



Veículos Eléctricos

O FUTURO DO NOSSO PLANETA
AECCB

37559 – Beatriz Lemos Barbosa 30076- Miguel Carlos da Silva Carvalho

Índice

Introdução.....	1
Objetivos	3
O que é um carro elétrico?	4
Veículos elétricos	4
Como funcionam os carros elétricos?.....	6
O Motor Elétrico.....	6
Motor CC (com escovas)	8
Motor CA assíncrono de indução	9
Motores CA síncronos de ímanes permanentes (PMAC)	10
Motor CA síncrono de relutância comutada (SRM)	15
Avaliação de motores para veículos elétricos.....	16
Motor na roda (in-wheel motor).....	17
Arrefecimento dos motores elétricos	20
Controladores.....	21
Controlo por PWM	22
Sistemas de armazenamento de energia.....	25
Baterias.....	25
Chumbo-ácido (Lead-Acid).....	28
Chumbo-cobalto (PbCo)	31
Níquel-cádmio (NiCd)	31
Níquel-hidreto metálico (NiMH)	32
Níquel-ferro (NiFe)	33
Níquel-zinco (NiZn).....	33
Níquel-hidrogénio (NiH)	33
Iões de Lítio (Li-ion)	34
Lítio-polímero (Li-Po).....	35
Lítio-Fosfato de Ferro (LiFePO4)	36
Titanato de bário em cerâmica	37
Sódio-enxofre (Na-S) e sódio-cloreto de níquel (NaNiCl2)	37
SCIB (Super Charge Ion Battery).....	37
Zinco-prata (Zn-Ag)	38
A bateria elétrica	38
O Carregamento.....	38
A Travagem Regenerativa	39

A Manutenção.....	40
A experiência de condução	40
Baterias.....	40
Webgrafia.....	44

Índice de Imagens

Figura 1- Previsão das necessidades de energia primária.....	1
Figura 2 - Distribuição das formas de energia consumida	2
Figura 3 - Distribuição atual e previsão de crescimento para o número de veículos	2
Figura 4 - Carro elétrico Baker de 1915.....	5
Figura 5 - Diagrama em árvore, dos motores mais aplicáveis a veículos elétricos.....	7
Figura 6 - Motores para veículos elétricos: a) Siemens [12], b) Hitachi [13]	8
Figura 7 - Motor CC em série comutado, em corte [16]	9
Figura 8 - Motor de indução com rotor em gaiola de esquilo, acoplado a uma caixa redutora [19]	10
Figura 9 - Motores de ímanes permanentes: a) ímanes à superfície do rotor, b) ímanes interiores [24].....	11
Figura 10 - Motores de ímanes permanentes: a) de fluxo radial [25], b) de fluxo axial [26], c) de fluxo transversal [27]	12
Figura 11 - Motor PMSM de fluxo radial do Honda IMA [28]	12
Figura 12 - Motores PMSM de fluxo axial de face dupla: a) EVO [29]; b) APEX [30]	13
Figura 13 - a) Motor Yasa, [32], b) motor KLD	14
Figura 14 - Mapa de rendimento do motor EVO Electric de 64kW [29]	14
Figura 15 - a) motor de tecnologia SRM da marca Nidec, b) respectivo mapa de rendimento [37]	15
Figura 16 – Regime de funcionamento típico de motores elétricos: a) motor de indução; b) motor de relutância comutada; c) motor síncrono de ímanes permanentes [21]	17
Figura 17 – Motores aplicados em cubos de rodas de bicicletas: a) motor de combustão interna [38], b) motor elétrico [39]	18
Figura 18- Exemplos de motores na roda: a) Honda, b) Protean, c) Michelin, d) Siemens	19
Figura 19 - Motor do Honda FCX Clarity [40]	20
Figura 20 – Transparência do motor elétrico WEG arrefecido a água [41]	21
Figura 21 - Esquema simplificado do controlo de um veículo elétrico [42].....	21
Figura 22- – Relação entre o tempo (t) de duração dos impulsos de tensão (U) gerados pelo sistema PWM ao longo do período (T) e a posição do pedal do acelerador	22
Figura 23 - - Esquema de funcionamento da ponte H para controladores de motores de CC [44]	23
Figura 24 - Sinusóide produzida por PWM.....	23
Figura 25 - - Diagrama de blocos do controlo do motor em malha fechada	24
Figura 26 - Exemplos de controladores, a) Evolveit [45], b) Zilla [46], c) Evnetics [47]	25
Figura 27 - - Evolução da energia específica de baterias [48]	26

Figura 28 - - Densidade de energia (mássica e volumétrica) de vários tipos de sistemas de armazenamento de energia (adaptado de [52] [53] [54])	27
Figura 29 - Longevidade de baterias de chumbo-ácido versus profundidade de descarga [56] 29	
Figura 30 - Constituição de uma bateria de chumbo-ácido [57].....	30
Figura 31 - Esquema de carga e descarga de baterias de chumbo-ácido [59].....	30
Figura 32 - Formas de baterias de NiCd [62] [63]	32
Figura 33 - a) Bateria Li-ion de computador portátil IBM Thinkpad, b) interior da mesma bateria onde se vê o BMS (folha de circuitos por cima das células) [68].....	34
Figura 34 - Esquema de uma bateria LiPo [70]	35
Figura 35 - Características da descarga de uma bateria LiFePO4 de 100Ah da marca Hipower, onde C é a capacidade nominal (ou taxa de descarga) [74]	36
Figura 36 - Carro elétrico em carregamento.....	39
Figura 37 – Evolução da energia específica de baterias [48]	41

Índice de Tabelas

Tabela 1- Avaliação de tecnologias de motores elétricos (adaptado de [21]).....	16
Tabela 2 - Aplicações mais usuais das baterias recarregáveis	28

Introdução

No contexto mundial que se vive, o progresso e o bem-estar da sociedade, está ligado ao consumo de energia. O consumo de energia primária tem crescido principalmente em países em desenvolvimento, como a China que tem registado na última década aumentos bastante significativos no consumo de petróleo e prevê-se que continuará a aumentar nos próximos anos (Figura 1).

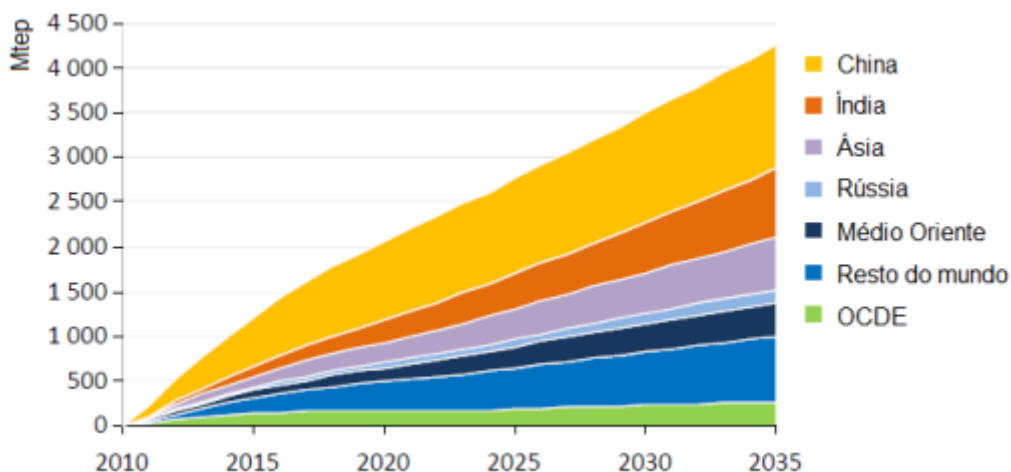


Figura 1- Previsão das necessidades de energia primária

A principal fonte de energia consumida em 2011, tem sido o petróleo, seguido pelo carvão e gás natural. Segundo [2] em 2011 o petróleo representou 33% do consumo, o carvão 30% e o gás natural 24%.

O petróleo tem sido alvo de várias especulações pelos países que o detêm, a instabilidade política e militar não ajuda, causando inflação e flutuação dos preços, afetando todos os países consumidores.

Alguns dos desastres naturais que têm ocorrido nos últimos anos poderão estar associados à emissão de dióxido de carbono através da queima de combustíveis fósseis. Nos próximos anos, em resposta ao aumento previsto de procura mundial, prevê-se um aumento da parcela do gás natural e das energias renováveis, que será mais significativo do que as restantes formas de energia (Figura 2).

As energias renováveis poderão fornecer 30% da geração adicional até 2035. Este tipo de energias tem benefícios ambientais e/ou custos de produção mínimos, no entanto requerem um grande investimento inicial [1].

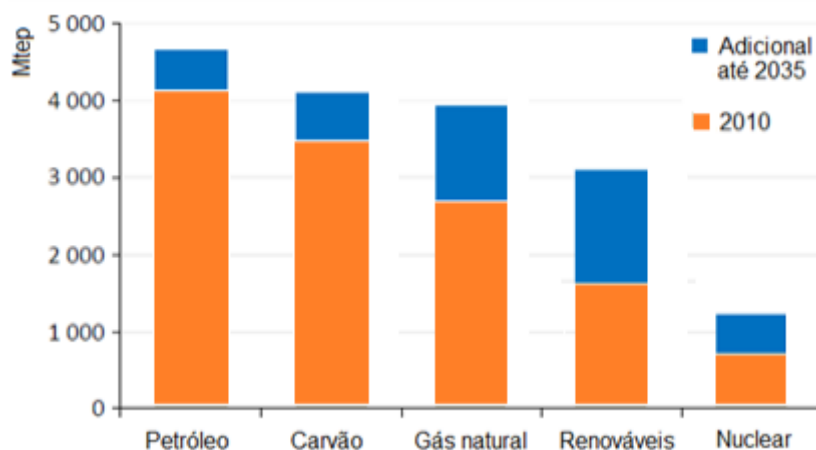


Figura 2 - Distribuição das formas de energia consumida

Por conseguinte, faz sentido que se procure novas formas de utilização ou conversão de energia, cada vez mais eficientes, por forma a atenuar o problema. Os países mais desenvolvidos têm vindo a diversificar o tipo de energia que consomem, procurando energias alternativas (hídrica, eólica, solar, geotérmica, biomassa, das ondas e das marés) de forma a reduzirem a dependência do petróleo e a diminuírem os gases com efeito de estufa.

Em (1) pode ter-se acesso a mapas do mundo onde existe potencial de implantação de cada uma destas energias alternativas. Alguns países como a China, Índia, Rússia, Japão, Coreia do Sul e EUA têm aumentado a sua capacidade nuclear, respondendo assim ao aumento de procura energética [3].

O sector dos transportes tem um grande peso no consumo de combustíveis fósseis. A OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) prevê um aumento dos veículos de passageiros nas próximas décadas, que ocorrerá principalmente na China, Índia e Médio Oriente como ilustra a Figura 3.

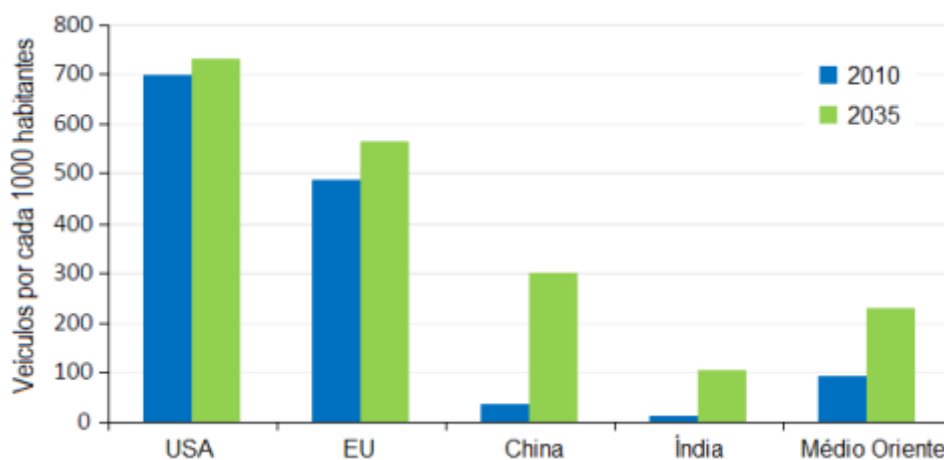


Figura 3 - Distribuição atual e previsão de crescimento para o número de veículos

Os veículos elétricos podem atenuar a dependência energética dos países que não possuem petróleo, além disso podem vir a ter um papel importante na diminuição da concentração de gases com efeito de estufa e na despoluição nas grandes cidades.

A eletricidade para os veículos elétricos poderá ser produzida através de energias renováveis, ou através das novas tecnologias de queima de carvão (Clean Coal Technologies) em modernas centrais com elevado rendimento de queima e com controlo de poluição apertado [4] de forma a reduzir as emissões poluentes.

A utilização em massa dos veículos elétricos tem vindo a acentuar-se nos domínios do debate público [5]. No entanto a implementação prática só acontecerá se os veículos forem realmente vantajosos em termos de custo e consumo.

O argumento de que são ecológicos, muitas vezes chamados de veículos “verdes”, por si só, não convence a maior parte das pessoas a comprarem.

Além disso, esse argumento é discutível, pois uma parte da produção da energia eléctrica faz-se à custa da queima de combustíveis fósseis, o que deixa também uma marca negativa chamada de “pegada ecológica”.

Os resíduos perigosos da produção de componentes (por exemplo as baterias) também devem ser considerados quando se fala em ecologia. Os carros eléctricos atuais são em geral caros e têm pouca autonomia em relação aos de combustão interna (exceptuando os muito caros). Para singrarem no mercado, as suas baterias têm de aumentar a densidade energética e baixar o custo de fabrico. As perdas de conversão de energia deverão ser minimizadas.

A dispensa de acessórios supérfluos poderá vir a ser uma característica do veículo eléctrico, tornando a carroçaria mais leve.

Objetivos

Este trabalho tem como objetivo de suporte, uma análise ao estado da arte sobre os veículos eléctricos, onde deverá constar o funcionamento dos principais órgãos, como por exemplo: o motor, a bateria, o controlador e os sistemas de transmissão.

A abordagem ao estado da arte deverá permitir a obtenção de conhecimentos fundamentais acerca da mobilidade eléctrica, que possibilitem ultrapassar os obstáculos que porventura possam surgir no decorrer do presente trabalho. Deverá também induzir a perceção da evolução de cada sistema ao longo do tempo.

Os principais objetivos assentam na realização de dois trabalhos, um teórico e um prático. No trabalho teórico será feita uma análise às características energéticas do carro eléctrico, onde conste o rendimento dos principais órgãos, a estimativa do consumo e a autonomia.

Será também abordado o processo de dimensionamento do motor e da bateria. A parte prática, feita em colaboração com a empresa SMS, tem como objetivos a conversão de um “Buggy” de motorização a gasolina para motorização eléctrica,

incluindo os respectivos cálculos para aferir a potência do motor e bateria, bem como o desenho dos acessórios necessários à conversão.

Consta ainda do trabalho prático a otimização dos parâmetros do controlador do motor do Little4 (carro que é fabricado na referida empresa) tendo em vista que o motor aquece demasiado no verão.

O que é um carro elétrico?

Antes de explicar como funcionam os carros elétricos, é importante perceber em que consiste esta tecnologia. A principal característica diferenciadora é a fonte de energia que faz o automóvel funcionar. Ao contrário dos veículos convencionais que utilizam combustíveis fósseis como fonte de energia, os veículos elétricos utilizam eletricidade. Por esse motivo, estes veículos podem ser carregados através da conexão do automóvel à rede elétrica (desde que assegurada a necessária compatibilidade).

Ao utilizar energia elétrica em vez de combustíveis fósseis, estes veículos protegem o ambiente e não emitem quaisquer gases poluentes. A mecânica e funcionamento de um veículo elétrico é bastante diferente da de um veículo convencional. Na página da Blue Academy encontra, também, todas as informações necessárias sobre este tipo de tecnologia.

Veículos elétricos

Existem veículos elétricos desde há muito, embora estivessem quase esquecidos durante décadas. Os primeiros protótipos de veículos elétricos tiveram desenvolvimento no início do séc. XIX [6], alguns eram do tipo carruagem e rodavam sobre carris e outros dispunham de 3 ou 4 rodas para circular em caminhos de terra batida. Nos seus anos dourados (1900), estes carros eram detentores de recordes de velocidade. Martins et al. [6] refere que a quebra da barreira de velocidade em 1899.

A mesma fonte refere que apesar de, nessa época já existirem veículos a gasolina e a vapor, a maior fiabilidade, a ausência de fumos, vibrações, ruído e o arranque a frio eram os principais motivos para que os elétricos fossem os mais procurados.



Figura 4 - Carro elétrico Baker de 1915

Entretanto a abertura de novos poços de petróleo, baixou o preço da gasolina. O sistema de produção em massa de Henry Ford veio baixar o custo de produção dos carros a gasolina. A invenção do motor de arranque elétrico (1912) eliminou outra das grandes desvantagens do carro a combustão, o difícil arranque. Tudo isto, aliado a uma maior autonomia dos carros a gasolina, veio afrouxar o interesse pelos carros elétricos.

Mais tarde, com as crises do petróleo em meados dos anos 70, a necessidade de alternativas ao uso dos combustíveis convencionais, veio despertar novamente o interesse no desenvolvimento dos carros elétricos.

O EV1 da General Motors foi o paradigma da nova geração de carros elétricos pós-crise petrolífera e comercializado (através de leasing) entre 1996 e 1999. O carro era aprimorado, tinha um bom desempenho e uma autonomia bastante aceitável, inicialmente entre 90 a 120 km e mais tarde (com baterias de NiMH) entre 120 a 240km. A velocidade máxima estava limitada electronicamente a 130 km/h.

Em 2004, a General Motors recolheu todos os EV1 do mercado, e estes veículos foram simplesmente destruídos. Interesses petrolíferos e limitações tecnológicas poderão ter sido a causa do sucedido. Existe um documentário sobre o assunto, realizado em 2006 com o título “Who Killed the Electric Car?”.

Nos dias que correm assiste-se a uma grande mudança na estratégia dos grandes construtores de automóveis. Marcas como a Honda, Toyota, Nissan, General Motors, Peugeot, entre outras, têm modelos híbridos nos seus catálogos. No geral todas as grandes marcas anunciam também modelos totalmente elétricos, algumas delas já os comercializam em Portugal (Smart, Nissan, Peugeot, Mitsubishi, Citroën e Renault).

A produção em pequenas séries de veículos elétricos e a sua configuração relativamente simples, favoreceu a proliferação de construtores de pequena dimensão, alguns dedicados exclusivamente ao fabrico de carros elétricos. São disso exemplo os modelos como o Reva, Futi, Little4, Tazzari, Melex, Alka Dilixi, Zenn, entre outros.

Foi recentemente apresentado na feira Paris Airshow 2011 um avião elétrico para o transporte de passageiros, denominado Voltair. É um projeto da empresa

européia de aviação EADS e poderá começar a voar daqui a 25 anos. A mesma fonte revela que este avião será equipado com dois motores elétricos supercondutores (poderão ter uma perda por efeito de joule praticamente nula) e as suas duas baterias (de íons de lítio) serão removíveis, para troca no aeroporto, por baterias já carregadas.

Num futuro próximo, esperam-se grandes mudanças. Os fabricantes de componentes para automóveis a combustão terão de adequar as suas fábricas de forma a poderem produzir componentes para veículos elétricos; os postos de abastecimento de combustível poderão ter de se adaptar para postos mistos, onde figure abastecimento elétrico.

A segurança com os carros elétricos terá de ser repensada à medida que estes carros evoluírem, principalmente com as baterias, que podem ser perigosas em situações de carga defeituosa, ou na ocorrência de acidentes (derrame ou incêndio).

Quanto à proteção dos peões, dado que os carros elétricos são silenciosos, poderá vir a ser obrigatória a instalação de dispositivos sonoros de aviso.

Como funcionam os carros elétricos?

Os veículos elétricos têm componentes e características específicas que são fundamentais para o seu funcionamento. Alguns dos componentes que são característicos dos carros elétricos e que não podem ser encontrados nos veículos convencionais são o motor elétrico e a bateria elétrica.

Estes dois componentes são centrais nesta tecnologia. Para além destes componentes, o carregamento, a travagem regenerativa e a manutenção são ainda fatores de destaque nesta tecnologia. Vamos agora analisar tudo, ponto a ponto.

O Motor Elétrico

O motor elétrico, impulsionado pela energia transmitida pela bateria, atinge o binário máximo (ou a potência máxima) logo desde o primeiro momento, permitindo uma aceleração poderosa. A potência destes automóveis pode ser medida pelos kW, sendo que estes podem facilmente ser traduzidos em cavalos.

O Hyundai Kauai Electric, por exemplo, tem 150 kW ou 204 cavalos. Estes veículos têm, geralmente, a velocidade máxima definida eletronicamente. Mas não se preocupe. O limite é bastante elevado, não vai ver o desempenho do automóvel comprometido. No caso do Kauai, a velocidade máxima são 167 km/h.

O motor elétrico converte energia eléctrica em energia mecânica usada para a tração do automóvel. Segundo [8] os cinco tipos de motores mais usados em veículos elétricos são: motor de corrente contínua (CC), motor de indução, motor síncrono de ímanes permanentes PMS (ou BLAC), motor de relutância comutado SRM e motor CC sem escovas BLDC.

Os fabricantes de motores elétricos têm vindo a desenvolver vários tipos de motores com vista à aplicação em veículos elétricos. Os chineses têm desenvolvido mais

os motores de ímanes permanentes, por possuírem materiais para o fabrico de ímanes, chamados de “terras raras” (lantânio samário e neodímio).

Contrariamente, a agência americana de energia ARPA-E [9] refere avultados investimentos no programa, “Rare Earth Alternatives in Critical Technologies”, apesar da diplomacia chinesa ter garantido publicamente que não colocaria problemas à exportação desses produtos para a América.

A Figura 5 mostra um diagrama de blocos com motores elétricos. A cor em destaque representa os motores mais adequados para veículos elétricos. O motor CC com escovas foi caindo em desuso por necessitar de manutenção (mudança de escovas e limpeza do coletor), e pelo aparecimento do controlo para motores de corrente alternada (síncronos e de indução) [10].

O motor de relutância comutada não era apropriado para veículos elétricos, por ter baixa densidade de potência, o que requeria motores grandes e pesados, no entanto novos desenvolvimentos tornaram este motor bastante promissor para uso em veículos elétricos [11].

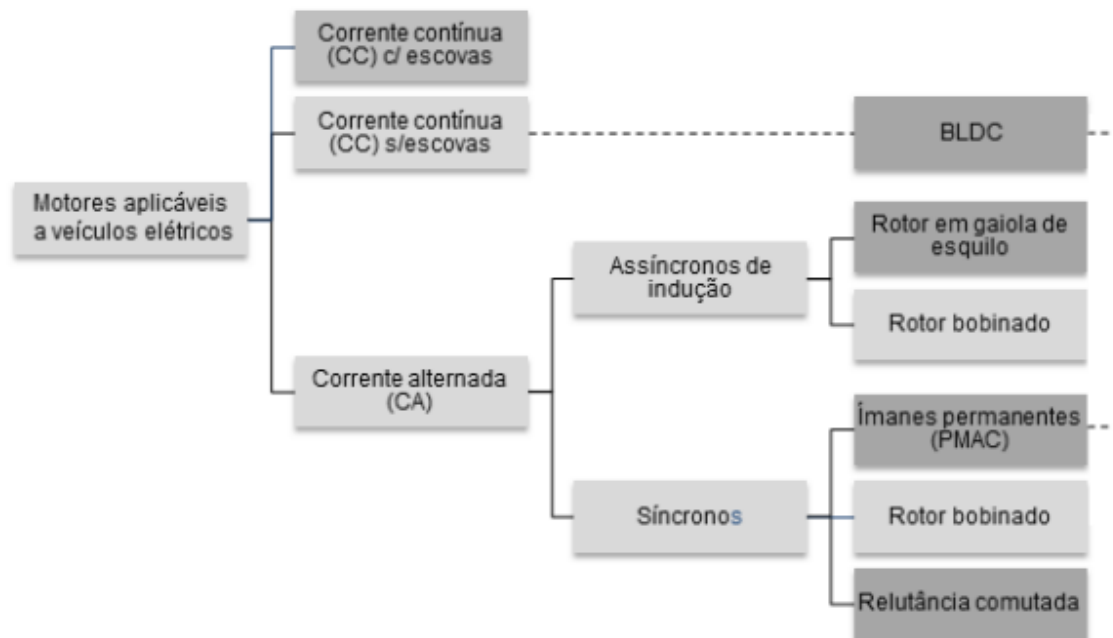


Figura 5 - Diagrama em árvore, dos motores mais aplicáveis a veículos elétricos

Os pormenores do funcionamento de cada um destes tipos de motor elétrico não serão aqui abordados, por estarem já bastante difundidos, mas deixa-se um endereço (2) (existem muitos), com animações que auxiliam na compreensão do seu funcionamento.

Mais informação poderá ser encontrada através dos fabricantes. Apresenta-se algumas marcas de motores para veículos elétricos, como a LMC (Lynch motor company), ABB, ABM, Iskra-AE, Siemens, Hitachi, GM, Apex, Agni, Kostovmotors. A título de exemplo, a Figura 6 mostra dois motores usados em veículos elétricos.

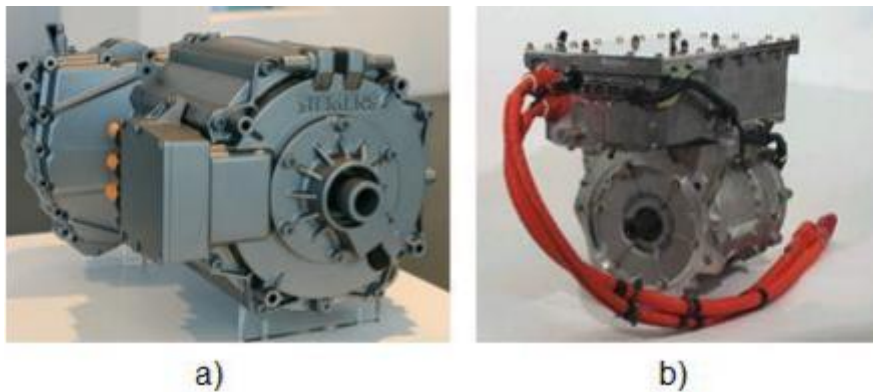


Figura 6 - Motores para veículos elétricos: a) Siemens [12], b) Hitachi [13]

O primeiro motor (Figura 6a) foi desenvolvido pela Siemens em parceria com a Volvo e é um motor arrefecido a água. O segundo motor da mesma figura foi feito pela Hitachi tendo o inversor acoplado por cima deste.

Motor CC (com escovas)

O motor CC pode ter os enrolamentos do indutor e do induzido ligados em série ou em paralelo.

No geral, de grosso modo, os motores CC em série podem ser considerados por operarem a “potência constante” e os motores CC em paralelo (shunt) podem ser considerados por operarem a “velocidade constante” [14]. O motor CC em série tem características de binário e velocidade ideais para tração e pode ser usado em veículos elétricos [14], apesar de estar em desuso, como foi referido.

O motor geralmente é monofásico CC, mas pode ser projetado para funcionar com CA (por isso, também se apelida de motor universal). Com CA não alcança a mesma performance que com CC, tem mais perdas reduz a força eletromotriz e a velocidade [10].

Segundo a Siemens [15], este tipo de motor tem como vantagens, elevado binário disponível em baixas velocidades de rotação, ampla variação de velocidade e um controlo relativamente fácil. O controlo pode ser feito por resistências [10]. No entanto, têm menor rendimento e são mais caros que os motores de indução, para além disso necessitam de manutenção (mudança de escovas e limpeza de coletores) [15]. Na Figura 7 pode ver-se este tipo de motor.

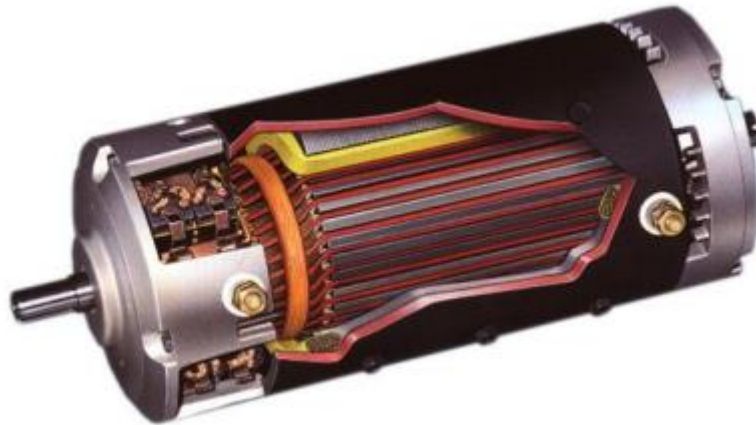


Figura 7 - Motor CC em série comutado, em corte [16]

A partir dos anos 90, o sucesso dos inversores permitiu o controlo de velocidade nos motores de indução, diminuindo o uso dos motores CC com escovas [17].

Motor CA assíncrono de indução

O motor CA assíncrono de indução funciona com um campo magnético rotativo, criado através de uma tensão alternada (trifásica ou monofásica) aplicada nos enrolamentos do estator. O campo magnético do rotor tende a alinhar-se com o campo do estator, sendo induzida uma força eletromotriz que produz o movimento de rotação do rotor.

A velocidade de rotação do rotor, tem um ligeiro atraso em relação ao campo magnético girante, devido à carga aplicada ao motor, daí a designação de motor assíncrono.

Esse atraso, também designado de deslizamento, será tanto maior quanto maior for a carga. Um maior deslizamento também se traduzirá num maior aumento das perdas (no rotor por efeito de joule), o que significará um menor rendimento do motor.

O motor de indução pode ter o rotor em forma de gaiola de esquilo ou bobinado. O motor com rotor bobinado não é muito usado em veículos elétricos por possuir coletores com escovas e assim ser mais caro e obrigar a manutenção.

O rotor em gaiola de esquilo (Figura 8) é constituído por um núcleo ferroso no qual estão inseridas (com isolamento) barras de alumínio dispostas paralelamente umas em relação às outras e são ligadas nas extremidades por dois anéis. Estas barras condutoras estão dispostas com uma certa inclinação (que se assemelha a uma torção do rotor) para evitar vibrações devido à ação eletromagnética entre o rotor e o estator. O estator é bobinado à semelhança de outros motores.

A vantagem do rotor em gaiola de esquilo em relação ao rotor bobinado, é ter uma construção mais simples, mais barata, quase sem manutenção, resultando num motor bastante robusto. Porém o binário de arranque não é muito elevado.



Figura 8 - Motor de indução com rotor em gaiola de esquilo, acoplado a uma caixa redutora [19]

O custo destes motores é significativamente inferior ao dos motores síncronos de ímanes permanentes e não requer o uso de “terras raras” cujo monopólio é detido por poucos países. Este facto, aliado à sua simplicidade de construção e fiabilidade, levou a um renovado interesse de algumas marcas automóveis por esta tecnologia [20].

Zeraoulia [21] refere que surgiu recentemente uma nova tecnologia de motores de indução para tração. São motores em forma de disco e poderão possuir o mesmo binário de um motor de ímanes permanentes.

Possuem potência constante ao longo de uma vasta gama de rotação, e podem operar a temperaturas mais elevadas e a uma maior velocidade do que os motores de indução convencionais.

Os custos de produção destes novos motores mantêm-se reduzidos tal como o dos motores de indução já existentes.

Motores CA síncronos de ímanes permanentes (PMAC)

Os motores PMAC são motores síncronos de ímanes permanentes e corrente alternada, podem ser BLDC (Brushless DC) ou PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor) [22].

Possuem geralmente elevado binário (disponível desde o arranque e que pode ser constante para uma grande gama de velocidades), têm melhores rendimentos, e são mais pequenos (para a mesma relação de potências) do que os motores de indução. A sua principal desvantagem é o preço, devido ao custo dos ímanes (normalmente feitos a partir de terras raras como o neodímio, material de eleição).

O motor BLDC (Brushless DC) é também conhecido por ECM (Electronically Commutated Motor), não possui escovas sendo a comutação feita electronicamente.

Assim este tipo de motor não tem os problemas associados à comutação por escovas, no entanto o controlo acrescenta um custo considerável na sua aplicação [14].

A comutação da corrente, entre os enrolamentos do estator, deve ser sincronizada com a posição do rotor, para tal são usados sensores, sendo comum usar sensores de efeito Hall e sensores ópticos [23].

Os BLDC requerem uma alimentação com onda retangular, em geral têm os ímanes montados à superfície do rotor (Figura 9a) e tem um controlo mais simples do que os motores PMSM. Este tipo de motor é usado em aplicações de baixa potência alguns poucos kW [24].

O motor BLDC é na verdade um motor CA, chama-se Brushless DC porque foi desenvolvido a partir do motor DC com escovas e porque as características de velocidade e binário são muito semelhantes aos motores CC com escovas [23].

Os motores PMSM requerem uma alimentação com onda sinusoidal, podem ter os ímanes montados à superfície do rotor (Figura 9a) ou em posição interior (Figura 9b), tem um controlo mais complexo do que os BLDC, e necessitam de um sensor de corrente por cada fase (caso sejam trifásicos).

São motores propícios a aplicações que necessitem de elevado desempenho [24].

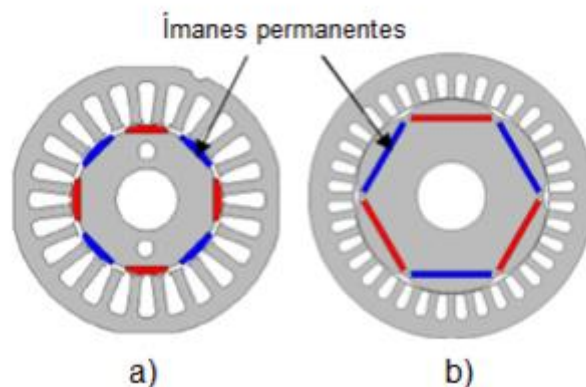


Figura 9 - Motores de ímanes permanentes: a) ímanes à superfície do rotor, b) ímanes interiores [24].

Os motores de ímanes internos possuem mais vantagens do que os de ímanes superficiais, a configuração interna dos ímanes produz, além do binário eletromagnético, um binário de relutância o que se manifesta num binário resultante maior. Outra vantagem em relação ao motor de ímanes superficiais é que os ímanes internos ficam protegidos contra a força centrífuga, podendo rodar a velocidades mais elevadas [24].

Os motores de ímanes permanentes também podem ser classificados quanto ao fluxo magnético, na Figura 10 são mostradas algumas dessas configurações.

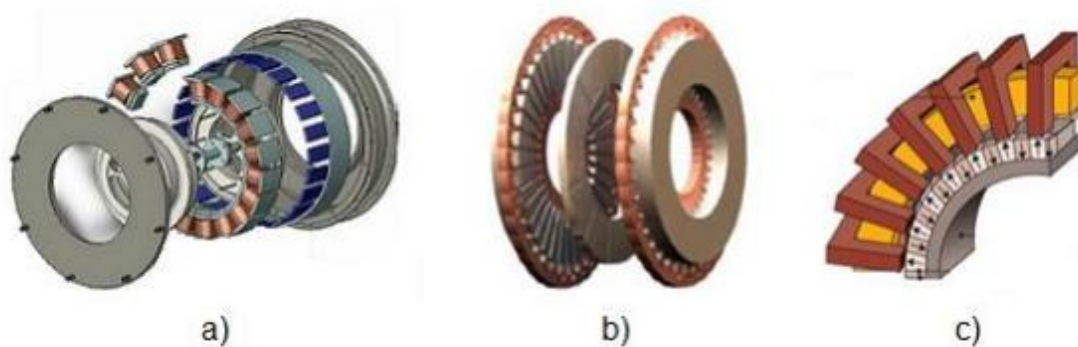


Figura 10 - Motores de ímanes permanentes: a) de fluxo radial [25], b) de fluxo axial [26], c) de fluxo transverso [27]

A configuração de fluxo radial requer alguns cuidados de projeto. Se os ímanes forem colocados no estator, os enrolamentos de cobre terão de ficar no rotor onde é mais difícil o escoamento de calor.

Se os enrolamentos forem colocados no estator (onde é mais fácil arrefecer) os ímanes terão de ficar no rotor, o que no caso de ímanes à superfície, limita a velocidade (a força centrífuga pode descolar os ímanes). A Figura 11 mostra um motor de fluxo radial.



Figura 11 - Motor PMSM de fluxo radial do Honda IMA [28]

Os motores de fluxo axial, podem assumir três configurações: face simples, dupla face ou multidiscos (é como ter vários motores numa só carcaça) cada face é composta por um par de discos magnéticos (ímã e bobine). Na Figura 12, pode ver-se um motor de face dupla.



Figura 12 - Motores PMSM de fluxo axial de face dupla: a) EVO [29]; b) APEX [30]

Este tipo de motores tem várias vantagens em relação aos de fluxo radial: possuem elevada densidade de potência; elevados binários (devido a grandes diâmetros, a mesma força com braço maior); podem funcionar como volante de inércia (flywheel); são facilmente integrados dentro da roda do automóvel (dimensões axiais bastante reduzidas); a sua configuração permite a extração de calor do eixo para a periferia.

Esta é uma vantagem importante dado que as altas temperaturas degradam o isolamento da bobinagem e os ímãs permanentes perdem o magnetismo. Só um bom escoamento de calor permite elevadas densidades de potência.

O desenvolvimento da tecnologia de fluxo transversal é recente, embora este tipo de motor tenha sido inventado em 1896 por WM Morday [31]. O motor possui uma construção complexa, à exceção do enrolamento de cobre (em anel central) que é mais simples de produzir do que noutros tipos de motores.

Este motor pode ter um tamanho inferior aos de fluxo axial, para a mesma potência, no entanto tem um custo de produção elevado e ainda se encontra em fase de desenvolvimento.

A Yasa Motors possui um motor de ímãs permanentes de fluxo axial (Figura 13a), com arrefecimento a água. Possui uma potência nominal de 50kW (100kW de pico), um binário de 400Nm (750Nm de pico) e um rendimento até 95%. O desenho permite a montagem de vários motores em empilhamento ao longo do eixo, obtendo um grupo de potência múltipla deste.



Figura 13 - a) Motor Yasa, [32], b) motor KLD

A marca asiática KLD desenvolveu um novo motor elétrico de ímãs permanentes (Figura 13b).

O motor possui 5kW, um binário de pico de 140Nm e é arrefecido a ar. Foi projetado para a aplicação em e-scooters pela Eclimo (fabricante de veículos), cujo projeto está englobado num programa para revolucionar o mercado de veículos da Malásia e visa reduzir drasticamente a poluição do ar urbano [33].

Uma outra marca a EVO Electric, possui motores deste tipo. A figura mostra o mapa de rendimento de um motor PMSM de 64kW, de fluxo axial e arrefecido a água.

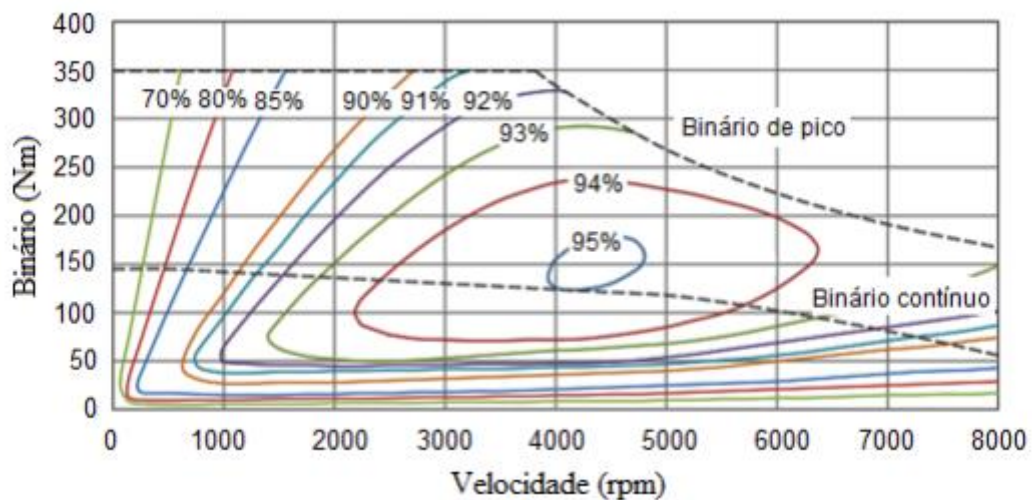


Figura 14 - Mapa de rendimento do motor EVO Electric de 64kW [29]

Motor CA síncrono de relutância comutada (SRM)

O motor de relutância comutada possui uma construção simples, robusta e de baixo custo [23], pode operar a velocidades elevadas, tem excelente controlabilidade e um bom rendimento [11]. Além disso funciona facilmente como gerador [34].

Como inconveniente, este motor possuía uma baixa densidade de potência (comparativamente com a generalidade dos motores elétricos) requerendo motores grandes e pesados, assim tornava-se inapropriado para veículos elétricos [11].

O desenvolvimento deste motor, nomeadamente por Akira Chiba (professor da Universidade de Tóquio), possibilitou um aumento na densidade de potência tornando o motor mais pequeno, e conseqüentemente bastante promissor para uso em veículos elétricos [11]. A construção do estator assemelha-se à de um motor de indução [23] e o rotor é constituído por ferro laminado (com pólos salientes).

Este tipo de rotor permite o funcionamento a temperaturas elevadas. É uma vantagem em relação aos motores de ímanes permanentes, pois nesses, as altas temperaturas desmagnetizariam os ímanes.

O princípio de funcionamento do SRM é bastante simples, o binário é gerado pela tendência do rotor para alcançar uma posição do estator, onde a indutância e o fluxo produzido pelo bobinado do estator, são máximos [35]. O binário contínuo é produzido por uma sincronização de excitação de cada fase com a posição do rotor [36].

Recentemente (janeiro de 2012) a empresa Nidec apresentou numa feira em Tokyo um novo motor SRM de 19kW (44kW de pico) com um binário de 50Nm (86Nm de pico) e uma rotação máxima de 12000 rpm.

O motor tem um diâmetro de 177mm e pesa cerca de 26.5kg. A Figura 15 mostra as fotos desse motor e do mapa de rendimento, expostos na referida feira.

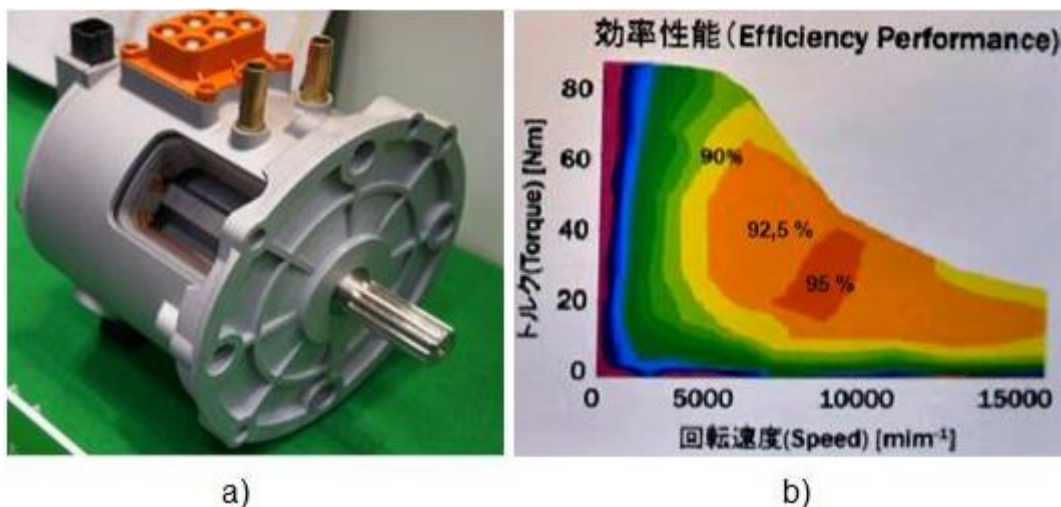


Figura 15 - a) motor de tecnologia SRM da marca Nidec, b) respectivo mapa de rendimento [37]

Avaliação de motores para veículos elétricos

Zeraoulia [21] apresenta uma matriz de avaliação (Tabela 1) para quatro tecnologias de motores candidatos a veículos elétricos. São atribuídos valores de zero a cinco, sendo zero muito mau e cinco muito bom.

Tabela 1- Avaliação de tecnologias de motores elétricos (adaptado de [21])

Tipo de motor	CC (c/ escovas)	Indução	Ímanes permanentes	Relutância comutada
Densidade de potência	2,5	3,5	5	3,5
Rendimento	2,5	3,5	5	4
Controlabilidade	5	4	4	4
Fiabilidade	3	5	4	5
Maturidade tecnológica	5	5	4	4
Custo	4	5	3	4
Total	22	26	25	24,5

Na escolha de um motor para um veículo elétrico, além desta avaliação, o projeto deve ter em conta a zona típica de funcionamento do motor (Figura 16) de forma a poder aferir qual a melhor relação de transmissão ou mesmo se é recomendável a adoção de um sistema mecânico de variação de velocidade do tipo CVT.

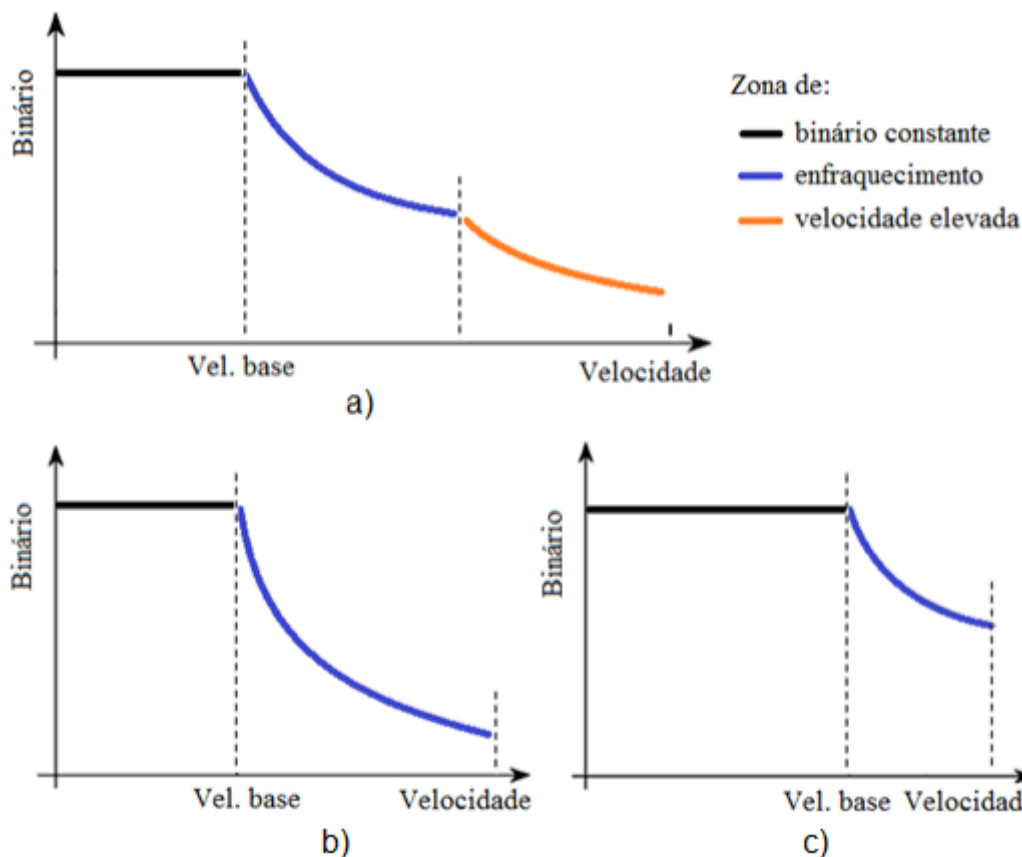


Figura 16 – Regime de funcionamento típico de motores elétricos: a) motor de indução; b) motor de relutância comutada; c) motor síncrono de ímanes permanentes [21]

Nestes gráficos, a limitação do binário (zona de binário constante a traço preto) está associada ao limite de corrente a partir do qual, o calor produzido no arame de cobre do enrolamento, enfraquece o isolamento levando a uma menor longevidade do motor. A curva da zona de enfraquecimento (a traço azul) tem por limite a capacidade de dissipação de calor através dos materiais de construção do motor, e no caso de ímanes permanentes tem a ver com o limite a partir do qual poderia ocorrer o risco de desmagnetização dos ímanes (nos motores que os possuem).

Motor na roda (in-wheel motor)

O conceito não é propriamente uma novidade, mas ganhou impulso com o interesse renovado pelos veículos elétricos. O motor é acoplado diretamente à roda, não precisa de outras ligações mecânicas como rodas dentadas ou cardans.

Permite um maior controlo de tração do veículo, pois o binário em cada roda pode ser independente, o que é vantajoso para os sistemas de estabilidade do automóvel. Possibilita maior liberdade de desenho, ao eliminar os sistemas de transmissão, tornando o automóvel mais leve, mais compacto e mais espaçoso.

Finalmente, um único modelo de motor pode ser utilizado numa multiplicidade de modelos e para duas gamas de potência (consoante for aplicado a duas ou quatro rodas) proporcionando uma notável economia de escala.

Na Figura 17 pode ver-se dois exemplos deste conceito: um motor a combustão interna e um motor elétrico aplicados em rodas de bicicleta.



Figura 17 – Motores aplicados em cubos de rodas de bicicletas: a) motor de combustão interna [38], b) motor elétrico [39]

O conceito in-wheel motor incorpora um motor de acionamento direto, o sistema de travagem, a suspensão e em alguns casos também a direção, tudo isto no espaço de atravancamento da roda.

O motor de acionamento direto é um motor onde as suas partes constituintes são integradas na estrutura, podendo fazer parte desta. Não possui engrenagens e pode nem precisar de rolamentos.

A Michelin desenvolveu o sistema (Active Wheel) que é composto por um disco, uma pinça de travão, um motor elétrico, uma suspensão ativa e uma mola de suspensão. Outras marcas estão também a desenvolver este conceito, por exemplo: Protean, Evans Electric, Honda e Siemens.

Na Figura 18 são mostradas imagens de algumas dessas rodas.



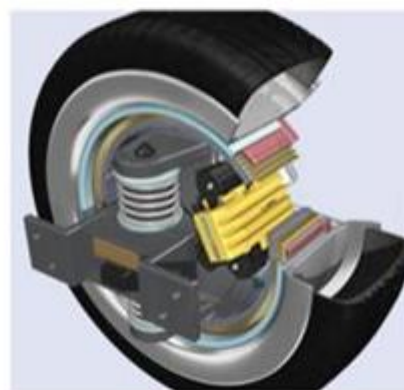
a)



b)



c)



d)

Figura 18- Exemplos de motores na roda: a) Honda, b) Protean, c) Michelin, d) Siemens

Este conceito tem como principais vantagens a simplificação do sistema, dimensões mais compactas, redução de ruído, menores folgas e menor manutenção. A desvantagem é que não tendo engrenagens (relação de transmissão de 1:1) o motor terá de possuir elevado binário de arranque.

Este problema pode ser resolvido colocando motores em todas as rodas do veículo, assim o binário de arranque solicitado a cada motor será uma fração do binário de arranque do veículo. No entanto, devido à inexistência de um diferencial mecânico, o controlo eletrónico deverá fazer a gestão correta da velocidade em cada roda.

Por curiosidade, a Honda no seu modelo movido a células de combustível (FCX Clarity) aplicou um conceito que, embora não seja de acionamento direto está próximo deste (Figura 19). Note-se que um dos veios que sai do diferencial passa através do veio do motor.



Figura 19 - Motor do Honda FCX Clarity [40]

Arrefecimento dos motores elétricos

Os motores elétricos geram calor devido às perdas elétricas e mecânicas referidas anteriormente, e que aumenta com a carga e velocidade de rotação. A norma IEC 60034 classifica os tipos de motores quanto ao tipo de arrefecimento.

Existem muitos tipos de motores com arrefecimento mais ou menos elaborado, no entanto distinguem-se três grandes grupos: máquinas abertas, máquinas fechadas arrefecidas a ar ou a líquido.

Nas máquinas abertas, o ar circula pelo interior, agitado pelo rotor da máquina, e o calor é retirado, por convecção, através das aberturas para o exterior.

As carcaças das máquinas fechadas são fabricadas com materiais bons condutores, de forma a conduzir o calor a ser retirado. No caso de arrefecimento por ar, a superfície é alhetada e é arrefecida através de um ventilador.

O ventilador pode ser acoplado ao eixo da máquina ou pode ser independente. Neste caso pode ainda possuir variação de velocidade em função da temperatura do motor.

Os motores arrefecidos a líquido (água ou óleo) possuem canais entre a bobinagem do estator e a carcaça, onde circula um fluido que escoar o calor para o exterior da máquina, como é mostrado na Figura 20.



Figura 20 – Transparência do motor elétrico WEG arrefecido a água [41]

Controladores

O controlador do motor é o aparelho responsável por controlar parâmetros como a velocidade, a aceleração e em alguns casos pela travagem regenerativa dos veículos elétricos. Opera nos circuitos de potência e controlo, como se simplifica através do esquema da Figura 21.

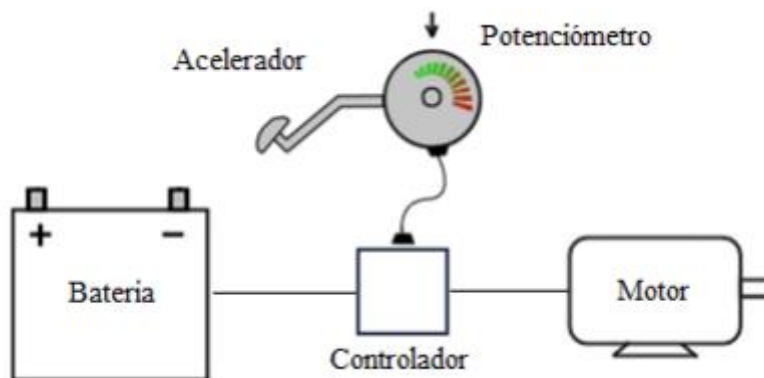


Figura 21 - Esquema simplificado do controlo de um veículo elétrico [42]

Nos automóveis elétricos mais antigos, com motor CC, os controladores eram bastante simples, usavam potenciômetros, cuja resistência aumentava ou diminuía com a posição do pedal do acelerador. As resistências dos potenciômetros regulavam o fluxo de corrente entre as baterias e o motor, permitindo assim controlar a velocidade do carro. Estes controladores tinham pouco rendimento por causa do efeito de joule nas resistências.

Controlo por PWM

Atualmente, muitos controladores funcionam por PWM (Pulse-Width Modulation) e aglomeram várias funções, podendo transformar tensão contínua em alternada (daí chamados de inversores, por inverterem o sinal da tensão) e regular o fluxo de corrente entre o motor e a bateria. Têm ainda as funções de inversão da rotação do motor (marcha-atrás) e a conversão do motor num gerador (travagem regenerativa).

A alimentação por PWM, comparada com a alimentação tradicional, acarreta alguns aspectos desfavoráveis ao motor: diminuição do rendimento, aumento da sua temperatura e aumento de ruído, pode levar a uma ligeira diminuição da vida útil [43].

Os controladores possuem microprocessadores que operam com pulsos de muito baixa potência, que é depois ampliada por MOSFET's (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) ou por IGBT's (Insulated Gate Bipolar Transistor). O funcionamento destes componentes afasta-se dos objectivos deste trabalho pelo que não será abordado.

Estes impulsos permitem ajustar a tensão que chega ao motor. Os impulsos (com durações na ordem dos milissegundos) são gerados por interruptores eletrónicos que ligam e desligam a uma determinada frequência. Quando se pretender uma elevada tensão, os impulsos serão longos, quando se pretender uma tensão baixa então os impulsos serão muito curtos, como se ilustra no esquema da Figura 22.

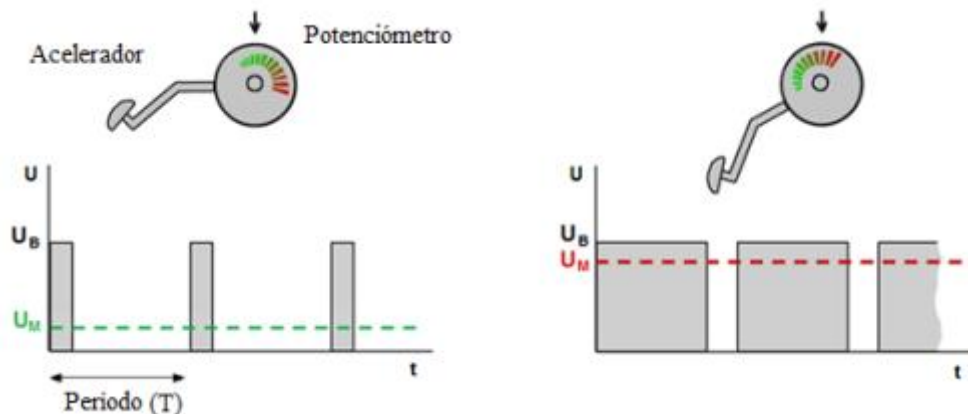


Figura 22- – Relação entre o tempo (t) de duração dos impulsos de tensão (U) gerados pelo sistema PWM ao longo do período (T) e a posição do pedal do acelerador

O controlador CC pode ser em ponte H, com quatro quadrantes, que através da lei das malhas e dos nós, permite alterar a polaridade e o sentido da corrente. Assim o motor pode rodar para a frente, para trás, e funcionar como gerador em ambos os sentidos, como se pode ver na Figura 23. O quadrante de funcionamento como gerador em marcha-atrás, na prática não é utilizado.

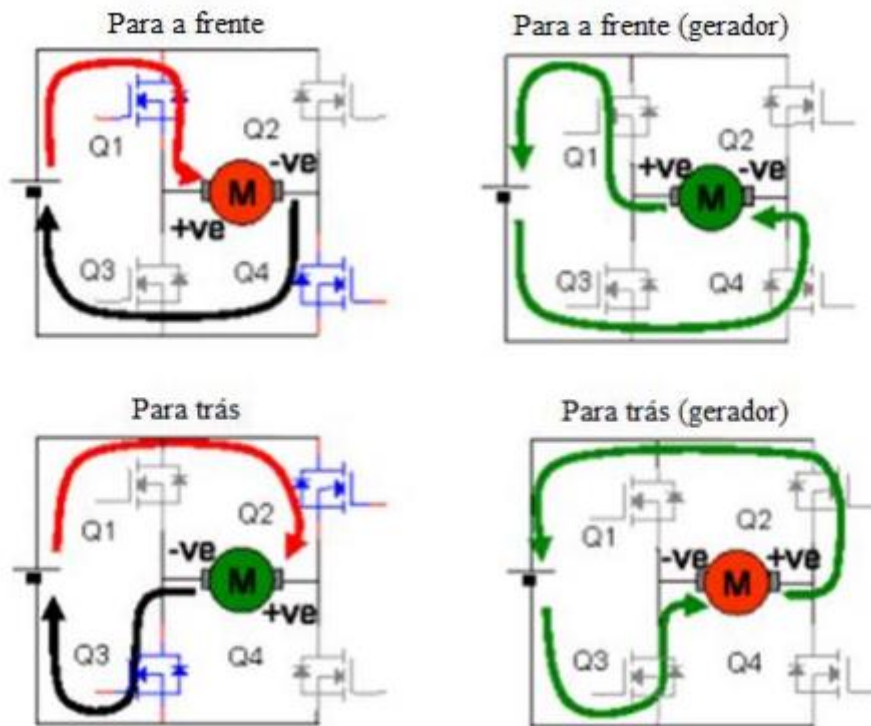


Figura 23 - - Esquema de funcionamento da ponte H para controladores de motores de CC [44]

Os inversores CA funcionam de forma semelhante aos controladores de CC, com uma importante particularidade: invertem o sinal da corrente. Conseguem-no através do mesmo sistema (PWM) que conjuga a variação do tempo do pulso com o sinal para gerar uma curva aproximadamente sinusoidal, semelhante à da corrente alternada, como ilustra a Figura 24.

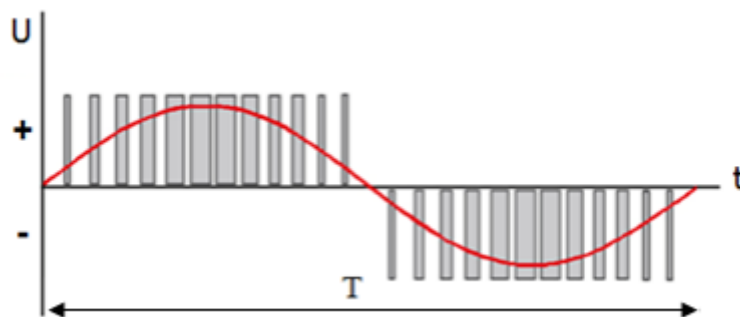


Figura 24 - Sinusóide produzida por PWM

Os impulsos (saídos do microprocessador) podem obedecer ao padrão sinusóide e simultaneamente podem ser mais ou menos longos (tal como já foi mostrado na Figura 22) o que faz variar a amplitude da sinusóide, isto é, a tensão

alternada que chega ao motor. Para motores trifásicos, o respectivo inversor gera três sinusóides, desfasadas 120 ° entre si, de forma a obter as três fases de alimentação.

Além da variação de tensão, o controlador pode aumentar ou diminuir o tempo do período (T), variando assim a frequência f, que está relacionada com a velocidade do motor, como se mostra através da equação seguinte:

$$N_s = \frac{f}{p} \times 60$$

Onde, NS é a velocidade de sincronismo (em rpm) e p é o número de pares de pólos do motor.

O controlo do motor é feito em malha fechada (autorregulável) e de uma forma geral pode ser resumido no diagrama de blocos da Figura 25. Com base na posição do pedal do acelerador (imposta pelo utilizador) e na leitura da velocidade de saída do motor, o controlador ordena uma determinada atuação (aumento ou diminuição de tensão e/ou corrente) para obter uma determinada velocidade.

Trata-se de um sistema dinâmico que no caso de uma perturbação (por exemplo: o automóvel começa a subir uma rampa, ou a posição do acelerador é entretanto alterada), o sensor de rotação detecta a alteração e envia essa informação para o controlador que por sua vez vai responder de forma a repor a velocidade desejada, entrando assim num ciclo de controlo em malha fechada.

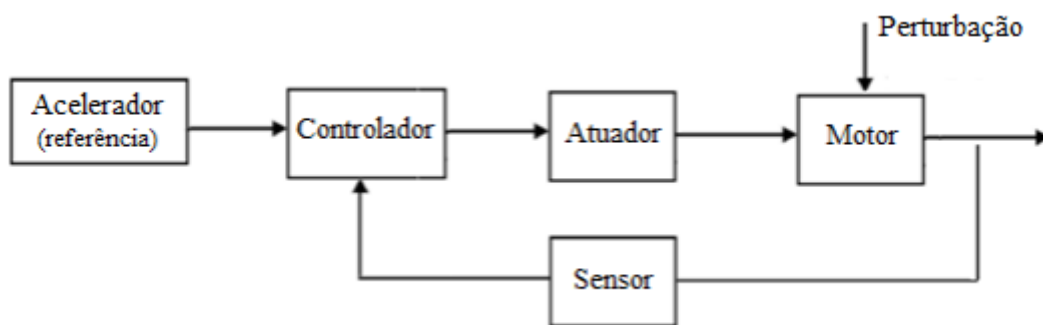


Figura 25 -- Diagrama de blocos do controlo do motor em malha fechada

Alguns fabricantes de motores fornecem também o controlador, geralmente em kits de conversão.

A Figura 26 mostra alguns exemplos de controladores.



Figura 26 - Exemplos de controladores, a) Evolveit [45], b) Zilla [46], c) Evnetics [47]

Sistemas de armazenamento de energia

Nos meios de transporte (naqueles que armazenam a bordo a energia que utilizam para a locomoção), quanto maior for a densidade mássica e volumétrica do armazenamento de energia, maior poderá ser a sua autonomia e menos frequentes as paragens para reabastecimento/recarga. No caso dos veículos elétricos as paragens para recarga são ainda bastante demoradas pelo que se torna imperativo o aproveitamento e maximização da energia armazenada.

Existem vários sistemas de armazenamento de energia, conforme o tipo de motorização em causa. Neste trabalho, apenas serão abordados os tipos de armazenamento relacionados com carros elétricos. Ao logo deste capítulo, aborda-se o assunto de uma forma mais ampla do que os outros temas, porque as limitações dos sistemas de armazenamento de energia, são atualmente um dos maiores obstáculos à difusão dos carros elétricos no mercado automóvel.

Baterias

Uma bateria é um dispositivo, composto por uma ou várias células unitárias, que convertem energia química em energia eléctrica e vice-versa. Definem-se em dois grandes grupos, as primárias e as secundárias, mais conhecidas por recarregáveis. Ambos os grupos têm sido desenvolvidos ao longo do tempo. Na Figura 27 ilustra-se a evolução da energia específica (Wh/kg) das baterias, do grupo primário e secundário, com destaque para as principais tecnologias usadas.

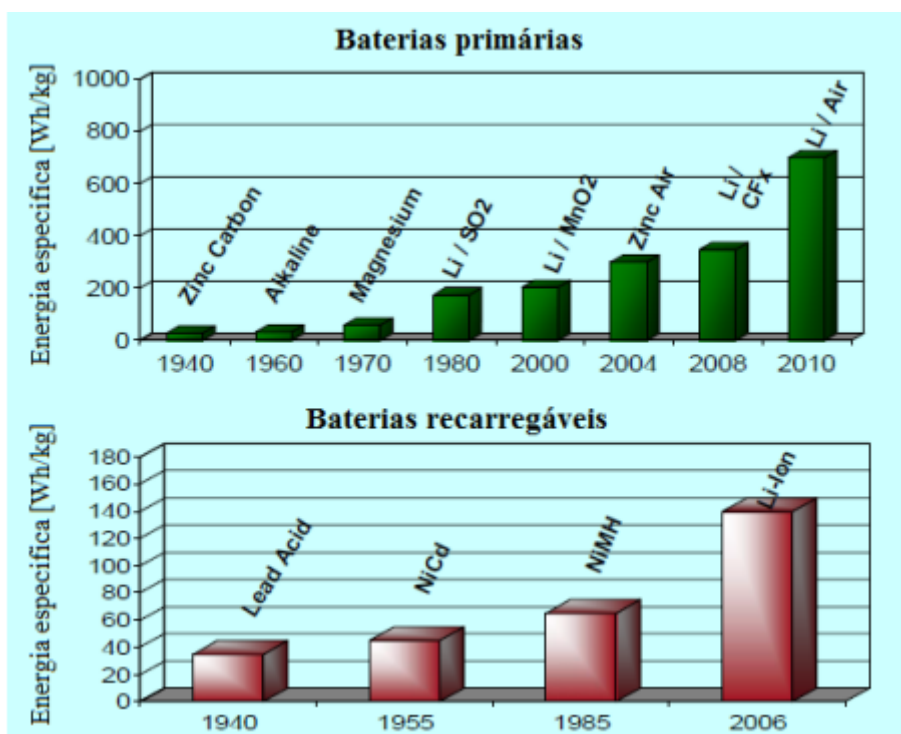


Figura 27 - - Evolução da energia específica de baterias [48]

Geralmente são utilizadas em dispositivos portáteis, como por exemplo: relógios, telecomandos, máquinas fotográficas, calculadoras, etc.

Tendo em conta a aplicação de baterias recarregáveis em veículos elétricos, este capítulo vai desenvolver uma abordagem às baterias do grupo secundário. Antes de ser feita a abordagem, faz-se uma descrição das principais especificações das baterias recarregáveis.

Célula, bateria e pack de baterias: uma célula é a unidade individual de uma bateria, por exemplo uma bateria de 12V possui 6 células de 2V (valores nominais). Juntando várias baterias, ligadas em série, em paralelo ou ambos, obtém-se um conjunto ao qual se chama pack de baterias.

Autodescarga: uma bateria descarrega-se com o tempo, mesmo sem ser usada, a isso chamase autodescarga (expressa em % da capacidade e geralmente para 1 mês). A taxa de autodescarga pode aumentar com o aumento de temperatura, com a idade da bateria e com a humidade [49]

“Efeito memória”: a diminuição da capacidade de retenção de carga, vulgarmente conhecida por “viciação da bateria” e por “efeito memória”, altera a percentagem de armazenamento da bateria. Este efeito afeta principalmente as baterias de Ni-Cd [50].

Energia específica e densidade de energia: a energia específica relaciona a quantidade de energia que uma bateria pode armazenar com a massa dessa bateria e é

expressa em kWh/kg. A densidade de energia é uma relação semelhante mas em relação ao volume ocupado por essa bateria e é expressa em kWh/L.

Capacidade de uma bateria: A capacidade de descarga de uma bateria (C) é expressa em (Ah) e representa o valor teórico de corrente que a bateria é capaz de fornecer durante uma hora de funcionamento a 25°C [51]. Por exemplo uma bateria de capacidade de 100Ah descarregada à taxa de 1C teoricamente debita 100A durante 1 hora, a mesma bateria descarregada à taxa de 0,5C debitaria 50A durante 2 horas.

SoC (State of Charge): o estado de carga é a percentagem de carga que resta na bateria. Com a bateria carregada corresponde a 100% e conforme a bateria vai descarregando, o valor desce até 0% que corresponde à bateria completamente descarregada.

DoD (Depth of Discharge): é a percentagem de energia removida da bateria e vai aumentando conforme se vai descarregando a bateria. Convém referir que quanto maior for a DoD, menor tempo de vida útil terá a bateria, principalmente em baterias de chumbo-ácido.

OCV (Open Circuit Voltage): é a tensão medida nos terminais da bateria sem que estes estejam ligados a qualquer fonte de consumo.

Vida útil: geralmente é contabilizada em número de ciclos de carga/descarga que uma bateria poderá alcançar.

Como foi referido, dá-se início à abordagem às baterias do grupo secundário (recarregáveis), mostrando um quadro (Figura 28) onde se compara a densidade de energia, mássica e volumétrica dos vários sistemas de armazenamento de energia.

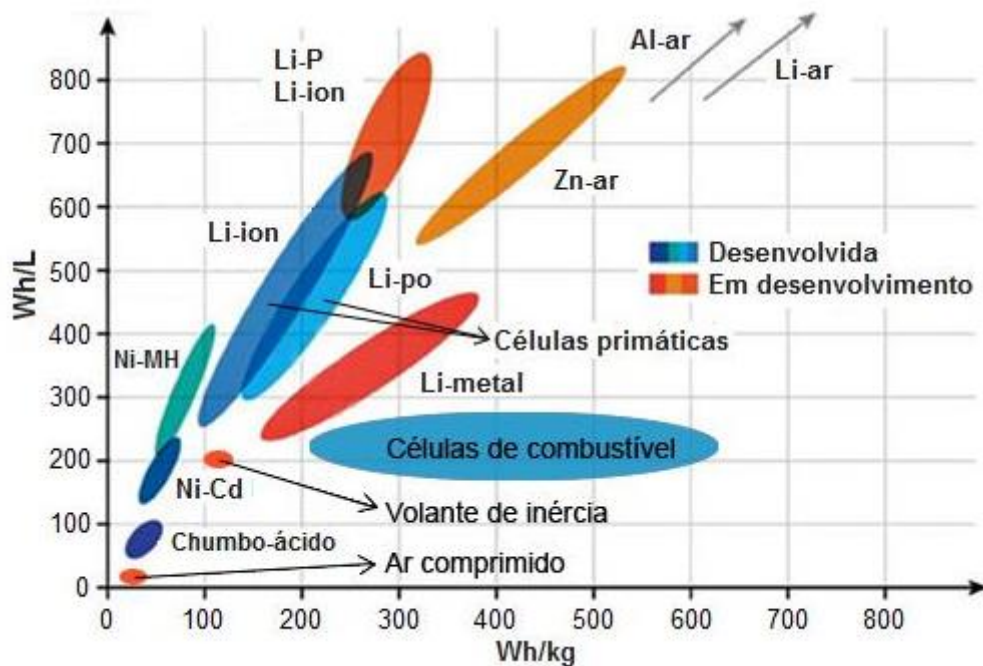


Figura 28 - - Densidade de energia (mássica e volumétrica) de vários tipos de sistemas de armazenamento de energia (adaptado de [52] [53] [54])

Neste quadro os tons de azul referem-se a tecnologias que já se encontram maduras, e em tons alaranjados as tecnologias emergentes, por enquanto, ainda caras ou pouco fiáveis. As tecnologias Alar e Li-ar são muito recentes estando ainda em estudo, mas os seus autores preveem elevadas densidades energéticas. Cada uma destas tecnologias será abordada mais à frente.

Uma bateria para um veículo elétrico deve ter uma boa densidade energética (para garantir uma autonomia razoável do VE), boa capacidade de descarga (adequada à potência do VE), ser uma tecnologia segura e fiável, possuir um longo tempo de vida útil, ter um custo baixo, além disso causar o menor impacto ambiental possível. Para complementar a informação da Figura 29, coloca-se em anexo (A) uma tabela com as principais características dos principais tipos de baterias.

As diferentes características das baterias tornam-nas mais propícias a determinados usos do que outras. A Tabela 2 mostra algumas aplicações mais correntes para os vários tipos de tecnologias químicas de baterias recarregáveis.

Tabela 2 - Aplicações mais usuais das baterias recarregáveis

	Aplicações Típicas
Chumbo-ácido	Submarinos, automóveis, EVs, cadeiras de rodas, scooters, E-Bikes e unidades UPS
NiCd	Aparelhos electrónicos, comandos, brinquedos, telemóveis, máquinas de furar portáteis e sinalização de emergência
NiMH	EVs, HEVs, locomotivas, computadores portáteis, telemóveis, aparelhos elétricos, instrumentos e equipamentos médicos
Li-ion	EVs, Computadores portáteis, telemóveis, máquinas fotográficas, aparelhos rádio modelismo e MP3
LiFePO4	EVs, motos e bicicletas eléctricas, SegWays, E-Bikes, Computadores portáteis e aparelhos rádio modelismo

Chumbo-ácido (Lead-Acid)

As baterias de chumbo-ácido têm capacidade de fornecer correntes elevadas em curtos períodos de tempo, são baratas e não têm “efeito memória”. Tipicamente a vida destas baterias situa-se entre os 500 e os 1000 ciclos [55]. Quanto menor for a profundidade de descarga usada, maior será a vida útil da bateria, como mostra a Figura 29. O rendimento depende das taxas de carga/descarga (corrente em função do tempo) que são impostas à bateria, bem como da temperatura de funcionamento.



Figura 29 - Longevidade de baterias de chumbo-ácido versus profundidade de descarga [56]

Durante o processo de carga de uma bateria de chumbo-ácido, deve-se ter especial cuidado para que a carga não seja excessiva, se isso ocorrer, a bateria pode “ferver” e emitir hidrogénio, que combinado com o oxigénio atmosférico resulta numa mistura altamente inflamável [49]. Aconselha-se fazer a carga em ambiente ventilado e com carregadores, ou parâmetros de carga, indicados pelo fabricante.

As baterias tradicionais requerem a manutenção do nível de líquido e podem ter problemas de derrame de electrólito. Como resposta a essas dificuldades, foi desenvolvida a bateria do tipo VRLA (valve-regulated lead acid), também conhecida por bateria de gel, e um outro tipo mais recente, a AGM (Absorbent Glass Mat) que tem um desempenho mais elevado do que o tipo convencional. É uma bateria de chumbo-ácido, com a particularidade do electrólito ser absorvido por esteiras de fibras de vidro (em vez das placas submersas em electrólito líquido). Ambos os tipos de baterias têm a vantagem de poder operar em qualquer posição e não precisam de manutenção. A Figura 30 mostra os constituintes típicos de uma bateria de chumbo-ácido.



Figura 30 - Constituição de uma bateria de chumbo-ácido [57]

O ácido sulfúrico contido nas baterias é muito corrosivo, devendo ser evitado o contacto com a pele e com as roupas. Este tipo de baterias não apresenta obstáculos quanto à sua reciclagem. Nos países da união Europeia, os pontos de venda são obrigados por lei a recolher as baterias em fim de vida. A percentagem de baterias de chumbo-ácido recicladas em todo o mundo ronda os 97% [58].

O processo químico das baterias de chumbo-ácido recorre a dois eléctrodos, o negativo de chumbo (Pb), e o positivo de óxido de chumbo (PbO₂). Ambos são imersos num electrólito de água destilada (H₂O) e ácido sulfúrico (H₂SO₄) como exibido na Figura 31.

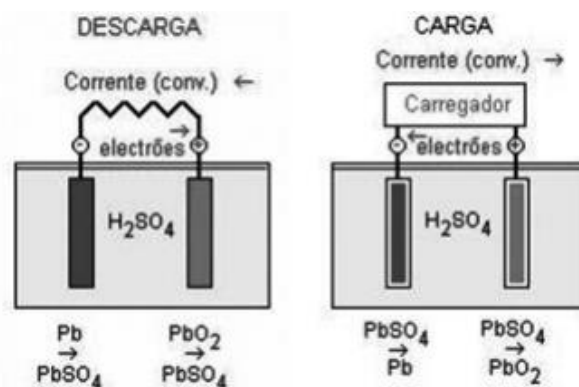


Figura 31 - Esquema de carga e descarga de baterias de chumbo-ácido [59]

Em geral as baterias de chumbo-ácido apresentam as vantagens e desvantagens que se listam a seguir.

Vantagens:

- Baixo custo e de fabrico simples;
- Tecnologia madura, fiável, informação bastante difundida;
- Baixa autodescarga;
- Potência específica elevada, capaz de correntes de pico elevadas.

Desvantagens:

- Baixa relação entre energia acumulada e peso;
- Carga lenta (carregar totalmente pode demorar até 10 horas);
- Ciclo de vida limitado;
- Consideradas como resíduo perigoso pelo que é obrigatória a sua reciclagem;

Chumbo-cobalto (PbCo)

A bateria de chumbo-cobalto foi desenvolvida em 1966, por Robert Raymond Aronsson, fundador da empresa EFP (Electric Fuel Propulsion Corporation) e foi usada nos carros MARS II que foram protagonistas nas duas célebres corridas cross-country realizadas nos EUA [60]. Esta bateria também é conhecida por tripolar, por possuir no seu interior, três barramentos colectores das placas, por cada polo.

O cobalto presente nesta bateria (como aditivo do electrólito) forma um revestimento das placas positivas, criando assim uma proteção contra sobrecargas.

Entretanto a empresa patenteou novos aperfeiçoamentos desta bateria e também alterou o nome para EAC (Electric Auto Corporation) [60]. Atualmente a empresa, ainda comercializa esta tecnologia de baterias, mas parece estar mais focada no desenvolvimento e comercialização de células de combustível AFC (Apollo Fuel Cell.) que serão abordadas no subcapítulo próprio, mais à frente. Referese ainda que a literatura recente da especialidade não aborda este tipo de Baterias.

Níquel-cádmio (NiCd)

O uso de baterias de níquel-cádmio em aplicações de tração, segundo Root [61], cresceu um pouco antes da Segunda Guerra Mundial. A bateria de níquel-cádmio tem uma grande aceitação em todo o mundo, é utilizada em aplicações onde se pretende baixo custo, longa duração e alto débito de potência. São pequenas, leves, resistentes e podem ser sujeitas a cerca de 1000 ciclos de carga/descarga [53]. A Figura 32 mostra algumas baterias deste tipo.



Figura 32 - Formas de baterias de NiCd [62] [63]

A bateria de níquel-cádmio tem sido substituída progressivamente pelas baterias do tipo NiMH. A grande limitação do uso destas baterias em EV's é o seu “efeito memória” [50], incompatível com os ciclos de carga/descarga tipicamente irregulares nos EV's. Uma outra desvantagem é possuírem cádmio (metal tóxico) que obriga a uma reciclagem controlada da bateria [61].

Níquel-hidreto metálico (NiMH)

Segundo Martins et al. [6] nos anos 90 a patente deste tipo de baterias foi comprada por uma empresa petrolífera que limitou o seu uso a baterias de pequena capacidade, pelo que a partir daí apenas têm sido usadas em veículos híbridos. Paralelamente, o desenvolvimento das baterias Li-ion também reduziu o entusiasmo pela NiMH. De qualquer forma, alguns fabricantes de veículos híbridos (HEV- hybrid electric vehicle) ainda apostam nesta tecnologia por esta se encontrar madura, por ser mais barata (para a mesma quantidade de energia acumulada) e ter menores riscos de segurança (incêndio) do que as baterias de Li-ion (com exceção para as LiFePO₄).

As baterias de NiMH devem ser carregadas de modo relativamente rápido, porque ao carregar de modo lento, dá-se uma formação cristalina que encurta o seu tempo de vida. Os carregadores para este tipo de baterias devem fazer a gestão entre a rapidez de carga e a temperatura máxima atingida, que deverá estar dentro dos valores admitidos pelo fabricante. Estes carregadores também devem interromper automaticamente o fornecimento de energia depois das a baterias estarem carregadas, para que estas baterias não se degradem, pois este tipo de baterias não tolera bem as sobrecargas.

Expõe-se de seguida uma lista de vantagens e desvantagens das baterias de NiMH [53].

Vantagens:

- Capacidade de 30 a 40 % mais do que as baterias NiCd (para o mesmo peso);
- Menor “efeito memória” que as NiCd;

- Armazenamento e transporte simples, não sujeito a controlo regulamentar;
- Contém apenas materiais levemente tóxicos;
- Teor de níquel torna a reciclagem lucrativa.

Desvantagens:

- Vida útil limitada, uma descarga profunda reduz a vida útil;
- Não tolera bem a sobrecarga;
- Gera calor durante a carga rápida (reduzindo o rendimento);
- Elevada autodescarga;
- Redução do desempenho para altas temperaturas;
- Menor densidade energética que as baterias de tecnologia de Lítio.

Níquel-ferro (NiFe)

Foram desenvolvidas por Edison no virar do século e chegaram a ser as baterias de eleição para os proprietários de veículos eléctricos endinheirados pois proporcionavam autonomias notáveis para a altura [6]. São conhecidas algumas aplicações, como por exemplo na sinalização ferroviária, em empilhadores industriais e em casas alimentadas por energia solar. Estas baterias são resistentes à sobrecarga e sobredescarga, e segundo [64] podem ter uma vida útil de mais de 25 anos. No entanto as baterias NiFe não foram muito apreciadas: tinham uma baixa energia específica (de 30 a 50Wh/kg) e um fraco rendimento (de 65 a 85%), para além de que sofrem de elevada autodescarga de 10 a 15% por mês [65].

Níquel-zinco (NiZn)

Estas baterias são semelhantes às de níquel-cádmio onde é usado um electrólito alcalino e um eléctrodo de níquel. A patente desta tecnologia remonta a 1901, embora o seu desenvolvimento se tenha fomentado mais tarde nas décadas de 60 e 70. Tinham um ciclo de vida curto causado pelo crescimento de dendrites que levavam a curto-circuito interno [50]. Entretanto foi melhorado o electrólito, reduzindo assim este problema. As vantagens como o custo relativamente baixo, possuírem uma energia específica superior à bateria de NiCd e o facto de não causar grandes problemas ambientais, fez crescer um novo interesse comercial por este tipo de baterias [66].

Níquel-hidrogénio (NiH)

Na década do desenvolvimento das baterias de NiMH (anos 70), a instabilidade destas levou a uma mudança para o desenvolvimento das de NiH. Segundo [26], as baterias de NiH são constituídas por um depósito de aço para armazenar os gases de hidrogénio a uma pressão de 8,270 MPa. A célula inclui eléctrodos de níquel sólido,

eléctrodos de hidrogénio, telas de gás e um electrólito. Estes componentes são encapsulados sob pressão na bateria.

Estas baterias têm uma vida útil longa, um baixo efeito de autodescarga, e operam a uma boa gama de temperaturas, de -28 a 54°C, o que torna a bateria ideal para uso em satélites. Como desvantagens, tem uma baixa energia específica (40 a 75Wh/kg) e um elevado custo.

Baterias de Lítio (Li-ion)

Dentro do tipo de baterias de Li-ion, existem muitos géneros que derivam deste. A diferença está principalmente nos materiais usados para o cátodo. Entretanto, novos materiais estão a ser desenvolvidos para o ânodo, de forma a modificar ou substituir a grafite usada tradicionalmente.

A família de baterias Li-ion é composta pelos seguintes membros, uns mais conhecidos do que outros: Lítio óxido de cobalto (LiCoO₂), Lítio óxido de manganês (LiMn₂O₄), Lítio ferro fosfato (LiFePO₄),

Lítio níquel manganês óxido de cobalto (LiNiMnCoO₂), Lítio níquel cobalto óxido de alumínio (LiNiCoAlO₂), lítio titanado (Li₄Ti₅O₁₂).

De um modo geral as baterias de Li-ion, se usadas sem a devida monitorização e controlo durante a carga/descarga, podem ser perigosas, existindo risco de incêndio ou explosão (o lítio queima exposto ao ar e reage explosivamente com água (para formar hidrogênio) [67]). Poderá ainda existir o risco de curto-circuito interno, através de formação de dendrites [61]. Daí que seja necessário implementar sempre um sistema BMS (Battery Management System) ao usar este tipo de baterias.

Devido ao exposto, todas as baterias de li-ion incorporam (geralmente junto às células) dispositivos BMS que monitorizam a corrente da bateria, o estado da carga e a temperatura da bateria. Estes dispositivos interrompem o circuito quer em carga, quando a bateria já se encontrar carregada; quer em descarga, quando a bateria está na sua tensão mínima. Um destes sistemas pode ser observado na Figura 33b.



Figura 33 - a) Bateria Li-ion de computador portátil IBM Thinkpad, b) interior da mesma bateria onde se vê o BMS (folha de circuitos por cima das células) [68]

Nos computadores portáteis, o sistema BMS completa-se com a interação de utilitários que estão disponíveis no setup e que possibilitam um ciclo de carga e descarga completo, atualizando assim as medições da bateria no sistema.

Uma equipa de investigadores da Universidade de Stanford [69] provou que, teoricamente uma bateria de lítio com ânodos de nano fios de silício, poderá ter uma energia específica de 1550Wh/kg, o que seria notável se fosse atingido.

A empresa Evonik Industries refere estar a desenvolver uma bateria de lítio-cerâmica que diz ser a maior do mundo. É uma bateria de electrólitos de lítio com uma membrana cerâmica. No futuro, o seu desenvolvimento promete armazenar energia, proveniente de fontes de energias renováveis, de forma eficiente e em grande escala. Segundo [29], a tecnologia patenteada pela Evonik também está no cerne de sua parceria com a Daimler AG, que visa a produção em massa de veículos elétricos a partir de 2012.

Lítio-polímero (Li-Po)

Este tipo de baterias, são uma evolução das baterias de íões de lítio. A bateria Li-Po fornece correntes de pico (num curto espaço de tempo) elevadas, o seu tempo de vida pode ser bastante superior às baterias de NiCd ou NiMH (dependendo do tipo de uso). O seu rendimento de carga/descarga também é mais elevado do que estas.

Nas baterias Li-Po, geralmente o ânodo é feito de carbono ou grafite e o cátodo é feito de cobalto, manganês ou à base de lítio. O electrólito é feito de polímero em forma de filme. Este filme não conduz energia, mas permite a troca de íões. O facto de usar o electrólito no estado sólido elimina a obrigatoriedade de usar uma cápsula rígida para envolver a bateria (Figura 34). Isso permite que a bateria possa ter vários tipos de formas, sendo a maioria prismáticas.



Figura 34 - Esquema de uma bateria LiPo [70]

Tal como nas baterias de Li-ion, as baterias Li-Po necessitam de um carregador próprio. Se este for desadequado, pode causar danos irreparáveis nas células e o tempo de vida da bateria será francamente inferior ao esperado. Se for detetada alguma célula com o aspeto de inchada, a bateria deve ser imediatamente substituída. Nestas baterias, para além da perigosidade referida nas baterias de Li-ion, acresce o risco de uma perfuração acidental.

Quanto à reciclagem, as baterias Li-Po não apresentam problemas, apenas devem estar completamente descarregadas antes de serem recicladas [71].

Lítio-Fosfato de Ferro (LiFePO₄)

É um tipo de baterias recente, foi descoberto em 1996 por John B. Goodenough [72], mas apenas começou a ser comercializado a partir de 2006.

Segundo [73] esta bateria possui um longo tempo de vida útil, baixa toxicidade, estabilidade térmica elevada, segura em termos de incêndio ou explosão e além disso o fosfato de ferro é um recurso abundante. A tecnologia LiFePO₄ exhibe uma boa energia específica (90 a 120Wh/kg) [53]. Por estes motivos esta bateria tem vindo a receber uma atenção crescente desde que começou a ser comercializada.

A tensão nominal das células LiFePO₄ é de normalmente 3.3V. Estas baterias quase não apresentam autodescarga e também não possuem “efeito memória”. A sua profundidade de descarga pode ir aos 100%, além disso a tensão nominal mantém-se praticamente constante durante quase todo o período de descarga, como se pode ver no gráfico da Figura 35.

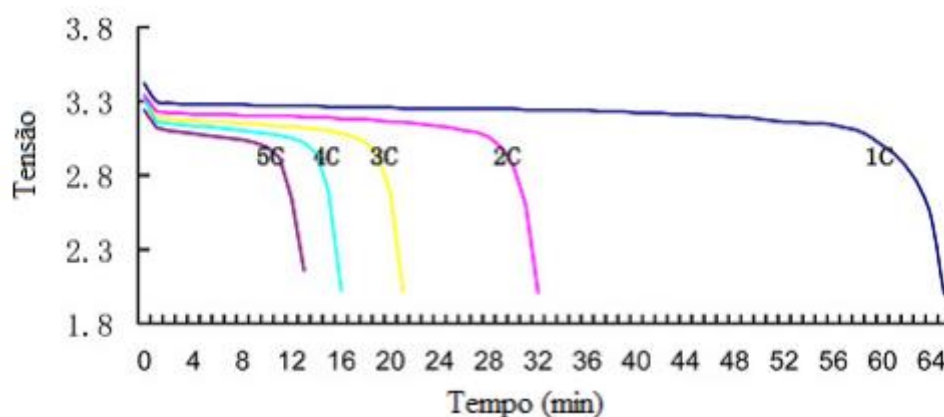


Figura 35 - Características da descarga de uma bateria LiFePO₄ de 100Ah da marca Hipower, onde C é a capacidade nominal (ou taxa de descarga) [74]

As LiFePO₄ oferecem uma tecnologia segura, não ardem nem explodem (apenas se deterioram) com sobrecargas e/ou com erros de carga e manipulação. Isso deve-se à incorporação de fosfatos como o material do cátodo. Os fosfatos são muito

estáveis em condições de sobrecarga ou curto-circuito e têm a capacidade de suportar temperaturas elevadas sem decomposição.

Estas baterias podem durar mais de 2000 ciclos de vida e podem ser deixadas parcialmente descarregadas por longos períodos sem causar danos permanentes, embora se recomende a carga completa antes de armazenar.

A marca ThunderSky, produz uma ampla gama de capacidades deste tipo de baterias entre 40Ah e 1600Ah que se revela destinada a veículos elétricos. Mostra-se na Figura 36 algumas das formas que este tipo de baterias pode ter.

Titanato de bário em cerâmica

Segundo [75], a empresa EESU registou a marca EESU (Electrical Energy Storage Unit) que se refere a uma bateria de titanato de bário em cerâmica. A bateria é supostamente de baixo custo, leve e de elevada densidade de energia, com uma excelente capacidade de descarga e terá um ciclo de vida longo.

A Zenn Motors tem um acordo de exclusividade para a construção dessas baterias, por notar que as suas propriedades são propícias para carros elétricos [75]. Segundo a mesma fonte, tudo isto pode ser especulação, mas é referido que em qualquer caso, a patente da marca EESU divulga especificações preliminares detalhadas para um modelo chamado de 24V-BDHD.

Sódio-enxofre (Na-S) e sódio-cloreto de níquel (NaNiCl₂)

Os dois tipos mais comuns de baterias de alta temperatura são o sódio-enxofre e sódio-cloreto de níquel. Também são chamadas de baterias quentes, por necessitarem de uma temperatura de cerca de 300°C para que o eletrólito se torne bom condutor [61].

As investigações sobre a bateria Na-S remontam ao início dos anos 70. Estas baterias possuem uma boa densidade de potência, um longo ciclo de vida e custo moderado. Existem grandes aplicações estacionárias desta bateria, como uma aplicação que armazena cerca de 57,6MWh [66].

A bateria de sódio-cloreto de níquel (NaNiCl₂) é muitas vezes apelidada de Zebra (nome comercial) e usa cloreto de níquel como material do eléctrodo positivo em vez do enxofre usado na NaS [61].

SCIB (Super Charge Ion Battery)

A Toshiba apresentou uma nova tecnologia de baterias designada SCIB (Super Charge Ion Battery) [76] que adopta um novo material de eléctrodo negativo e que oferece um alto nível de estabilidade térmica. Esta tecnologia promete ciclos de carga e descarga superiores a 5000 vezes. Isto significa uma duração da bateria de cerca de 10 anos (usando um ciclo por dia). Uma outra característica é permitir carregamentos a 90% da capacidade em apenas cinco minutos [76]. Segundo a mesma fonte este tipo de bateria é ideal para aplicações de alta potência. Este tipo de bateria opera bem sob

temperaturas extremas, com boa descarga a temperaturas muito baixas, na ordem do -30 °C o que resolve o problema de adaptação a climas frios.

Zinco-prata (Zn-Ag)

A bateria de zinco-prata, tem tido um papel importante em aplicações militares e espaciais. Também são usadas em câmaras de televisão [53]. Um elevado custo e uma vida útil curta, baniu este tipo de bateria para fora do mercado comercial, todavia com a evolução tecnológica poderá sempre surgir um renascimento.

Os primeiros eléctrodos (de zinco) e os separadores degradavam-se rapidamente e foram a principal causa de falha no projeto original. Além disso (tal como as NiZn) existe o problema da formação de dendrites de zinco que causam curto-circuitos internos. A vida útil estava limitada a cerca de dois anos.

Novos desenvolvimentos nas melhorias do eléctrodo de zinco e separador, prometem uma vida útil mais longa e uma densidade energética específica 40 por cento superior às baterias de Li-ion.

As baterias de zinco-prata são seguras, não contêm metais tóxicos e podem ser recicladas, mas o uso da prata faz com que o preço desta bateria seja muito elevado.

A bateria elétrica

É através da capacidade da bateria que é possível perceber a autonomia máxima do veículo. O Hyundai Kauai Electric, por exemplo, tem uma capacidade de 64 kWh que se traduzem em 484 km de autonomia.

As baterias extremamente eficientes que equipam estes veículos alimentam não só o motor elétrico, mas todos os componentes do veículo, nomeadamente o sistema de ar condicionado, sistema de infoentretenimento, entre outros. As baterias são construídas com materiais resistentes que garantem o seu correto funcionamento e, ainda, segurança. Em caso de sobreaquecimento, por exemplo, as baterias acionam um mecanismo de proteção que limitam o funcionamento da bateria promovendo o seu arrefecimento.

O Carregamento

Ao contrário dos veículos convencionais que têm que ser abastecidos com combustível fóssil num posto de abastecimento, os veículos elétricos podem ser carregados através da simples conexão à rede elétrica. Praticamente qualquer tomada elétrica permite o carregamento do automóvel.

O importante é ter um cabo de carregamento, conector e uma potência que sejam compatíveis entre o automóvel e a tomada. Podem ser realizados carregamentos

em casa, ou na rua. Em postos públicos ou privados, os carregamentos podem ser normais ou rápidos.

Um carregamento normal através de uma wallbox pode demorar cerca de 6 horas. Independentemente da opção escolhida, uma coisa é certa: estará a poupar dinheiro. Se pretender fazer uma simulação e perceber quanto estará a poupar, utilize a calculadora de poupança disponibilizada pela Blue Academy.

A energia elétrica é mais barata que o combustível, o que faz com que o custo de um carregamento seja cerca de três vezes inferior ao custo de um abastecimento para um percurso semelhante.



Figura 36 - Carro elétrico em carregamento

A Travagem Regenerativa

O sistema de travagem regenerativo permite recolher a energia cinética das rodas do automóvel nos momentos de desaceleração. Esta energia é utilizada para impulsionar o motor elétrico e enviar energia à bateria elétrica para armazenamento e posterior utilização.

De uma forma simples: este sistema permite carregar o automóvel em andamento.

Assim, é fundamental utilizar este sistema sempre que possível. Para tal, basta tirar o pé do acelerador nas descidas ou pouco antes de imobilizar o veículo. Vai sentir simplesmente o carro a abrandar lentamente. Para além de aumentar a autonomia, a travagem regenerativa permite, ainda, preservar os travões, uma vez que a sua utilização não necessita ser tão frequente.

Alguns veículos, como o Kauai Electric ou o IONIQ Electric, estão equipados com diferentes níveis de sistema de travagem regenerativa. Os níveis de regeneração mais elevados reduzirão mais rapidamente a velocidade, o que significa que será também maior a quantidade de energia regenerada.

A Manutenção

A manutenção de um veículo elétrico é bastante diferente e mais barata do que a de um veículo a combustão. Os veículos elétricos não têm tantos componentes de desgaste rápido quando os veículos convencionais, o que significa que a manutenção será mais simples e mais barata.

Alguns dos componentes que simplesmente não existem nos veículos elétricos são: filtro de combustível, filtro do óleo, óleo do motor, velas e correias de distribuição. A bateria, por seu lado, é um componente caro, caso seja necessária a sua substituição. Contudo, isto será necessário em situações muito excecionais ou depois de atingida o máximo da sua vida útil (que ultrapassa os 10 anos).

Atualmente, existem baterias que funcionam por módulos e em que apenas alguns dos módulos têm que ser substituídos em caso de avaria, diminuindo exponencialmente os custos de reparação.

A experiência de condução

Os elétricos são automóveis divertidos e fáceis de conduzir. Se procura momentos de adrenalina e diversão, pode usufruir da potência, poder de aceleração e tecnologia proporcionados por um carro elétrico.

Por outro lado, se procura relaxar enquanto conduz, pode usufruir da facilidade de condução e do silêncio destes veículos. Independentemente das suas preferências, os automóveis elétricos não o vão desiludir.

Baterias

Uma bateria é um dispositivo, composto por uma ou várias células unitárias, que convertem energia química em energia eléctrica e vice-versa. Definem-se em dois grandes grupos, as primárias e as secundárias, mais conhecidas por recarregáveis. Ambos os grupos têm sido desenvolvidos ao longo do tempo. Na Figura 27 ilustra-se a

evolução da energia específica (Wh/kg) das baterias, do grupo primário e secundário, com destaque para as principais tecnologias usadas.

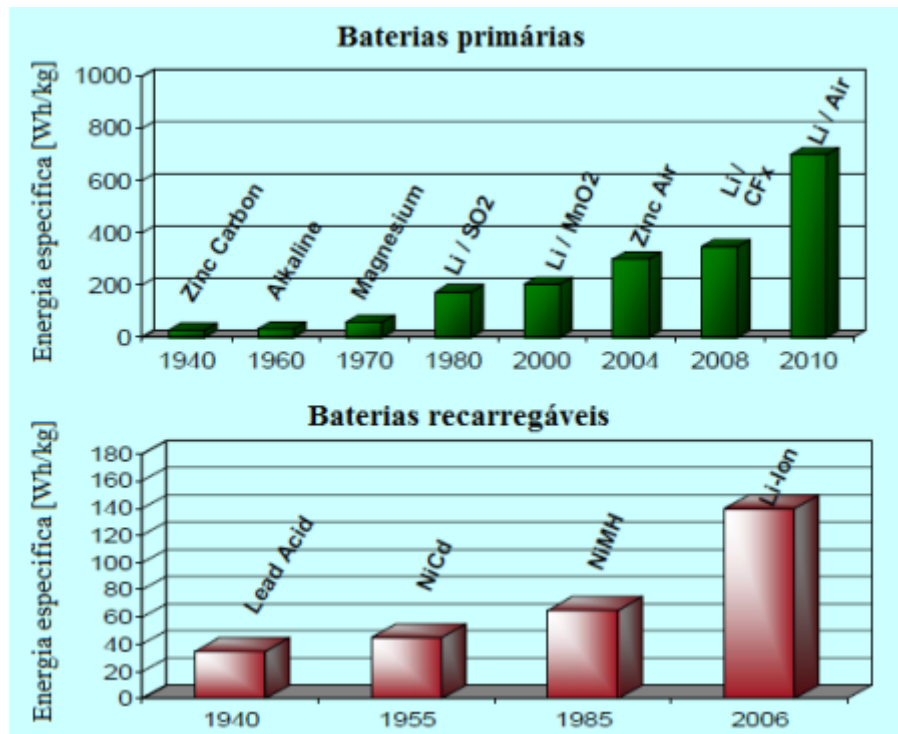


Figura 37 – Evolução da energia específica de baterias [48]

Geralmente são utilizadas em dispositivos portáteis, como por exemplo: relógios, telecomandos, máquinas fotográficas, calculadoras, etc.

Tendo em conta a aplicação de baterias recarregáveis em veículos elétricos, este capítulo vai desenvolver uma abordagem às baterias do grupo secundário. Antes de ser feita a abordagem, faz-se uma descrição das principais especificações das baterias recarregáveis.

Célula, bateria e pack de baterias: uma célula é a unidade individual de uma bateria, por exemplo uma bateria de 12V possui 6 células de 2V (valores nominais). Juntando várias baterias, ligadas em série, em paralelo ou ambos, obtém-se um conjunto ao qual se chama pack de baterias.

Auto descarga: uma bateria descarrega-se com o tempo, mesmo sem ser usada, a isso chamasse Auto descarga (expressa em % da capacidade e geralmente para 1 mês). A taxa de Auto descarga pode aumentar com o aumento de temperatura, com a idade da bateria e com a humidade [49]

“Efeito memória”: a diminuição da capacidade de retenção de carga, vulgarmente conhecida por “viciação da bateria” e por “efeito memória”, altera a percentagem de armazenamento da bateria. Este efeito afeta principalmente as baterias de Ni-Cd [50].

Energia específica e densidade de energia: a energia específica relaciona a quantidade de energia que uma bateria pode armazenar com a massa dessa bateria e é

expressa em kWh/kg. A densidade de energia é uma relação semelhante mas em relação ao volume ocupado por essa bateria e é expressa em kWh/L.

Capacidade de uma bateria: A capacidade de descarga de uma bateria (C) é expressa em (Ah) e representa o valor teórico de corrente que a bateria é capaz de fornecer durante uma hora de funcionamento a 25°C [51]. Por exemplo uma bateria de capacidade de 100Ah descarregada à taxa de 1C teoricamente debita 100A durante 1 hora, a mesma bateria descarregada à taxa de 0,5C debitaria 50A durante 2 horas.

SoC (State of Charge): o estado de carga é a percentagem de carga que resta na bateria. Com a bateria carregada corresponde a 100% e conforme a bateria vai descarregando, o valor desce até 0% que corresponde à bateria completamente descarregada.

Neste quadro os tons de azul referem-se a tecnologias que já se encontram maduras, e em tons balaranjados as tecnologias emergentes, por enquanto, ainda caras ou pouco fiáveis. As tecnologias Alar e Li-ar são muito recentes estando ainda em estudo, mas os seus autores preveem elevadas densidades energéticas. Cada uma destas tecnologias será abordada mais à frente.

Uma bateria para um veículo elétrico deve ter uma boa densidade energética (para garantir uma autonomia razoável do VE), boa capacidade de descarga (adequada à potência do VE), ser uma tecnologia segura e fiável, possuir um longo tempo de vida útil, ter um custo baixo, além disso causar o menor impacto ambiental possível. Para complementar a informação da Figura 29, coloca-se em anexo (A) uma tabela com as principais características dos principais tipos de baterias.

As diferentes características das baterias tornam-nas mais propícias os determinados usos do que outras. A Tabela 2 mostra algumas aplicações mais correntes para os vários tipos de tecnologias químicas de baterias recarregáveis.

O MATLAB importa estes dados do Excel e com as equações já descritas (subcapítulo 3.2) permite obter em cada instante: a potência fornecida pelo motor, a potência devido às forças de arrasto, inércias (do carro e da rotação do motor) e a potência máxima que é possível regenerar. No algoritmo pode estabelecer-se um limite de regeneração em função da capacidade máxima de corrente do motor, embora esse limite também dependa da capacidade máxima da bateria, dos cabos de ligação e da existência de condensadores. Caso esse teto máximo não existisse correr-se-ia o risco de danificar os órgãos elétricos.

A travagem regenerativa não recupera toda a potência inercial, alguma é consumida através das potências de rolamento e arrasto. É notória a influência da potência de arrasto a velocidades elevadas. Através do ciclo de condução, o programa pode estimar o consumo para circuito urbano, extraurbano e combinado.

O consumo em circuito extraurbano e combinado não se aplicam ao Little4 quer por imperativos legais (está homologado para um limite de velocidade de 45km/h) quer por este não possuir potência motora suficiente para alcançar tais velocidades. A Tabela 10 mostra uma estimativa de alguns dados que se obtêm com o referido programa. Não foi considerado o consumo de acessórios.

O menor consumo verifica-se em circuito urbano (11,2kWh/100km), onde a velocidade é baixa conferindo potências de rolamento e de arrasto pouco significativas

(como foi mostrado na Figura 76. Tenha um valor máximo teórico de cerca de 34% da energia total que o veículo necessita.

Webgrafia

<https://www.e-konomista.pt/como-funcionam-os-carros-eletricos/>

https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/22557/1/Tese_VF_a52762_Pdf.pdf