

PEDRO VAZ MARINS COSTA

Células eletroquímicas: um breve histórico e perspectivas sobre o atual mercado de veículos híbridos e elétricos

Pedro Vaz Marins Costa

Células eletroquímicas: um breve histórico e perspectivas sobre o atual mercado de veículos híbridos e elétricos

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador (a): Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza

Guaratinguetá
2022

C837c	Costa, Pedro Vaz Marins Células eletroquímicas: um breve histórico e perspectivas sobre o atual mercado de veículos híbridos e elétricos / Pedro Vaz Marins Costa – Guaratinguetá, 2022. 71 f : il. Bibliografia: f. 69-71 Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2022. Orientador: Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza 1. Baterias. 2. Veículos elétricos. 3. Indústria automobilística. I. Título. CDU 621.352
-------	---

PEDRO VAZ MARINS COSTA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA”

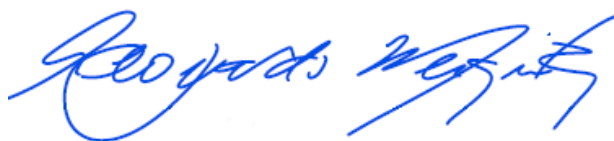
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM NOME DO CURSO

Prof. Dr. DANIEL JULIEN BARROS DA SILVA SAMPAIO
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. TEÓFILO MIGUEL DE SOUZA
Orientador/UNESP-FEG



Prof. Dr. LEONARDO MESQUITA
UNESP-FEG



Prof. Dr. DANIEL JULIEN BARROS DA SILVA SAMPAIO
UNESP-FEG

Março de 2022

Honrosamente, dedico este trabalho aos meus pais, Antônio Carlos e Márcia Valéria, e ao meu querido irmão, Fábio, por serem meus alicerces familiares durante toda a jornada de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço pelo apoio, auxílio, ajuda e, principalmente, pela paciência de todos os professores e funcionário da UNESP campus de Guaratinguetá, carinhosamente conhecida por FEG (Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá). Graças à essas pessoas, posso hoje vislumbrar um novo rumo para minha vida, sob novas perspectivas e através de um novo prisma da realidade. Com o empenho e dedicação de cada um, desde a equipe de manutenção até o corpo docente, criei maturidade e evolui como ser-humano, tanto em âmbito pessoal, bem como civil e profissional.

Também agradeço aos meus amigos de curso, que através dos anos de graduação motivaram-me e ajudaram a sustentar os fardos diários da vida universitária.

Por fim, porém não menos importante, agradeço aos meus familiares, que mantiveram o apoio às minhas escolhas e ensinaram-me a corrigir os erros cometidos através dos anos, assim como prestaram-me ajuda a levantar dos tombos causados acometidos pelas tomadas de decisões equivocadas – e que hoje enaltecem um ser-humano mais vivido e experiente.

Por todos esses motivos, sou eternamente grato.

“O homem científico não pretende alcançar um resultado imediato. Ele não espera que suas ideias avançadas sejam imediatamente aceitas. Seus trabalhos são como sementes para o futuro. Seu dever é lançar as bases para aqueles que estão por vir e apontar o caminho. O dia em que descobriremos exatamente o que é a eletricidade, isso irá marcar um evento provavelmente maior, mais importante que qualquer outro na história da humanidade. Então, será apenas uma questão de tempo para que o homem consiga ligar suas máquinas diretamente à própria natureza. Imagine o que está por vir...”

Nikola Tesla

RESUMO

Com consideráveis avanços de pesquisas em diferentes tecnologias voltadas para o desenvolvimento/aperfeiçoamento de meios de transporte sustentáveis, células eletroquímicas (popularmente denominadas “baterias”) vêm ganhando destaque devido sua relevância na indústria. No meio acadêmico, novos trabalhos são executados com o intuito final de alimentar o mercado aquecido, auxiliando o setor de mobilidade urbana – desde pequenos startups até gigantes no ramo automobilístico. Neste trabalho, apresenta-se um breve histórico das células eletroquímicas, permeando os diferentes tipos de baterias, bem como a evolução das mesmas através das eras. Em paralelo, aborda-se o destino final ao qual as baterias serão aplicadas, os veículos híbridos e elétricos. Assim, faz-se um retorno ao passado, desde o surgimento dos primeiros carros elétricos, até o presente, no qual este trabalho é apresentado, revelando assim as novas tendências do mercado de veículos sustentáveis e as principais tecnologias atualmente utilizadas.

PALAVRAS-CHAVE: Células eletroquímicas. Baterias. Veículos híbridos. Veículos elétricos.

ABSTRACT

With considerable research advances in different technologies aimed at the development/improvement of sustainable means of transport, electrochemical cells (popularly called “batteries”) have been gaining prominence due to their relevance in the industry. In the academic environment, new academic works are performed with the final intention of feeding the heated market, helping the urban mobility sector – from small startups to giants in the automobile industry. In this work, a brief history of electrochemical cells is presented, permeating the different types of batteries, as well as their evolution through the ages. In parallel, it addresses the final destination to which the batteries will be applied, the hybrid and electric vehicles. Thus, a return to past is done, from the appearance of the first electric cars, to the presente, to which this work is presented, revealing the new trends in the sustainable vehicle market and the main technologies currently used.

KEYWORDS: Electrochemical cells. Batteries. Hybrid vehicles. Electric vehicles

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Pilha de Alessandro Volta	19
Figura 2 – (a) Célula eletrolítica (galvânica) durante a descarga. (b) Célula eletrolítica (eletrólise) durante a carga	20
Figura 3 – Representação esquemática de sobrepotenciais de eletrodos	22
Figura 4 – Comparação de curvas de descarga entre diferentes células	23
Figura 5 – Energia específica de diferentes células em função da temperatura	24
Figura 6 – Dependência do ciclo de vida de uma bateria em função da temperatura	25
Figura 7 – Distribuição relativa da resistência térmica entre células eletroquímicas e componentes refrigerantes	26
Figura 8 – Curvas de descarga para uma célula primária alcalina-manganês, tamanho AA	27
Figura 9 – Três baterias de Leclanché	29
Figura 10 – evolução do mercado de eletrônicos alimentados por baterias de lítio	35
Figura 11 – Componentes estruturais de uma bateria NIMH.....	39
Figura 12 – Linha do tempo de veículos elétricos	41
Figura 13 – Carro elétrico de brinquedo de Jadelik.....	44
Figura 14 – Camille Jenatzy, em 1899, conduzindo um veículo elétrico	44
Figura 15 – Senador George P. Wetmore com sua esposa em uma carroça elétrica Krieger	45
Figura 16 – (a) população detentora de automóveis/cavalos; (b) comparação entre a produção de diferentes plataformas de meios de transporte	46
Figura 17 – Honda Insight	49
Figura 18 – Venda de veículos híbridos no mercado norte-americano	50
Figura 19 – Fluxograma para o desenvolvimento de baterias automotivas	51
Figura 20 – Eixo de transmissão para um sistema de potência à combustão interna	53
Figura 21 – Diferentes layouts de sistemas de veículos híbridos: (a)paralelo, (b)split, (c)série	54
Figura 22 – principais configurações para EV's	55
Figura 23 – Crescimento do mercado de baterias recarregáveis	56
Figura 24 – Mercado de baterias de íon-lítio entre os anos 2000-2012	57
Figura 25 – Projeção do mercado de baterias recarregáveis entre os anos 2000-2025	59
Figura 26 – Inserção dos veículos híbridos no mercado automobilístico	60
Figura 27 – Venda de HEV's no mundo/ano (em milhões de unidades)	60
Figura 28 – Tesla Roadster 2008	62

Figura 29 – EV Movi Electric	64
Figura 30 – Baterias encapsuladas refrigeradas à líquido.....	65
Figura 31 – Sistema de recuperação de energia cinética (Kers).....	65
Figura 32 – Queda dos preços de baterias oriunda do desenvolvimento de novas tecnologias	67
Figura 33 – Custo de armazenamento de um quilowatt-hora para células eletroquímicas	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo entre máxima distância percorrida por diferentes modelos de veículos elétricos ao final da década de 1990	48
Tabela 2 – Dimensionamentos de baterias para veículos elétricos compactos de 1200kg	52
Tabela 3 – Características de diversos tipos de baterias utilizadas no mercado de HEV's e EV's	58
Tabela 4 – Venda de alguns modelos HEV's entre 2010-2012	61
Tabela 5 – Venda de alguns modelos EV's entre 2010-2012	61
Tabela 6 – Características técnicas para diferentes modelos de EV's	63
Tabela 7 – Ficha técnica Hyundai Ionic 5	63
Tabela 8 – Comparações entre os principais tipos de baterias	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

d.d.p	diferença de potencial
SoC	state-of-charge
DoD	state-of-discharge
SEI	Solid Electrolyte Interface
VRLA	valve-regulated lead-acid batteries
AGM	absorptive glass mat
EV's	electric vehicles
HEV's	hybrid electric vehicles
SLI	Starting/Lighting/Ignition
OPEP	Organização dos Países Exportadores de Petróleo
GM	General Motors
Kers	Kinetic Energy Recovery System
BMS	Battery Management System

LISTA DE SÍMBOLOS

V_r	tensão reversível
V_0	tensão nominal
V_c	tensão da célula durante a carga
V_d	tensão da célula durante a descarga
η	sobrepotencial de eletrodo
Ah	ampére-hora
T_{nom}	temperatura nominal
T_{ref}	temperatura de referência
T	temperatura da bateria em análise
T_{Arr}	temperatura de Arrhenius
I_{nom}	corrente nominal
$Whkg^{-1}$	watt-hora/kg
WhL^{-1}	watt-hora/litro
Wkg^{-1}	watt/kg
WL^{-1}	watt/litro
$^{\circ}C$	graus célsius
k	corrente de redução
k_{ref}	corrente k de referência
$R_{cell-struct}$	dissipação térmica pela estrutura das baterias
$R_{cool-amb}$	dissipação térmica para o meio-ambiente
$R_{struct-cool}$	dissipação térmica pelos componentes refrigerantes das baterias
SO_2	dióxido sulfúrico
$SOCl_2$	cloreto de tionila
SO_2Cl_2	cloreto de sulfurila
TiS_2	dissulfeto de titânio
MoS_2	dissulfeto de molibdênio
$LiCoO_2$	óxido de lítio-cobalto
NiMH	hidrido de níquel
PbO_2	óxido de chumbo
Pb	chumbo
H_2SO_4	ácido sulfúrico
$PbSO_4$	sulfato de chumbo

H_2O	água
H^+	hídron
HSO_4^-	hidrogenossulfato
e	elétron
HP	horse-power
CEO	Chief Executive Officer

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	AS PRINCIPAIS TECNOLOGIAS UTILIZADAS NO VIGENTE MERCADO DE HEV'S E EV'S	16
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO	16
1.3	DESENVOLVIMENTO	17
2	CÉLULAS ELETROQUÍMICAS	20
2.1	UM BREVE HISTÓRICO	20
2.2	COMPONENTES E TERMINOLOGIAS	20
2.3	CARGA E DESCARGA DAS CÉLULAS	20
2.4	CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO.....	22
2.5	ENERGIA/POTÊNCIA ESPECÍFICA E DENSIDADE DE ENERGIA E POTÊNCIA	23
2.6	TEMPERATURA DE OPERAÇÃO	24
2.7	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E TAXA DE RECARGA	26
2.8	VIDA ÚTIL DE UMA BATERIA	27
3	EVOLUÇÃO DAS TECNOLOGIAS AO LONGO DO TEMPO	28
3.1	SÉCULO XIX	28
3.2	SÉCULO XX	30
3.2.1	Sistema selado	31
4	DIFERENTES TECNOLOGIAS	33
4.1	BATERIAS DE LÍTIO	33
4.2	BATERIAS DE CHUMBO-ÁCIDO	36
4.2.1	Baterias de chumbo-ácido reguladas à válvula (valve-regulated lead-acid batteries/ VRLA)	36
4.3	BATERIAS DE HIDRÍDO DE NÍQUEL	38
5	HEV'S E EV'S	40
5.1	BREVE HISTÓRICO DOS HEV'S E EV'S	41
5.2	ENGENHARIA POR DE TRÁS POR HEV'S E EV'S	50
5.3	PARADIGMAS POR TRÁS DO NOVO MERCADO	55
5.4	ATUAL CENÁRIO E TECNOLOGIAS UTILIZADAS	62
5.5	COMPARATIVOS ENTRE AS PRINCIPAIS TECNOLOGIAS DE BATERIAS DO ATUAL MERCADO	66

6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
	REFERÊNCIAS	69

1 INTRODUÇÃO

Comumente utilizados no dia-a-dia de milhões de pessoas ao redor de todos os continentes do globo, os veículos motorizados são elementos utilitários engessados na vida urbana, rural e industrial quando o tema “mobilidade” é abordado. Tanto para o transporte de pessoas quanto para o transporte de cargas, veículos à combustão interna constituem, desde o final do século XIX, boa parte (para não dizer maioria) do mercado automobilístico. No entanto, veículos híbridos e elétricos vêm gradualmente ganhando maior relevância no mercado em questão, atingindo maior e mais significativo destaque na grande mídia e, conseqüentemente, englobando gradativamente mais um pedaço no setor de mobilidade.

1.1 AS PRINCIPAIS TECNOLOGIAS UTILIZADAS NO VIGENTE MERCADO DE HEV'S E EV'S

Veículos movidos por motores à combustão interna não são novidade para o grande público consumidor. Alimentados por combustíveis inflamáveis, podemos facilmente listar uma gama de opções: gasolina, etanol, diesel, bio-diesel, gás natural. Todas as opções são facilmente encontradas em postos de combustíveis distribuídos através de rodovias, grandes conglomerados urbanos, e até mesmo em pequenos vilarejos localizados nas zonas rurais. A partir do momento que abordamos veículos híbridos e elétricos, canalizamos nosso enfoque para apenas um tipo de fonte de alimentação: células eletroquímicas, as populares baterias.

Apesar de não serem exclusividades do século XXI, os veículos movidos por motores elétricos estão atingindo patamares de vendas em massa à níveis nunca antes vistos nos tempos presentes. Acompanhando o desenvolvimento das tecnologias de novos motores elétricos, novas tecnologias de células de alimentação para tais motores estão sendo apresentadas.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Este trabalho tem como objetivos a apresentação de noções básicas de baterias e seus componentes, realizando uma síntese do histórico das baterias através dos séculos XIX e XX, comparando as diferentes tecnologias desenvolvidas. Em paralelo, apresentar

as noções básicas dos conceitos de veículos híbridos e elétricos, bem como a realização de uma revisão histórica, desde o início dos estudos e desenvolvimento desses nos séculos XIX e XX. A partir de então, realizar uma análise do atual cenário do mercado de veículos movidos à motores elétricos, apresentando as variadas tecnologias de células eletroquímicas comumente utilizadas e as tendências do mercado.

1.3 DESENVOLVIMENTO

Este trabalho será dividido em três partes principais, sendo elas: baterias, histórico e tecnologias desenvolvidas; veículos híbridos e elétricos, histórico e tecnologias desenvolvidas; e síntese dos dois temas anteriores, abordando tecnologias de células eletroquímicas comumente utilizadas no atual mercado de veículos elétricos.

2 CÉLULAS ELETROQUÍMICAS

2.1 UM BREVE HISTÓRICO

A história de qualquer tipo de ferramenta criada pelo homem passa por diversos capítulos e fases através de seu desenvolvimento e aperfeiçoamento, seja mediante anos, décadas ou até mesmo séculos. Mas, para seguirmos em frente com a caminhada do progresso, primeiramente precisamos olhar para os capítulos anteriores.

Por definição, baterias (ou mais precisamente, células eletroquímicas) são dispositivos capazes de converter energia oriunda de reações químicas em corrente elétrica. Desta forma, primeiro dispositivo criado pelo ser-humano capaz de atender tais parâmetros é comumente conhecido como “Bateria de Bagdá”: um artefato arqueológico feito de cerâmica, encontrado em meados da década de 1930, na atual região Bagdá. Tal objeto fora datado por volta do primeiro século A.C., e possivelmente fora criado pela antiga civilização persa. No entanto, é mais comumente aceito que os trabalhos publicados no fim do século XVIII e início do XIX, por Luigi Galvani, da Universidade de Bologna, e Alessandro Volta, da Universidade de Pavia (ambas situadas na Itália), foram os responsáveis pela divulgação acadêmica e popularização à humanidade sobre o que conhecemos hoje como células eletroquímicas.

Durante o século XVIII, em contexto de revoluções políticas embasadas pelo movimento iluminista que varria o continente europeu, Volta encontrava-se despedido de crenças religiosas ao sustentar suas teorias acadêmicas, enquanto Galvani, ainda ligado às tradições de Bologna (até então sob domínio de Roma e do Estado Papal) mantinha-se fortemente ligado ao pensamento conservador. Galvani propunha que havia nos seres vivos uma entidade denominada por “eletricidade animal”. No entanto, para Volta este conceito era defasado e assemelhava-se mais à alquimia do que à ciência iluminista.

A disputa entre Galvani e Volta persiste, intensificando-se quando, em 1794, Giovanni Aldini, sobrinho de Galvani, publica o trabalho do tio, denominado *A Eletricidade Animal* (ALDINI, GIOVANNI. *De Animalis Electricitate*. Bologna: Stamperia dell’Istituto delle Scienze di Bologna, 1794). Cético com tais estudos de Galvani, Volta estudou as pesquisas do físico e químico britânico Henry Cavendish, e em particular seus resultados do estudo do peixe tremelga, peixe esse capaz de emitir uma pequena descarga elétrica em seus predadores.

Observando o padrão encontrado no dorso do peixe tremelga, Volta copiou artificialmente o modelo do animal, utilizando metal: colocou, em contato de uma chapa de cobre, folhas de papel embebidas em ácido sulfúrico diluído em água; em seguida, repetiu o processo com uma chapa de zinco, e para cada processo foi empilhando o composto “chapas de metais heterogêneos / folhas de papel umedecidas em ácido”, resultando no que podemos observar na Figura 1.

Figura 1 – Pilha de Alessandro Volta



Fonte: Scrosati (2011)

Desta forma que, em 1800, Alessandro Volta cria a primeira pilha, ou célula eletroquímica. Desde então, seu projeto tem sido estudado, aprimorado e aplicado nas mais diversas áreas da física, química e engenharia. Mesmo diferenciando-se umas das outras em termos de material utilizado, processo de fabricação e método de montagem, todas as baterias convergem em alguns pontos e componentes chaves, classificando-as como células eletroquímicas. Veremos a seguir quais são ele.

2.2 COMPONENTES E TERMINOLOGIAS

Antes de prosseguirmos com a análise cronológica das baterias, é necessário colocar em pauta alguns detalhes técnicos, para melhor elucidação e consequentemente, melhor e mais didática compreensão dos termos pautados.

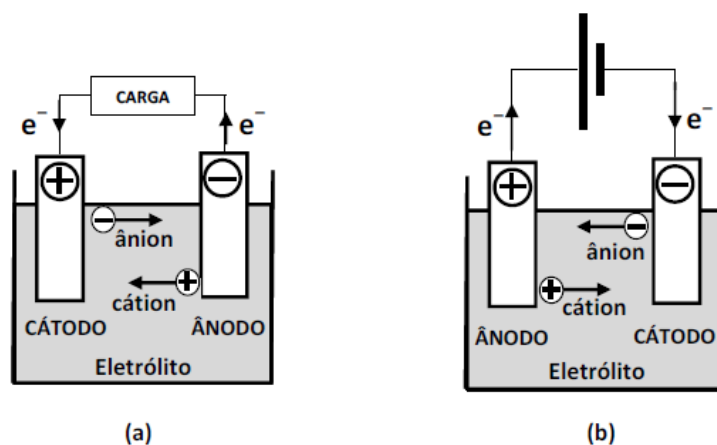
Como dito anteriormente, o termo “bateria” refere-se à unidade eletroquímica básica, designada por “célula”. Uma bateria é formada por um grupo dessas células, conectadas em série, paralelo ou até mesmo ambos (dependendo das especificações técnicas de projeto).

Toda célula consiste em, basicamente, três componentes:

1. Anodo ou eletrodo negativo – libera elétrons para o circuito;
2. Catodo ou eletrodo positivo – recebe os elétrons liberados pelo anodo;
3. Eletrólito – condutor iônico inserido entre anodo e catodo, permitindo a transferência de elétrons de um componente ao outro.

Esquematicamente, vemos na Figura 2 os componentes de uma célula eletroquímica.

Figura 2 – (a) Célula eletrolítica (galvânica) durante a descarga. (b) Célula eletrolítica (eletrólise) durante a carga



Fonte: Faria Neto, Mesquita e Lotufo (2013)

As baterias podem ser classificadas em duas principais categorias, são elas: baterias primárias – capazes de realizar uma única descarga; e baterias secundárias – passíveis de recargas e, consequentemente, sofrerem mais de uma descarga (uma vez operando em ciclo de descarga, a célula eletrolítica é denominada célula galvânica, e

operando em ciclo de recarga, denominada célula de eletrólise). Para o caso das baterias secundárias em específico, o ciclo de vida (ou seja, número de recargas e descargas) varia para cada tipo de bateria, de acordo com sua utilização e elementos que compõem sua confecção (o número máximo de recargas dá-se até o momento em que a capacidade de armazenamento deteriore-se e não atinja mais um valor de tensão mínimo desejado).

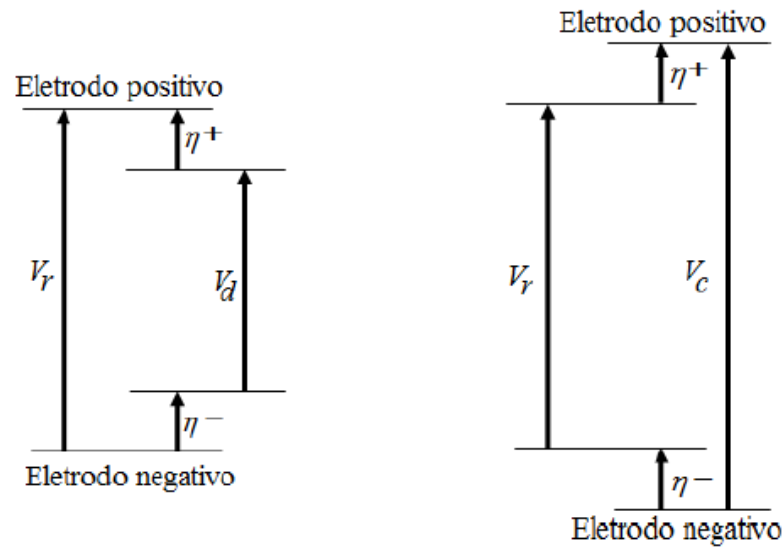
2.3 CARGA E DESCARGA DAS CÉLULAS

Uma vez em circuito aberto, ao aferirmos a diferença de potencial (d.d.p.) entre o terminal positivo em relação ao terminal negativo de uma bateria, em teoria teríamos uma tensão designada tensão reversível V_r . Para o caso específico da *tensão nominal* da mesma, tal variável é designada por V_0 . No entanto, a tensão aferida sempre será um pouco menos do valor absoluto nominal, uma vez que a bateria, por si só, apresenta uma resistência elétrica interna (intrínseca à natureza de seus componentes) formada por:

- Perdas por polarização nos eletrodos: responsáveis pela diminuição da tensão da célula durante a carga (V_c), e durante a descarga (V_d);
- O afastamento do potencial de um eletrodo em relação ao seu potencial de equilíbrio é denominado de sobrepotencial de eletrodo (η). Para o diodo negativo, η^- , e para o diodo positivo, η^+ .

Abaixo, podemos observar a Figura 3, dada uma representação esquemática de sobrepotenciais de eletrodos.

Figura 3 – Representação esquemática de sobrepotenciais de eletrodos



Fonte: Faria Neto, Mesquita e Lotufo (2013)

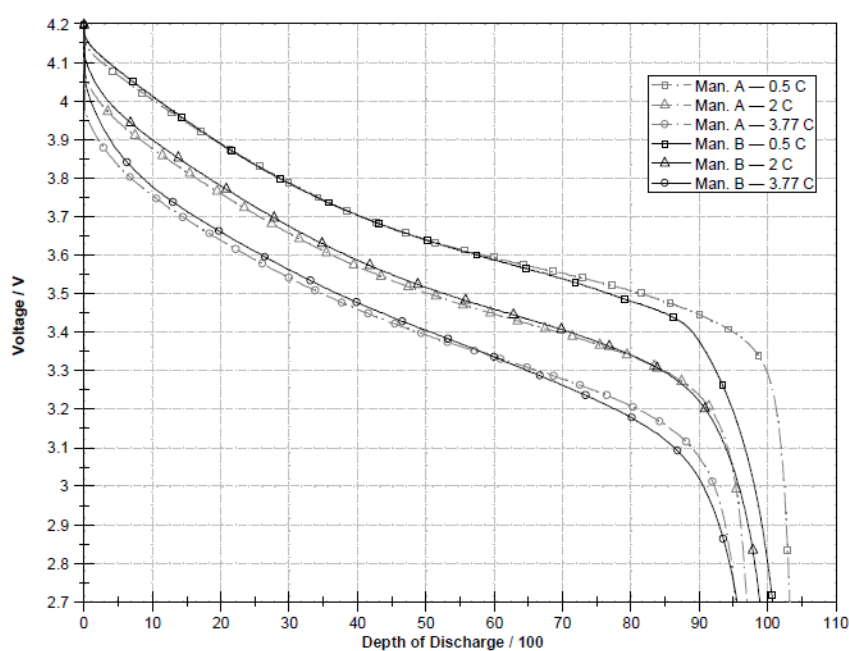
2.4 CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO

A capacidade de armazenamento de uma bateria é, por definição, o produto da corrente fornecida pelo número de horas em operação. Para fins didáticos, a capacidade de armazenamento é definida como a integral da corrente ao longo do tempo de descarga (unidade: ampére-hora (Ah); no sistema internacional de unidade, 1 Ah equivale à 3600 Coulombs). Também podemos analisar tal parâmetro sob a perspectiva percentual, utilizando o conceito de estado de carga (do inglês *state-of-charge* – SoC), que é o percentual de carga disponível após deduzido uma fração do total disponível pela bateria, denominado profundidade de descarga (do inglês *depth-of-discharge* – DoD). Matematicamente:

$$\text{SoC}\% = 100 - \text{DoD}\% \quad (1)$$

Após um estudo aplicado à diferentes baterias (AKASOL ENGINEERING, 2010), todas aplicadas à temperatura nominal de $T_{\text{nom}}=25^{\circ}\text{C}$ e corrente nominal de $I_{\text{nom}}=1\text{ A}$, o gráfico da Figura 4 [Voltage/depth-of-discharge (V/DoD)] fora traçado.

Figura 4 – Comparação de curvas de descarga entre diferentes células



Fonte: Eberle, von Borck e Raiser (2010)

2.5 ENERGIA/POTÊNCIA ESPECÍFICA E DENSIDADE DE ENERGIA E POTÊNCIA

Para definirmos os conceitos de energia específica e densidade de energia, devemos salientar um ponto de suma importância, por mais trivial que possa soar: bateria variam de tamanho, peso e dimensões. Cada célula eletroquímica varia a geometria espacial e massa absoluta de acordo com a referida aplicação. Assim, podemos encontrar células com as dimensões e peso de uma moeda, bem como robustos bancos de baterias ocupando a área interna de um veículo quase por completo.

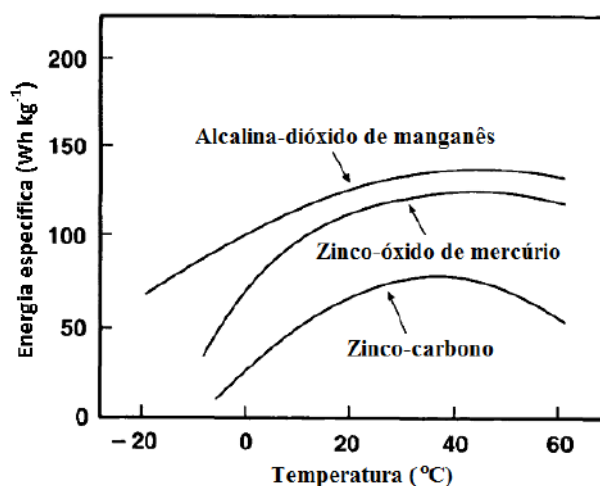
Energia específica – também designada por densidade gravimétrica de energia – é definida como energia armazenada por unidade de massa (watt-hora/kg – Whkg^{-1}). Já densidade de energia – ou densidade volumétrica de energia – é definida como energia armazenada por unidade de volume (watt-hora/litro – WhL^{-1}). Analogamente, podemos definir potência específica (watt/kg – Wkg^{-1}) e densidade de potência (watt/litro – WL^{-1}).

Na prática, energia específica e potência específica ficam muito aquém dos valores teóricos, limitadas por questões térmicas, principalmente tratando-se de um banco de baterias agrupadas próximas umas às outras (aumento vertiginoso de perdas por efeito Joule).

2.6 TEMPERATURA DE OPERAÇÃO

Como acabamos de ver, a eficiência de uma bateria está atrelada diretamente à temperatura de operação da mesma. Em geral, as baterias operam entre uma faixa de 15°C à 30°C. Para valores fora dessa faixa, o rendimento da célula vai sendo comprometido, como podemos verificar pela Figura 5 à seguir.

Figura 5 – Energia específica de diferentes células em função da temperatura



Fonte: Faria Neto, Mesquita e Lotufo (2013)

Como podemos observar na Figura 5, a máxima energia específica atingida pelos três tipos distintos de células eletroquímicas encontra-se por volta dos 40°C. Afastando-se desse ponto, para maiores temperaturas a energia específica decai suavemente para células alcalinas-dióxido de manganês e para zinco-óxido de mercúrio, e mais vertiginosamente para células de zinco-carbono. Para temperaturas abaixo dos 20°C, para todas as três células observa-se uma queda brusca nos valores de energia específica. As taxas de decaimento variam, portanto, de acordo com fatores químicos, construção e temperatura de armazenamento de cada bateria.

A influência da temperatura em relação a vida útil das baterias é habitualmente descrita matematicamente pela equação de Arrhenius:

$$\text{Perda de capacidade} = k \sqrt{\text{num. dias}} \quad (2)$$

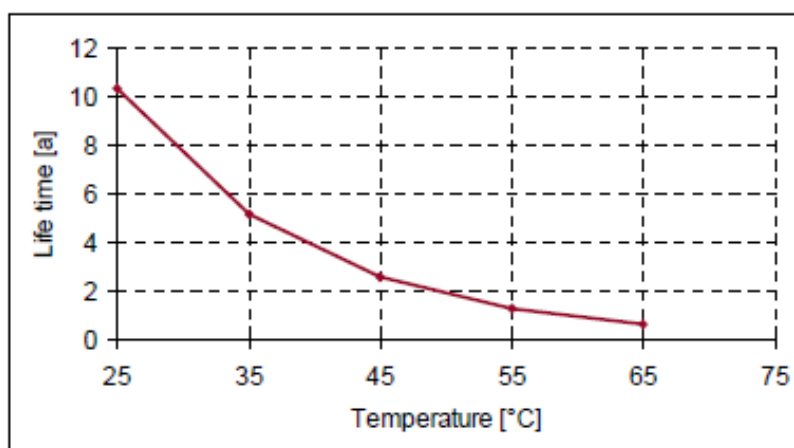
A perda de capacidade das baterias, portanto, será diretamente proporcional à raiz quadrada do valor referente ao número de dias que a célula fora utilizada (num.dias) multiplicado pelo coeficiente de redução k . O valor de tal coeficiente está intimamente correlacionado com o aumento de temperatura nas células, variando, portanto, em função da mesma. Matematicamente:

$$k(T) = k_{\text{ref}} \sqrt{2^{\frac{T-T_{\text{ref}}}{T_{\text{Arr}}}}} \quad (3)$$

Portanto, o coeficiente k é diretamente proporcional à um coeficiente k de referência (k_{ref}) multiplicado pela raiz quadrada subsequente – que apresenta as variáveis temperatura de referência (T_{ref}), temperatura da bateria em análise (T) e temperatura de Arrhenius (T_{Arr}).

Adotando um período de vida útil de 10 anos, com um capacidade de redução de 20%, o coeficiente de redução é estipulado em $k=0,7$ para uma temperatura de referência de 45°C e temperatura de Arrhenius de 10K. Assim, traça-se o gráfico da Figura 6, correlacionando o ciclo de vida de uma bateria em função da temperatura de operação.

Figura 6 – Dependência do ciclo de vida de uma bateria em função da temperatura



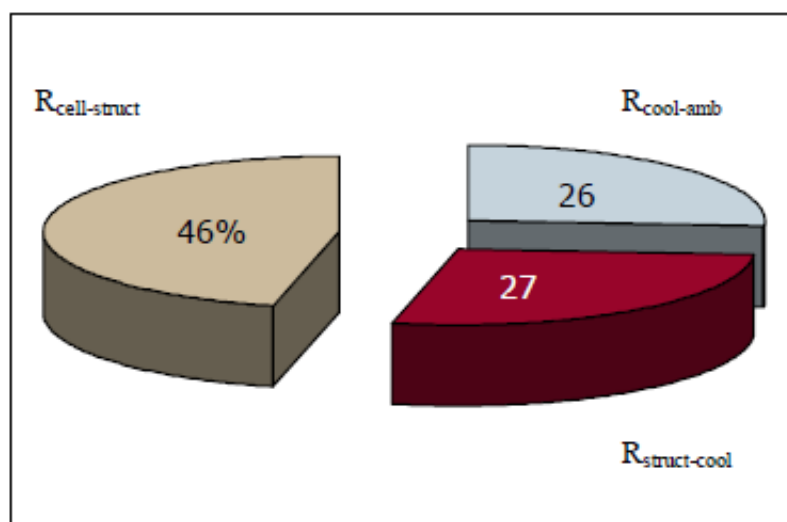
Fonte: Eberleh, von Borck e Raiser (2010)

O sistema de resfriamento das baterias é concebido a partir de módulos de líquidos refrigerantes, capazes de oferecer rigidez estrutural e massiva transferência de calor. A

temperatura é dissipada através de três principais caminhos: estrutura das células eletroquímicas ($R_{\text{cell-struct}}$), meio-ambiente ($R_{\text{cool-amb}}$), e componentes estruturais do sistema ($R_{\text{struct-cool}}$).

Uma boa distribuição de percentual para dissipação de calor pode ser observada através do seguinte gráfico da Figura 7:

Figura 7 – distribuição relativa da resistência térmica entre células eletroquímicas e componentes refrigerantes.



Fonte: Eberleh, von Borck e Raiser (2010)

2.7 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E TAXA DE RECARGA

Tomemos uma bateria secundária. Para cada descarga da célula, o montante energético após a próxima carga sempre será menor em comparação ao montante anterior. Daí definimos eficiência energética: a razão entre energia apartada pela bateria e a energia utilizada para a recarga da mesma. As perdas elétricas responsáveis pelas quedas da eficiência energética de uma bateria são subdivididas em duas partes:

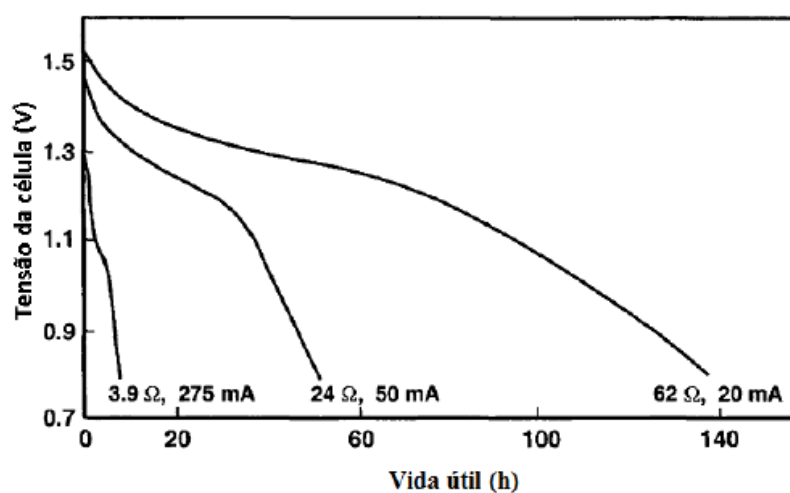
- Eficiência voltaica: intrinsecamente relacionada com as perdas por polarização nos eletrodos (vide Figura 3);
- Eficiência coulombiana: perdas associadas à corrente desperdiçada em reações químicas (formação de gases, corrosão de componentes da bateria, etc).

Chamamos de eficiência global de uma bateria o produto da eficiência voltaica pela eficiência coulombiana. Uma vez operando em condições nominais, as baterias costumam apresentar valores de eficiência global entre a faixa de 50 a 75%.

2.8 VIDA ÚTIL DE UMA BATERIA

De forma simples e didática, vida útil de uma bateria é definida como o ponto final da tensão na curva de descarga da célula, como bem podemos observar na Figura 8 à seguir:

Figura 8 – Curvas de descarga para uma célula primária alcalina-manganes, tamanho AA



Fonte: Faria Neto, Mesquita e Lotufo (2013)

O fim da vida útil de uma célula é considerado a partir do momento que a capacidade da bateria em reter energia encontra-se aquém do aceitável. Percentualmente, adotamos que esse valor ocorre quando a capacidade máxima de potência a 80% DoD seja inferior à 80% de seu valor inicial.

3 EVOLUÇÃO DAS TECNOLOGIAS AO LONGO DO TEMPO

Uma vez definidos os parâmetros com os quais iremos destrinchar nesse trabalho, veremos a seguir um breve histórico de como as células fotovoltaicas foram sendo desenvolvidas através do tempo.

3.1 SÉCULO XIX

Com os resultados acadêmicos de grande magnitude obtidos por Volta, não demorou para que outros cientistas se interessassem pelo projeto de seu dispositivo.

Em apenas dois anos, em 1802, o químico escocês William Cruikshank desenvolve um aprimoramento do projeto de Volta: células voltaicas em uma bandeja de madeira, recobertas com cera, contendo eletrodos de zinco-cobre imersos em solução de ácido sulfúrico (primeiro modelo de pilha vendido em massa). Três anos depois, em 1805, o químico britânico Humphry Davy constrói uma imensa bateria de Cruikshank, com 250 células, utilizando-a para a experimentos de eletrólise de sódio, potássio, cálcio, bem como experimentos com filamentos de carbono, dando início ao estudo de arcos elétricos em lâmpadas.

Avançando um pouco no tempo, em 1812, Giuseppe Zamboni – padre e físico italiano – desenvolve uma das primeiras baterias à seco (sem eletrólitos), utilizando finas folhas de zinco e folhas umedecidas de carbono em pó, e pouco tempo depois, em 1816, o químico britânico William Wollaston introduz um novo aperfeiçoamento à bateria de Volta, retirando os eletrodos do eletrólito enquanto a bateria não estiver em operação.

Em 1821, o estoniano Thomas Johann Seebeck descobre os efeitos termoelétricos em baterias, utilizando a diferença de temperatura, gerada a partir do contato de diferentes metais, para a produção de força eletromotriz. A partir de então, diversos tipos de baterias termoelétricas e termopares foram desenvolvidos, à exemplo de Leopoldo Nobili, italiano que, em 1830, cria um conjunto de termopares capaz de detectar radiação infravermelha (mesmo ano em que William Grove desenvolve as primeiras células a base de zinco-platina).

As baterias de Volta eram fervorosamente estudadas e aperfeiçoadas, mas permaneciam limitadas ao fenômeno de polarização, fato que diminuía o rendimento e vida útil das mesmas. Antoine Bequerel foi o primeiro a formular uma pilha não-polarizada, em 1829. Em 1836, John F. Daniell desenvolveu tal bateria, construída a partir

de cobre, nitrato de cobre, zinco e nitrato de zinco. Desde então, baterias não-polarizadas são conhecidas como “baterias de Daniell”. Ademais, a pilha de Volta tinha características não conservadoras, ou seja, de única utilização. Isso muda em 1859 com o físico francês Gaston Planté, ao desenvolver a primeira bateria chumbo-ácida recarregável comercializável, que mais tarde, já no século XX, mais precisamente em 1901, Waldemar Jungner aperfeiçoaria tal projeto, desenvolvendo uma bateria recarregável à níquel-cádmio. Apesar de primitivo, tal projeto serviu como base para atuais modificações, ajustando elementos e componentes de acordo com o avanço da tecnologia. Suas variantes são utilizadas até os dias atuais, à exemplo de fontes de energia para partida de motor de carros e alimentação de dispositivos portáteis.

No ano de 1866, George-Lionel Leclanché, engenheiro francês, divulga um novo projeto de bateria baseado em anodo com haste de zinco e catodo confeccionado com uma mistura de óxido de carbono e manganês, imerso em solução aquosa de cloreto de amônio – vide Figura 9. Tal configuração também é utilizada até os dias de hoje, mais conhecida como pilhas alcalinas de carbono-zinco, com a diferença apenas de substituir a solução eletrolítica de líquida para pasta (adicionando à solução farinha de trigo ou amido).

Figura 9 – Três baterias de Leclanché



Fonte: Brenni, Galdi, Pietra e Savini (2012)

Uma década e meia após as divulgações de Leclanché, em 1881, Felix Lalande e Georges Chaperon patenteiam uma nova célula eletroquímica, obtendo o título de primeira célula alcalina. Em sua forma original, a célula utilizava uma placa positiva horizontal, com óxido de cobre como material ativo. Acima desta, era colocado um eletrodo negativo de zinco. O eletrólito consistia em hidróxido de potássio ou de sódio. Nos anos seguintes, diversas modificações e aprimoramentos do projeto inicial de Lalande-Chaperon foram criando forma e sendo patenteadas por A.L. De Virloy, E. Commelin, G. Bailhache, J.B. Entz, E. Boettcher, dentre tantos outros.

3.2 SÉCULO XX

Mesmo com fervorosos avanços desde o projeto inicial de Volta, durante o século XIX a utilização da tecnologia das baterias permaneceu limitada ao meio acadêmico, quando muito sendo utilizada em espetáculos públicos, conhecidos popularmente como “teatro de luzes”. A eletricidade em si ainda era, para muitos leigos, tida como truques de mágica, para não dizer feitiçaria. Apenas no início do século XX que as baterias foram tomando maior espaço entre a sociedade moderna, principalmente após a criação do telégrafo. Enquanto as grandes redes de distribuição de energia de Thomas Edison, Nikola Tesla e George Westinghouse caminhavam à passos largos, timidamente as baterias foram ganhando destaque em motores de carros e pequenas centrais de telecomunicações. Em suma, durante os anos de 1880 e 1890, Edison foi gradualmente tomando ciência dos trabalhos de Lalande-Chaperon. Sua ideia inicial era a gradual adesão das baterias em veículos elétricos. Edison estava convicto que, eventualmente, a propulsão por baterias em veículos elétricos iria substituir os motores à combustão interna.

Ainda que caminhando em paralelo, as baterias não obtiveram o mesmo destaque que as grandes usinas e centrais de distribuição de energia: com baixa capacidade de armazenamento elétrico, baixo rendimento e nada econômicas, as baterias permaneceram em segundo plano no campo da engenharia elétrica.

Apenas na segunda metade do século XX, por volta da década de 1960, que as baterias ganharam maior visibilidade, havendo uma série de inovações neste ramo, bem como o aumento significativo da demanda. Os três principais motivos para esse aumento foram:

- I. Avanço em pesquisas em dispositivos médicos
- II. Desenvolvimento de equipamentos bélicos.
- III. Aumento oneroso do consumo de dispositivos eletroeletrônicos caseiros.

Para esses e diversos outros motivos, pesquisas realizadas com células de energia tinham como objetivo a redução de custos, diminuição de peso, aumento da potência e eficiência.

3.2.1 Sistema selado

Antes de avançarmos nos tipos de baterias, primeiramente foquemos em um grande avanço no sistema de configuração de montagem das baterias: as famigeradas células seladas. Alguns projetos vislumbravam a possibilidade do desenvolvimento de uma célula voltaica que pudesse trabalhar completamente selada, em ambos os estágios (carga e descarga). As vantagens eram claras: inibição dos riscos de respingos e derramamento do eletrólito (evitando a reposição com água), além de design arrojado para utilização em qualquer posição.

O título de primeiro homem a descrever tal sistema pertence a Thomas A. Edison, que em 1912 patenteou uma célula selada secundária, na qual os gases liberados durante o período de carga eram recombinados por meio de um fio de platina aquecido. O fio era conectado dentro da célula, entre os eletrodos positivo e negativo, e o aquecimento era finalizado durante a fase de carga.

Durante a década de 1930, cientistas alemães focaram suas pesquisas na investigação da possibilidade de materiais ativos reagirem com os gases liberados. A ideia inicial era fazer com que o oxigênio reagisse com a placa polarizada com cargas negativas, e o hidrogênio reagisse com a placa polarizada com cargas positivas. A reação seria impulsionada por catalizadores contidos no material ativo.

A atividade em pesquisas sobre o campo das baterias seladas foi muito extensa durante os anos de 1950, sendo lançadas nesta década uma grande quantidade de patentes. Foram lançados métodos para ajustes da quantidade de eletrólitos, análises da influência da pressão durante a montagem da célula, dispositivos para a prevenção e manutenção dos subprodutos oriundos do processo de carga.

Em termos gerais, a maior parte das baterias seladas produzidas até o presente momento são baseadas nos mesmos princípios e fundamentos. Desta forma, infelizmente,

os mesmos déficits de projetos são encontrados na maioria dos casos. Primeiramente, o eletrodo negativo tem um excesso de material ativo não carregado, desta forma o eletrodo positivo começa a produzir oxigênio antes do negativo estar completamente carregado. Como oxigênio reage com material ativo carregado negativamente, o eletrodo negativo nunca se estabiliza 100% carregado, e conseqüentemente não produz a quantidade certa de hidrogênio. Em segundo plano, a quantidade de eletrólitos utilizada é, geralmente, inferior à quantidade que pode (em teoria) ser absorvida pelos eletrodos e separadores. E finalmente, o separador utilizado é selecionado sob o critério de permitir a passagem de oxigênio no estado gasoso, condição que permite a rápida transferência deste para a placa negativa, onde é recombinado com o material ativo em questão.

4 DIFERENTES TECNOLOGIAS

Por não existir uma única e absoluta forma de manipulação da matéria, vários modelos de baterias foram sendo desenvolvidos ao longo da trajetória evolutiva das mesmas. As diferentes combinações entre materiais que compõe o anodo, catodo e eletrólito possibilitaram uma vasta gama de tecnologias, cada qual com suas particularidades, vantagens e desvantagens. Analisemos a seguir as principais delas.

4.1 BATERIAS DE LÍTIO

Muito embora os primeiros estudos relacionados às baterias de lítio tenham sido feitos por G.N. Lewis, em 1912, as primeiras baterias comerciais vieram apenas na década de 1970. O aprimoramento de seu alto poder energético fora impulsionado, principalmente, para utilização militar e para suprir a demanda energética de dispositivos eletrônicos (filmadoras de mão, calculadoras, relógios digitais, brinquedos, etc). Para suprir tais necessidades, baterias em formato de moeda foram desenvolvidos utilizando como catodo dióxido de manganês. Alguns tipos de baterias foram desenvolvidos utilizando diferentes tipos de catodo, bem como soluções (dióxido sulfúrico SO_2) e reagentes líquidos (cloreto de tionila SOCl_2 ou cloreto de sulfurila SO_2Cl_2).

Obtendo relativo sucesso e aumento de visibilidade em escala industrial, o próximo passo no desenvolvimento das baterias de lítio era o aperfeiçoamento das mesmas para a escala “recarregáveis”. Para tanto, em 1978, cria-se o processo popularmente conhecido por “inserção”, ou “eletrodos intercalados”, princípio que permite a livre transição de íons de lítio sendo depositados e liberados das estruturas metálicas. Tais princípios foram encontradas em compostos metálicos de transição, e a resposta foi sulfeto de titânio, que consegue trocar íons de lítio com sua estrutura em camadas, acompanhado com a mudança da 4º para o 3º estado de valência. No final dos anos 1970 e início dos anos 1980, as baterias de lítio recarregáveis apareceram ao público, sendo comercializadas nos EUA pela Exxon Company (utilizando dissulfeto de titânio TiS_2 como catodo), e no Canadá pela Moli Energy (esta optando por dissulfeto de molibdênio MoS_2 como catodo).

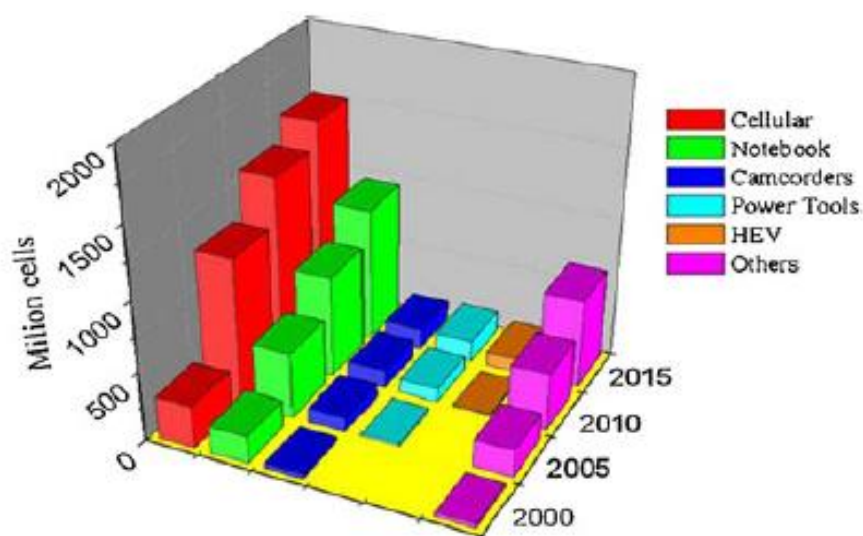
No entanto, lítio tem princípio de alta e fácil reatividade com os eletrólitos, de tal maneira formando uma camada reativa em sua superfície. Nomeada SEI (Solid Electrolyte Interface, ou interface sólida eletrolítica), tal camada é permeável por íons de lítio, permitindo a contínua deposição de material em sua superfície, levando à ruptura da

célula, que em casos extremos explode e/ou incendeia-se. Michel Armand, em 1978, lança uma das possíveis soluções: substituição do eletrólito por polímeros à base de solventes livres, formados por sais de lítio e polímeros coordenados (triflato de lítio e óxido polietileno). Posteriormente, tal conceito fora aperfeiçoado para larga escala, com o surgimento de: módulos de bateria laminadas à base anodos de folhas de lítio, eletrólitos a base de óxido polietileno e catodos compostos por óxido de vanádio, desenvolvidos em conjunto com a Hydro-Québec – no Canadá – e com a 3M – nos Estados Unidos da América.

Muito embora tais ideias fossem atraentes enquanto projeto e com relativo sucesso enquanto produção industrial, ainda não haviam chegado ao nível de produção comercial em massa, devido aos constantes riscos tal tecnologia persistia em oferecer.

Enquanto muitos engenheiros buscaram aprimorar o projeto original, que consistia na utilização de um metal mais resistente, capaz de suportar as constantes reposições de íons, a resposta veio com um projeto totalmente novo, que considerava a utilização de dois eletrodos, um capaz de suportar a deposição de íons de lítio (operando como anodo) e outro trabalhando com a liberação desses mesmos íons (operando como catodo). Tal processo ocorrendo no primeiro ciclo do processo. No estágio seguinte, o anodo, uma vez carregado, passaria a trabalhar como catodo, e o catodo, uma vez descarregado, passaria a ser o anodo, e a partir daí o ciclo se repetiria. De tal processo, nasce um novo conceito, batizado de “lithium rocking chair battery”, ou seja, processo baseado no conceito da livre movimentação de íons de lítio através dos eletrodos. Apesar do conceito ter sido levantado ainda no final da década de 1970 e trabalhada na década de 1980, apenas em 1991 veio a aplicação prática, desenvolvida pela empresa japonesa Sony. A evolução da utilização dessa tecnologia no mercado de eletrônicos é vista na Figura 10 à seguir.

Figura 10 – Evolução do mercado de eletrônicos alimentados por baterias de lítio



Fonte: Scrosati (2011)

A empresa japonesa optara por desenvolver os eletrodos da seguinte maneira: anodos feitos à base de grafite, e catodos confeccionados por óxido de lítio-cobalto LiCoO_2 . Uma das principais características dessas baterias é a alta tensão fornecida pelo eletrodo positivo, enquanto o eletrodo negativo fornece uma baixa tensão. Essas duas características, trabalhando em conjunto, garantem à bateria uma altíssima diferença de potencial. Como a confecção dessas baterias garante a elas dimensões relativamente pequenas (quando comparadas com as baterias de nosso cotidiano – como baterias automobilísticas), isso também confere uma altíssima densidade energética.

Com o sucesso imediato desta tecnologia, muitas empresas asiáticas – tais como Sony, Sanyo, Matsushita, NEC, Hitachi – rapidamente investiram na produção das agora conhecidas baterias de íons de lítio. Um grande incremento na capacidade energética das baterias de íons de lítio fora impulsionado, principalmente pela concorrência com novos tipos de baterias, destaque para baterias de níquel-hidreto metálico NiMH que, apesar de possuírem menor densidade energética, eram mais baratas para o consumidor final.

4.2 BATERIAS DE CHUMBO-ÁCIDO

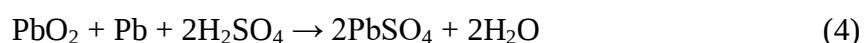
Ao falarmos de baterias de chumbo-ácido, não podemos deixar de lembrar Gaston Planté, responsável pelo passo inicial. Embora rudimentares, as baterias de Planté seguiam o mesmo princípio das baterias de chumbo-ácido que conhecemos hoje: uma célula eletro voltaica composta por uma liga de chumbo, reagindo quimicamente com uma solução aquosa de ácido sulfúrico. Tal tecnologia vem sendo usada a mais de um século, com algumas modificações sendo feitas através dos anos.

As primeiras baterias, ainda no início do século XX, eram compostas por duas ou mais placas, compostas por ligas de chumbo, moldadas em formato de grelha preenchida por uma pasta composta por óxido de chumbo, sulfato de chumbo e água. As placas eram separadas por um espaçador de madeira, e tudo era imerso em solução aquosa de ácido sulfúrico. Os espaçadores de madeira serviam para impedir o contato direto entre as placas de chumbo, mas, em contrapartida, diminuía o tempo de vida útil da bateria graças a rápida deterioração. A solução para o problema foi a substituição do espaçador de madeira por outro feito de borracha. O problema da deterioração foi resolvido, mas outro surgiu em seu lugar: a perda da capacidade de recarga completa. Para solucionar ambas as fragilidades nos projetos, a melhor solução encontrada foi continuar com os espaçadores de borracha, e a utilização de madeira não mais como espaçador, mas agora como material utilizado na composição da pasta que preenche as grelhas de chumbo. Futuramente, pesquisas mais avançadas mostraram que a lignina – principal componente químico encontrado nas células de cascas de árvores – era a peça chave para a recarga completa das baterias. Mais do que isso, um subproduto desse componente, designado lignosulfeto, fora desenvolvido para atender às necessidades das baterias de chumbo-ácido que utilizavam (e continuam utilizando) espaçadores que não sejam de madeira.

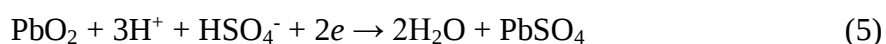
4.2.1 Baterias de chumbo-ácido reguladas à válvulas (valve-regulated lead-acid batteries/ VRLA)

Visando a manutenção de um ciclo de gases internos à bateria, as baterias de chumbo-ácido tiveram um grande avanço a partir de uma nova configuração criada, as baterias reguladas à válvula – VRLA – operando da seguinte maneira: o oxigênio que envolve o eletrodo positivo durante o ciclo de carga, passa através de uma câmara para então entrar em contato com o eletrodo negativo, onde sofre o processo de oxirredução.

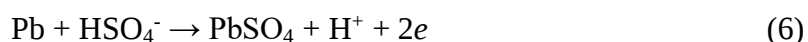
A câmara em questão pode ser desenvolvida de duas maneiras distintas; na primeira delas, o eletrólito é envolto por uma manta de vidro absorvente (absorptive glass mat (AGM) em inglês). Na segunda, o eletrólito é imobilizado na forma de gel. O ciclo do oxigênio despolariza o eletrodo negativo, tendo como resíduo do processo a liberação de hidrogênio. A VRLA atua exatamente para aliviar a pressão interna da bateria, evitando o acúmulo de resíduos oriundos do processo de oxirredução. Muito embora o design e método de construção varie para cada tipo de VRLA, a reação química geral pode ser descrita para todos os casos através da equação a seguir:



A reação no eletrodo positivo:



A reação no eletrodo negativo:



Uma das grandes revoluções nas VRLA é que estas conseguiram adaptar-se ao mercado de baterias em aplicações que antes não eram viáveis. Isso foi possível graças a flexibilidade e liberdade de configuração e adaptação nos projetos, sendo capaz de suprir as necessidades às quais as baterias estacionárias ainda estavam engessadas.

Em 1992, para atender melhor às necessidades do contínuo investimento em pesquisas sobre EV's e HEV's - empregando as VRLA para possíveis mudanças na SLI (Starting/Lighting/Ignition – partida, luz e ignição (torque inicial), respectivamente) - o Consórcio de Baterias Avançadas de Chumbo-Ácido (Advanced Lead Acid Battery Consortium (ALABC) em inglês) fora fundado, e a partir de então, veículos elétricos passaram a ser uma nova perspectiva para o transporte urbano.

Visando o aprimoramento das VRLA, um novo programa de pesquisas fora aberto para o melhor desempenho destas em 3 principais e mais comuns estados de operação: descarga total, recarga parcial e ciclos de trabalho intermitentes. Além desses temas pontuais, outros detalhes de teor mais técnico foram postos em pauta, dentre eles o alto nível de corrosão das placas condutoras e a dilatação dos espaçadores entre o catodo e anodo.

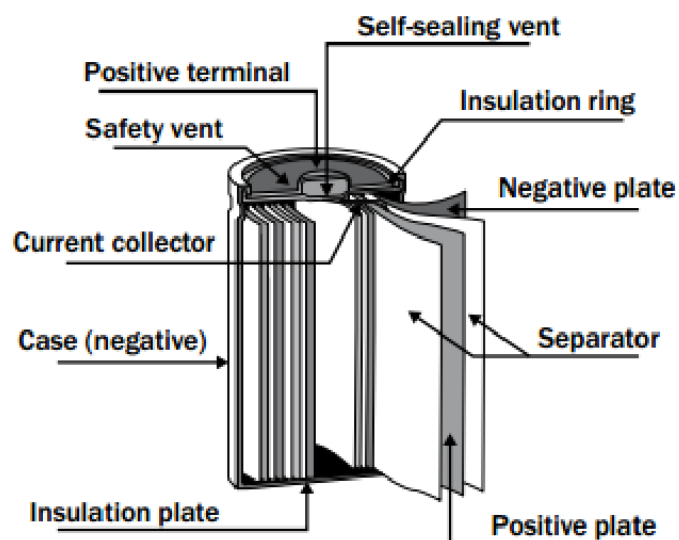
Mesmo com os avanços nas pesquisas, tanto para o caso de baterias de chumbo-ácido como para o caso de níquel-cádmio, ambas criam dificuldades na produção e manutenção. Para o caso das baterias ventiladas, estas são mais tolerantes à sobrecargas e sobre descargas, porém necessitam de manutenções laboriosas, fora o alto custo. Em contrapartida, para as VRLA e baterias seladas, o problema do alto custo na manutenção é superado, no entanto esta configuração está mais sujeita a falhas quando submetida a regulações com baixas cargas. Além de tais quesitos técnicos, um fator intrínseco nestas tecnologias é irreduzível e imutável: alta toxicidade oriunda de metais pesados (chumbo e cádmio). A resposta para todos esses quesitos fora encontrada em baterias de hidrido de níquel.

4.3 BATERIAS DE HIDRIDO DE NÍQUEL

Baterias de hidrido de níquel (NiMH) tem se tornado uma atrativa e viável fonte de energia para a gradual substituição das baterias de níquel-cádmio e afins. Muito parecidas com as baterias de níquel-cádmio, as baterias de hidrido de níquel apresentam pequenas (ou quase insignificantes) diferenças na tensão nominal fornecida, e ciclos de vida equivalentes. No entanto, as baterias NiMH tem o benefício adicional de não serem tão agressivas ao meio-ambiente, além de atingirem um rendimento de 40% (as de níquel-cádmio não passavam de 25%). Ambas as confecções também são deveras similares: o enrolamento do eletrodo positivo de níquel com a liga negativa, imersas em uma solução eletrolítica.

Em caso de sobrecarga, as baterias seladas de hidrido de níquel operam similarmente às baterias de níquel-cádmio: o oxigênio gerado durante a fase de carga é recombinado, limitando a pressão interna da célula. À seguir, a Figura 11 esquematizando os componentes estruturais de uma bateria NIMH.

Figura 11 – Componentes estruturais de uma bateria NIMH



Fonte: Tarabay e Karami (2015)

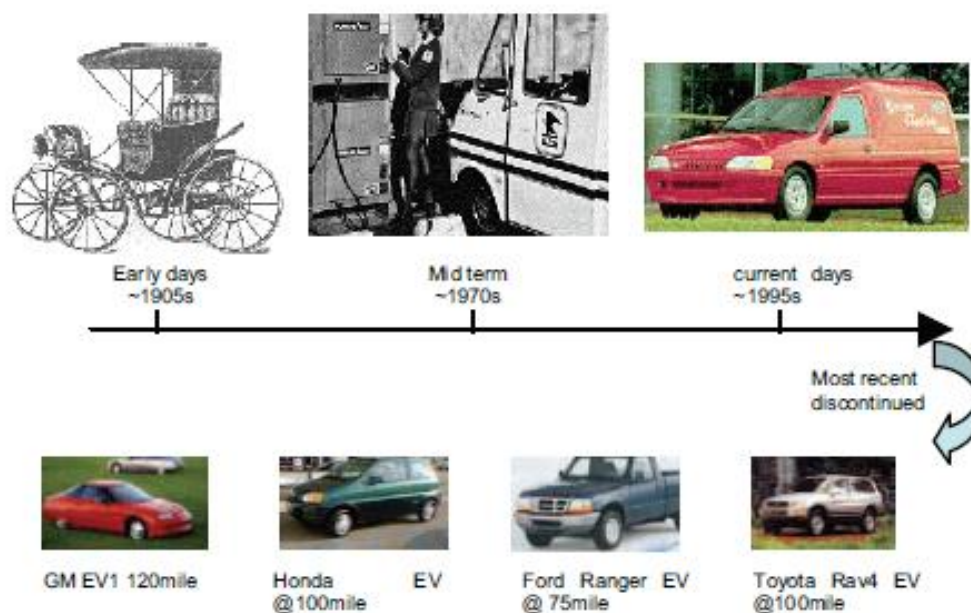
Dentre as principais tecnologias desenvolvidas, as baterias anteriormente listadas são as que obtiveram patamar de maior destaque atualmente. Porém, antes de avançarmos para comparativos das principais tecnologias utilizadas no atual mercado de veículos elétricos, primeiramente precisamos abordar tais veículos bem como abordamos as baterias. Voltemos ao passado para entendermos como tudo começou e de que forma o desenvolvimento tecnológico direcionou o mercado de mobilidade até o cenário que conhecemos hoje.

5 HEV'S E EV'S

Mesmo com as novas e promissoras tecnologias atingindo patamar global como fonte de energia para dispositivos eletroeletrônicos das mais diversas naturezas – notebooks, vídeo-games, telefones celulares, máquinas filmadoras, etc – surge para as empresas de baterias um novo desafio, dado que a década de 1990 também fora marcada por mudanças de perspectivas no campo ambiental e ao que se refere às fontes de energias limpas e renováveis.

Com o constante decréscimo das fontes de combustíveis fósseis, e, em contrapartida, com o aumento de pesquisas indicando mudanças climáticas à nível global, abre-se para o mundo a janela de novas pesquisas em energia eólica e solar. No quesito poluição, carros com motores à combustão interna começam a ser alvo de estudos para a gradual substituição por veículos híbridos (hybrid electric vehicles – HEV's), ou, em casos ideais, substituição por veículos elétricos propriamente ditos (electric vehicles – EV's) - veículos híbridos são cada vez mais a tendência, pois, mesmo com o benefício da incrível redução dos índices de poluição, para os veículos 100% elétricos ainda é inviável uma viagem à longas distâncias sem paradas (os EV's continuam atrelados às constantes recargas, enquanto os pontos com o aparato necessário ainda são limitados). Em contrapartida, para curtos percursos, como a circulação em ambientes metropolitanos, os EV's estão respondendo muito bem às necessidades dos primeiros compradores. Desta forma, HEV's, e principalmente EV's são um grande foco de investimento em pesquisas. Mas antes de avançarmos os estudos sobre as principais e futuras tendências de HEV's e EV's, vamos novamente olhar um pouco para o passado para entendermos como chegaram ao patamar no qual estão inseridos hoje (vide Figura 12 à seguir, ilustrando uma breve linha do tempo de veículos elétricos).

Figura 12 – Linha do tempo de veículos elétricos

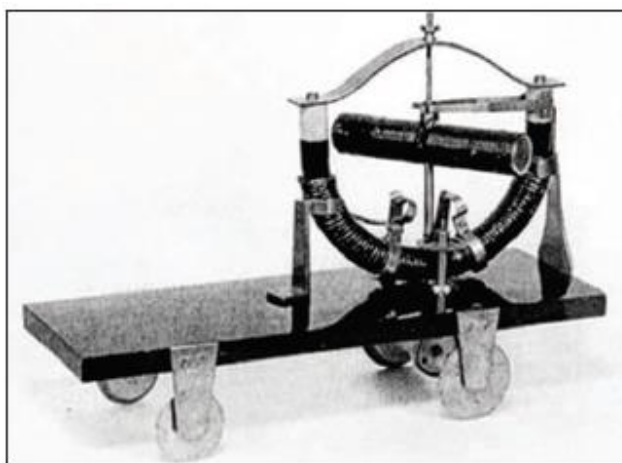


Fonte: Situ (2009)

5.1 BREVE HISTÓRICO DOS HEV'S E EV'S

Aparentando, de primeiro momento, ser uma tecnologia recente – e por muitos leigos considerada até futurista – muitos impressionam-se ao saber que mais de um século atrás os veículos elétricos já eram uma realidade. Os primeiros veículos movidos por força oriunda de um motor elétrico, alimentado por células eletroquímicas, datam do início do século XIX. Um padre húngaro chamado Ányos Jedelik é creditado por ser o responsável por construir o primeiro motor elétrico funcional para um veículo – mesmo que este seja um brinquedo, um protótipo de carro elétrico em escala reduzida (Figura 13) – em 1828.

Figura 13 – Carro elétrico de brinquedo de Jadelik



Fonte: Guarnieri (2011)

O modelo de Jedelik logo foi seguido pelo escocês Robert Anderson, que desenvolveu uma primitiva carroça elétrica. No entanto, esses e outros tantos protótipos datados do século XIX eram deveras rudimentares, e inviáveis para aplicações práticas. Seus motores consistiam em, basicamente, um combinado de rudimentares comutadores elétricos automatizados, todos de baixa eficiência e potência. No quesito fornecimento energético, os poucos modelos de células disponíveis para tal aplicação eram as baterias de Bequerel e Grove – até então com várias lacunas em seus projetos. Mesmo com os aprimoramentos introduzidos por Daniell (células com eletrólitos duplos despolarizados), todas essas células primárias, que incluíam metais nobre e que deveriam ser descartadas após a primeira e única utilização – permaneciam como fontes energéticas muito caras, e economicamente inviáveis.

Uma possível resposta para este empecilho fora encontrada em dínamos – máquina capaz de converter energia mecânica em energia elétrica de característica CC (corrente contínua) – surgidos na década de 1860, graças aos avanços em pesquisas de Werner Von Siemens, Antonio Pacinotti e Zénobe Gramme. Tal mecanismo era alimentado por máquinas a vapor, servindo então como ponte para a conversão da energia oriunda da queima de carvão, para a transmissão dessa energia ao motor elétrico.

A retomada às pesquisas referente as baterias como fonte geradora de energia para veículos elétricos veio com os avanços de Gaston Planté e suas baterias de chumbo-ácido recarregáveis, estas sendo aperfeiçoadas em projetos para veículos elétricos por Camille Alphonse Faure, no ano de 1881. Neste mesmo ano, ocorria a primeira Exposição Internacional de Eletricidade (Exposition Internationale d'Électricité), evento esse onde

o público pôde admirar em primeira mão a lâmpada incandescente de Edison, o bonde elétrico de Siemens, o dínamo de Gramme, o telefone de Graham Bell, um sistema de transmissão de energia de Marcel Deprez, e um triciclo elétrico alimentado por baterias construído por Gustave Trouvé, enquanto Charles Jeantaud exibia um veículo elétrico movido por um motor de Gramme.

O responsável pelo primeiro veículo elétrico capaz de transportar seis passageiros a uma velocidade de 16 km/h foi Paul Pouchain, em 1893, tornando este o primeiro veículo deste gênero comercialmente viável. Jeantaud começa a produção e comercialização de tais veículos a partir de 1893, enquanto o francês Louis Antoine Krieger inicia sua produção no ano seguinte, nos idos de 1894, e alguns anos mais tarde introduz ao mercado o primeiro sistema de freios recarregáveis, ou seja, um sistema eletromagnético de freios capaz de converter energia cinética em energia elétrica, desta forma recarregando as células eletroquímicas.

Ao mesmo tempo e em paralelo, na Grã-Bretanha, outros inventores e engenheiros trabalhavam em seus próprios projetos, como o escocês Robert Davidson, que em 1873 produz aquele que é por muitos considerado o primeiro veículo elétrico de rua operacional; porém, como este era alimentado por baterias de ferro/zinco, tornava-se economicamente inviável sua produção e comercialização em larga escala. Já na década de 1880, mais especificamente em 1882, William E. Ayrtton e John Perry desenvolvem um triciclo elétrico capaz de gerar 0,5 HP de potência, sendo este alimentado por dez células de Planté – o que infelizmente sobrecarregava seu peso. O primeiro veículo elétrico que obteve relativo sucesso na Grã-Bretanha foi o produzido por Thomas Parker, em 1884, sendo alimentado por baterias recarregáveis produzidas por sua própria empresa, a Elwell-Parker Ltd.

Pode-se notar que nesses anos e nos que viriam a seguir, o clima de competição era acirrado, criando nos entornos da Europa o sentimento de corrida pelo avanço tecnológico. Como forma de demonstração pública de tais progressos no campo científico, os engenheiros levavam seus projetos às ruas, e vários recordes foram quebrados nesses mesmos anos. Em dezembro de 1898, conduzindo um EV de Jeantaud, o francês Gaston de Chasseloup-Laubat estabelece o primeiro recorde de velocidade de um veículo elétrico, atingindo a marca de 63 km/h. Pouquíssimo tempo mais tarde (apenas 4 meses depois), em abril de 1899, o belga Camille Jenatzy dirige um veículo elétrico (Figura 14) fabricado por Jamais Contente a incríveis 105 km/h, estabelecendo a marca de “primeiro carro a

quebrar a barreira dos 100 km/h” (como podemos analisar, um carro elétrico bateu a marca de 100 km/h antes de um carro à combustão interna).

Figura 14 – Camille Jenatzy, em 1899, conduzindo um veículo elétrico



Fonte: Guarnieri (2011)

Esses e diversos outros avanços foram primordiais para o avanço do mercado automobilístico no continente europeu, principalmente na França, onde o advento da eletricidade caminhava a passos largos, seduzindo grandes investidores que ficavam impressionados com o show de novidades no ramo de transporte autônomo (ou seja, sem a necessidade da utilização de cavalos), caracterizando esta época como a dita *Belle Époque*, com o surgimento de grandes companhias e “mestres do capitalismo” moderno. Em pouco tempo, a França tornou-se a principal produtoras de automóveis em todo o mundo (sendo superada pelos Estados Unidos da América apenas em 1904).

Tocando nesse ponto, os EUA buscavam seguir as tendências que o continente europeu, estabelecendo uma infraestrutura para recarga das baterias graças à Thomas A. Edison, que desde os anos de 1880 já havia concretizado um gigantesco monopólio comercial de eletricidade por corrente contínua. Desta forma, várias empresas norte-americanas também se lançaram à corrida tecnológica, seguindo os mesmos passos dos irmãos europeus. Em 1884, Riker Motor Vehicle Company foi uma das primeiras a desenvolver um motor elétrico no continente americano. Dois anos depois, em 1886 a companhia Brush Electric Co. desenvolve um triciclo elétrico, e tantas outras foram dando sequência e aprimorando os trabalhos já apresentados pelos grandes nomes da

indústria europeia. Abaixo, temos a Figura 15, fotografia de George P. Wetmore sendo conduzido em uma carroça elétrica Krieger.

Figura 15 – Senador George P. Wetmore com sua esposa em uma carroça elétrica Krieger



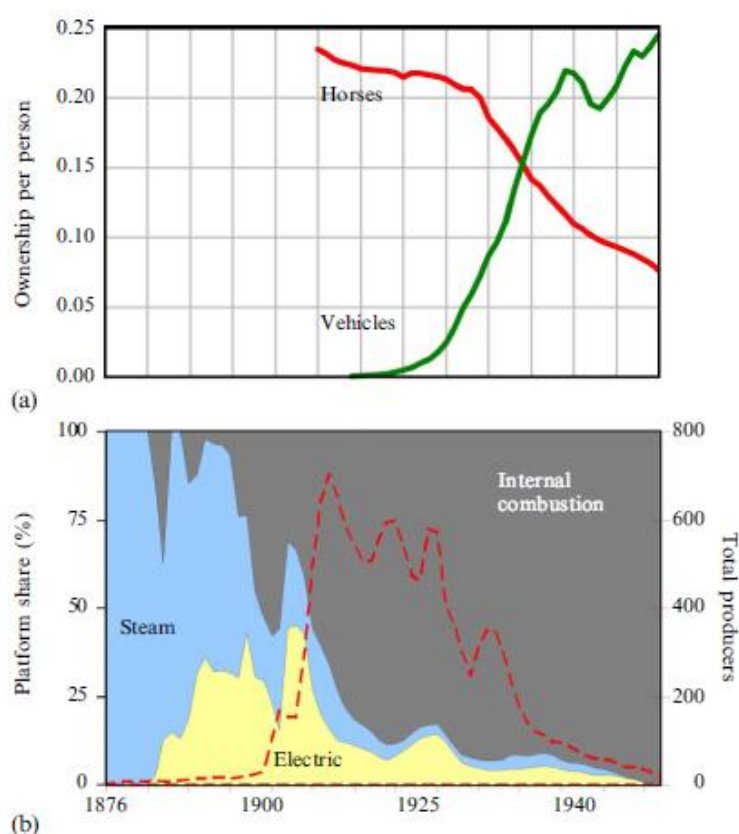
Fonte: Guarnieri (2011)

Os anos entre 1900 e 1910 seriam caracterizados como o período no qual os veículos elétricos atingiriam seu mais alto nível de comercialização. Mesmo custando mais que o dobro do valor de um veículo a combustão interna (a faixa de preço de um carro elétrico da época flutuava entre US\$1750 a US\$3000, contra os “singelos” US\$650 do modelo básico à gasolina Ford T), os carros elétricos atingiram um percentual de, aproximadamente, 38% de todos os veículos comercializados nos EUA até então. Até mesmo o próprio Henry Ford adquiriu 3 unidades da Detroit Electric para si mesmo e parente, enquanto J. D. Rockefeller comprou 1 unidade para sua esposa.

Esse cenário, aos poucos, foi mudando. Juntamente com o avanço do desenvolvimento da indústria automobilística, grandes avanços foram sendo realizados nas pesquisas de indústrias que pertenciam (e pertencem até hoje) à cadeia de suprimentos de negócios. Capital estatal era massivamente investido nos planos de governo na cadeia de pavimentação de rodovias e longas autoestradas que “rasgam” o país de leste à oeste (auto vias destinadas principalmente à veículos à combustão interna, uma vez que a autonomia dos EV ainda limitavam-nos apenas ao tráfego interno das cidades); no Texas,

Oklahoma e Califórnia, grandes bolsões de petróleo são descobertos, causando o barateamento vertiginoso nos preços do petróleo; a partir de 1914, Henry Ford desenvolve a tão famosa “linha de produção”, processo industrial que torna seus veículos progressivamente mais baratos e acessíveis: o Ford Modelo T foi lançado em 1908 pelo preço o US\$850, no ano de 1915 passa a custar US\$440, e em 1916 chega ao preço de US\$360. Como podemos observar, na história da humanidade as tecnologias não são estanques, ou seja, não há um transitório imediato entre as diferentes tecnologias (nesse caso, nos diferentes meios de transporte). Até o fim do século XIX, a maior parte dos meios de transporte individuais (ou de até 4 pessoas) eram representados por cavalos, ou carroças/diligências puxadas por cavalos (vide gráficos abaixo, ilustrado pela Figura 16).

Figura 16 – (a) população detentora de automóveis/cavalos; (b) comparação entre a produção de diferentes plataformas de meios de transporte



Fonte: Struben e Sterman (2008)

Com o início da produção de veículos à combustão interna, houve deveras manifestações de públicos escandalizados pela revolução que permitia que carroças fossem locomovidas sem o auxílio de animais, movimentavam-se de forma autônoma (daí o termo auto-móveis). No ano de 1900 havia uma quantidade de cavalos nos Estados

Unidos da América estima em 18 milhões de animais, enquanto o número de automóveis motorizados fora estimado em (apenas) pouco mais de 8 mil unidades para uma população 76 milhões de pessoas. Usando o exemplo como um paralelo, similarmente podemos definir a trajetória de adaptação dos veículos elétricos ao mercado norte-americano.

A aposta em veículos elétricos como novo meio de transporte para as novas gerações atingiu valores significativos até a primeira década do século XX. Porém as vendas desse mercado foram sendo aos poucos desaquecidas devido ao barateamento da tecnologia de proliferação de novos modelos fabricados por novas fábricas que iam nascendo e fixando seus nomes no mercado (tais como Cadillac, General Motors, Chrysler, Dodge...).

Considerando que muitas pessoas no início do século passado, mesmo quando considerando os mais velhos, jamais haviam visto um veículo (seja ele elétrico ou à combustão), todo esse nicho da engenharia brilhavam os olhos dos futuros consumidores como novidades à nível futurista. Os carros elétricos ainda eram tão novidade quando a eletricidade em si – lembremos que muitas residências (para não dizer a esmagadora maioria) ainda eram iluminadas através de velas, lampiões e luminárias à gás encanado. Os carros à combustão, no entanto, estavam mais próximos da realidade da sociedade do período em questão, que já estava bastante familiarizada com veículos à combustão externa, vulgas máquinas à vapor (tais como navios, locomotivas e até mesmo alguns protótipos automotivos). Assim, as notícias de jornais e a mídia falada inevitavelmente foi dando maior destaque aos veículos movidos com motores à combustão interna em detrimento dos veículos movidos à baterias. Mesmo com produções decaindo, os veículos elétricos foram dando suas primeiras contribuições para os veículos à combustão: a partida elétrica. Os primeiros veículos à combustão tinham como forma de ignição inicial uma alavanca conectada diretamente ao motor, onde os próprios usuários deviam girar tal manivela para tirar o motor do estado de inércia estacionário. A substituição por partida elétrica é datada no ano de 1911.

Durante os anos de 1920, os veículos elétricos foram aos poucos desaparecendo, até que foram reaparecendo lenta e timidamente durante os anos de 1990, reflexo (em muitos pontos) em decorrência à crise do petróleo vigente nos EUA – e consequentemente no mundo – nos anos da década de 1970 e 1980 após embargos políticos e econômicos dos países membros da OPEP (Organização dos Países Exportadores de Petróleo) e Golfo Pérsico para a comercialização de petróleo com EUA e Europa. Com pesquisas na área de motores elétricos e baterias tendo cada vez mais relevância com o decorrer dos anos

que seguem o século XXI, grandes empresas do ramo automobilístico aventuraram-se em alguns projetos de veículos elétricos, destaques para as americanas General Motors (GM) e Ford, e as japonesas Toyota e Honda (vide Tabela 1).

Tabela 1 – Comparativo entre máxima distância percorrida por diferentes modelos de veículos elétricos ao final da década de 1990

Modelo	Montadora	Distância Max.(milhas)
EV1	GM	~100
Ranger	Ford	75
Rav4	Toyota	~100
Car	Honda	~100

Fonte: Situ (2009)

Infelizmente, tais pesquisas permaneceram na fase de protótipos, e nenhuma delas avançou para linha de produção, devido a complicações políticas, econômicas, déficits na produção em larga escala e falhas tecnológicas – os exemplares produzidos foram sucateados e apenas alguns exemplares encontram-se intactos nas mãos de colecionadores e entusiastas.

Atualmente, mesmo que baterias tenham sido utilizadas em carrinhos de golfe e cadeiras de roda elétricas, e muito embora seja teoricamente viável a implementação de motores elétricos alimentados por baterias para ônibus, vans e veículos pesados, o maior enfoque para a aplicação desta tecnologia ainda tem maior destaque em automóveis de pequeno e médio porte, ou seja, motos e carros principalmente - ambos os casos nos deparamos com veículos leves, de pequenas e/ou médias dimensões, mas que demandam grande potência, para atingirem altas velocidades (ao menos, as mais próximas possíveis quando comparadas com veículos à combustão interna).

Como, até então, essas baterias haviam sido usadas para projetos em menor escala, os engenheiros responsáveis pelas pesquisas deveriam se preocupar em 3 pontos básicos para a adaptação para veículos elétricos:

- I. Aprimoramento do nível de segurança
- II. Diminuição de custos
- III. Aumento da densidade energética

Ainda nos anos 2000, os veículos 100% elétricos não estavam desenvolvidos à um nível competitivo para abocanhar uma fatia do mercado global. No entanto, a revolução nesse paradigma muda com o início do desenvolvimento dos primeiros veículos híbridos. A japonesa Honda dá o passo inicial, lançando, no ano de 1999, seu primeiro modelo de veículo híbrido destinado ao mercado norte-americano: o Honda Insight (Figura 17).

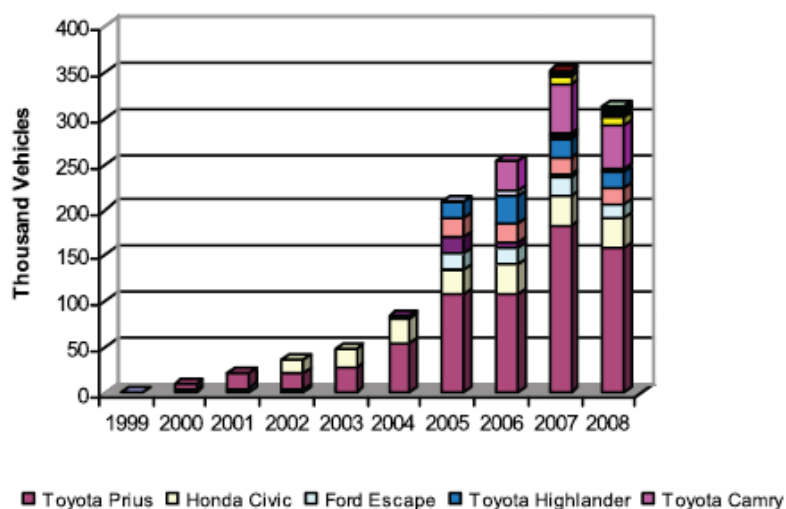
Figura 17 – Honda Insight



Fonte: ultimatespecs.com (2021)

A partir de então, demais companhias automobilísticas vêm desenvolvendo e aprimorando novos projetos de veículos híbridos. O gráfico da Figura 18 mostra que, até a primeira década dos anos 2000 os veículos híbridos ascenderam vertiginosamente ao mercado norte-americano (um dos principais em termos globais e, portanto, sendo utilizado como guia para as novas tendências). No ano de 2008, o mercado de veículos híbridos já representava uma porcentagem em torno de 2,5% em relação ao total de veículos comercializados. Uma nova geração dos projetos das gigantes Honda, Toyota e Ford foi desenvolvida e apresentada ao público no ano de 2009, aprimorando ainda mais o desempenho desses veículos.

Figura 18 – Venda de veículos híbridos no mercado norte-americano



Fonte: Situ (2009)

Como fora observado, a tecnologia de veículos híbridos tem sido difundida de forma avassaladora por muitas marcas, porém veículos 100% elétricos ainda são dissonâncias para o mercado. Primeiramente, além de possibilidade da utilização de veículos híbridos, a indústria à combustão foi desenvolvendo novos combustíveis, como é de conhecimento por muitos brasileiros o etanol e gás natural. No exterior (principalmente EUA) o diesel ainda é massivamente utilizado para impulsionar veículos de dimensões robustas.

Mas para explorarmos o cerne da questão, primeiramente devemos entender como são concebidos tais projetos, e quais suas principais características, semelhanças e diferenças em relação à um veículo à combustão.

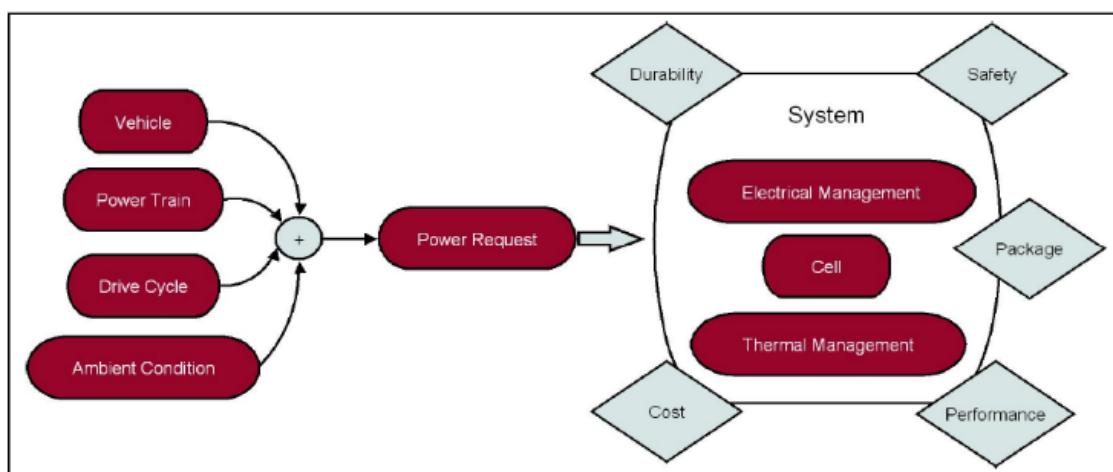
5.2 ENGENHARIA POR DE TRÁS DOS HEV'S E EV'S

Embora os veículos-conceitos desenvolvidos durante o início do século passado possuam as mesmas bases técnicas da engenharia dos atuais dias, estes são exorbitantemente diferentes dos atuais HEV's e EV's. Ao falarmos de veículos híbridos e elétricos do século XXI, devemos colocar em pauta um meio de transporte muito diferente tanto em seu exterior como em seu interior, principalmente no âmbito tecnológico. Os veículos elétricos modernos são sumariamente caracterizados pelos

seguintes pontos: são meios de transporte baseados em propulsão elétrica, que consiste em um motor elétrico, conversor de potência e fonte de alimentação (baterias agrupadas em conjunto).

Para o desenvolvimento apropriado de um sistema de fornecimento de energia, alguns parâmetros devem ser levados em consideração, e os principais tópicos levantados foram: tipo de veículo (*vehicle*), tipo de eixo de transmissão (*power train*), período de cada ciclo de utilização (*drive cycle*) e condições ambiente (*ambient conditions*) – pressão atmosférica, temperatura ambiente média, variações climáticas ao longo do ano. A partir dos dados aferidos, faz-se a apuração da demanda energética necessária para suprir as necessidades dos HEV's e EV's em questão (*power request*), para só então ser possível projetar um sistema elétrico que irá equipar tais veículos (fluxograma esquematizado pela Figura 19).

Figura 19 – Fluxograma para o desenvolvimento de baterias automotivas



Fonte: Eberleh, von Borck e Raiser (2010)

O sistema deve englobar a maneira de instalação e manuseio do mesmo (*electrical management*), qual o tipo e quantidade de baterias (*cell*) e manutenção térmica (*thermal management*). Periféricamente às pautas centrais, ainda temos que considerar índices de durabilidade (*durability*), segurança (*safety*), layout físico (*package*), performance (*performance*), e custos totais (*cost*).

A ênfase aplicada à cada parâmetro varia arbitrariamente entre as empresas desenvolvedoras. No entanto, através de simulações realizadas por Eberleh, von Borck e Raiser (2010), levantou-se uma tabela base, muito utilizada para termos uma noção do direcionamento que o projeto deve ser encaminhado. Para tanto, estipulou-se um veículo de massa total de 1200 kg, que (em situações ideais) percorre diariamente uma distância

total entre 100 à 200 km. E mais, a Tabela 2 também afere o C-rate (razão entre descarga total da bateria/tempo[horas]) para cada tipo de bateria.

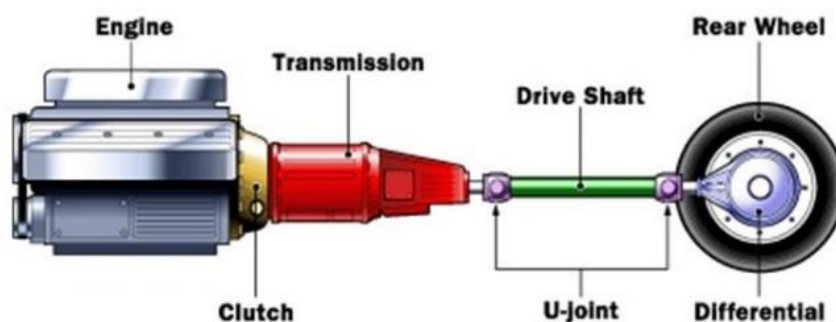
Tabela 2 – Dimensionamentos de baterias para veículos elétricos compactos de 1200 kg.

Variável	Unidade	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3
Capacidade	Ah	40	60	80
Energia	kWh	14,2	21,3	28,4
Tensão nom.	V	355,2	355,2	355,2
Peso	kg	1157	1215	1272
Consumo	kWh/100 km	13,3	13,24	13,4
Alcance	Km	102	156	207
Corrente RMS	A	61	60,8	62,5
C-rate	-	1,5	1	0,8

Fonte: Eberle, von Borck e Raiser (2010)

O layout do chassi para um veículo à combustão é de conhecimento geral e massivamente difundido para a população mundial, principalmente na parte técnica para manutenção e troca de peças (oficinas mecânicas). Podemos sintetizar a construção de um carro à combustão interna em quatro partes (ilustrados pela Figura 20): motor propriamente dito (*engine*), caixa de transmissão de marchar (*transmission*), eixo de transmissão (*drive shaft*) e eixo de rodas traseiras (*rear wheel*) – sistema em questão trata-se de um veículo com tração traseira, para veículos com tração dianteira (motor acoplado diretamente ao eixo de rodas dianteiras) o eixo de transmissão não é necessário.

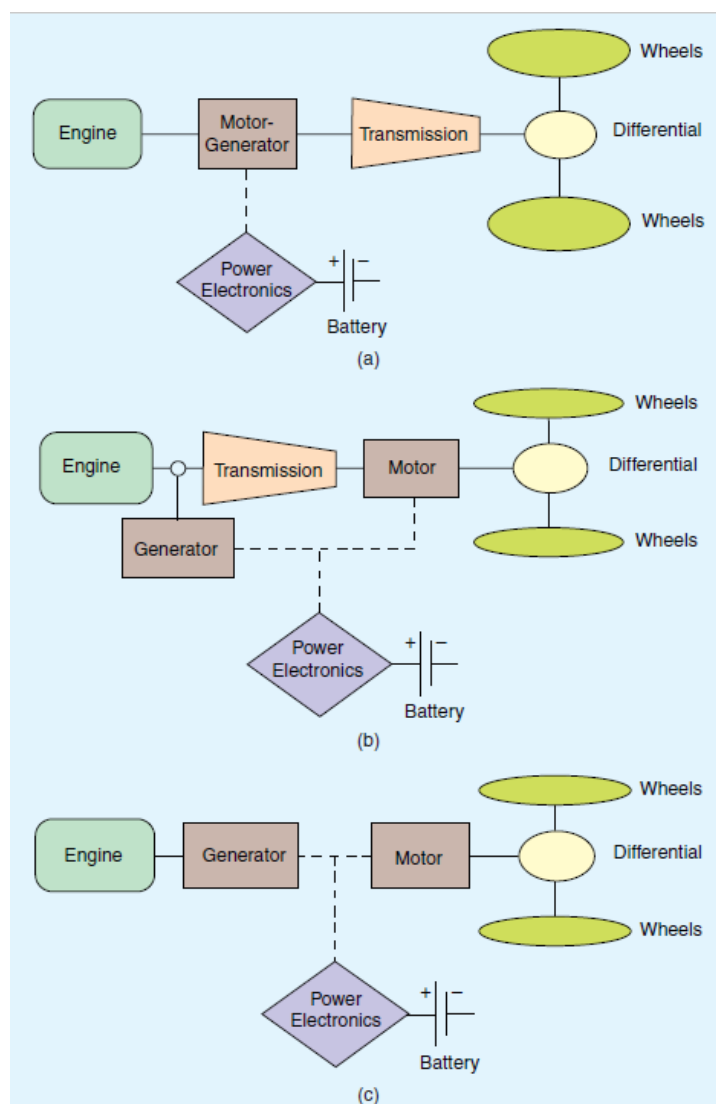
Figura 20 – Eixo de transmissão para um sistema de potência à combustão interna



Fonte: HowStuffWorks Inc (2005)

A partir do momento que abordamos veículos híbridos, seu sistema estrutural torna-se um pouco mais complexo, uma vez que ainda estamos tratando de um veículo à combustão interna, porém com o diferencial de também ter em seu conjunto um sistema de propulsão elétrica alimentado por baterias. O layout pode ser estruturado de três maneiras diferentes: sistema em paralelo (motor à combustão conectado à transmissão, paralelamente ao sistema elétrico), separados (split – possibilidade de alternância entre motor à combustão e motor elétrico), e em série (motor à combustão conectado em série com o sistema elétrico). A Figura 21 abaixo ilustra cada configuração em detalhes.

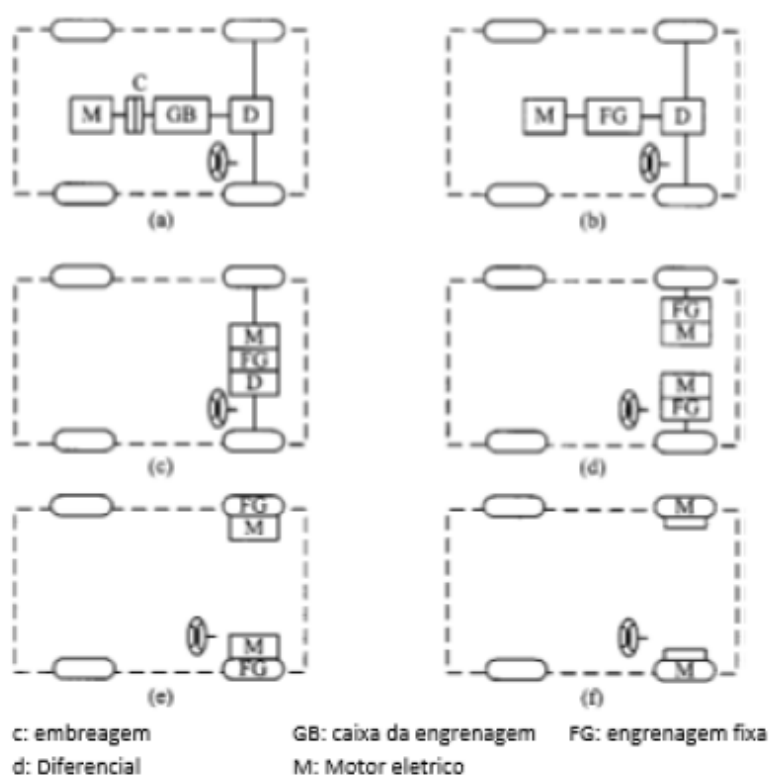
Figura 21 – Diferentes layouts de sistemas de veículos híbridos: (a)paralelo, (b)split, (c)série



Fonte: Hesla (2009)

Para veículos 100% elétricos, o conjunto motor/células combustíveis torna-se muito mais sucinto e de simples entendimento. O sistema como um todo pode ser entendido, basicamente, como as células eletroquímicas abordadas nesse trabalho, alimentando um motor elétrico, acoplado à uma caixa de engrenagem para possibilitar o veículo mover-se para frente ou para trás. A Figura 22 abaixo ilustra tal layout.

Figura 22 – Principais configurações para EV's



Fonte: Chan e Chau (2002)

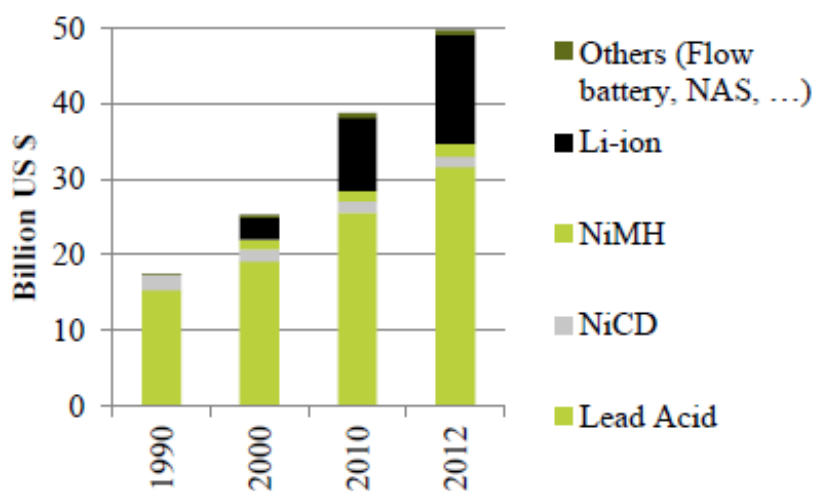
Conforme observamos nos modelos acima, o veículo também possui um sistema de embreagem, diferencial nas rodas e engrenagem fixa. No entanto, sejam quais forem os projetos, os EV são discrepantemente mais simples que qualquer projeto de veículo híbrido ou veículo à combustão interna, uma vez que a veículo trabalha com uma energia pura, inodora, incolor, com pouquíssimos ruídos, e com possibilidade de ser reutilizada (lembramos que energia elétrica – junto com energia potencial elástica e peso – é uma energia conservadora).

5.3 PARADIGMAS POR DE TRÁS DO NOVO MERCADO

Com o aumento do desenvolvimento de projetos de veículos automotivos híbridos e elétricos, o mercado de baterias viu-se desafiada à produzir novas tecnologias e em maiores quantidades para suprir a “nova” demanda. Do início dos anos 1990 até primeiros anos da primeira década do século XXI, as principais tecnologias (vide gráficos da Figura

23) eram baterias de íon-lítio, níquel-hidreto metálico, níquel-cádmio, chumbo-ácido e outras (baterias de fluxo, sulfato de sódio...).

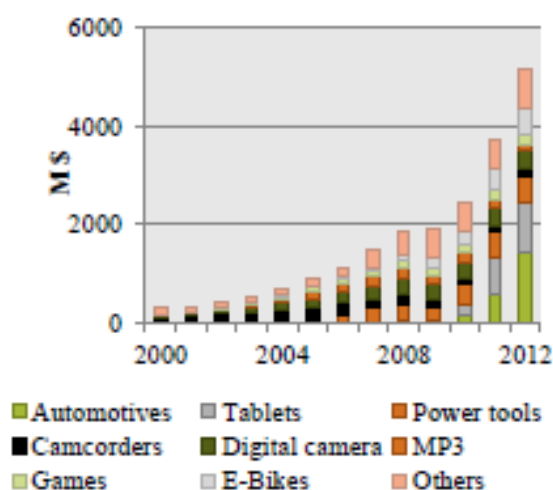
Figura 23 – Crescimento do mercado de baterias recarregáveis



Fonte: Pillot (2014)

Observando os gráficos acima, podemos verificar dois principais pontos. Primeiro, o consumo global para com o mercado de baterias recarregáveis teve um aumento brusco (como um todo) para as mais diversas tecnologias de baterias entre os anos de 1990 e 2012. Em segundo plano, podemos observar o destaque para o crescimento vertiginoso da utilização de baterias à íon de lítio. O aumento do consumo desse tipo específico de bateria está diretamente correlacionado à utilização destinada ao mercado automotivo (sejam eles elétricos, híbridos ou à combustão interna – lembremos que um carro à combustão possui um sistema elétrico “alimentado” por uma bateria). O gráfico da Figura 24 a seguir mostra em detalhes os diversos outros mercados que corroboraram para o aumento da utilização dessa tecnologia:

Figura 24 – Mercado de baterias de íon-lítio entre os anos 2000-2012



Fonte: Pillot (2014)

Já nos primeiros anos do século XXI – mais precisamente no ano de 2007 – Andrew F. Burke realizara diversas simulações (BURKE, A. F.; *Batteries and Ultracapacitors for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles*. Princeton: IEEE, 2007), aferindo algumas das características das principais tecnologias de baterias no mercado (para utilização em veículos) e suas diversas fabricantes.

Em seus estudos, Burke (2007) constatou que (até aquele momento) veículos híbridos possuíam uma densidade de energia muito inferior quando comparado aos veículos elétricos. Ao exemplo de baterias íon-lítio, baterias utilizadas por veículos elétricos possuíam densidade de energia entre 100-150 Wh/kg, enquanto veículos híbridos possuíam densidade energética entre 60-75 Wh/kg (vide Tabela 3 à seguir).

Tabela 3 – Características de diversos tipos de baterias utilizadas no mercado de HEV's e EV's

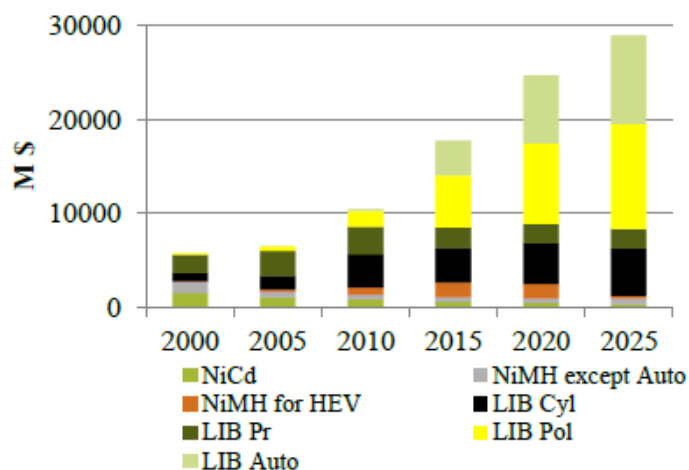
Battery technology	Applic.type	Ah	V	Wh/kg At C/3	Resist. mOhm	W/kg	W/kg 95% eff.	Usable SOC
Lead-acid								
Panasonic	HEV	25	12	26,3	7,8	389	77	28%
Panasonic	EV	60	12	34,2	6,9	250	47	-
Nickel-metal hydride								
Panasonic EV	EV	65	12	68	8,7	240	46	-
Panasonic EV	HEV	6,5	7,2	46	11,4	1093	207	40%
Ovonic	EV	85	13	68	10	200	40	-
Ovonic	HEV	12	12	45	10	1000	195	30%
Saft	HEV	14	1,2	57	1,1	900	172	30%
Lithium-ion								
Saft	HEV	12	4	77	7,0	1550	256	20%
Saft	EV	41	4	140	8,0	476	90	-
Skin-Kobe	EV	90	4	105	0,93	1344	255	-
Skin-Kobe	HEV	4	4	56	3,4	3920	745	18%

Fonte: Burke (2007)

Até o momento da realização dos estudos de Burke, o mercado possuía diversas marcas fabricando diversos tipos de baterias capazes de alimentar o sistema elétrico de veículos híbridos e 100% elétricos, porém nenhuma delas fora desenvolvida especificamente para tal função: ainda não havia um abrangente mercado de “plug-in batteries” (baterias com conexões por ‘plug’). Em análises, os estudos indicavam a igual possibilidade de projetar veículos movidos à ultra capacitores, ou até células à combustão de hidrogênio. No entanto, com crescente demanda do mercado global por veículos com maiores configurações elétricas (maior número de sensores, sistemas de controle de estabilidade de direção, sistemas capazes de proporcionar economia no consumo de combustível, etc), percebemos que, partir do ano de 2010, o mercado de baterias voltadas

à indústria automotiva passou por uma nova revolução, condensando-se em 4 principais tecnologias: níquel-hidreto metálico, íon-lítio, polímero de lítio, e níquel-cádmio (Figura 25 abaixo ilustrando a projeção do mercado de tais tecnologias).

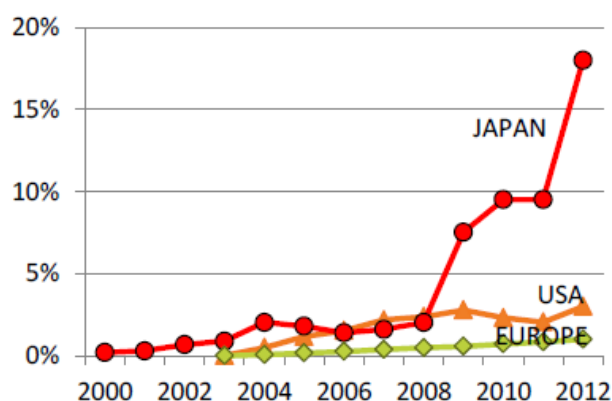
Figura 25 – Projeção do mercado de baterias recarregáveis entre os anos 2000-2025



Fonte: Pillot (2014)

As respostas para tal crescimento podem ser encontradas quando analisamos o mercado japonês: este foi (e continua sendo) um dos grandes responsáveis pelo aumento do consumo de veículos híbridos. A produção e comercialização em massa desses automóveis tem início, como dito anteriormente, no início dos anos 2000. Portanto tomaremos como início das análises os primeiros anos do século XXI (ilustrada pela Figura 26 à seguir).

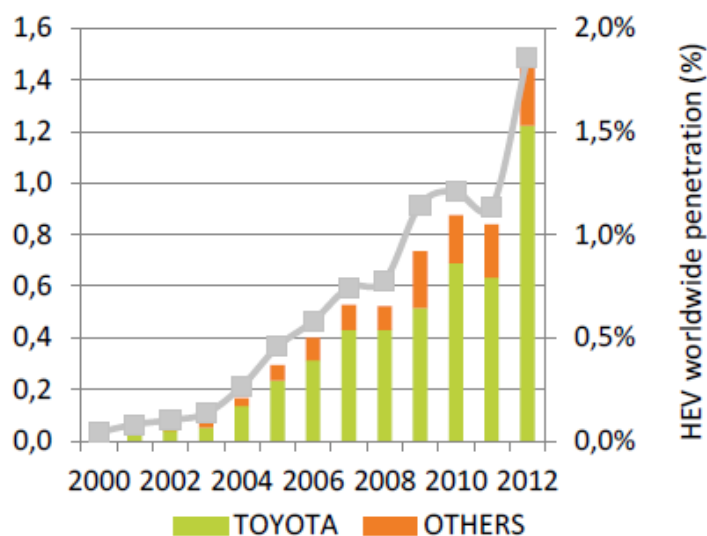
Figura 26 – Inserção dos veículos híbridos no mercado automobilístico



Fonte: Pillot (2014)

A partir da Figura 26, vemos que veículos híbridos tiveram um aumento muito tímido dentro dos mercados norte-americano e europeu. No entanto o mercado japonês apresentou uma elevação vertiginosa, principalmente a partir do ano de 2008 em diante. Não coincidentemente, podemos ver que, a partir do mesmo ano, a marca Toyota alavancou suas vendas em relação às demais marcas. A terceira geração do modelo Prius é, em grande parte, a responsável por tais números (Figura 27).

Figura 27 – Venda de HEV's no mundo/ano (em milhões de unidades)



Fonte: Pillot (2014)

Acompanhando as novas tendências, podemos destacar as marcas GM, Ford e Opel quando abordamos veículos híbridos. Em relação à veículos elétricos, destaques para

Nissan, Mitsubishi e Renault. Os números de vendas para cada marca entre os anos de 2010 e 2012 podem ser verificados nas tabelas 4 e 5 à seguir.

Tabela 4 – Venda de alguns modelos HEV's entre 2010-2012

Região	Companhia	Modelo	2010	2011	2012
USA	GM	GM Volt	326	761	23328
	Toyota	Prius			11546
	Ford	C-Max			2703
	Total				37577
Europa	Opel – GM	Ampera			10000
	Total				10000
Japão	Toyota	Prius			14000
	Total				14000
China			450	550	1000
	Total HEV		776	8221	62577

Fonte: Pillot (2014)

Tabela 5 – Venda de alguns modelos EV's entre 2010-2012

Região	Companhia	Modelo	2010	2011	2012
EUA	Nissan	Leaf	19	9674	9819
	Mitsubishi	i-Miev		80	563
	Ford				415
	Smart			388	162
	Tesla				805
	BMW	Active E			1163
	Honda	FIT			37
	Toyota	Rav4 EV			145
	Total		19	10142	13109
Europa	Nissan	Leaf		2000	10000
	Renault	Tweezy			8000
	Mitsubishi	i-Miev		6000	9300
	Outros		3000		
	Total		3000	8000	27300
Japão	Nissan	Leaf		8000	8000
	Mitsubishi	i-Miev	3000	6000	8300
	Outros			3000	8000
	Total		3000	17000	24300
Outros	Nissan	Leaf			2000
	Mitsubishi	i-Miev		2000	4000
	Renault	Fluence			5000
	Outros		6231	8458	14591
	Total		6231	10458	25591
Total			12250	45600	90300

Fonte: Pillot (2014)

5.4 ATUAL CENÁRIO E TECNOLOGIAS UTILIZADAS

Com o mercado aquecido, diversas empresas vêm alavancando pesquisas e lançamentos de novos modelos de veículos elétricos e híbridos, abrindo um novo leque de possibilidades para a área automobilística, que já está movimentando o mercado econômico mundial. A maior, mais influente e mais popular marca – Tesla, Inc. – entrou para os anais do jornalismo, dos periódicos acadêmicos e até mesmo para a cultura popular. A partir do ano de 2008, com a entrada de Elon Musk como CEO da empresa, e do lançamento do primeiro modelo Roadster (Figura 28), a companhia Tesla vai aos poucos mostrando ao mundo que, além de utilitários, os veículos elétricos também podem ser atrativos ao mercado esportivo, de forma sedutora e elegante aos olhos de uma grande parte da elite apaixonada pelo mercado de automobilismo. A companhia alemã BMW, seguindo a tendência, lança em novembro 2013 (data referente ao lançamento no continente europeu) o modelo i3 – modelo esse 100% elétrico – e pouco tempo depois (julho de 2014) lança o modelo i8, primeiro esportivo híbrido da companhia.

Figura 28 – Tesla Roadster 2008



Fonte: Tesla News (2020)

Além de veículos esportivos, várias produtoras asiáticas, como a indiana Tata Motors, e as chinesas JAC Motors, Chery Automobile e Kandi Technologies Group vem progressivamente focando suas linhas de produção em veículos elétricos, apostando no desenvolvimento de modelos para uso das massas populares no dia a dia (Tabela 6).

Tabela 6 – Característica técnicas para diferentes modelos de EV's

Empresa	Tata	JAC	Chery	Kandi
Modelo	Nexon	iEV20	Arrizo5e	K23
Potência(cv)/ Torque(Nm)	128/ 24,5	68/ 21,9	122/ 28,1	49/17,8
Autonomia máx.(km)	312	400	322 km	302
Vel.máx(km/h)	110	113	152	113
Bateria(kWh)	30	41	53	41,4
Tensão nom.(V)	320	326	357	158,4

Fonte: produção do próprio autor

Analisando o mercado asiático, a empresa sul-koreana Hyundai inova mais uma vez o mercado de veículos elétricos ao soltar na mídia a notícia de seu próximo lançamento, o modelo Ioniq 5 (Tabela 7 com ficha técnica do mesmo), promessa da empresa de ser capaz de recarregar seu banco de baterias em apenas 18 minutos, e ter autonomia de 450 km.

Tabela 7 – Ficha técnica Hyundai Ionic 5

Long Rang 72,6 kWh Battery (77,4 kWh for NA)	AWD	Power	225-kW (Front and Real combined)
		Torque	605-kW (Front and Real combined)
		0-100 km/h	5,2 seconds
	2WD	Power	160 kW Rear
		Torque	350 Nm Rear
		0-100 km/h	7,4 seconds
Standard Range 58 kWh Battery	AWD	Power	173 kW (Front and Rear combined)
		Torque	605-kW (Front and Real combined)
		0-100 km/h	6,1 seconds
	2WD	Power	125 kW
		Torque	350 Nm
		0-100 km/h	8,5 seconds

Fonte: Engenharia é: (2021)

Além de esportivos e carros voltados para a locomoção diária, o mercado de veículos elétricos também vem tentando abocanhar uma fatia do mercado destinado à veículos utilitários, destaque aqui para a companhia Sero Electric, com sua divisão de veículos Movi Electric (Figura 29). Empresa sul-americana com parceria Brasil-Paraguai, iniciando suas produções no campo industrial do Paraguai, vem desenvolvendo pequenos modelos de veículos elétricos voltados para utilização como carros patrulhas em condomínios residenciais; transporte dentro de grandes universidades, conglomerados industriais e bairros fechados; transporte de cargas em aeroportos e construções civis, etc.

Figura 29 – EV Movi Electric

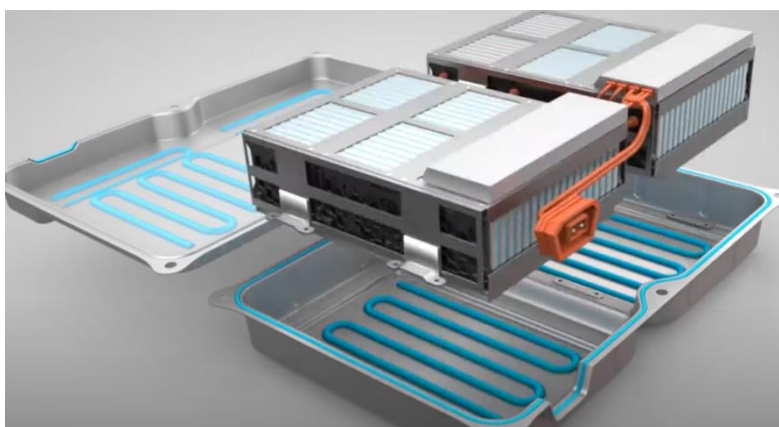


Fonte: Engenharia é: (2021)

Muitas empresas, diversos modelos, variadas fichas técnicas em relação à motores, layouts, chassis, poderio econômico do público alvo, etc. Deixemos tais variáveis de lado e foquemos no tema deste trabalho: o “coração” dos EV’s, os tipos de baterias utilizadas e suas respectivas tecnologias.

A indiana Tata Motors vem atacando ferozmente o mercado de veículos elétricos com seu plano de marketing, “pintando” sua tecnologia designada Zip Tron (Figura 30): encapsulado de baterias de íon-lítio refrigerada à líquido (utiliza-se como líquido refrigerante derivados de glicol e poliglicol). Para o veículo da JAC Motors, sua aposta foi em tecnologia de fosfato de ferro-lítio, também refrigerada à líquido. Arrizo5e, da marca Chery, também vem impulsionado por bancos de baterias de tecnologia íon-lítio, e finalmente o pequeno Kandi K23 é impulsionado por baterias de lítio.

Figura 30 – Baterias encapsuladas refrigeradas à líquido



Fonte: PluginIndia Electric Vehicles: (2020)

Dentre outras importantes tecnologias desenvolvidas para implementação em EV's, podemos pontuar:

- Sistema de recuperação de energia cinética (Kinetic Energy Recovery System) – popularmente designado por *Kers* (Figura 31). Acoplado às pastilhas de freios, o *Kers* possibilita a conversão de energia térmica (oriunda da frenagem) em energia elétrica, direcionada à recarga das baterias.
- Sistema de gerenciamento de baterias (Battery Management System – ou apenas BMS) – software de monitoramento, utilizado com a finalidade de maximizar a vida útil de baterias recarregáveis, garantindo segurança e conformidade de operação. Dentre os parâmetros monitorados, encontram-se: tensão, temperatura, corrente, estado de carga (SOC) e balanço de carga nas células.

Figura 31 – Sistema de recuperação de energia cinética (*Kers*)



Fonte: Quatro Rodas (2016)

5.5 COMPARATIVOS ENTRE AS PRINCIPAIS TECNOLOGIAS DE BATERIAS DO ATUAL MERCADO

Como dito anteriormente, as principais células eletroquímicas utilizadas são: íon-lítio, hidreto metálico de níquel, e chumbo-ácido. Abaixo, podemos observar a Tabela 8, comparando as 3 modalidades e suas respectivas características de uma maneira mais genérica.

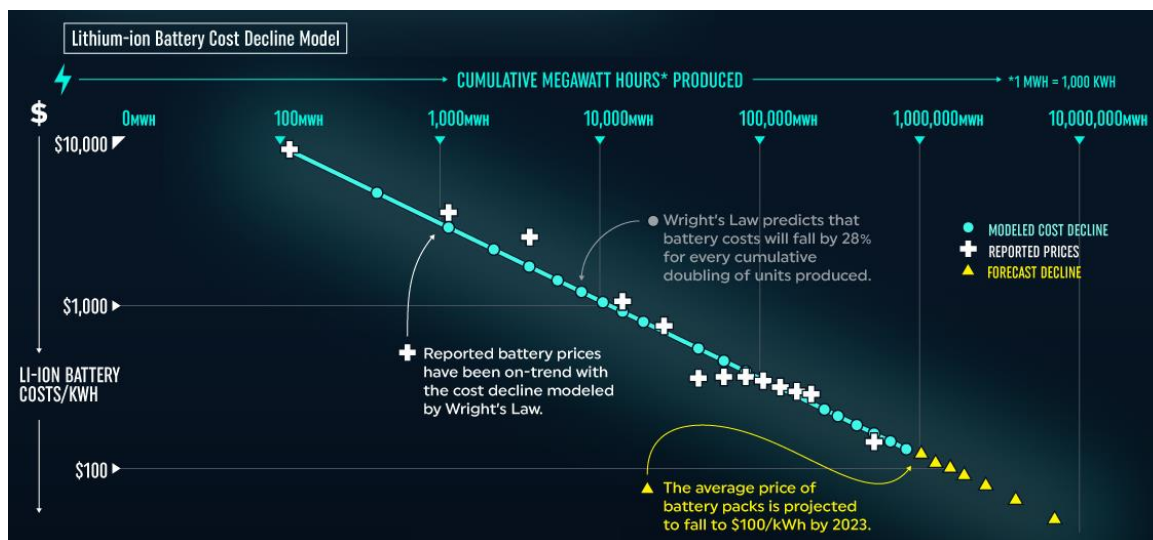
Tabela 8 – Comparações entre os principais tipos de baterias

Variáveis	Íon de lítio	Níquel hidreto metálico NiMH	Chumbo-ácido
Densidade energética	100 – 300 Wh/kg	40 – 120 Wh/kg	30 – 40 Wh/kg
Densidade de potência	1000 – 5000 W/kg	300 – 1000 W/kg	180 W/kg
Ciclo de vida	500 – 15000	500 – 1000	500 – 800
Eficiência de carga e descarga	95 – 99 %	65 – 80 %	70 – 92 %
Taxa de descarga própria	1 – 5 % / mês	-30% / mês	3 – 20% / mês
Tolerância à sobrecarga	Baixa	Baixa	Alta
Tempo para manutenção	Sem necessidade	60 – 90 dias	3 – 6 meses
Tempo para carga rápida	1 hora ou menos	2 – 4 horas	8 – 16 horas

Fonte: NeoCharge. (2020)

A partir dos dados da Tabela 8, podemos aferir que em quase todos os parâmetros as células de íon-lítio obtiveram as melhores qualificações. Não à toa o preço da tecnologia vem apresentando queda de custos – bem ilustrada pela Figura 32 – haja visto as apostas da indústria no desenvolvimento e aperfeiçoamento da referida categoria de células eletroquímica.

Figura 32 – Queda dos preços de baterias oriunda do desenvolvimento de novas tecnologias

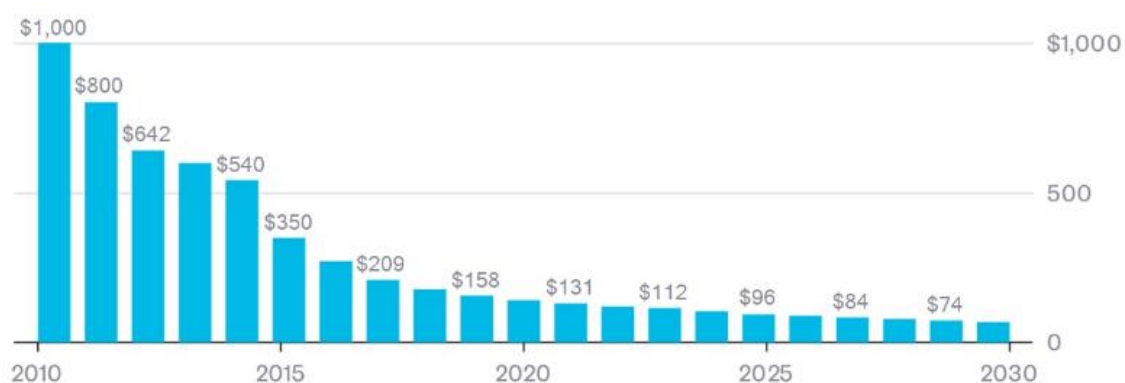


Fonte: Visual Capitalist. (2021)

Segundo as projeções do gráfico acima, espera-se que até o ano de 2023 o custo do kWh de baterias de íon-lítio chegue a custar em torno de U\$100.

Não apenas a tecnologia de íon-lítio vem apresentando declínio de preços: como podemos observar no gráfico a seguir, o custo de armazenamento do kWh para células eletroquímicas automotivas (de forma geral) vem apresentando quedas expressivas a partir do ano de 2010 (Figura 33 abaixo ilustra uma projeção até o ano de 2030).

Figura 33 – Custo de armazenamento de um quilowatt-hora para células eletroquímicas



Fonte: NeoCharge. (2020)

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

É inegável o crescimento do mercado de veículos híbridos e elétricos mediante a análise deste trabalho. A evolução de novas e promissoras tecnologias de baterias e fontes de armazenamento de energia eletroquímica tem ganhado destaque na mídia, atraindo a atenção do público consumidor em geral e (principalmente) o investimento de novos empreendedores.

Com a democratização e rápida propagação de ensaios e estudos acadêmicos, micro e pequenos empresários vem se aventurando no desenvolvimento de veículos elétricos. Da mesma forma, gigantes tradicionais do mercado automobilístico também estão “navegando em novos mares”. Em absoluto, o mercado contemporâneo está voltado majoritariamente para veículos à combustão interna, perpetuando uma tradição centenária. No entanto, vista as novas tendências tecnológicas atreladas ao conceito de desenvolvimento bio-sustentável, os HEV's e EV's vem ganhando destaque como alternativas de mobilidade limpa e barata para as massas urbanas.

As células eletroquímicas são o combustível para essa nova revolução, e o avanço do novo mercado de locomoção em massa virá atado (direta e indiretamente) com maiores investimentos em pesquisas para o barateamento e produção massiva de baterias mais leves, mais potentes e com maior densidade energética, suprimindo, portanto, a demanda das células de potências (motores elétricos) que – em conjunto – vem ganhando projeção à níveis globais.

REFERÊNCIAS

- ALDINI, GIOVANNI. De animali electricitate. **Stamperia dell'Istituto delle Scienze di Bologna**, Bologna, 1794. Disponível em <https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/S0317167100003851>. Acesso em 29 maio 2021.
- AUTOPAPO UOL. **Carros elétricos no Brasil: veja todos os modelos e preços**. Brasil: AutopapoUol, 2019. Disponível em <https://autopapo.uol.com.br/noticia/carros-eletricos-no-brasil/>. Acesso em: 05 maio 2021.
- BLOMGREN, G. E. Current status of lithium ion and lithium polymer secondary batteries. *In: ANNUAL BATTERY CONFERENCE ON APPLICATIONS AND ADVANCES*, 5, 2000, California. **Anais [...]**. Lakewood: Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE), 2000. Disponível em <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/838386>. Acesso em: 08 fev. 2021.
- BRENNI, P. GALDI, R.; PIETRA, F.; SAVINI, A. From Volta onwards: a variety of electrical batteries in the Pavia Museum of Electrical Technology. *In: IEEE HISTORY OF ELECTRO-TECHNOLOGY CONFERENCE (HISTELCON)*, 3, 2012. **Anais [...]**. Pavia: Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE), 2012. Disponível em <https://ieeexplore.ieee.org/document/6487561>. Acesso em: 15 fev. 2021.
- BURKE, A. F. Batteries and ultracapacitors for eletric, hybrid, and fuel cell vehicles. **Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE)**, Princeton, v.95, n.4, 2007. Disponível em <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4168012>. Acesso em: 15 fev. 2021.
- CHAN, C. C; CHAU, K. T. An overview of power eletronics in electric vehicles. **Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE)**, Hong Kong, v.44, n.1, 1997. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/557493>. Acesso em: 02 mar. 2021.
- DUNBAR, J. High performance nickel metal hydride batteries. *In: PROCEEDINGS OF WESCON '94*, 1994, California. **Anais [...]**. Carlsbad: Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE), 2002. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/403594>. Acesso em 13 set. 2021.
- EBERLEH, B.; VON BORCK, F.; RAISER, S. A highly integrated, mass produced battery module as basis for various ev and hev systems. *In: EMOBILITY - ELECTRICAL POWER TRAIN*, 2010, Leipzig. **Anais [...]**. Darmstadt, Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE), 2010. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5668073>. Acesso em: 30 jun. 2021.
- ENGENHARIAÉ. **Hyundai revela seu carro elétrico Ionic 5 com autonomia de 450km e bateria que recarrega em apenas 18 minutos**. Brasil: EngenhariaÉ, 2021. Disponível em <https://engenhariae.com.br/editorial/energia-verde/hyundai-revela-seu-carro-eletrico-ioniq-5-com-autonomia-de-450km-e-bateria-que-recarrega-em-apenas-18-minutos?>. Acesso em: 13 maio 2021.

ENGENHARIAÉ. **Empresa brasileira de carros elétricos inicia produção no Paraná.** Brasil: EngenhariaÉ, 2021. Disponível em <https://engenhariae.com.br/editorial/energia-verde/empresa-brasileira-de-carros-eletricos-inicia-producao-no-parana?>. Acesso em: 20 maio 2021.

FARIA NETO, A.; LOTUFO, F. A.; SANTOS, C. A. Energy storage for power systems. **Revista Sodebras**, São Paulo, v.11, n.132, 2016. Disponível em https://www.researchgate.net/publication/318967496_Revista_SODEBRAS_Volume_11_N_132_DEZEMBRO_2016_ARMAZENAMENTO_DE_ENERGIA_PARA_SISTEMAS_ELETRICOS_ENERGY_STORAGE_FOR_ELECTRICAL_SYSTEMS. Acesso em: 17 jun. 2021.

FARIA NETO, A.; LOTUFO, F. A.; MESQUITA, L. Introdução ao armazenamento eletroquímico de energia: uma abordagem didática. **Revista Ciências Exatas**, São Paulo, v.19, n.2, 2013. Disponível em https://www.researchgate.net/publication/295537752_INTRODUCAO_AO_ARMAZENAMENTO_ELETROQUIMICO_DE_ENERGIA_UMA_ABORDAGEM_DIDATICA. Acesso em: 17 jun. 2021.

GUARNIERI, M. When cars went electric. **Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE)**, Padova, v.5, n.1, 2011. Disponível em <https://ieeexplore.ieee.org/document/5742587>. Acesso em: 03 ago. 2021.

HELLER, B. Advances in platemaking and expanders for lead acid batteries. In: ANNUAL BATTERY CONFERENCE ON APPLICATIONS AND ADVANCES, 3, 1998, California. **Anais [...]**. Ambler, Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE), 2002. Disponível em <https://ieeexplore.ieee.org/document/653857>. Acesso em 01 ago. 2021.

HESLA, E. Electric propulsion. **Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE)**, Calgary, v.15, n.4, p.10-13, 2009. Disponível em <https://ieeexplore.ieee.org/document/5073955>. Acesso em 25 mar. 2021.

HOW STUFF WORKS. **How manual transmissions work.** USA: HowStuffWorks Inc, 2005. Disponível em <http://www.geocities.ws/pilafovi/Auto/Manual-Transmission.html>. Acesso em: 24 mar. 2021.

INSIDE EVS. **Elétrico chinês popular tem centenas de pedidos em 24 horas nos EUA.** Brasil: InsideEvs, 2020. Disponível em: <https://insideevs.uol.com.br/news/440075/eletrico-chines-kandi-eua/>. Acesso em: 05 maio 2021.

KANDIVEHICLE. **K23 parameters.** China: KandiVehicle, 2020. Disponível em <http://en.kandivehicle.com/carinfo?id=2855>. Acesso em: 07 jun. 2021.

NEOCHARGE. **Bateria de um veículo elétrico.** NeoCharge, Brasil, 2020. Disponível em <https://www.neocharge.com.br/tudo-sobre/carro-eletrico/bateria-veiculo-eletrico>. Acesso em: 30 abr. 2021.

PILLOT, C. Micro hybrid, hev, p-hev and ev market 2012-2025: impact on the battery business. *In: WORLD ELECTRIC VEHICLE SYMPOSIUM AND EXHIBITION (EVS27)*, 2013, Barcelona. **Anais [...]**. Barcelona: Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE), 2014. Disponível em <https://ieeexplore.ieee.org/document/6914818>. Acesso em: 11 maio 2021.

PLUGININDIA ELECTRIC VEHICLES. **Tata Nexon ev battery – liquid cooling & cell balancing**. USA: PluginIndia Electric Vehicles YouTube Channel, 2020. Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=9eS70vH8OB4> . Acesso em: 30 abr. 2021.

QUATRO RODAS. **Sistemas de recuperação de energia**. Brasil: Revista Quatro Rodas, 2016. Disponível em <https://quatrorodas.abril.com.br/noticias/sistemas-de-recuperao-de-energia/> . Acesso em: 30 abr. 2021.

SCROSATI, B. History of lithium batteries. **Journal of Solid State Electrochemistry**, Rome, v.15, 2011. Disponível em <https://link.springer.com/article/10.1007/s10008-011-1386-8>. Acesso em: 18 abr. 2021.

SITU, L. Electric vehicle development: the past, present & future. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS SYSTEMS AND APPLICATIONS (PESA)*, 3, 2009, Hong Kong. **Anais [...]**. Hong Kong: Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE), 2009. Disponível em <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5228601>. Acesso em: 18 abr. 2021.

STRUBEN, J.; STERMAN, J. D. Transition challenges for alternative fuel vehicle and transportation systems. **Massachusetts Institute of Technology (MIT)**, Massachusetts, v.35, p.1070-1097, 2008. Disponível em <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1068/b33022t>. Acesso em: 15 abr. 2021.

TARABAY, J.; KARAMI, N. Nickel metal hydride battery: Structure, chemical reaction, and circuit model. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TECHNOLOGICAL ADVANCES IN ELECTRICAL, ELECTRONICS AND COMPUTER ENGINEERING (TAECE)*, 3, 2015, Beirut. **Anais [...]**. Beirut: Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE), 2015. Disponível em <https://ieeexplore.ieee.org/document/7113594>. Acesso em: 13 abr. 2021.

TESLA NEWS. **Conheça a sexy linha de produtos da Tesla, e a sua cronologia**. Brasil: TeslaNews, 2020. Disponível em <https://www.teslanews.com.br/artigo/2/conheca-a-sexy-linha-de-produtos-da-tesla-e-a-sua-cronologia> . Acesso em: 14 abr. 2021.

ULTIMATESPECS. **Honda Insight automatic ficha técnica**. USA: Ultimate Specs, 2005. Disponível em <http://www.ultimatespecs.com/br/carros-ficha-tecnica/Honda/33441/Honda-Insight-Automatic.html> . Acesso em: 22 mar. 2021.

VISUAL CAPITALISM. **Electric vehicle prices fall as battery technology improves**. USA: Visual Capitalism, 2021. Disponível em <https://www.visualcapitalist.com/electric-vehicle-battery-prices-fall/> . Acesso em: 05 maio 2021.