

ADRIANUS DE QUEIROZ FERREIRA

Panorama da indústria de baterias automotivas: tecnologias da transição para eletrificação

Guaratinguetá - SP

2019

Adrianus de Queiroz Ferreira

Panorama da indústria de baterias automotivas: tecnologias da transição para eletrificação

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

Orientador: Prof.º Dra. Thaís Santos Castro

Guaratinguetá – SP

2019

F383p	Ferreira, Adrianus de Queiroz Panorama da indústria de baterias automotivas: tecnologias da transição para eletrificação / Adrianus de Queiroz Ferreira – Guaratinguetá, 2019. 76 f : il. Bibliografia: f. 72 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2019. Orientadora: Prof^a. Dr^a. Thaís Santos Castro 1. Baterias elétricas. 2. Indústria automobilística. 3. Baterias de Lítio. I. Título. CDU 621.352
-------	---

Luciana Máximo

Bibliotecária CRB-8/3595

ADRIANUS DE QUEIROZ FERREIRA

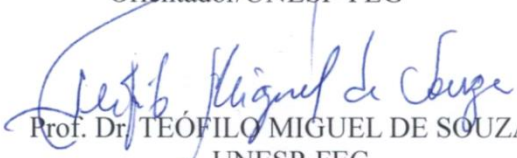
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA


Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr.ª. THAIS SANTOS CASTRO
Orientador UNESP-FEG


Prof. Dr. TEÓFILO MIGUEL DE SOUZA
UNESP-FEG


Prof. MSc. EVALDO CHAGAS GOUVÊA
UNESP-FEG

Dezembro de 2019

ADRIANUS DE QUEIROZ FERREIRA

NASCIMENTO

21.08.1991 - Campinas /SP

FILIAÇÃO

Crispiniano Ferreira

Cilene Maria Queiroz

2012/2019

Curso de Graduação em Engenharia Mecânica

Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita
Filho" Campus de Guaratinguetá

2018/2019

Estágio Supervisionado

Robert Bosch LTDA - Campinas/SP

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a todas as pessoas que me suportaram nesses longos anos de faculdade. Por incompetência própria demorou-se tanto, mas se chegou ao fim, pela ajuda de pessoas/professores incríveis que tiveram paciência comigo, pelos amigos que me suportaram em momentos difíceis. Dedico especialmente a minha mãe, Cilene Maria Queiroz, a maior responsável por quem eu sou hoje. Dedico também ao meu falecido pai, Crispiniano Ferreira, quem também me ensinou o que ser e o que não como homem.

AGRADECIMENTOS

Agradeço esse trabalho a todas as pessoas que me suportaram na pesquisa principalmente minha orientadora, meus chefes na Bosch, Vinícius Raimundo e Leo Ferreira além da própria Robert Bosch GmbH por também fornecer grandes insumos de pesquisa.

EPIGRAFE

“It is in truth not for glory, nor riches, nor
honours, that we are fighting, but for freedom -
for that alone, which no honest man gives up but
with life itself”

Declaration of of Arbroath

RESUMO

Devido tendência mundial pela busca de matrizes energéticas mais sustentáveis, a indústria automobilística passa pelo processo de conversão do motor a combustão interna, alimentado por combustíveis fósseis, ao motor elétrico, alimentado por baterias de íon lítio. Através da revisão de diversos textos científicos e análises de mercado, esse trabalho busca dar um panorama desse processo e das tecnologias em envolvidas nessa transição, como também analisar o posicionamento do Brasil nessa transformação mundial. Com um parque industrial voltado exclusivamente a produção da bateria de chumbo ácido e, devido ao consolidado setor agrícola, com a maior parte dos investimentos de pesquisa recentes voltados a produção de biocombustíveis, o Brasil enfrenta empecilhos para acompanhar a eletrificação automobilística.

PALAVRAS-CHAVE: Baterias automotivas. Indústria automotiva. Baterias elétricas. Baterias de íon de lítio

ABSTRACT

Due to the global trend towards more sustainable energy matrices, the automobile industry is going through the process of converting the internal combustion engine, powered by fossil fuels, to the electric motor, powered by lithium ion batteries. Through the review of several scientific texts and market analysis, this paper seeks to give an overview of this process and the technologies involved in this transition, as well as to analyze Brazil's position in this worldwide transformation. With an industrial park devoted exclusively to lead acid battery production and, due to the consolidated agricultural sector, with most recent research investments focused on biofuels production, Brazil faces difficulties to keep up with automobile electrification.

KEYWORDS: Automotive batteries. Automotive industry. Electric batteries. Lithium ion batteries

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Parâmetros funcionais de baterias	22
Figura 2 - Modelo eletroquímico da bateria chumbo-ácido	25
Figura 3 - Modelo eletroquímico da bateria de íon-lítio	27
Figura 4 - Modelo de Planté	35
Figura 5 - Modelo de Farue	36
Figura 6 - Grade por estampagem (Powergrid)	38
Figura 7 - Bateria EFB	38
Figura 8 - Modelo de placa negativa híbrida	39
Figura 9 - Bateria AGM expandida	42
Figura 10 - Patentes relacionadas a bateria de lítio registradas até 2015	45
Figura 11 - Modelo de Whittingham	46
Figura 12 - Modelo de Goodenough	46
Figura 13 - Modelo de Yoshino	47
Figura 14 - Nanoestrutura do cátodo de LCO	48
Figura 15 - Nanoestrutura do cátodo de LMO	51
Figura 16 - Nanoestrutura do cátodo de LFP	52
Figura 17 - Design de células de baterias íon-lítio	54
Figura 18 - Demanda de energia e potência das classes de híbridos	55
Figura 19 - Modelos de sistema de transmissão híbridos	59
Figura 20 - Custo inicial por capacidade de tecnologia	61
Figura 21 - Comparação de potencial entre diferentes baterias	62

Figura 22 - Propriedades específicas de diferentes baterias	63
Figura 23 - Custo por total por ciclo de vida.....	64
Figura 24 - Estrutura de custos de uma célula NMC.....	64
Figura 25 - Preço médio do volume médio de um conjunto de células íon lítio	65
Figura 26 - Custos do kWh de sistemas em USD	66
Figura 27 - Processo de reciclagem de baterias chumbo-ácido.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção e vendas de baterias automotivas em milhões de unidades.....	31
Tabela 2 - Principais fabricantes de baterias automotivas instalados no Brasil	32
Tabela 3 - Comparativo técnico de diferentes designs de baterias PbA	42
Tabela 4 - Comparativo de custo e aplicação de diferentes designs de baterias PbA	44
Tabela 5 - Comparativo técnico dos cátodos	52
Tabela 6 - Comparação de tecnologias íon lítio	53
Tabela 7 - Aplicações de baterias de acordo com tecnologia automotiva	60
Tabela 8 - Porcentagem de materiais nas baterias chumbo-ácido	68

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

AGM	<i>Absorbed Glass Material</i>
ANFAVEA	Associação Nacional de Fabricantes de Veículos Automotores
CNAE	Classificação Nacional de Atividades Econômicas
EFB	<i>Enhanced Fluid Battery</i>
EV	<i>Electric Vehicle</i>
HEV	<i>Hybrid electric vehicle</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IAM	<i>Internal Aftermarket</i>
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IPI	Imposto sobre Produto Industrializado
LCO	Lítio Óxido de Cobalto
LFP	Lítio Íon Fosfato
LMO	Lítio Óxido de Manganês
MCI	Motor de combustão interna
NCA	Níquel Cobalto Alumínio
NiMH	Níquel-hidreto metálico
NMC	Níquel Cobalto Manganês
OEM	<i>Original Equipment Manufacturer</i>
PbA	Bateria de chumbo-ácido
PIB	Produto interno bruto
PsoC	<i>Partial State of Charge</i>
Sindipeças	Sindicato Nacional da Indústria de Componentes para Veículos Automotores
SLI	<i>Starting Lighting Ignition</i>
VRLA	<i>Valve Regulated Lead Acid</i>
ZVEI	<i>Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Graus Celsius
Kg	Quilograma
Km	Quilômetro
KW	Quilowatt
KWh	Quilowatt hora
mAh/Kg	Capacidade específica
mm	milímetro
mΩ	miliohm
V	Volts
W/Kg	Densidade de potência
W/L	Potência específica
Wh/Kg	Densidade de energia
Wh/L	Energia específica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivos gerais.....	17
1.1.2	Objetivos específicos.....	17
1.2	DELIMITAÇÃO	18
1.3	MOTIVAÇÃO	18
1.4	METODOLOGIA E ESTRUTURA DO TRABALHO	19
1.4.1	Metodologia.....	19
1.4.2	Estrutura do trabalho	19
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	21
2.1	PARÂMETROS DE FUNCIONAMENTO DE BATERIAS	21
2.1.1	Princípio de funcionamento de baterias chumbo-ácido	23
2.1.2	Princípio de funcionamento de baterias íon-lítio.....	25
3	PANORAMA DA INDÚSTRIA ATUAL	28
3.1	PANORAMA ATUAL DA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA	28
3.1.1	Panorama da Indústria de Baterias automotivas	31
4	ANÁLISE DAS TECNOLOGIAS DE BATERIAS	35
4.1	BATERIAS CHUMBO-ÁCIDO	35
4.1.1	Invenção do modelo de bateria chumbo-ácido.....	35
4.1.2	Inovações no modelo	37
4.1.2.1	Baterias EFB.....	37

4.1.2.2	Baterias AGM	40
4.2	BATERIAS DE ÍON-LÍTIO	44
4.2.1	Invenção e desenvolvimento do modelo de bateria íon-lítio	45
4.2.2	Baterias de íon-lítio atuais	47
4.2.2.1	Lítio Óxido de Cobalto (LCO)	48
4.2.2.2	Níquel Cobalto Alumínio (NCA)	49
4.2.2.3	Níquel Cobalto Manganês (NMC).....	49
4.2.2.4	Lítio Óxido de Manganês (LMO).....	50
4.2.2.5	Lítio Íon Fosfato (LFP).....	51
4.2.3	Formatos de células de íon lítio	53
5	APLICAÇÃO NOS VEÍCULOS ELÉTRICOS.....	55
5.1	CLASSIFICAÇÃO DOS HEV E TECNOLOGIA DE BATERIAS	56
5.1.1	Veículos Micro Híbridos (<i>Micro-Hybrid</i>)	56
5.1.2	Veículos Meio Híbridos (<i>Mild-Hybrid</i>)	56
5.1.3	Veículos Híbridos Completos (<i>Full-Hybrid</i>)	57
5.1.4	Veículos Híbridos <i>Plug-in</i> (<i>Plug-in Hybrid</i>)	58
5.1.5	Veículos Elétricos (<i>Electric vehicles</i>)	59
6	CENÁRIO ECONÔMICO	61
7	CENÁRIO AMBIENTAL	67
7.1	DESCARTE E RECICLAGEM DE BATERIAS CHUMBO-ÁCIDO	67
7.2	DESCARTE E RECICLAGEM DE BATERIAS ÍON-LÍTIO	70
8	CONCLUSÃO.....	72
	REFERÊNCIAS.....	74

1 INTRODUÇÃO

No início do século XX, as baterias automotivas participaram da revolução do automóvel, constituindo-se em uma das diversas indústrias que se estabeleceram com a popularização e produção em massa do veículo de combustão interna. Uma das características de uma inovação revolucionária é promover a criação e o desenvolvimento de novas indústrias, alterando o *status quo* e pondo a indústria tradicional em xeque. A produção de automóveis desenvolveu novos materiais e produtos e melhores conceitos de organização da produção provocando mudanças profundas na sociedade mundial.

A indústria automobilística, desde a Segunda Revolução Industrial, passou a ter uma indiscutível relevância na economia mundial, movimentando atualmente trilhões de dólares por ano (SABERI,2018). Segundo Saberi (2018), o setor automobilístico movimenta diversos outros setores como mineração, siderurgia, produção de plásticos, componentes eletrônicos, entre outros. Variações de 1% de crescimento nessa indústria resultam em 1% a 1,5% de crescimento no produto interno bruto (PIB) de países desenvolvidos. Os números de consumo de matéria-prima podem expressar bem essa importância. De acordo com Saberi (2018), estima-se que 50% do total de borracha, 25% do total de vidro e 15% do total de aço produzidos no mundo destinam-se à essa indústria, comprovando dados que as atividades desse setor impactam 10% do PIB dos países desenvolvidos. Ainda se estima que mais de 8 milhões de funcionários estão empregados diretamente e, para cada emprego direto, mais de cinco indiretos são gerados.

Paralelamente ao desenvolvimento da indústria automobilística desenvolveu-se a indústria de autopeças. No início, todas as peças eram importadas da Europa e dos EUA, porém a partir de 1950 a indústria nacional começa a se desenvolver no Brasil. A indústria nacional de autopeças é formada por fornecedores de componentes originais e independentes. Existem dois mercados para esses produtos, sendo o primeiro caracterizado pelas vendas para as montadoras de veículos, e o segundo mercado, denominado mercado de reposição, para substituição de peças em veículos usados.

Conjuntamente com o desenvolvimento da indústria de autopeças, desenvolveu-se o setor de produção de baterias automotivas. Hoje, todos os veículos automotores contêm baterias. Elas foram introduzidas em 1912, quando assumiram seu papel primordial no

funcionamento do automóvel, devido a substituição da manivela de ignição pela partida elétrica, e também servindo para acionar as luzes. Atualmente, elas servem como fonte de energia para diversos sistemas auxiliares embarcados que cresceram em quantidade com a evolução dos veículos.

O Brasil possui amplo parque industrial no setor de baterias automotivas, com uma estrutura de mercado bastante particular. Mesmo com abertura comercial nos anos 90 e a entrada de multinacionais no país, ainda existe acentuada presença de empresas de capital nacional, que respondem por cerca de 80% do mercado brasileiro, sendo toda a produção voltada ao modelo chumbo-ácido. Com a atual tendência mundial à substituição dos combustíveis fósseis e busca da sustentabilidade energética, intensificou-se a conversão dos veículos a combustão interna para veículos híbridos e elétricos. Nesse processo, o mercado brasileiro de baterias enfrenta um sério problema já que o modelo de chumbo-ácido não atende à demanda energética dos novos veículos, nem é adequado devido ao peso. Assim, esse trabalho busca explicar os detalhes e características das diferentes tecnologias envolvidas nesse processo de mudança e como o Brasil figura nesse cenário.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral desse estudo é apresentar as diferentes tecnologias de baterias automotivas.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Apresentar o panorama da indústria automobilística brasileira;
- Analisar o setor de produção de baterias automotivas;

- Apresentar as tendências tecnológicas do mercado automotivo de baterias e o modelo de conversão entre tecnologias;
- Apresentar o cenário econômico das tecnologias;
- Apresentar o cenário ambiental das tecnologias.

1.2 DELIMITAÇÃO

O presente trabalho baseia-se no estudo sobre as diferentes tecnologias de baterias no mercado automotivo, considerando-se o atual processo de conversão entre o motor a combustão interna para o carro puramente elétrico. A análise se inicia no panorama da atual da indústria automobilística, apresenta as características do mercado do setor de baterias nacional, encerrando-se com a apresentação das atuais tecnologias do modelo de chumbo-ácido e das novas tecnologias no mercado que suportarão a eletrificação citando-se também inovações ainda em pesquisa científica.

1.3 MOTIVAÇÃO

As tendências tecnológicas da eletrificação vêm modificando seriamente um dos principais mercados onde o engenheiro mecânico atua. Sendo assim é interessante entender como será o funcionamento das baterias que suportaram todos os sistemas de controle e a alimentação motor dos carros, visto que o motor de combustão interna tende a ser substituído em um futuro próximo. Espera-se construir um material de referência a um possível interessado em trabalhar com essa linha de produto.

1.4 METODOLOGIA E ESTRUTURA DO TRABALHO

1.4.1 Metodologia

Desenvolveu-se uma pesquisa de análises e artigos relacionados a baterias, carros elétricos e tendências energéticas do futuro de maneira que se permita primeiramente conhecimento amplo e detalhado do tema.

A pesquisa foi realizada em duas etapas, sendo a primeira etapa relacionada ao levantamento bibliográfico e seleção dos textos e artigos que darão fundamentação teórica ao estudo, para construir diagnóstico do setor de baterias automotivas no Brasil. Na segunda etapa, pesquisou-se as novas tecnologias com o advento dos veículos elétricos, através da seleção exploratória em buscas em plataformas eletrônicas, bancos de artigos de universidades públicas e particulares do Brasil, artigos das plataformas Science Direct e ResearchGate, além de dados do site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e da Associação Nacional de Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA). Os critérios de seleção dos documentos foram padronizados em textos publicados entre os anos de 2014 a 2018.

1.4.2 Estrutura do trabalho

Este trabalho foi dividido em capítulos, da seguinte forma:

No capítulo 1, apresenta-se a introdução, objetivos, motivação e metodologia de execução desse trabalho.

No capítulo 2, será apresentado o referencial teórico dos princípios de funcionamento das baterias.

No capítulo 3 discute-se o panorama do setor automobilístico e do setor de produção de baterias para veículos, considerando-se o movimento global da eletrificação e o posicionamento do Brasil nele.

O capítulo 4 apresenta as atuais tecnologias de baterias no mercado automotivo: as baterias de chumbo-ácido e suas melhorias, principal tecnologia empregada nos carros atuais, e as baterias de íon-lítio que são a perspectiva de aplicação futura.

O capítulo 5 traz as aplicações dessas tecnologias nos carros híbridos e puramente elétricos explicando as necessidades crescentes de aumento de potência e energia acumulada nas baterias.

No capítulo 6, apresenta-se uma análise econômica da conversão para tecnologia de íon lítio.

O capítulo 7 apresenta uma análise ambiental dos descarte e reciclagem desses dispositivos.

Por fim, temos as conclusões dos pontos abordados no trabalho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

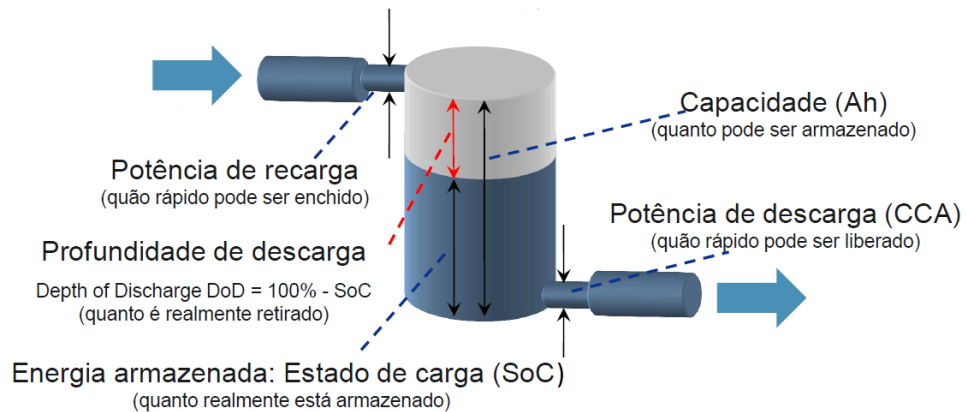
2.1 PARÂMETROS DE FUNCIONAMENTO DE BATERIAS

Baterias são sistemas eletroquímicos para armazenamento de energia. São acumuladores que transformam energia química em energia elétrica e vice-versa, normalmente por meio de uma reação de oxirredução. O polo negativo é denominado ânodo, onde ocorre a oxidação, enquanto o positivo é o cátodo, onde ocorre a redução. Os elétrons correm do ânodo para o cátodo através do eletrólito, devido a diferença de eletronegatividade dos materiais dos eletrodos, gerando fluxo de elétrons, ou seja, corrente elétrica (CROMPTON, 2000).

Segundo Dehghani-Sanji et al. (2019) as baterias podem ser classificadas como primárias e secundárias. Nas baterias primárias os reagentes são completamente consumidos ao longo do uso da bateria. Desse modo, após o consumo da carga, a bateria deve ser descartada.

Já as baterias secundárias, também chamadas de recarregáveis, podem ser reenergizadas por meio da aplicação de uma diferença de potencial (através de um gerador, como carregador específico para o aparelho, um alternador ou um dínamo). Isso ocorre porque as reações envolvidas no funcionamento desses dispositivos são forçadas a acontecer no sentido contrário, regenerando os reagentes e permitindo que a bateria seja utilizada novamente servindo a uma grande quantidade de equipamentos portáteis, como celulares, telefones sem fio, *laptops* e máquinas fotográficas, além dos automóveis e seus sistemas eletrônicos. Baterias são caracterizadas principalmente pelos parâmetros operacionais que devem ser ajudados às aplicações eletroeletrônicas. A Figura 1 apresenta esquematicamente os parâmetros funcionais das baterias e uma explicação literal de seu significado.

Figura 1 - Parâmetros funcionais de baterias



Fonte: Johnson Controls (2016).

O Quadro 1 apresenta a definição matemática de cada parâmetro assim como sua unidade de medida no sistema internacional.

Quadro 1 - Definição de parâmetros funcionais

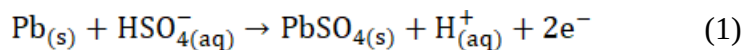
Parâmetro	Definição
Potência de Recarga [W]	É a taxa de energia recebida pela bateria dividida pelo tempo. Define a capacidade de carregamento da bateria.
Profundidade de Descarga (DoD) [%]	Quantidade de energia retirada da bateria dividida pela capacidade total de acúmulo de energia.
Estado de carga (SoC) [%]	Quantidade de energia restante da bateria dividida pela capacidade total de acúmulo de energia.
Capacidade [Ah]	Quantidade de energia acumulada em uma bateria.
Potência de Descarga [W]	É a taxa de energia descarregada pela bateria dividida pelo tempo. Define a capacidade de entrega da bateria.

Fonte: Autoria própria.

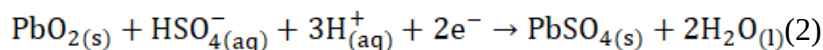
2.1.1 Princípio de funcionamento de baterias chumbo-ácido

As baterias de chumbo-ácido produzem tensão a partir da reação química entre os dois materiais eletronicamente desiguais das placas de chumbo positiva (dióxido de chumbo, $\text{PbO}_{2(s)}$) e negativa (chumbo puro, $\text{Pb}_{(s)}$) imergidas no eletrólito, ou seja, na solução de ácido sulfúrico e água. No processo de descarga, ambas as placas de se tornam sulfato de chumbo (PbSO_4) e o eletrólito perde o ácido sulfúrico dissociado tornando-se água. As reações podem ser descritas da seguinte forma:

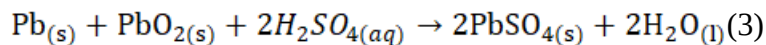
Reação na placa negativa



Reação na placa positiva

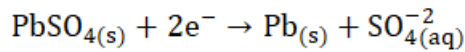


Reação total

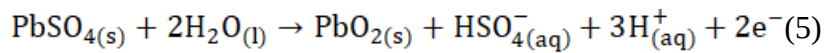
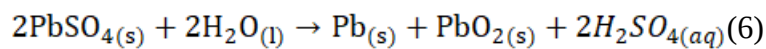


Os íons H^{+} e HSO_4^{-} estão dissociados na solução aquosa. No processo de descarga os íons HSO_4^{-} migram para o eletrodo negativo e produzem íons H^{+} e sulfato de chumbo. No eletrodo positivo, o dióxido de chumbo reage com o eletrólito para formar cristais de sulfato de chumbo e água. Ambos os eletrodos são descarregados para o sulfato de chumbo, que é um mau condutor e o eletrólito é progressivamente diluído à medida que a vazão prossegue já que a reação produz água.

No processo de carga as reações se invertem. O alternador fornece elétrons que reagem com o sulfato de chumbo na placa negativa resultando na formação de chumbo puro e dissolução de íons sulfato no eletrólito. Na placa positiva a dissolução do sulfato de chumbo é incentivada e placa retorna à composição inicial de óxido de chumbo.

Reação na placa negativa

(4)

Reação na placa positiva**Reação total**

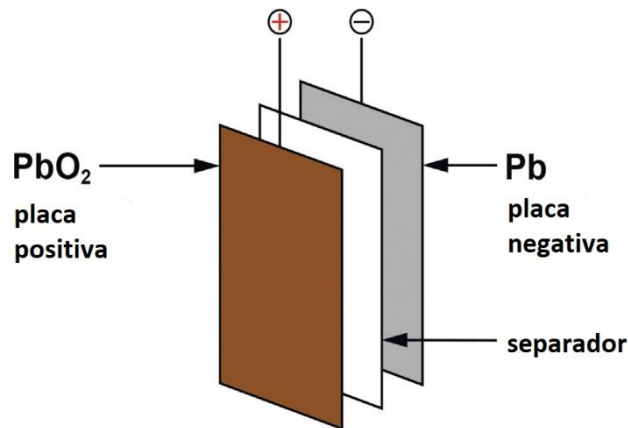
Quando a célula se encontra próxima ao seu estado máximo de carga, os eletrodos voltam parcialmente a composição inicial (óxido de chumbo na positivo e chumbo puro no negativo) e no eletrólito aumenta-se a concentração de íon sulfato. Como as reações não são completamente reversíveis, a taxa de reversibilidade diminui a cada ciclo, sendo ela um dos principais parâmetros que definem a vida útil e desempenho das baterias chumbo-ácido.

Caso haja sobrecarga, ocorre a eletrólise de água pela diferença de potencial extra aplicadas, resultando na produção de oxigênio e hidrogênio gasosos e perda de volume de eletrólito. Para baterias inundadas convencionais, a seleção correta de ligas das grades formadoras das placas e os parâmetros de carregamento, reduzem a perda de água a níveis muito baixos, de modo que a adição de água para a manutenção da bateria precise ser realizada ocasionalmente. Segundo Belmokhtar et al. (2016), os modelos de baterias classificadas como *Valve regulated lead acid* (VRLA) ou baterias de chumbo-ácido reguladas por válvula, onde o eletrólito é imobilizado em um separador de lã de vidro absorvente ou gelificado com sílica finamente dispersa, apresenta vantagem por permitir serem formados canais entre as placas positiva e negativa, de modo que exista uma passagem para o gás oxigênio do eletrodo positivo onde é gerado, para o eletrodo negativo, onde reage com o chumbo para formar sulfato de chumbo, eliminando o efeito da eletrólise.

Em uma bateria de chumbo-ácido típica, a tensão nominal da célula é relativamente alta aproximadamente 2,05V. A união de 6 células em série forma as tradicionais baterias automotivas de 12V. A Figura 2 apresenta o modelo de placas convencional de uma célula de

chumbo-ácido.

Figura 2 - Modelo eletroquímico da bateria chumbo-ácido



Fonte: May; Davidson e Monahov (2018).

2.1.2 Princípio de funcionamento de baterias íon-lítio

O princípio de funcionamento das baterias de íon-lítio difere-se das demais pelo fato do lítio não passar por reações de oxirredução, mas sim pelos íons serem transferidos do eletrodo negativo para eletrodo positivo por meio do eletrólito.

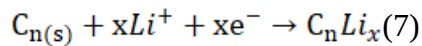
As baterias de íon lítio funcionam baseadas no fenômeno de intercalação iônica. É um fenômeno de difusão dos íons de lítio (Li^+) através da rede cristalina tanto do cátodo como do ânodo, com a diferença de que quando um íon intercala, outro se desliga da rede oposta, e vice-versa. A intercalação de um Li^+ num eletrodo requer, obrigatoriamente, que um elétron se intercale também, para que mantenha a neutralidade. O eletrodo recebe o íon intercalante e um elétron sendo assim reduzido, enquanto o outro eletrodo que cede o íon intercalante e perde um elétron, é oxidado. Por esse movimento iônico de ora intercalar, ora desintercalar, esta bateria recebeu originalmente o nome de *cadeira de balanço*.

Os principais tipos de eletrodos positivos (cátodos) empregados atualmente são compostos de óxidos de metais de transição litiados, como os à base de: manganês (LiMn_2O_4), cobalto (LiCoO_2), níquel (LiNiO_2) ou titânio (Li_2TiO_3), assim como os de

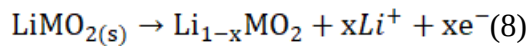
composições mistas como níquel-mangânês-cobalto ($LiNiMnCoO_2$), níquel-cobalto-alumínio ($LiNiCoAlO_2$) ou fosfato de ferro ($LiFePO_4$). O eletrodo negativo (ânodo) mais usado é um composto de carbono grafite (C) intermeado por lítio metálico. O eletrólito é uma mistura de solventes orgânicos apróticos (não possuem ligações entre hidrogênio e oxigênio) e sais de lítio ($LiClO_4$, $LiPF_6$, ...).

Reações do processo de carga de uma bateria com um composto de óxido metálico M genérico podem ser escritas da seguinte forma:

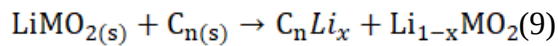
Reação na placa negativa



Reação na placa positiva

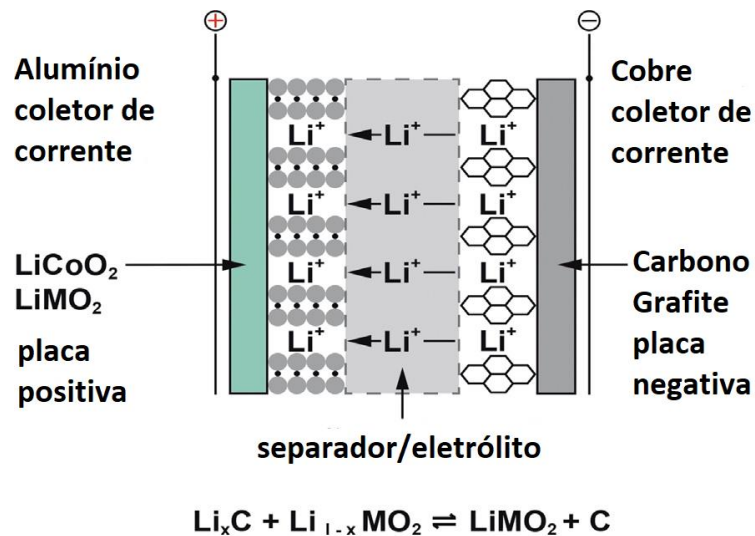


Reação total



A Figura 3 apresenta esquematicamente como funciona o fluxo de íons-lítio entre o cátodo e o ânodo de uma célula convencional.

Figura 3 - Modelo eletroquímico da bateria de íon-lítio



Fonte: May; Davidson; Monahov (2018).

O fato desse modelo funcionar pela difusão de íon de lítio e não por reações de oxirredução confere, além da capacidade de ser recarregável, baixa necessidade manutenção e menor taxa de auto descarga, vantagens as quais a maioria dos outros modelos não possuem. A bateria não tem memória e não precisa de descargas completas para mantê-la em bom estado de funcionamento.

Segundo Meng et al. (2019) a tensão nominal das células atualmente no mercado varia de 3,2 a 3,80V o que pode alimentar diretamente telefones celulares, *tablets* e câmeras digitais, oferecendo simplificações e reduções de custo em projetos com várias células. As desvantagens são a necessidade de circuitos de proteção para evitar sobrecarga e superaquecimento o que, aliado aos materiais dos eletrodos, aumentam o preço do dispositivo.

3 PANORAMA DA INDÚSTRIA ATUAL

3.1 PANORAMA ATUAL DA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

Com a abertura comercial da economia brasileira na metade da década de 1990, iniciou-se um período de expansão e investimento para as montadoras de automóveis e para o setor de autopeças que, até o momento, só produzia peças de reposição para veículos importados, antes de se iniciar a produção de automóveis no Brasil. Ambos os setores se fortaleceram com o estabelecimento de várias indústrias em lugares do Brasil onde não havia prática no setor automotivo.

A partir da década de 1990, essa indústria passou por transformações globais, como a intensificação da descentralização produtiva e modularização (*design* de sistemas capazes de satisfazer uma variedade de requisitos com várias combinações aplicáveis em diferentes modelos) as quais promoveram elevação dos investimentos fora dos países centrais. Esse período também foi importante no mercado interno, marcando reconfigurações produtivas domésticas. De um lado, o Brasil promoveu uma abertura unilateral da economia; de outro, não conseguiu escapar do baixo crescimento e também sofrer impacto de sucessivas crises externas (CASTRO; BARROS; VEIGA, 2013).

No período subsequente, de 2003 a 2012, o setor automotivo teve robusto crescimento, pontuado por breves retrações, o que se reflete no comportamento de investimento, produção, emprego, vendas no mercado nacional e exportações. Ao final do ano de 2008, a crise financeira no mundo prejudicou o setor em questão, sendo seu efeito no Brasil percebido no início de outubro com a queda nas vendas de 6,7% quando comparadas ao mesmo intervalo de tempo do ano de 2007. Segundo Da Costa (2016), mesmo com a crise permanecendo após 2008, o mercado automotivo alcançou números relevantes, passando de 3 milhões de automóveis produzidos. No que tange às exportações, estas apresentaram variação relativamente pequena, de 13% no mesmo período, de 393 mil para 444 mil unidades. Entretanto, desde setembro de 2013, a indústria automobilística vem passando por um período de quedas em suas variáveis de desempenho que, pela sua magnitude e persistência, pode ser qualificado como de crise.

O atual paradigma tecnológico nessa indústria é a fabricação enxuta, como resposta

encontrada pela indústria automobilística para a saturação dos mercados por produtos padronizados, fragmentando sua demanda, em especial nos países avançados, ao final dos anos 1960. Desenvolveram-se inovações de produto e de processo de fabricação a partir dos avanços na microeletrônica e em técnicas organizacionais, no âmbito do conceito de produção enxuta (sistema *just-in-time* vindo dos conceitos Lean Six Sigma da Toyota). Segundo Da Costa (2016), o acirramento da competição e a necessidade de produtos customizados exigiram maior diversidade na oferta de modelos, mas com menor volume por tipo de modelo, aceleração no ritmo de desenvolvimento de inovações tecnológicas, bem como maior flexibilidade e eficiência produtivas nessas condições.

Dessa forma manteve-se a mesma estratégia de busca por volume e diversidade, implantada ainda sob a produção em massa na década de 1960, mas agora passando a ser executada sob um novo modelo produtivo e organizacional. Especificamente, essa estratégia consiste na busca de economias de escala pela padronização de plataformas e de economias de escopo pela variedade de modelos de automóveis e suas configurações, bem como a montagem de marcas distintas em uma mesma plataforma.

Devido a sua importância, tal indústria vem ganhando destaque nos últimos anos na construção de políticas públicas, com estímulos para a desconcentração regional e redução de impostos. Segundo Veríssimo e Araújo (2015), as políticas públicas de desconcentração regional se iniciaram em 1996 com o estabelecimento do *Regime Automotivo Regional ou Especial* e seu objetivo foi incentivar a instalação de montadoras nas regiões menos desenvolvidas do país como Norte, Nordeste e Centro-Oeste, com redução de impostos de peças e componentes. A indústria automobilística é inegavelmente um setor-chave para as principais economias do mundo, inclusive a do Brasil, sendo responsável pela geração de milhões de empregos diretos. Além disso, para cada emprego direto gerado, estima-se que mais de cinco empregos indiretos sejam criados. Este setor é capaz de gerar uma receita bruta exorbitante e contribui aos cofres públicos com o pagamento de impostos. Segundo a ANFAVEA (2019), nos anos recentes o setor representou cerca de 5% do PIB brasileiro e respondeu por pouco mais de 20% do PIB da indústria de transformação.

Mundialmente a indústria automotiva vêm se transformando segundo a lógica da sustentabilidade, substituição das matrizes de combustíveis fósseis e melhoria de eficiência energética. A indústria brasileira possui uma estrutura de mercado concentrada em um pequeno número de grandes firmas multinacionais. A necessidade constante de diferenciar o

produto faz com que as firmas precisem acumular competências em *design* e engenharia, sendo também relevantes o reconhecimento da marca e os gastos em propaganda e *marketing*. Entretanto, as multinacionais presentes no Brasil normalmente realizam apenas adaptações de projetos sendo as fases de desenvolvimento e etapas mais nobres de concepção, projeto e desenho ficam por conta das matrizes. Segundo Lima (2015) essa configuração aliada ao distanciamento do Brasil das cadeias globais de valor da indústria automobilística mundial, fazem com que o Brasil fique alheio aos processos de inovação tecnológica. Ainda não há produção de veículos leves híbridos (com um motor elétrico e outro a combustão) e elétricos no país. Segundo Daudt (2018), os custos associados a importação desses modelos tornam os mesmos acessíveis apenas ao público de alta renda. A maioria esmagadora dos motoristas brasileiros ainda não vislumbra a possibilidade de adquirir seu primeiro modelo híbrido ou elétrico. Desde o altíssimo preço de compra até a falta de infraestrutura de abastecimento e pontos de assistência técnica com mão-de-obra especializada. Além disso, a expressiva produção de álcool e o desenvolvimento de biocombustíveis no Brasil se mostram como força de resistência a disseminação do processo de eletrificação na frota brasileira.

Com o novo regime automotivo aprovado pelo governo de Michel Temer em 2018, busca-se melhorar a atratividade de investimentos que deverão tornar a indústria brasileira mais competitiva e poderão, a longo prazo, baratear o custo dos carros híbridos e elétricos. Segundo a ANFAVEA (2019), foi proposto também reduzir a alíquota do Imposto sobre Produto Industrializado (IPI) dos carros elétricos e híbridos, saindo da faixa de 25% para uma faixa de 7% a 20% dependendo do peso do veículo e da sua eficiência energética (consumo mais baixo de combustível e menor emissão de poluentes). Modelos híbridos movidos a etanol (flex.) terão ainda um desconto *extra* de 2 % no IPI. Montadoras do Brasil se comprometeram a testar essa combinação justamente para ajudar a quebrar a barreira dos biocombustíveis.

As vendas de baterias estão diretamente correlacionadas com o tipo e o tamanho da frota circulante, como também com a produção de veículos. Desse modo é necessário considerar tanto o posicionamento atual da indústria quanto o futuro.

3.1.1 Panorama da Indústria de Baterias automotivas

Nos automóveis convencionais, a bateria é responsável por alimentar os sistemas elétricos e eletrônicos é recarregada por um gerador, sendo o próprio motor a combustão que move o veículo. O tipo mais frequente nos automóveis é a chamada bateria de chumbo-ácido (PbA), embora veículos elétricos e híbridos em comercialização, em geral, utilizem outras tecnologias como Níquel-hidreto metálico (NiMH) e, futuramente, baterias de íon-lítio. A indústria brasileira de baterias automotivas é totalmente concentrada na produção de baterias de chumbo-ácido, possuindo grande parque industrial concentrado nos estados de São Paulo e Paraná, apesar da maior fabricante, a Acumuladores Moura S.A, ser do estado do Pernambuco. Algumas empresas começaram a trabalhar com tecnologias mais modernas como EFB (*Enhanced Fluid Battery*) e AGM (*Absorbed Glass Material*) para atender a demanda dos veículos *start-stop* que começam a ser recorrentes no mercado.

A produção e venda do setor apresentou crescimento nos últimos 10 anos, como mostram os números baseados na Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE) 2722.2010: Baterias ou acumuladores elétricos produzidos para veículos. A Tabela 1 apresenta a Produção e vendas de baterias automotivas em milhões de unidades.

Tabela 1 - Produção e vendas de baterias automotivas em milhões de unidades

	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Produção	14,50	16,71	16,73	18,98	20,05	18,93	22,90	25,45	25,09	28,43	38,63
Vendas	13,79	16,09	16,19	18,63	18,56	18,74	24,30	23,53	25,83	21,96	31,86

Fonte: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2019).

A demanda de baterias deverá acompanhar o movimento ascendente do mercado de veículos que de acordo com o Sindicato Nacional da Indústria de Componentes para Veículos Automotores (Sindipeças, 2019) apresentará um crescimento de 2,3% em 2019 e de 2,6% em 2020. Se confirmadas, a frota brasileira alcançará, em termos absolutos, 45,8 milhões e 47,1 milhões de veículos, respectivamente.

A indústria de baterias automotivas tem uma estrutura bastante peculiar, pois existe

acentuada participação de empresas de capital nacional, que respondem a cerca de 75% do mercado. O mercado de baterias se divide em duas grandes frentes de atuação distintas: aquele associado a vendas para montadoras de veículos, chamado de OEM (do inglês *Original Equipment Manufacturer*) e o mercado de reposição interno denominado IAM (do inglês *Internal Aftermarket*) e externo (exportações). A tabela 2 apresenta um panorama dos principais fabricantes de baterias instalados no Brasil e seu mercado de atuação.

Tabela 2 - Principais fabricantes de baterias automotivas instalados no Brasil

(continua)

Empresa	Marca	Origem capital	Mercado de atuação
Moura	Moura, Zetta	Brasil	OEM, reposição e exportação
Johnson Controls	Heliar, Bosch, Optima, Varta, Freedom	EUA	OEM, reposição e exportação
Ajax	Ajax	Brasil	Reposição e exportação
Cral	Cral	Brasil	Reposição e exportação
Tudor	Tudor	Brasil	Reposição e exportação
Baterax	Baterax, Woltrax, Energex	Brasil	Reposição
Camarotto	Camarotto	Brasil	Reposição
Eletran	Eletran	Brasil	Reposição
Enerbrax	Route	Brasil	Reposição
GNB	Reifor, Herbo, Yokohama	Brasil	Reposição
Inbracell	Excell	Brasil	Reposição
Júpiter	Júpiter	Brasil	Reposição
Kania	Kondor, Fort Light, Dutra	Brasil	Reposição
Newpower	Fulguris	Brasil	Reposição
Pioneiro	Pioneiro, Piovox, Conectiva, Arazzo	Brasil	Reposição

Tabela 3 - Principais fabricantes de baterias automotivas instalados no Brasil

(conclusão)

Empresa	Marca	Origem capital	Mercado de atuação
Ranger	Extranger	Brasil	Reposição
Rondopar	Max, Fox, Impact, Prac	Brasil	Reposição
Baterlife	Maxion	Brasil	Reposição
Freelight	Freelig	Brasil	Reposição
Erbs	Erbs	Brasil	Reposição
HF	HF, Globo, Delta	Brasil	Reposição
Real	Real, Suprema, Forza, Discbal	Brasil	Reposição

Fonte: Castro, Barros e Veiga (2013).

Segundo Pereira e Bánkuti (2016) apesar do número de empresas atuantes nesse setor, algumas restrições de entrada e permanência no mercado formal são impactantes, como os requisitos de investimento para atuar nesse mercado, principalmente de máquinas e equipamentos. Os investimentos iniciais e os custos fixos influenciam a estrutura de custos dessas empresas, exigindo uma escala mínima para alcançar a eficiência e viabilidade econômica da operação. Além disso, existem sérias legislações ambientais que regulam a atividade já que principalmente o chumbo é muito prejudicial a saúde humana e ao meio ambiente. Segundo Mendes, Ruiz e de Faria (2016), os fabricantes de baterias são obrigados a seguir a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente nº401 a qual estabelece os limites de chumbo para as baterias comercializadas no Brasil e a Instrução Normativa do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) nº8 que institui os procedimentos de recebimento e destinação final das baterias.

A fabricação nacional é concentrada em baterias de chumbo-ácido. Embora haja tecnologias mais modernas e com desempenho superior, a maioria das empresas não trabalha com outros *designs* de baterias, pelo fato da frota brasileira ser majoritariamente ajustada a esse modelo. Apesar da complexidade existente na produção dessas baterias, o produto pode ser classificado como uma *commodity*, porque raramente o cliente se preocupa com o peso da qualidade e tende a se orientar pelo preço. Nesse panorama a indústria brasileira de baterias

automotivas se encontra numa posição delicada já que seu parque industrial não está bem posicionado frente as tendências mundiais. Em contrapartida, pela configuração do mercado automotivo brasileiro, a pressão pela mudança de tecnologia não será tão intensa quanto está sendo fora do Brasil.

4 ANÁLISE DAS TECNOLOGIAS DE BATERIAS

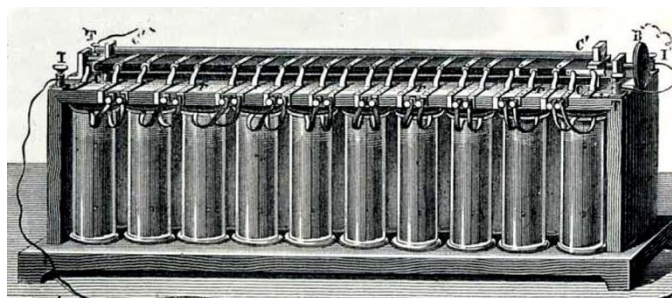
4.1 BATERIAS CHUMBO-ÁCIDO

4.1.1 Invenção do modelo de bateria chumbo-ácido

O primeiro protótipo da bateria de chumbo-ácido foi criado em 1859 pelo francês Gaston Planté, sendo também o primeiro modelo de bateria recarregável do mundo. Por apresentar boa densidade de energia para as necessidades da época, além de baixo custo de produção, a bateria de chumbo-ácido mostrou-se ideal para prover alta corrente de surto e propiciar a partida elétrica dos motores a combustão interna já que, até então, a partida era dada manualmente através de manivelas.

O primeiro modelo de Planté consistia em duas folhas de chumbo separadas por tiras de borracha enroladas em espiral e imersas em uma solução contendo aproximadamente 10% de ácido sulfúrico (Figura 4). Inicialmente as células tinham baixa capacidade, de modo que um processo lento de *formação* era necessário para corroer as folhas de chumbo, criando dióxido de chumbo nas placas e tornando-as ásperas para aumentar a área de superfície. A princípio, esse processo usava eletricidade de baterias primárias (pilhas); posteriormente quando os geradores se tornaram disponíveis após 1870, o custo de produção de baterias diminuiu muito. As placas de Planté ainda são usadas em algumas aplicações estacionárias, nas quais são produzidas ranhuras nas chapas para aumentar sua área de superfície.

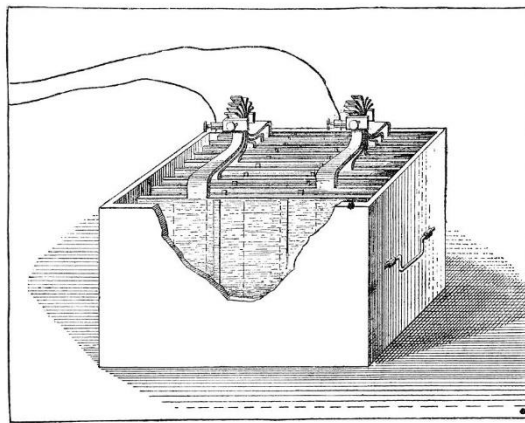
Figura 4 - Modelo de Planté



Fonte: Sciencephoto (2019).

Em 1881, Émile Alphonse Faure aprimorou essa construção com uma grade de chumbo (condutor de corrente), onde uma pasta de óxidos de chumbo, ácido sulfúrico e água era pressionada, formando uma placa retangular (Figura 5). As placas posteriormente eram expostas a uma fonte de calor suave em um ambiente de alta umidade para uma fase de cura, visando que a pasta mudasse para uma mistura de sulfatos que aderiram à placa de chumbo. Então, durante a carga inicial da bateria (chamada *formação*), a pasta curada nas placas era convertida em material eletroquimicamente ativo (*massa ativa*). O processo de Faure significativamente reduziu o tempo e o custo de fabricação de baterias de chumbo-ácido e proporcionou aumento de capacidade comparado com o modelo original de Planté.

Figura 5 - Modelo de Farue



Fonte: Fineartamerica (2019).

Esse processo ainda está em uso hoje, apenas com melhorias incrementais na composição da pasta, da cura (que ainda é realizada com vapor, mas com um processo rigidamente controlado), estrutura e composição da grade na qual a pasta é aplicada. O método de Faure, além de mais eficiente, facilitou a produção em massa possibilitando o surgimento de indústrias fabricantes. Em 1886, Henri Tudor começa a produzir baterias de chumbo-ácido, sendo sua companhia presente nesse mercado até os dias atuais.

As baterias de chumbo-ácido são o principal equipamento acumulador de energia nos veículos de combustão interna dos últimos 150 anos, sendo a tecnologia disponível para aplicações em veículos convencionais, incluindo aqueles com *start-stop* e o básico dos sistemas micro híbridos devido ao seu excelente desempenho de arranque a frio,

confiabilidade e baixo custo. Baterias de partida de 12V são padronizadas globalmente. O manuseio e comportamento dessas baterias são bem conhecidos em todos os países.

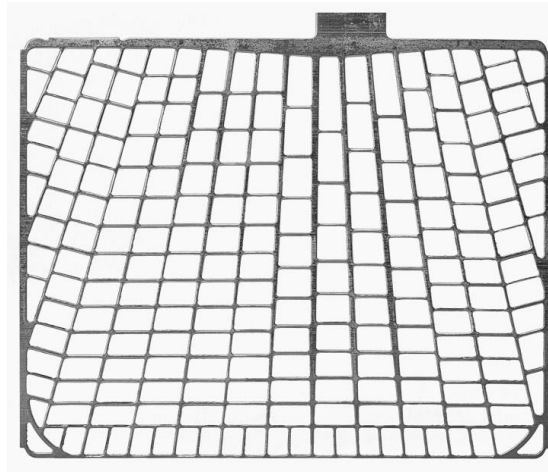
4.1.2 Inovações no modelo

4.1.2.1 Baterias EFB

A sigla EFB, do inglês *Enhanced Flooded Battery* (bateria inundada melhorada), é a primeira otimização do modelo de bateria chumbo-ácido para aplicações em veículos *start-stop*. Nessas aplicações a bateria passa a ser mais requisitada em descargas e cargas em intervalos de tempo curtos. A condição de taxa de descarga da bateria aumenta neste tipo de uso, e toda oportunidade de recarga é usada pelo sistema para alimentar a bateria com alta corrente. Durante o uso do veículo, as cargas e descargas sucessivas solicitam uma resposta mais rápida, configurando uma condição de aplicação chamada PSoC (*Partial State of Charge*), exigindo uma melhoria na tecnologia da bateria chumbo-ácido para atender a essas demandas. A produção de EFB é o resultado do processo de desenvolvimento e otimização de projeto de produto com base em um conhecimento mais sólido sobre a bateria inundada e seus parâmetros limitadores de desempenho.

Destacam-se avanços na composição das ligas de chumbo-antimônio, chumbo-cálcio-estanho, chumbo-estanho ou chumbo puro, formadoras das placas positivas. Novas seleções dos formatos das grades foram pesquisados para melhorar sua capacidade de resistência a corrosão. A empresa JCI desenvolveu a tecnologia de fabricação de grades por estampagem de folhas metálicas contínuas (Figura 6), o que contribui no aumento de condutividade.

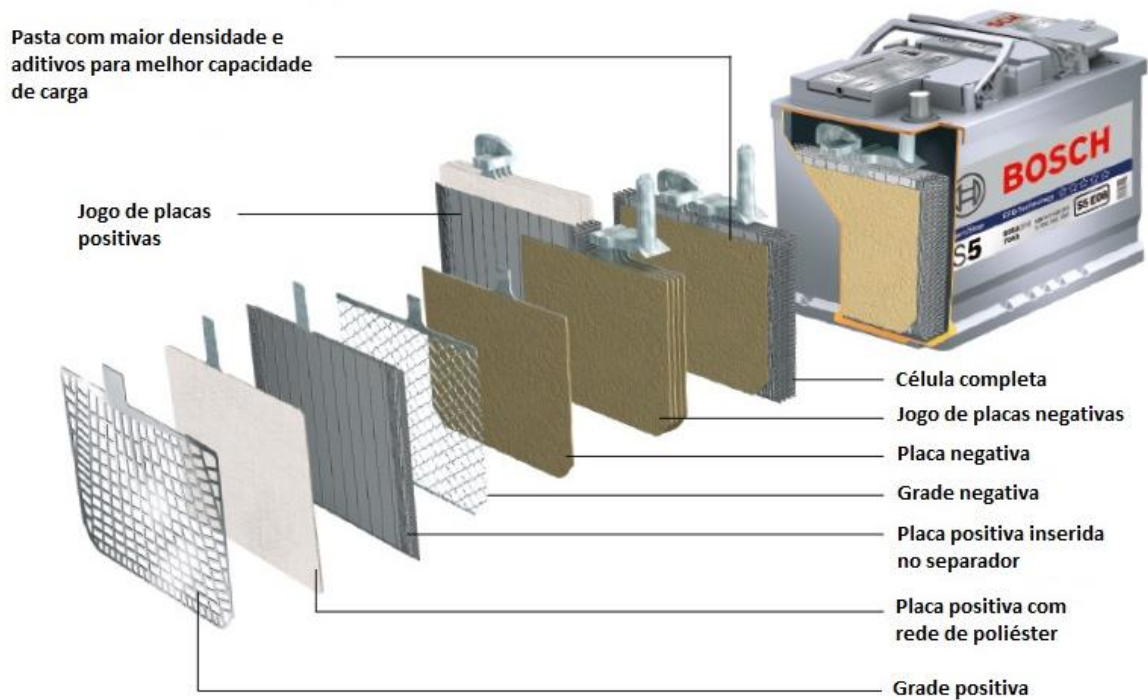
Figura 6 - Grade por estampagem (*Powergrid*)



Fonte: JCI (2019).

Desenvolvimentos na composição química da pasta de óxidos também melhora o comportamento durante cargas e descargas. Além disso, uma rede de poliéster adicional é usada para melhorar e aumentar a retenção de material ativo na placa positiva, o que proporciona maior resistência a ciclos longos de variação de SoC (Figura 7).

Figura 7 - Bateria EFB

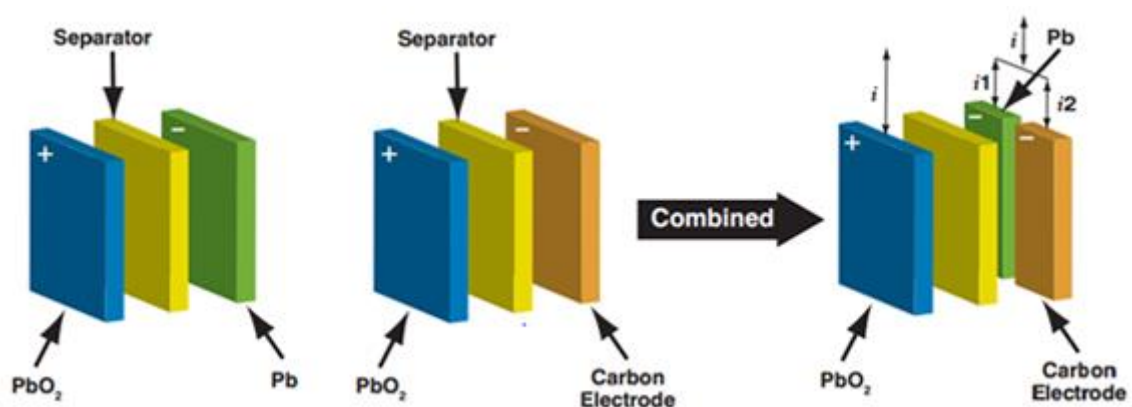


Fonte: BOSCH (2019).

Segundo May, Davidson e Monahov (2018), avanços operacionais também surgem da adição de carbono que pode modificar o desempenho da placa negativa de uma bateria de chumbo-ácido, evitando o acúmulo permanente de sulfato de chumbo na sua superfície. É sabido que o acúmulo de sulfato promove a falha da placa negativa em aceitar a carga porque a reação de carga e descarga da mesma não é totalmente reversível e o sulfato de chumbo se torna difícil de carregar completamente, acumulando no ciclo e inibindo a operação da placa.

É possível ter um eletrodo negativo composto por um supercapacitor baseado em carbono combinado com a placa negativa convencional e, quando isso é usado com um eletrodo positivo padrão, essa construção híbrida oferece comportamento substancialmente melhorado em ciclos rasos. Os dois componentes do eletrodo negativo são conectados juntos em paralelo e a parte do capacitor do eletrodo atua como um amortecedor para compartilhar a corrente com a placa negativa e reduzir a taxa de carga e descarga. Essa construção apresenta vantagens como evitar a sulfatação irreversível da placa negativa nos ciclos de PSoC e a necessidade de ciclos de condicionamento intermitentes onde a bateria é carregada por um período prolongado; melhorar aceitação de altas taxas de carga e melhorar o equilíbrio de células quando em associações em série. Na figura 8 é ilustrado um modelo de placa negativa híbrida.

Figura 8 - Modelo de placa negativa híbrida



Fonte: Battery University (2018).

Efeitos capacitivos são favorecidos pelo carbono que possui grandes áreas de superfície específicas fazendo bom contato com as grades coletoras de corrente e a matriz esponjosa de

chumbo formada na massa ativa. O carbono, no entanto, não precisa ser intimamente misturado com matriz. Segundo Salam (2017), baterias EFB híbridas estão em aplicação em sistemas fotovoltaicos residenciais na Austrália, apresentando-se como alternativa mais barata as baterias de íon-lítio a médio prazo.

4.1.2.2 Baterias AGM

A sigla AGM, do inglês *Absorbed Glass Material* (Fibra de vidro absorvente) é uma construção onde o eletrólito (ácido sulfúrico) fica embebido numa lã de microfibras de vidro (85% de vidro boro silicato e 15% de fibras formadas por polímeros) a qual preenche completamente o espaço entre as células. Dessa forma a própria lã de microfibras de vidro encharcada de ácido torna-se o separador entre as células o que confere maior solidez mecânica ao conjunto, permitindo que as placas tenham maior compressão dentro da caixa da bateria. Devido a esse maior empacotamento a densidade de carga é aumentada se comparada aos modelos com líquido ou gel intracelular.

Como o eletrólito fica absorvido na lã, diminui-se o risco de vazamento caso a bateria sofra danos de perfuração. Da mesma forma a lã retém a evaporação e propicia alta eficiência no ciclo de recombinação do oxigênio e do hidrogênio, a qual é limitada apenas pela própria capacidade da reação química. Essas características fazem com que as baterias AGM não necessitem de refil de água.

As baterias AGM também se classificam como baterias VRLA por possuírem válvula reguladora de saída única para o escape de gases e manutenção de uma pressão interna constante. Quando essas baterias chegam a um baixo nível de SoC ou são rapidamente descarregadas, há formação de hidrogênio gasoso que pode escapar pela válvula. Em situações de descargas lentas, cálcio pode ser adicionado a placas para conter e absorver o hidrogênio.

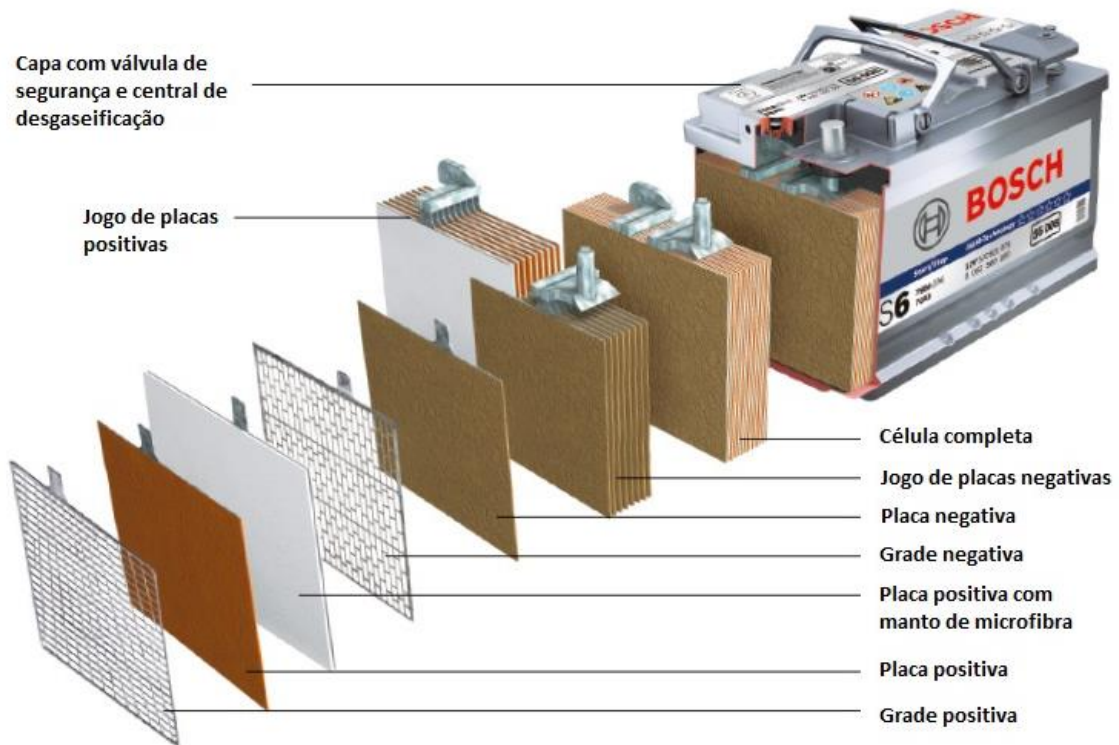
A rede de microfibras também evita o movimento vertical do eletrólito dentro da bateria. Quando uma célula úmida normal é armazenada em estado de descarga, as moléculas de ácido mais pesadas tendem a assentar no fundo da bateria, fazendo com que o eletrólito estratifique. Quando a bateria é usada, a maioria da corrente flui somente nessa área e a parte inferior das placas tende a se desgastar rapidamente. Esta é uma das razões pelas quais uma

bateria de carro convencional pode ser danificada quando armazenada por um longo período de tempo e posteriormente usada e carregada. Segundo Yazd, Molazemi e Moayed (2006), a lã de microfibras impede significativamente essa estratificação, eliminando a necessidade de agitação periódico das baterias ou a de indução de uma *carga de equalização* para misturar o eletrólito. Como a estratificação também faz com que as camadas superiores da bateria se transformem quase completamente em água, que pode congelar no tempo frio, as AGMs são significativamente menos suscetíveis a danos devido ao uso em baixa temperatura.

Enquanto as células AGM não necessitam de reposição de água, o seu processo de recombinação é fundamentalmente limitado pelos processos de oxiredução. Alguns descobriram que é lucrativo adicionar água a uma bateria AGM, mas deve-se fazê-lo lentamente para permitir que a água se misture através da difusão em toda a bateria. Esse procedimento não é ideal, porém geralmente caminhoneiros brasileiros o praticam para aumentar a vida útil já que, em muitos pontos do país, não há assistência técnica eletromecânica especializada.

A vantagem dessas baterias são que elas não vazam por existir apenas quantidade de ácido suficiente para manter a lã de vidro molhada. Assim, se a bateria for perfurada, o risco de vazamento é mínimo. A Figura 9 mostra as partes em detalhes da bateria AGM.

Figura 9 - Bateria AGM expandida



Fonte: BOSCH (2019).

A Tabela 3 apresenta um quadro comparativo dos parâmetros técnicos e do custo médio do kW dos diferentes modelos de baterias chumbo ácidos abordados.

Tabela 4 - Comparativo técnico de diferentes *designs* de baterias PbA

(continua)

Parâmetro	Baterias inundadas SLI padrão	Baterias inundadas EFB	Baterias de placas planas VRLA AGM	Baterias de célula espiral VRLA AGM	Baterias de placas planas VRLA GEL
Peso (kg)	17 – 19,5	20 – 21,5	20,5 – 21,5	21	21
Dimensão de caixa (mm)	278x175x190	278x175x190	278x175x190	254x173x200	278x175x190
Densidade de potência (W/kg)	220 - 290	270 - 310	300 - 310	350 - 400	170 - 190
Potência específica (W/L)	400 – 600	600 – 680	600 – 680	900	400

Tabela 5 - Comparativo técnico de diferentes *designs* de baterias PbA

(conclusão)

Parâmetro	Baterias inundadas SLI padrão	Baterias inundadas EFB	Baterias de placas planas VRLA AGM	Baterias de célula espiral VRLA AGM	Baterias de placas planas VRLA GEL
Densidade de energia (Wh/kg)	~ 44 – 46	~ 40 – 42	~ 40 – 41	~31	~31
Energia específica (Wh/L), 25°C	~86 – 95	~90	~90	~75	~78
Resistência interna 25°C; 100% SOC.	3,8 – 4,7 mΩ	3,0 – 3,4 mΩ	3,2 – 3,5 mΩ	2,8 mΩ	5,0 mΩ
Taxa de auto descarga/mês	Baixa (~3 - 6%)	Baixa (~3,3%)	Baixa (~3%)	Muito baixa (~2,3%)	Muito baixa (~2%)
Intervalo de Temperatura	~30 – 75°C	~30 – 75°C	~30 – 60°C	~30 – 60°C (+75°C)	~30 – 75°C
Carregamento a frio a -18°C	Bom	Muito bom	Muito bom	Excelente	Fraco (~20%)
Vida operacional	2 – 3 Anos	5 – 7 Anos	5 – 7 Anos	5 – 7 Anos	5 – 7 Anos

Fonte: Gelbke e Mondoloni (2017).

A Tabela 4 apresenta um comparativo entre os diferentes modelos abordados, sua aplicação e custo médio por kW fornecido em reais.

Tabela 6 - Comparativo de custo e aplicação de diferentes configurações de baterias PbA

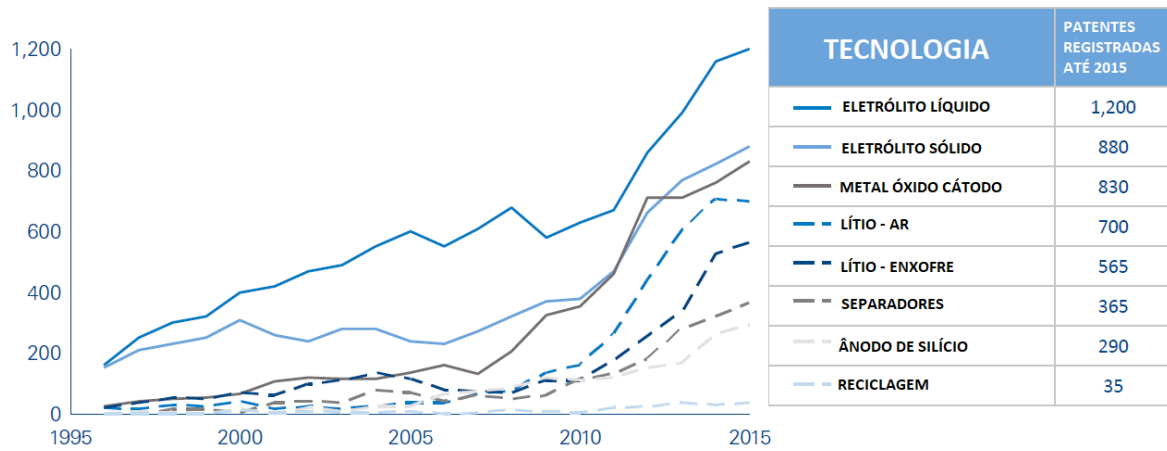
Parâmetro	Baterias inundadas SLI padrão	Baterias inundadas EFB	Baterias de placas planas VRLA AGM	Baterias de célula espiral VRLA AGM	Baterias de placas planas GEL
Custo	R\$33/kW a R\$42/kW	R\$43/kW a R\$56/kW	R\$55/kW a R\$67/kW	R\$84/kW a R\$105/kW	R\$94/kW a R\$118/kW
Aplicação	SLI para automóveis de motor de combustão interna (MCI) e para micro-híbridos com frenagem regenerativa.	Para veículos MCI e micro híbridos com start-stop	Para veículos MCI e micro híbridos com start-stop ou veículos com muitos consumidores	Alta potência ciclo longos para veículos especiais e máquinas de construção	Vans de entregas, mobilidade motorizada, ônibus, caminhões, veículos industriais

Fonte: Gelbke e Mondoloni (2017).

4.2 BATERIAS DE ÍON-LÍTIO

Baterias de íons de lítio é um termo abrangente para uma variedade de combinações de materiais usadas para formar baterias, as quais contêm lítio como elemento do cátodo. Suas características em relação à potência, vida útil, *performances* em baixa e alta temperatura e segurança são muito dependentes da combinação de materiais. O desenho do eletrodo permite a otimização para células de alta potência ou alta energia. Devido às altas demandas por energia e potência dos carros elétricos, essa tecnologia apresenta-se, a curto e médio prazo, como a melhor opção comercialmente viável. Mesmo assim, melhorias no modelo estão sendo pesquisadas em diversos centros de pesquisas ao redor mundo. A Figura 10 mostra o crescente número de patentes registradas relacionadas aos diferentes componentes de uma bateria de lítio.

Figura 10 - Patentes relacionadas a bateria de lítio registradas até 2015

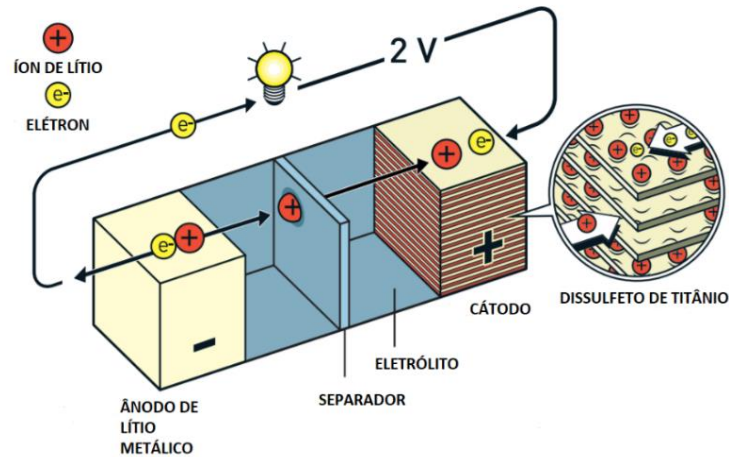


Fonte: Baes et al. (2018).

4.2.1 Invenção e desenvolvimento do modelo de bateria íon-lítio

Em 1912 o químico americano Gilbert Newton Lewis propôs e estudou o primeiro modelo de bateria baseado no fato do lítio ser o mais leve de todos os metais, possuir o maior potencial eletroquímico e fornecer a maior energia específica por peso. Porém, apenas na década 1970, motivado pela crise do petróleo, o químico britânico Stanley Whittingham criou um modelo comercialmente possível usando dissulfeto de titânio e metal de lítio como eletrodos (Figura 11). O ânodo da bateria era parcialmente fabricado com lítio metálico, que possui um forte impulso para liberar elétrons. Isso resultou em uma célula com potencial de 2 V., no entanto, como o lítio metálico é altamente reativo, a bateria não era comercialmente viável por explodir facilmente.

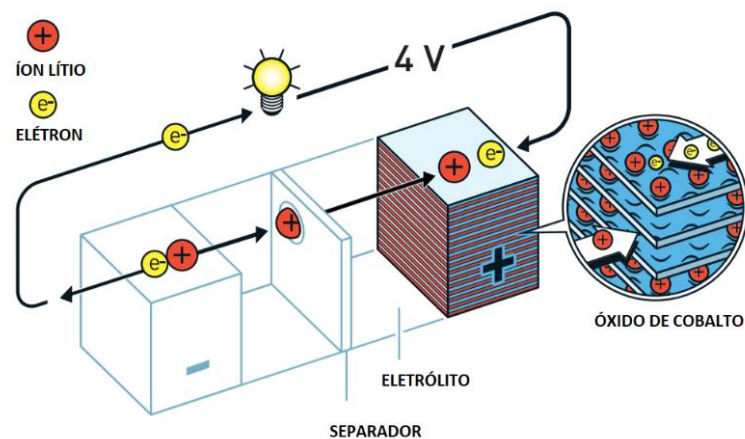
Figura 11 - Modelo de Whittingham



Fonte: Real Academia de Ciências Sueca (2019).

Na década de 1980, o professor americano John B. Goodenough liderou uma equipe de pesquisa da Sony para produzir uma versão mais estável da bateria de lítio recarregável (Figura 12). O modelo proposto substituiu o dissulfeto de titânio por óxido de cobalto e lítio como cátodo o que resultou em uma bateria com o dobro de potencial energético.

Figura 12 - Modelo de Goodenough

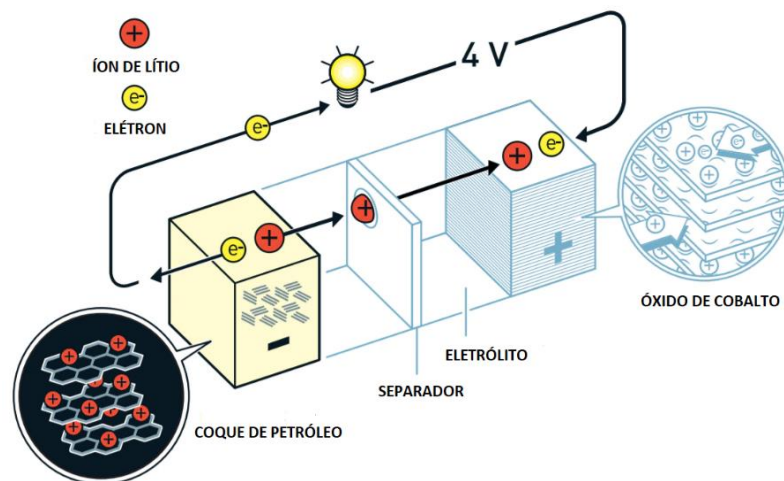


Fonte: Real Academia de Ciências Sueca (2019).

Usando esse modelo como ponto de partida, em 1985, o professor Akira Yoshino da Universidade de Nagoya, substituiu o ânodo de lítio metálico por um composto de coque de

petróleo capaz de ser intercalado com íons de lítio. O resultado foi uma bateria mais leve e segura que poderia suportar diversos ciclos de carregamento, viabilizando assim seu uso comercial em larga escala (Figura 13). Esse modelo tornou-se a base das atuais baterias de íon-lítio tornando-se, em 1991, o primeiro modelo a ser lançado no mercado de eletrônicos.

Figura 13 - Modelo de Yoshino



Fonte: Real Academia de Ciências Sueca (2019).

O invento da bateria de íon-lítio propiciou o desenvolvimento outras diversas tecnologias da eletrônica como celulares e *laptops*, possibilitando o funcionamento de equipamentos mais potentes e sem fio. Pela contribuição no desenvolvimento desse dispositivo, os 3 cientistas, Stanley Whittingham, John B. Goodenough e Akira Yoshino, receberam o Prêmio Nobel de Química de 2019 pela Real Academia de Ciências Sueca(2019).

4.2.2 Baterias de íon-lítio atuais

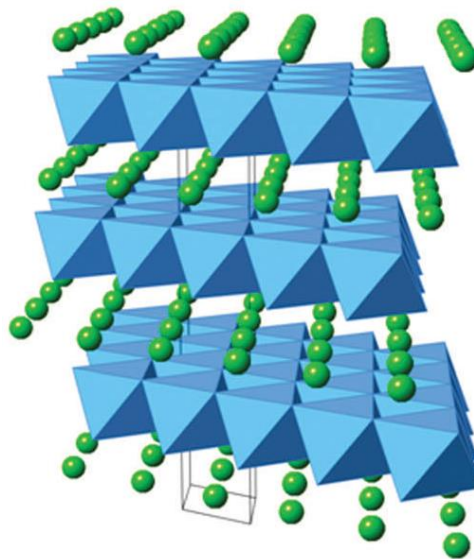
Atualmente existem 5 principais modelos de baterias de íon-lítio no mercado, cada uma denominada por uma sigla de referência à composição química de seu cátodo. Segundo Dinger et al. (2010) cada combinação possui diferentes características de energia específica, potência específica, custos e vida útil o que justifica sua aplicação em determinados

dispositivos.

4.2.2.1 Lítio Óxido de Cobalto (LCO)

A bateria consiste em um cátodo de óxido de cobalto e um ânodo de grafita entremeada de íons de lítio. O cátodo possui uma estrutura em camadas e, durante a descarga, os íons de lítio se movem do ânodo para o cátodo. O fluxo se reverte com a carga. É o modelo que prevalece em número de aplicações de consumo. Sua principal vantagem é a alta energia específica que faz do LCO a escolha convencional para telefones celulares, *laptops* e câmeras digitais, aplicações de baixa potência e longo período de uso. A Figura 14 apresenta a nanoestrutura do óxido de cobalto em azul juntamente com os íons de lítio em verde.

Figura 14 - Nanoestrutura do cátodo de LCO



Fonte: Islam e Fisher (2014).

A principal desvantagem do LCO é a vida útil relativamente curta, baixa estabilidade térmica e potências de carga e descarga limitadas. Segundo Nitta et al. (2015) pelo fato dos íons de lítio estarem misturados com cobalto numa estrutura lamelar, a qual não favorece uma difusão eficiente, a velocidade de transferência dos íons é prejudicada e consequentemente as propriedades de potência. Do mesmo modo, recargas com altas correntes causam

superaquecimento da bateria.

Os sistemas mais recentes incluem níquel, manganês ou alumínio para melhorar a longevidade, capacidade de carga e custo, devido ao alto preço do cobalto e ao desempenho aprimorado ao se misturar outros materiais ativos no cátodo. Segundo Bae et al. (2019), a substituição LCO pelos modelos níquel cobalto alumínio (NCA) e níquel cobalto manganês(NMC) ou de cátodos híbridos aumenta gradativamente já que tanto alta energia quanto alta potência são necessárias para aplicações automotivas.

4.2.2.2 Níquel Cobalto Alumínio (NCA)

Segundo Nitta et al. (2015) a adição de Níquel e Alumínio no cátodo resultou em melhores propriedades de energia e principalmente de potência específica se comparado ao cátodo puro de óxido de cobalto, além de maior vida útil de armazenamento. Como resultado, o modelo NCA encontrou amplo uso comercial, sendo o primeiro a ser aplicado em um carro elétrico, pela Panasonic, no veículo Roadster da Tesla (2005).

O foco atual é aumentar ainda mais o teor de níquel, resultando em maior densidade de energia e reduzindo, simultaneamente, o uso de cobalto, reduzindo-se o custo por kWh de duas maneiras. Entretanto, como o modelo NMC apresenta características mais adequadas aos requisitos automotivos, ele ainda premonina em aplicações automotivas.

4.2.2.3 Níquel Cobalto Manganês (NMC)

A combinação de Níquel e Manganês resultou numa bateria com melhor balanço entre energia e potência específicas aliadas ao custo. O níquel é conhecido por sua alta energia específica, mas baixa estabilidade; o manganês tem o benefício de formar uma estrutura de espinélio¹ para obter baixa resistência interna, mas oferece energia específica baixa.

Segundo Islam e Fischer(2014) tais características complementares entre os metais

¹ Espinélio

geram uma microestrutura mista no cátodo, conferindo ênfase em uma propriedade ou outra dependendo da proporção da mistura entre os mesmos. A combinação mais comum é um terço de níquel, um terço de manganês e um terço de cobalto, proporção chamada 1-1-1, a qual oferece uma mistura única que também reduz o custo da matéria-prima devido a quantidade reduzida de cobalto. Outra combinação bem-sucedida é a NMC com 5 partes de níquel, 3 partes de cobalto e 2 partes de manganês, proporção 5-3-2.

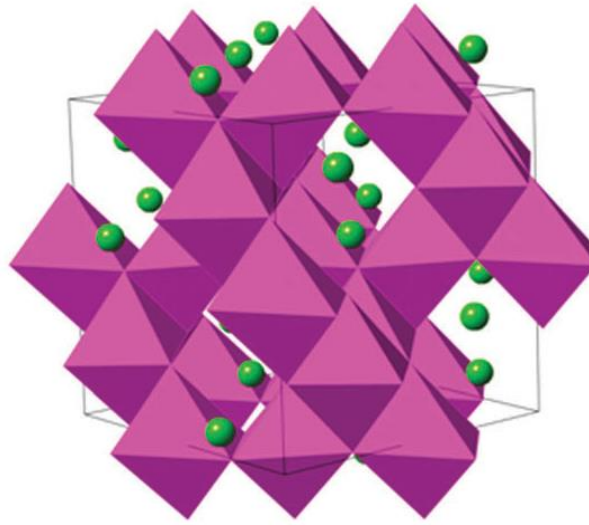
Apesar de apresentarem uma tensão por célula levemente inferior que a LCO, a NMC ainda é a melhor opção para ferramentas elétricas, bicicletas elétricas e propulsores elétricos, por suas propriedades de potência específica. Novos eletrólitos e aditivos permitem o carregamento de 4,4V por célula, aumentando sua energia específica.

4.2.2.4 Lítio Óxido de Manganês (LMO)

O modelo LMO é a alternativa para aplicações de baixo custo, pelo fato do manganês ser muito mais barato e menos tóxico que o níquel e o cobalto. Segundo Islam e Fischer (2014), o cátodo apresenta uma microestrutura em forma de espinélio tridimensional que melhora o fluxo de íons no eletrodo, resultando em menor resistência interna e melhor fluxo de corrente (Figura 15). Outra vantagem do espinélio é a alta estabilidade térmica e a segurança aprimorada. Apesar disso, tais características diminuem os ciclos e conferem menor vida útil. Segundo Nitta et al. (2015), foi observado para todos os cátodos de manganês tendência de se dissociar espontaneamente em Mn^{2+} e Mn^{4+} , depositando-se no ânodo e aumentando a impedância do mesmo. Devido a essa instabilidade, o modelo LMO é usado apenas em aplicações especiais.

A Figura 15 apresenta a nanoestrutura do LMO onde os tetraedros representam os íons compostos de óxido de manganês e as esferas verdes, os íons de lítio.

Figura 15 - Nanoestrutura do cátodo de LMO

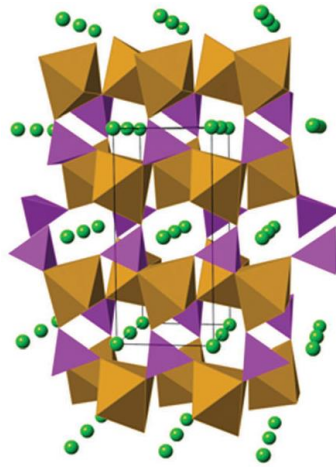


Fonte: Islam e Fisher (2014).

4.2.2.5 Lítio Íon Fosfato (LFP)

O modelo LFP difere dos demais por apresentar maior balanço entre lítio e óxido catódico. Segundo Nitta et al. (2015), o fosfato de lítio oferece bom desempenho eletroquímico com baixa resistência por ter uma estrutura de olivina, a qual possui grande estabilidade térmica e capacidade de potência. Os principais benefícios são aceitação de maiores níveis de corrente e maior tempo de vida útil, além de boa estabilidade térmica, segurança e tolerância aprimoradas em caso de sobrecarga ou superaquecimento. A Figura 16 apresenta a nanoestrutura do cátodo de LFP, na qual os triângulos amarelos representam o óxido de fosfato, os triângulos em roxo representam os íons de ferro e as esferas verdes representam os íons de lítio.

Figura 16 - Nanoestrutura do cátodo de LFP



Fonte: Islam e Fisher (2014).

Como compensação, sua tensão nominal é 3,4V por célula o que representa menor energia específica se comparado aos cátodos com cobalto. Como na maioria das baterias, baixas temperaturas reduzem o desempenho e altas temperaturas de operação reduzem a vida útil. O fosfato de lítio possui autodescarga maior do que outras baterias de íon-lítio, o que pode causar problemas de equilíbrio com o envelhecimento. Esse efeito pode ser atenuado com construções de melhor qualidade ou usando sistemas eletrônicos de controle, os quais aumentam o custo da aplicação. A Tabela 5 mostra um comparativo técnico médio dos 5 principais tipos de cátodo de baterias de íon-lítio comercializados atualmente.

Tabela 7 – Comparativo técnico dos cátodos

Tecnologia	Nanoestrutura	Capacidade específica (mAh/kg)	Tensão média fornecida (V)
LCO	Lamelar	0,145	3,8 V
NCA	Lamelar híbrida	0,2	3,7 V
NMC	Lamelar híbrida	0,170	3,7 V
LMO	Espinélio	0,120	4,1 V
LFP	Olivina	0,165	3,4 V

Fonte: Nitta et al. (2015).

A Tabela 6 mostra as vantagens e desvantagens dos atuais eletrodos no mercado.

Tabela 8 - Comparação de tecnologias íon lítio

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens
Lítio óxido de Cobalto ($LiCoO_2$) (LCO)	Alta densidade de energia Boa densidade de potência	Segurança e custo do cobalto
Níquel Cobalto Alumínio (NCA)	Altas densidade de potência e energia, alto ciclo de vida	Segurança
Níquel Cobalto Manganês (NMC)	Boas densidade de potência e energia, alto ciclo de vida	Segurança
Lítio Óxido de Manganês ($LiMn_2O_4$) (LMO)	Densidade de potência alta	Tempo de vida
Lítio íon fosfato ($LiFePO_4$) (LFP)	Segurança	Densidade de energia e tempo de vida

Fonte: Andwari et al. (2017).

4.2.3 Formatos de células de íon-lítio

Existem três formatos principais de células de íon-lítio: cilíndricas, prismáticas e de bolsa (também chamada de sachê de café). O formato cilindro é o mais desenvolvido e utilizado atualmente por ser um recipiente denso e poder suportar melhor as pressões internas (que surgem ocasionalmente das reações colaterais) sem deformação. A desvantagem é a baixa densidade de empacotamento e a maior resistência a transferência de calor do interior da célula para o lado exterior. Em particular, para células com maior capacidade, isso pode levar a temperaturas mais altas no meio das células. No entanto, a relação entre a superfície e o volume é mais eficiente, tornando mais fácil o resfriamento.

As células prismáticas são, do ponto de vista de construção, semelhantes às células cilíndricas. As células prismáticas são envoltas em alumínio ou aço para maior estabilidade. Devido à resistência do *container* externo, esse formato é atualmente preferido para

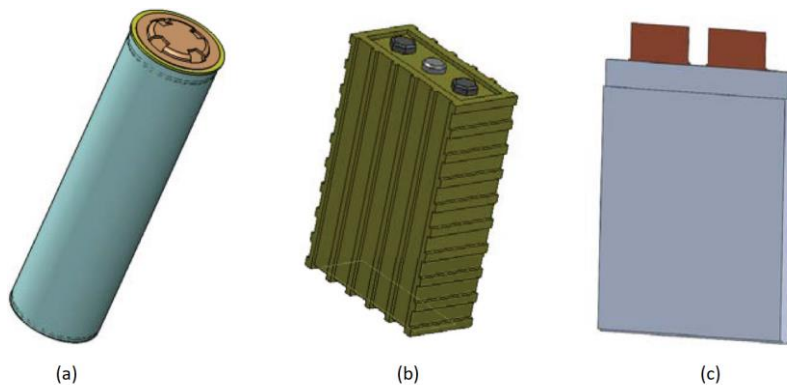
aplicações automotivas pela maioria dos fabricantes. Imersa em gel ou empilhada, a célula economiza espaço, mas pode ser mais cara de fabricar do que a célula cilíndrica. Células prismáticas modernas são usadas no trem de força elétrico e nos sistemas de armazenamento de energia.

Prevê-se que, no futuro, as células de bolsa possam alcançar custos mais baixos de produção e densidade de energia um pouco maior, pois as folhas da caixa são mais leves que os recipientes de células cilíndricas. Em células de bolsa, a qualidade da soldagem é um problema, mesmo após vários anos de desenvolvimento contínuo.

A Figura 17 apresenta os atuais formatos de aplicação das baterias de íon lítio no mercado. Respectivamente os formatos cilíndrico, prismático e sachê de café.

Figura 17 - Design de células de baterias íon-lítio

(a) cilíndrico; (b) prismático; (c) sachê de café



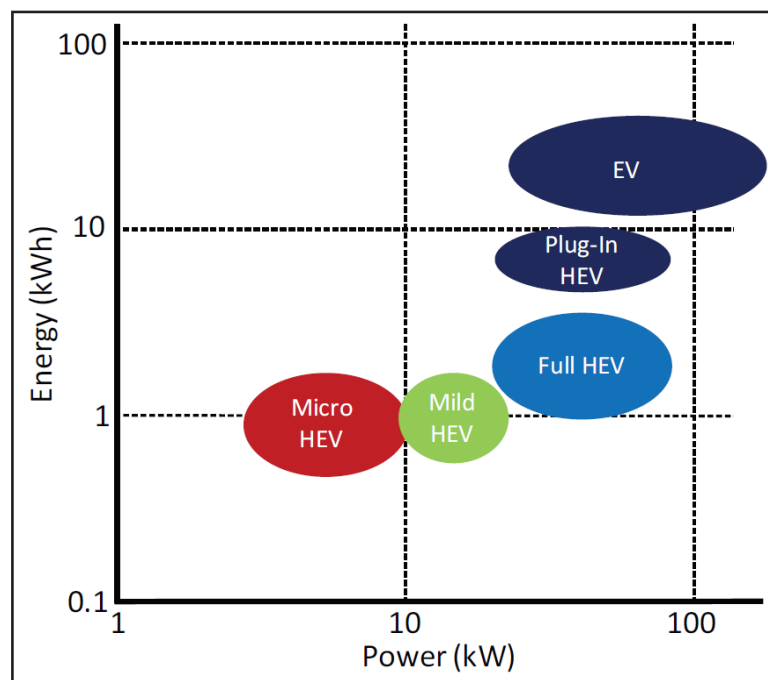
Fonte: Budde-Meiwes et al. (2013).

5 APLICAÇÃO NOS VEÍCULOS ELÉTRICOS

As baterias passam a ter papel importante com a introdução no mercado dos modelos de automóveis híbridos e elétricos, já que nesses veículos elas se tornaram a fonte de energia motriz do veículo. A necessidade de energia nesses veículos é cada vez maior, criando uma barreira para a tecnologia tradicional (bateria de chumbo-ácido), na qual o Brasil dispõe de grande parque industrial. Esta dificuldade decorre do volume e, sobretudo, do peso dessas baterias, que não seriam aplicáveis aos veículos elétricos, embora haja espaço para aplicações em alguns tipos de híbridos. Surgem, então, como provável tecnologia dominante, as baterias de íon-lítio, mais leves e com maior densidade energética.

Os veículos elétricos e híbridos são, em geral, classificados conforme seu grau de hibridização. À medida que esse grau aumenta, maior é a potência requerida pelo sistema, o que provoca o descarte de determinadas tecnologias para algumas aplicações. A figura 18, mostra a necessidade de cada modelo de veículo híbrido em relação a demanda de energia e potência requerida.

Figura 18 - Demanda de energia e potência das classes de híbridos



Fonte: Budde-Meiwes et al. (2013).

5.1 CLASSIFICAÇÃO DOS HEV E TECNOLOGIA DE BATERIAS

5.1.1 Veículos Micro Híbridos (*Micro-Hybrid*)

O primeiro modelo de hibridização são os veículos micro híbridos, veículos com motor de combustão convencional equipados com opções para reduzir as emissões de CO_2 . A função *stop-start*, que está disponível no mercado há vários anos, é amplamente conhecida. O motor de combustão é desligado quando o motor está em estado inativo e nos semáforos. Durante o desligamento do motor, a bateria assume todos os requisitos elétricos. Na maioria dos carros, o motor volta a funcionar quando o motorista pressiona a embreagem. O sistema funciona no formato do híbrido-paralelo, mas não há tração elétrica, apenas um auxílio ao motor a combustão (BUDDE-MEIWES et al., 2013).

Devido à presença do sistema *start-stop*, são necessárias no mínimo baterias EFB de 12V ou superiores. Os arranques e demanda de energia nos sistemas eletrônicos no período em que o motor fica desligado exigem baterias capazes de suportar maior número de descargas intermitentes, trabalhando em um nível mínimo de SoC entre 80% a 90%. Segundo a Associação Alemã de Fabricantes Eletroeletrônicos (em alemão, *Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie, ZVEI*, 2013), esse alto nível é justificado pelo fato de o MCI carregar a bateria no período de trânsito constante, através do alternador.

5.1.2 Veículos Meio Híbridos (*Mild-Hybrid*)

O veículo meio híbrido oferece as mesmas funções que o veículo micro híbrido, a diferença é que já possui um pequeno motor elétrico auxiliar, o qual desempenha uma função extra de impulsionar o sistema de transmissão durante o período transiente entre mudanças de marchas, fornecendo torque adicional e compensando o atraso na resposta do torque do MCI, causada pela inércia mecânica. Assim como nos veículos micro híbridos, a bateria é carregada apenas durante a condução. Isso ocorre quando a velocidade é reduzida (frenagem regenerativa) pelo gerador ou quando a energia de recarga é fornecida ativamente pelo MCI através do alternador.

Segundo a ZVEI (2013), essa aplicação se caracteriza como de alta potência já que a bateria deve ser dimensionada de forma a atender adequadamente aos requisitos de energia tanto do motor elétrico quanto de diversos sistemas eletrônicos, exigindo-se pelo menos baterias de 48V capazes de trabalharem com nível mínimo de SoC entre 40% a 60% (mais baixo se comparado ao modelo micro híbrido, já que a exigência de potência e energia é maior). Modelos superiores AGM são aplicáveis assim como baterias de íon-lítio.

5.1.3 Veículos Híbridos Completos (*Full-Hybrid*)

Os veículos híbridos completos combinam as características de um veículo totalmente elétrico e um veículo convencional com um MCI, já que apresentam ambos os motores elétrico e mecânico capazes de moverem o eixo do veículo.

Geralmente, dois conceitos básicos diferentes podem ser realizados para integrar o MCI e motor elétrico ao trem de força: o modelo em série e o paralelo. Nos projetos de trem de força em série, o MCI é usado para alimentar mecanicamente um gerador, o qual fornecerá potência elétrica para motor que através de um conversor (Figura 19a). Essa configuração é vantajosa pelo fato de possibilitar o MCI a trabalhar em estados bem definidos: ligado em alta ou em baixa potência e desligado, melhorando a eficiência isolada do MCI (trabalho próximo a região ótima do motor) e diminuindo as emissões de combustão incompleta. A bateria fica responsável pela tração no meio urbano com paradas e retomadas sucessivas, as quais podem ser usadas para recarga por frenagem regenerativa. O MCI traciona o veículo nas navegações contínuas em estradas, onde o fluxo constante do motor produz tração mais eficiente, recarregando também a bateria através do gerador e do conversor de potência. Devido aos componentes de conversão eletromecânicos, a eficiência global do sistema em série é menor do que a do sistema em paralelo.

Já o projeto do trem de força paralelo permite que o MCI transfira a energia mecânica através da caixa de engrenagens diretamente para as rodas (acoplamento mecânico) e, além disso, pode recarregar a bateria (através da frenagem regenerativa para manter o baixo nível SoC). A ineficiência de converter energia mecânica em eletricidade é eliminada, aumentando a eficiência desses híbridos nas rodovias (funcionamento puramente mecânico). Em contrapartida, há piora no desempenho urbano e maior emissão de CO_2 . Este é o conceito

usado por veículos híbridos completos, mas também nos veículos híbridos *plug-in*.

Os veículos híbridos completos contam com maior assistência de potência durante a aceleração, por possuírem motores elétricos mais robustos capazes de fornecer torque adicional. Pelo fato da bateria ser recarregada apenas durante a condução pelo MCI ou durante a frenagem regenerativa, a conversão de energia cinética também é mais eficiente para garantir o máximo de autonomia puramente elétrica. Porém, devido a limitações tecnológicas ainda é muito limitada (geralmente abaixo de 10km) sendo uma opção interessante unicamente para tráfegos silenciosos em áreas residenciais.

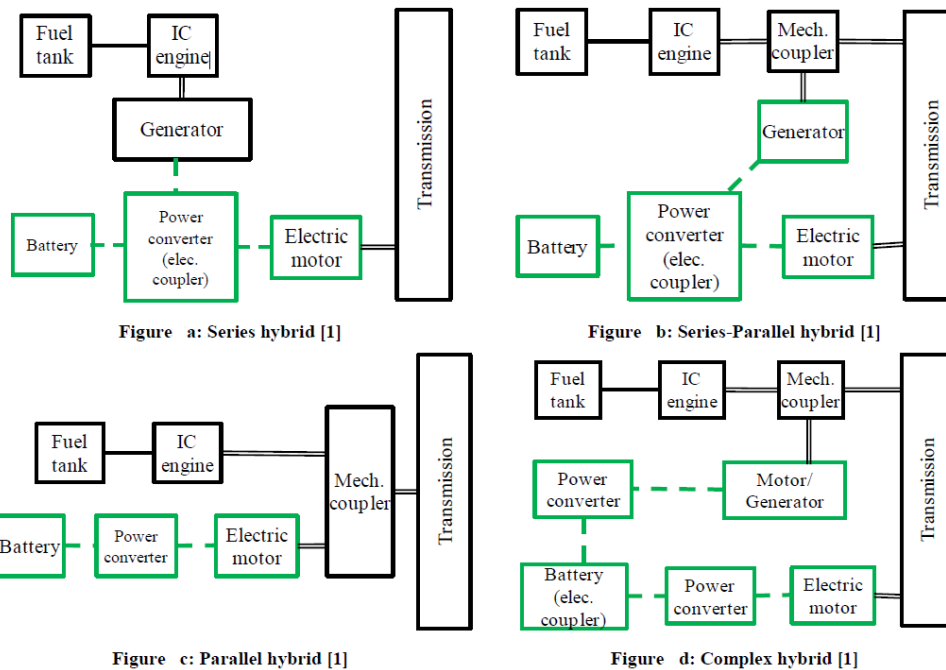
O sistema de bateria é usado quando a alta potência é necessária ou a eficiência do motor de combustão é baixa. Devido a essa característica, apenas baterias de íon-lítio de 300 V a 400V de tensão são adequadas para esse *design*.

5.1.4 Veículos Híbridos *Plug-in* (*Plug-in Hybrid*)

Nessa modalidade de híbrido, o carregamento da bateria pode ser realizado também através de conexão com a rede. Portanto, a autonomia de condução elétrica pura é maior do que com veículos totalmente híbridos (geralmente entre 20km a 50km), pela maior disponibilidade energética oferecida pelas baterias de lítio regarregáveis tanto pela rede quanto pelo MCI. Quando a bateria está em um nível de SoC de aproximadamente 20%, o MCI funciona como a fonte de energia. Deste ponto em diante, o carro se comporta principalmente como um veículo híbrido completo até que o veículo seja conectado a rede e recarregado.

Todos os componentes do sistema de tração (exceto o MCI em si) e o sistema elétrico a bordo de um veículo híbrido em série são semelhantes aos dos veículos totalmente elétricos. Segundo Zhang et al. (2019), tanto híbridos completos quanto os *plug-in* apresentam um sistema inteligente da gestão de energia ajustando a fonte de energia de tração mais adequada. A Figura 19 apresenta os modelos de sistemas de transmissão híbridos, ilustrando os modelos em série (a), série-paralelo (b), paralelo (c) e complexo (d).

Figura 19 - Modelos de sistema de transmissão híbridos



Fonte: Kumar e Majhi (2014).

5.1.5 Veículos Elétricos (*Electric Vehicles*)

Os veículos elétricos são exclusivamente acionados eletricamente e operam completamente sem um MCI. Devido às atuais limitações tecnológicas, com um alcance baixo, porém como 90% de todas as viagens são inferiores a 100 km por dia, uma autonomia para essa distância é aceitável para a maioria das aplicações, especialmente para usos urbanos de mobilidade ou comercial. Assim, o veículo elétrico é mais adequado para viagens diárias da casa para o trabalho (porque essa distância é bem conhecida) e como um segundo carro para as famílias. Segundo a ZVEI (2013), os veículos elétricos para passageiros contam com motores elétricos que variam entre 60 kW a 180 kW, operando em tensões que variam de 400V a 800V. Tais requisitos definem uma aplicação de alta potência e energia, as quais apenas baterias de íon-lítio são capazes de suprir.

Segundo Budde-Meiwes et al. (2013), alcances maiores que 100km, exigiriam uma bateria maior, mas, como os custos e o peso também aumentariam, equipar veículos elétricos com baterias maiores não faz sentido economicamente. Por exemplo, para uma autonomia de 500 km, a massa da bateria aumentaria para 720 kg de massa e 500 l de volume, assumindo

15 kWh por 100 km. Isso tornaria um simples carro de passeio tão pesado quanto um SUV.

A Tabela 7 apresenta um resumo das características dos diferentes modelos automotivos discutidos na seção e a tecnologia de bateria aplicada a cada classificação de híbrido.

Tabela 9 - Aplicações de baterias de acordo com tecnologia automotiva

Tipo	MCI	Micro híbrido	Meio híbrido	Híbrido completo	Híbrido <i>plug-in</i>	Puramente Elétrico
Funções	Alimentação dos sistemas elétricos; Ignição	<i>Start-stop</i>	<i>Start-stop</i> ; Frenagem regenerativa; Assistência na aceleração;	<i>Start-stop</i> ; Frenagem regenerativa; Assistência na aceleração; Propulsão elétrica (mínima)	<i>Start-stop</i> ; Frenagem regenerativa; Assistência na aceleração; Propulsão elétrica (estendida)	Propulsão elétrica (total);
Potência típica do motor elétrico	Não tem	Não tem	10kW a 20kW	30kW	50kW	90kW
Baterias	SLI	EFB ou AGM	AGM ou Íon-Lítio	Íon-Lítio	Íon-Lítio	Íon-Lítio

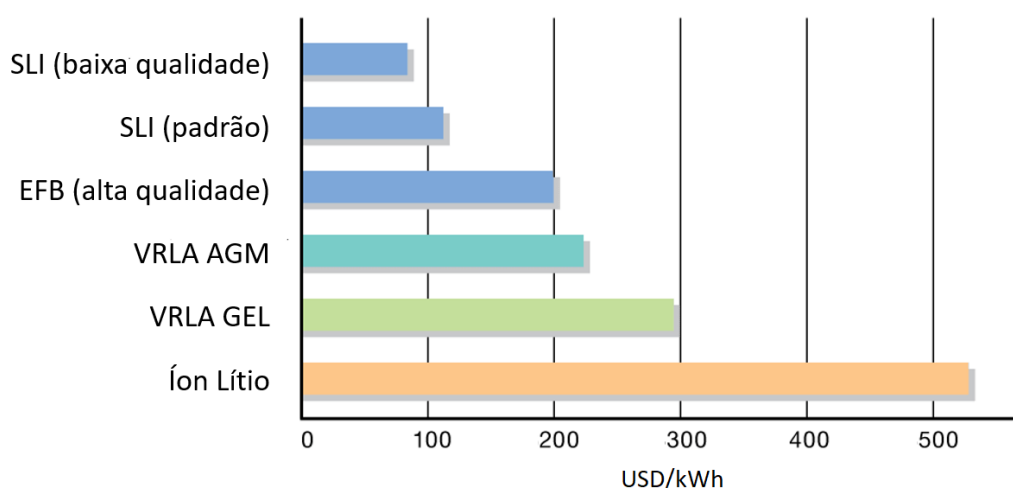
Fonte: Castro (2013).

6 CENÁRIO ECONÔMICO

Fontes de energia comercialmente viáveis são um fator limitante para permitir o estabelecimento e aplicação de avanços tecnológicos. Do mesmo modo que o MCI se estabeleceu devido a disponibilidade dos combustíveis fósseis, o surgimento dos veículos híbridos e elétricos só foi possível devido ao desenvolvimento de melhores acumuladores de energia, o qual foi impulsionado pelo desejo global de reduzir as emissões de carbono e romper com a matriz energética tradicional. A indústria automotiva busca limitar seu impacto ambiental, mas, ao mesmo tempo, tornar a mobilidade elétrica viável do ponto de vista econômico, sendo o investimento em melhores baterias de íon-lítio a principal solução a curto e médio prazo.

Segundo Geoffrey e Mondoloni (2017), a bateria de chumbo-ácido pode ser considerada uma *commodity*, com processos de fabricação já bem otimizados, diminuindo custos com uma cadeia produtiva que se retroalimenta através da reciclagem do dispositivo. A Figura 20 apresenta os custos em dólares americanos (USD) do kWh de cada tecnologia, onde podemos ver que as baterias de íon-lítio chegam a custar o dobro de alguns modelos de chumbo-ácido.

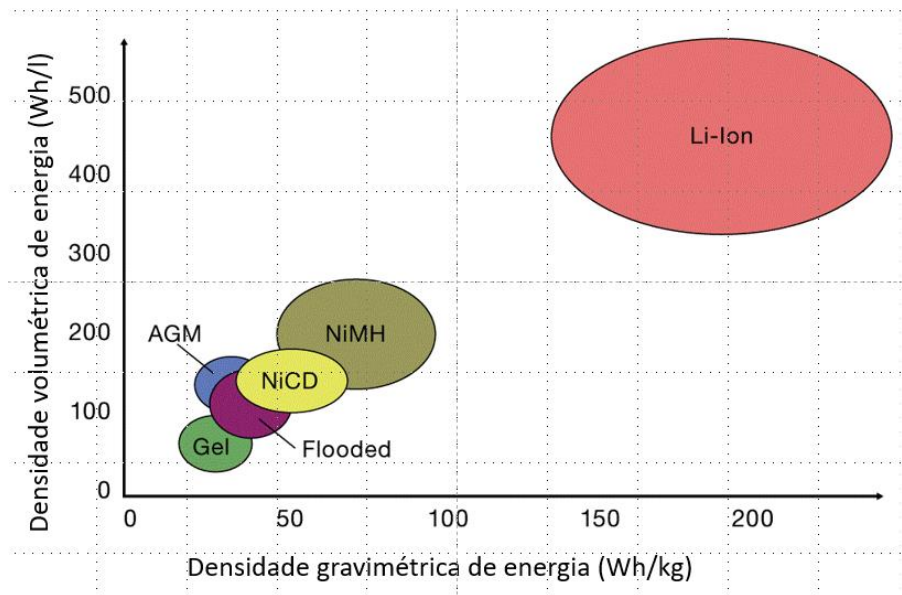
Figura 20 - Custo inicial por capacidade de tecnologia



Fonte: O'Connor (2017).

Porém a escolha do modelo de íon-lítio se justifica quando se analisa as características específicas da tecnologia e sua possibilidade de maior entrega de energia e potência, o que se traduz numa melhor relação custo benefício. Segundo O'Connor (2017) baterias de íon-lítio representam cerca de um terço da massa e metade do volume quando comparadas a modelos de bateria de chumbo-ácido (EFB, AGM e GEL). A Figura 21 mostra um comparativo entre as propriedades específicas de diferentes tecnologias, no qual podemos ver a superioridade das baterias de lítio.

Figura 21 - Comparação de potencial entre diferentes baterias

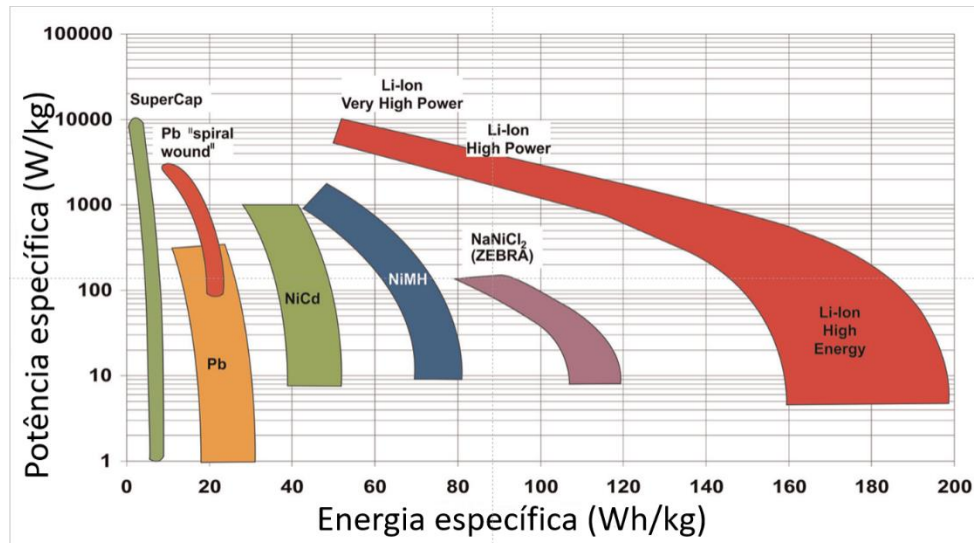


Fonte: O'Connor (2017).

Além da maior densidade de energia, a densidade de potência também é essencial para mobilidade elétrica, já que motores elétricos e todos os sistemas exigem altas entregas de potência. Segundo Budde-Meiwes et al. (2013), geralmente são características antagônicas, porém de acordo com ajuste de composição química do cátodo melhores balanços entre potência e energia específica podem ser conseguidos. O uso combinado de baterias e supercapacitores também se mostra como uma alternativa.

Na Figura 22, pode-se novamente perceber que a faixa de atuação das diferentes configurações de baterias íon-lítio oferece maiores níveis de potência e energia do que outras tecnologias, pela mesma quantidade de massa de bateria.

Figura 22 - Propriedades específicas de diferentes baterias

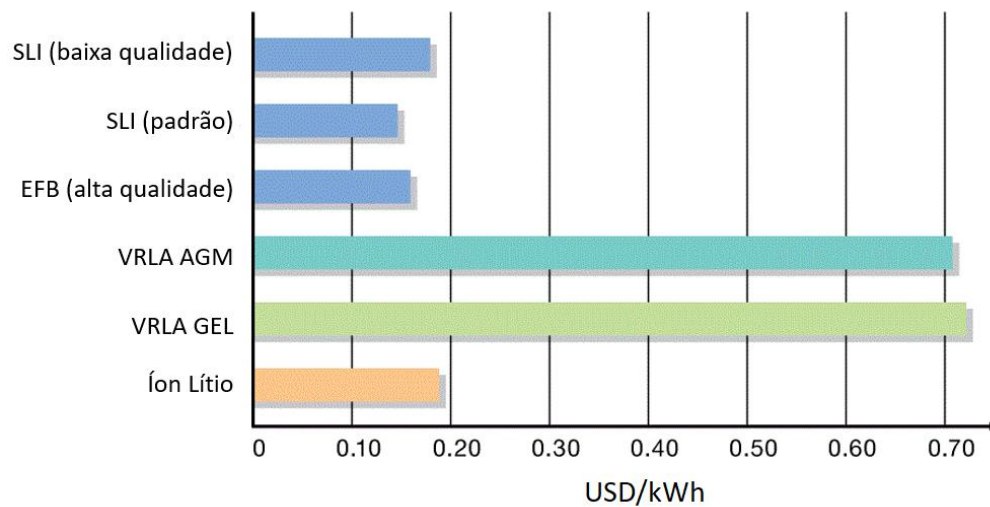


Fonte: Budde-Meiwes et al. (2013).

Segundo Budde-Meiwes et al. (2013) tais características levam as baterias de íon-lítio a oferecerem maior número de ciclos úteis, com maior profundidade de descarga (DoD) e, ao mesmo tempo, operando em altas taxas de corrente. Segundo O'Connor (2017), as baterias de chumbo-ácido perdem ciclos úteis se forem descarregadas abaixo de 50% do seu SoC, enquanto que as baterias de íon-lítio podem ser descarregadas até 80% SoC sem danos a longo prazo. Desse modo, quando analisamos os custos de maneira qualitativa, considerando-se o número de ciclos oferecidos pela bateria, a bateria de íon-lítio mostra-se rentável já que seu custo por ciclo se vida de aproxima do custo de baterias de chumbo ácido EFB.

A Figura 23 apresenta o custo total do kWh de cada tecnologia em dólares americanos (USD) por ciclo de vida.

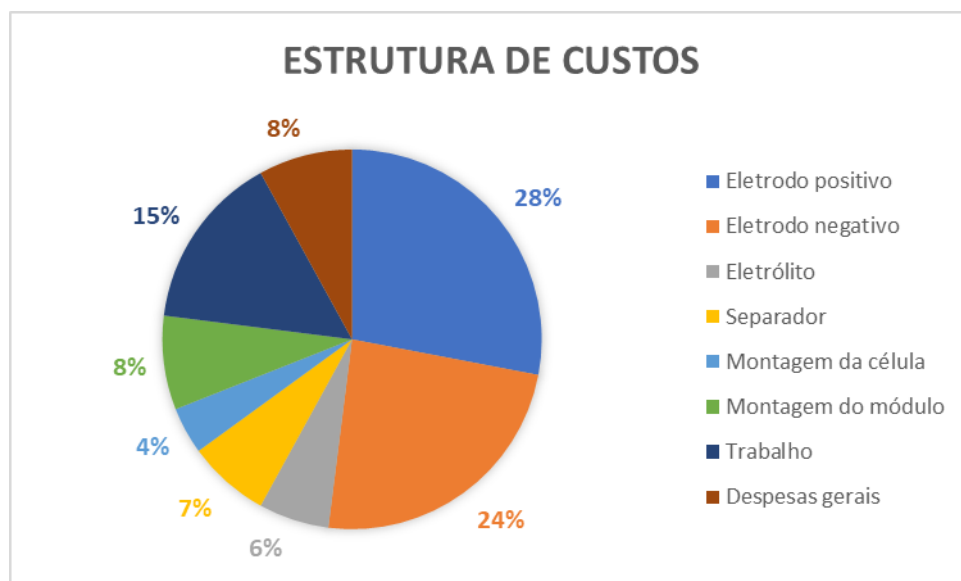
Figura 23 - Custo por total por ciclo de vida



Fonte: O'Connor (2017).

Segundo Berckmans et al. (2017), o ponto chave para a diminuição dos custos absolutos é preço dos materiais envolvidos no cátodo já que, ao se analisar a estrutura de custos do cátodo mais empregado nos carros híbridos e elétricos (NMC), percebe-se que ele tem a maior participação na estrutura de custo, representando 28% do total. A figura 24 apresenta os custos de uma célula de NMC.

Figura 24 - Estrutura de custos de uma célula NMC



Fonte: Berckmans et al. (2017).

Segundo Baes et al. (2018), a crescente dependência do armazenamento de baterias está impulsionando uma demanda enorme e, no geral, espera-se que aplicações de baterias se tornem um mercado de mais de US \$ 90 bilhões até 2025. Com maior demanda, a capacidade de mineração e refino de metais como lítio, cobalto e níquel tem se desenvolvido e cada vez mais empresas estão entrando nesse mercado, o que aumenta a competitividade entre os fornecedores, reduzindo o preço das matérias primas e consequentemente das baterias. Segundo Goldie-Scot (2019) esse fenômeno já pode ser observado ao se analisar o preço do volume médio de um conjunto células de íon-lítio. Na Figura 25 pode-se observar redução de 85% do preço em dólares do kWh entre 2010 e 2018.

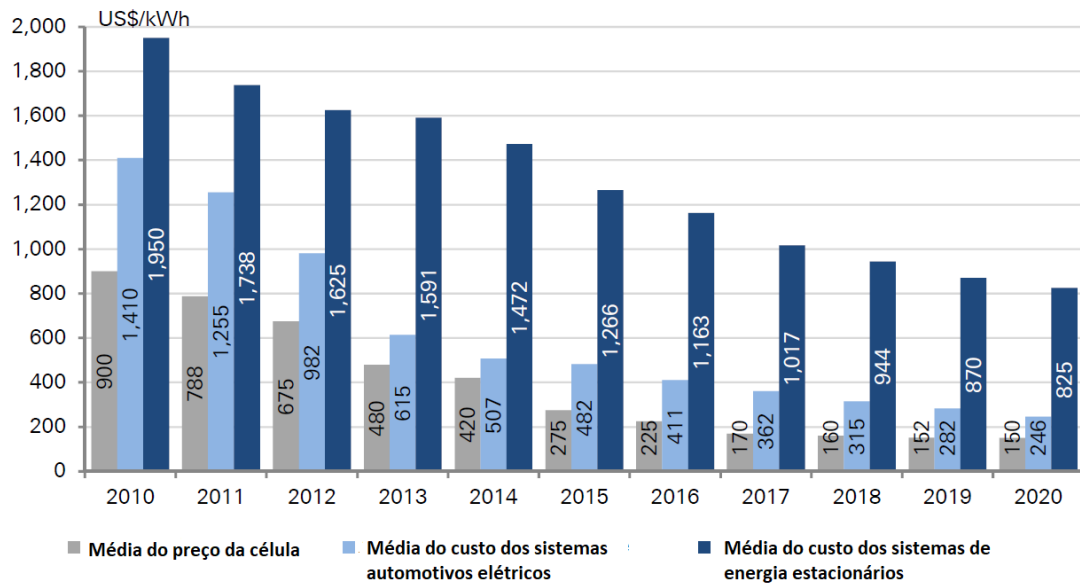
Figura 25 - Preço médio do volume médio de um conjunto de células íon lítio



Fonte: Goldie-Scot – Bloomberg NEF (2019).

Segundo a análise do *Deutsche Bank* (2016), a redução do preço das baterias de íon-lítio favorece o barateamento de toda a cadeia de produtos na qual são aplicadas. Os investimentos globais na cadeia de fornecimento de baterias e a necessidade de baterias mais baratas impulsionarão o consumo tanto de veículos elétricos (estima-se que as vendas de EV cresçam para mais de 16 milhões de unidades até 2025) quanto de sistemas estacionários. Na Figura 26 podemos perceber a redução de preços dos últimos 10 anos e a projeção para 2020.

Figura 26 - Custos do kWh de sistemas em USD



Fonte: Deutsche Bank (2016).

7 CENÁRIO AMBIENTAL

7.1 DESCARTE E RECICLAGEM DE BATERIAS CHUMBO-ÁCIDO

As baterias chumbo-ácido são classificadas como equipamentos de lixo especial já que possuem em seu interior diversos compostos químicos que podem ser nocivos ao meio ambiente. Por isso baterias devem ser separadas e descartadas de maneira especial. O descarte inadequado de baterias de chumbo-ácido ao ar livre contamina solos, cursos d'água e lençóis freáticos, além de apresentar grande risco para a saúde pública.

A maioria dos grandes fabricantes de baterias, não aceita encomenda de novos pedidos sem o retorno equivalente em sucata de bateria. A devolução acontece mesmo nas áreas mais remotas, pois a logística reversa desempenha papel importante na rentabilidade desse negócio já que o Brasil não é produtor primário de chumbo e o preço da sucata é mais competitivo do que do chumbo primário.

No programa de coleta vigente no Brasil, todos os estabelecimentos que comercializam baterias automotivas devem receber o produto usado, proveniente de qualquer marca, evitando o tombamento dos mesmos em qualquer situação de armazenagem ou transporte para preservar a solução ácida evitando contaminações. Os comerciantes são instruídos a recolherem e armazenarem corretamente as baterias entregues pelos clientes, posteriormente fazendo a conexão com os distribuidores e atacadistas, que farão coletas periódicas dos produtos nos estabelecimentos. Estes, por sua vez, devem armazená-los em conformidade com a legislação ambiental e entregá-los aos fabricantes, importadores ou empresas recicladoras.

As baterias normalmente contêm 65% em peso de chumbo que em sua maioria pode ser recuperado. A maior parte da sucata coletada é de baterias automotivas com uma pequena parte de baterias industriais. A Tabela 8 apresenta a porcentagem das matérias de uma bateria PbA.

Tabela 10 - Porcentagem de materiais nas baterias chumbo-ácido

Item	Porcentagem
Chumbo	25%
Óxido de chumbo	35%
Polipropileno	10%
Ácido Sulfúrico	10%
Água	16%
Vidro	2%
Antimônio	1%

Fonte: Sullivan et al. (2010).

Os processos são projetados para recuperar o polipropileno das caixas. Outros polímeros tais como acrilonitrilo-butadieno-estireno ou estireno-acrilonitrilo usados em algumas baterias industriais geralmente não são recuperados. Segundo May, Davidson e Monahov (2018), quando grandes quantidades de baterias industriais de sucata estão na mistura de trituração, os processos para recuperar outros polímeros podem se tornar economicamente vantajosos já que, nas baterias industriais, inserções de latão, conectores de cobre e as ligas contendo antimônio também podem agregar valor ao refugo.

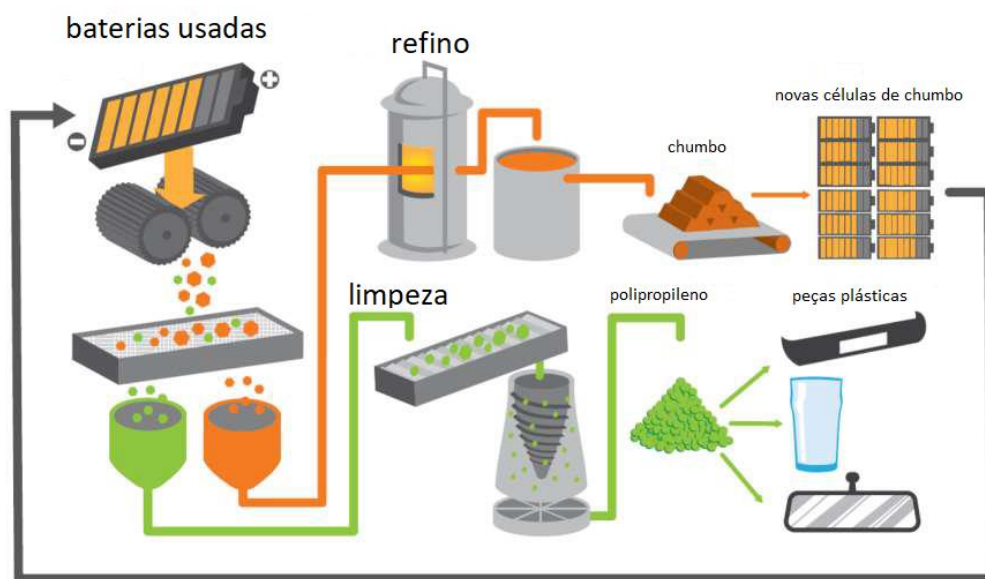
O processo de reciclagem começa com a quebra das baterias por um moinho de trituração, etapa realizada para que o ácido seja drenado e coletado. Os fragmentos são então divididos por flutuação e são usados processos para separar o polipropileno do chumbo metálico, a pasta de bateria e outros plásticos.

A pasta de óxidos pode ser dessulfurizada usando carbonato de sódio convertendo o ácido em sulfato de sódio para venda externa. O polipropileno é lavado e vendido para reutilização. A pasta e o chumbo metálico são então fundidos com agentes redutores e aglutinadores de impurezas para produzir o chumbo. Então o material é refinado para remover as impurezas, para que na sequência possa ser produzido chumbo puro de acordo com o grau de pureza requerida.

Pode-se fornecer esse chumbo para a produção de novas baterias ou transformado em ligas de acordo com as especificações do cliente. As impurezas da refinação são fundidas para

recuperar metais como antimônio, estanho e cobre. O polipropileno e o sulfato de sódio adicionam valor, mas isso deve ser compensado com os custos de processamento. Um crédito de fim de vida útil será fornecido para as baterias de chumbo com reciclagem de baterias realizadas em total conformidade com as regulamentações ambientais. A Figura 27 esquematiza o processo de reciclagem do chumbo e do polipropileno.

Figura 27 - Processo de reciclagem de baterias chumbo-ácido



Fonte: De-Leon (2018).

Tal processo é altamente desenvolvido e altas eficiências são alcançadas. Segundo May, Davidson e Monahov (2018), para cada tonelada de baterias de sucata, 650 kg de chumbo são recuperados. Isso torna o chumbo o metal *commodity* mais eficientemente reciclado, sendo que na União Europeia e nos EUA, mais de 99% das baterias à base de chumbo são coletadas e recicladas em um sistema de circuito fechado. Essa taxa de reciclagem é mais alta do que a presenteem qualquer outro produto de consumo de massa, com índices, nos países ocidentais, de 95–99% das baterias em fim de vida recicladas.

7.2 DESCARTE E RECICLAGEM DE BATERIAS ÍON-LÍTIO

Atualmente, a maior parte das baterias de íons de lítio que estão sendo recicladas são pequenas células consumidoras com cátodos de óxido de cobalto. Há muito poucos outros tipos sendo coletados e virtualmente nenhuma célula de armazenamento de EV, HEV, industriais ou de energia no fim da vida útil. Portanto as operações de reciclagem atuais são projetadas apenas para as baterias de eletrônicos portáteis de hoje.

Os regulamentos de embalagem e transporte para baterias de íons de lítio são muito rigorosos (pelo fato do lítio ser muito reativo), o que aumenta os custos. Tais requisitos tornam a atividade muito onerosa. As baterias de armazenamento de energia precisarão ser desmontadas para separar as células dos conectores, sistemas de resfriamento, componentes do módulo, entre outros.

Segundo Hoyer, Kieckhäfer e Spengler (2015), os custos de processamento também dependem da natureza da sucata e se ela está contaminada por outros materiais. Para o tratamento da sucata, diferentes tecnologias são aplicadas geralmente por processos de coprodução em várias etapas. Eles adotam etapas de desmontagem manual e automática, bem como etapas de condicionamento mecânico, pirometalúrgico e hidrometalúrgico. Dessa maneira diferentes componentes e materiais em diferentes graus de qualidade podem ser recuperados. O volume e o tipo de materiais que podem ser recuperados das baterias de íon-lítio diferem amplamente entre as variantes de bateria disponíveis. Processos pirometalúrgicos seguidos por processamento hidro metalúrgico permitem que o cobalto, níquel e o lítio sejam recuperados, já que tais metais são particularmente valiosos o que torna a reciclagem uma atividade economicamente atraente. Por outro lado, sucatas do modelo LFP, apresentam baixa oportunidade de retorno já que o único metal precioso é o lítio.

Segundo Helbig et al. (2018), o rápido crescimento do mercado e a falta de uma indústria capaz de reciclar grandes volumes em circuito fechado, tornam improvável que fontes secundárias de materiais estejam disponíveis em um curto prazo e a preços competitivos.

Apesar dos desafios econômicos, a reciclagem de baterias de íon-lítio conta com apoio governamental para se estabelecer. Destaca-se o pioneirismo da União Europeia com a diretiva 2006/66/EC de 2006 que busca regular e padronizar a atividade de reciclagem de

baterias de lítio automotivas e tem sido referência para estruturação dessa atividade ao redor do mundo (MANCHA, 2016).

8 CONCLUSÃO

O Brasil se encontra numa posição delicada quanto ao movimento global de eletrificação automotiva. Mesmo com a diminuição dos custos das baterias de íon-lítio e dos carros híbridos e elétricos, esses dispositivos continuam com alto valor tecnológico agregado totalmente desenvolvido fora do Brasil.

Em uma primeira análise, esse fator já contribuiu para o encarecimento desses dispositivos no mercado brasileiro, já que custos de logística e importação deverão ser refletidos no preço, o que tornarão os produtos ao alcance apenas das classes A e B. Segundo o Sindipeças, os veículos híbridos e elétricos têm baixa representatividade na frota brasileira, somando 11.038 unidades ou 0,025%, sendo que sua perspectiva mais favorável é chegar a 1% até 2030. Desse modo, investimentos em infra-estrutura para produção, manutenção e reposição de componentes desses veículos não serão priorizados pelo menos nos próximos 10 anos. Tal conjuntura será um grande empecílio a conversão do parque industrial brasileiro para a produção de baterias de íon-lítio.

Aliado a esses pontos, existe também uma defasagem da mão de obra da rede de oficinas. Apesar dos sistemas elétricos exigirem menor nível de manutenção, devido a complexidade dos dispositivos, a quantidade de sistemas de controle e *softwares* embarcados faz-se necessário uma mão de obra devidamente especializada para consertá-los. Além disso a manutenção de carros híbridos e elétricos equivale a de sistemas de alta tensão, já que mesmo os mais simples exigem baterias de 200V. Desse modo além de investimentos em capacitação, exigir-se-ão investimentos em infraestrutura e equipamentos adequados para essa atividade.

O novo regime automotivo brasileiro, o Rota 2030, busca de certa forma conciliar a realidade brasileira ao atual cenário de mudança da indústria automotiva. Empresas que optarem por modelos *Full Hybrid* ou *Plug-in-Hybrid* capazes de operar com álcool terão benefícios fiscais, o que pode ser tanto um fator de incentivo a transferência de tecnologia desses dispositivos ao Brasil, como a oportunidade de diferenciação na mesma nacionalmente.

Ao se comparar o processo de eletrificação em diferentes países desenvolvidos, percebe-se como denominador comum, o posicionamento estratégico dos governos em promover ambiente de negócios favorável já que, por si só, os custos são elevados. Recomenda-se ao Governo Brasileiro tomar diretrizes semelhantes, eliminando burocracias e

taxações para que diversos competidores como montadoras, indústrias de auto-peças ou componentes e de abastecimento vejam valor em reverter entrar no mercado brasileiro, apesar de seus desafios.

REFERÊNCIAS

- ANDWARI, A. M. *et al.* A review of battery electric vehicle technology and readiness levels. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 78, p. 414-430, 2017.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES (ANFAVEA). **Anuário da indústria automobilística brasileira 2019**. São Paulo, 2019.
- BAE, K. Y. *et al.* Energy-density improvement in Li-ion rechargeable batteries based on LiCoO₂+ LiV₃O₈ and graphite+ Li-metal hybrid electrodes. **Materials**, v. 12, n. 12, p. 2025, 2019.
- BATTERY UNIVERSITY. **How do lithium batteries work?** [S.l.] [2018]. Disponível em: https://batteryuniversity.com/learn/article/lithium_based_batteries. Acesso em: 12 set. 2019.
- BAES, K. *et al.* **Future of batteries: winner takes all?** Arthur D. Little, Bruxelas, 2018. Disponível em: https://www.adlittle.com/sites/default/files/viewpoints/adl_future_of_batteries-min.pdf . Acesso em: 15 out. 2019.
- BELMOKHTAR, K. *et al.* Charge equalization systems for Serial Valve Regulated Lead-Acid (VRLA) connected batteries in hybrid power systems applications. **Energy Procedia**, v. 99, p. 277-284, 2016.
- BERCKMANS, G. *et al.* Cost projection of state of the art lithium-ion batteries for electric vehicles up to 2030. **Energies**, v. 10, n. 9, p. 1314, 2017.
- BOSCH. **The Bosch battery range: the right power for every application**. Disponível em: https://nl.bosch-automotive.com/en/parts_and_accessories/service_parts_1/batteries_4/batteries_5. Acesso em: 10 mai. 2019.
- BUDDE-MEIWES, H. *et al.* A review of current automotive battery technology and prospects. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering**, v. 227, n. 5, p. 761-776, 2013.
- CASTRO, B. H. R. de; BARROS, D. C.; VEIGA, S. G. da. Baterias automotivas: panorama da indústria no Brasil, as novas tecnologias e como os veículos elétricos podem transformar o mercado global. **BNDES Setorial**, n. 37, p. 443-496, 2013.
- COSTA, R. M. da. A indústria automobilística no Brasil e o plano nacional de exportações. **Indicadores Econômicos FEE**, v. 44, n. 1, p. 17-32, 2016.
- CROMPTON, T. R. **Battery reference book**. 3rd ed. [S.l.]: Newnes, 2000.
- DAUDT, G. M.; WILLCOX, L. D. **Indústria automotiva**. 2018.
- DEHGHANI-SANIJ, A. R. *et al.* Study of energy storage systems and environmental challenges of batteries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 104, p. 192-208,

2019.

DE-LEON, S. **Lithium ion battery recycling market 2018**. Disponível em: <https://www.sdle.co.il/wp-content/uploads/2018/12/26-Lithium-ion-battery-recycling-Market-2018-for-conferences.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2019.

DELGADO, F. *et al.* **Carros elétricos**. Rio de Janeiro: Cadernos FGV Energia, 2017. Disponível em: <https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/19179/Caderno%20Carros%20Eletricos-FGV-BOOK%20VFINAL.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2019.

DEUTSCHE BANK. Welcome to the lithium-ion Age. **Deutsche Bank Market Research**, v. 9, 2016.

DINGER, A. *et al.* Batteries for electric cars: challenges, opportunities, and the outlook to 2020. **The Boston Consulting Group**, v. 7, p. 2017, 2010.

ELECTRICAL, ZVEI-German *et al.* Voltage Classes for Electric Mobility. **Frankfurt am Main, Germany**, 2013.

FINEARTAMERICA. **Early storage battery 19th century**, 2019. Disponível em: <https://fineartamerica.com/featured/early-storage-battery-19th-century-.html>. Acesso em: 15 ago. 2019.

GELBKE, M.; MONDOLONI, C. Flooded starting-lighting-ignition (SLI) and enhanced flooded batteries (EFBs): state-of-the-art. **Lead-Acid Batteries for Future Automobiles**, p. 149-184, 2017.

GOLDIE-SCOT, L. **A behind the scenes take on lithium-ion battery prices - Bloomberg NEF**, 2019. Disponível em: <https://about.bnef.com/blog/behind-scenestake-lithium-ion-battery-prices>. Acesso em: 31 out. 2019.

HELBIG, C. *et al.* Supply risks associated with lithium-ion battery materials. **Journal of cleaner production**, v. 172, p. 274-286, 2018.

HOYER, C.; KIECKHÄFER, K.; SPENGLER, T. S. Technology and capacity planning for the recycling of lithium-ion electric vehicle batteries in Germany. **Journal of Business Economics**, v. 85, n. 5, p. 505-544, 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Produção e vendas dos produtos e/ou serviços industriais, segundo as classes de atividades e os produtos**, 2017. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6705#resultado>. Acesso em: 17 abr. 2019.

ISLAM, M. S.; FISHER, C. A. J. Lithium and sodium battery cathode materials: computational insights into voltage, diffusion and nanostructural properties. **Chemical Society Reviews**, v. 43, n. 1, p. 185-204, 2014.

JCI. **Power Frame**, 2019. Disponível em: <https://www.powerframe.com/en-us/powerframe-benefits>. Acesso em: 16 ago. 2019.

KUMAR, P.; MAJHI, S. **Introduction to hybrid and electric vehicles-web course**. 2014.

KUNGL. VETENSKAPSAKADEMIEN. **They created a rechargeable world**. [S.l.] [2019]. Disponível em: <https://www.kva.se/en/pressrum/pressmeddelanden/nobelpriset-i-kemi-2019>. Acesso em: 20 out. 2019.

LIMA, U. M. **A dinâmica e o funcionamento da cadeia global de valor da indústria automobilística na economia mundial**. Texto para discussão, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), 2015. Disponível em: http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/TDs/td_2065.pdf. Acesso em: 20 out. 2019.

MANCHA, A. A look at some international lithium ion battery recycling initiatives. **The Journal of Undergraduate Research at the University of Illinois at Chicago**, v. 9, n. 1, 2016.

MAY, G. J.; DAVIDSON, A.; MONAHOV, B. Lead batteries for utility energy storage: a review. **Journal of Energy Storage**, v. 15, p. 145-157, 2018.

MENDES, H. M. R.; RUIZ, M. S.; DE FARIA, A. C. Logística reversa de pilhas e baterias: revisão e análise de um sistema implementado no Brasil. **Revista em Gestão, Inovação e Sustentabilidade**, v. 2, n. 1, 2016.

MENG, J. *et al.* Lithium-ion battery state-of-health estimation in electric vehicle using optimized partial charging voltage profiles. **Energy**, v. 185, p. 1054-1062, 2019.

NITTA, N. *et al.* Li-ion battery materials: present and future. **Materials today**, v. 18, n. 5, p. 252-264, 2015.

O'CONNOR, J. P. **Battery showdown: lead-acid vs. lithium-ion. An excerpt from: off grid solar: a handbook for photovoltaics with lead-acid or lithium-ion batteries**. Medium, 2017. Disponível em: <https://medium.com/solar-microgrid/battery-showdown-lead-acid-vs-lithium-ion-1d37a1998287>. Acesso em: 13 ago. 2019.

PEREIRA, J. A.; BÁNKUTI, S. M. S. Estrutura de mercado e estratégia: um estudo na indústria brasileira de baterias automotivas. **Iberoamerican Journal of Strategic Management (IJSM)**, v. 15, n. 1, p. 97-115, 2016.

SABERI, B. The role of the automobile industry in the economy of developed countries. **International Robotics & Automation Journal**, v. 4, n. 3, p. 179-180, 2018.

SALAM, N. **A Techno-economic and cost benefit analysis of the ultrabattery for residential applications with solar photovoltaics in western Australia**. 2017. 176 f. Dissertação (Masters of Renewable and Sustainable Energy) - Murdoch University, Austrália, 2017. Disponível em: <https://researchrepository.murdoch.edu.au/id/eprint/40396/1/Salam2017.pdf>. Acesso em: 25 set. 2019

SCIENCEPHOTO. **Plante accumulator battery**, 2019. Disponível em:

<https://www.sciencephoto.com/media/782375/view/plante-accumulator-battery-1859>. Acesso em: 15 ago. 2019.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE COMPONENTES PARA VEÍCULOS AUTOMOTORES (SINDIPEÇAS). **Relatório anual de frota circulante**. São Paulo, 2019.

SULLIVAN, J. L. *et al.* A review of battery life-cycle analysis: state of knowledge and critical needs. **Argonne National Lab (ANL)**, 2010.

VERÍSSIMO, M. P.; ARAÚJO, V. M. Desempenho da indústria automobilística brasileira no período 2000-2012: uma análise sobre a hipótese de desindustrialização setorial. **Economia e Sociedade**, v. 24, n. 1, p. 151-176, 2015.

YAZD, M. S.; MOLAZEMI, A.; MOAYED, M. H. The effects of different additives in electrolyte of AGM batteries on self-discharge. **Journal of power sources**, v. 158, n. 1, p. 705-709, 2006.

ZHANG, F. *et al.* Energy management strategies of connected HEVs and PHEVs: recent progress and outlook. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 73, p. 235-256, 2019.