

Instituto Politécnico de Viseu

Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu



RESUMO

Tendo em conta a natureza finita das fontes de energia fóssil, o seu nocivo contributo para as alterações climáticas e o período de crescente escassez em que estamos a entrar, esta dissertação apresenta as energias renováveis e a mobilidade eléctrica como parte da solução para uma nova era energética.

Ela inicia-se com uma secção sobre o panorama energético actual e os contributos dados pelas descobertas decorrentes da primeira e segunda revolução industrial. Analisam-se depois a evolução do veículo eléctrico, e das suas diferentes arquitecturas bem como dos sistemas de armazenamento de energia e infra-estruturas e metodologias de carga. No capítulo seguinte são apresentadas tecnologias de armazenamento de pequena e larga escala já existentes e em fase de desenvolvimento, destas últimas são exploradas as mais promissoras que melhor poderão ajudar na integração das energias renováveis e da mobilidade eléctrica no sistema energético e no quotidiano da civilização.

No final é projectada e simulada uma bateria constituída por supercondensadores cuja função é substituir a bateria de um pequeno veículo eléctrico. Neste projecto foram evidenciadas as características desta alternativa e foram comprovadas as vantagens e as desvantagens deste tipo de armazenamento de energia.

ABSTRACT

This dissertation presents renewable energy alternatives and electric mobility as part of the solution to a new energy age, given the finite characteristics of fossil energy sources, its harmful contribution to climate changes, and the increasingly scarcity period which we are now facing.

The initial section is about the current energy scenario, and the changes that occurred since the discoveries made during the first and second industrial revolution. It has an analysis of the evolution of the electric vehicle, its different architectures and systems for energy storage and infrastructure, as well as the battery charge methodologies. The following chapter presents the existing and developing small and large scale storage technologies. The most promising ones are explored and that may help the integration of renewable energy, and electric mobility into daily civilization.

In conclusion, a battery consisting of supercapacitors to replace a small electric vehicle's battery is designed and simulated. Alternative features were highlighted in this project, and the advantages and disadvantages of this type of energy storage have been proved.

PALAVRAS CHAVE

armazenamento de energia
bateria lítio-ar
bateria metal líquido
energia renovável
fim do petróleo
mobilidade eléctrica
supercondensadores

KEY WORDS

electric mobility
end of oil
energy storage
liquid metal battery
lithium-air
renewable energy
supercapacitors

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Professor Doutor Joaquim Duarte Barroca Delgado, por ter proposto este tema e por todo o apoio e ideias durante a sua realização.

Agradeço também especialmente a todos os familiares e amigos que directa ou indirectamente influenciaram o meu percurso académico com o seu apoio e amizade.

ÍNDICE GERAL

RESUMO	i
ABSTRACT	iii
ÍNDICE GERAL	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
ÍNDICE DE QUADROS.....	xvii
ABREVIATURAS E SIGLAS	xix
NOTAÇÃO.....	xx
1. Introdução.....	1
2. Panorama actual.....	3
2.1 Petróleo – um recurso finito.....	3
2.2 As emissões de CO ₂	7
3. Revisão histórica.....	9
3.1 História da bateria	9
3.2 História do veículo eléctrico	13
3.3 A diminuição do interesse pelo veículo eléctrico	16
4. Estado da arte do veículo eléctrico	17
4.1 Veículo eléctrico	17
4.1.1 Arquitecturas dos veículos eléctricos	19
4.2 Infra-estruturas e metodologias de carga	29
4.2.1 Infra-estruturas.....	29
4.2.2 Metodologias de carga.....	31
4.3 Sistema de carga indutivo	34
5. Tecnologias de armazenamento de energia	43
5.1 Fontes de energia	44
5.2 Fontes renováveis de energia	45
5.2.1 Energia Solar	45
5.2.2 Energia Eólica.....	45
5.3 Armazenamento de energia.....	46
5.3.1 Armazenamento de larga escala	49

5.3.2	Armazenamento de pequena escala	51
5.4	Comparação entre tecnologias de armazenamento	53
5.4.1	Comparação das eficiências	53
5.4.2	Comparação da densidade de energia por massa e volume	55
5.4.3	Comparação dos custos de investimento	55
5.4.4	Aplicações	56
5.5	Tecnologias de armazenamento de energia mais promissoras	58
5.5.1	Iões de Lítio	58
5.5.2	Lítio-ar	60
5.5.3	Bateria de Metal líquido.....	64
5.5.4	Bateria Quântica.....	66
5.5.5	Supercondensadores	67
6.	Projecto do sistema de armazenamento de energia com supercondensadores.....	73
6.1	Especificações do veículo eléctrico.....	74
6.1.1	Veículo eléctrico (escala de dimensão 1:10).....	74
6.1.2	Motor eléctrico.....	75
6.1.3	Electronic Speed Control (ESC)	75
6.1.4	Bateria	76
6.2	Projecto da nova bateria de supercondensadores	77
6.3	Estudo da autonomia	79
6.3.1	Modelo de simulação com a bateria de supercondensadores.....	82
6.3.2	Resultados do modelo de simulação da descarga	84
6.3.3	Cálculo da autonomia.....	85
6.3.4	Cálculo da autonomia à velocidade máxima.....	86
6.4	Modelo de simulação da operação de carga da bateria de supercondensadores	88
6.5	Conclusões do Capítulo 6.....	91
6.5.1	Sugestão de trabalho futuro.....	91
7.	Conclusões gerais.....	93
	Referências.....	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Nos Estados Unidos o pico na exploração de petróleo foi atingido por volta de 1970 [2].....	4
Figura 2-2: Na Europa o pico na exploração de petróleo foi atingido por volta de 2000 [2].....	4
Figura 2-3: Ilustração da estimativa da exploração dos vários tipos de petróleo a nível mundial [3].....	5
Figura 2-4: Evolução do preço do barril de petróleo desde 1970, ano em que ocorreram as primeiras crises petrolíferas [4].	6
Figura 2-5: Contribuição dos transportes rodoviários para as emissões de CO ₂ [6].	7
Figura 2-6: Emissão de CO ₂ ao longo dos anos e previsões para anos futuros [6].....	8
Figura 3-1: Bateria de Bagdad [8].	9
Figura 3-2: Bateria de Volta [9].	10
Figura 3-3: Bateria em calha de William Cruickshank [10].....	11
Figura 3-4: Primeira bateria de Chumbo ácido, a primeira bateria recarregável de Gaston Planté [11].....	11
Figura 3-5: Densidade de potência e de energia para diferentes tipos de bateria [13].	12
Figura 3-6: O motor eléctrico (esquerda) e veículo eléctrico (direita) de Anyos Jedlik [14]...	13
Figura 3-7: Modelo de um motor eléctrico de Davenport (esquerda) e motor que foi patenteado (direita) [7], [14].....	13
Figura 3-8: Modelo do carro de Stratingh e Becker, precursor do veículo eléctrico [7].	14
Figura 3-9: Primeiro triciclo eléctrico de William Ayrtton e John Perry [15].	14
Figura 3-10: Um dos primeiros carros de Thomas Parker [16].	14
Figura 3-11: “Le Jamais Contenté”, primeiro veículo a atingir 100 km/hora [7].	15
Figura 3-12: Veículo de Ferdinand Porsche que usava dois motores eléctricos, um em cada roda dianteira [17].	15
Figura 3-13: Veículo híbrido paralelo a gasolina de Louis Antoine Krieger [7].	15
Figura 3-14: Ford T usando a ignição por manivela [19].	16
Figura 4-1: Eficiências comparativas entre VE’s e veículo convencional [4].	18
Figura 4-2: Níveis de electrificação por arquitectura [4].	19
Figura 4-3: Arquitectura do veículo eléctrico puro [4].....	19
Figura 4-4: Subsistemas de um BEV [21].	20
Figura 4-5: Tesla model s [23].	21
Figura 4-6: Arquitectura série do veículo eléctrico híbrido, PHEV [4].	24
Figura 4-7: Especificação das ligações da arquitectura série do veículo eléctrico híbrido [26].	24
Figura 4-8: Fisker Atlantic [27].....	24
Figura 4-9: Arquitectura paralela do veículo eléctrico híbrido, HEV (esquerda), PHEV (direita) [4].....	26

Figura 4-10: Especificação das ligações da arquitectura paralela do veículo eléctrico híbrido [26].	26
Figura 4-11: Toyota Prius [28].	26
Figura 4-12: Sistema Voltec.	27
Figura 4-13: Opel Ampera com arquitectura híbrida mista [29].	27
Figura 4-14: Arquitectura do camião híbrido da Volvo [30].	28
Figura 4-15: Postos de abastecimento MOBILE [31].	29
Figura 4-16: Ficha CHAdeMO [32].	29
Figura 4-17: Ficha Mennekes [33].	30
Figura 4-18: Ficha SAE J1772 [34].	30
Figura 4-19: Sistema V2G [38].	33
Figura 4-20: Modelo equivalente da indutância mútua [39].	35
Figura 4-21: Base emissora e receptor da Witricity [40].	37
Figura 4-22: Esquema ilustrativo do carregamento indutivo [41].	38
Figura 4-23: Trilho com kits de indução [42].	38
Figura 4-24: Figura ilustrativa do acoplamento de um sistema indutivo [43].	39
Figura 4-25: Gráfico da eficiência do acoplamento indutivo tendo em consideração a distância entre emissor e receptor bem como o tamanho dos mesmos [43].	40
Figura 4-26: i-Miev da Mitsubishi [45].	41
Figura 4-27: Nissan Leaf [46].	41
Figura 4-28: Mercedes-Benz Classe A E-CELL [44].	41
Figura 5-1: Fontes de energia [48].	44
Figura 5-2: Eficiência de várias tecnologias de armazenamento [53].	53
Figura 5-3: Comparação da energia primária necessária para 100% de energia útil [53].	54
Figura 5-4: Comparação de rendimentos e tempo de vida em ciclos [51].	54
Figura 5-5: Comparação da densidade de energia por massa e volume [51].	55
Figura 5-6: Comparação do custo da energia [51].	56
Figura 5-7: Aplicações e suas características [51].	56
Figura 5-8: Tecnologias e as suas possíveis aplicações [51].	57
Figura 5-9: Comparação da densidade de energia [54].	58
Figura 5-10: Comparação da autonomia e preço de veículos eléctricos [54].	59
Figura 5-11: Comparação das densidades de energia teóricas das várias baterias de metal-ar [57].	60
Figura 5-12: Esquema da bateria Lítio-ar aprótica [56].	61
Figura 5-13: Gráfico da tensão de carga e descarga da célula aprótica [56].	62
Figura 5-14: Esquema da bateria Lítio-ar aquosa [58].	62
Figura 5-15: Esquema da bateria Lítio-ar de mistura aquosa-aprótica [58].	63
Figura 5-16: Esquema da bateria Lítio-ar de estado sólido [58].	63
Figura 5-17: Sadoway explica o funcionamento da bateria [59].	65
Figura 5-18: Esquema de carga e descarga da bateria da Ambri [60].	65
Figura 5-19: Modelo da bateria de 2 MWh [60].	65

Figura 5-20: Gráficos comparativos com outras tecnologias [61].	66
Figura 5-21: Condensadores de dupla camada eléctrica (EDLC) [64].	68
Figura 5-22: Ilustração dos nanotubos de Carbono [62].	69
Figura 6-1: Bandit VXL [66].	74
Figura 6-2: Diagrama de blocos da parte eléctrica [67].	74
Figura 6-3: Velineon 380 Motor [68].	75
Figura 6-4: VXL-3m Waterproof Electronic Speed Control [69].	75
Figura 6-5: Bateria NiMH [70].	76
Figura 6-6- Quadro das velocidades dependentes da bateria [66].	76
Figura 6-7: Maxwell BCAP3000 [71].	77
Figura 6-8: Dimensões do condensador Maxwell BCAP3000.	78
Figura 6-9: Configuração 1 da disposição da bateria.	78
Figura 6-10: Configuração 2 da disposição da bateria.	78
Figura 6-11: Área frontal do veículo eléctrico.	80
Figura 6-12: Modelo da bateria de supercondensadores.	82
Figura 6-13: Modelo da descarga da bateria de supercondensadores.	83
Figura 6-14: Resultados da descarga da bateria de supercondensadores.	84
Figura 6-15: Tensão e corrente no ESC.	84
Figura 6-16: Resultados da descarga da bateria de supercondensadores.	87
Figura 6-17: Tensão e corrente no ESC.	87
Figura 6-18: Fonte Zhaoxin KXN Series [76].	89
Figura 6-19: Modelo da carga da bateria de supercondensadores.	89
Figura 6-20: Simulação de carga com corrente de 100 A.	90
Figura 6-21: Tempo de carga em função da corrente.	90

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 4-1: Características do Tesla model s [23].	21
Quadro 4-2: Grau de hibridação [21].	21
Quadro 4-3: Tempos de carga em função da potência do carregador Camaleão [35].	31
Quadro 4-4: Wit-3300 [40].	37
Quadro 5-1: Tecnologias de larga escala [51].	48
Quadro 5-2: Tecnologias de pequena escala [51].	48
Quadro 5-3: Materiais usados para supercondutores.	50
Quadro 5-4: Características de diversas baterias [52].	52
Quadro 5-5: Características das flow cells regenerativas [52].	53
Quadro 6-1: Características do Bandit VXL.	74
Quadro 6-2: Características do motor [67].	75
Quadro 6-3: Características do ESC.	75
Quadro 6-4: Características da bateria.	76
Quadro 6-5: Características do Maxwell BCAP3000 [72].	77
Quadro 6-6: Características da nova bateria de supercondensadores.	79
Quadro 6-7: Coeficientes de resistência ao rolamento [73].	79
Quadro 6-8: Coeficientes aerodinâmicos [74].	81
Quadro 6-9: Características do conversor DC-DC da Linear Technology [75].	83
Quadro 6-10: Características da fonte Zhaoxin KXN Series.	89
Quadro 6-11: Resultados da simulação de carga.	90

ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	Alternating Current (Corrente alternada)
BEV	Battery Electric Vehicle (Veículo eléctrico puro)
CAES	Compressed Air Energy Storage (Armazenamento de energia por ar comprimido)
DC	Direct Current (Corrente contínua)
EDLC	Electric Double-Layer Capacitor (Condensador eléctrico de dupla camada)
EROEI	Energy Returned of Energy Invested (Energia recuperada da energia investida)
ESC	Electronic Speed Control (Controlo electrónico de velocidade)
ESR	Equivalent Series Resistance (Resistência série equivalente)
GPL	Gás de Petróleo Liquefeito
HEV	Hybrid Electric Vehicle (Veículo eléctrico híbrido)
ICPT	Inductively Coupled Power Transfer (Transferência de energia por acoplamento indutivo)
ISO	Independent System Operator (Operador de sistema independente)
MCI	Motor de Combustão Interna
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle (Veículo eléctrico híbrido plug-in)
SEI	Solid-Electrolyte-interface (Electrólito sólido)
SMES	Superconducting Magnetic Energy Storage (Armazenamento de energia por supercondução magnética)
V2G	Vehicle to Grid (Veículo para a rede)
VE	Veículo Eléctrico

NOTAÇÃO

a) Maiúsculas latinas

B	Campo magnético
C	Condensador
E	Campo eléctrico
I	Corrente eléctrica
L	Bobine
M	Indutância Mutua
R	Resistência
V	Tensão eléctrica

b) Minúsculas latinas

f	Frequência
i	Corrente eléctrica
k	Coefficiente de acoplamento
v	Tensão eléctrica

1. Introdução

Esta dissertação insere-se numa nova mentalidade energética motivada pela escassez de recursos energéticos de origem fóssil e questões ambientais. Na nova ordem emergente as energias renováveis e a mobilidade eléctrica assumem um papel de crucial importância e têm sido vistas como parte de uma solução futura.

Um dos maiores obstáculos à sua mais rápida expansão é ainda a reduzida capacidade de armazenamento de energia das tecnologias existentes. No entanto esta questão tem sido alvo de estudos que têm resultado em relevantes progressos. Todos os dias são apresentados avanços e hoje já existem tecnologias de armazenamento com densidade de energia que as torna viáveis para cada vez mais aplicações.

Ao longo da dissertação serão exploradas tecnologias de armazenamento, com principal ênfase para as mais recentes e promissoras. Entre essas encontram-se o Lítio-Ar, o metal líquido, ressonância quântica e os supercondensadores.

A dissertação é composta por **7** capítulos, cujos conteúdos são descritos sumariamente a seguir.

No capítulo 2, denominado por panorama actual é feita uma reflexão sobre o petróleo, onde é referenciado o seu pico na exploração bem como as causas e consequências. É também abordado o tema das emissões de CO₂, e este serve para demonstrar a necessidade de uma nova mentalidade energética e o papel da mobilidade eléctrica nessa realidade.

O capítulo 3, trata de facultar uma revisão histórica sobre a evolução da bateria e o seu uso no veículo eléctrico, evocando as datas e os nomes dos cientistas mais relevantes para a sua evolução.

No capítulo 4, denominado de estado da arte do veículo eléctrico são expostas as ultimas evoluções do mesmo, e são referidas as diversas arquitecturas, bem como os modos de recarga e suas infra-estruturas. No final deste capítulo é abordado o sistema de carga indutiva.

O capítulo 5 é direccionado para as tecnologias de armazenamento de energia, são apresentadas tecnologias de pequena e larga escala e são feitas comparações entre elas. Neste capítulo são também expostas tecnologias de armazenamento de energia promissoras tanto para as energias renováveis como para a mobilidade eléctrica.

No capítulo 6 é desenvolvido o projecto de um sistema de armazenamento de energia constituído por supercondensadores, o objectivo principal é substituir a bateria original de um pequeno veículo eléctrico por uma de energia equivalente utilizando esta tecnologia. Os restantes objectivos passam pelo estudo da nova autonomia e pela constatação das vantagens e desvantagens do armazenamento de energia por supercondensadores. No final do capítulo estão as conclusões referentes ao mesmo bem como uma sugestão para um trabalho futuro.

No capítulo 7 estão presentes as conclusões gerais da presente dissertação.

A presente dissertação encontra-se escrita no antigo acordo ortográfico.

2. Panorama actual

Neste capítulo é feita uma contextualização do panorama energético e ambiental actual, onde são descritos temas de elevada importância como a escassez do petróleo e as emissões de CO₂.

2.1 Petróleo – um recurso finito

A energia constitui o pilar de qualquer civilização e a maioria da que consumimos hoje é proveniente de um recurso não renovável, o petróleo. Praticamente tudo que diz respeito à produção e consumo, de bens ou serviços, depende da energia obtida desse recurso.

O tema da escassez do petróleo demorou a chegar ao público e a ser debatido pela sociedade. Hoje essa é sentida no aumento dos preços de praticamente todos os bens e serviços com principal ênfase nos combustíveis cujos preços são afectados mais directamente.

“As descobertas de petróleo a nível global atingiram o seu pico em 1964 e têm seguido uma firme linha descendente desde então. A taxa de utilização de petróleo acelerou tremendamente desde 1950. Após o pico de produção, a procura mundial excederá a capacidade mundial de produção de petróleo” [1].

Hubbert¹ conhecido na geologia do petróleo pela teoria do pico petrolífero e pela curva de Hubbert que previa esse mesmo pico, previu em 1956 que a produção de petróleo nos Estados Unidos da América teria o seu pico no início dos anos 70, essa previsão viria a mostrar-se acertada, e desde então Hubbert ganhou a atenção dos mais cépticos.

Nas Figuras 2-1, 2-2 e 2-3 são apresentados dados e projecções baseadas na curva de Hubbert para a produção de petróleo. É possível confirmar a tendência decrescente e acentuada na produção nos próximos anos. Nas projecções a nível mundial verifica-se para 2050 uma

¹ Marion King Hubbert (05 de Outubro de 1903 - 11 de Outubro de 1989) foi um geólogo que se dedicou ao estudo das fontes de energia fósseis.

produção equivalente à de 1960, tendo em conta a diferença populacional, e o desenvolvimento industrial entre estes dois anos, é fácil concluir que se avizinham dias difíceis, e uma real necessidade de mudança de mentalidade no que respeita ao uso desta fonte de energia.

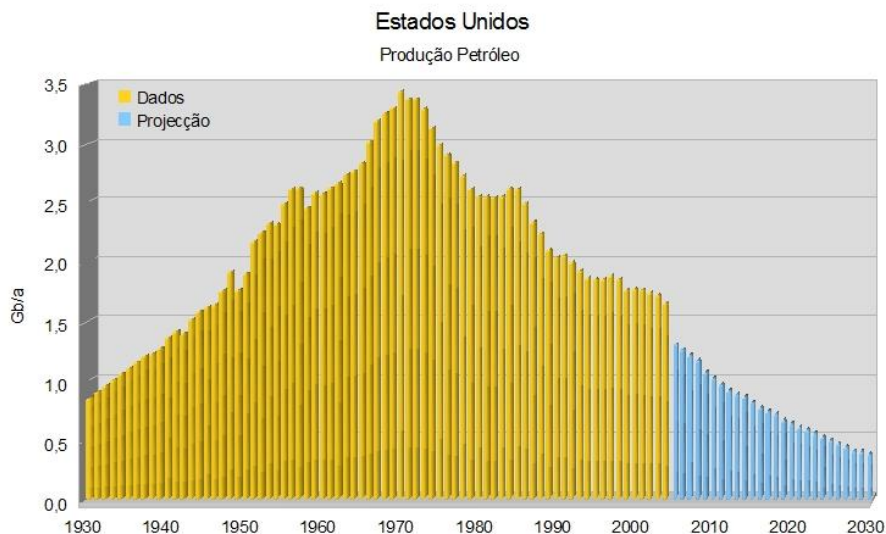


Figura 2-1: Nos Estados Unidos o pico na exploração de petróleo foi atingido por volta de 1970 [2].

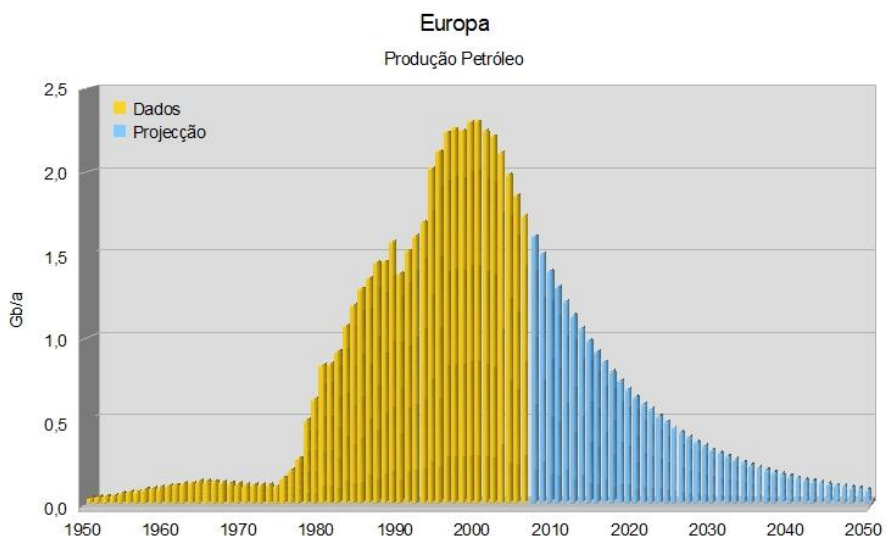


Figura 2-2: Na Europa o pico na exploração de petróleo foi atingido por volta de 2000 [2].

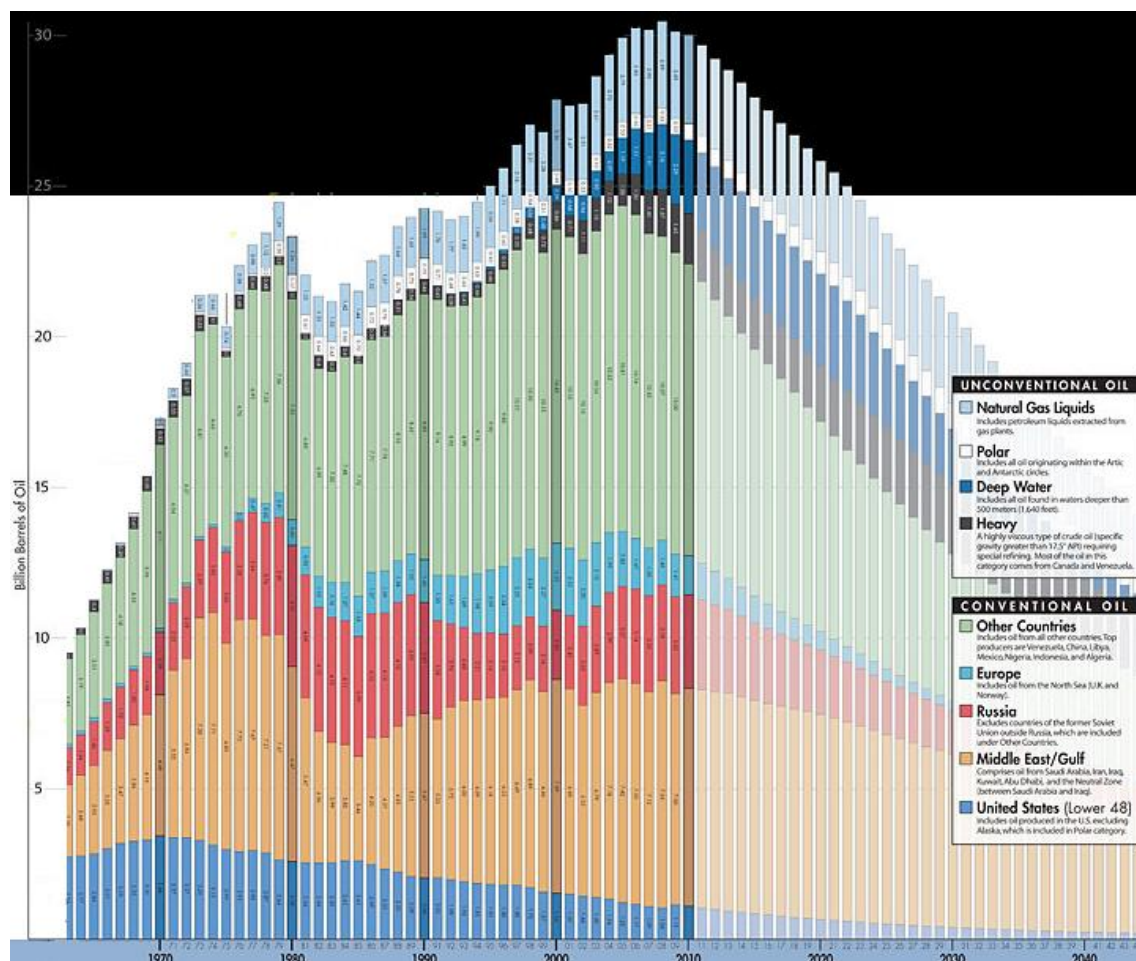


Figura 2-3: Ilustração da estimativa da exploração dos vários tipos de petróleo a nível mundial [3].

Conceito de EROEI:

EROEI (*Energy Returned of Energy Invested*) é o indicador que indica se determinada tecnologia de captura de energia é sustentável.

$$EROEI = \frac{\text{Energy Returned}}{\text{Energy Invested}}$$

Para que uma tecnologia de captura de energia seja viável a energia obtida tem de ser superior à energia investida, logo segundo a expressão o EROEI tem de ser superior a um, e quanto maior mais rentável é a tecnologia. A energia investida depende da localização, da profundidade a que se encontra o petróleo e da sua variedade pois umas são mais dispendiosas de refinar do que outras. Nos últimos anos tem-se verificado um aumento na energia investida e isto tem-se traduzido numa diminuição do rácio entre a energia obtida e a energia investida. “O rácio da energia despendida pela indústria petrolífera dos EUA para retirar o petróleo do subsolo relativamente à energia produzida por esse mesmo petróleo caiu de 28:1 em 1916 para 2:1 em 2004 e continuará a cair” [1].

A civilização tem vindo a sustentar-se no petróleo, um recurso não renovável, que tem gasto como se fosse inesgotável. Torna-se hoje evidente que a exploração de petróleo convencional atingiu já o seu pico de exploração e que a era da energia barata acabou.

A crise económica e social a que assistimos resulta, directa e indirectamente, desse facto pois é a energia que move o mundo e sustenta a civilização tal como a conhecemos hoje.

A Figura 2-4 ilustra a evolução do preço do petróleo nos últimos anos, onde podemos ver que o facto de os EUA atingirem o seu pico de extracção de petróleo em 1970, deu origem à primeira crise petrolífera em 1973. Consegue-se também observar que em pouco mais de 40 anos o preço passou de 2 dólares o barril, em 1970, para 100 dólares em Março de 2011. Preocupante também é o facto da maioria dessa subida se ter verificado nos últimos 5 anos, uma subida correspondente a mais de 70 dólares!

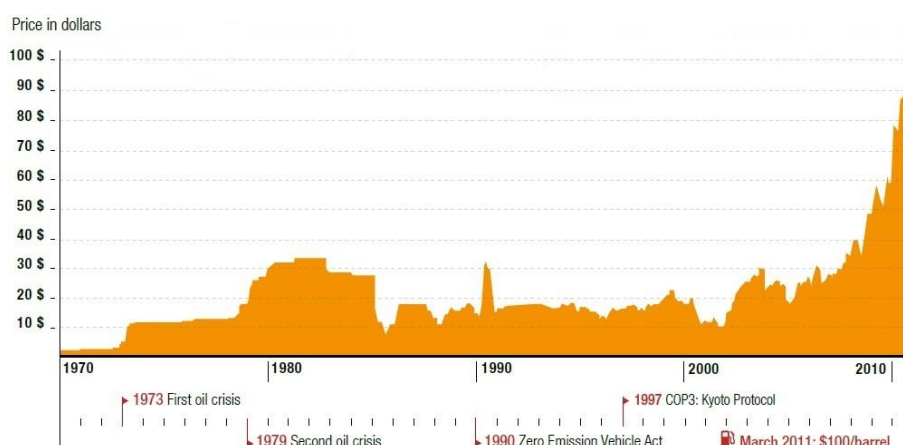


Figura 2-4: Evolução do preço do barril de petróleo desde 1970, ano em que ocorreram as primeiras crises petrolíferas [4].

1ª Lei da Termodinâmica:

A Energia não pode ser criada, esta só pode ser convertida noutra forma de energia!

Torna-se clara a necessidade de adopção de uma nova mentalidade energética, preocupação que tem vindo a ser discutida por vários países, mas que continua a ser “descartada” por alguns dos desenvolvidos e em vias de desenvolvimento. A resistência à mudança de mentalidade poderá levar ao colapso da civilização, tal como hoje a conhecemos.

Há claro a descoberta e início de exploração de outras fontes fósseis que passaram a ser rentáveis mas que, segundo os maiores especialistas, nenhuma possui o potencial de reposição e utilidade que foi proporcionada pelo petróleo barato durante muitas décadas.

Por todo o mundo assistimos à aposta nas denominadas fontes alternativas (entenda-se ao petróleo!) e de onde se destacam as renováveis (eólica, solar, geotérmica,...).

De entre as fontes alternativas, as de maior potencial não são despacháveis e apresentam um perfil intermitente. Assim, além de uma nova atitude em relação ao consumo, imposta pelo preço, que se traduz na modificação de hábitos, no desfasamento de consumos e no uso de tecnologias mais eficientes, é necessário o desenvolvimento de tecnologias mais eficazes de armazenamento de energia. Necessita-se de armazenar a energia quando essa está disponível

para utilizar quando é necessária e também para garantir a estabilidade no funcionamento do sistema eléctrico que está erigido.

Também na mobilidade eléctrica o armazenamento de energia é uma questão fundamental e o principal factor para acelerar a sua afirmação no mercado.

2.2 As emissões de CO₂

A outra face do uso da fonte fóssil são as emissões de CO₂ para a atmosfera, que provocam o efeito de estufa, dando origem a mudanças climáticas que põem em risco a sobrevivência de seres vivos incluindo a do ser humano. Este tema mais interiorizado pela sociedade, que o pico do petróleo, já teve grande mediatização com o protocolo de Quioto, onde países se comprometeram a reduzir as taxas de emissões. Nesse âmbito os países são aconselhados, entre outras medidas, a reformar os sectores da energia e dos transportes e a promover o uso de fontes energéticas renováveis [5].

A Figura 2-5 mostra o contributo dos transportes rodoviários para as emissões de CO₂. A nível mundial verifica-se uma contribuição de 10%, valor que pode ser reduzido com a afirmação da mobilidade eléctrica no mercado, para isso contribuirá o desenvolvimento de melhores tecnologias de armazenamento de energia, tema que se aprofunda nesta dissertação.

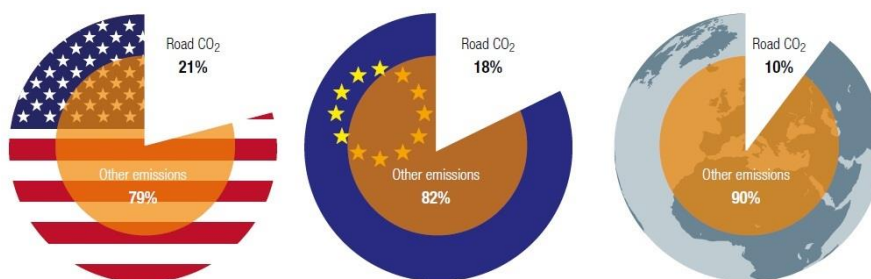


Figura 2-5: Contribuição dos transportes rodoviários para as emissões de CO₂ [6].

Na Figura 2-6 exhibe-se a distribuição das emissões pelas suas fontes de emissão. Verifica-se um aumento nas emissões de CO₂ de 1990 para 2007 e prevê-se que continue a aumentar ao longo dos próximos anos. Também se mostra que a maioria das emissões é proveniente da geração de electricidade. A melhoria das tecnologias de armazenamento de energia contribui para a diminuição das emissões de CO₂, pois para além de melhorar o aproveitamento das energias renováveis que têm um perfil intermitente e cuja energia precisa ser armazenada quando é gerada para ser utilizada quando necessária, favorece a afirmação da mobilidade eléctrica onde o principal obstáculo é a autonomia.

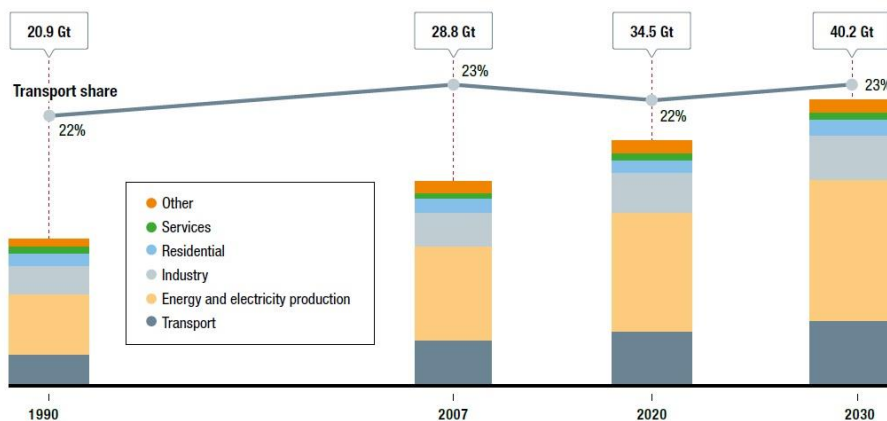


Figura 2-6: Emissão de CO2 ao longo dos anos e previsões para anos futuros [6].

Quer pelo aproximar do fim da energia barata provocada pela escassez de petróleo, quer pela necessidade de reduzir as emissões de CO₂ torna-se evidente a importância de uma nova mentalidade energética, e no âmbito dessa nova mentalidade a descoberta de novas e melhores formas de armazenamento de energia assume um papel de crucial importância.

3. Revisão histórica

Efectua-se neste capítulo uma análise sobre a evolução histórica da bateria e o seu uso no veículo eléctrico, evocando as datas e os nomes dos cientistas mais relevantes para a sua evolução.

3.1 História da bateria

Em 1936, numa vila perto de Bagdad, no Iraque, foram encontrados vasos, que vieram a ser alvo de grande atenção por parte de Wilhelm König². Este concluiu serem uma espécie de célula electroquímica, ou bateria rudimentar (Figura 3-1). Esta era constituída por um pequeno vaso de argila no qual havia um tubo em chapa de Cobre, com diâmetro de aproximadamente 2,5 cm por 10 cm de comprimento, a base era selada por um disco de Cobre, no seu interior havia uma barra de Ferro, aparentemente corroída por ácido, com uma tampa de betume. O vaso apresentava sinais de corrosão, testes revelaram o uso de elementos ácidos como vinagre ou vinho [7].

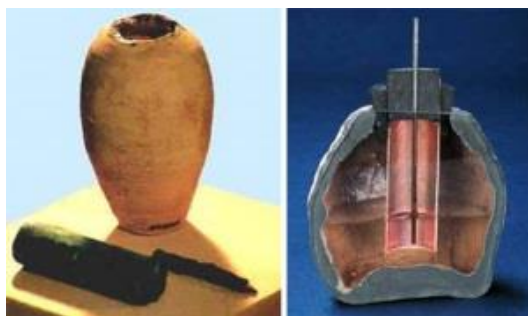


Figura 3-1: Bateria de Bagdad [8].

² Wilhelm König foi um arqueólogo alemão e director do Museu Nacional do Iraque.

Por volta de 1780, Luigi Galvani³ descobriu através de experiências em rãs, que os músculos e nervos sofriam uma contracção ou espasmo causado pela corrente eléctrica liberada por um gerador electrostático. A contracção muscular também aparecia quando o músculo era colocado em contacto com dois metais diferentes, sem que houvesse aplicação de electricidade externa. Galvani chegou à conclusão que certos tecidos orgânicos geravam electricidade por si próprios. Para ele estava claro que os músculos do sapo eram capazes de gerar "electricidade animal" ou electricidade galvânica, que ele julgou ser similar à electricidade gerada por máquinas ou por raios.

Alessandro Volta⁴ repetindo as experiências de Galvani, obteve os mesmos resultados, mas não ficou convencido com a explicação dada por Galvani. Volta logo concluiu que a electricidade observada deveria ter origens mais simples, e que o tecido animal apenas ligava, inadvertidamente, os dois metais.

Volta construiu a primeira bateria, que consistia em dois discos de metal distintos (Zinco e Prata), separados por discos de papelão humedecidos com uma solução salina e ligados em série. Esta montagem foi chamada de célula galvânica e a combinação destas células formava uma bateria, cuja tensão dependia do número de células que estavam ligadas. Este foi o primeiro método encontrado para a geração de uma corrente eléctrica contínua. Ainda em 1799, Volta conseguiu aumentar a corrente com a utilização de Cobre, Zinco e papelão (Figura 3-2).

A invenção da bateria foi comunicada, por Volta, à Royal Society of London numa carta de 20 de Março de 1800. Entretanto, está bem documentado que a invenção ocorreu no final de 1799, que foi universalmente reconhecido como o ano de nascimento da electroquímica [7].



Figura 3-2: Bateria de Volta [9].

Os modelos originais da bateria de Volta tinham algumas falhas. Uma delas envolvendo o electrólito que se derramava por causa do peso dos discos comprimidos. William

³ Luigi Galvani (Bolonha, 9 de Setembro de 1737 - Bolonha, 4 de Dezembro de 1798) foi um médico, investigador e professor italiano.

⁴ Alessandro Giuseppe António Anastácio Volta (Como, 18 de Fevereiro de 1745 - Como, 5 de Março de 1827) foi um físico e professor italiano.

Cruikshank⁵ resolveu esse problema colocando os elementos numa caixa horizontal, em vez de empilhar. Esta ‘nova’ bateria ficou conhecida como bateria em calha (Figura 3-3) [7].

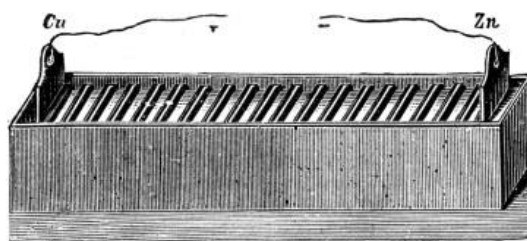


Figura 3-3: Bateria em calha de William Cruickshank [10].

Outro problema da bateria de Volta era a curta duração de vida da bateria. Este problema foi melhorado em 1830 por William Sturgeon⁶, que descobriu que sintetizando o Zinco aumentava a vida da bateria.

John F. Daniell⁷ com base na pesquisa de Alessandro Volta, desenvolveu uma bateria mais eficiente capaz de fornecer corrente eléctrica por um longo período. Essa bateria também conhecida como célula de Daniell é constituída de eléctrodos de Cobre e Zinco interligados e imersos numa solução de Cu^{2+} e Zn^{2+} .

Em 1859, Gaston Planté⁸ inventa a bateria de Chumbo ácido (Figura 3-4) que se tornou na primeira bateria recarregável pela passagem de uma corrente inversa através dela. Esta era constituída por um ânodo de Chumbo e um cátodo de óxido de Chumbo separados por borracha e mergulhados numa solução com ácido sulfúrico [7].



Figura 3-4: Primeira bateria de Chumbo ácido, a primeira bateria recarregável de Gaston Planté [11].

Georges Leclanché⁹ em 1866 inventou uma bateria que era formada por um ânodo de Zinco, e um cátodo de grafite coberto por uma camada de dióxido de Manganês envolto num papel poroso, e mergulhados numa solução de cloreto de amónio e cloreto de Zinco. Esta bateria

⁵ William Cruickshank membro da Royal Society, foi um cirurgião militar e químico escocês, e também professor de química na Real Academia Militar de Woolwich.

⁶ William Sturgeon (22 de Maio de 1783 - 4 Dezembro 1850) foi um físico e inventor Inglês, que fez o primeiro electroímã, e inventou o primeiro prático motor eléctrico inglês.

⁷ John Frederic Daniell (Londres, 12 de Março de 1790 - Londres, 13 de Março de 1845) foi um químico e físico britânico.

⁸ Gaston Planté (Orthez, 22 de Abril de 1834 - Bellevue, 21 de Maio de 1889) foi um físico francês.

⁹ Georges Leclanché (1839 - 14 de Setembro de 1882) foi um engenheiro francês.

também conhecida como bateria de Leclanché, está na origem da primeira bateria seca também conhecida como bateria de Zinco-Carbono cuja patente foi registada por Carl Gassner¹⁰ em 1887.

A bateria de Níquel-Cádmio e a bateria de Níquel-Ferro foram inventadas em 1899 por Waldemar Jungner¹¹. Em 1912, G.N. Lewis inventou a bateria de Lítio, que só viria a ser comercializada em 1970. A Sony iniciou a produção da primeira bateria de íões de Lítio em 1991 [7], [12]. Na Figura 3-5 exhibe-se a comparação entre diferentes tipos de baterias.

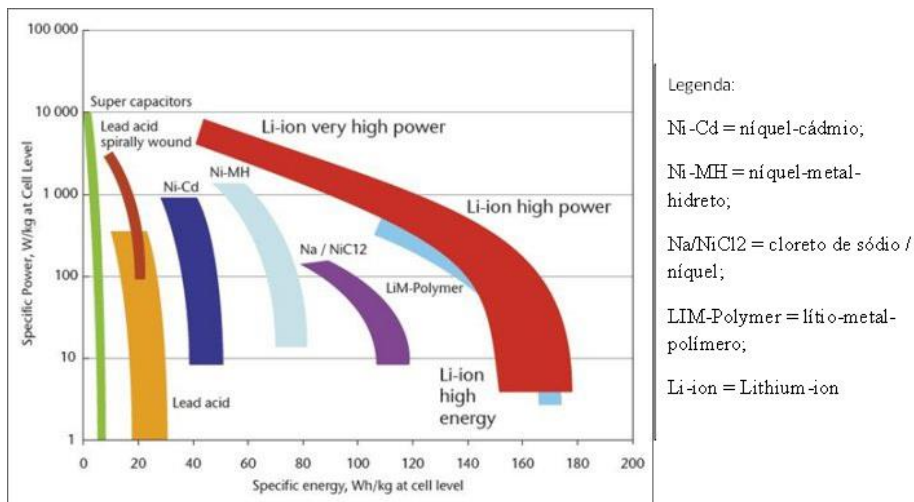


Figura 3-5: Densidade de potência e de energia para diferentes tipos de bateria [13].

¹⁰ Carl Gassner (Mainz , 17 de Novembro 1855 - 31 Janeiro 1942) foi um médico, cientista e inventor alemão.

¹¹ Ernst Waldemar Jungner, (19 de Junho de 1869 - 30 de Agosto de 1924), foi um inventor e engenheiro sueco.

3.2 História do veículo eléctrico

A descoberta da bateria e do motor eléctrico são anteriores à do motor de combustão interna (MCI). A invenção do veículo eléctrico é atribuída a várias pessoas. Em 1821 Faraday¹² publicou um trabalho que chamou de "rotação electromagnética" (princípio por trás do funcionamento do motor eléctrico). Em 1828, Anyos Jedlik¹³ inventou um motor eléctrico rudimentar, e criou um pequeno veículo experimental movido pelo seu motor (Figura 3-6).



Figura 3-6: O motor eléctrico (esquerda) e veículo eléctrico (direita) de Anyos Jedlik [14].

Em 1834, Thomas Davenport¹⁴, inventou o primeiro motor eléctrico DC, e recebeu a primeira patente americana de um motor eléctrico em 1837. Davenport aplicou o seu motor num pequeno veículo, que se movia numa pista circular electrificada (Figura 3-7).

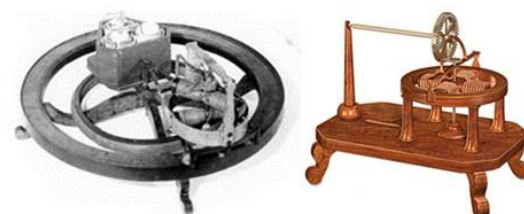


Figura 3-7: Modelo de um motor eléctrico de Davenport (esquerda) e motor que foi patenteado (direita) [7], [14].

Em 1835, Sibrandus Stratingh¹⁵ e Christopher Becker, inventaram um veículo de pequena escala, alimentado por baterias não recarregáveis (Figura 3-8).

Em 1881, William Ayrton¹⁶ e John Perry¹⁷ construíram o primeiro triciclo eléctrico (Figura 3-9), este usava dez células de Planté em série, tinha uma autonomia entre 10 e 25 km e uma velocidade máxima de 9 km/hora, foi também o primeiro veículo a ter iluminação eléctrica.

¹² Michael Faraday (Newington, Surrey, 22 de Setembro de 1791 - Hampton Court, 25 de Agosto de 1867) foi um físico e químico inglês.

¹³ Stephen Anyos Jedlik (11 Janeiro 1800 - 13 de Dezembro de 1895) foi um inventor, engenheiro e físico húngaro.

¹⁴ Thomas Davenport (09 de Julho de 1802 - 6 de Julho de 1851) foi um ferreiro.

¹⁵ Stratingh Sibrandus (09 Abril 1785 - 15 Fevereiro 1841) foi um professor e inventor.

¹⁶ William Edward Ayrton (14 de Setembro de 1847 - 8 de Novembro de 1908) foi um físico e engenheiro eléctrico Inglês.

¹⁷ John Perry (14 de Fevereiro de 1850 - 1920) foi um pioneiro engenheiro e matemático da Irlanda.



Figura 3-8: Modelo do carro de Stratingh e Becker, precursor do veículo elétrico [7].



Figura 3-9: Primeiro triciclo elétrico de William Ayrtton e John Perry [15].

Em 1884, Thomas Parker¹⁸ desenvolveu um veículo elétrico de quatro rodas parecido com uma carruagem sem os cavalos (Figura 3-10), ele desenvolveu vários protótipos durante a sua vida, alguns deles com freios hidráulicos nas quatro rodas, bem como as quatro rodas direccionais. A barreira dos 100 km/hora foi atingida em 1899 pelo “Le Jamais Contente” (Figura 3-11).

Em 1900, Ferdinand Porsche¹⁹ cria o primeiro veículo com sistema híbrido série, este tinha dois motores integrados nas rodas dianteiras, e um gerador de electricidade accionado por um motor de combustão interna que funcionava como extensor de autonomia (Figura 3-12). Também em 1900, Waldmar Jungner, que desenvolveu a bateria de Níquel-Cádmio, conseguiu uma autonomia de 150 km.



Figura 3-10: Um dos primeiros carros de Thomas Parker [16].

¹⁸ Thomas Parker (Shropshire, em 22 de Dezembro de 1843 - 05 de Dezembro de 1915)

¹⁹ Ferdinand Porsche (Maffersdorf, 3 de Setembro de 1875 - Stuttgart, 30 de Janeiro de 1951) foi um engenheiro austríaco.



Figura 3-11: “Le Jamais Contente”, primeiro veículo a atingir 100 km/hora [7].



Figura 3-12: Veículo de Ferdinand Porsche que usava dois motores eléctricos, um em cada roda dianteira [17].

Louis Antoine Krieger, criou em 1903 um veículo híbrido paralelo a gasolina (Figura 3-13). O veículo tinha um motor em cada roda dianteira com um segundo conjunto de enrolamentos paralelos para efectuar travagem regenerativa, sendo a energia produzida armazenada numa bateria para posteriormente alimentar o motor.



Figura 3-13: Veículo híbrido paralelo a gasolina de Louis Antoine Krieger [7].

3.3 A diminuição do interesse pelo veículo eléctrico

A diminuição do interesse foi provocada por vários acontecimentos. A evolução da civilização e das vias de comunicação entre cidades requeriam uma autonomia superior à que os veículos eléctricos podiam fornecer, a descoberta de petróleo abundante e barato, e a melhoria do motor de combustão interna trouxeram a resposta a essa necessidade. Henry Ford iniciou a produção em massa de veículos de combustão interna (Figura 3-14), e a vendê-los a preços mais acessíveis, em contrapartida o preço dos veículos eléctricos continuava a aumentar. A invenção da ignição eléctrica através de um motor de arranque eléctrico e uma bateria em 1912 eliminou a necessidade do uso da manivela. Foram diversos os motivos que levaram à diminuição do interesse pelo veículo eléctrico, no entanto, ironicamente, foi a invenção da ignição eléctrica um dos mais importantes [18].

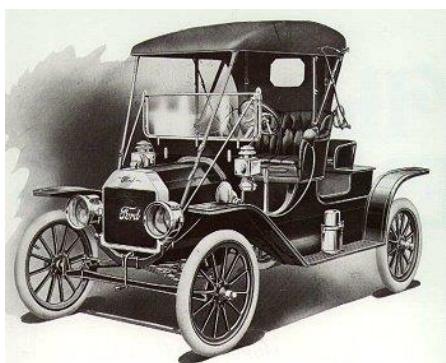


Figura 3-14: Ford T usando a ignição por manivela [19].

4. Estado da arte do veículo eléctrico

Neste capítulo são expostas e descritas as várias arquitecturas do veículo eléctrico existentes bem como as metodologias de carga e as infra-estruturas.

4.1 Veículo eléctrico

Designa-se por veículo eléctrico (VE) um veículo que utiliza na sua propulsão um ou mais motores eléctricos alimentados por células de combustível a Hidrogénio (PCEV) ou por baterias recarregáveis. Estes veículos podem ser totalmente eléctricos (BEV), ou usar também um motor de combustão interna ou outra tecnologia como GPL (gás de petróleo liquefeito) de forma a aumentar a sua autonomia (HEV/PHEV).

O VE integra-se num novo paradigma energético no entanto enfrenta alguns obstáculos à sua afirmação, entre eles o mais referido é o da autonomia que depende da tecnologia de armazenamento adoptada. Esta desvantagem trás outra associada que é a dos custos, o veículo eléctrico ainda é muito caro e esse custo provém dos preços das baterias. Outro problema é o facto de o dono de um VE ter a necessidade de possuir uma garagem para proceder a recarga do mesmo, pois essa é demorada e num posto de recarga é mais cara e menos segura sem supervisionamento.

Uma das vantagens do VE é a diminuição das emissões de CO₂ para a atmosfera, isto deve-se a uma maior eficiência quando comparado com os veículos de combustão interna. Esta eficiência está no processo de transformação da energia contida no petróleo na energia mecânica final. Em termos de energia primária/energia final obtida a transformação do petróleo em combustível é um processo mais eficiente do que o da produção de electricidade nas centrais termoeléctricas, no entanto o motor eléctrico tem muito mais eficiência do que o motor de combustão e no conjunto final, um veículo eléctrico torna-se mais eficiente que um veículo de combustão interna como mostra a Figura 4-1.

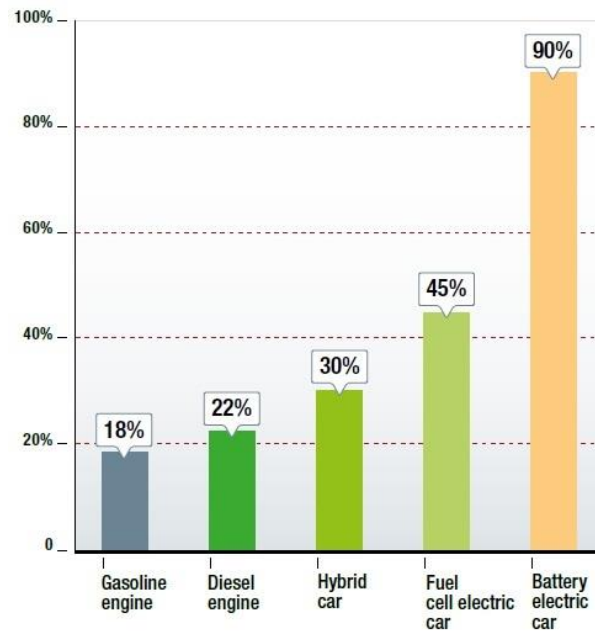


Figura 4-1: Eficiências comparativas entre VE's e veículo convencional [4].

Outra vantagem é a ajuda que a mobilidade eléctrica pode prestar à rede. Esta é um sistema em equilíbrio em que, num dado momento, o total de produção de energia tem de ser igual ao total do consumo. Com a cada vez maior percentagem de produção a ter origem em energias renováveis voláteis, que rapidamente podem duplicar ou passar para metade a sua produção, é necessário ter uma forma de manter o equilíbrio com capacidade de resposta rápida. Neste momento esse equilíbrio é mantido pelas barragens reversíveis no caso de excesso de produção e por centrais que estão em funcionamento *stand-by* (reserva girante) no caso de falta de produção. A médio/longo prazo, com milhares de veículos eléctricos estacionados e ligados à rede na maior parte do tempo, poderá ser possível usar as suas baterias como fonte de armazenamento de energia distribuída, podendo-se, assim, desligar as centrais em *stand-by*, que são caras e poluentes, pois em caso de ser necessária potência de estabilização de rede, todos os veículos podem fornecer de volta à rede um pouco de energia, que no somatório de todos será bastante. Paralelamente, a maioria dos veículos carregará à noite, precisamente quando a produção de energia eólica é maior, permitindo o seu aproveitamento, ao contrário do que, por vezes, acontece, quando parte desta produção tem de ser desligada ou utilizada no bombeamento de água em barragens reversíveis para não destabilizar a rede [20].

Actualmente existem arquitecturas a ser comercializadas com as seguintes siglas:

- BEV (*Battery Electric Vehicle*) – Veículo eléctrico puro.
- HEV (*Hybrid Electric Vehicle*) – Veículo eléctrico híbrido;
- PHEV (*Plug-in Hybrid Electric Vehicle*) – Veículo eléctrico híbrido, que pode recarregar as baterias através da rede;

Cada arquitectura com um nível de electrificação diferente (Figura 4-2).

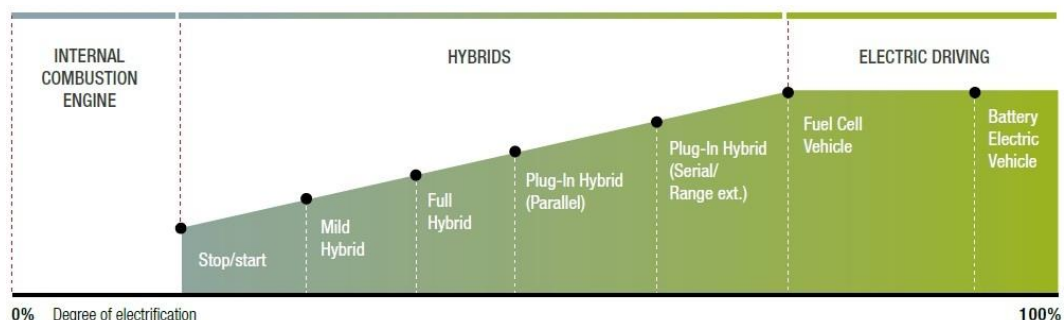


Figura 4-2: Níveis de electrificação por arquitectura [4].

4.1.1 Arquitecturas dos veículos eléctricos

BEV (*Battery Electric Vehicle*)

“O BEV caracteriza-se por ser um veículo totalmente eléctrico, também conhecido por veículo eléctrico puro, é alimentado por baterias recarregáveis, que são recarregadas através da rede ou em andamento através do sistema de regeneração de energia.

Entre as suas principais vantagens podem-se referir a elevada eficiência energética, o facto de não produzirem emissões no local de uso, e serem silenciosos. No entanto também apresentam desvantagens tais como a baixa autonomia quando comparados com os veículos de combustão interna e híbridos, o custo elevado das baterias, e o tempo de recarga. Como se observa as desvantagens estão relacionadas com o armazenamento de energia. As tecnologias de armazenamento de energia têm sofrido grandes evoluções, e existem já diversas tecnologias em fase de testes que diminuem estas desvantagens” [21].

Na Figura 4-3 ilustra-se a topologia de um veículo eléctrico puro.

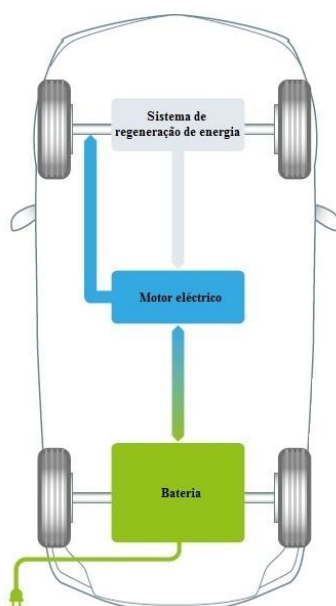


Figura 4-3: Arquitectura do veículo eléctrico puro [4].

Nos veículos eléctricos puros a maioria das ligações mecânicas existentes nos veículos de combustão interna é substituída por ligações eléctricas, isto traduz-se numa maior eficiência energética devido a diminuição de atritos. Na Figura 4-4 representam-se os três subsistemas que fazem parte de um BEV, subsistema de propulsão eléctrica, subsistema fonte e armazenamento e subsistema auxiliar.

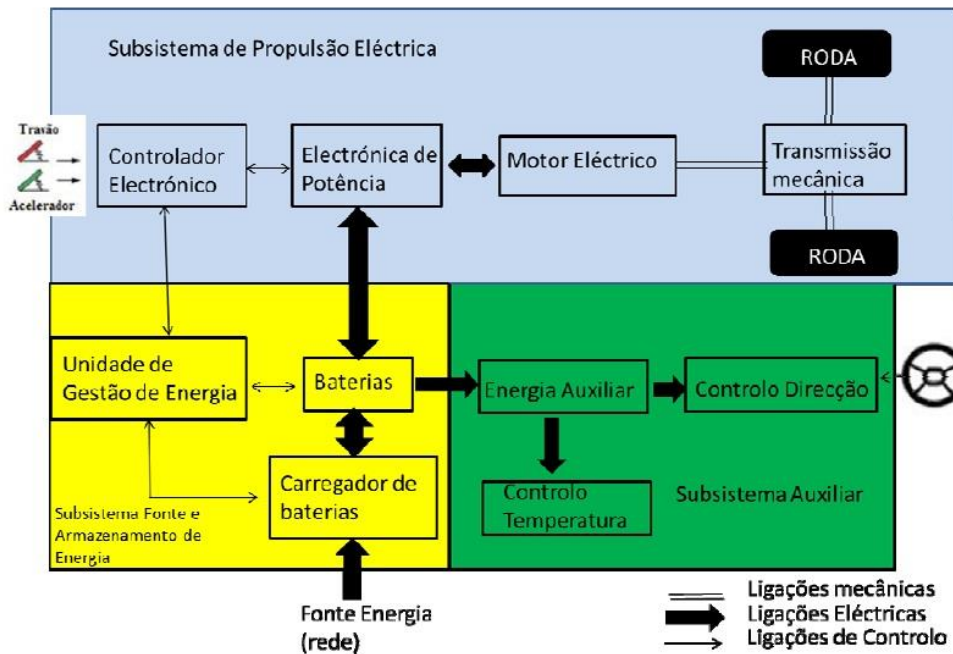


Figura 4-4: Subsistemas de um BEV [21].

“A partir das entradas de controlo dos pedais do veículo, o controlador electrónico disponibiliza sinais de controlo adequados à ligação e corte dos dispositivos de electrónica de potência, cuja função é a regulação do fluxo de energia entre a fonte de armazenamento de energia e o motor eléctrico. O sentido inverso de fluxo de energia deve-se à energia regenerativa, que será armazenada na unidade de armazenamento de energia. Existe uma “colaboração” entre a unidade de gestão de energia e o controlador electrónico de modo a controlar a recuperação de energia regenerativa de travagem, cooperando igualmente com a unidade de reabastecimento de energia, de modo a gerir o respectivo reabastecimento. A fonte auxiliar de energia disponibiliza a potência necessária com diferentes níveis de tensão para todos os módulos auxiliares, como o controlo da temperatura, unidade de controlo de direcção e de toda a electrónica de controlo” [22].

Como exemplo de um veículo eléctrico puro já a ser comercializado, temos o Tesla model s (Figura 4-5) e as suas características no Quadro 4-1.



Figura 4-5: Tesla model s [23].

Quadro 4-1: Características do Tesla model s [23].

Lotação	5 adultos + 2 crianças
Autonomia	≈ 420 km
Velocidade max.	≈ 200 kmh
Bateria	80 kWh (Bateria de iões de Lítio)

HEV (*Hybrid Electric Vehicle*) e PHEV (*Plug-in Hybrid Electric Vehicle*)

O HEV é o resultado da conjugação do veículo de combustão interna com o veículo eléctrico, o HEV usa um motor de combustão interna de forma a aumentar a autonomia do veículo, e usa um motor eléctrico para aumentar a eficiência energética total, melhorar a performance dinâmica e baixar o consumo e as emissões de CO₂. Existem híbridos a gasolina, a *diesel* e mais recentemente a GPL, estes últimos são os que apresentam mais vantagens a nível do custo da mobilidade e de emissões. Dentro dos veículos híbridos existem vários graus de hibridação (Quadro 4-2).

Quadro 4-2: Grau de hibridação [21].

Tipo de híbridos	Exemplo de veículos
<i>Micro hybrid</i>	Citroen C3 Stop&Start
<i>Mild hybrid</i>	Honda Civic Hybrid
<i>Full hybrid</i>	Toyota Prius Hybrid
<i>Hybride rechargeable (plug-in hybrid)</i>	Chevrolet Volt

Micro hybrid é o primeiro nível de hibridação e é conhecido como o sistema *Stop&Start*, nesta tecnologia o motor de arranque funciona também como alternador, e quando o veículo desacelera ou pára o motor de combustão interna é desligado diminuindo o consumo e as emissões de CO₂, o motor é reiniciado automaticamente quando o pedal do acelerador é pressionado.

Mild hybrid é o segundo nível de hibridação, os veículos com este nível de hibridação possuem motores de arranque maiores que os convencionais, como no sistema *stop&start* o motor de combustão interna é desligado sempre que o veículo trave ou pare, o motor de arranque que funciona também como gerador pode recuperar energia na desaceleração através da travagem regenerativa. Além dessa função o motor de arranque auxilia o motor de combustão interna no arranque, quando a inercia é maior, resultando assim numa maior performance e poupança de combustível que se traduz em maior eficiência energética.

Full Hybrid é o nível de hibridação mais conhecido e utilizado, os veículos com este nível de hibridação são totalmente híbridos e a sua propulsão pode ser obtida através de uma só fonte de energia (eléctrica ou combustão interna) ou as duas em simultâneo.

Hybrid rechargeable é a versão *plug-in* do *full hybrid* ou seja é igual ao *full hybrid* mas permite o recarregamento das baterias através da rede eléctrica.

Os veículos eléctricos híbridos (*full hybrid* e *hybride rechargeable*) podem-se agrupar em duas arquitecturas principais, os veículos eléctricos híbridos com arquitectura série e os veículos eléctricos híbridos com arquitectura paralela, também existe uma arquitectura híbrida mista, que conjuga as duas arquitecturas anteriores tirando partido de ambas e aumentando assim a flexibilidade de utilização.

Estas arquitecturas apresentam as seguintes vantagens relativamente ao veículo convencional [24]:

1. Redução da potência do motor de combustão (bem como do tamanho);
2. Maior suavidade na operação do motor a combustão, com picos de binários reduzidos;
3. Maior controlabilidade do sistema.
4. Travagem regenerativa;
5. Redução da utilização do travão convencional;
6. Redução do ruído.

Arquitectura híbrida série

Na arquitectura híbrida série o motor de combustão interna (MCI) funciona como extensor de autonomia, o MCI está acoplado a um gerador eléctrico que fornece electricidade às baterias e ao sistema de propulsão composto pelo motor eléctrico que tracciona o veículo. As baterias armazenam a energia proveniente da travagem regenerativa e do gerador. O motor eléctrico pode receber energia das baterias, do gerador acoplado ao MCI ou por ambos ao mesmo tempo, não existe ligação física entre o MCI e o veio das rodas, a tracção é 100% eléctrica. Quando as baterias estão totalmente carregadas o veículo funciona como um eléctrico puro, abaixo de um determinado estado de carga ou a altas rotações o MCI entra em funcionamento auxiliando através do gerador o motor eléctrico, se a exigência de potência do veículo for abaixo da capacidade do MCI, o excesso é aproveitado para recarregar as baterias.

Comparativamente com a arquitectura paralela a arquitectura série apresenta as seguintes vantagens [24], [25]:

1. Não existir um acoplamento mecânico entre o motor de combustão e o eixo das rodas, ou seja, o motor de combustão pode operar no regime de funcionamento óptimo, independentemente do que se passa na tracção;
2. A tracção é exclusivamente eléctrica, o que associado à característica binário velocidade deste tipo de motores pode evitar o uso de transmissões adicionais, reduzindo nos componentes e conseqüentemente nos custos. Além disso permite a utilização de dois, ou até quatro, motores eléctricos de tracção nas rodas que permite obter configurações alternativas.
3. Capacidade superior de travagem em relação ao paralelo, reduzindo a utilização do travão mecânico, aumentando a eficiência e a segurança do sistema;
4. Eliminação da caixa de transmissão e, conseqüentemente, aumento do conforto na condução do veículo.

No entanto esta arquitectura também tem desvantagens [25]:

1. A dupla conversão de energia entre a fonte e a tracção, o que leva a perdas adicionais;
2. Tem um elemento adicional, o gerador, com peso e custos significativos;

Nas Figuras 4-6 e 4-7 é apresentada a arquitectura híbrida série. Como exemplo de um veículo eléctrico híbrido série já a ser comercializado, temos o Fisker Atlantic (Figura 4-8).

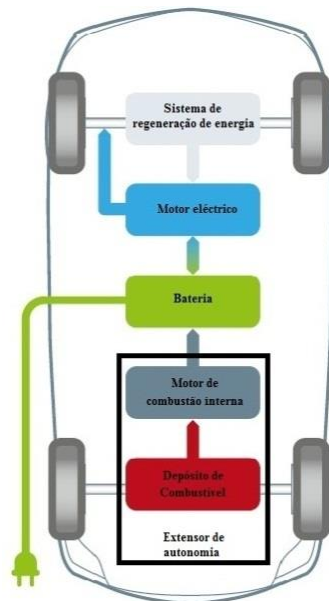


Figura 4-6: Arquitectura série do veículo eléctrico híbrido, PHEV [4].

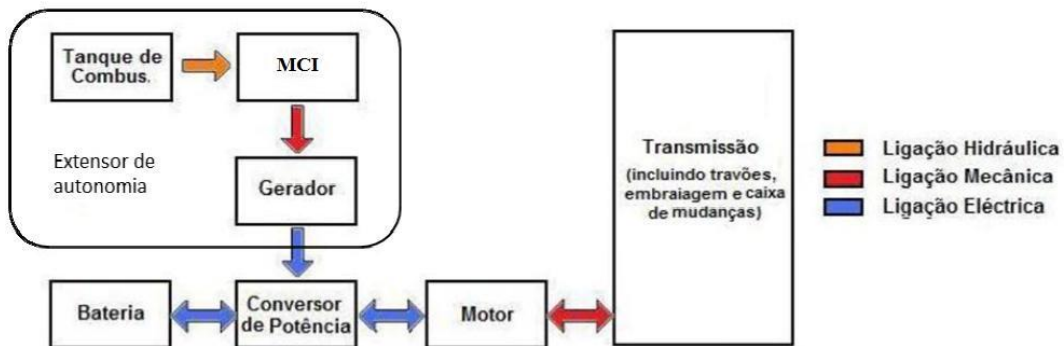


Figura 4-7: Especificação das ligações da arquitectura híbrida série do veículo eléctrico híbrido [26].



Figura 4-8: Fisker Atlantic [27].

Arquitectura híbrida paralela

Na arquitectura híbrida paralela existem dois motores ligados ao veio de tracção, o motor de combustão interna que representa o papel principal na propulsão do veículo e o motor eléctrico que o auxilia quando é exigido binário extra, por exemplo na aceleração. O motor eléctrico pode também traccionar o veículo a velocidades reduzidas e desempenha também o papel de gerador, tanto nas travagens como nas desacelerações, de forma a recarregar as baterias. Relativamente a arquitectura hibrida serie esta apresenta as seguintes vantagens [25]:

1. Ambos os motores (combustão e eléctrico) fornecem binário às rodas aumentando a potência final;
2. O motor eléctrico é usado para assistir o motor de combustão, o que permite um sub dimensionamento deste, poupando em termos de peso e custo;
3. Além de que evita o uso de um componente adicional, o gerador, com ganhos em termos de peso, e custos.

As principais desvantagens desta arquitectura são [25]:

1. Não permitir que o motor de combustão trabalhe em regimes de rendimento óptimo, devido ao acoplamento mecânico existente entre este e a transmissão;
2. A presença do acoplamento mecânico leva a uma maior complexidade na estrutura e no controlo, e sendo um componente mecânico está também sujeito a desgaste.

Na Figura 4-9 e 4-10 é apresentada a arquitectura híbrida paralela na sua vertente normal e plug-in. Como exemplo de um veículo eléctrico híbrido paralelo já a ser comercializado, temos o Toyota Prius (Figura 4-11).

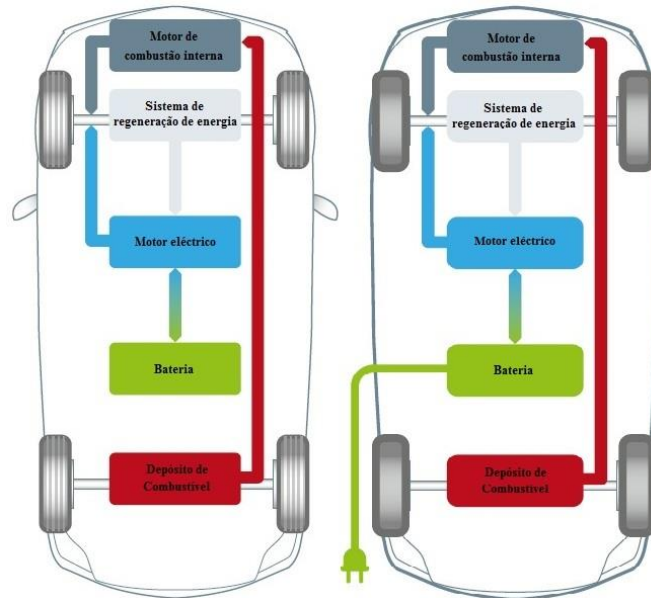


Figura 4-9: Arquitectura paralela do veículo eléctrico híbrido, HEV (esquerda), PHEV (direita) [4].

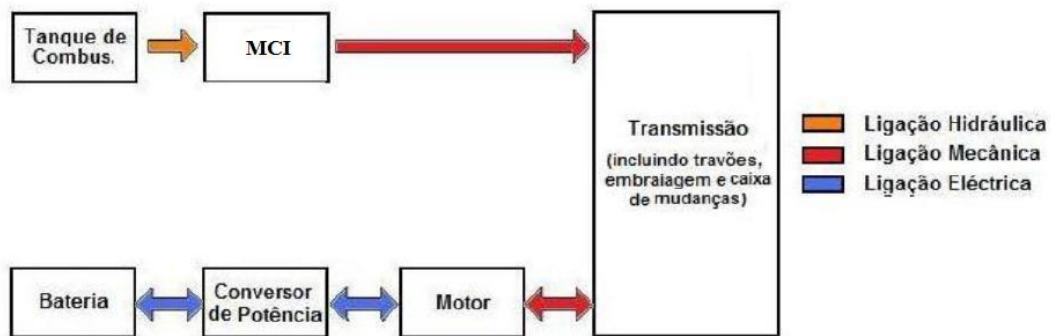


Figura 4-10: Especificação das ligações da arquitectura paralela do veículo eléctrico híbrido [26].



Figura 4-11: Toyota Prius [28].

Arquitectura híbrida Mista

A arquitectura híbrida mista conjuga a arquitectura híbrida série com a arquitectura híbrida paralela. Nesta o motor de combustão interna além de estar ligado ao veio de transmissão como na arquitectura paralela também se encontra ligado ao gerador como na arquitectura série. Esta arquitectura reúne as vantagens das arquitecturas série e paralela, no entanto torna-se mais complexa e mais cara.

Na Figura 4-12 é apresentada a arquitectura híbrida mista. Como exemplo de um veículo eléctrico híbrido misto já a ser comercializado, temos o Opel Ampera (Figura 4-13).

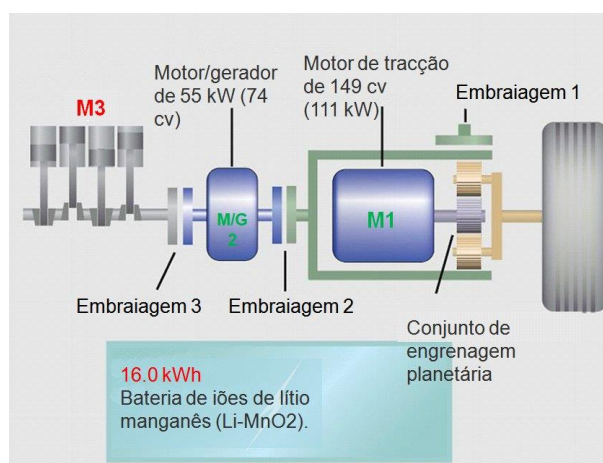


Figura 4-12: Sistema Voltec.



Figura 4-13: Opel Ampera com arquitectura híbrida mista [29].

O mercado tem optado por promover o veículo familiar, no entanto com as dificuldades das empresas cujas despesas têm levado ao fecho de muitas, o investimento em veículos ligados á industria como camiões, carrinhas e carros comerciais parece ser uma melhor aposta. Pessoas desempregadas não terão meios para comprar veículos eléctricos desta forma torna-se essencial avivar a indústria de forma a diminuir o desemprego e dar condições às pessoas para comprar. Um dos exemplos dessa aposta são os camiões híbridos da Volvo (Figura 4-14).

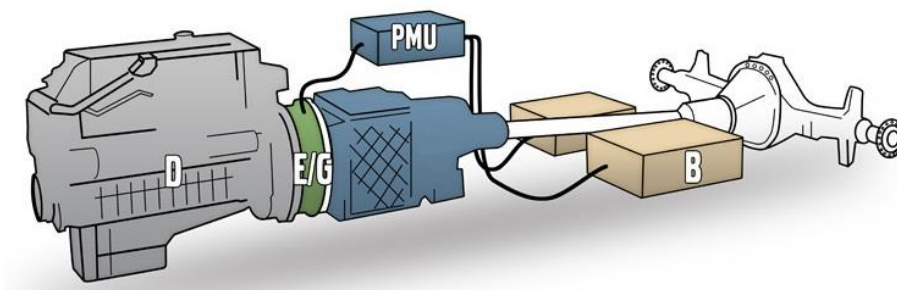


Figura 4-14: Arquitectura do camião híbrido da Volvo [30].

Quando imobilizado é o motor eléctrico (E/G) que inicia o movimento fornecendo um torque elevado posteriormente o motor a diesel (D) entra em funcionamento, na travagem o motor funciona como gerador carregando as baterias (B), o PMU é a unidade que gere a potência entregue ao motor e o carregamento das bateria [30].

4.2 Infra-estruturas e metodologias de carga

Com o ressurgimento dos veículos eléctricos e do interesse das marcas em não perder a corrida, surgem diferentes metodologias de carga. Por forma a impor alguma organização foi criada a norma internacional IEC 62196 que regula o tipo de ligações eléctricas e os modos de carregamento para veículos eléctricos. Actualmente existem vários sistemas, entre eles: CHAdeMO no Japão (para carregamento DC), Mennekes na Europa, SAE J1772 na América do Norte. Mais recentemente a Renault patenteou um carregador que se adapta a vários níveis de potência apelidado de Camaleão.

4.2.1 Infra-estruturas

Em Portugal foi criado o programa MOBILE, cujo objectivo é implementar uma rede de abastecimento para veículos eléctricos no território nacional, com o objectivo de facilitar a transição para a mobilidade eléctrica.

Esta rede disponibiliza dois modos de carregamento, o normal em que o carregamento é feito entre 6 a 8 horas e o rápido onde o carregamento é feito entre 20 a 30 minutos (Figura 4-15).



Figura 4-15: Postos de abastecimento MOBILE [31].

CHAdeMO

CHAdeMO é um protocolo de carregamento rápido para carregar baterias de veículos eléctricos, entrega até 62,5 kW em tensão até 500 V DC e corrente até 125 A, através de uma ficha especial (Figura 4-16).



Figura 4-16: Ficha CHAdeMO [32].

Mennekes

A ficha de carregamento da Mennekes (Figura 4-17) está capacitada para ligação monofásica de 230 V com correntes de carga de 16 A (3.7 kW) e para ligações trifásicas de 400 V com correntes até 63 A (43.5 kW). Esta é constituída por sete pinos: L1, L2, L3, Neutro, Terra, controlo e Detector de proximidade.



Figura 4-17: Ficha Mennekes [33].

SAE J1772

A SAE J1772 é uma norma americana. A ficha constituída por cinco pinos (Figura 4-18): L1, L2 ou Neutro, Terra, Controlo e Detector de proximidade, é projectada para dois sistemas monofásicos um de 120 V até 16 A (L1) e outro de 240 V até 80 A (L2).



Figura 4-18: Ficha SAE J1772 [34].

Carregador Camaleão da Renault

“O novo carregador patenteado pela Renault é compatível com qualquer nível de potência até 43 kW (Quadro 4-3) e que permite carregar o ZOE (o único automóvel a utilizar este carregador neste momento), em função da potência disponível, entre 30 minutos e 9 horas. Por exemplo, com uma potência de 22 kW, o ZOE carrega-se, integralmente, em apenas uma hora. Este nível de potência intermediária preserva melhor a duração das baterias e tem menos impacto na rede eléctrica do que uma carga rápida a 43 kW” [35].

Quadro 4-3: Tempos de carga em função da potência do carregador Camaleão [35].

Tipo mono e trifásico até 43 kW	
Potência	Tempo de recarga
3 kW (monofásico 16 A)	9 Horas
22 kW (trifásico 32 A)	1 Hora
43 kW (trifásico 63 A)	30 Minutos

4.2.2 Metodologias de carga

Nos sistemas de carga dos veículos eléctricos são considerados dois factores, a rapidez de operação e o instante em que é realizada. No que diz respeito a rapidez de operação consideram-se três modos: carga lenta, carga semi-rápida e carga rápida. Relativamente ao instante, consideram-se também três alternativas: carga cega (*dumb charge*), carga inteligente (*smart charge*) e V2G (*Vehicle to Grid*) [36].

Rapidez da operação

Carga lenta (em AC)

“Os sistemas de carga lenta consistem na carga do veículo eléctrico numa vulgar tomada de 230 V, 50 Hz e 16 A. Para suportar este modo, os VE’s integram a bordo um carregador que converte a tensão alternada (AC) da rede no nível de tensão das suas baterias utilizando um Sistema de Gestão da Carga da Bateria (BMS).

Como a este modo está associada uma potência da ordem dos 3,6 kW, para os VE’s que estão a chegar ao mercado, cuja capacidade da bateria oscila entre os 16 kWh e os 24 kWh, os tempos de carga variam entre as cinco e as oito horas, caso as baterias se encontrem muito descarregadas. Sem dúvida que estes tempos são longos, mas não constituem um obstáculo se atendermos ao tipo de uso que será dado a esses veículos e ao facto de que a maioria dos automóveis eléctricos irão circular cerca de duas horas por dia, estando 22 horas imobilizados e, muitas vezes, próximos de uma tomada” [36].

A utilização deste modo de carga depende da presença de um dispositivo de corrente residual (RCD), também chamado disjuntor diferencial, de $I_n \leq 30\text{mA}$ que deve ser fornecido como parte do equipamento de alimentação condutiva do VE para sistemas com ligação à terra, no lado da rede de alimentação.

A presença de um diferencial de elevada sensibilidade é obrigatória para tomadas que alimentem VEs. Existem também RCDs que podem ser instalados no próprio cabo de carregamento, que são uma opção quando se desconhece a instalação eléctrica em utilização [21].

Carga semi-rápida (em AC)

“Os sistemas de carga semi-rápida permitem efectuar o abastecimento do VE num período de uma a duas horas. Para tal é necessário ter disponível no posto de carga uma potência da ordem dos 10 kW a 20 kW por ponto de abastecimento, valores que exigem uma potência contratada com tarifa mais dispendiosa, não acessível em muitos locais, disponibilizada sob a forma de tensão trifásica. Os VE’s para suportarem este tipo de carga, têm que possuir um carregador trifásico que faz a conversão da tensão alternada trifásica da rede para o valor de tensão DC das baterias” [36].

Carga rápida (em DC)

“Entende-se por carga rápida um modo que permite realizar a carga de 80% da bateria entre 20 a 30 minutos, ou ainda menos. Para transferir a energia em causa (energia = potência x tempo) em pouco tempo é necessário um sistema que debite elevada potencia. Valores que se situam entre 40 kW e os 100 kW por ponto de carga e que exigem postos de transformação, uma infra-estrutura e tarifa de potência contratada muito mais dispendiosa. Com esta alternativa a solução passa por colocar electrónica de potência estacionária no posto de abastecimento, sendo a energia transferida sob a forma de corrente contínua (DC). Se o valor de tensão de serviço de um VE for, por exemplo, 330 V, estamos a falar de correntes da ordem dos 150 a 300 A. Estes sistemas exigem uma rede robusta e não disponível em muitos locais, integram electrónica de potência dispendiosa, possuem cabos de elevada secção e, por tudo isto, não podem ser baratos. Além disso, os valores de potência acima referidos são para apenas um posto de carga. Se quisermos ter vários postos, há que multiplicar a potência absorvida da rede pelo seu número. Há ainda que ter em consideração os impactos dessas cargas não lineares nas perturbações introduzidas ao nível de cavas de tensão e de injeção de poluição harmónica. Para mitigar estes aspectos, poderá vir a associar-se a este modo de carga o uso de tecnologia de armazenamento de energia eléctrica a nível local para suprir as potências em causa.

Por fim, as cargas rápidas submetem a tecnologia electroquímica de armazenamento de energia a esforços térmicos que necessitam de ser controlados para que não se destruam, tendo, inevitavelmente, repercussões na redução do tempo de vida das baterias” [36].

Instante da operação

Carga Cega (*dumb charge*)

O modo de carga cega é o modo de carga mais simples em que o proprietário liga o seu veículo eléctrico à rede quando quiser sem ter qualquer preocupação com o estado da rede, se esta estiver sobrecarregada as protecções actuam. Este modo de carga se usado em larga escala pode causar problemas a rede e às instalações a ela ligada [21].

Carga inteligente (*smart charge*)

O modo de carga inteligente contrariamente a carga cega utiliza um sistema de gestão de carga escalonada, que só vai permitir a recarga do veículo eléctrico em horas de menor subcarga da rede. O sistema de gestão pode receber informação em tempo real do estado da rede e gerir a recarga do veículo. Os utilizadores que utilizarem este tipo de carga serão beneficiados com tarifas mais baixas, por isso para além de se diminuir o impacto na rede este modo de carregamento representa uma poupança em termos de tarifas para o utilizador [21].

V2G (*Vehicle to Grid*)

O V2G (Figura 4-19) representa um sistema em que a energia armazenada no veículo pode ser vendida à rede eléctrica, quando o veículo não está a ser usado e se encontra ligado a esta. As preferências de carregamento e descarregamento devem obedecer a certas normas e protocolos. “A energia a injectar na rede é definida pelo condutor, de modo a salvaguardar as suas necessidades. As necessidades de armazenamento de energia por parte do condutor e por parte da rede ocorrem em instantes distintos, o que pode abrir portas a estratégias de conciliação, tal como o carregamento das baterias durante o vazio beneficiando do período de baixo consumo” [37].

“Os futuros veículos eléctricos (desde que com capacidade V2G) poderão participar, como um serviço auxiliar de produção no qual o V2G faz a adaptação da carga à capacidade de

geração de energia, ao invés dos sistemas atuais que ajustam a produção de energia à carga. Se pensarmos num futuro onde a maior parte dos veículos poderão ser V2Gs, poderemos ter milhares de V2Gs a contribuir com uma pequena quantidade de potência.

A energia fornecida pelos veículos eléctricos, como um serviço auxiliar, é caracterizada por ter uma qualidade superior: resposta rápida, disponível em pequenas quantidades e distribuída. A quantidade disponível deste tipo de energia depende do número de veículos ligados à rede e pode ser estimada com dados de tráfego rodoviário. Estas características complementam os mercados de reserva, ponta e regulação. Estes mercados têm associados curtos tempos de despacho o que favorece a falta de capacidade das baterias, além de necessitarem de resposta rápida e disponibilidade permanente, características que são o ponto forte de V2G. Para o sucesso das operações V2G, a necessidade de redes inteligentes (*smart grids*), torna-se essencial” [21].

Uma rede inteligente é uma rede que:

- Se auto-repara
- Adaptativa
- Optimizada
- Distribuída
- Integrada
- Segura

Surge assim um Operador de Sistema, responsável pelo controlo das operações V2G, podendo usar para efeitos de comunicação uma rede *wireless*. O ISO (*Independent System Operator*) deverá ter as seguintes funções [21]:

- Deve atribuir um endereço IP a cada veículo;
- Comunicar à rede eléctrica que determinado veículo está pronto para a operação V2G;
- Gerir permissões de acesso à rede e a monitorização do trânsito de energia.

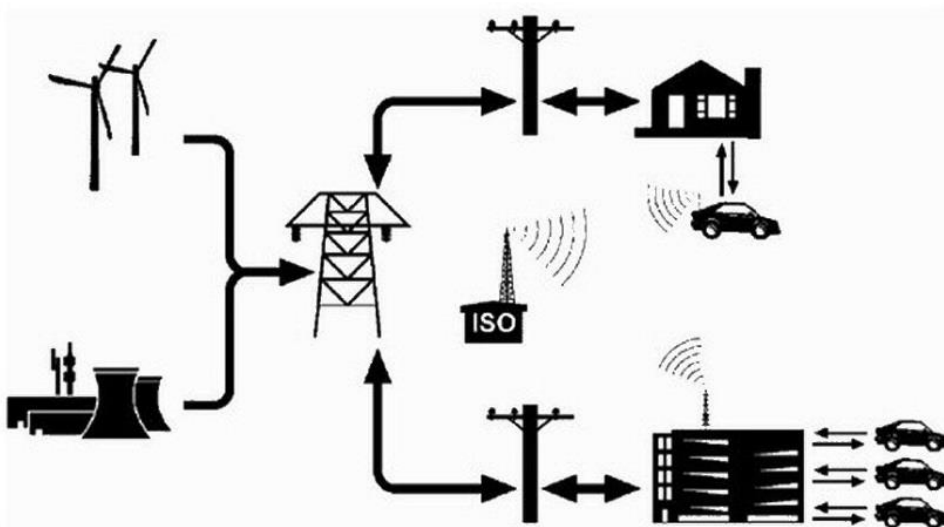


Figura 4-19: Sistema V2G [38].

4.3 Sistema de carga indutivo

A primeira transmissão de energia sem fios foi feita por Nicola Tesla²⁰ por volta de 1891. O princípio de funcionamento deste sistema é o electromagnetismo. Electromagnetismo é o campo da ciência que descreve como o fenómeno eléctrico e magnético estão relacionados. A teoria foi desenvolvida no século XIX por cientistas como Ørsted, Ampère, Faraday, Gauss e Maxwell.

Equações

A física básica de interacção eléctrica e magnética pode ser descrita pelas seguintes equações [39].

$$\text{Faraday} \quad \oint E \cdot dl = \frac{-d\Phi_B}{dt} \quad (4-1)$$

$$\text{Ampère - Maxwell} \quad \oint B \cdot dl = \mu_0 \left(I + \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \right) \quad (4-2)$$

Eq. (4-1) diz respeito a uma mudança do fluxo magnético com o campo eléctrico (induzido). Eq. (4-2) descreve como uma corrente I pode produzir um campo magnético, e também pode ser associada com uma mudança no fluxo eléctrico (corrente de deslocamento).

Quando uma corrente alternada flui através de uma bobine primária, e de acordo com a eq. (4-2) é produzido um campo de indução magnética correspondente, resultando num fluxo magnético Ψ_{11} . Algumas das linhas de campo podem ligar uma bobine secundária, resultando num fluxo de ligação Ψ_{21} . De acordo com a eq. (4-1) isso vai induzir uma tensão sobre a bobine secundária. Se uma corrente flui no secundário, é produzido um fluxo magnético Ψ_{22} e o seu fluxo de ligação é dado por Ψ_{12} .

A quantidade de fluxo magnético que a bobine irá produzir para uma determinada corrente depende da auto indutância da bobine.

A indutância é medida em Henry (H) e depende da forma, tamanho, do número de espiras da bobine e da presença de material magnético nos arredores. A auto indutância da bobine 1 e 2 é definida pelas eq. (4-3) e (4-4) [39].

$$\text{Auto indutância primário} \quad L_1 = \frac{\Psi_{11}}{i_1} \quad (4-3)$$

$$\text{Auto indutância secundário} \quad L_2 = \frac{\Psi_{22}}{i_2} \quad (4-4)$$

$$\text{Indutância mutua} \quad M = \frac{\Psi_{21}}{i_1} = \frac{\Psi_{12}}{i_2} \quad (4-5)$$

²⁰ Nikola Tesla (10 de Julho de 1856 - 07 de Janeiro de 1943) foi um sérvio-americano inventor, engenheiro eléctrico, engenheiro mecânico, físico conhecido pela invenção da corrente alternada e transmissão sem fios.

A eq. (4-5) define a indutância mútua M , que indica quanto do fluxo magnético produzido a partir de uma bobine liga a outra. Consequentemente, a indutância mútua tem uma dependência muito forte do espaço entre as duas bobines. E pode ser provado que $M_{21}=M_{12}=M$.

Num transformador ideal, todo o fluxo magnético produzido flui através de ambas as bobines. Isso implica que $M = \sqrt{L_1 L_2}$. Num transformador real existe algum fluxo de dispersão, portanto, $M < \sqrt{L_1 L_2}$. Um indicador da qualidade de um transformador é o coeficiente de acoplamento k , definido através da eq. (4-6) [39].

$$\text{Coeficiente de acoplamento} \quad k = \frac{M}{\sqrt{(L_1 \cdot L_2)}}, 0 \leq k \leq 1 \quad (4-6)$$

Um modelo equivalente da indutância mútua é mostrado na Fig. 4-20.

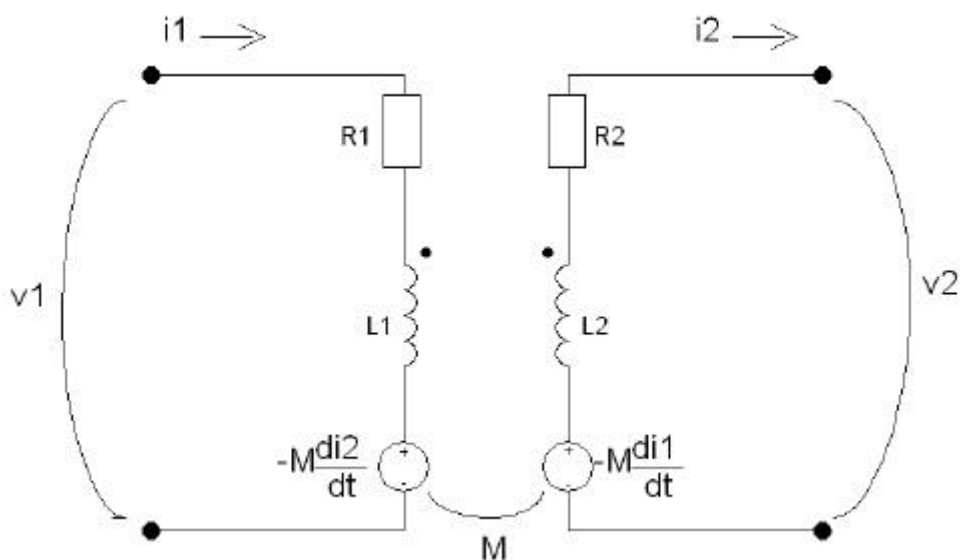


Figura 4-20: Modelo equivalente da indutância mútua [39].

De acordo com este modelo, as tensões entre os terminais são:

$$v_1(t) = L_1 \cdot \frac{di_1(t)}{dt} - M \cdot \frac{di_2(t)}{dt} \quad (4-7) \quad v_2(t) = L_2 \cdot \frac{di_2(t)}{dt} - M \cdot \frac{di_1(t)}{dt} \quad (4-8)$$

Se a resistência da bobine é conhecida, as equações são (4-9) e (4-10).

$$v_1(t) = R_1 \cdot i_1(t) + L_1 \cdot \frac{di_1(t)}{dt} - M \cdot \frac{di_2(t)}{dt} \quad (4-9)$$

$$v_2(t) = R_2 \cdot i_2(t) + L_2 \cdot \frac{di_2(t)}{dt} - M \cdot \frac{di_1(t)}{dt} \quad (4-10)$$

O rácio é definido como, $a = \frac{N_1}{N_2}$ onde N_1 e N_2 são o número de espiras do primário e do secundário respectivamente.

L_m é chamada de indutância principal e é definida como, $L_m = a \cdot M$.

Resistência do enrolamento

Quando são aplicadas altas frequências, as correntes alternadas no condutor tendem a concentrar-se na superfície do mesmo. Este efeito é chamado pelicular e faz com que a resistência efectiva do condutor aumente com a frequência da corrente. A distância δ é chamada profundidade pelicular e é definida como a profundidade abaixo da superfície, onde a densidade de corrente diminuiu para $1/e \approx 0,37$ da densidade de corrente na superfície. A profundidade pelicular pode ser calculada com eq. 4-11 [39].

$$\text{Profundidade} \quad \delta = \frac{1}{\sqrt{(\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma)}} \quad (4-11)$$

f é a frequência da corrente, μ é a permeabilidade e σ é a condutividade do material. Para o cobre, $\mu=4\pi \cdot 10^{-7}$ (H/m) e $\sigma=5,80 \cdot 10^7$ (S/m) que para 100 kHz, dá uma profundidade de pele de 0,21 mm.

Outro efeito que contribui para um aumento da resistência com frequência é o efeito de proximidade.

Blindagem

A forma como um campo magnético interage com um material depende da permeabilidade magnética e a condutividade do material. Depende, também, do ângulo de incidência do campo e da frequência do campo magnético [39].

Transferência de potência por acoplamento indutivo (ICPT²¹)

ICPT's usam o acoplamento indutivo entre as bobines, para transferir energia a uma determinada distância. Eles usam o mesmo princípio que os transformadores, com a diferença que a (folga) entre a bobine primária e a secundária resulta em elevada perda de indutância e mau acoplamento entre as bobines [39].

Consequências do mau acoplamento magnético

Num ICPT o mau acoplamento magnético entre a bobine do primário e a do secundário resulta numa grande dispersão de fluxo.

Esse mau acoplamento também significa que a impedância de magnetização (L_m) torna-se muito baixa, resultando numa corrente de magnetização elevada. Se a grande dispersão não for compensada, causa perdas elevadas devido às grandes correntes no sistema.

Portanto, a dispersão e a impedância de magnetização devem ser compensadas o que é feito com condensadores ressonantes no primário e secundário.

A ressonância entre os elementos indutivos e capacitivos no circuito eléctrico ocorre quando toda a energia magnética na bobina fluiu para o condensador e retorna novamente. Isso acontece quando a impedância do elemento indutivo (eq. 4-12) é igual a impedância do elemento capacitivo eq. (4-13). Logo a ressonância ocorre numa determinada frequência f_0 , como mostra a eq (4-14) [39].

$$Z_{indutor} = (2 \cdot \pi \cdot f) \cdot L \quad (4-12)$$

²¹ Do termo inglês ICPT – Inductively Coupled Power Transfer

$$Z_{capacitor} = \frac{1}{(2. \pi. f). C} \quad (4-13)$$

$$2. \pi. f_0 = \frac{1}{\sqrt{(L. C)}} \quad (4-14)$$

Para uma eficiente transferência de energia é necessária uma alta frequência de ressonância preferencialmente da ordem dos 100 kHz. A alta frequência resulta numa quantidade substancial de perdas nos circuitos de electrónica de potência, de forma a minimizar estas perdas deve ser usada a comutação suave (*soft switching*). Na comutação suave, a ressonância é usada para atingir altas frequências de saída diminuindo assim as altas perdas de comutação. Com o uso de alta frequência de ressonância consegue-se acoplamentos magnéticos com rendimentos na ordem dos 90%, com distância entre o emissor e receptor da ordem dos 20 centímetros. É de realçar que quanto menor for a distância maior será a eficiência da transferência de energia [21].

No sistema de recarga indutiva, aplicado à mobilidade eléctrica o primário é colocado no solo e o secundário está sob o carro, no chassi (Figura 4-21). Na Figura 4-22 está a ilustração deste modo de recarga e no Quadro 4-4 encontra-se as especificações técnicas de um destes sistemas desenvolvido pela Witricity onde se pode salientar a frequência de operação de 145 kHz.



Figura 4-21: Base emissora e receptor da Witricity [40].

Quadro 4-4: Wit-3300 [40].

Características	
Frequência de operação	145 kHz
Potência de saída	DC: 300 W – 3.3 kW
Tensão de saída	DC: 350 VDC – 400 VDC
Eficiência (distância)	90% (até 20 cm)

Este tipo de transferências de energia permite fazer o carregamento totalmente automatizado. Os sistemas são colocados no local de estacionamento e inicia o carregamento automaticamente, após o utilizador dar ordem para carregar. Sem necessidade do mesmo tocar em cabos ou outros equipamentos.

A comunicação entre o veículo e as infra-estruturas de recarga é efectuada recorrendo a uma tecnologia sem fios, onde o controlador envia à central a informação necessária para a realização do recarregamento, em segurança. Alguns dos dados enviados são o estado de carga e a temperatura das baterias, para que o sistema de fornecimento se adapte às necessidades das mesmas. Todos estes parâmetros são monitorizados em tempo real estando o posto de abastecimento a adaptar-se as condições impostas pelo carregador interno do automóvel a cada momento [21]. Na Figura 4-22 encontra-se a descrição dos diversos componentes deste sistema.

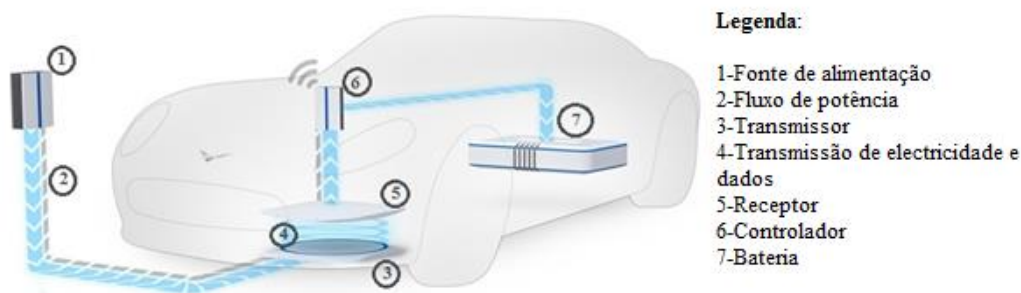


Figura 4-22: Esquema ilustrativo do carregamento indutivo [41].

Para além desta forma de carregamento, existem estudos que ponderam o uso de um trilho onde o carregamento é feito em andamento sem necessidade de imobilização do veículo (Figura 4-23). Esta alternativa ainda exhibe custos de implementação incomportáveis.



Figura 4-23: Trilho com kits de indução [42].

Vantagens e desvantagens do sistema de carga indutivo

A maior vantagem do sistema de carga indutivo é a inexistência de ligação física, que resulta na maior segurança, por não haver a possibilidade de contacto com partes activas do sistema. Para além disso se algum objecto ou animal atravessa o carregador este desliga-se automaticamente por questões de segurança, isto ocorre devido á intensidade das ondas electromagnéticas emitidas pelo emissor. Por não existir ligação física entre o veículo e a fonte de alimentação, o sistema de recarga indutiva é um passo importante para uniformizar a forma de recarregar o veículo eléctrico independentemente do fabricante.

As principais desvantagens são o custo acrescido e as perdas por dispersão de fluxo na transferência de energia que se traduz num rendimento da ordem dos 90% mesmo com acoplamento perfeito (Figura 4-24, Figura 2-25). O aumento dos custos destes sistemas deve-se ao funcionamento do mesmo ser realizado a altas frequências, logo maior complexidade da electrónica de potência [21]. Numa altura em que a eficiência energética está na ordem do dia, este modo de recarga vem contra esta mentalidade pois é o modo de recarga menos eficiente apresentando no máximo uma eficiência/rendimento na ordem dos 90%. Outra questão levantada é sobre a dificuldade no alinhamento do receptor com o emissor, este problema encontra soluções na tecnologia já existente. Por exemplo a Mercedes-Benz desenvolveu um sistema que utiliza sensores sob o veículo e um gráfico na consola central, indicando ao condutor que manobras tem de fazer até o alinhamento ser o ideal.

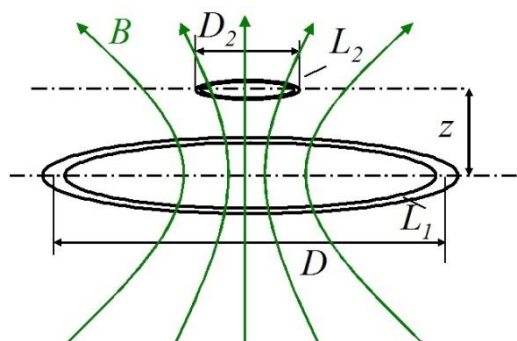


Figura 4-24: Figura ilustrativa do acoplamento de um sistema indutivo [43].

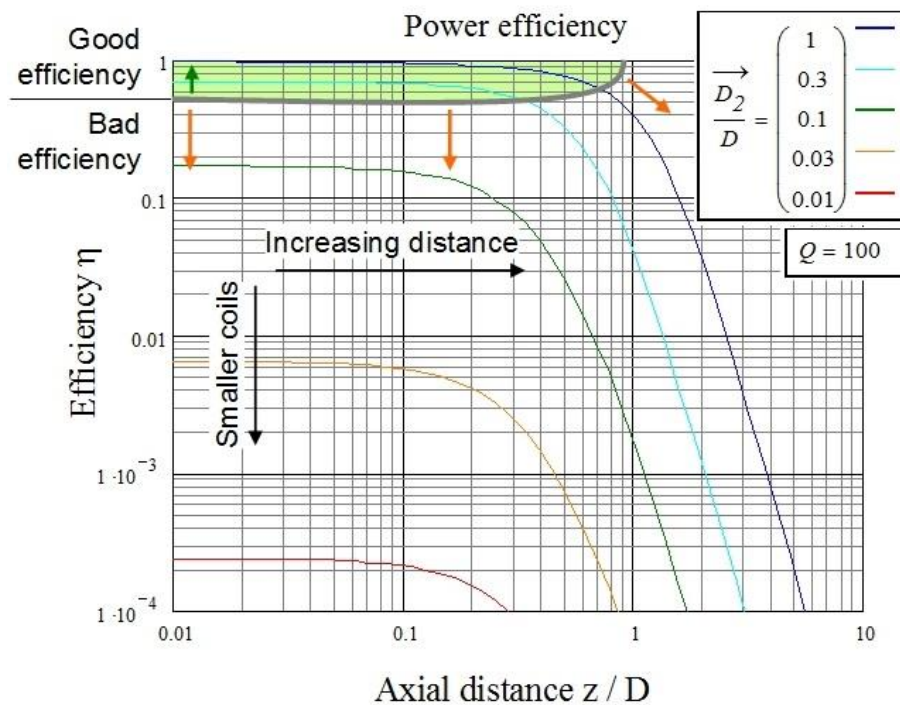


Figura 4-25: Gráfico da eficiência do acoplamento indutivo tendo em consideração a distância entre emissor e receptor bem como o tamanho dos mesmos [43].

Empresas e veículos que possuem o carregamento indutivo

Devido às suas vantagens este sistema é alvo do interesse de várias empresas de automóveis que se uniram a outras para dotarem os seus veículos desta tecnologia. Entre as empresas que comercializam este sistema de recarga para veículos eléctricos temos a HaloIPT a primeira empresa do mundo a comercializar este sistema, que recentemente foi adquirida pela Qualcomm, a Witricity que desenvolveu um sistema capaz de entregar até 3,3 kW de potência de carga a uma distância de 20 centímetros com uma eficiência de mais de 90% e a Plugless Power.

A seguir são apresentados alguns veículos onde foram aplicados este sistema de recarga.

A Mitsubishi juntou-se à Witricity e à IHI Corporation para dotar o seu carro eléctrico i-Miev com este sistema de recarga (Figura 4-26).

A Nissan lançará um novo modelo do Nissan Leaf que para além do sistema convencional de recarga por cabo terá também este sistema (Figura 4-27).

A Mercedes colocou em prática desde de Março de 2012 um projecto patrocinado pelo Ministério dos Transportes da Alemanha. Pela primeira vez no dia-a-dia, um Mercedes-Benz Classe A E-CELL com um sistema indutivo de carregamento vai ser testado por uma família (Figura 4-28) [44].



Figura 4-26: i-MiEV da Mitsubishi [45].



Figura 4-27: Nissan Leaf [46].



Figura 4-28: Mercedes-Benz Classe A E-CELL [44].

5. Tecnologias de armazenamento de energia

Neste capítulo são apresentadas diversas tecnologias de armazenamento de energia, de pequena e larga escala.

“O armazenamento de energia é um dos temas mais discutidos e importantes no futuro energético. Com baixa emissão CO₂, as energias renováveis estão em alta, nomeadamente a energia solar e a eólica. Devido aos receios das alterações climáticas e com os níveis das reservas de petróleo cada vez mais em baixo, torna-se necessário descobrir uma forma eficiente para armazenar a energia produzida, pois nem sempre temos vento capaz de impulsionar as turbinas eólicas ou Sol para as células fotovoltaicas.

O armazenamento de energia como processo natural é tão antigo quanto o próprio universo, a energia presente na criação do universo tem sido armazenada em estrelas como o Sol e agora utilizada por nós directamente (aquecimento solar) ou indirectamente (cultivo...). O armazenamento de energia tornou-se um factor dominante no desenvolvimento económico com a generalização da electricidade e combustíveis químicos (gasolina, querosene, gás...).

Uma das primeiras soluções para o problema do armazenamento de energia eléctrica foi o desenvolvimento da bateria, um dispositivo de armazenamento electroquímico. Este tem sido de utilidade limitada em sistemas de energia eléctrica, devido à baixa capacidade de armazenamento e custo elevado.

Os combustíveis químicos tornaram-se a forma dominante de armazenamento de energia, tanto na geração de electricidade como no transporte de energia. Os combustíveis químicos mais comuns são: biomassa, carvão, gasolina, gasóleo, gás natural, gás de petróleo liquefeito (GPL), propano, butano, etanol, biodiesel e o hidrogénio. Todos estes produtos químicos são facilmente convertidos em energia mecânica e depois em energia eléctrica.

Neste momento, os combustíveis de origem fóssil (petróleo, carvão, gás natural) são uma das principais fontes de energia, no entanto, estes produzem gases de efeito estufa, além de

estarem a chegar ao seu nível mais baixo” [47]. Uma fonte alternativa a estes combustíveis e com custos de emissão de gases com efeito estufa quase nulos, são os biocombustíveis (etanol, biodiesel), mas devido ao baixo EROEI estes também poderão vir a trazer outros problemas a humanidade (aumento no preço dos alimentos, desmatamentos a larga escala, etc.).

“O armazenamento de forma eficiente tem sido um dos grandes obstáculos ao conceito verde no que se refere ao sector energético. A produção a partir de painéis solares e turbinas eólicas tem sido largamente incentivada por diversos governos, o que está a gerar uma corrida ao desenvolvimento de tecnologias energéticas de armazenamento, que provavelmente irão funcionar os automóveis eléctricos e dispositivos do futuro” [47].

O desenvolvimento das tecnologias de armazenamento constitui um passo crucial para a melhoria do sistema energético e a sua independência da energia de origem fóssil, pois possibilitam o aumento da eficiência das energias renováveis e assim a sua melhor incorporação. As mais promissoras são alvo de estudo mais aprofundado, entre essas estão o Lítio-Ar, metal líquido, ressonância quântica e supercondensadores.

5.1 Fontes de energia

São várias as fontes de energia existentes (Figura 5-1) e podem dividir-se em dois grupos, renováveis e não renováveis, no entanto a dependência de fontes não renováveis continua a ser superior às renováveis. A nova mentalidade energética procura contrariar essa dependência de forma a diminuir os problemas a ela associados.

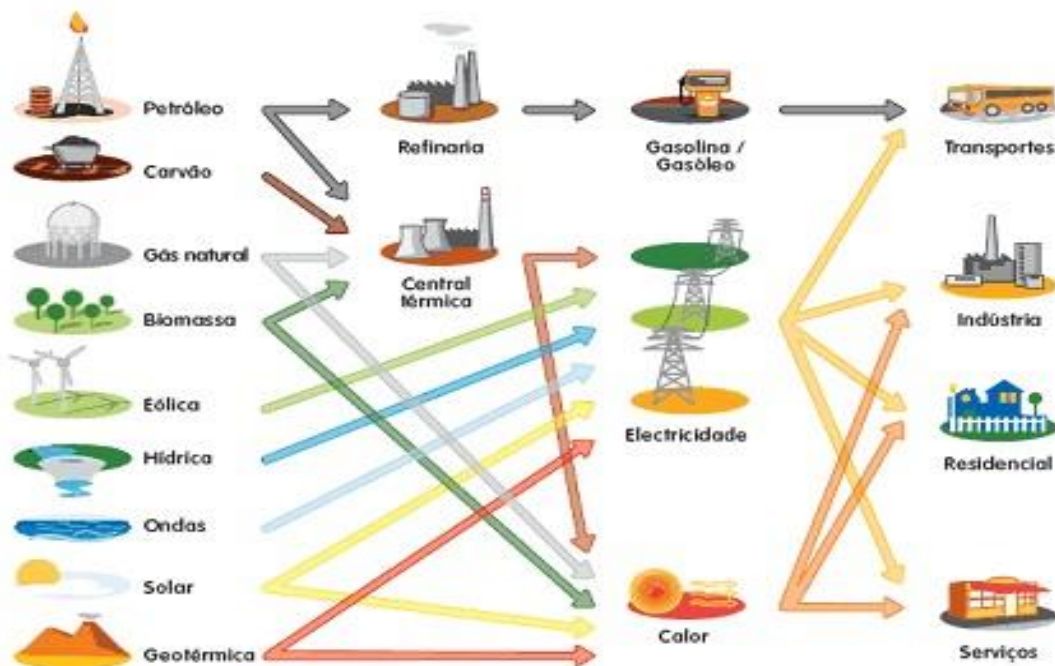


Figura 5-1: Fontes de energia [48].

5.2 Fontes renováveis de energia

As fontes renováveis de energia são todas aquelas originárias de fontes naturais que possuem a capacidade de regeneração.

As suas vantagens como o pequeno impacto no meio ambiente e o facto de serem inesgotáveis, torna-as uma excelente alternativa ao sistema energético tradicional dependente de combustíveis fósseis, principalmente na actual situação de escassez desses recursos e de luta contra a poluição atmosférica e o aquecimento global.

Como exemplos de energia renovável, existem: a energia solar, energia eólica, energia hídrica, geotérmica, biomassa e mareomotriz.

Das energias renováveis, as que têm sofrido maior evolução são a solar e a eólica, para essa evolução muito tem contribuído a melhoria das tecnologias de armazenamento de energia.

5.2.1 Energia Solar

Esta energia pode ser captada por painéis fotovoltaicos ou solares, e transformada em energia eléctrica ou calorífica. A energia solar ainda é pouco utilizada no mundo, devido a uma das suas desvantagens relacionada com os custos de fabricação e instalação ainda elevados. Outras desvantagens são o facto de só existir geração de energia quando há radiação solar, e o baixo rendimento dos painéis fotovoltaicos. O rendimento destes painéis é dos problemas que tem sido mais estudado e obtido melhores avanços e melhorias recentemente.

As vantagens desta energia são o baixo custo de manutenção dos equipamentos e baixíssimo impacto ao meio ambiente.

Entre os países que mais produzem energia solar estão: Alemanha, Japão, Estados Unidos e Espanha.

5.2.2 Energia Eólica

A energia eólica é captada do vento através de turbinas acopladas a geradores denominadas aerogeradores, estes devem ser instalados em locais amplos e com grande incidência de ventos.

Esta energia encontra-se em grande expansão pois tem um grande potencial de exploração.

Actualmente, a capacidade eólica mundial instalada é de 238,4 GW (Gigawatts).

Os países que têm maior capacidade eólica instalada são [49]:

- 1º - China (62,7 GW)
- 2º - Estados Unidos (46,9 GW)
- 3º - Alemanha (29 GW)
- 4º - Espanha (21,6 GW)
- 5º - Índia (16 GW)
- 6º - França (6,8 GW)
- 7º - Itália (6,7 GW)
- 8º - Reino Unido (6,5 GW)
- 9º - Canadá (5,2 GW)
- 10º - Portugal (4 GW)

5.3 Armazenamento de energia

“As características dos sistemas de armazenamento, que determinam a selecção de uma tecnologia para cada caso específico são descritas a seguir” [50].

Capacidade de armazenamento

“A capacidade de armazenamento está associada à quantidade de energia que é possível armazenar”.

Potência disponível

“Este parâmetro está associado à constituição e tamanho do motor/gerador no sistema de conversão da energia armazenada. Geralmente é expresso através da potência máxima de carga ou descarga”.

Autonomia

“A autonomia de um sistema depende quer do tipo de armazenamento, quer do tipo de aplicação. Para pequenos sistemas, de alguns kWh, em áreas isoladas em que se confia nas fontes de energia renovável, a autonomia torna-se um critério crucial.

A autonomia é definida pela razão entre a capacidade de armazenamento de energia (W_u) e a potência máxima de descarga (P_d), conforme a expressão” (5-1).

$$a = \frac{W_u}{P_d} \quad (5-1)$$

“A autonomia está relacionada com o tempo de descarga que depende das condições operacionais do sistema. É denominado tempo de descarga, o tempo que é necessário para esvaziar a energia armazenada num sistema de armazenamento totalmente carregado, sendo libertada à potência máxima”.

Rendimento

“Este parâmetro define a relação entre a energia armazenada e a energia disponibilizada. A definição do rendimento deve ser baseada na análise de vários ciclos de operação”.

Durabilidade

“Refere-se ao número de vezes que a unidade de armazenamento pode libertar o nível de energia para a qual foi projectada, sendo expresso em número máximo de ciclos (um ciclo corresponde a uma carga e descarga total)”.

Custos

“Os custos de um sistema de armazenamento incluem o investimento inicial e os custos de operação (manutenção, perdas de energia durante o ciclo, envelhecimento) ”.

Fiabilidade e adaptabilidade à fonte de geração

“O sistema de armazenamento necessita de estar adaptado ao tipo de aplicação (áreas isoladas de pequena ou média escala, conexão de rede, etc.) e ao tipo de produção (permanente, móvel, renovável, etc)”.

Auto-descarga

“A auto-descarga pode ser definida pela quantidade de energia que estava inicialmente armazenada e que, ao fim de algum tempo sem uso, vai perdendo”.

Restrições de operação

“As restrições de operação estão essencialmente relacionadas com a segurança (risco de explosão, temperaturas de operação, pressão), que podem influenciar na escolha da tecnologia de armazenamento”.

Componente ambiental

“A componente ambiental de um sistema de armazenamento é cada vez mais tida em conta na execução do seu projecto. Por exemplo, num sistema de armazenamento de bombagem, a necessidade de construção de dois reservatórios de tamanho considerável pode dar origem a um impacto ambiental de elevada importância”.

As tecnologias de armazenamento podem ser classificadas pela forma como o armazenamento ocorre e agrupadas em dois grupos, larga escala (Quadro 5-1) e pequena escala (Quadro 5-2) [51].

1. Armazenamento de energia eléctrica:

Bobinas Supercondutoras (SMES²²);
Supercondensadores.

2. Armazenamento de energia electroquímica:

Fuel Cell regenerativas;
Baterias.

3. Armazenamento de energia mecânica:

Volantes de Inércia (“Flywheels”);
Aproveitamentos hidroeléctricos reversíveis (Bombagem de Água);
Sistemas de Ar Comprimido (CAES²³).

4. Armazenamento de energia térmica:

Calor em materiais cerâmicos e sais fundidos.

²² Do termo inglês SMES – Superconducting Magnetic Energy Storage

²³ Do termo inglês CAES – Compressed Air Energy Storage.

Larga escala

Quadro 5-1: Tecnologias de larga escala [51].

Tecnologia	Hídricas (Bombagem)	Ar Comprimido (CAES)	SMES
Densidade de Energia	1 kWh/m ³ para uma queda de 360 m	12 kWh/m ³ de caverna a 100 bar	1 – 10 kWh/kg
Rendimento	65 – 80%	70%	>90%
Custo (€/kWh)	120	150	2500 a 3800
Tempo de vida (anos)	50	30	30

Pequena escala

Quadro 5-2: Tecnologias de pequena escala [51].

Tecnologia	Supercondensadores	Bateria	Flywheels	Hidrogénio
Densidade de Energia	10 a 60 Wh/kg	Ácida 20 a 120 Lítio 400 Wh/kg	1 a 5 Wh/kg	300 a 600 Wh/kg (200 a 350 bar)
Rendimento	80 a 90 %	70 a >80%	80 a >90%	30 a 50%
Custo (€/kWh)	-	Ácida 50 a 200 Lítio 700 a 1.000	150 a 200	500 a 1500
Tempo de vida (anos)	-	Ácida 5 Lítio 20	30	10

5.3.1 Armazenamento de larga escala

Aproveitamentos hidroeléctricos reversíveis (Bombagem de Água)

Quando existe energia excedentária na rede (períodos de vazio) podemos recorrer aos sistemas de bombagem para armazenar essa energia bombeando água de uma cota inferior para uma cota superior, voltando a ser turbinada quando é necessário injectar energia na rede. É actualmente bastante usada em aplicações que necessitam de elevada potência disponível. O seu rendimento varia entre os 65% e 80%. A quantidade de energia que pode ser armazenada depende da diferença em altura dos reservatórios e do volume de água armazenada.

Vantagens [52]:

- Elevada Eficiência;
- As centrais entram rapidamente em serviço;
- Poucos custos de exploração (depois do custo inicial de construção, o custo de produção de energia é relativamente baixo);
- O recurso primário é renovável;
- Despachabilidade.

Desvantagens [52]:

- Forte dependência das condições climáticas e geográficas;
- A dependência em relação a outros países, nomeadamente aos países onde nascem os rios;
- Impactos ambientais.

Sistemas de Ar Comprimido (CAES)

A energia é armazenada através da injeção de ar comprimido numa caverna subterrânea. Para libertar a energia armazenada, o ar comprimido é retirado, expandindo-se em turbinas de alta pressão, acopladas mecanicamente a geradores eléctricos. Esta tecnologia pode ser usada em escalas muito grandes e tem a particularidade de armazenar energia para mais de um ano. O sistema CAES ganha mais importância quando temos um parque eólico ou um parque a energia solar, devido ao seu perfil intermitente a energia que não for despachável pode ser usada para comprimir o ar. O rendimento desta tecnologia anda em torno de 70% [21], [52].

Vantagens:

- Longo período de armazenamento;
- Menos poluentes que as restantes centrais;
- Rápida resposta em relação às centrais de ciclo combinado e ciclo simples.

Desvantagens:

- Dependência de estruturas geológicas que são muito raras.

Bobinas Supercondutoras (SMES)

O princípio de suporte de funcionamento das bobinas supercondutoras é a supercondutividade. A supercondutividade é um fenómeno observado em vários metais e materiais de cerâmica. Quando estes materiais são arrefecidos até temperaturas limite, próximas do zero absoluto (0 graus Kelvin, -273 graus Celsius) até temperaturas do azoto líquido (77 K, -196 C), deixam de ter resistência eléctrica. A temperatura à qual a resistência eléctrica é zero é chamada de temperatura crítica (Tc). O Quadro 5.3 mostra as temperaturas críticas de vários supercondutores [52].

Quadro 5-3: Materiais usados para supercondutores.

Material	Tipo	T ₀ (K)	T ₀ (°C)
Zinco	Metal	0.88	-272.12
Alumínio	Metal	1.19	-271.81
NbTi	Metal	3.15	-270
Estanho	Metal	3.72	-269.28
Mercúrio	Metal	4.15	-268.85
YBa ₂ Cu ₃ O ₇	Cerâmico	90	-183
TlBaCaCuO	Cerâmico	125	-148

Como estes materiais não têm resistência eléctrica os electrões podem viajar livremente por longos períodos de tempo, sem perder energia como calor. Os supercondutores, além de apresentarem resistência eléctrica nula sob baixas temperaturas, também são diamagnéticos, ou seja, repelem o campo magnético a que são submetidos. Este fenómeno é chamado de Efeito Meissner²⁴. O armazenamento de energia em bobinas é realizado por indução de corrente contínua (DC) numa bobine constituída por cabos supercondutores com resistência muito baixa, geralmente feito de filamentos de Nióbio de Titânio (NbTi), que operam a temperaturas muito baixas (3.15K,-270°C). Os sistemas SMES são uma forma dispendiosa de armazenar energia. Este custo associado à necessidade de energia para refrigeração, faz com que esta tecnologia seja apenas utilizada para aplicações de curta duração, nomeadamente para aplicações de qualidade de energia [52].

Vantagens:

- Fiabilidade;
- Elevada eficiência;
- Podem fornecer energia reactiva;
- Poder de descarga muito rápido;
- Carregam e descarregam milhares de vezes sem degradação do material.

Desvantagens:

- Elevados custos;

²⁴ O efeito Meissner é uma expulsão do campo magnético de um supercondutor durante a transição para o estado de supercondução.

- Elevado tamanho;
- Necessita refrigeração;
- Situação crítica para correntes elevadas.

Calor em materiais cerâmicos e sais fundidos

Esta forma de armazenamento térmico pode também ser despachável. A sua aplicação pode ser efectuada de diversas formas: para produção de energia eléctrica ou usada directamente sob a forma de calor. A ideia consiste em armazenar energia sob a forma de calor quando estiver disponível, para poder recupera-la quando for necessário. Nestas centrais existe uma torre receptora que recebe os raios reflectidos por espelhos sempre orientados para o Sol e é arrefecida por um sal liquefeito. O sal é bombeado dum depósito "frio" a cerca de 290°C para a torre e daí segue para o depósito "quente" a 565°C. Este sal é utilizado para produzir vapor de água a 540°C num gerador de vapor. Este é depois utilizado para accionar as turbinas da central, à semelhança do que ocorre noutros tipos de centrais térmicas [52].

5.3.2 Armazenamento de pequena escala

Volantes de Inércia (“Flywheels”)

Uma flywheel um volante de inércia feito de um material pesado (aço, fibras de Carbono especial, etc.) que tem a função de armazenar a energia cinética.

A quantidade de energia cinética armazenada nessa massa é dada pela seguinte expressão:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot I \cdot W^2 \quad (5-2)$$

Onde I é o momento de inércia do volante e W a sua velocidade de rotação.

Para se armazenar uma maior quantidade de energia, o volante necessita de rodar á máxima velocidade possível, visto que E_c depende do quadrado da velocidade de rotação (W). Este facto origina grandes forças centrífugas, que podem levar à sua desintegração. Assim a densidade e a resistência mecânica do material do volante são determinantes para um correcto e eficiente funcionamento da “Flywheel” [52].

Vantagens:

- É uma tecnologia “limpa” e silenciosa;
- A principal vantagem é a capacidade de fornecer energia acumulada muito rapidamente, ou seja, permite atingir potências elevadas;
- Podem operar sob condições de grandes variações térmicas.

Desvantagens:

- Pouco resistentes a choques mecânicos intensos;
- Tensão á saída com grandes variações de amplitude;
- Variação da frequência da tensão produzida.

Baterias electroquímicas

Para se realizar a carga transformam, através de reacções químicas, energia eléctrica em química e vice-versa na descarga.

Existe uma vasta gama de tipos de baterias usados em sistemas de armazenamento: o Quadro 5-4 mostra as baterias que estão actualmente a ser usadas, ou que estão sobe consideração para uso futuro [52].

Quadro 5-4: Características de diversas baterias [52].

Tipo de bateria	Densidade Energia Máxima (Wh/kg)	Densidade Potência Máxima (W/kg)	Tempo Recarga 20%-100% (min)	Temperatura Operação (°C)	Numero Ciclos Vida útil
Chumbo-ácido	35	150	-	Ambiente	1000
Chumbo-ácido Avançado	45	250	-	Ambiente	1500
Chumbo – ácido Válvula regulada	50	150+	15	Ambiente	700+
Chumbo-ácido Folha de metal	30	900	15	Ambiente	500+
Níquel-ferro	50	100	-	Ambiente	2000
Níquel-zinco	70	150	-	Ambiente	300
Níquel-cádmio	50	200	15	Ambiente	300
Níquel-metal hidreto	70	200	35	Ambiente	2000+
Sódio-enxofre	110	150	-	350	1000
Níquel-cloreto de sódio	100	150	-	300	700+
Lítio-Sulfeto de ferro	150	300	-	450	1000
Polímero de lítio sólido	200	350	-	80-120	1000
Lítio-ferro	120-150	120-150	<60	Ambiente	1000+
Iões de lítio	400	340	-	Ambiente	1200

Flow cell regenerativas

Esta tecnologia ainda recente produz electricidade e calor e consegue inverter o processo. Ela consegue armazenar ou fornecer energia eléctrica através de uma reacção electroquímica reversível entre dois electrólitos que se encontram na fase líquida.

No Quadro 5-5 estão as características de três destas células, Polysulfide Bormide Battery (PSB), Vanadium Redox Battery (VRB) e Zinc Bromine Flow Battery (ZnBr) [52].

Quadro 5-5: Características das flow cells regenerativas [52].

	VRB	ZnBr	PSB
Potência típica (MW)	<3	<1	<15
Densidade de energia (Wh/litro)	16-33	60-90	20-30
Eficiência/ciclo (Wh^{out}/Whⁱⁿ) (%)	70-85	65-75	60-75
Ciclos de vida	>12000	>2000	n/a
Anos de vida	5-10	5-10	15

5.4 Comparação entre tecnologias de armazenamento

5.4.1 Comparação das eficiências

Na Figura 5-2 são comparadas as eficiências de algumas tecnologias baseadas nas perdas de cada uma.

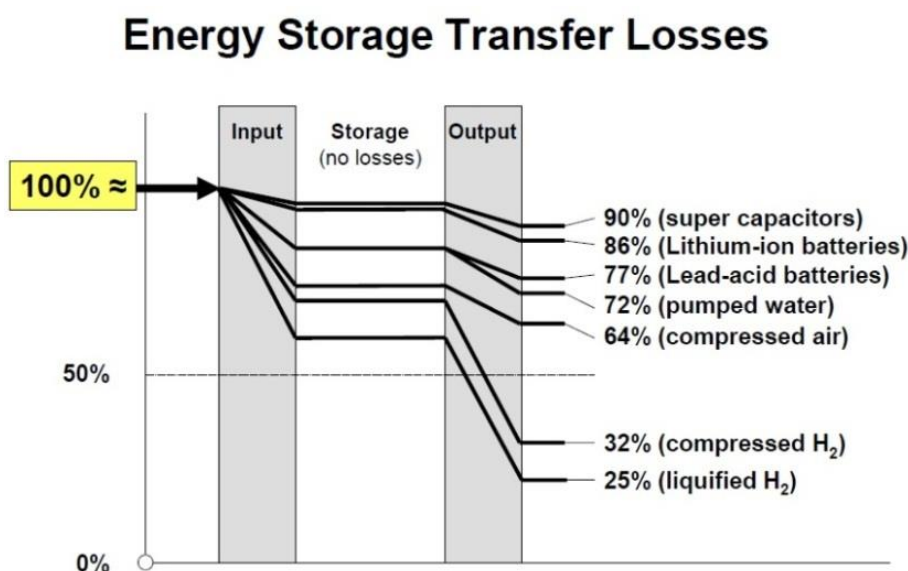


Figura 5-2: Eficiência de várias tecnologias de armazenamento [53].

A Figura 5-3 demonstra a percentagem de energia primária necessária para 100% de energia útil.

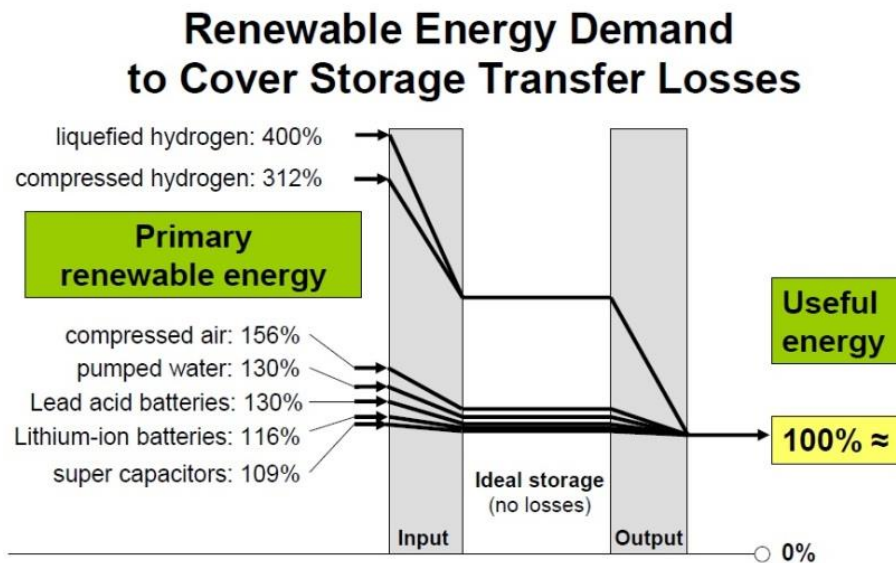


Figura 5-3: Comparação da energia primária necessária para 100% de energia útil [53].

O rendimento dos ciclos de operação (Figura 5-4) e a previsão do tempo de vida (número máximo de ciclos) do sistema de armazenamento são dois parâmetros importantes a considerar antes de se escolher a tecnologia de armazenamento, pois afectam e muito os custos globais do armazenamento. Um baixo rendimento aumenta os custos de operação, pois só uma parte da energia armazenada pode ser usada. Os sistemas de armazenamento com um reduzido período de vida, também aumentam os custos a longo prazo, pois a unidade de armazenamento necessita de ser substituída com mais frequência [50].

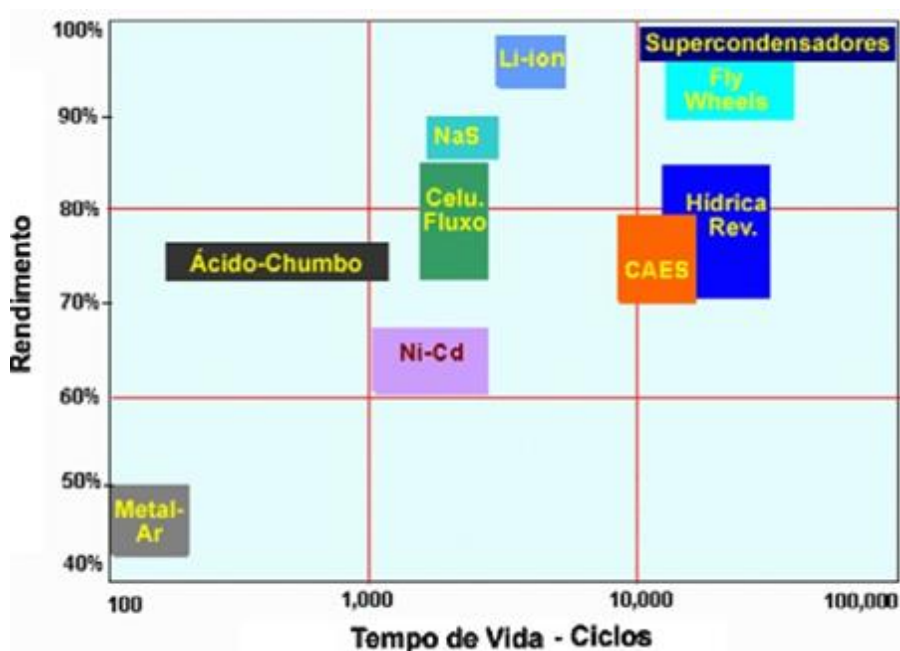


Figura 5-4: Comparação de rendimentos e tempo de vida em ciclos [51].

5.4.2 Comparação da densidade de energia por massa e volume

O tamanho e o peso dos dispositivos de armazenamento são factores importantes para algumas aplicações.

O volume do sistema de armazenamento tornar-se importante na sua escolha quando há restrições de espaço no local a instalar, ou o espaço é muito caro. Na Figura 5-5 está a comparação da densidade de energia por peso e por volume de algumas tecnologias.

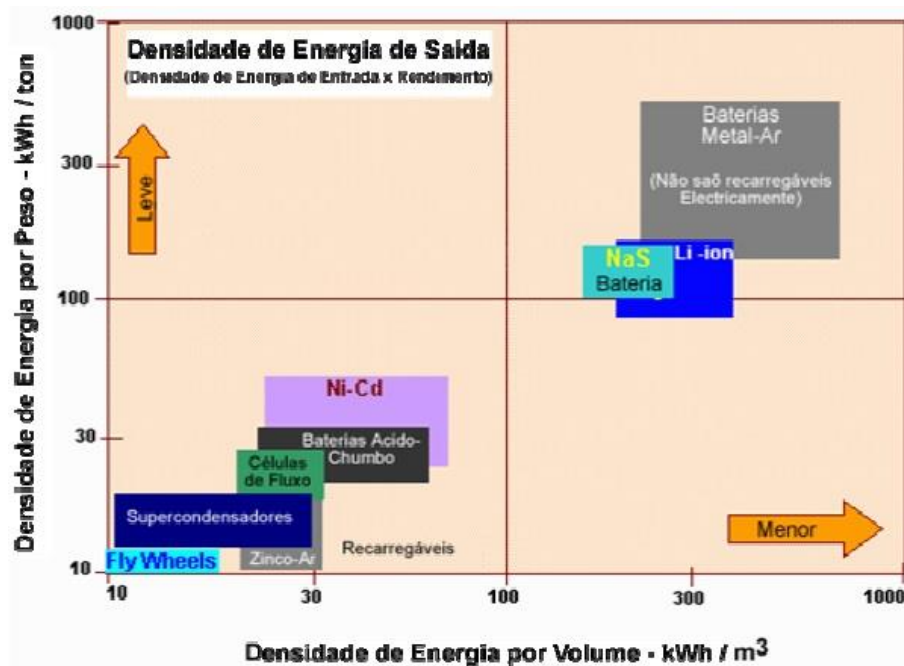


Figura 5-5: Comparação da densidade de energia por massa e volume [51].

5.4.3 Comparação dos custos de investimento

“Os custos de investimento associados ao tipo de armazenamento constituem um factor económico importante que afectam os custos totais de produção de energia. Assim, alguns tipos de armazenamento podem somente tornar-se proveitosos se for fornecido determinado valor mínimo de energia. Os custos globais do sistema necessitam então de ser considerados, a fim de ser efectuada uma análise completa dos custos. Nem sempre a tecnologia mais barata no momento da compra, se torna a tecnologia mais viável. Nos custos de investimento, estão também incluídos os custos associados ao projecto necessário para o sistema de armazenamento de energia, que depende do tipo e do tamanho do sistema” [50].

Na Figura 5-6 é apresentada uma comparação de custos de investimento de várias tecnologias.

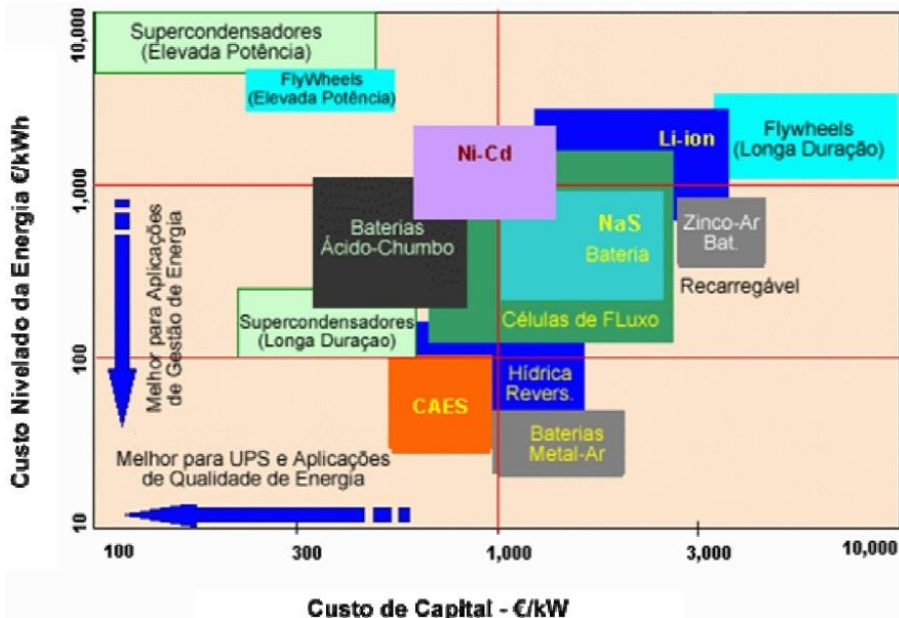


Figura 5-6: Comparação do custo da energia [51].

5.4.4 Aplicações

Diferentes aplicações exigem diferentes potências e tempos de armazenagem como se pode observar na Figura 5-7.

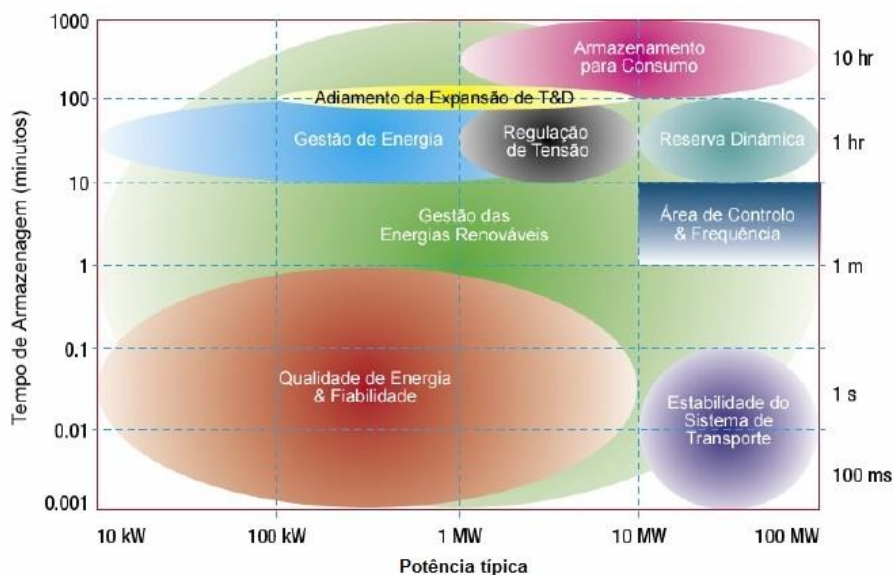


Figura 5-7: Aplicações e suas características [51].

As aplicações permanentes de armazenamento de energia a grande escala, podem ser classificadas em três grupos principais [50]:

- Qualidade de energia:
 - Aplicada numa escala de tempo de segundos ou menos.
 - Destinada a assegurar a continuidade de serviço e a qualidade da onda da tensão.
- Armazenamento de reserva:
 - Aplicada numa escala de tempo de segundos ou minutos.
 - Destinada a assegurar a continuidade de serviço quando há troca de uma fonte de energia para outra.
- Gestão de energia:
 - Aplicada em escalas de tempo de horas.
 - Nivelar o diagrama de cargas reduzindo a necessidade de garantir o equilíbrio entre a geração e o consumo, armazenando nas horas de vazio, para entregar à rede nas horas cheias.

Na Figura 5-8 estão representadas as tecnologias que melhor satisfazem cada uma das três categorias.

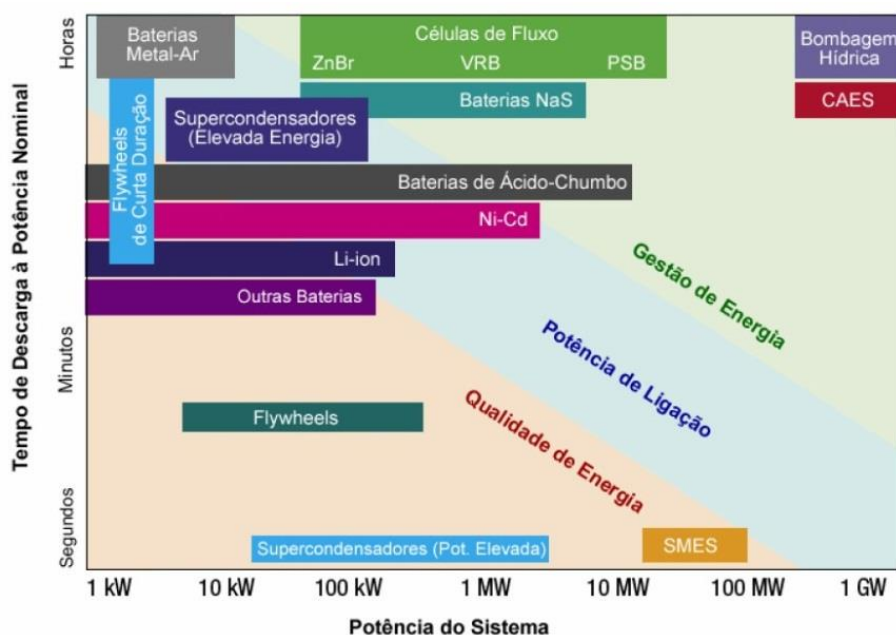


Figura 5-8: Tecnologias e as suas possíveis aplicações [51].

5.5 Tecnologias de armazenamento de energia mais promissoras

Diversas tecnologias têm sido consideradas e estudadas, algumas são ainda teóricas como a bateria quântica, outras já têm protótipo mas ainda um longo caminho a percorrer até terem realmente utilidade, no entanto a solução para a evolução das tecnologias de armazenamento de energia passa pela nanotecnologia. Recentemente as conhecidas baterias de íões de lítio tiveram uma importante evolução batendo um novo record de densidade de energia, este record foi obtido pela empresa Envia Systems.

5.5.1 Íões de Lítio

A Envia Sytems desenvolveu uma célula com uma capacidade de 45 Ah e 400 Wh/kg, além deste novo record de densidade de energia também conseguiu diminuir o preço em cerca de 50% (Figura 5-9). Esta nova densidade de energia garante uma autonomia de mais de 400 quilómetros e contribui de forma preponderante para a afirmação da mobilidade eléctrica. A Envia realizou testes que comprovam que a sua nova bateria é mais leve, mais barata, mais durável e mais segura em caso de acidente do que as existentes no mercado actualmente [54].



Figura 5-9: Comparação da densidade de energia [54].

Impacto possível desta tecnologia na produção de veículos eléctricos (Figura 5-10).

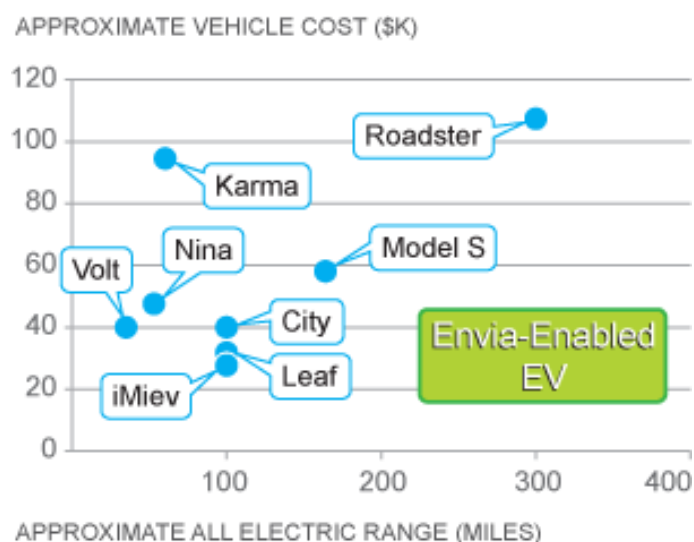


Figura 5-10: Comparação da autonomia e preço de veículos eléctricos [54].

“Quase todos os ânodos das baterias de Lítio são feitos de grafite, que é electricamente condutor mas cuja capacidade de expansão é reduzida, os iões de Lítio são armazenados entre as camadas de grafeno que formam a grafite.

O Silício é o material com maior capacidade de absorção de iões de Lítio entre todos os materiais que se conhece. Mas ele triplica de volume quando está totalmente carregado, diminuindo a vida útil das baterias durante os ciclos de carga e descarga. A solução veio na forma de um polímero²⁵ Silício-Carbono, que conduz electricidade e se liga fortemente às partículas de Silício que retêm o Lítio no ânodo da bateria. No processo de absorção do Lítio, durante o carregamento da bateria o polímero incha, expandindo até três vezes o seu volume inicial. Durante o descarregamento, este libera o Lítio e encolhe novamente para seu tamanho normal. Segundo os pesquisadores, o novo ânodo usa apenas materiais já disponíveis, de baixo custo e compatíveis com as tecnologias da fabricação das baterias recarregáveis de Lítio. Outros estudos estão a ser feitos tendo em vista o melhoramento das baterias de iões de Lítio principalmente no aumento da densidade de potência e do número de ciclos de carga e descarga bem como na diminuição do tempo dos mesmos” [55].

²⁵ Os polímeros são compostos químicos de elevada massa molecular, resultantes de reacções químicas de polimerização. Trata-se de macromoléculas formadas a partir de unidades estruturais menores (os monómeros).

5.5.2 Lítio-ar

A tecnologia Lítio-ar foi inicialmente proposta para aplicações de mobilidade eléctrica em 1970, mas em 2009 e inícios de 2010 o interesse nesta tecnologia aumentou consideravelmente em grande parte devido á sua densidade de energia comparável à da gasolina. Nas baterias de Lítio-ar as células usam Carbono, em vez de óxidos de metais para o eléctrodo positivo, que é mais leve e reage com o Oxigénio do ar em torno dele para produzir uma corrente eléctrica. A oxidação de 1 kg de metal de lítio liberta 11680 Wh/kg valor idêntico ao da densidade energética da gasolina [56]. Além desta tecnologia existem outras baterias de metal-ar com densidade de energia considerável (Figura 5-11).

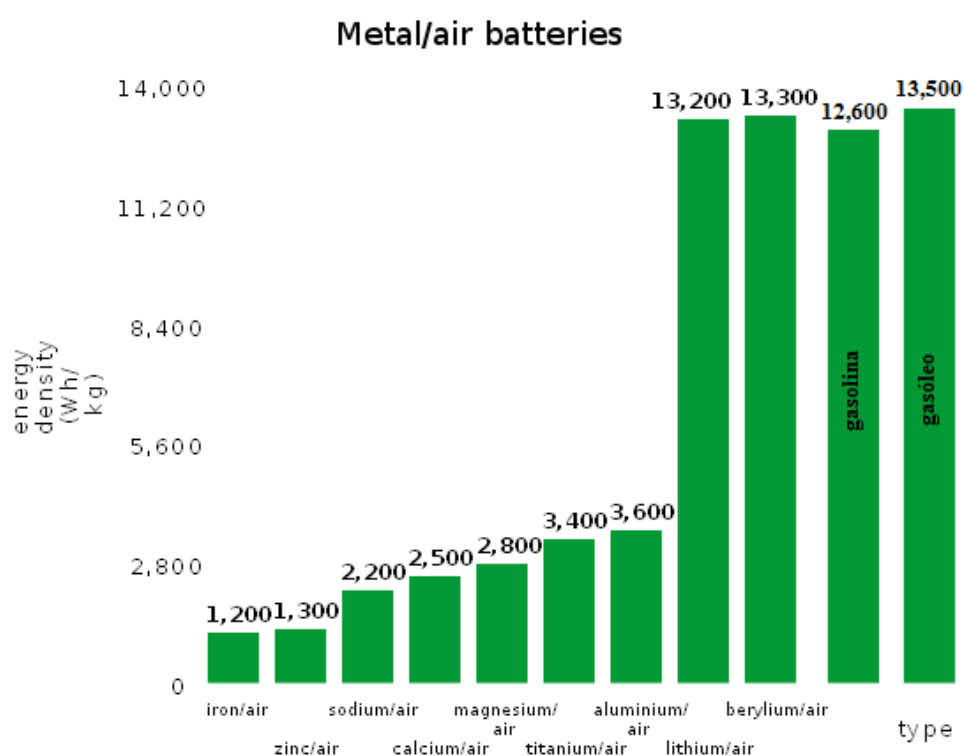


Figura 5-11: Comparação das densidades de energia teóricas das várias baterias de metal-ar [57].

O Lítio tem uma capacidade específica elevada (3840 mAh / g) em comparação com outros materiais metálicos aplicados a baterias de metal-ar (2965 mAh / g de Zinco, 2965 mAh / g para o Alumínio). Embora a tecnologia Lítio-ar tenha grande densidade de energia (Wh/kg) esta apresenta uma densidade de potência (W/kg) reduzida. A tensão de carga é consideravelmente mais elevada que a tensão de descarga, isto resulta numa baixa eficiência de energia do ciclo eléctrico, na ordem dos 60-70%. O número de ciclos de carga/descarga é reduzido no entanto isto pode não ser assim tão relevante devido á elevada densidade de energia [56].

Uma das empresas a estudar este tipo de baterias é a International Business Machines (IBM) que pretende chegar á criação de uma bateria recarregável para uso na mobilidade eléctrica com uma autonomia de 500 milhas (800 quilómetros).

Arquitecturas da bateria Lítio-ar

Existem quatro arquiteturas actualmente a serem estudadas, três soluções com electrólito líquido: aprótica²⁶ (Figura 5-12), aquosa (Figura 5-14) e uma mistura de ambos (Figura 5-15) onde o cátodo é imerso num electrólito aquoso, e o ânodo é imerso num electrólito aprótico. A quarta solução utiliza um electrólito sólido (Figura 5-16).

Aprótica

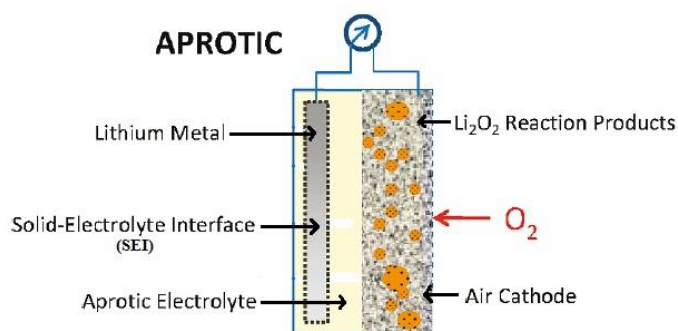


Figura 5-12: Esquema da bateria Lítio-ar aprótica [56].

Esta é a solução mais estudada porque é a que pode actualmente ser recarregável. Consiste num ânodo de metal de Lítio, um electrólito que contem um sal de Lítio dissolvido num solvente aprótico, e um cátodo de respiração de Carbono poroso. Uma vantagem importante da concepção da bateria aprótica é a formação de uma barreira (SEI²⁷) entre o ânodo e o electrólito que protege o metal de Lítio. Durante a descarga, a reacção electroquímica $2\text{Li} + \text{O}_2 \rightarrow \text{Li}_2\text{O}_2$ gera uma tensão de 2,96 Volts. Durante a carga, é aplicada uma tensão maior do que 2,96 V (Figura 5-13), e conduz á reacção electroquímica reversa $\text{Li}_2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{Li} + \text{O}_2$.

²⁶ Solventes apróticos são solventes bons para dissolver iões, mas carecem de Hidrogénio ácido. Estes solventes geralmente têm altas constantes dieléctricas e altas polaridades.

²⁷ Do termo inglês SEI – Solid-Electrolyte-interface.

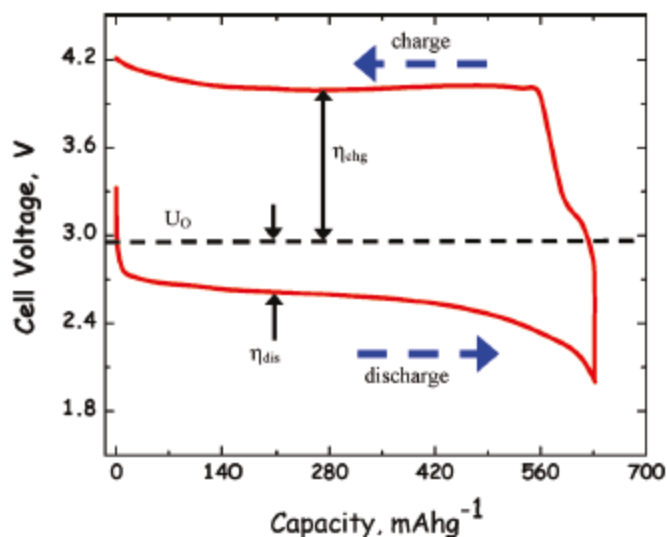


Figura 5-13: Gráfico da tensão de carga e descarga da célula aprótica [56].

O Li_2O_2 produzido no cátodo é geralmente insolúvel no eletrólito conduzindo á sua acumulação ao longo do cátodo o que reduz a condutividade e degrada o desempenho da bateria ao longo do tempo.

Aquosa

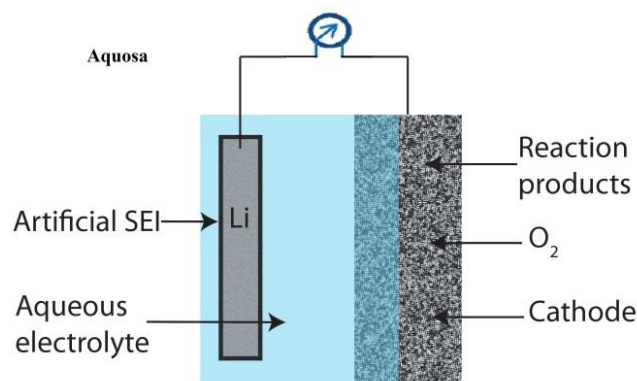


Figura 5-14: Esquema da bateria Lítio-ar aquosa [58].

A solução aquosa consiste de um ânodo de metal de Lítio, um eletrólito aquoso, e um cátodo de carbono poroso. O eletrólito aquoso é simplesmente uma combinação de sais de Lítio dissolvido em água. A bateria Lítio-ar aquosa evita o problema de acumulação do Li_2O_2 no cátodo como ocorre nas baterias apróticas porque os produtos da reação são solúveis em água, o que permite a estas baterias manter o desempenho ao longo do tempo. A solução aquosa tem um potencial de descarga maior que a sua homóloga aprótica. No entanto, o metal de Lítio reage violentamente com a água e, assim, a concepção aquosa requer uma interface de eletrólito sólido entre o metal de Lítio e o eletrólito aquoso [56], [58].

Mistura Aquosa-Aprótica

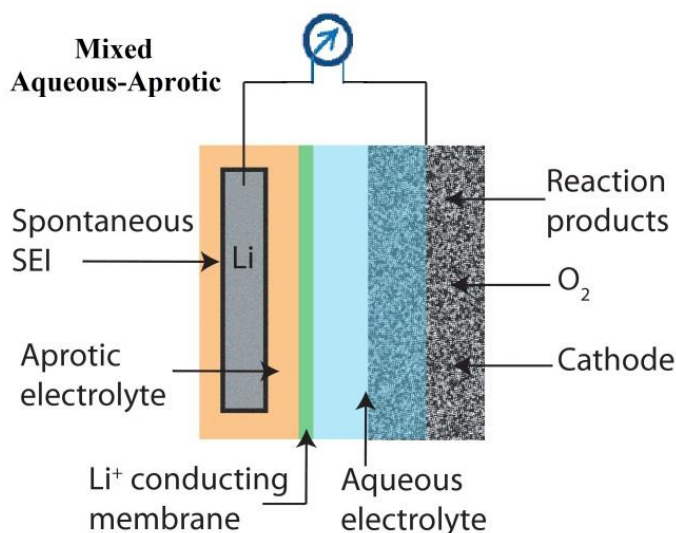


Figura 5-15: Esquema da bateria Lítio-ar de mistura aquosa-aprótica [58].

A solução aquosa-aprótica é uma tentativa de unir as vantagens das anteriores. A característica comum desta solução é a existência de dois eletrólitos ligados por uma membrana condutora de Lítio. O ânodo de Lítio metálico está em contacto com o eletrólito aprótico enquanto o cátodo poroso está em contacto com o eletrólito aquoso. Um condutor cerâmico de Lítio é tipicamente empregue como a membrana que une os dois eletrólitos [56], [58].

Estado Sólido

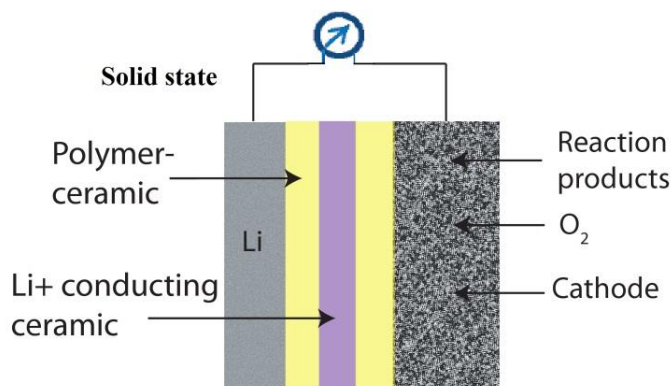


Figura 5-16: Esquema da bateria Lítio-ar de estado sólido [58].

A solução de estado sólido elimina os problemas nas interfaces de ânodo / cátodo associados à utilização de um eletrólito líquido. O ânodo e do cátodo são tipicamente separados do eletrólito através de compósitos polímero-cerâmicos que melhoram a transferência de carga. Os compósitos polímero-cerâmicos servem para reduzir a impedância global da bateria Lítio-ar de estado sólido. A principal desvantagem da solução de estado sólido é a baixa condutividade da maioria dos eletrólitos vitrocerâmicos [56], [58].

5.5.3 Bateria de Metal líquido

A bateria de metal líquido está a ser desenvolvida por Donald Sadoway (Figura 5-17) e a sua equipa na Ambri. Esta é a bateria que promete revolucionar as energias renováveis contribuindo para o melhoramento da eficiência das mesmas. Donald Sadoway afirma que a existência de uma bateria entre as renováveis e a rede eléctrica põe fim às actuais variações abruptas no fornecimento de energia, tornando o sistema eléctrico mais eficiente. Com esta tecnologia pode-se armazenar a energia quando esta está disponível para usar quando é necessária, possibilitando assim que se desliguem as centrais em *stand-by*, que são caras e poluentes e que actualmente são usadas para equilibrar a produção de energia com o consumo da rede. A bateria concebida por Donald Sadoway e a sua equipa além de grande capacidade de armazenamento deve ter um custo de produção reduzido, tornando-a na mais promissora das tecnologias de armazenamento de energia de grande escala.

A Ambri conta com investidores importantes como Bill Gates, Khosla Ventures e a empresa de energia Total.

Princípio de funcionamento

Tudo começou com a tabela periódica onde Sadoway procurou dois metais com densidades diferentes e altamente reactivos entre si. Esses dispostos em camadas e separados por um electrólito, formam o pólo positivo e negativo da bateria. Outra preocupação de Sadoway foi que os metais fossem abundantes e baratos.

Os metais escolhidos foram o Magnésio (Mg) para a camada superior (pólo negativo) e Antimónio (Sb) para a camada inferior (pólo positivo), o electrólito é uma mistura de sal derretido com cloreto de Magnésio. Esta bateria opera a temperaturas da ordem dos 700 graus celsius, o que se torna numa vantagem porque não precisa de cuidados especiais no que diz respeito à temperatura como a maioria das outras baterias.

Para libertar corrente o Magnésio perde dois electrões tornando-se um ião positivo (Mg^{2+}), que passa através do electrólito recebendo dois electrões do Antimónio. Para carregar a bateria basta inverter a corrente que obriga o Magnésio a recompor-se (Figura 5-18). A corrente que passa entre os eléctrodos gera calor suficiente para manter a temperatura da bateria. Para esta configuração experimental foram já alcançadas eficiências energéticas de 69% [59]. Na Figura 5-19 exhibe-se o modelo da bateria de 2 MWh da Ambri.



Figura 5-17: Sadoway explica o funcionamento da bateria [59].

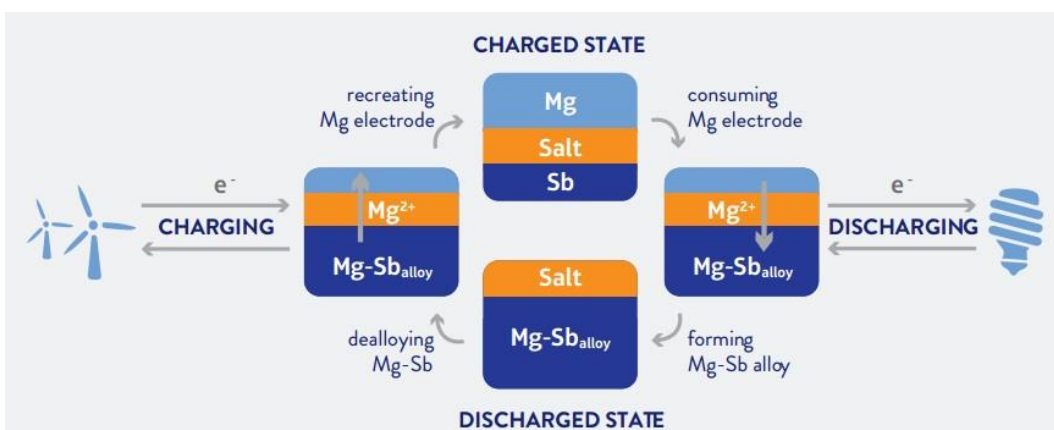


Figura 5-18: Esquema de carga e descarga da bateria da Ambri [60].

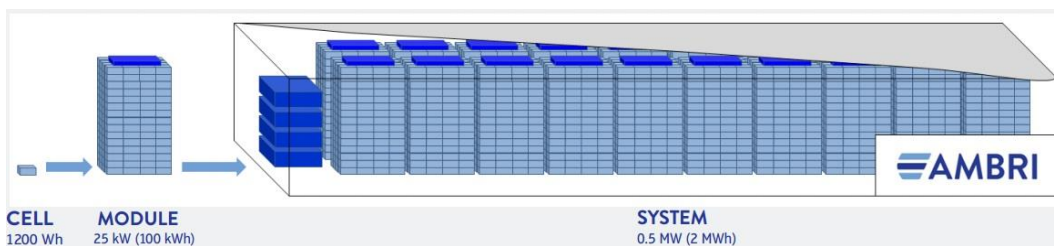


Figura 5-19: Modelo da bateria de 2 MWh [60].

Entre as vantagens desta bateria estão o baixo custo devido à utilização de materiais abundantes e baratos, a flexibilidade de resposta podendo responder em milissegundos ou lentamente ao longo do tempo e a longa duração devido à utilização de eléctrodos líquidos em vez de eléctrodos sólidos.

5.5.4 Bateria Quântica

As baterias quânticas são uma tecnologia em início de desenvolvimento baseadas em nanotubos em vácuo.

As taxas de carga e descarga dos nanotubos ultrapassam todos os outros dispositivos. Nanotubos de vácuo podem conter a energia eléctrica sem perdas por muito tempo e podem ser carregados e descarregados rapidamente. A maior taxa de carga-descarga é proporcional à relação entre o tamanho da abertura e da velocidade da luz, enquanto a taxa de carga/descarga de baterias e condensadores depende de taxas de difusão e reacção química.

A densidade de energia gravimétrica dos nanotubos de vácuo pode mesmo ser superior às reacções nucleares em cadeia porque a densidade de energia gravimétrica das reacções nucleares em cadeia depende da velocidade dos neutrões, que é muito menor que a velocidade da luz [61]. Na Figura 5-20 exhibe-se o potencial teórico desta tecnologia.

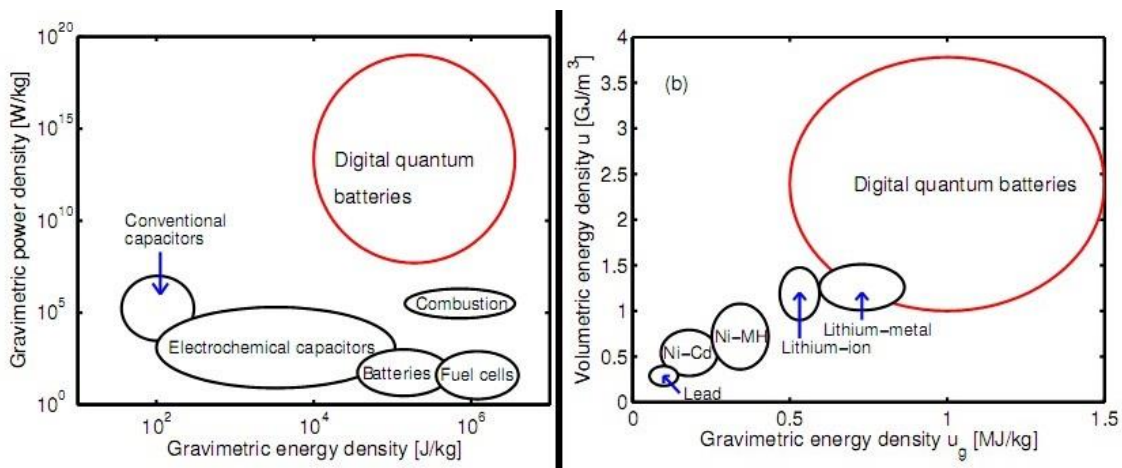


Figura 5-20: Gráficos comparativos com outras tecnologias [61].

5.5.5 Supercondensadores

Os supercondensadores também conhecidos por condensadores de dupla camada eléctrica (EDLC²⁸) (Figura 5-21) são uma das tecnologias de armazenamento de energia que mais interesse despertam na mobilidade eléctrica devido às suas vantagens como o número de ciclos de carga e descarga elevado, rapidez de recarga e a elevada densidade de potência.

Princípio de funcionamento

O princípio de funcionamento é igual ao dos comuns condensadores onde se armazena energia eléctrica de forma directa através do armazenamento de cargas eléctricas. Essas cargas podem ser armazenadas em objectos condutores. A capacidade desses objectos de armazenar cargas eléctricas é o que define a sua capacidade electrostática, um objecto condutor carregado tem uma certa quantidade de carga Q . Isso faz com que o mesmo possua um potencial eléctrico V (5-3).

$$Q = C * V \text{ (em Coulomb)} \quad (5-3)$$

A capacidade depende da permissividade do dieléctrico, da área das placas A e da distância entre as placas d , como se exprime em (5-4). A energia armazenada no condensador depende da sua capacidade e do quadrado da tensão (5-5).

$$C = \varepsilon * \frac{A}{d} \text{ (em Farad)} \quad (5-4)$$

$$E_c = \frac{1}{2} * C * V^2 \text{ (em Joule)} \quad (5-5)$$

A quantidade de energia armazenada num condensador depende do quadrado do valor da sua tensão. No entanto a tensão é limitada pelo valor máximo de ruptura do dieléctrico, que depende também directamente do distanciamento entre as placas. A capacidade pode ser assim maximizada, aumentando a área das placas, aumentando a permissividade, ou diminuindo a distância entre as placas.

A potência máxima (P_{max}) de um supercondensador é dada por [62]:

$$P_{max} = \frac{V^2}{4 * R} \quad (5-5)$$

Onde, V é a voltagem da célula, e R é a resistência série total equivalente (ESR) do condensador.

²⁸ Do termo ingles EDLC – Electric Double-Layer Capacitor

Os supercondensadores têm um dielétrico formado por umas placas que são na realidade duas camadas do mesmo substrato. A sua propriedade electroquímica, chamada de "dupla camada eléctrica", resulta na separação efectiva de carga, apesar de muito ténue (da ordem de nanómetros) das camadas. A falta de necessidade de uma camada de dielétrico volumoso, e a porosidade do material utilizado, permite placas com área de superfície muito maior para um dado volume, resultando em capacitâncias elevadas [63].

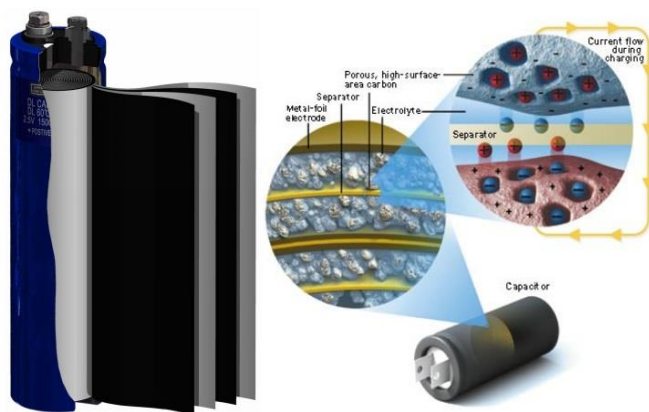


Figura 5-21: Condensadores de dupla camada eléctrica (EDLC) [64].

Capaz de alcançar maior potência e maior vida útil do que as baterias, os supercondensadores foram desenvolvidos para fornecer energia a uma vasta gama de aplicações, incluindo transporte eléctrico (veículos eléctricos híbridos (HEV) e plug-in PHEV), indústria da energia eléctrica (alimentação de emergência, etc.), electrónica de consumo (computadores portáteis, telemóveis, etc.), equipamento médico (desfibriladores portáteis, estimuladores neurológicos, etc.) e dispositivos de defesa militar (dispositivos de comunicação, veículos aéreos não tripulados, sondas espaciais, sistemas de mísseis, etc.)

Nos transportes eléctricos, os supercondensadores estão a ser desenvolvidos para fornecer potência de pico durante a aceleração e grandes subidas, e podem ser recarregados durante a travagem regenerativa. Isto é extremamente útil para se conseguir uma melhor economia de combustível, diminuindo as emissões de CO₂, e reduzindo a dependência de fontes de origem fóssil.

O maior problema dos supercondensadores é a sua reduzida densidade de energia, e é neste campo que se têm concentrado os estudos. Como a capacitância destes dispositivos é proporcional à área do eléctrodo activo, a solução para aumentar a densidade de energia passa por aumentar a área do eléctrodo, isto tem sido conseguido com a utilização de materiais extremamente porosos como o carvão vegetal activo que tem uma elevada área de superfície específica. No entanto o carvão vegetal activo possui limitações pois os portadores de carga são muitas vezes, maiores que os poros do carvão activo limitando assim o armazenamento.

Neste momento a investigação virou-se para a nanotecnologia e concentra-se em procurar materiais que ofereçam maiores áreas de superfície.

Materiais em estudo considerados com elevado potencial

Grafeno

O grafeno possui elevada área de superfície por unidade gravimétrica ou volumétrica e é altamente condutor. Bor Jang e outros cientistas da Nanotek Instruments desenvolveram um supercondensador com base no grafeno e obtiveram densidades de energia específica de 85,6 Wh / kg à temperatura ambiente e 136 Wh / kg a 80 °C medido a uma densidade de corrente de 1 A/grama. O grafeno é constituído por uma camada única de átomos Carbono, flexível, com células hexagonais e excelentes propriedades condutoras de electricidade. Neste supercondensador é também utilizado um composto de acetileno, uma substância química chamada PTFE (Politetrafluoretileno) e electrólitos Celguard-3501. Com o grafeno consegue-se uma elevada relação de área/peso. O grafeno permite alcançar uma área de 2.675 m² por grama. Embora existam muitas equipas a tentar chegar a supercondensadores baseados em grafeno, os resultados obtidos até agora não chegam nem mesmo remotamente aos valores de capacitância teórica de 550 F/g (Farads por grama). Apesar da boa relação área/peso os condensadores de grafeno não atingem o limite teórico, pois as camadas de grafeno devido à sua proximidade colam-se umas às outras. Para solucionar este problema curvam-se as camadas [65].

Nanotubos de Carbono

“Cientistas americanos, da Universidade de UC Davis, desenvolveram um novo tipo de supercondensadores utilizando como base nanotubos de Carbono (Figura 5-22). Os ensaios realizados determinaram uma libertação enorme de energia.

Posteriormente cientistas coreanos conseguiram desenvolver um método para depositar os nanotubos de Carbono sobre folhas de níquel, mantendo-os perfeitamente alinhados e muito próximos uns dos outros. Devido ao seu reduzido tamanho, os nanotubos fornecem uma gigantesca área superficial, na qual a energia pode ser armazenada e depois libertada” [62].

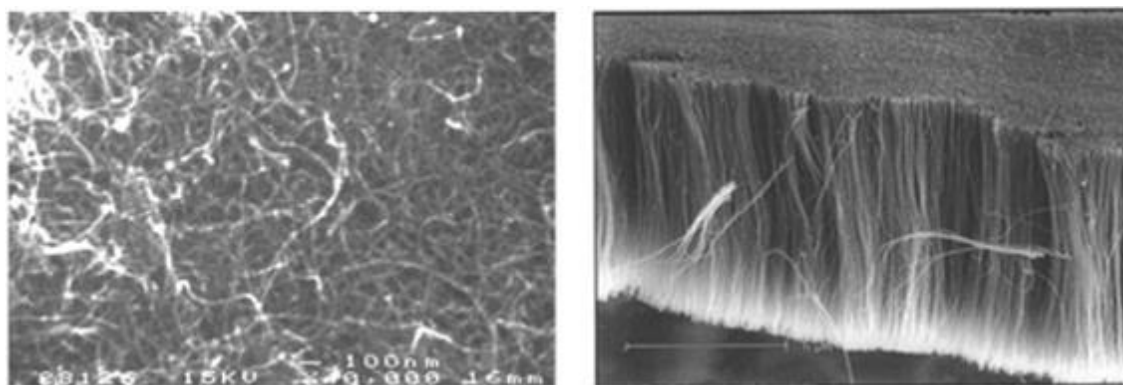


Figura 5-22: Ilustração dos nanotubos de Carbono [62].

Aerogel

O aerogel de Carbono é um material extremamente leve. Pesquisas em Livermore já conseguiram obter uma sílica aerogel apenas com duas vezes a densidade do ar.

Os aerogéis são células abertas de plástico com poros com menos de 50 nanómetros de diâmetro. A estrutura interna de ligações cruzadas dá aos aerogéis uma área de superfície interna por grama maior do que qualquer um dos materiais conhecidos (dióxido de Silício, óxido de Alumínio, etc.). Os aerogéis possuem as melhores propriedades de isolamento a nível eléctrico, térmico e de som, do que qualquer sólido conhecido.

O aerogel de Carbono fornece uma área de superfície de alta densidade de cerca de 400 – 1000 m²/g. Os eléctrodos dos supercondensadores de aerogel são geralmente feitos a partir de um material composto de fibras de Carbono revestido com aerogel orgânico. As fibras de Carbono fornecem a integridade estrutural e o aerogel fornece a grande área de superfície necessária. Só podem funcionar com tensões reduzidas, tensões mais elevadas ionizam o carbono e danificam o supercondensador.

Os supercondensadores de aerogel de Carbono atingiram uma densidade de energia de 90 Wh/kg e uma densidade de potência de 20 W/g [52].

Vantagens e desvantagens dos supercondensadores

Vantagens

- Longa vida, com pouca degradação ao longo de centenas de milhares de ciclos de carga.
- Baixo custo por ciclo.
- Elevadas taxas de cargas e descarga.
- Resistência interna (ESR) extremamente baixa e conseqüente alta eficiência do ciclo (95% ou mais) e níveis de aquecimento baixos.
- Potência específica elevada.
- Melhoria da segurança, devido a electrólito não corrosivo e baixa toxicidade dos materiais.
- Não são necessários métodos de detecção de carga completa, não há perigo de sobrecarga.
- Quando usado em conjunto com as baterias recarregáveis, em algumas aplicações o EDLC pode fornecer energia para um curto período de tempo, prolongando a vida da bateria.

Desvantagens

- Baixa densidade de energia.
- Auto-descarga elevada, a energia armazenada decresce desde 100 a 50 por cento em cerca de 30 a 40 dias.

- Tensão máxima baixa, para obter tensões mais altas são necessárias ligações em série, e o equilíbrio de tensão pode ser necessário. As ligações em série diminuem a capacidade total.
- De forma a termos uma tensão constante existe a necessidade de utilizar um conversor DC/DC com consequente perda de rendimento.

Membrana de armazenamento de energia

Os últimos desenvolvimentos em tecnologia de armazenamento eléctrico são de uma equipe da Universidade National University of Singapore's Nanoscience and Nanotechnology Initiative (NUSNNI), liderada pelo investigador Dr. Xie Xian Ning. Este desenvolveu a primeira membrana de armazenamento de energia do mundo (energy-storage membrane).

Reconhecendo os problemas relacionados com o meio ambiente e as dificuldades do armazenamento de energia sob a forma de electricidade, Xie e sua equipa desenvolveram uma membrana que não só promete uma maior rentabilidade do armazenamento e disponibilização de energia, mas também uma solução amiga do ambiente.

Os investigadores usaram uma membrana baseada num polímero de poliestireno, macio e moldável que, quando colocado entre placas de metal carregadas, pode armazenar carga de 0,2 Farads por centímetro quadrado.

Isto está bem acima do limite típico de 1 microfarad por centímetro quadrado armazenado num condensador padrão.

Os custos envolvidos no armazenamento de energia são também reduzidos drasticamente. A membrana pode ser usada em veículos híbridos para armazenamento e entrega de potência instantânea, melhorando assim a eficiência energética e a redução de emissões de Carbono. Potencialmente, os carros híbridos com a tecnologia de membrana podem ser alimentados pela energia armazenada nas membranas em conjunto com a energia fornecida pelo motor de combustão, aumentando a vida útil das baterias do carro e diminuindo o desperdício. A membrana também pode ser integrada próximo de painéis solares e turbinas eólicas para armazenar e gerir a energia gerada. A energia fornecida por estas fontes está propensa a instabilidade devido à sua dependência de factores naturais. Utilizando tecnologias de armazenamento de energia com base nesta membrana, a questão da instabilidade poderia ser anulada, a energia excedente gerada pode ser armazenada, e entregue para uso em momentos em que os factores naturais são insuficientes, como a falta de sol durante a noite [21].

6. Projecto do sistema de armazenamento de energia com supercondensadores

Neste capítulo é exposto o desenvolvimento de um sistema de armazenamento de energia baseado na associação de supercondensadores para substituir a bateria de um pequeno veículo eléctrico (escala de dimensão 1:10). Apesar de se tratar de um veículo de pequenas dimensões este está equipado com componentes idênticos aos existentes num veículo à escala real, constituído por um motor de imãs permanentes, um controlador trifásico e uma bateria. Pretende-se que o veículo modificado seja movido por esta tecnologia de armazenamento que deverá ter uma energia idêntica à bateria original. São apresentados os resultados das simulações e dos estudos de acomodação da nova bateria, autonomia, viabilidade entre outros.

6.1 Especificações do veículo eléctrico

6.1.1 Veículo eléctrico (escala de dimensão 1:10)

Na Figura 6-1 encontra-se o aspecto físico do veículo eléctrico e as suas respectivas dimensões, no Quadro 6-1 estão algumas características do mesmo. A Figura 6-2 representa o diagrama de blocos da parte eléctrica.

1/10 SCALE BRUSHLESS BUGGY



Figura 6-1: Bandit VXL [66].

Quadro 6-1: Características do Bandit VXL.

Peso	1.36 kg
Motor	Velineon 380 Brushless
Electronic Speed Control (ESC²⁹)	VXL-3m WATERPROOF ESC
Sistema de rádio	TQi™ 2.4 GHz
Bateria	Traxxas 7.2 V NiMH 1200mAh 6-Cell Flat
Diâmetro das Rodas	2.2" ≈ 5.6 cm



Figura 6-2: Diagrama de blocos da parte eléctrica [67].

²⁹ Do termo inglês ESC – Electronic speed control.

6.1.2 Motor eléctrico

O veículo eléctrico utiliza o motor de ímãs permanentes representado na Figura 6-3 e cujas características de encontram no Quadro 6-2.



Figura 6-3: Velineon 380 Motor [68].

Quadro 6-2: Características do motor [67].

ipo	Sensorless Brushless
RPM/Volt	4000
Max RPM	50000
Corrente	25 A, constante / 50 A, máximo

6.1.3 Electronic Speed Control (ESC)

Na ligação entre a bateria e o motor é usado o controlador trifásico da Figura 6-4, as suas características encontram-se no Quadro 6-3.

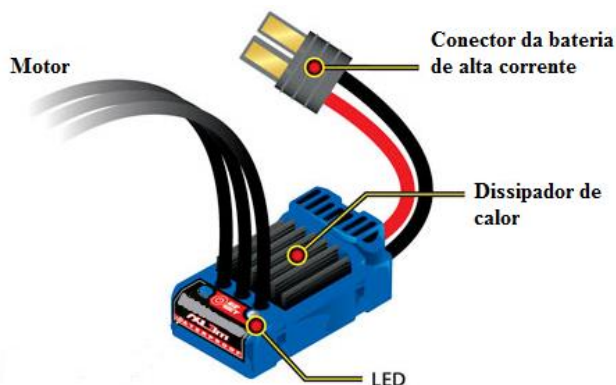


Figura 6-4: VXL-3m Waterproof Electronic Speed Control [69].

Quadro 6-3: Características do ESC.

Tensão	6 a 12 cells NiMH, 2S a 3S LiPo
Frequência do PWM	12000 Hz
Corrente contínua	50 A
Corrente de Pico	150 A

6.1.4 Bateria

A bateria original (Figura 6-5) é de NiMH (Níquel-hidreto metálico) e as suas características encontram-se no Quadro 6-4.



Figura 6-5: Bateria NiMH [70].

Quadro 6-4: Características da bateria.

Tensão	7.2 V
1200 mAh	
Energia	8.64 Wh
Densidade de energia	≈ 66 Wh/kg
Comprimento	9.4 cm
Largura	3.4 cm
Altura	1.7 cm
Peso	≈ 130 g

A velocidade máxima do veículo depende da bateria como demonstra a Figura 6-6, no nosso caso a velocidade máxima é de 35 mph ou seja aproximadamente 56 km/h.

BANDIT VXL SPEED & SKILL LEVEL CHART				
SPEED	35+mph	45+mph	65+mph	70mph & beyond
GEARING pinion/spur	26/76	28/76 (included)	33/76 (sold separately)	33/76 (sold separately)
BATTERY	6-Cell NiMH	7-Cell NiMH	3S 20C Lipo*	3S 20C LiPo*
NOMINAL VOLTAGE	7.2V	8.4V	11.1V	11.1V
mAh	3000+ mAh	4000+ mAh	4000+ mAh	8000+ mAh
SKILL LEVEL	1	2	5	5

Figura 6-6- Quadro das velocidades dependentes da bateria [66].

6.2 Projecto da nova bateria de supercondensadores

Energia da bateria original

Para projectar a nova bateria é necessário calcular qual a energia da bateria original do veículo por forma a criar uma bateria de energia idêntica. A original possui uma tensão de 7.2 V e capacidade de 1.2 Ah (Quadro 6-4).

$$Energia = 7.2 * 1.2 = 8.64 Wh$$

A marca de supercondensadores escolhida foi a Maxwell, e será usado como referência o supercondensador *Maxwell BCAP3000* (Figura 6-7).

Características do supercondensador *Maxwell BCAP3000* (Quadro 6-5)



Figura 6-7: Maxwell BCAP3000 [71].

Quadro 6-5: Características do Maxwell BCAP3000 [72].

Capacidade	3000 F
Tensão	2.7 V
Energia	3.04 Wh
Ciclos de vida	1 000 000
Max. I	130 A
Max. I pico	2 200 A
Max ESR³⁰_{DC}	0.29 mΩ
Corrente de fuga (max.)	5.2 mA
Comprimento	13.8 cm
Diâmetro	6.07 cm
Peso	510 g

³⁰ Do termo inglês ESR – Equivalent series resistance.

Nova bateria de supercondensadores

Como cada supercondensador tem 3.04 Wh (Quadro 6-5) e de forma a termos uma bateria com energia idêntica à original a nova bateria será constituída por 3 supercondensadores em série.

Tendo por base as dimensões do supercondensador da Maxwell BCAP3000 (Figura 6-8), foram consideradas duas configurações possíveis para a disposição da bateria (Figura 6-9 e Figura 6-10). Nas medidas apresentadas não são consideradas as ligações que não serão superiores a 1 centímetro. As características da nova bateria são apresentadas no Quadro 6-6.

Medidas de cada supercondensador

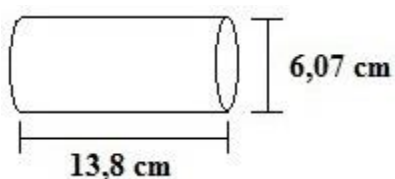


Figura 6-8: Dimensões do supercondensador Maxwell BCAP3000.

Configuração 1

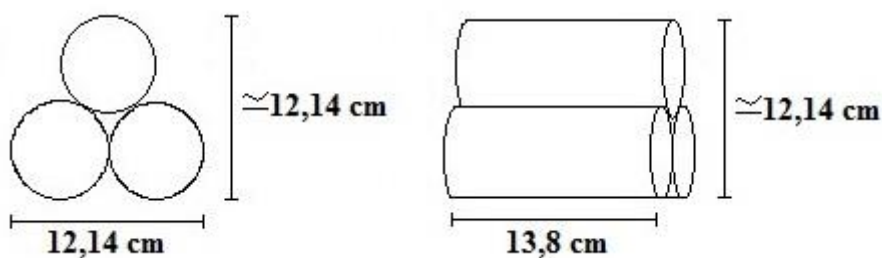


Figura 6-9: Configuração 1 da disposição da bateria.

Configuração 2, disposta deitada na base do veículo

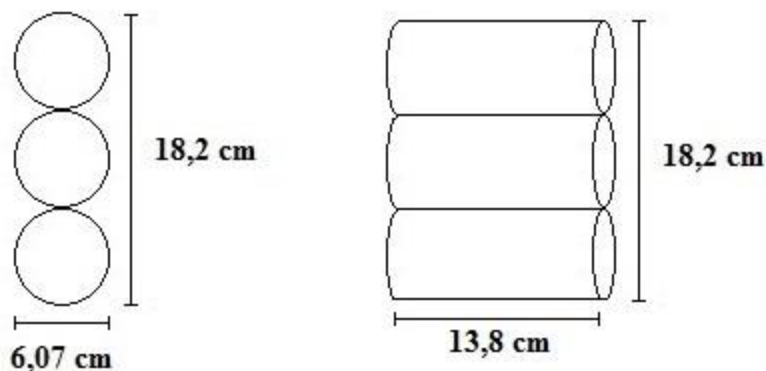


Figura 6-10: Configuração 2 da disposição da bateria.

Quadro 6-6: Características da nova bateria de supercondensadores.

Capacidade	1000 F
Tensão	8.1 V
Energia	9.12 Wh
Peso	1530 g

6.3 Estudo da autonomia

No estudo da autonomia foi usado o modelo cinemático do veículo eléctrico. Este é necessário para calcular a energia que é necessária fornecer ao veículo para o manter a uma determinada velocidade. O modelo foi calculado para a velocidade média de 28 km/h, considera-se ainda que o veículo se encontra numa superfície plana de asfalto e despreza-se o vento e o momento angular de aceleração. Este estudo serve também para comparar a autonomia da nova bateria com a da bateria original.

Força gravítica

$$F_g = m * g * \sin(\alpha)$$

$F_g = 0$ porque,

$\alpha = 0$ (superfície plana, horizontal!)

Força (ou atrito) de resistência ao rolamento

$$F_r = P_t * f_r \quad \text{onde,}$$

$P_t = \text{Peso total}$

$f_r = \text{Coeficiente de resistência ao rolamento(Quadro 6-7)}$

Neste caso será usado o coeficiente médio para asfalto 0.0125.

Quadro 6-7: Coeficientes de resistência ao rolamento [73].

Tipo de piso	f_r	f_r médio
Cimento	0.008-0.01	0.009
Asfalto	0.01-0.015	0.0125
Calçada	0.033-0.055	0.044
Areia	0.15-0.3	0.225
Neve	0.025-0.037	0.031

Bateria nova (Supercondensadores)

Massa do veículo – 1.36 kg

Massa da bateria – 1.53 kg

$$P_t = (1.36 + 1.53) * 9.8 = 28.32 \text{ N}$$

$$F_r = 28.32 * 0.0125 = 0.35 \text{ N}$$

Bateria original (NiMH)

Massa do veículo – 1.36 kg

Massa da bateria – 0.13 kg

$$P_t = (1.36 + 0.13) * 9.8 = 14.6 \text{ N}$$

$$F_r = 14.6 * 0.0125 = 0.18 \text{ N}$$

Força (ou atrito) de resistência aerodinâmica

Este parâmetro é igual para as duas baterias.

$$F_D = \frac{1}{2} * \rho_{ar} * A_f * C_D * (v \pm v_{vento})^2 \quad \text{onde,}$$

ρ_{ar} = Densidade do ar cujo valor típico ao nível do mar e a 15°C é de 1.225 kg/m³

A_f = Área frontal do veículo

A área frontal é calculada tendo em conta as medidas presentes na Figura 6-1 que correspondem as representadas na Figura 6-11.

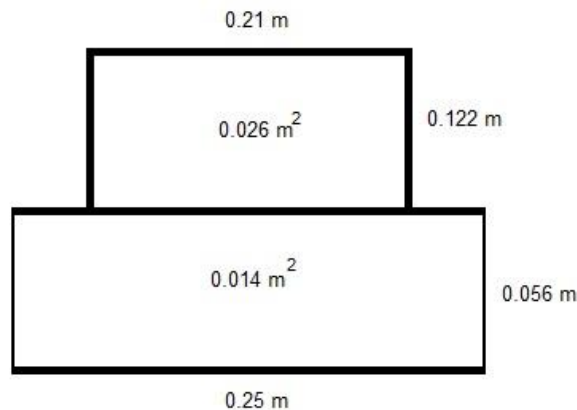


Figura 6-11: Área frontal do veículo eléctrico.

$$A_f = 0.026 + 0.014 = 0.04 \text{ m}^2$$

C_D = Coeficiente de resistência aerodinâmica(Quadro 6-8)

Será usado o coeficiente para carro aerodinâmico 0.25.

Quadro 6-8: Coeficientes aerodinâmicos [74].

Tipo de veículo	C_D
Camiões, comboios	0.8-1.5
Carro moderno	0.3-0.7
Carro desportivo	0.2-0.3
Carro aerodinâmico	0.1-0.25

$$(v \pm v_{vento})^2$$

É a velocidade do veículo em metros por segundo com a componente de acção do vento nessa velocidade. Esta componente poderá variar o seu sinal, ou seja, quando o vento é oposto á velocidade de circulação ela tem sinal negativo e corresponde a um aumento efectivo da velocidade.

Neste caso 28 km/h \approx 7.8 m/s.

$$F_D = \frac{1}{2} * 1.225 * 0.04 * 0.25 * 7.8^2 \approx 0.37 N$$

Força de atrito Total

Bateria nova (Supercondensadores)

$$F_t = F_r + F_D = 0.35 + 0.37 = 0.72 N$$

Bateria original (NiMH)

$$F_t = F_r + F_D = 0.18 + 0.37 = 0.55 N$$

Cálculo da potência eléctrica a fornecer ao sistema propulsor

$$P_{eléctrica} = \frac{P_w}{\eta} \quad \text{onde,}$$

$$P_w = v * F_t \quad \text{onde,}$$

$v = \text{velocidade do veículo em m/s}$

Bateria nova (Supercondensadores)

$$P_w = 7.8 * 0.72 = 5.62 W$$

$$P_{eléctrica} = \frac{5.62}{0.7} \approx 8.03 W$$

Bateria original (NiMH)

$$P_w = 7.8 * 0.55 = 4.29 W$$

$$P_{eléctrica} = \frac{4.29}{0.8} \approx 5.36 W$$

Nota: No rendimento são consideradas perdas no variador electrónico de velocidade, no motor eléctrico e na transmissão mecânica, no caso da bateria de supercondensadores são também consideradas as perdas no conversor DC-DC necessário para esta aplicação.

Corrente debitada pela bateria

$$P_{elétrica} = V * I$$

Bateria nova (Supercondensadores)

$$I = \frac{P_{elétrica}}{V} = \frac{8.03}{7.2} \approx 1.12 \text{ A}$$

Bateria original (NiMH)

$$I = \frac{P_{elétrica}}{V} = \frac{5.36}{7.2} \approx 0.74 \text{ A}$$

6.3.1 Modelo de simulação com a bateria de supercondensadores

Para o estudo de simulação da nova bateria de supercondensadores foi usado o Simulink da MathWorks.

Modelo da bateria

Na bateria foi usado um modelo de um supercondensador pré-desenvolvido pela MathWorks que considera as perdas resultantes das correntes de fuga internas. O Modelo da bateria de supercondensadores desenvolvido para a simulação está na Figura 6-12.

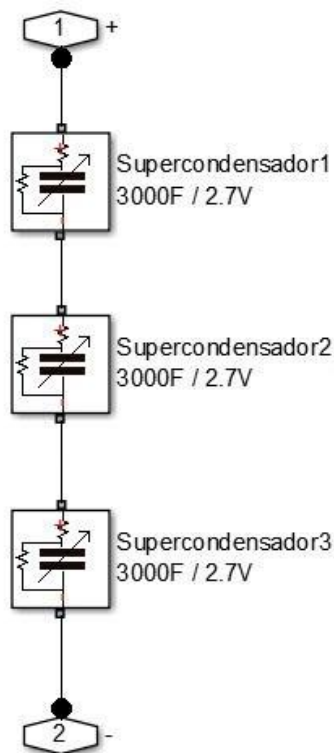


Figura 6-12: Modelo da bateria de supercondensadores.

Modelo de simulação da descarga da bateria de supercondensadores

O uso de uma bateria de supercondensadores implica usar um conversor DC-DC de forma a aproveitar o máximo de energia nela contida. Neste modelo foram usadas as características de um conversor DC-DC da Linear Technology presentes na Quadro 6-9, a função deste será a de manter á sua saída uma tensão constante de 7.2 V, igual à bateria original. A corrente de saída da bateria de supercondensadores aumenta significativamente com a descida de tensão devido há necessidade de o conversor manter os 7.2 V constantes, por causa deste problema foi usada uma protecção no circuito que evita correntes superiores a 25 A, corrente máxima suportada pelo conversor. A simulação foi feita para um consumo de 1.12 A resultante do estudo com o modelo cinemático para a velocidade média de 28 km/h. A Figura 6-13 representa o modelo da descarga da bateria de supercondensadores que foi simulado.

Quadro 6-9: Características do conversor DC-DC da Linear Technology [75].

Modelo	Buck-Boost - LT8705
V_{in}	2.8-80 V
V_{out}	1.3-80 V
I_{out}	Até 25 A
Frequência Máx.	400 kHz
Eficiência Máx.	98%

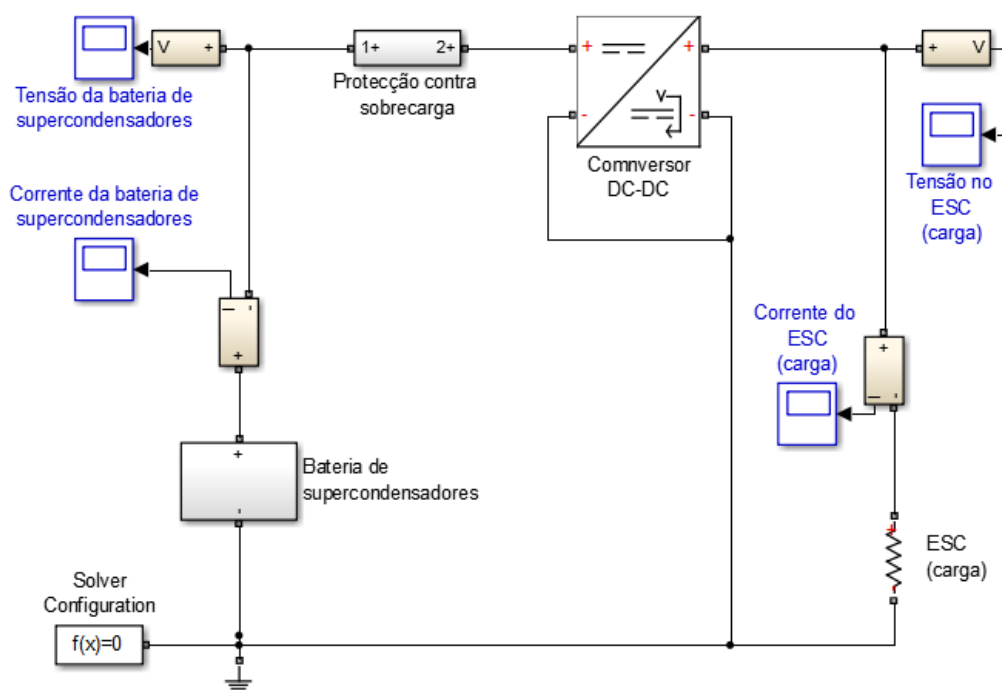


Figura 6-13: Modelo da descarga da bateria de supercondensadores.

6.3.2 Resultados do modelo de simulação da descarga

A descarga termina quando a bateria de supercondensadores atinge os 2.8 V que é a tensão mínima de entrada do conversor (Figura 6-14).

A bateria consegue fornecer energia ao veículo à sua velocidade média de 28 km/h durante aproximadamente 3400 segundos.

A Figura 6-15 representa a saída do conversor DC-DC.

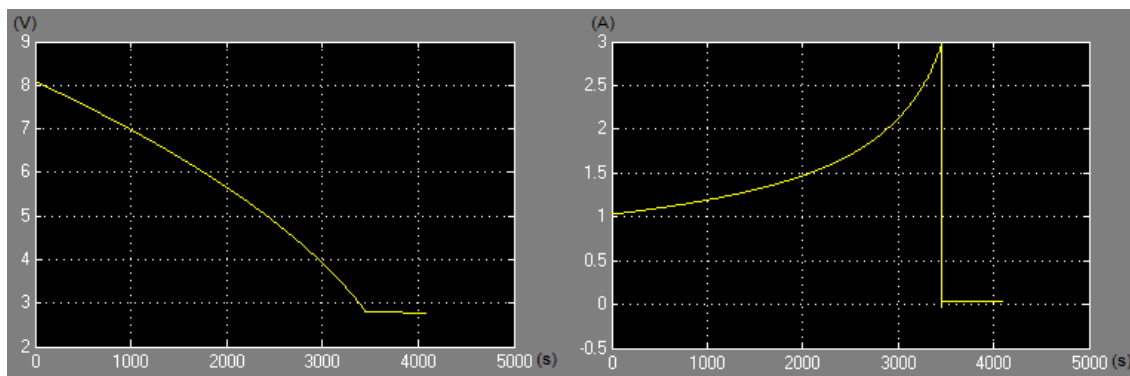


Figura 6-14: Resultados da descarga da bateria de supercondensadores.

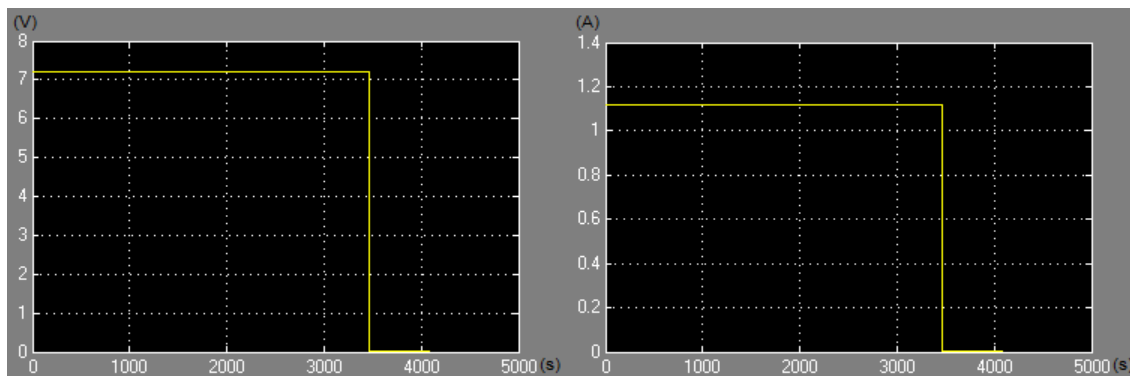


Figura 6-15: Tensão e corrente no ESC.

6.3.3 Cálculo da autonomia

Bateria de supercondensadores

$$\frac{3400}{60} \approx 56.67 \text{ minutos} \quad \frac{56.67}{60} \approx 0.94 \text{ horas}$$

$$\text{Autonomia} = 0.94 * 28 \approx 26 \text{ km}$$

A autonomia do veículo à sua velocidade média de 28 km/h numa superfície plana de asfalto alimentado pela bateria de supercondensadores é de aproximadamente 26 km.

Cálculo da energia utilizada

$$P_{elétrica} \approx 8.03 \text{ W (Secção 6.3)}$$

$$E_{utilizada} = 8.03 * 0.94 = 7.55 \text{ Wh}$$

Embora a energia da nova bateria seja de 9.12 Wh somente 7.55 Wh são utilizados devido à tensão mínima de entrada do conversor DC-DC.

Bateria original (NiMH)

A bateria original tem 1.2 Ah o que significa que consegue fornecer 1A durante 1.2 horas, dividindo esse tempo pela corrente resultante do modelo cinemático obtêm-se o tempo que a bateria consegue fornecer a mesma.

$$\frac{1.2}{0.74} \approx 1.62 \text{ horas}$$

$$1.62 * 28 \approx 45 \text{ km}$$

A autonomia do veículo à sua velocidade média de 28 km/h numa superfície plana de asfalto alimentado pela bateria original (NiMH) é de aproximadamente 45 km.

6.3.4 Cálculo da autonomia à velocidade máxima

Neste cálculo é usado novamente o modelo cinemático é considerado que o veículo se encontra numa superfície plana de asfalto e despreza-se o vento e o momento angular de aceleração. A velocidade máxima do veículo com a bateria original é de 56 km/h (Figura 6-6).

Força gravítica

$$F_g = m * g * \sin(\alpha)$$

$$F_g = 0 \quad \text{porque,}$$

$$\alpha = 0 \quad (\text{superfície plana, horizontal!})$$

Força (ou atrito) de resistência ao rolamento

Bateria nova (Supercondensadores)

$$F_r = 28.32 * 0.0125 = 0.35 \text{ N}$$

Nota: Valores já calculados na secção 6.3.

Bateria original (NiMH)

$$F_r = 14.6 * 0.0125 = 0.18 \text{ N}$$

Força ou atrito de resistência aerodinâmica

Neste caso 56 km/h \approx 16 m/s.

$$F_D = \frac{1}{2} * 1.225 * 0.04 * 0.25 * 16^2 \approx 1.57 \text{ N}$$

Força de atrito Total

Bateria nova (Supercondensadores)

$$F_t = F_r + F_D = 0.35 + 1.57 = 1.92 \text{ N}$$

Bateria original (NiMH)

$$F_t = F_r + F_D = 0.18 + 1.57 = 1.75 \text{ N}$$

Cálculo da potência eléctrica a fornecer ao sistema propulsor

Bateria nova (Supercondensadores)

$$P_w = 16 * 1.92 = 30.72 \text{ W}$$

$$P_{elétrica} = \frac{30.72}{0.7} \approx 43.89 \text{ W}$$

Bateria original (NiMH)

$$P_w = 16 * 1.75 = 28 \text{ W}$$

$$P_{elétrica} = \frac{28}{0.8} \approx 35 \text{ W}$$

Corrente debitada pela bateria

Bateria nova (Supercondensadores)

$$I = \frac{P_{el\u00e9ctrica}}{V} = \frac{43.89}{7.2} \approx 6.1 A$$

Bateria original (NiMH)

$$I = \frac{P_{el\u00e9ctrica}}{V} = \frac{35}{7.2} \approx 4.86 A$$

Resultados do modelo de simulação da descarga

A Figura 6-16 representa a sa\u00edda da bateria de supercondensadores e a Figura 6-17 a sa\u00edda do conversor DC-DC.

A bateria consegue fornecer energia ao ve\u00edculo \u00e0 velocidade m\u00e1xima de 56 km/h durante aproximadamente 600 segundos.

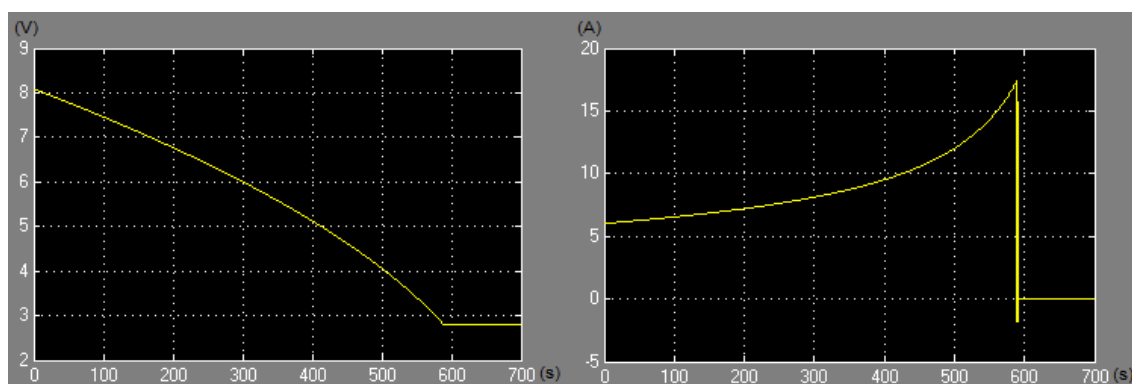


Figura 6-16: Resultados da descarga da bateria de supercondensadores.

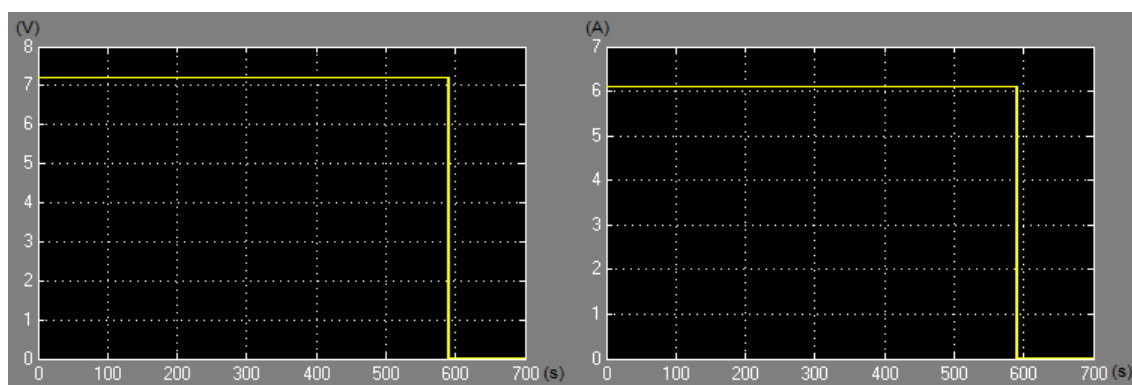


Figura 6-17: Tens\u00e3o e corrente no ESC.

Cálculo da autonomia à velocidade máxima

Bateria de supercondensadores

$$\frac{600}{60} = 10 \text{ minutos} \qquad \frac{10}{60} = 0.17 \text{ horas}$$

$$\mathbf{0.17 * 56 \approx 9.5 \text{ km}}$$

A autonomia do veículo à velocidade máxima de 56 km/h numa superfície plana de asfalto é de 9.5 km.

Bateria original (NiMH)

$$\frac{1.2}{4.86} \approx 0.25 \text{ horas}$$

$$\mathbf{0.25 * 56 \approx 14 \text{ km}}$$

A autonomia do veículo à velocidade máxima de 56 km/h numa superfície plana de asfalto alimentado pela bateria original (NiMH) é de aproximadamente 14 km.

6.4 Modelo de simulação da operação de carga da bateria de supercondensadores

No modelo da carga foi usada uma fonte de corrente e foram usados diferentes valores de corrente que resultaram em diferentes tempos de carga. Estes tempos de carga dependem somente da capacidade da fonte usada visto que o supercondensador suporta uma corrente máxima de 130 A (Quadro 6-5) e as operações de carga muito rápidas não têm qualquer efeito sobre a degradação dos supercondensadores até este valor, na Figura 6-18 está uma fonte capaz de fornecer até 100 A e no Quadro 6-10 as suas características.

A Figura 6-19 representa o modelo da carga da bateria de supercondensadores que foi simulado.



Figura 6-18: Fonte Zhaoxin KXN Series [76].

Quadro 6-10: Características da fonte Zhaoxin KXN Series.

Modelo	Zhaoxin KXN Series
V_{out}	0-30V
I_{out}	0-100A
P_{out}	>500W

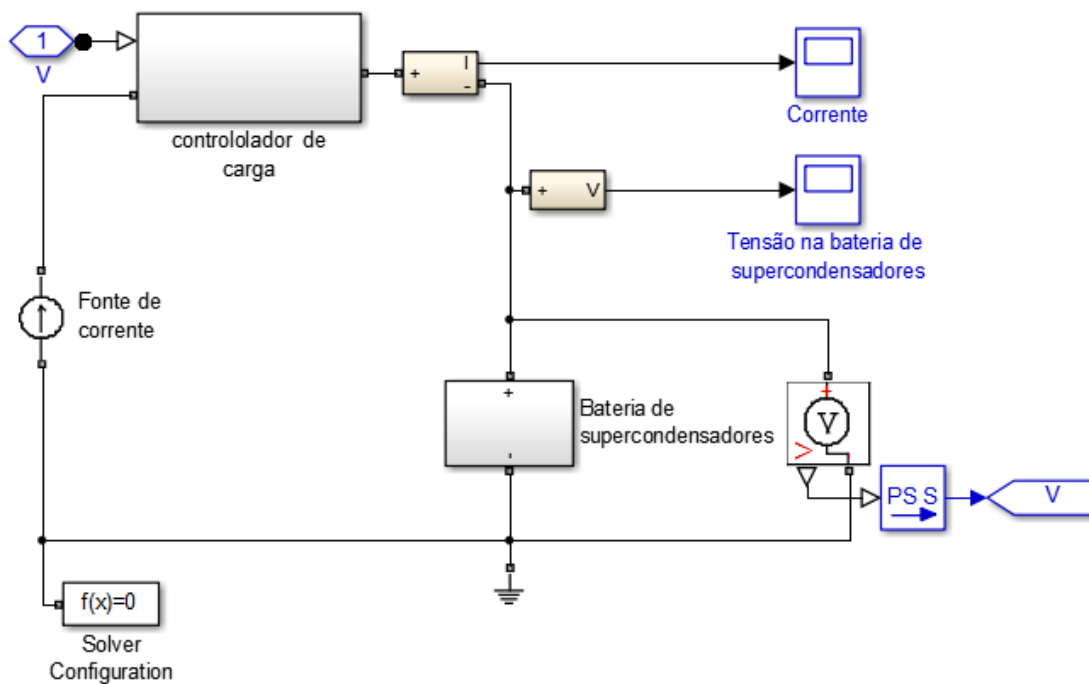


Figura 6-19: Modelo da carga da bateria de supercondensadores.

A bateria de supercondensadores carrega em 80 segundos quando alimentado por uma corrente constante de 100 A (Figura 6-20). O tempo de carga esta directamente relacionado com a corrente de carga como mostra o Quadro 6-11 e a Figura 6-21.

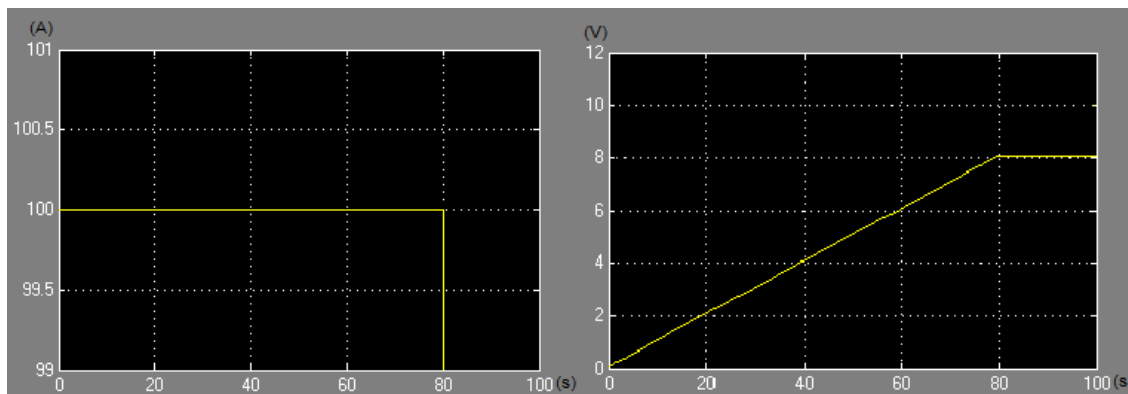


Figura 6-20: Simulação de carga com corrente de 100 A.

Quadro 6-11: Resultados da simulação de carga.

Corrente (A)	5	10	30	50	80	100	130
Tempo de Carga (s)	1600	800	260	160	100	80	60

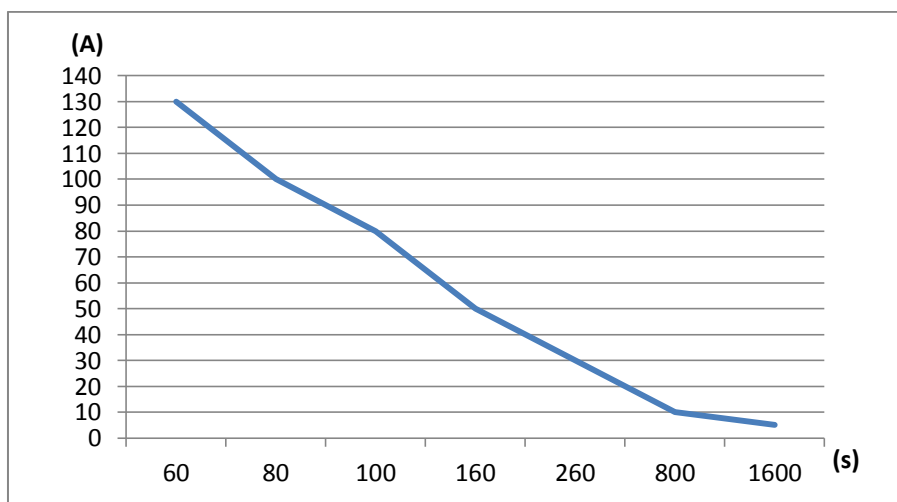


Figura 6-21: Tempo de carga em função da corrente.

6.5 Conclusões do Capítulo 6

No desenvolvimento deste projecto foi possível confirmar algumas das vantagens e desvantagens decorrentes do uso da tecnologia de armazenamento com supercondensadores.

A primeira conclusão foi sobre a densidade de energia, para uma energia equivalente, a nova bateria possui um peso que é mais de dez vezes superior (1.53kg) ao da bateria original (0.13kg). A autonomia da bateria de supercondensadores é inferior à da bateria original de NiMH isso deve-se entre outros factores ao elevado peso da nova bateria que resulta numa força de resistência ao rolamento de praticamente o dobro (0.35 N) da bateria original (0.18 N). Outro factor é o menor rendimento derivado da utilização de um conversor DC-DC necessário neste tipo de armazenamento. Nesse menor rendimento está incluído o facto de não utilizarmos toda a energia contida na bateria de supercondensadores, embora a energia da nova bateria seja de 9.12 Wh somente 7.55 Wh são utilizados devido à tensão mínima de entrada do conversor DC-DC (2.8 V). Para aumentar a autonomia do veículo seria necessário adicionar mais supercondensadores, o que resultaria no aumento do peso do conjunto e na perda de aerodinâmica.

Com este projecto conseguiu-se concluir o rápido tempo de carga sem degradação da bateria, com uma corrente de 100 A que não provoca qualquer degradação nos supercondensadores que suportam até 130 A a nova bateria carrega em apenas 80 segundos. Outra vantagem desta tecnologia é o elevado número de ciclos muito superior à tecnologia electroquímica.

Um dos pontos fracos desta solução é também a taxa de auto-descarga dos supercondensadores devido às correntes internas de fugas.

Do ponto de vista da exequibilidade esta solução torna-se ainda pouco prática devido à baixa densidade de energia desta tecnologia, o que implica maior peso e volume da nova bateria.

6.5.1 Sugestão de trabalho futuro

A tensão de uma bateria de supercondensadores diminui com a descarga, isso implica que se utilize um conversor DC-DC quando é necessário utilizar uma tensão constante. Por outro lado a corrente de saída aumenta significativamente com a descida de tensão de forma a manter a tensão constante à saída do conversor.

O conversor para supercondensadores requer elevadas dinâmicas que podem ser alcançadas através de uma alta frequência de comutação. Mas a alta frequência de comutação provoca perdas elevadas o que reduz a eficiência total do conversor. Este problema pode ser solucionado com a utilização da comutação de tensão zero (*zero voltage switching*) que mantém a alta eficiência do conversor com a preservação da alta frequência de comutação [77].

De modo a aumentar a eficiência desta tecnologia e o seu aproveitamento a solução pode passar pelo dimensionamento de um conversor DC-DC mais apropriado a este projecto, conseguindo-se um maior aproveitamento da energia contida na bateria de supercondensadores.

7. Conclusões gerais

A energia constitui um elemento vital no funcionamento da civilização tal como a conhecemos hoje. A maioria da energia que usamos provém de fontes não renováveis das quais a que assume mais importância é o petróleo. A nossa civilização enfrenta tempos de grandes mudanças, a aproximação do esgotamento do petróleo é um facto cada vez mais aceite pela comunidade e as condições atmosféricas instáveis são sentidas por todo o mundo. Essas são algumas das razões para a revolução energética que já se encontra em marcha. A aposta nas energias renováveis é grande e encontra-se em expansão, de forma a otimizar e acelerar essa expansão existe a necessidade das tecnologias de armazenamento de energia evoluírem também. É necessário armazenar a energia quando esta está disponível para usar quando é necessária, tornando o sistema mais eficiente.

É neste ponto que se encontra a emergente revolução energética, hoje já existem tecnologias em fase final de testes prestes a chegar aos mercados, entre as mais promissoras encontra-se a bateria de metal líquido produzida pela Ambri, uma bateria com grande capacidade de armazenamento e que deve ter um custo de produção reduzido devido à utilização de materiais abundantes e baratos, esta tecnologia tem grande potencial para revolucionar as energias renováveis aumentando a sua eficiência e contribuindo para a sua maior e melhor integração no sistema eléctrico já erigido.

Outra área que se encontra em expansão nesta nova mentalidade energética é a mobilidade eléctrica que também enfrenta o mesmo obstáculo que as energias renováveis, o armazenamento de energia. Nesta área a tecnologia mais evoluída é a baseada em Lítio onde a Envia detém o recorde da densidade de energia, 400 Wh/kg para além de ter conseguido um custo de produção menor. Esta além de ter maior durabilidade e de ser mais leve promete ser mais segura em caso de acidente do que as existentes no mercado actualmente.

O Lítio tem sido um dos materiais mais estudados, outra tecnologia baseada neste, que se encontra em desenvolvimento é conhecida por Lítio-ar, esta tecnologia é uma das muitas em fase de estudo conhecidas como Metal-ar, esta em particular tem uma densidade de energia teórica que se aproxima da densidade energética dos combustíveis fósseis (gasolina, gasóleo), neste momento existem quatro arquitecturas a serem estudadas, três soluções com electrólito líquido: aprótica, aquosa e uma mistura de ambos e uma quarta solução que utiliza um electrólito sólido, no entanto só a primeira pode ser actualmente recarregável. Embora muito promissora esta tecnologia ainda se encontra em desenvolvimento e com um grande caminho a percorrer.

Nesta corrida os supercondensadores também estão em equação, principalmente devido às suas vantagens como o elevado número de ciclos de carga sem degradação, potência específica elevada e principalmente pelas elevadas taxas de carga e descarga. No entanto enfrentam a desvantagem da baixa densidade de energia. Em estudo e com vista a eliminar esta desvantagem encontram-se diversos materiais, com os quais já se conseguiram densidades de energia promissoras, com o grafeno foram atingidos 85,6 Wh / kg à temperatura ambiente e 136 Wh / kg a 80 °C, com o aerogel o valor atingido foi de 90 Wh/kg.

Por enquanto os supercondensadores ainda não podem ser usados como sistema armazenador de energia na mobilidade eléctrica como foi constatado nas conclusões do capítulo 6 na secção 6.5. Por outro lado eles são uma boa escolha como uma fonte de potência auxiliar, pois são capazes de fornecer elevadas potências de pico na aceleração ou serem usados para armazenar a energia da travagem regenerativa.

REFERÊNCIAS

- [1] J. Kunstler, *The Long Emergency: Surviving the Converging Catastrophes of the Twenty-First Century*. Grove/Atlantic, 2005.
- [2] L. Sousa, «O Pico do Petróleo», Mar-2009. Disponível em: <http://www.jornalmeioambiente.com/materia/4090/o-pico-do-petroleo>. Acedido: 20-Jan-2012.
- [3] «The Oil Age». Disponível em: <http://www.oilposter.org/posterlarge.html>. Acedido: 07-Jul-2013.
- [4] Challenge Bibendum Booklets, *Let's drive electric - Electric and Hybrid Vehicles*.
- [5] «Protocolo de Quioto», *Wikipédia*, 13-Dez-2012. Disponível em: http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Protocolo_de_Quito&oldid=33279165. Acedido: 17-Dez-2012.
- [6] Challenge Bibendum Booklets, *More air! - Reduce CO2 emissions in road transport*.
- [7] «History of the Battery Electric Vehicles News». Disponível em: http://electricvehiclesnews.com/Technology/Battery_History.htm. Acedido: 20-Jan-2012.
- [8] Rafael, «Incríveis e misteriosos objetos antigos», Jun-2010. Disponível em: http://fantasticocenario.com.br/2010/06/05/incriveis-e-misteriosos-objetos-antigos/?like=1&_wpnonce=098f5383fd. Acedido: 20-Jan-2012.
- [9] P. Cesar, «Pilhas e Baterias». Disponível em: http://www.profpc.com.br/pilhas_baterias.htm. Acedido: 20-Jan-2012.
- [10] «Trough Battery». Disponível em: http://etc.usf.edu/clipart/61100/61104/61104_battery.htm. Acedido: 20-Jan-2012.
- [11] F. Ferrari, «Bref comparatif des technologies de batteries». Disponível em: http://www.symbiocars.com/symbiocars/JO/index.php?option=com_content&view=article&id=9:bref-comparatif-des-technologies-de-batteries&catid=3:batteries&Itemid=14. Acedido: 20-Jan-2012.
- [12] C. M. V. B. Almeida, «Qual a historia completa da pilha e da bateria?» Disponível em: <http://br.answers.yahoo.com/question/index?qid=20071022075341AA25lmW>. Acedido: 21-Jan-2012.
- [13] «Energy and Power by Battery Type», Jan-2010. Disponível em: http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/facts/2010_fotw607.html. Acedido: 21-Jan-2012.
- [14] «Thomas Davenport - Electrical Pioneer». Disponível em: <http://edisontechcenter.org/DavenportThomas.html>. Acedido: 21-Jan-2012.
- [15] «Ayrton & Perry 1881: the first electric car rebuilt». Disponível em: <http://www.technologicvehicles.com/en/green-transportation-news/1356/video-green-classic-ayrton-perry-1881-the-fir>. Acedido: 21-Jan-2012.
- [16] «World's first electric car built by Victorian inventor in 1884». Disponível em: <http://www.telegraph.co.uk/news/newstopics/howaboutthat/5212278/Worlds-first-electric-car-built-by-Victorian-inventor-in-1884.html>. Acedido: 21-Jan-2012.
- [17] «Porsche eléctrico de 1900», Jun-2010. Disponível em: <http://pelanatureza.pt/mobilidade/noticias/porsche-electrico-de-1900>. Acedido: 21-Jan-2012.
- [18] «Hist. Veiculo Eléctrico». Disponível em: http://alumni.ipt.pt/~frmendes/index_ficheiros/Page463.htm. Acedido: 21-Jan-2012.

- [19] «Henry Ford & The Model T». Disponível em: http://local.aaca.org/muscleshoals/frames/article_ford.html. [Acedido: 21-Jan-2012.
- [20] EDP, «Veículos Eléctricos». Disponível em: <http://www.edp.pt/pt/sustentabilidade/ied/wattdrive/veiculoselectricos/pages/veiculoselectricos.aspx>. Acedido: 23-Jan-2012.
- [21] *Mobilidade Eléctrica - 1ª edição 2011/2012*, 1ª edição ed. IPV-ESTV-Departamento de Engenharia Electrotécnica.
- [22] T. Ramos, «Sistema de tração de um VEC (Veículo Eléctrico de Competição)», Porto, 2010. Disponível em: http://paginas.fe.up.pt/~ee06254/tiagoramos/documentos/estado_de_arte.pdf
- [23] «Model S Features | Tesla Motors». Disponível em: <http://www.teslamotors.com/models/features#/performance>. Acedido: 13-Mai-2013.
- [24] G. Winnischofer, «Modelamento de veículo híbrido-eléctrico para transporte colectivo», São paulo, 2004. Disponível em: <http://pt.scribd.com/doc/40634730/VEICULO-HIBRIDO-ELETRICO>. Acedido: 03-Fev-2012.
- [25] L. Cardoso, «Desenvolvimento de “Range Extender” para veículo eléctrico», 2011.
- [26] P. Santos, «O Automóvel Híbrido como Elemento Fornecedor/Consumidor de Electricidade», 2009.
- [27] «FISKER ATLANTIC». Disponível em: <http://www.fiskerautomotive.com/GALLERY-ATL-INDEX.shtml>. Acedido: 13-Mai-2013.
- [28] «Carro Híbrido. Toyota Prius». Disponível em: http://www.toyota.pt/cars/new_cars/prius/index.tmx. Acedido: 13-Mai-2013.
- [29] «Opel Ampera | O carro eléctrico de grande alcance da Opel Portugal». Disponível em: <http://www.opel.pt/veiculos/opel-gama/veiculos-passageiros/ampera/indice.html>. Acedido: 13-Mai-2013.
- [30] «Volvo FE Hybrid - New Trucks: Volvo Trucks». Disponível em: <http://www.volvotrucks.com/trucks/global/en-gb/trucks/new-trucks/Pages/volvo-fe-hybrid.aspx>. Acedido: 19-Abr-2013.
- [31] «O mundo fantástico da Mobi.E», 2011. Disponível em: <http://luzligada.blogspot.pt/2011/08/o-mundo-fantastico-do-mobie.html>. Acedido: 03-Fev-2012.
- [32] «CHAdEMO charging video - how to plug in». Disponível em: <http://www.mynissanleaf.com/viewtopic.php?style=3&f=15&t=7338>. Acedido: 17-Nov-2013.
- [33] «Intelligent charging stations as a key to electric mobility». Disponível em: http://www.mennekes.de/nl/latest0.html?tx_ttnews%5Btt_news%5D=47&cHash=958c8a8fb119aeb0e57fc7a22d20c60c. Acedido: 04-Fev-2012.
- [34] «Que tipo de fichas existem para carregar EV's e PlugIn's?» Disponível em: <http://prius-pt.com/cafe/forums/p/3492/29172.aspx>. Acedido: 17-Nov-2013.
- [35] «O Zoe Inaugura a Era do Veículo Eléctrico para Todos». Disponível em: <http://www.renault.pt/descubra-a-renault/novidades-promocoes/imprensa/2012/03-2012-zoe/>. Acedido: 17-Dez-2012.
- [36] J. Delgado, «Abastecimento de veículos eléctricos, Sistemas de recarga lenta e recarga rápida», *Energia e futuro*, Jul. 2011.
- [37] N. Reis, «O automóvel híbrido como elemento fornecedor-consumidor de electricidade», IST, 2008. Disponível em: <https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/233748/1/DissertacaoFinalNunoReis.pdf>
- [38] «Electric Vehicles with V2G - Storage for Large-Scale Wind Power». Disponível em: http://www.wwindea.org/technology/ch04/en/4_3_4.html. Acedido: 04-Fev-2012.

- [39] T. Tengner, «Automatic inductive charging of electric vehicles». 2009.
- [40] «WiTricity Corp. Home». Disponível em: <http://www.witricity.com/>. Acedido: 04-Fev-2012.
- [41] «Wireless Power Planet». Disponível em: <http://www.wirelesspowerplanet.com/>. Acedido: 06-Fev-2012.
- [42] «Charge your EVs Wirelessly while you Drive», 2010. Disponível em: <http://www.tomsguide.com/us/haloipt-inductive-wireless-charging-road,news-9047.html>. Acedido: 06-Fev-2012.
- [43] «Wireless Power Technology - Wireless Power Consortium». Disponível em: <http://www.wirelesspowerconsortium.com/technology/>. Acedido: 19-Dez-2012.
- [44] «Mercedes Class A E-Cell». Disponível em: <http://insideevs.com/report-mercedes-to-produce-a-class-e-cell-powered-by-tesla/>. Acedido: 06-Fev-2012.
- [45] «i-MiEV | Mitsubishi Motors Portugal». Disponível em: <http://www.mitsubishi-motors.pt/explores.aspx?id=12789#/Gallery>. Acedido: 13-Mai-2013.
- [46] «Nissan Portugal». Disponível em: http://www.nissan.pt/?cid=ps-130_318518#vehicules/electric-vehicules/leaf/discover/photos/front-view/6. Acedido: 13-Mai-2013.
- [47] «Armazenamento de Energia», 2008. Disponível em: <http://www.inxinet.com/2008/08/26/armazenamento-de-energia/>. Acedido: 06-Fev-2012.
- [48] «Fontes de Energia Renovaveis e Nao Renovaveis». Disponível em: <http://www.portal-energia.com/fontes-de-energia/>. Acedido: 07-Fev-2012.
- [49] «Os 10 países líderes em energia eólica». Disponível em: <http://planetasustentavel.abril.com.br/noticia/energia/10-paises-lideres-energia-eolica-676876.shtml>. Acedido: 12-Jan-2013.
- [50] B. Silva, «Estudo de soluções Alternativas de Armazenamento de Energia para Diferentes horizontes Temporais», Porto, 2008 Disponível em: http://paginas.fe.up.pt/~ee02063/Dissertacao_Bruno_Silva.pdf. Acedido: 12-Jan-2013.
- [51] «Eficiência Energética e Integração Sustentada de PRE, “Armazenamento de energia”». UC-ISR-Departamento de engenharia Electrotécnica e de Computadores.
- [52] Anselmo Santos e Bruno Baptista, «“Produção e planeamento de energia – Armazenamento de energia”». Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- [53] «Physics and Economy of Energy Storage». International Conference Energy Autonomy through Storage of Renewable Energies by EUROSOLAR and WCRE, 2006.
- [54] «Envia Systems». Disponível em: <http://enviasystems.com/>. Acedido: 17-Dez-2012.
- [55] «Baterias de lítio ganham o poder do silício». Disponível em: <http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=baterias-litio-poder-silicio&id=010115110930>. Acedido: 29-Abr-2013.
- [56] G. Girishkumar, «Lithium-Air Battery: Promise and Challenges», *The Journal of Physical Chemistry Letters*.
- [57] «Metal–air electrochemical cell». Disponível em: http://en.wikipedia.org/wiki/Metal%E2%80%93air_electrochemical_cell. Acedido: 17-Nov-2013.
- [58] «Lithium–air battery», *Wikipedia*. Disponível em: http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Lithium%E2%80%93air_battery&oldid=526761385. Acedido: 17-Dez-2012.
- [59] D. Sadoway, *Donald Sadoway: The missing link to renewable energy*. Disponível em: http://www.ted.com/talks/donald_sadoway_the_missing_link_to_renewable_energy.html. Acedido: 12-Nov-2012.

- [60] «Ambri». Disponível em: <http://www.ambri.com/storage/documents/ambri-brochure-web5.pdf>. Acedido: 13-Mai-2013.
- [61] «Understanding Digital Quantum Capacitors». Disponível em: <http://newenergyandfuel.com/http://newenergyandfuel.com/2009/12/24/understanding-digital-quantum-capacitors/>. Acedido: 19-Dez-2012.
- [62] W. Lu e L. Dai, «Carbon Nanotube Supercapacitors». Disponível em: http://cdn.intechopen.com/pdfs/10024/InTech-Carbon_nanotube_supercapacitors.pdf. Acedido: 12-Nov-2013.
- [63] «Electric double-layer capacitor». Disponível em: http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_double-layer_capacitor. Acedido: 19-Dez-2012.
- [64] «Maxwell Technologies Ultracapacitors». Disponível em: <http://www.maxwell.com/>. Acedido: 19-Dez-2012.
- [65] «Graphene supercapacitor breaks storage record». Disponível em: <http://physicsworld.com/cws/article/news/2010/nov/26/graphene-supercapacitor-breaks-storage-record>. Acedido: 25-Mai-2013.
- [66] «Traxxas - Bandit VXL». Disponível em: <http://traxxas.com/products/models/electric/2407Lbanditvxl-specs>. Acedido: 01-Abr-2013.
- [67] «Velineon380». Disponível em: http://vxl.mojemodely.cz/instructions/3370_3371_Velineon380_INST.pdf. Acedido: 04-Abr-2013.
- [68] «Traxxas - Velineon 380 Motor». Disponível em: <http://traxxas.com/products/parts/motors/velineon380motor>. Acedido: 01-Abr-2013.
- [69] «Traxxas - VXL-3m ESC». Disponível em: <http://traxxas.com/products/parts/escs/vxl3m>. Acedido: 01-Abr-2013.
- [70] «Traxxas - NiMH Power Cell Batteries». Disponível em: <http://traxxas.com/products/parts/batteries/powercellbatteries/nimh>. Acedido: 02-Abr-2013.
- [71] «Maxwell Technologies, BCAP3000 P270 K05». Disponível em: http://elcodis.com/parts/1983501/BCAP3000_P270_K05.html. Acedido: 02-Abr-2013.
- [72] «Datasheet k2 series». Disponível em: http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/docs/datasheet_k2_series_1015370.pdf. Acedido: 13-Mai-2013.
- [73] L. Gomes, «O Veículo Eléctrico e a sua Integração no Sistema Eléctrico», Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa. Disponível em: <https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/767651/1/dissertacaoLuisGomes.pdf>. Acedido: 03-Fev-2012.
- [74] «Drag Coefficient». Disponível em: http://www.engineeringtoolbox.com/drag-coefficient-d_627.html. Acedido: 02-Nov-201.
- [75] «LT8705 - Buck-Boost DC/DC Controller». Disponível em: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/8705f.pdf>. Acedido: 14-Jun-2013.
- [76] «KXN Series High-power Switching DC Power». Disponível em: http://dennis866.en.ec21.com/KXN_Series_High_power_Switching--3912862_3912976.html. Acedido: 14-Jun-2013.
- [77] P. Chlebis, Z. Pfof, A. Havel, and P. Vaculik, «Soft-switched Converter for Ultracapacitors», Mar. 2011.