

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

NATHAN DOS SANTOS MOREIRA

**Eletromobilidade: Estado Atual dos Veículos Elétricos e
das Baterias de Íons Lítio (BILs)**

São Carlos - SP
2023

NATHAN DOS SANTOS MOREIRA

**Eletromobilidade: Estado Atual dos Veículos Elétricos e
das Baterias de Íons Lítio (BILs)**

**Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Química da Universidade Federal de
São Carlos como requisito parcial
para obtenção do título de Bacharel
em Química Tecnológica.**

Orientador: Prof. Dr. Nerilso Bocchi

**São Carlos - SP
2023**



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA - DQ/CCET

Rod. Washington Luís km 235 - SP-310, s/n - Bairro Monjolinho, São Carlos/SP, CEP 13565-905

Telefone: (16) 33518206 - <http://www.ufscar.br>

DP-TCC-ADP nº 7/2024/DQ/CCET

Graduação: Defesa Pública de Trabalho de Conclusão de Curso

Ata da Defesa Pública (GDP-TCC-ADP)

Aos oito dias do mês de dezembro de 2023, realizou-se a Defesa Pública do Trabalho de Conclusão de Curso do (a) estudante Nathan dos Santos Moreira do Curso de Bacharelado em Química da Universidade Federal de São Carlos – Campus São Carlos, devidamente matriculado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso, perante a Banca Examinadora, composta pelos Professores Nerilso Bocchi, Elton Fabiano Sitta e Romeu Cardozo Rocha Filho segundo o estabelecido nas Normas para apresentação de Trabalho de Conclusão do Curso.

Após a apresentação e arguições, a Banca deliberou, segundo os critérios estabelecidos nas normas supracitadas:

Nome do Docente	Função	Nota
Prof. Dr. Nerilso Bocchi	Orientador	10,0
Prof. Dr. Elton Fabiano Sitta	Membro da Banca 1	10,0
Prof. Dr. Romeu Cardozo Rocha Filho	Membro da Banca 2	10,0

Com isso, o Trabalho foi considerado aprovado, com nota final 10,0 .

São Carlos, 29 de janeiro de 2024.



Documento assinado eletronicamente por **Caio Marcio Paranhos da Silva, Professor(a)**, em 29/01/2024, às 15:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufscar.br/autenticacao>, informando o código verificador **1341261** e o código CRC **55E5B54B**.

Referência: Caso responda a este documento, indicar expressamente o Processo nº 23112.002238/2024-93

SEI nº 1341261

Modelo de Documento: Grad: Defesa TCC: Ata, versão de 02/Agosto/2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais pelo apoio e suporte, e também aos meus tios e tias que ajudaram na minha mudança para São Carlos.

À minha irmã pela companhia e amizade, especialmente neste último ano em que dividimos o apartamento juntos.

Ao Prof. Dr. Nerilso Bocchi pela orientação, disponibilidade e discussões para a elaboração deste trabalho e pelos ensinamentos nas disciplinas de Química Experimental Geral e Eletroquímica.

Ao Prof. Dr. Elton Sitta por ter aceitado participar da banca, pelas valiosas sugestões oferecidas ao meu trabalho e pelos ensinamentos nas disciplinas de Termodinâmica Química e Cinética Química. Agradeço também pela oportunidade de atuar como monitor em Eletroquímica.

Ao Prof. Dr. Romeu Cardozo Rocha-Filho por ter aceitado participar da banca, pelas valiosas sugestões oferecidas ao meu trabalho e pelos ensinamentos na disciplina de Química Geral.

Aos colegas de graduação, pela amizade, parcerias de laboratório e de seminários ao longo do curso.

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1. Gasto a longo prazo em dólares de dois modelos de carros 100% elétricos, dois modelos de carros híbridos e de dois modelos de motor a combustão interna na cidade de São Paulo.....	10
TABELA 1.2. Energia Específica (teórica e experimental) e fator de célula para diversas baterias recarregáveis.....	27
TABELA 5A.1. Cotação do dólar, preço médio do litro de gasolina na cidade de São Carlos, SP e preço da energia elétrica no mês de abril de 2023.....	62
TABELA 5A.2. Autonomia e capacidade energética da bateria de dois veículos elétricos selecionados.....	62
TABELA 5A.3. Valores da distância percorrida por litro de gasolina de dois veículos elétricos híbridos e dois veículos a combustão selecionados.....	63
TABELA 5B.1. Valores do preço do veículo, alíquota do IPVA, e custo mensal de abastecimento de dois modelos de veículos 100 % elétricos, dois modelos de veículos híbridos e dois veículos a combustão.....	64
TABELA 5C.1. Valores de energia livre de Gibbs de formação para algumas substâncias selecionadas.....	65

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 Geração da energia elétrica mundial a partir de diferentes fontes desde 1990. Fonte: Próprio autor com dados de IEA, 2022.....	3
FIGURA 1.2 Geração da energia elétrica no Brasil a partir de diferentes fontes desde 1970. Fonte: SEEG, 2023.....	4
FIGURA 1.3 Variação das emissões de CO ₂ (em Mt) por setor de 2021 a 2022. Fonte: Adaptado de IEA, 2023a.....	5
FIGURA 1.4 Emissões de CO ₂ (em Gt) no planeta ao longo de mais de um século. Fonte: Adaptado de IEA, 2023a.....	5
FIGURA 1.5 Oscilações do preço do petróleo ao longo de quase 150 anos. Fonte: Adaptado de EFTEKHARI, 2019.....	7
FIGURA 1.6 Comparação do custo (em dólares) para percorrer 160 km com dois modelos de carros a combustão, dois modelos de carros híbridos e dois modelos de carros 100% elétricos disponíveis no Brasil. Fonte: Próprio autor com dados do AUTOESPORTE, 2022; GARAGEM 360, 2022; JAC MOTORS; JEEP; RENAULT BRASIL e TOYOTA.....	9
FIGURA 1.7 Vendas de carros elétricos (em milhões) na Europa, China, EUA e outros países desde 2016. Fonte: Adaptada de IEA, 2023b.....	11
FIGURA 1.8 Modelos de veículos a combustão e elétricos entre os anos de 2010 e 2022. Fonte: Adaptada de IEA, 2023c.....	12
FIGURA 1.9 Custo médio de aquisição em dólares (esquerda) e autonomia em quilômetros (direita) de quatro diferentes categorias de veículos elétricos disponíveis na China, Europa e Estados Unidos. Fonte: Adaptada de IEA, 2023c.....	13
FIGURA 1.10 Evolução da demanda de baterias de íons lítio em veículos elétricos de três categorias. Fonte: Adaptada de IEA, 2023c.....	14
FIGURA 1.11 Participação dos três principais países produtores na mineração de alguns minerais selecionados em 2022. Fonte: Adaptado de IEA, 2023d.....	14
FIGURA 1.12 Comparação das quantidades necessárias de minerais (em kg por veículo) para a produção de baterias, motores e outros componentes dos veículos convencionais e elétricos. Fonte: Adaptada de IEA, 2021b.....	15
FIGURA 1.13 Número de pontos de carregamento públicos ao longo do tempo. Fonte: Adaptada de IEA, 2023c.....	16

FIGURA 1.14 Esquema de uma estação típica de troca de baterias. Fonte: Adaptado de ADEGBOHUN et al., 2019.....	17
FIGURA 1.15 Evolução do número de veículos elétricos emplacados no Brasil. Fonte: Próprio autor com dados da ABVE, 2023a.....	19
FIGURA 1.16 Estados em que a empresa Zletric dispõe, atualmente, de estações de carregamento de baterias no Brasil. Fonte: Adaptado de ZLETRIC, 2023.....	20
FIGURA 1.17 Células eletroquímicas usadas para a interconversão de energias química e elétrica. Fonte: Próprio autor.....	21
FIGURA 1.18 Componentes da bateria de chumbo-ácido. Fonte: Adaptado de LOPES & STAMENKOVIC, 2020.....	23
FIGURA 1.19 Taxa de reciclagem de alguns materiais selecionados, nos Estados Unidos e no Brasil. Fonte: Próprio autor com dados de EPA, 2020; CEMPRE 2023; ABIPET, 2019 e CARNEIRO et. al, 2017.....	24
FIGURA 1.20 Curva de potencial em função do tempo a corrente constante para: (a) bateria sem sobrepotencial de nucleação; (b) bateria com sobrepotencial de nucleação. Fonte: Próprio autor, adaptado de PLETCHER & WALSH, 1990.....	25
FIGURA 1.21 Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura para um eletrodo de Pb: (a) no estado carregado; (b) após descarregamento lento e (c) após descarregamento rápido, formando a fase não condutora de sulfato de chumbo. Fonte: Adaptado de LOPES & STAMENKOVIC, 2020.....	26
FIGURA 1.22 Comparação dos valores de energia específica e densidade energética de baterias disponíveis no mercado. Fonte: Adaptado de KHARBACHI et al., 2020).....	29
FIGURA 2.1 Esquema de funcionamento de uma bateria de íons lítio durante seu descarregamento e carregamento. Fonte: Próprio autor adaptado de BEARD, 2019.....	30
FIGURA 2.2 Percentagem de participação no mercado mundial dos diferentes materiais usados como eletrodo positivo de baterias de íons lítio de veículos leves desde 2018. Fonte: Próprio autor com dados de IEA 2023e.....	31
FIGURA 2.3 Estrutura cristalina do LiCoO ₂ lamelar. Fonte: Adaptado de FALQUETO, 2018.	32
FIGURA 2.4 Estrutura cristalina do LiMn ₂ O ₄ tipo espinélio. Fonte: Adaptado de ZHANG et al., 2013.....	34
FIGURA 2.5 Valores de estabilidade térmica, capacidade específica e de retenção de	

capacidade dos óxidos do tipo NMC ($\text{LiNixMnyCo}_{1-x-y}\text{O}_2$). Fonte: Adaptado de NOH et al., 2013.....	37
FIGURA 2.6 Estrutura cristalina do LiFePO_4 do tipo olivina. Fonte: Adaptado de TOLGANBEK et al., 2021.....	38
FIGURA 2.7 Quantidade dos materiais usados em eletrodos negativos de baterias de lítio e íons lítio (em kg/kW h) e a percentagem de suas participações no mercado no ano de 2022. Fonte: Adaptado de IEA 2023c.....	39
FIGURA 2.8 Composição da SEI (Solid Electrolyte Interphase - Interfase de Eletrólito Sólido) formada nos eletrodos negativos de baterias de lítio e íons lítio. Fonte: Adaptado de PELED & MENKIN, 2017.....	40
FIGURA 2.9 Representação esquemática da formação de dendritas de lítio metálico no eletrodo negativo de baterias de lítio. Fonte: Adaptado de UPS BATTERY CENTER, 2022b... 41	41
FIGURA 2.10 Representação esquemática: (a) da estrutura do carbono grafite e (b) da formação de poros no grafite mediante o tratamento com hidróxido de potássio. Fonte: Adaptado de CHENG et al., 2015.....	43
FIGURA 2.11 Dependência da capacidade específica do grafite (azul) e do grafite multicanal (vermelho) com (a) a taxa de recarga e (b) a taxa de descarga. Fonte: Adaptado de CHENG et al., 2015.....	44
FIGURA 2.12 Representação esquemática dos mecanismos de degradação do silício como material de eletrodos negativos. Fonte: Adaptado de NZEREOGU et al., 2022.....	45
FIGURA 2.13 Representação esquemática da dissolução da SEI (Solid Electrolyte Interphase) em potenciais elevados, ocasionando a degradação do eletrodo negativo e a deposição de lítio metálico. Fonte: Adaptado de BARRÉ et al., 2013.....	48
FIGURA 2.14 Representação esquemática do mecanismo de transporte dos íons lítio através do eletrólito polimérico de PEO. Fonte: Adaptado de ZHOU et al., 2019.....	50
FIGURA 2.15 Estrutura química do copolímero poli(fluoreto de vinilideno hexafluoropropileno) (PVDF-HFP). Fonte: Adaptado de FENG et al., 2013.....	51

RESUMO

Os veículos elétricos são caracterizados por apresentarem um motor movido a eletricidade cuja energia provém de uma bateria ou de uma célula a combustível. Diversos problemas de saúde e ambientais estão relacionados com a liberação de gases de efeito estufa provenientes da queima de combustíveis fósseis. Estas preocupações, aliadas à flutuação dos preços do petróleo, têm impulsionado significativamente o setor dos veículos elétricos nos últimos anos para substituir os veículos a combustão, exigindo o desenvolvimento de baterias que proporcionam uma elevada autonomia e segurança ao condutor. Dentre estes dispositivos, as baterias de íons lítio têm apresentado maior densidade energética e volumétrica, bem como um longo ciclo de vida. Assim, este trabalho tem a finalidade de realizar uma revisão bibliográfica sobre as baterias de íons lítio, avaliando suas perspectivas e desafios. Além disso, dados mais recentes sobre os veículos elétricos no Brasil e no mundo também serão apresentados.

Palavras-chave: Eletromobilidade. Veículos Elétricos. Veículos Elétricos a Bateria. Baterias Secundárias. Baterias de íons lítio.

ABSTRACT

Electric vehicles are characterized by having an electricity-powered motor whose energy comes from a battery or a fuel cell. A variety of health and environmental problems are linked to the emission of greenhouse gases from fossil fuel combustion. These concerns, combined with the fluctuation in oil prices, have significantly boosted the electric vehicle sector in recent years to replace internal-combustion-engine vehicles, requiring the development of batteries that offer high autonomy and driver safety. Among these devices, lithium-ion batteries exhibit higher energy and volumetric density as well as a long life cycle. Thus, this work aims to conduct a literature review on lithium-ion batteries, evaluating their prospects and challenges. Additionally, the most recent data on electric vehicles in both Brazil and world will also be presented.

Keywords: Electromobility. Electric Vehicles. Battery Electric Vehicles. Secondary Batteries. Lithium-Ion Batteries.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

ABVE - Associação Brasileira do Veículo Elétrico

BEV - *Battery Electric Vehicle* (veículo elétrico a bateria)

BMS - *Battery Management System* (sistemas de gerenciamento das baterias)

CA – Corrente elétrica alternada

CC – Corrente elétrica contínua

FCEV - *Fuel Cell Electric Vehicle* (veículo elétrico a célula a combustível)

HEV - *Hybrid Electric Vehicle* (veículo elétrico híbrido)

ICE - *Internal Combustion Engine* (motor a combustão interna)

IPVA - Imposto sobre a Propriedade de Veículos Automotores

LI - Líquido Iônico

LFP - *Lithium Iron Phosphate* (fosfato de ferro e lítio)

LNMO - *Lithium Nickel Manganese Oxide* (óxido de lítio-níquel e manganês)

MME - Ministério das Minas e Energia

NMC - *Nickel Manganese Cobalt* (cobaltato de níquel e manganês)

PHEV - *Plug-in Hybrid Electric Vehicle* (veículo elétrico híbrido *plug-in*)

PVDF-HFP - *Poly(vinylidene fluoride-co-hexafluoropropylene)* (poli(fluoreto de vinilideno-co-hexafluoropropileno))

PAN - *Polyacrylonitrile* (poliacrilonitrila)

PCMs – *Phase Change Materials* (materiais de mudança de fase)

PPO - *Poly(propylene oxide)* (poli(óxido de propileno))

PEO - *Polyethylene oxide* (poli(óxido de etileno))

SEI - *Solid Electrolyte Interphase* (interfase de eletrólito sólido)

SUV - *Sport Utility Vehicle* (veículo utilitário esportivo)

T_g - Temperatura de transição vítrea

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1) Apresentação e Objetivos do Trabalho.....	1
1.2) Veículos Elétricos.....	2
1.2.1) Contextualização.....	2
1.2.2) Definições.....	7
1.2.3) Dados Econômicos dos Veículos Elétricos.....	10
1.2.4) Baterias e Veículos Elétricos.....	13
1.2.5) Sistemas de Carregamento dos Veículos Elétricos.....	16
1.2.6) Sistemas de Gerenciamento de Baterias.....	17
1.2.7) Veículos Elétricos no Brasil.....	18
1.3) Baterias.....	20
1.3.1) Aspectos Gerais das Baterias.....	20
1.3.2) Baterias de Chumbo-Ácido.....	21
1.3.3) Baterias de Íons Lítio (BILs).....	28
2. SITUAÇÃO ATUAL DAS BATERIAS DE ÍONS LÍTIO.....	30
2.1) Materiais de Eletrodo Positivo.....	31
2.1.1) Óxidos Lamelares (LiMO ₂ ; M = Co, Ni e Mn).....	32
2.1.2) Óxidos do Tipo Espinélio (LiM ₂ O ₄ ; M = Mn, Ni, Co, Ti e V).....	34
2.1.3) Óxido de Níquel Manganês Cobalto e Lítio (LiN _x Mn _y Co _{1-x-y} O ₂) - NMC.....	36
2.1.4) Fosfato de Ferro e Lítio (LiFePO ₄).....	37
2.2) Materiais de Eletrodo Negativo.....	39
2.2.1) Lítio Metálico.....	40
2.2.2) Carbono Grafite.....	42
2.2.3) Ligas de Silício.....	44
2.3) Eletrólitos.....	46
2.3.1) Sais de lítio dissolvidos em solventes orgânicos.....	47
2.3.2) Líquidos Iônicos.....	48
2.3.3) Eletrólitos Poliméricos e Eletrólitos em Gel.....	49
3. CONCLUSÕES.....	52
4. REFERÊNCIAS.....	54
5. ANEXOS.....	62
A - CÁLCULO DOS CUSTOS DE RODAGEM.....	62
B - CUSTOS DE MANUTENÇÃO A LONGO PRAZO NA CIDADE DE SÃO PAULO.....	64
C - CÁLCULO DA ENERGIA LIVRE DE GIBBS PADRÃO DE REAÇÃO DA BATERIA DE CHUMBO-ÁCIDO.....	65

1. INTRODUÇÃO

1.1) Apresentação e Objetivos do Trabalho

Os veículos a combustão, movidos por gasolina ou diesel, são dependentes do petróleo, uma fonte não-renovável sujeita à oscilação de preço e responsável por liberar dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO) e óxidos de nitrogênio (NO_x). Como é bem conhecido, estes gases afetam a saúde ocasionando doenças respiratórias e cardiovasculares, além de contribuírem para o aquecimento global do planeta favorecendo a ocorrência de eventos climáticos extremos, tais como ondas de calor, elevações no nível do mar e alterações na fauna e flora (ROCHA-FILHO & TOLENTINO, 1998; NIEHS, 2020).

Como alternativa para a mitigação dos problemas mencionados, esforços mundiais têm sido feitos no sentido de proceder a transição energética do setor automotivo por meio da implementação dos veículos elétricos. Estes apresentam um motor elétrico alimentado por uma bateria ou uma célula a combustível, cujo trabalho elétrico é fornecido a partir de uma reação de oxirredução espontânea.

Dentre as baterias desenvolvidas e estudadas atualmente para esse propósito, destacam-se as baterias de íons lítio, uma tecnologia presente no mercado desde os anos 90 e reconhecida pelos seus elevados valores de energia específica e densidade energética. Assim, ao longo desta introdução, serão apresentados alguns dados econômicos sobre os veículos elétricos no mundo e no Brasil, destacando-se que a crescente participação desses veículos no mercado tem impulsionado a demanda de baterias, especialmente as de íons lítio. Além disso, serão abordados os sistemas de gerenciamento e carregamento das baterias, ambos essenciais para operação dos veículos elétricos pelos seus usuários. Outro aspecto a ser destacado é a bateria chumbo-ácido, empregada nos veículos com motores de combustão interna e também nos veículos elétricos, apesar dos seus baixos valores de energia específica e densidade energética.

Dessa forma, o objetivo do presente trabalho consiste em realizar uma revisão bibliográfica acerca das baterias de íons lítio e seu uso em veículos elétricos, apresentando os desafios e as perspectivas futuras.

1.2) Veículos Elétricos

1.2.1) Contextualização

A energia elétrica desempenha um papel essencial em diversos setores da sociedade: na indústria, é aplicada na operação de caldeiras e máquinas; no transporte, na mobilidade dos veículos; nas residências, no funcionamento de eletrodomésticos e na iluminação. Dado que a eletricidade não pode ser obtida diretamente da natureza, ela deve ser gerada utilizando fontes primárias de energia. A geração de eletricidade a partir de outras fontes de energia, inclui principalmente:

1. Geradores Elétricos: dispositivos que produzem energia elétrica a partir da energia cinética de um fluido em movimento - água, vapor, gases de combustão ou ar - que é responsável por girar o eixo do rotor de turbinas geradoras. Dentre essas, destacam-se as turbinas hidráulicas, turbinas a vapor, turbinas a gás (combustão), turbinas eólicas e as turbinas termelétricas que utilizam o calor gerado de fontes fósseis, nucleares e de biomassa (EPE, 2023; EIA, 2023);
2. Células Galvânicas: dispositivos eletroquímicos que transformam a energia livre de Gibbs liberada por reações eletroquímicas espontâneas em energia elétrica (JANZEN, 1979). As células galvânicas abrangem as células a combustível, em que os reagentes são armazenados fora das células, e as baterias, nas quais os reagentes são armazenados no seu interior. Os aspectos gerais das baterias, incluindo o panorama das baterias chumbo-ácido e das baterias de íons lítio, serão tratados no tópico 1.3, e;
3. Células Fotovoltaicas: dispositivos que geram eletricidade em corrente elétrica contínua (CC) a partir da radiação solar, num processo conhecido como efeito fotovoltaico. Os sistemas fotovoltaicos são formados por semicondutores, como o silício, responsáveis por absorver o fóton incidente, de modo a fornecer energia para que os elétrons sejam excitados da banda de valência para a banda de condução. A energia elétrica produzida é então convertida em corrente elétrica alternada (CA) a partir de um inversor (MACHADO & MIRANDA, 2015; KHARE *et al.*, 2023).

Mundialmente, a matriz energética se concentra em fontes não renováveis como o carvão e o gás natural, como pode ser observado na Figura 1.1 (IEA, 2022).

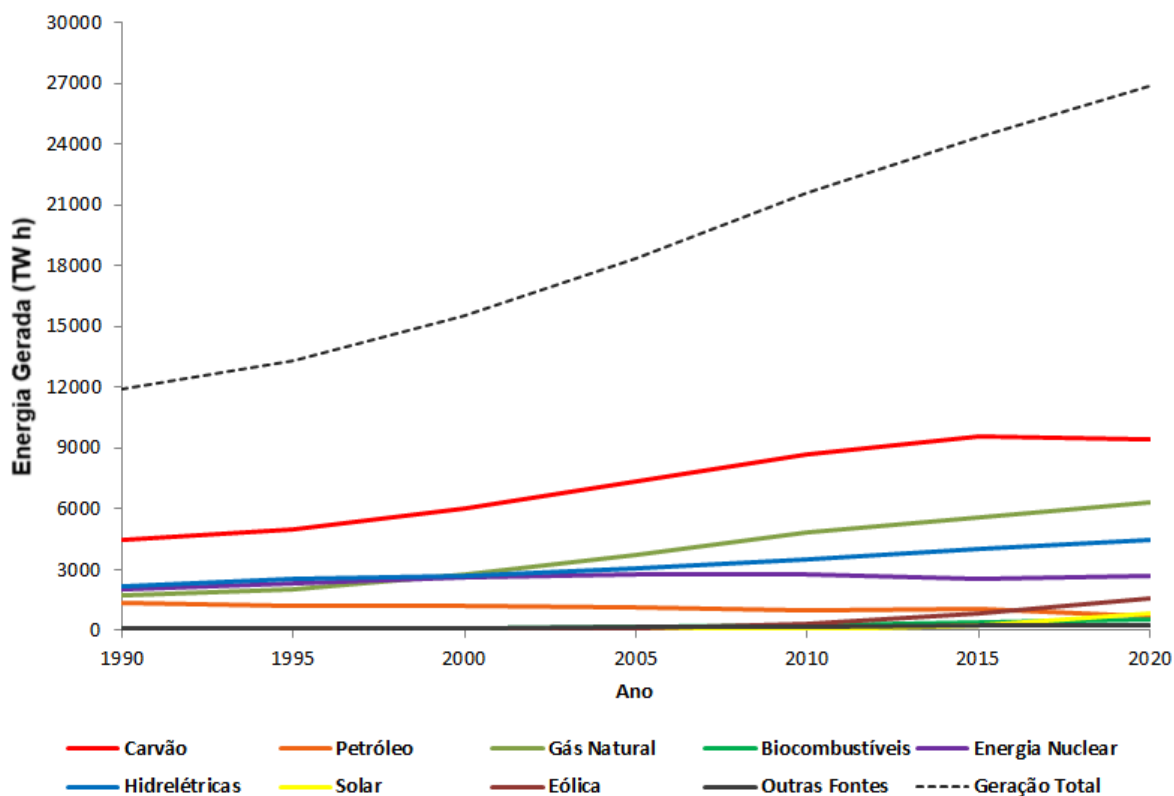


FIGURA 1.1 Geração da energia elétrica mundial a partir de diferentes fontes desde 1990.
Fonte: Próprio autor com dados de IEA, 2022.

Por outro lado, no Brasil, a matriz energética é formada majoritariamente por fontes renováveis como a hidráulica, eólica, solar e termelétrica que usam a biomassa e minoritariamente por fontes não renováveis como as termelétricas que utilizam combustível fóssil, conforme apresentado na Figura 1.2.

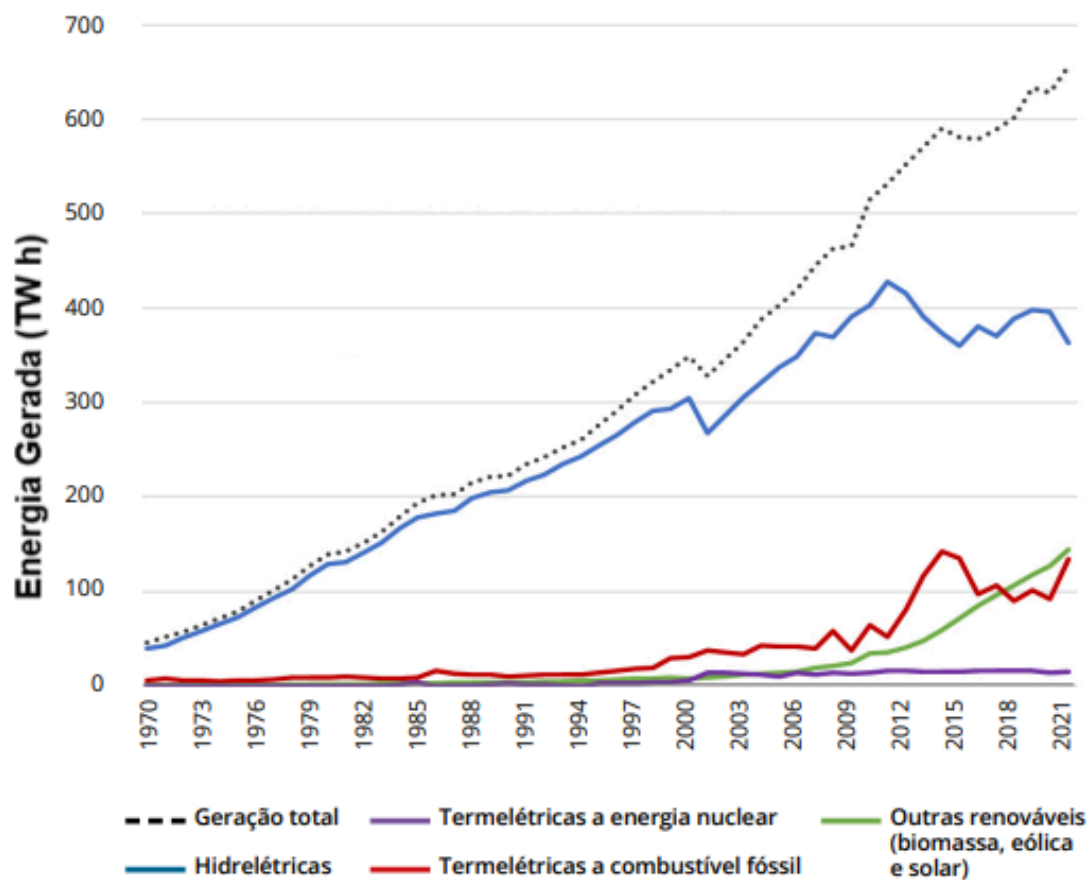


FIGURA 1.2 Geração da energia elétrica no Brasil a partir de diferentes fontes desde 1970. Fonte: SEEG, 2023.

Os dados da matriz energética mundial e do Brasil, apresentados anteriormente, revelam a importância crítica da transição para fontes de energia mais limpas e sustentáveis. Isto porque a variação líquida das emissões de dióxido de carbono (CO₂) nos setores de transporte, indústrias, de construção civil e geração de energia elétrica, apresentou um saldo positivo de 321 Mt de 2021 para 2022, conforme apresentado pela Figura 1.3. Ao todo, 36,8 Gt de CO₂ foram emitidos no ano de 2022, como indicado na Figura 1.4, retornando aos níveis de emissões pré-pandemia (IEA, 2023a).

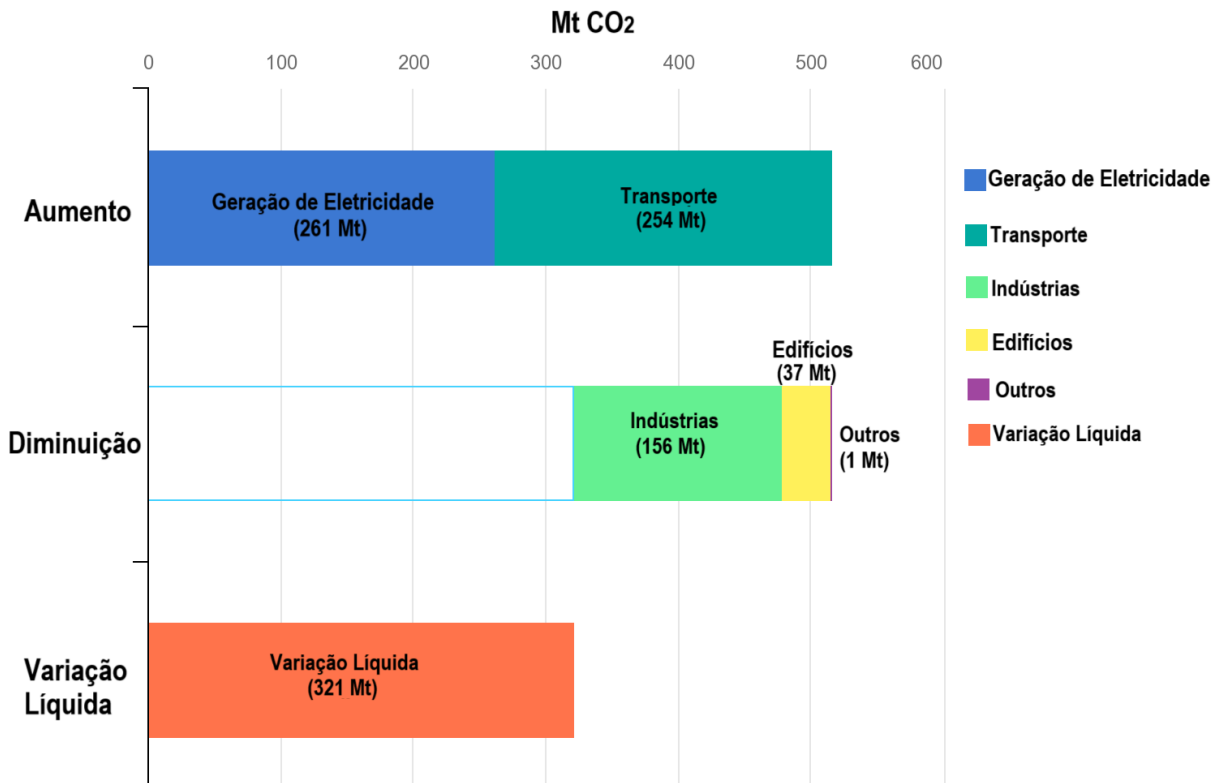


FIGURA 1.3 Variação das emissões de CO₂ (em Mt) por setor de 2021 a 2022. Fonte: Adaptado de IEA, 2023a.

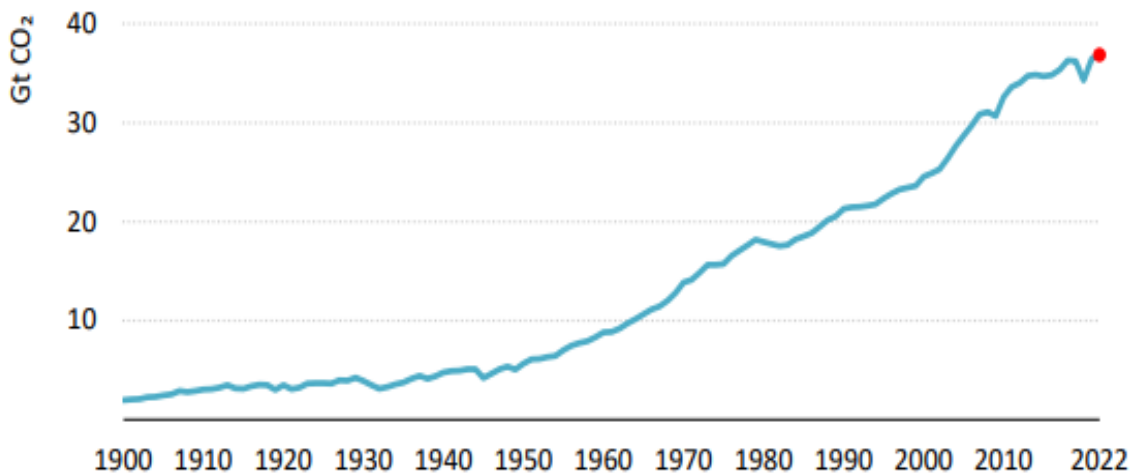


FIGURA 1.4 Emissões de CO₂ (em Gt) no planeta ao longo de mais de um século. Fonte: Adaptado de IEA, 2023a.

Os principais emissores de CO₂ são os combustíveis fósseis (petróleo, gás natural e carvão), os quais são formados por átomos de carbono cuja queima leva à formação

de CO₂. A liberação desse gás na atmosfera é maior na queima do carvão, uma vez que a proporção de carbono em sua composição é relativamente elevada. Em contrapartida, o petróleo e o gás natural, por serem formados majoritariamente por hidrocarbonetos, apresentam menores teores de carbono, liberando menos CO₂ (BAIRD & CANN, 2012).

Em especial, o petróleo é utilizado como matéria-prima na produção de combustíveis dos veículos a combustão, tais como a gasolina e diesel, além de ser matéria-prima na produção de polímeros. No entanto, essa fonte fóssil apresenta as seguintes desvantagens:

1. Além da emissão de CO₂, também são gerados o monóxido de carbono (CO) e óxidos de nitrogênio (NO_x). Esses gases afetam a saúde ocasionando doenças respiratórias e cardiovasculares, além de contribuírem para o aquecimento global do planeta favorecendo a ocorrência de eventos climáticos extremos, tais como ondas de calor, elevações no nível do mar e alterações na fauna e flora (ROCHA-FILHO & TOLENTINO, 1998; NIEHS, 2020);
2. O preço do petróleo é constantemente sujeito a oscilações decorrentes de questões geopolíticas, como ilustrado pela Figura 1.5, que mostra as variações do preço ao longo dos anos. A alta do petróleo prejudica principalmente os países que importam essa *commodity* (EFTEKHARI, 2019);
3. O petróleo é uma fonte de energia não renovável, ou seja, é previsto o esgotamento das reservas mundiais dessa matéria-prima (GAUTO & ROSA, 2011). Assim, fontes de energia renováveis devem ser buscadas, e;
4. Parte da energia obtida a partir da combustão é perdida na forma de calor e atrito, de modo que nem toda energia potencial é destinada à movimentação do veículo. Essas perdas são causadas por limitações dos componentes dos veículos (motor, transmissão etc.) e por questões termodinâmicas, uma vez que, de acordo com a segunda lei da termodinâmica, é impossível converter toda a energia potencial fornecida ao sistema em trabalho (COUTINHO *et al.*, 2010; FUEL ECONOMY).

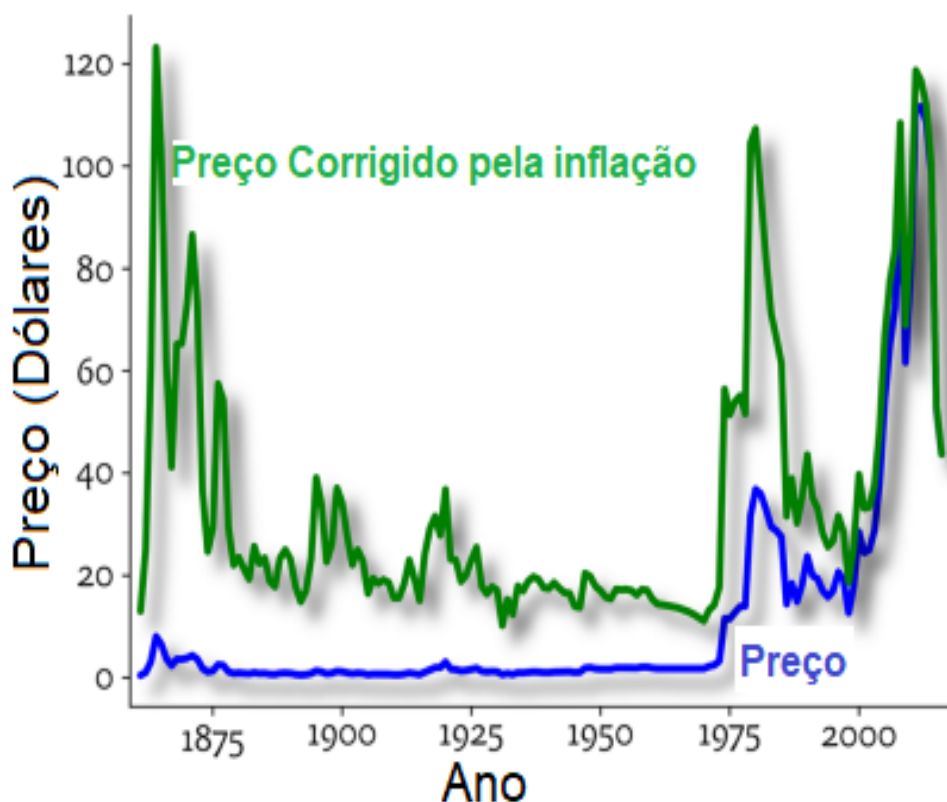


FIGURA 1.5 Oscilações do preço do petróleo ao longo de quase 150 anos. Fonte: Adaptado de EFTEKHARI, 2019.

Por essas razões, as lideranças mundiais têm buscado adotar fontes alternativas de energia. Dentre elas, destaca-se a eletrificação dos veículos, uma vez que não liberam gases que contribuem para o aquecimento global. Diversas pesquisas reportam que a adoção de políticas sustentáveis, tais como uso de energias renováveis (eólica, solar, de hidrelétricas e de biomassa) e a comercialização de veículos elétricos ajudaram a reduzir as emissões adicionais de dióxido de carbono (IEA, 2023a). Nesse sentido, a União Europeia tem a expectativa de que 100% das vendas de veículos movidos a combustíveis fósseis sejam banidos até 2035, enquanto montadoras como a Volkswagen preveem cessar a venda de motores a combustível até 2035 (REUTERS, 2021).

1.2.2) Definições

Os veículos elétricos caracterizam-se por apresentar um motor elétrico cuja energia é fornecida por uma bateria ou célula a combustível. Nesse sentido, há as seguintes classificações (BOCCHI *et al.*, 2010; COUTINHO *et al.*, 2010; ATKINS *et al.*, 2018; SANGUESA *et al.*, 2021; EPA, 2023):

1. Veículo Elétrico a Bateria (*Battery Electric Vehicle* - BEV): trata-se do veículo 100% movido a eletricidade, cujo motor elétrico é alimentado por uma bateria recarregável;
2. Veículo Elétrico Híbrido (*Hybrid Electric Vehicle* - HEV): apresenta um motor elétrico e um motor a combustão, sendo, portanto, movido tanto por eletricidade quanto por combustíveis, mas com uma eficiência energética superior à dos veículos a combustão devido às menores perdas energéticas. Alguns modelos de HEV podem ter sua bateria recarregada por energia elétrica da rede, sendo denominados como *Plug-in Hybrid Electric Vehicle* - (PHEV);
3. Veículo Elétrico a Célula a Combustível (*Fuel Cell Electric Vehicle* - FCEV): neste tipo de veículo elétrico, o motor elétrico é alimentado pela energia elétrica produzida a partir de uma célula a combustível, que, por sua vez, utiliza o hidrogênio e o oxigênio como reagentes, levando à formação de água como produto.

Os primeiros veículos elétricos tiveram seu surgimento no século XIX utilizando principalmente as baterias de chumbo-ácido e as de níquel-ferro. Ao longo dos anos, esses veículos foram perdendo espaço para os motores a combustão devido à descoberta de jazidas de petróleo no Texas, EUA aliada a produção em escala dos veículos por meio do fordismo e a demanda por veículos de maior autonomia. Esses fatores contribuíram para o aumento da procura pelos veículos a combustão, tornando-os mais baratos que os veículos elétricos (BARAN & LEGEY, 2011; U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2014).

Uma vantagem que os veículos elétricos proporcionam é o menor custo de rodagem em relação aos veículos a combustão. Os dados da Figura 1.6 fazem uma comparação do gasto necessário (em dólares) para percorrer 160 km utilizando dois carros 100% elétricos (Renault Kwid E-Tech e JAC E-SJ1), dois carros híbridos (Jeep Compass 4xe e Toyota Corolla Cross XRX Hybrid) e dois carros de motor a combustão (Renault Kwid Zen e Fiat Mobi Like). A comparação levou em consideração a capacidade energética da bateria dos veículos elétricos informada pelos fabricantes, o consumo de gasolina dos motores híbridos e a combustão, o preço da energia elétrica e o preço médio da gasolina na cidade de São Carlos. Os resultados indicam que o custo de abastecimento pode ser reduzido em pelo menos 14% ao realizar a transição dos motores a combustão para os motores híbridos. Ao comparar os motores a combustão com os motores 100% elétricos, os custos nestes últimos

são reduzidos no mínimo 51%. Os cálculos efetuados para a obtenção desses custos estão apresentados no Anexo A.

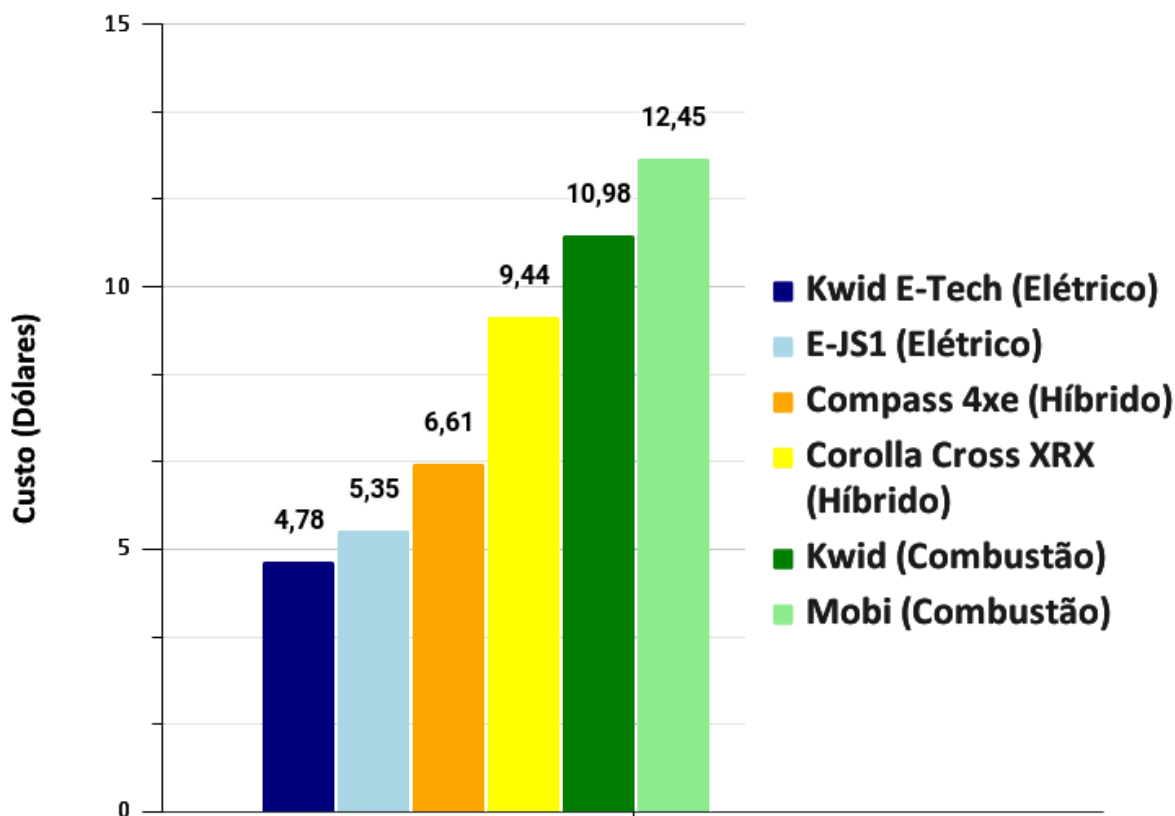


FIGURA 1.6 Comparação do custo (em dólares) para percorrer 160 km com dois modelos de carros a combustão, dois modelos de carros híbridos e dois modelos de carros 100% elétricos disponíveis no Brasil. Fonte: Próprio autor com dados do AUTOESPORTE, 2022; GARAGEM 360, 2022; JAC MOTORS; JEEP; RENAULT BRASIL e TOYOTA.

Ao considerar os custos de longo prazo, é fundamental levar em consideração o IPVA (Imposto sobre a Propriedade de Veículos Automotores), cuja alíquota varia de acordo com a legislação de cada Estado. No Distrito Federal, por exemplo, os BEVs e HEVs são isentos do imposto, ao passo que no Maranhão, a isenção contempla apenas os motores totalmente elétricos, enquanto em outros Estados, o imposto é aplicado para ambos os tipos de automóveis elétricos, como ocorre no Rio de Janeiro (JORNAL DO CARRO, 2024).

No Estado de São Paulo, a alíquota é de 4% para os veículos à passeio (combustão, elétricos e híbridos). Porém, na capital, há a restituição de 50% do IPVA para os BEVs e HEVs (JORNAL DO CARRO, 2024). Cabe destacar que na Assembleia Legislativa do Estado de São Paulo (Alesp) está em tramitação o Projeto de Lei nº 1510/2023, o qual

prevê a isenção do IPVA exclusivamente aos veículos híbridos e movidos a hidrogênio (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2023).

Dessa forma, tomando como base as alíquotas estabelecidas na cidade de São Paulo, pode-se estimar os custos de manutenção (em dólares) no primeiro ano de compra, que estão apresentados na Tabela 1.1. Além do IPVA, considerou-se também o gasto anual com o abastecimento ou recarregamento da bateria do veículo. Os resultados apresentados permitem concluir que os carros totalmente elétricos também são mais vantajosos ao considerar os gastos a longo prazo, com redução percentual mínima de 18%. No entanto, para os veículos elétricos híbridos, em consequência do preço de venda dessa categoria de veículo ser muito elevado (acima de US\$ 40.000), os custos são pelo menos 35% superiores ao dos veículos à combustão. Detalhes sobre os cálculos dos custos a longo prazo são encontrados no Anexo B.

TABELA 1.1. Gasto a longo prazo em dólares de dois modelos de carros 100% elétricos, dois modelos de carros híbridos e de dois modelos de motor a combustão interna na cidade de São Paulo.

Montadora / Veículo	Tipo de Veículo	Gasto IPVA + abastecimento anual (US\$)
Renault / Kwid E-Tech	BEV	552,31
JAC / E-JS1	BEV	572,83
Jeep / Compass 4xe	HEV	1471,36
Toyota / Corolla Cross XRX Hybrid	HEV	958,92
Renault / Kwid Zen	Combustão	702,44
Fiat / Mobi Like	Combustão	709,67

Fonte: Próprio autor com dados de FIAT MOBI; JAC MOTORS; JEEP; JORNAL DO CARRO, 2024; RENAULT BRASIL e TOYOTA.

1.2.3) Dados Econômicos dos Veículos Elétricos

As vendas anuais de carros elétricos na Europa e outros países estão apresentadas na Figura 1.7, com destaque para a China na liderança de vendas, sendo o país

com a maior circulação de veículos elétricos no mundo. A projeção é que cerca de 14 milhões de carros elétricos sejam vendidos até o final do ano de 2023 (IEA, 2023b).

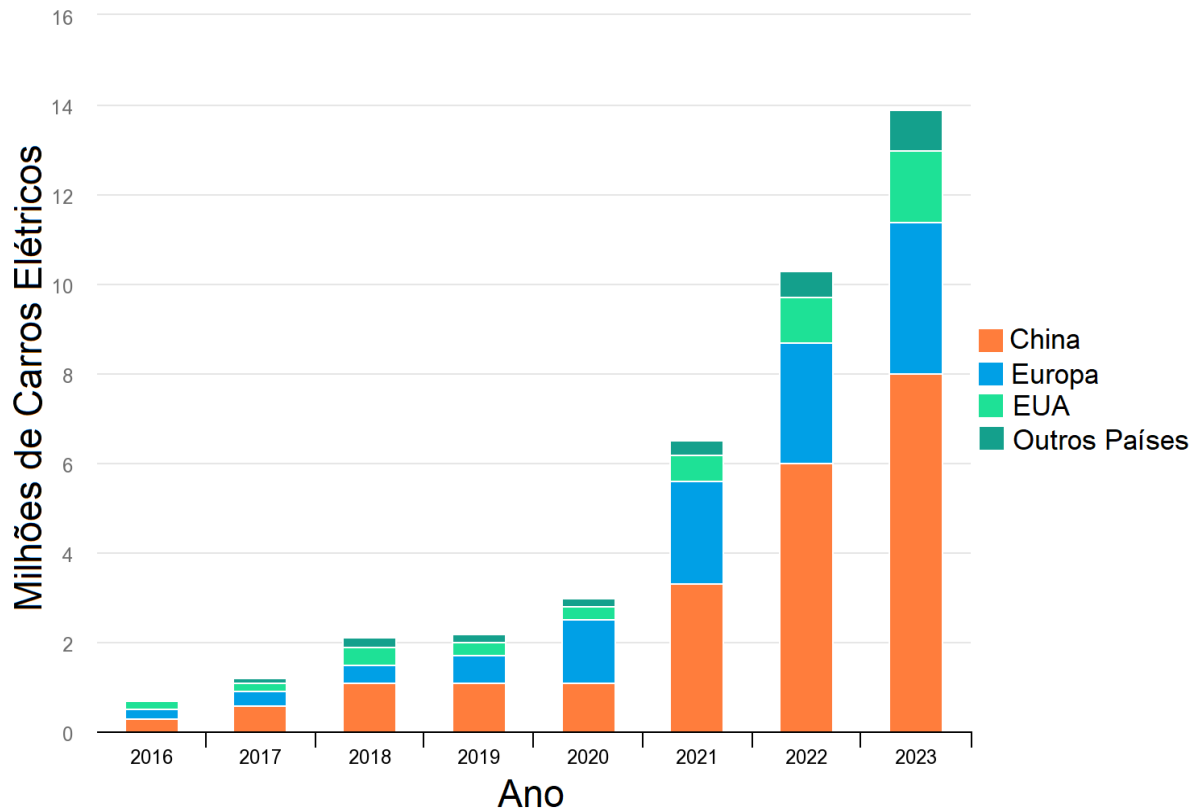


FIGURA 1.7 Vendas de carros elétricos (em milhões) na Europa, China, EUA e outros países desde 2016. Fonte: Adaptada de IEA, 2023b.

Concomitantemente, o número de modelos dos veículos elétricos vem crescendo ao longo dos últimos anos, tendo atingido 500 modelos em 2022, dos quais 60% correspondem aos SUVs por proporcionarem maiores lucros às montadoras e por cobrir parte dos investimentos feitos no desenvolvimento de opções elétricas (IEA, 2023c).

Entretanto, o número de modelos de veículos elétricos disponíveis no mercado ainda é pouco significativo em comparação com o de veículos movidos a combustão interna, que chegaram a mais de 1250 modelos no ano de 2022. Apesar disso, é notada uma pequena diminuição do número de modelos de veículos a combustão disponíveis no mercado, conforme apresentado na Figura 1.8 (IEA, 2023c).

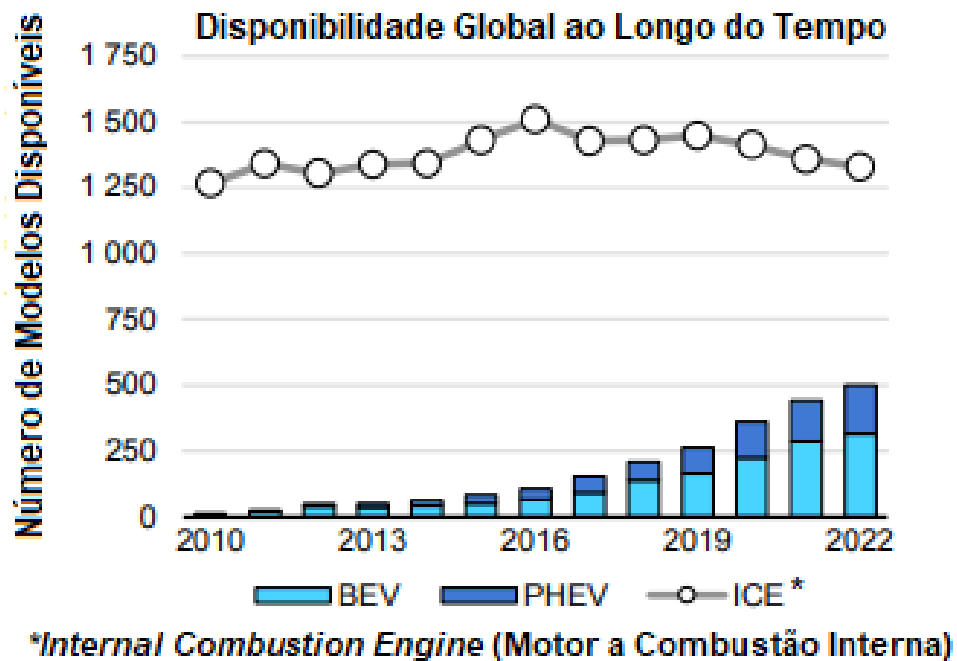


FIGURA 1.8 Modelos de veículos a combustão e elétricos entre os anos de 2010 e 2022.
Fonte: Adaptada de IEA, 2023c.

As representações da Figura 1.9 comparam o custo médio de aquisição em dólares (esquerda) e a autonomia em quilômetros (direita) de quatro diferentes categorias de veículos elétricos (pequenos, médios, SUVs e *crossovers* e grandes) disponíveis na China, Europa e Estados Unidos. A China se destaca por ter todas essas categorias de veículos elétricos com os menores preços mundiais, atingindo no máximo 40 mil dólares devido ao forte investimento governamental desde a extração dos minerais até a fabricação dos veículos. Desta mesma figura, fica evidente que os carros pequenos, devido ao menor tamanho da bateria em comparação com outras categorias de veículos, são os que proporcionam menor autonomia (IEA, 2023c).

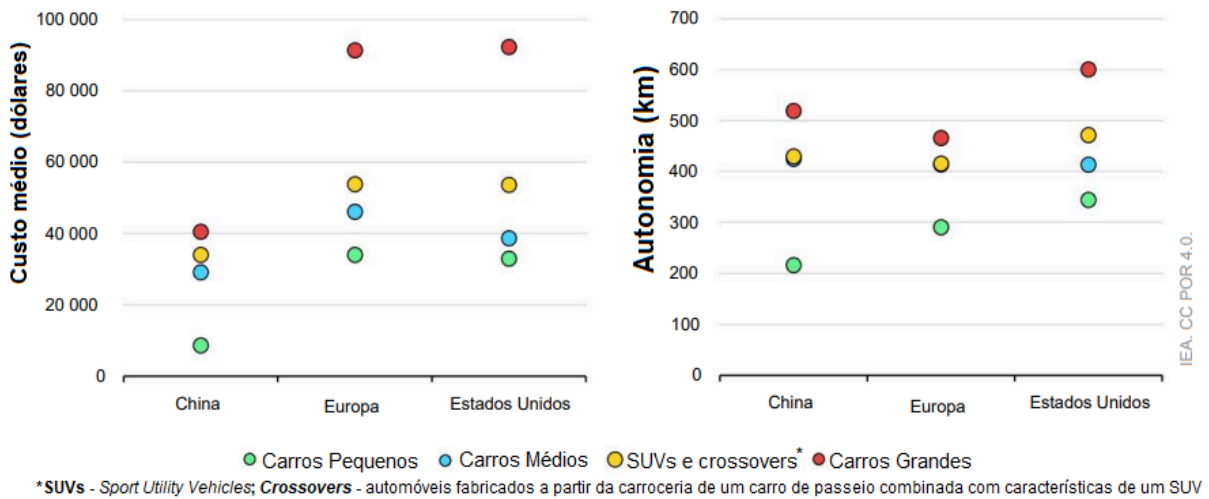


FIGURA 1.9 Custo médio de aquisição em dólares (esquerda) e autonomia em quilômetros (direita) de quatro diferentes categorias de veículos elétricos disponíveis na China, Europa e Estados Unidos. Fonte: Adaptada de IEA, 2023c.

1.2.4) Baterias e Veículos Elétricos

A expansão do número de veículos elétricos no mundo tem incentivado o desenvolvimento e demanda das baterias de íons lítio. A Figura 1.10 mostra o crescimento da demanda das baterias de íons lítio para uso em veículos elétricos leves, ônibus e caminhões. Estima-se que, até 2040, a demanda global de lítio aumentará 40 vezes em relação ao ano de 2020 como consequência da implantação de leis que proíbam a venda de veículos a combustível (IEA, 2021a).

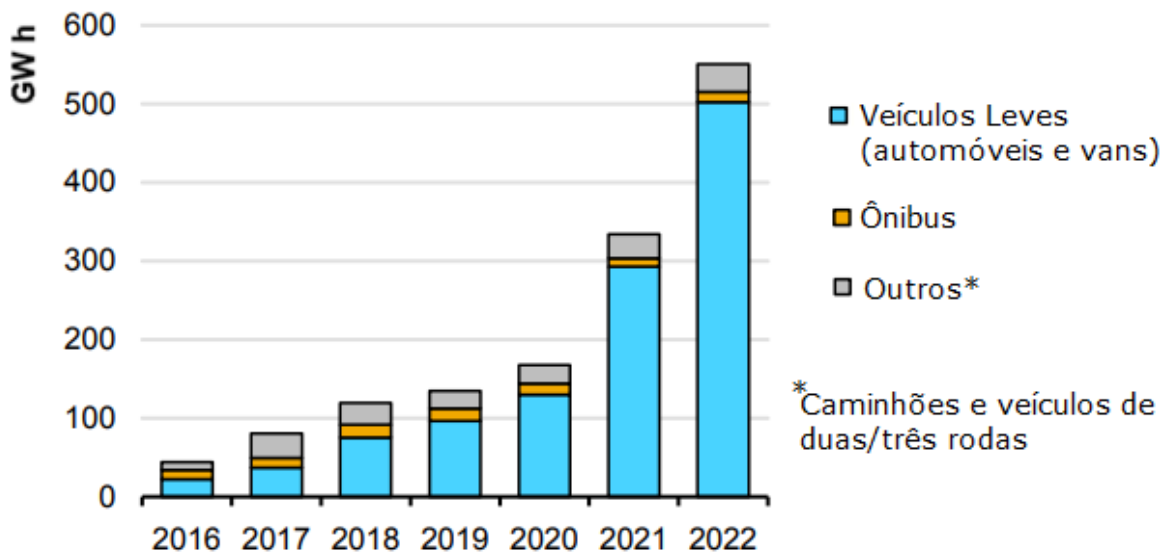


FIGURA 1.10 Evolução da demanda de baterias de íons lítio em veículos elétricos de três categorias. Fonte: Adaptada de IEA, 2023c.

Como já citado, além do lítio, outros minerais são usados na fabricação das baterias, motores e outros componentes, tais como níquel, cobalto, ferro, alumínio e grafite, essenciais para a otimização da performance da bateria, bem como terras raras para a fabricação de ímãs permanentes. Tendo em vista esse fato, a participação dos três principais países produtores mundiais na extração do lítio e demais minerais no ano de 2022 está ilustrada no gráfico da Figura 1.11 (IEA, 2023d).

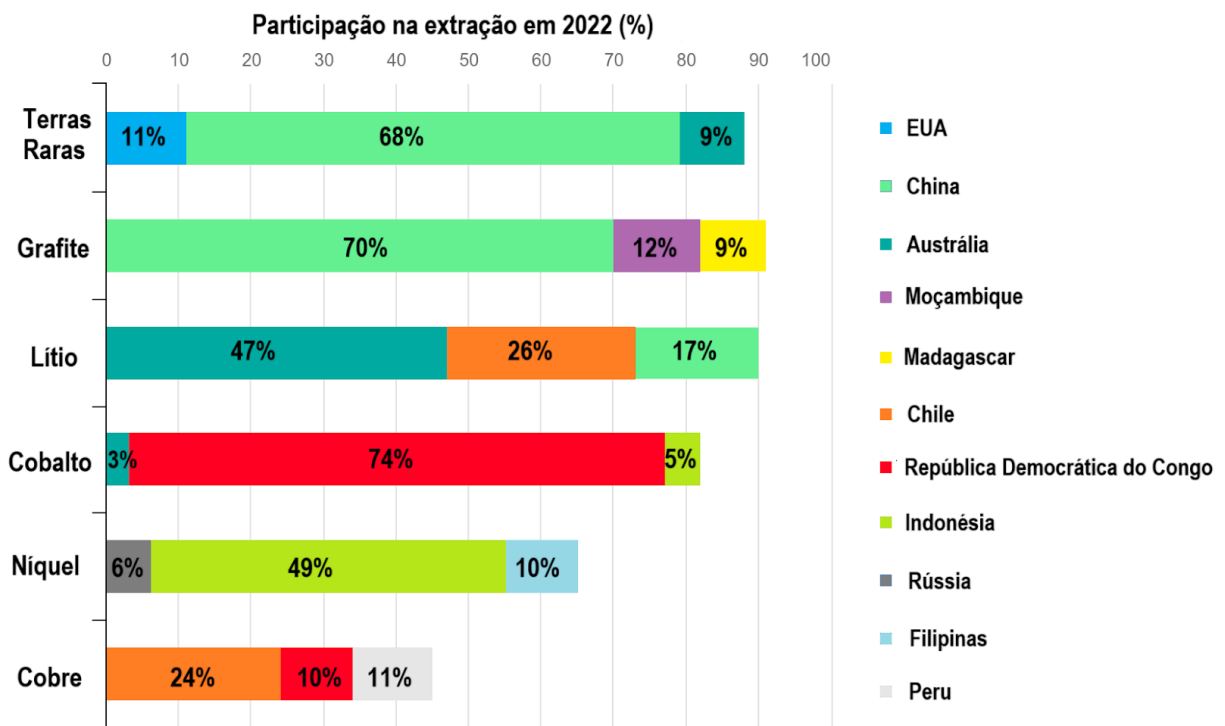


FIGURA 1.11 Participação dos três principais países produtores na mineração de alguns minerais selecionados em 2022. Fonte: Adaptado de IEA, 2023d.

Nesse contexto, a Figura 1.12 faz uma comparação das quantidades necessárias de minerais em um veículo convencional e um veículo elétrico. Este último possui uma bateria que utiliza o NMC (622) como material de eletrodo positivo, carbono grafite como material de eletrodo negativo e capacidade de armazenamento de 75 kW h (IEA, 2021b). A análise da Figura permite concluir que alguns desses minerais adicionais não são comumente utilizados nos veículos convencionais. Ainda, minerais como o cobre e manganês são

necessários em uma quantidade maior que o dobro em relação aos veículos convencionais. Ademais, ao comparar entre as categorias de tamanho dos veículos elétricos, as baterias dos SUVs elétricos são duas vezes maiores que as de carros elétricos médios, exigindo 75 % a mais de minerais metálicos (lítio, cobalto, níquel, alumínio, manganês, ferro etc.) e não metálico (grafite) e outros materiais (plásticos) necessários para a produção dos demais componentes do veículo (IEA, 2023c).

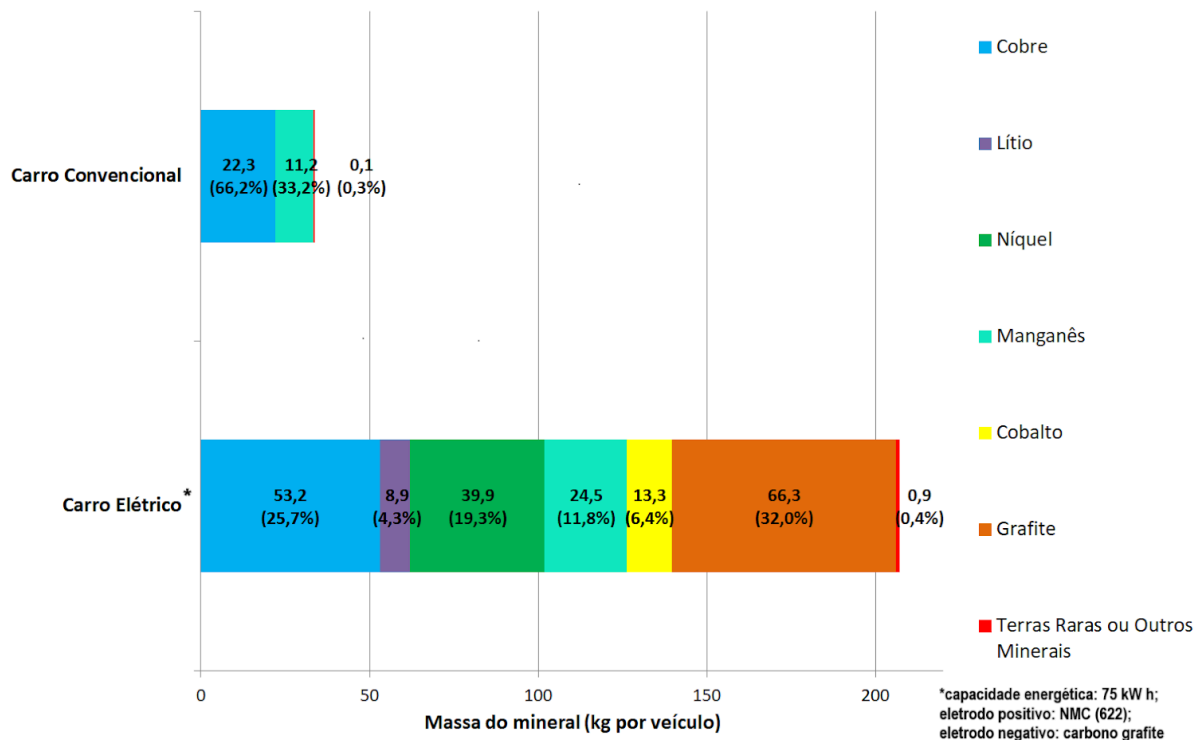


FIGURA 1.12 Comparação das quantidades necessárias de minerais (em kg por veículo) para a produção de baterias, motores e outros componentes dos veículos convencionais e elétricos.

Fonte: Adaptada de IEA, 2021b.

No Brasil, em maio de 2023, o Ministério das Minas e Energia (MME) lançou o projeto “Vale do Lítio”, que visa atrair investimentos para a exploração do lítio na região do Vale do Jequitinhonha, em Minas Gerais. É reportado que o lítio brasileiro possui alta pureza, exigindo menos água para a extração em comparação com o de outros países. Ainda, segundo o Serviço Geológico do Brasil, órgão vinculado ao MME, o potencial do lítio nessa região é cerca de 20 vezes maior que em outras regiões brasileiras (MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA, 2023).

1.2.5) Sistemas de Carregamento dos Veículos Elétricos

Como as baterias perdem sua carga elétrica ao longo do uso, faz-se necessário a implementação de sistemas de carregamento que podem ser de uso individual ou público. Esses dispositivos são divididos em carregadores lentos e rápidos, a depender da potência fornecida. Os carregadores lentos são aqueles que fornecem uma potência inferior a 22 kW, ao passo que os carregadores rápidos fornecem potências entre 22 kW e 350 kW. A Figura 1.13 ilustra a evolução do número de carregadores públicos instalados ao longo dos anos, com destaque para a China. A implementação dessas estações é essencial para que haja a adoção dos veículos elétricos pelos consumidores, visto que uma das barreiras que impedem a adoção do consumidor por um veículo elétrico é a sua autonomia, principalmente quando o veículo deverá percorrer grandes distâncias (IEA, 2023c).

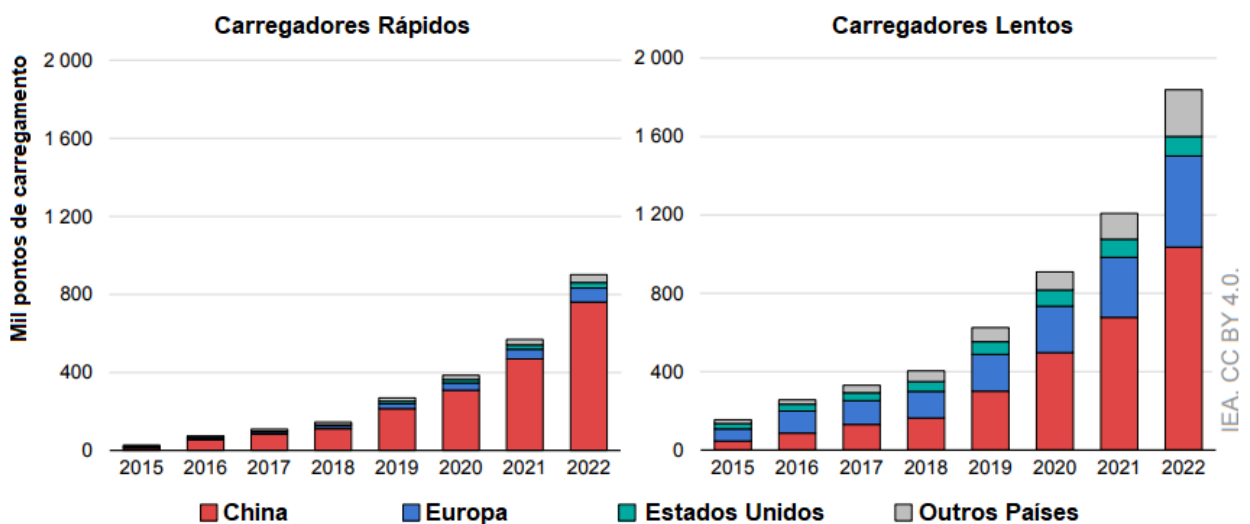


FIGURA 1.13 Número de pontos de carregamento públicos ao longo do tempo. Fonte: Adaptada de IEA, 2023c.

Além das estações de carregamento, outra estratégia é a troca da bateria descarregada por uma carregada, cujo esquema é mostrado na Figura 1.14. Essa prática tem as seguintes vantagens quando comparada com a recarga das baterias (MIAO *et al.*, 2019):

1. A troca é realizada de maneira rápida, levando, em média, 5 min e;
2. A troca evita o desgaste das baterias, uma vez que o carregamento em taxas aceleradas é responsável pela redução da sua vida útil.

Entretanto, as estações de troca de bateria possuem como desvantagens a necessidade de baterias extras para serem repostas nos veículos, o que afeta a demanda dos minerais usados na produção das baterias. Além disso, essas estações devem atender as diversas marcas e modelos de automóveis elétricos existentes que possuem baterias de tamanhos e composições distintas (IEA, 2023c).

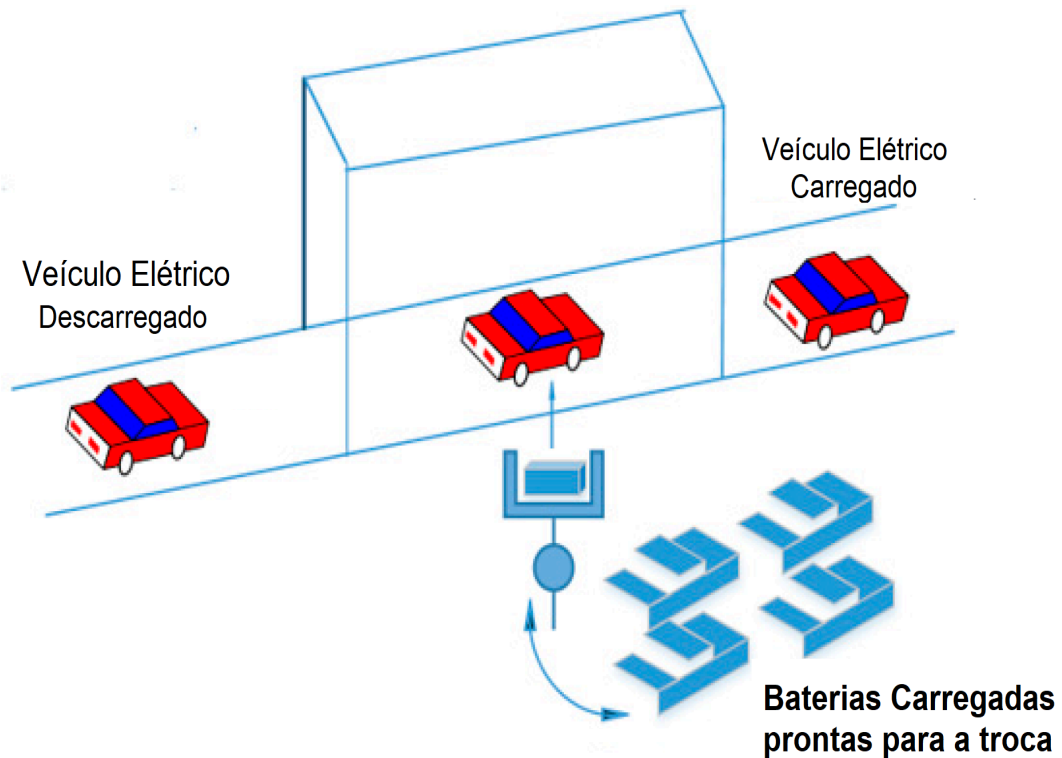


FIGURA 1.14 Esquema de uma estação típica de troca de baterias. Fonte: Adaptado de ADEGBOHUN *et al.*, 2019.

1.2.6) Sistemas de Gerenciamento de Baterias

As baterias têm o risco de gerar fenômenos indesejados, afetando seu desempenho e podendo comprometer a segurança do motorista. A fim de evitar essas ocorrências, os sistemas de gerenciamento das baterias (BMS - *Battery Management System*) são empregados. Trata-se de um circuito eletrônico introduzido na célula eletroquímica gerenciado por algoritmos que avaliam a corrente elétrica, tensão, temperatura e carga elétrica da bateria, além de realizar o diagnóstico de falhas. Assim, em situações de anormalidades, como temperaturas elevadas, sobrecargas ou curto-circuito, esses algoritmos desabilitarão a bateria (ROSOLEM *et al.*, 2012; DA SILVA, 2022; EMBARCADOS, 2023a).

Para que um BMS realize essas funções corretamente, faz-se necessário o desenvolvimento de algoritmos sofisticados que identifiquem precisamente possíveis condições de risco (EMBARCADOS, 2023a).

1.2.7) Veículos Elétricos no Brasil

No Brasil, a demanda pelos veículos elétricos é menor que em outros países, mas se apresenta em constante evolução, como mostra a Figura 1.15 que apresenta o número de veículos elétricos emplacados anualmente. Segundo a Associação Brasileira do Veículo Elétrico (ABVE), até novembro de 2023 foram registrados 77.648 veículos elétricos, dos quais 13.292 são BEV, ultrapassando o total de automóveis registrados no ano de 2022. Ao todo, há mais de 200 mil veículos elétricos em circulação pelo país atualmente (ABVE, 2023a).

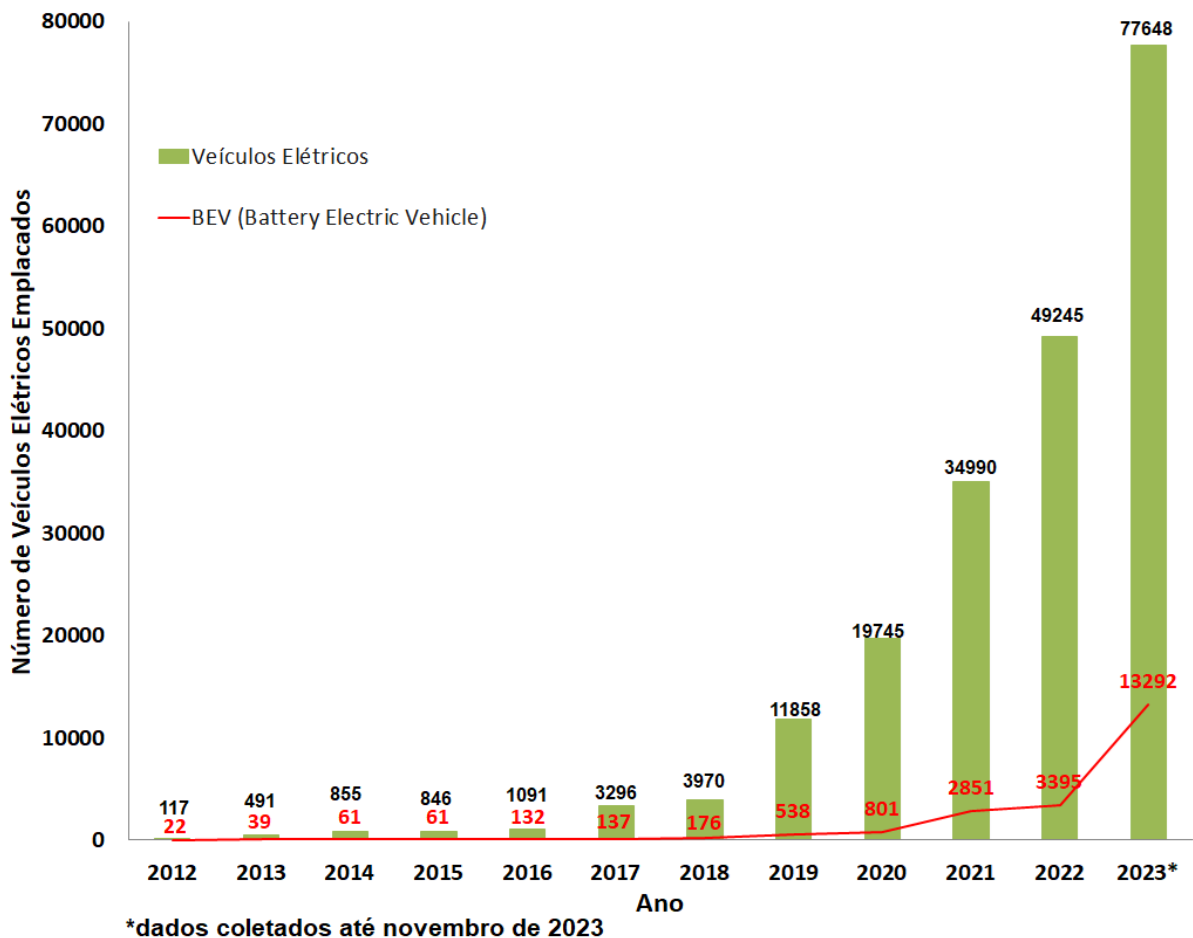


FIGURA 1.15 Evolução do número de veículos elétricos emplacados no Brasil. Fonte: Próprio autor com dados da ABVE, 2023a.

Com relação aos postos de carregamento de baterias, há 3.800 eletropostos públicos e semipúblicos instalados no país até agosto de 2023. Esse número representa um crescimento de 28% em relação ao mesmo período do ano de 2022 (ABVE, 2023b).

Dentre as estações de carregamento de baterias disponíveis no Brasil, as da empresa Zletric são as de maior número com mais de 700 pontos de carregamento distribuídos em 14 estados e 51 cidades, conforme ilustrado na Figura 1.16. Essas estações estão divididas em 3 categorias (ZLETRIC):

1. Zletric Home: sistema de carregamento para uso doméstico ou compartilhado no caso de condomínios;
2. Zletric Network: estações de recarga localizadas nas cidades, abrangendo postos de abastecimento, supermercados, *shoppings* ou estacionamentos. O carregamento do veículo nesses locais pode ser gratuito ou ter um custo de R\$ 1,99 por kW h e;
3. Zletric Fast: pontos de carregamento, localizados em centros de conveniência das rodovias, destinados aos motoristas que percorrem longas distâncias. Assim como na estação Zletric Network, a recarga nesses locais pode ser gratuita ou ter um custo de R\$ 1,99 por kW h.

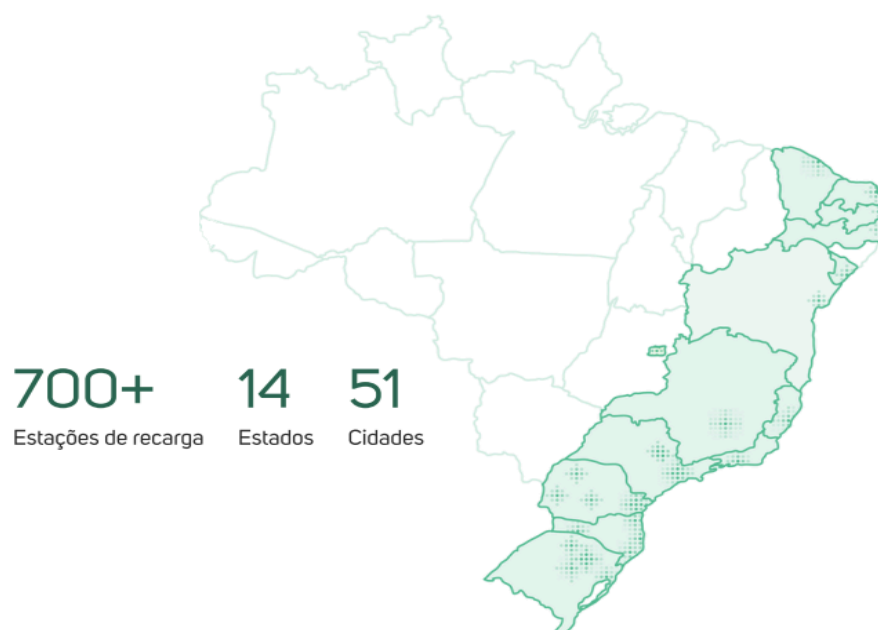


FIGURA 1.16 Estados em que a empresa Zletric dispõe, atualmente, de estações de carregamento de baterias no Brasil. Fonte: Adaptado de ZLETRIC, 2023.

Em fevereiro de 2023, um projeto de lei (PL 392/2023) proposto no Senado Federal prevê a implementação de pontos de recarga nos postos de abastecimentos localizados nas rodovias federais. Atualmente, o projeto encontra-se em análise por comissão do Senado e, caso aprovado, a legislação obrigará a instalação dos pontos de recarga pelos postos de abastecimento em até 12 meses, contando a partir da data de vigência da lei. Tal medida visa estimular a adoção de veículos elétricos no país (RÁDIO SENADO, 2023).

1.3) Baterias

1.3.1) Aspectos Gerais das Baterias

Do ponto de vista da Termodinâmica, a variação da energia livre de Gibbs equivale ao trabalho máximo diferente do de expansão sob pressão e temperatura constantes, (w_{extra}), conforme a Equação 1.1. O trabalho, por sua vez, é definido como o processo de transferência de energia devido à mudança de parâmetros externos que descrevem o sistema. Nesse sentido, uma das formas de trabalho máximo de não expansão é o trabalho elétrico o qual envolve o fluxo de z elétrons quando uma diferença de potencial ($\Delta E_{\text{célula}}$) é aplicada na célula eletroquímica, conforme a Equação 1.2, sendo F a constante de Faraday (ATKINS *et al.*, 2018; PECKHAM & MCNAUGHT, 1993).

$$\Delta_r G = w_{\text{extra}} \quad (1.1)$$

$$\Delta_r G = -zF\Delta E_{\text{célula}} \quad (1.2)$$

Sistemas nos quais o trabalho elétrico é fornecido para a realização de uma reação de oxirredução não espontânea são denominados de células eletrolíticas, sendo empregados, por exemplo, nas indústrias de cloro-soda e de alumínio. Por outro lado, processos em que uma reação de oxirredução espontânea fornece trabalho elétrico são denominados de células galvânicas, conforme o esquema mostrado na Figura 1.17 (ATKINS *et al.*, 2018).



FIGURA 1.17 Células eletroquímicas usadas para a interconversão de energias química e elétrica. Fonte: Próprio autor.

Dentre as células galvânicas, as pilhas e baterias têm sido aplicadas nos dispositivos eletrônicos, como *notebooks*, computadores, celulares, controles remotos e veículos. Por definição, uma pilha é constituída por dois condutores eletrônicos denominados de catodo e anodo e um condutor iônico conhecido como eletrólito, enquanto a bateria corresponde ao conjunto de pilhas associadas em série ou em paralelo com o intuito de se obter maior potencial ou corrente, respectivamente (TICIANELLI & GONZALEZ, 2005; ATKINS *et al.*, 2018; BOCCHI *et al.*, 2000).

As baterias são classificadas em dois tipos: primárias e secundárias. Uma bateria primária não apresenta capacidade de recarga após seu descarregamento total, sendo imediatamente descartada, a exemplo das pilhas zinco/dióxido de manganês. Por outro lado, uma bateria secundária é um sistema eletroquímico que possui a capacidade de ser recarregado como a bateria de chumbo-ácido. Portanto, no processo de descarregamento ela opera como uma célula galvânica e no processo de recarga, como uma célula eletrolítica na qual há a inversão dos polos: o catodo é o polo negativo e o anodo, o polo positivo. Segundo BOCCHI *et al.* (2000), uma bateria é considerada recarregável quando é capaz de suportar, no mínimo, 300 ciclos completos de carregamento e descarregamento, com pelo menos 80% da sua capacidade de armazenamento de carga elétrica inicial.

1.3.2) Baterias de Chumbo-Ácido

Inventada pelo francês Gaston Planté em 1859, a bateria de chumbo-ácido é a mais utilizada atualmente nos veículos em geral, sendo responsável pelo faturamento de aproximadamente 33 bilhões de dólares no ano de 2021 nos Estados Unidos (BEARD, 2019;

BCI, 2023). Um esquema desta bateria é apresentado na Figura 1.18, sendo constituída pelos seguintes componentes (TICIANELLI & GONZALEZ, 2005; PAVLOV, 2011; BEARD, 2019):

1. Eletrodo positivo: consiste de dióxido de chumbo na forma ortorrômbica e tetragonal, onde ocorre a reação de redução durante o descarregamento, formando sulfato de chumbo. A grade onde é aplicado o dióxido de chumbo é constituída de ligas de chumbo que possuem a função de aumentar a resistência mecânica e à corrosão, além de proporcionar boa condutividade elétrica. Dentre as ligas usadas para esse fim, destacam-se as ligas de chumbo-antimônio, chumbo-cálcio e chumbo-estrôncio;
2. Eletrodo negativo: trata-se de um eletrodo de chumbo metálico que é oxidado a sulfato de chumbo durante o descarregamento da bateria;
3. Eletrólito: trata-se de uma solução de ácido sulfúrico, cuja concentração deve ser ajustada de forma a garantir uma boa condutividade iônica e, ao mesmo tempo, não causar a corrosão dos demais componentes da bateria, evitando, assim, a redução da vida útil da bateria.

As reações que ocorrem nos eletrodos positivo e negativo, bem como a reação global, estão apresentadas nas equações (1.3), (1.4) e (1.5), respectivamente, onde o descarregamento é representado pela reação direta e o carregamento, pela inversa. Como uma única pilha de chumbo-ácido fornece um potencial de célula de 2 V, 6 pilhas são ligadas em série a fim de se obter um potencial de 12 V, que é utilizado nos veículos em geral (TOMA, 2013; PLETCHER & WALSH, 1990).

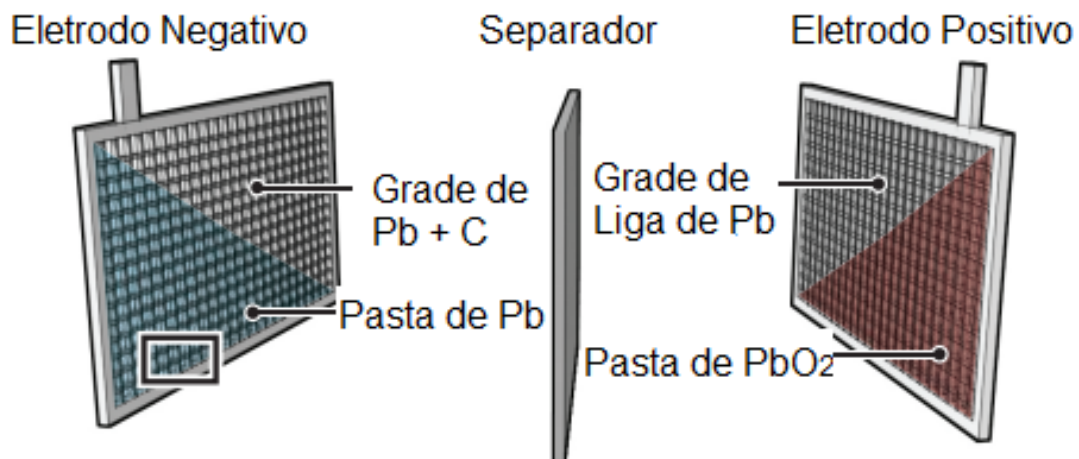
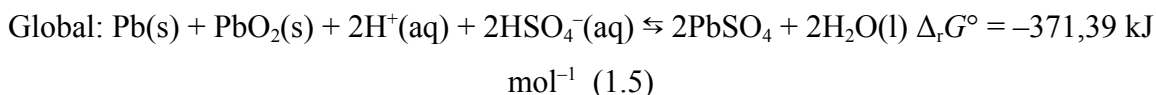
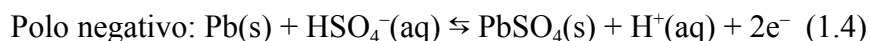


FIGURA 1.18 Componentes da bateria de chumbo-ácido. Fonte: Adaptado de LOPES & STAMENKOVIC, 2020.



Essas baterias empregam chumbo em sua composição, cuja exposição pode ocasionar problemas neurológicos, disfunção renal e danos cardiovasculares na saúde humana. Ainda, quando descartado de forma inadequada, esse metal prejudica o meio ambiente, contaminando lençóis freáticos e a atmosfera terrestre com óxidos de chumbo e chumbo particulado quando incinerado (FLORA *et al.*, 2012). Entretanto, nos Estados Unidos e Brasil, a reciclagem dessas baterias é um processo seguro e estabelecido há muito tempo, apresentando uma taxa de reciclagem de 99%, sendo que seus três principais componentes – ácido sulfúrico, chumbo metálico e plástico - são completamente recicláveis. A Figura 1.19 ilustra a comparação das taxas de reciclagem das baterias de chumbo-ácido nesses dois países com outros produtos usados no dia-a-dia. Segundo a *Battery Council International*, mais de 160 milhões de baterias são recicladas anualmente nos Estados Unidos, permitindo que o chumbo seja recuperado e reutilizado de forma responsável e sem perda de desempenho, evitando a contaminação do meio ambiente e a acumulação em aterros sanitários (BATTERY COUNCIL INTERNATIONAL).

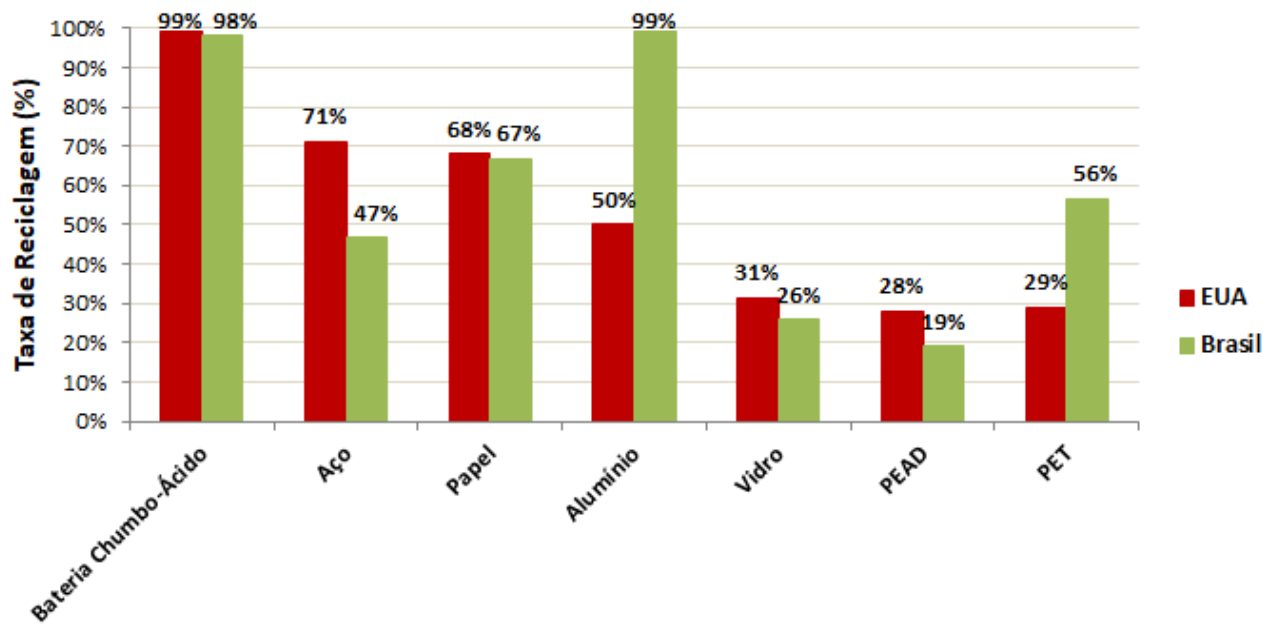
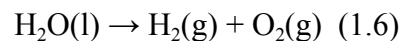


FIGURA 1.19 Taxa de reciclagem de alguns materiais selecionados, nos Estados Unidos e no Brasil. Fonte: Próprio autor com dados de EPA, 2020; CEMPRES 2023; ABIPET, 2019 e CARNEIRO *et. al*, 2017.

Uma das desvantagens dessa bateria é a eletrólise da água durante a recarga, formando os gases hidrogênio e oxigênio, conforme a Equação 1.6. Essa perda de água contribui para a redução da vida útil do dispositivo. Células modernas empregam um eletrólito gelatinoso, minimizando as perdas por evaporação durante o seu funcionamento (BEARD, 2019; TOMA, 2013).



Outra desvantagem é a existência de um sobrepotencial de nucleação, apresentado na Figura 1.20, decorrente do crescimento de cristais de sulfato de chumbo (PbSO_4) a partir do material ativo (Pb), sendo responsável por uma queda brusca no potencial da bateria durante seu descarregamento (PLETCHER & WALSH, 1990).

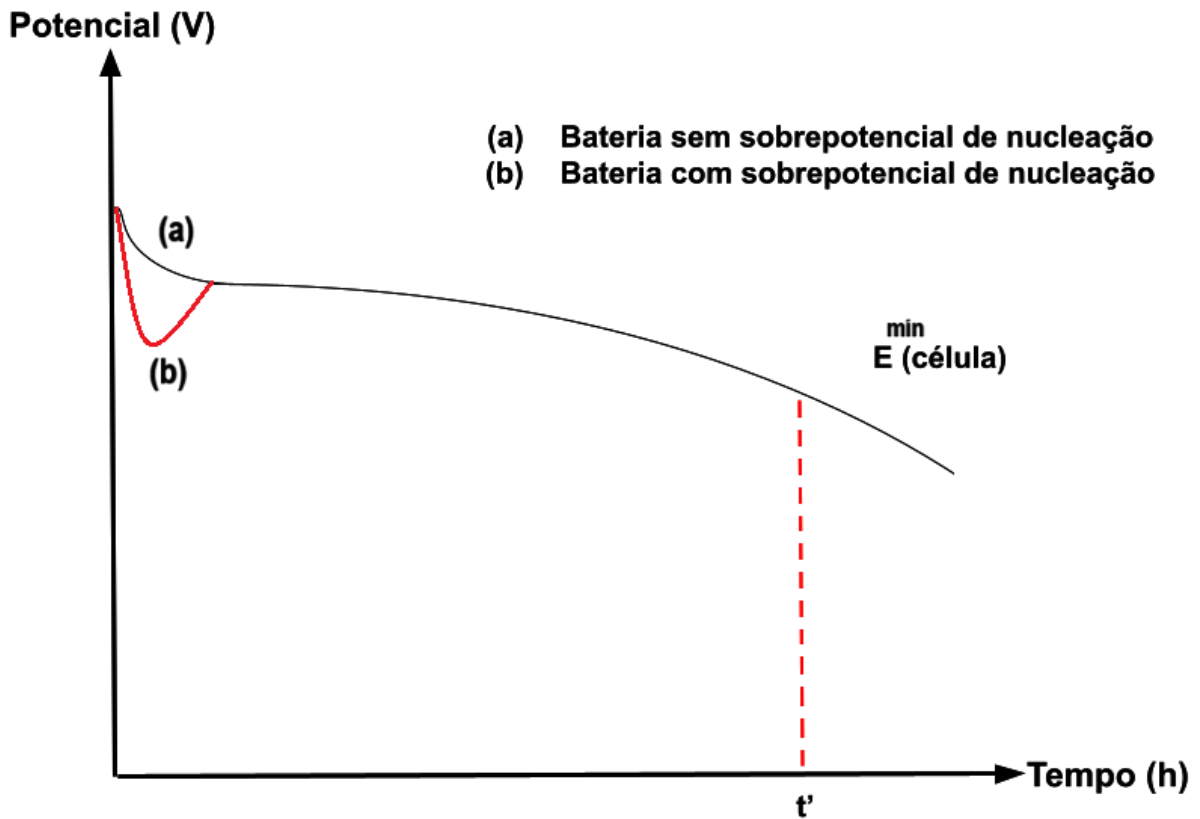


FIGURA 1.20 Curva de potencial em função do tempo a corrente constante para: (a) bateria sem sobrepotencial de nucleação; (b) bateria com sobrepotencial de nucleação. Fonte: Próprio autor, adaptado de PLETCHER & WALSH, 1990.

As imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) da fase de PbSO_4 estão apresentadas na Figura 1.21 em que há uma mudança brusca da morfologia do eletrodo de chumbo para a formação de cristais insolúveis de sulfato de chumbo. Esta espécie química é uma fase não condutora que torna o processo de recarga mais difícil do ponto de vista cinético e termodinâmico, ocasionando a redução da vida útil da bateria e a corrosão dos eletrodos de chumbo (LOPES & STAMENKOVIC, 2020; PLETCHER & WALSH, 1990). Assim, novas pesquisas desde então têm buscado minimizar a formação dessa fase por meio da adição de aditivos de carbono que contribuem para a formação de cristais de tamanho reduzido, além de aumentarem a condutividade e o ciclo de vida (JAISWAL & CHALASANI, 2015; LACH *et al.*, 2019).

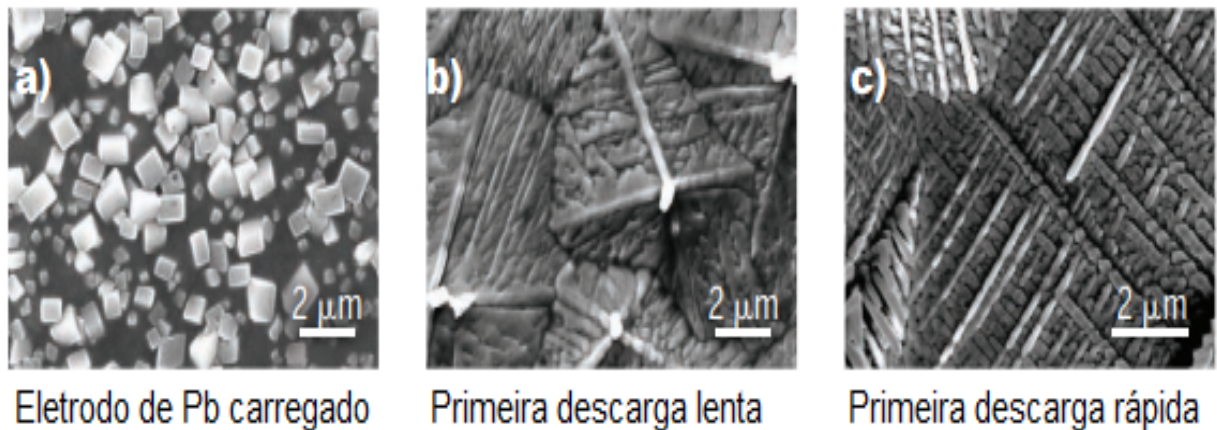


FIGURA 1.21 Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura para um eletrodo de Pb: (a) no estado carregado; (b) após descarregamento lento e (c) após descarregamento rápido, formando a fase não condutora de sulfato de chumbo. Fonte: Adaptado de LOPES & STAMENKOVIC, 2020.

Um parâmetro importante para avaliar o desempenho de uma bateria é a energia específica, que expressa a quantidade de energia elétrica que pode ser obtida por massa de bateria. Assim, baterias de menor energia específica são mais pesadas, ao passo que baterias de maior energia específica são mais leves.

Nesse sentido, a energia específica teórica da bateria de chumbo-ácido pode ser calculada através da energia livre de Gibbs associada à reação global (equação 1.5), a qual é obtida pelos dados tabelados da energia livre de Gibbs de formação ($\Delta_f G^\circ$) que podem ser encontrados no Anexo C. Da equação 1.2, é possível obter o potencial da célula de 1,9246 V. A aplicação das equações (1.7) e (1.8), resulta na energia específica teórica de 170,09 W h kg⁻¹ (equação 1.9). Entretanto, ao comparar esse valor com os dados experimentais contidos na Tabela 1.2, apenas 43 W h kg⁻¹ são fornecidos pela bateria, resultando num fator de célula de 25 %. As perdas de energia são decorrentes da polarização dos eletrodos que surge quando a corrente elétrica circula pela bateria. A polarização é quantificada por meio de distintos sobrepotenciais, responsáveis pela diferença entre os valores do potencial de célula em operação e do potencial de célula no equilíbrio (situação na qual a corrente é nula) (UE *et al.*, 2020).

$$Q = (2 \text{ mol } e^-) \times (96485 \text{ C/1 mol } e^-) \times (1 \text{ h/3600 s}) = 53,603 \text{ A h} \quad (1.7)$$

$$E_{\text{elétrica}} = (53,603 \text{ A h}) \times (1,9246 \text{ V}) = 103,16 \text{ W h} \quad (1.8)$$

$$\text{Energia Específica} = (103,16 \text{ W h}/2 \times 303,26 \text{ g mol}^{-1}) \times (10^3 \text{ g}/1 \text{ kg}) = 170,09 \text{ W h kg}^{-1} \quad (1.9)$$

TABELA 1.2. Energia Específica (teórica e experimental) e fator de célula para diversas baterias recarregáveis.

Bateria	Energia Específica (W h kg ⁻¹)		Fator de Célula (%)
	Teórica	Experimental	
Pb/2H ₂ SO ₄ /PbO ₂	175	43	25
Cd/2NiOOH	245	45	18
MH/NiOOH	228	100	44
Na/1.5S	784	226	29
C ₆ /LiCoO ₂	694	291	42
C ₆ /LiMn ₂ O ₄	456	147	32
C ₆ /LiNi _{0.8} Co _{0.15} Al _{0.05} O ₂	669	249	37
C ₆ /LiNi _{0.6} Co _{0.2} Mn _{0.2} O ₂	682	245	36
C ₆ /LiFePO ₄	408	152	37

Fonte: Adaptado de UE *et al.*, 2020.

Dessa forma, as baterias de chumbo-ácido são aplicadas em alguns veículos elétricos de pequeno porte, tais como *scooters*, motocicletas, patinetes, bicicletas, empilhadeiras e carros. Nesses casos, não há exigências por autonomies elevadas, de modo que o uso dessas baterias é mais vantajoso que as demais devido ao menor custo (ERBER, 2010).

Nos veículos elétricos híbridos, esses dispositivos são usados no motor de partida do motor à combustão e, em outros veículos elétricos, nas funções secundárias como, por exemplo, as travas, janelas e faróis, fornecendo energia a esses sistemas mesmo quando o veículo está desligado (UPS BATTERY CENTER, 2022a; ENERGYSAGE, 2022). Apesar dos veículos elétricos utilizarem as baterias de íons lítio para o funcionamento do motor elétrico, elas não são aplicadas nas funções secundárias pelos seguintes motivos (EMBARCADOS, 2023b):

1. Requer um conversor CC/CC que possui a função de converter a tensão de 400 V da bateria de íon lítio em 12 V. O custo desse dispositivo é mais elevado do que uma bateria de chumbo-ácido e;
2. Esse sistema de conversão deve ser robusto, a fim de garantir a segurança do motorista e dos passageiros;

1.3.3) Baterias de Íons Lítio (BILs)

Com o intuito de atingir um maior fator de célula, e, ao mesmo tempo, não serem nocivas ou menos nocivas ao ambiente, novas baterias têm sido estudadas. Dentre essas candidatas a substituir a bateria de chumbo-ácido, destacam-se as baterias de íons lítio, cujas pesquisas e descobertas levaram à premiação dos cientistas John Goodenough, Stanley Whittingham e Akira Yoshino com o Prêmio Nobel de Química no ano de 2019 (BOCCHI *et al.*, 2019).

O lítio é um metal alcalino localizado no primeiro grupo da tabela periódica, com densidade igual a $0,53 \text{ g cm}^{-3}$, sendo, portanto, um metal mais leve que a água, proporcionando a confecção de dispositivos mais leves e de dimensões menores. Entretanto, esse elemento químico possui como desvantagens a alta reatividade com a água e ar e a sua baixa abundância. Portanto, o desenvolvimento das baterias de íons lítio deve levar em consideração a segurança para o consumidor e a reciclagem do material após o término da sua vida útil, de modo a reduzir a geração de lixo eletrônico e a extração da matéria-prima (BANKS, 1989).

As baterias de íons lítio apresentam como vantagens os elevados valores de energia específica e densidade energética, como pode ser observado na Figura 1.22. Além disso, segundo DING *et al.* (2019), as baterias de íons lítio possuem maior ciclo de vida e ausência de efeito memória. Apesar dessas vantagens, as baterias de chumbo-ácido continuam sendo utilizadas até os dias atuais devido ao baixo custo tanto de produção quanto dos materiais. Já as baterias de íons lítio são mais caras devido à dependência de materiais relativamente escassos, tornando-as menos atrativas para o mercado, impedindo a sua difusão em larga escala (LOPES & STAMENKOVIC, 2020). Consequentemente, os custos maiores dessas baterias irão impactar no preço final dos veículos elétricos, dificultando a atração de novos consumidores. Dessa forma, o tempo de vida desses dispositivos deve ser relativamente

longo para que haja a adoção dos veículos elétricos pelos consumidores (BOCCHI *et al.*, 2010).

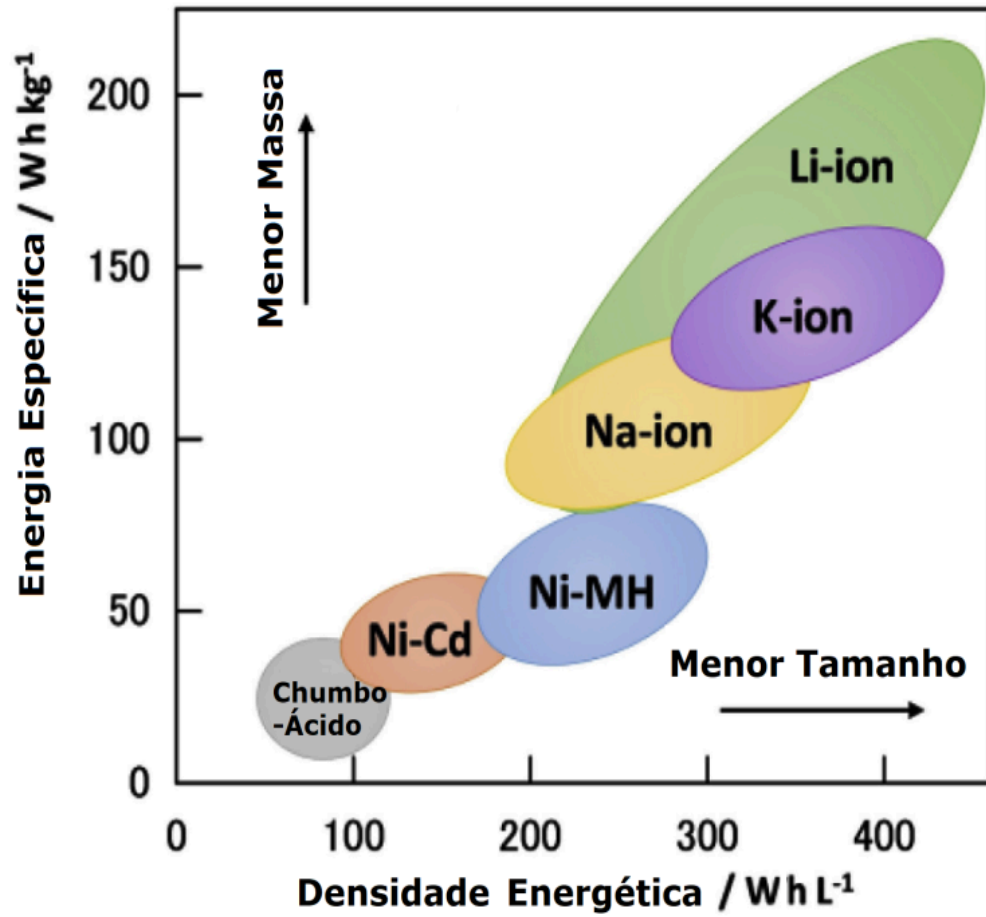


FIGURA 1.22 Comparação dos valores de energia específica e densidade energética de baterias disponíveis no mercado. Fonte: Adaptado de KHARBACHI *et al.*, 2020).

2. SITUAÇÃO ATUAL DAS BATERIAS DE ÍONS LÍTIO

O funcionamento das baterias de íons lítio envolve processos de intercalação de íons lítio através de compostos de intercalação. Estes, por sua vez, apresentam uma estrutura aberta que permite a entrada ou saída desses íons a partir do eletrólito, para compensar a deficiência ou excesso de cargas geradas pelos processos de redução ou oxidação dos compostos de intercalação, respectivamente. Ambos os eletrodos são isolados por uma membrana porosa que evita o curto-circuito. Assim, no descarregamento, há a liberação de íons lítio do eletrodo negativo que irão ser transportados pelo eletrólito para o eletrodo positivo e os elétrons fluem pelo circuito externo no mesmo sentido. Já no processo de carregamento, ocorre o processo inverso: os íons lítio são difundidos do eletrodo positivo para o negativo e os elétrons também fluem do eletrodo positivo para o negativo (BOCCHI *et al.*, 2000; KORTHAUER, 2018; BOCCHI *et al.*, 2019). Um esquema de funcionamento dessas baterias pode ser observado na Figura 2.1 a seguir.

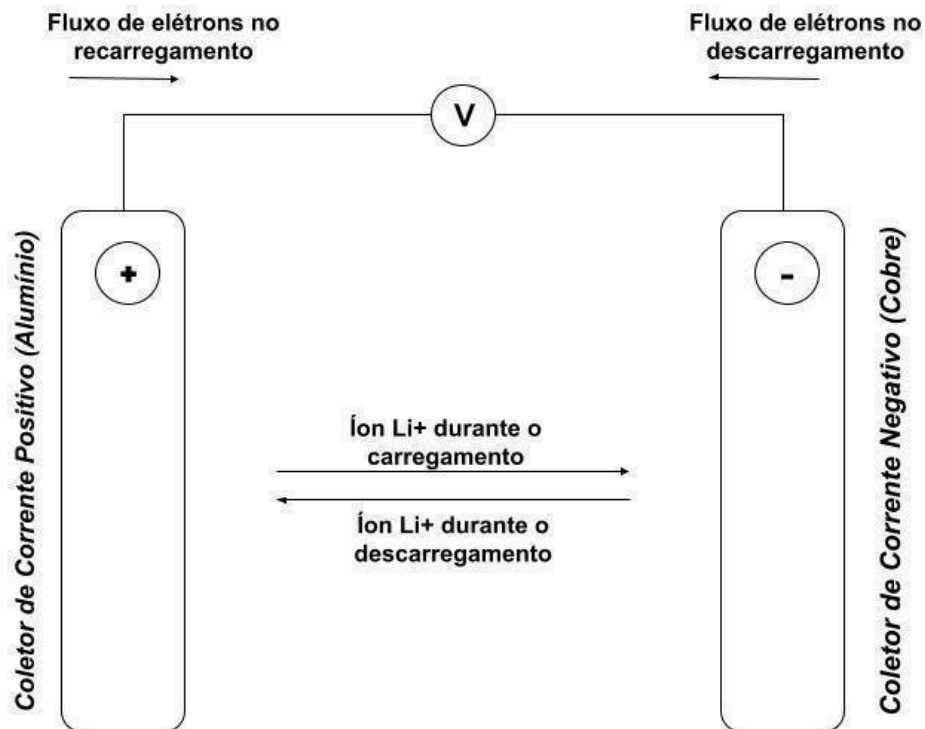


FIGURA 2.1 Esquema de funcionamento de uma bateria de íons lítio durante seu descarregamento e carregamento. Fonte: Próprio autor adaptado de BEARD, 2019.

2.1) Materiais de Eletrodo Positivo

A Figura 2.2 mostra que, dentre os diversos materiais usados como eletrodo positivo de baterias de íons lítio, os óxidos com alto teor de níquel, representados principalmente pela mistura dos óxidos de níquel, manganês, cobalto e lítio (*Nickel Manganese Cobalt* - NMC), apresentam as maiores participações no mercado mundial de veículos leves, respondendo por 66% no ano de 2022. No entanto, nos últimos anos vem sendo observado um crescimento da participação do fosfato de ferro e lítio (*Lithium Iron Phosphate* - LFP), atingindo 27% em 2022. Já os óxidos com baixo teor de níquel, como o NMC 333, e outros materiais de eletrodo positivo representam menos de 10% da participação (IEA, 2023c).

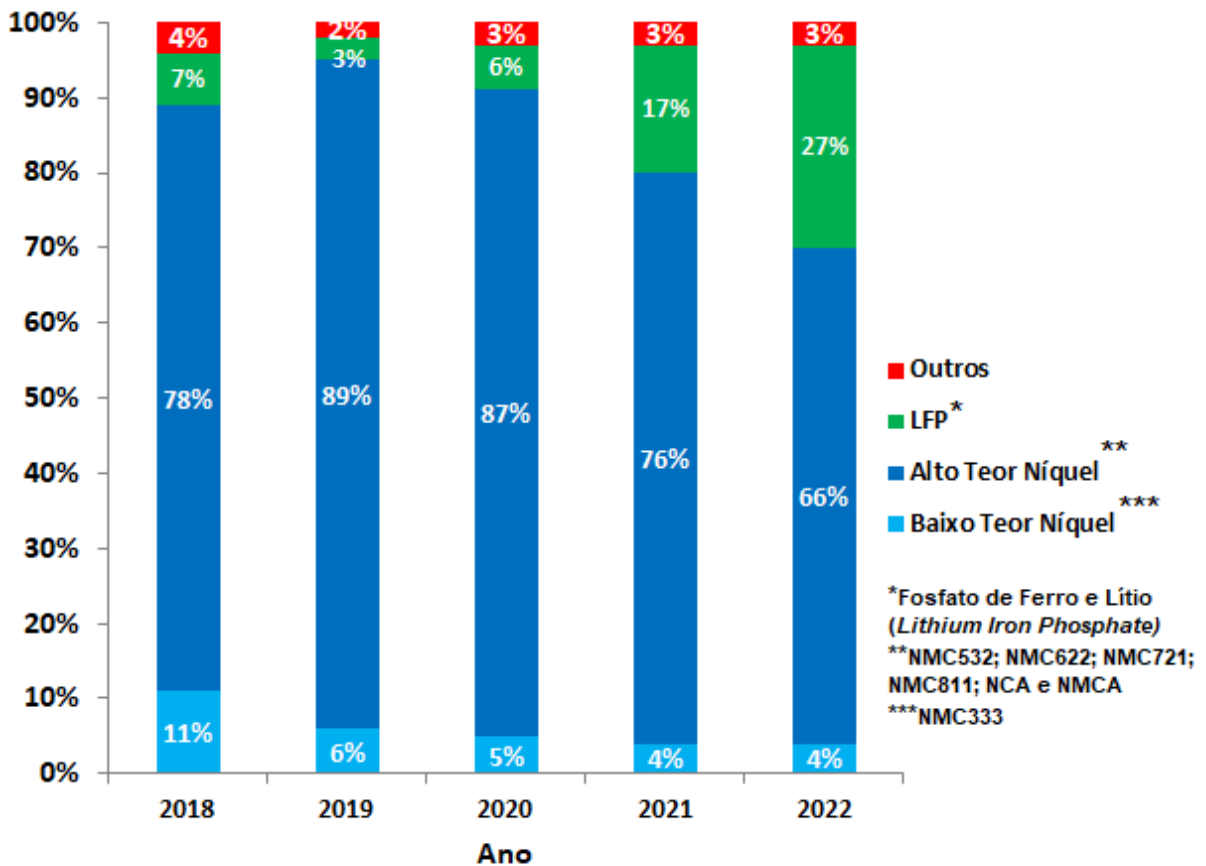


FIGURA 2.2 Percentagem de participação no mercado mundial dos diferentes materiais usados como eletrodo positivo de baterias de íons lítio de veículos leves desde 2018. Fonte: Próprio autor com dados de IEA 2023e.

Bons candidatos para materiais de eletrodos positivos são aqueles que apresentam um potencial de redução eletroquímico mais positivo do que o potencial do lítio

metálico (sistema redox Li/Li^+), uma vez que o potencial de célula corresponde à diferença entre os potenciais eletroquímicos dos eletrodos positivo e negativo. Nos tópicos a seguir, serão apresentados as vantagens e desvantagens dos materiais de eletrodo positivo que já estão disponíveis no mercado e os materiais que estão em fase de estudo.

2.1.1) Óxidos Lamelares (LiMO_2 ; $\text{M} = \text{Co}, \text{Ni}$ e Mn)

Os óxidos lamelares são caracterizados por apresentar a estrutura espacial $R-3m$ que forma a estrutura $\alpha\text{-NaFeO}_2$ (AKHILASH, 2021). Dentre esses óxidos, o mais popular é o óxido de cobalto e lítio (LiCoO_2), também conhecido como cobaltato de lítio, cuja estrutura cristalina está ilustrada na Figura 2.3. Este material fornece excelentes propriedades às baterias de íons lítio, tais como elevada capacidade específica, longo ciclo de vida e potencial de célula de aproximadamente 4 V. Além disso, a boa ordenação dos cátions Co^{3+} e Li^+ em camadas permite uma boa condutividade elétrica e alta estabilidade da estrutura (MIAO *et al.*, 2019; MANTHIRAM, 2021). Nos veículos elétricos, é encontrado em poucos modelos, como o Tesla Roadster e o Smart Fortwo (MIAO *et al.*, 2019).

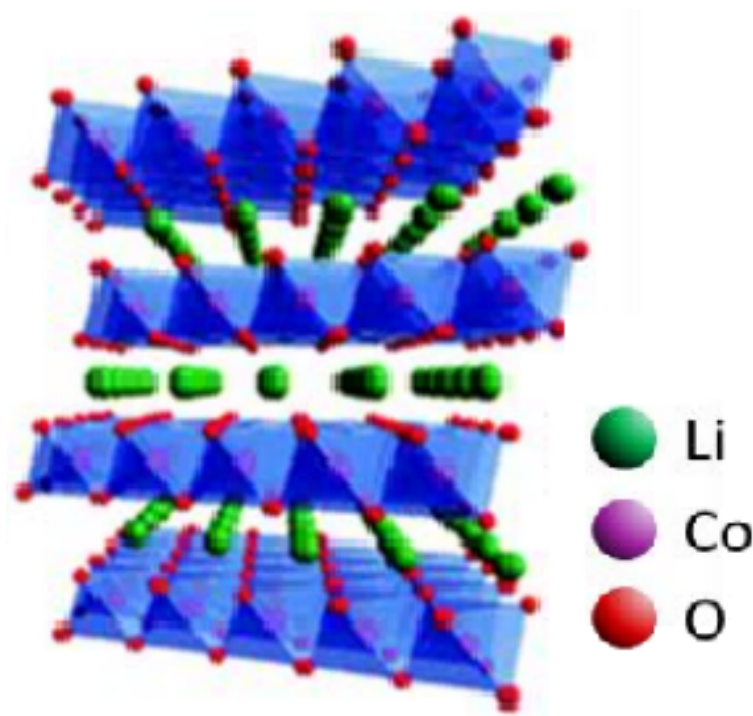


FIGURA 2.3 Estrutura cristalina do LiCoO_2 lamelar. Fonte: Adaptado de FALQUETO, 2018.

Apesar das propriedades mencionadas, o cobaltato de lítio apresenta as seguintes desvantagens (MIAO *et al.*, 2019; STAMPATORI *et al.*, 2020; IEA, 2023c):

1. Instabilidade em altas temperaturas, exigindo um monitoramento contínuo para garantir a segurança do usuário;
2. Alto valor agregado do cobalto, e;
3. Baixa abundância do cobalto, cuja mineração tem sido questionada pela sociedade em decorrência de denúncias de trabalho infantil no Congo, seu principal produtor.

Assim, dado o contínuo crescimento do mercado de veículos elétricos, a baixa disponibilidade do minério de cobalto e a necessidade de contínuo monitoramento, a fim de evitar riscos de segurança ao usuário, o cobaltato de lítio tem sido considerado inviável como material de eletrodo positivo de baterias de íons lítio (MIAO *et al.*, 2019; MANTHIRAM, 2021).

Em decorrência desses fatores, outros óxidos lamelares constituídos por metais diferentes do cobalto têm sido estudados. Um deles é o niquelato de lítio (LiNiO_2), de capacidade específica teórica semelhante à do LiCoO_2 , mas com custo inferior devido à abundância do níquel. No entanto, as dificuldades de implementação deste material positivo nas baterias comerciais decorrem das seguintes desvantagens (MIAO *et al.*, 2019; LI & LU, 2020; AKHILASH, 2021; OBER *et al.*, 2023):

1. Instabilidade do material causada pelo forte momento magnético dos íons Ni^{3+} no arranjo desses íons no retículo cristalino, levando a um estado energético mais elevado devido ao alinhamento dos spins;
2. Formação de camadas passivantes na superfície, e;
3. Perda de capacidade específica significativa em ciclagens longas.

Apesar disso, existem pesquisas que visam aumentar a estabilidade da estrutura do niquelato de lítio. O trabalho de OBER *et al.* (2023) descreve o revestimento deste eletrodo positivo com niobato de lítio (Li_xNbO_y), proporcionando a retenção de 82% da capacidade específica inicial aos 500 ciclos. Por outro lado, sem a dopagem com nióbio, os autores relatam a retenção de 73% da capacidade específica para o mesmo número de ciclos (OBER *et al.*, 2023). Outra alternativa já implementada e presente nas baterias comerciais é a substituição parcial do níquel por cobalto e manganês, resultando no material de eletrodo positivo denominado de NMC, que será abordado na seção 2.1.3 (MANTHIRAM, 2020).

Por sua vez, o óxido de manganês e lítio (LiMnO_2) possui as vantagens de ser barato, dado o custo menor do manganês em relação ao cobalto, e ambientalmente amigável. Porém, é estruturalmente instável em decorrência da diferença de raio iônico dos íons Li^+ e Mn^{3+} , o que é responsável por reduzir o desempenho eletroquímico do material (AKHILASH, 2021).

Além dos óxidos lamelares, os do tipo espinélio, como o manganato de lítio (LiMn_2O_4), têm sido empregados a fim de diminuir a proporção de cobaltato de lítio na mistura de óxidos usada como eletrodo positivo (MANTHIRAM, 2020).

2.1.2) Óxidos do Tipo Espinélio (LiM_2O_4 ; $\text{M} = \text{Mn, Ni, Co, Ti e V}$)

Estes óxidos pertencem ao grupo espacial $Fd3m$, cuja estrutura permite a intercalação de íons lítio através de “túneis”. O mais utilizado é o manganato de lítio, cuja estrutura cristalina está representada na Figura 2.4, que possui condutividade elétrica razoável, assim como o cobaltato de lítio, mas com as vantagens adicionais do manganês ser abundante, ambientalmente amigável e de menor custo que o cobalto (MANTHIRAM, 2020).

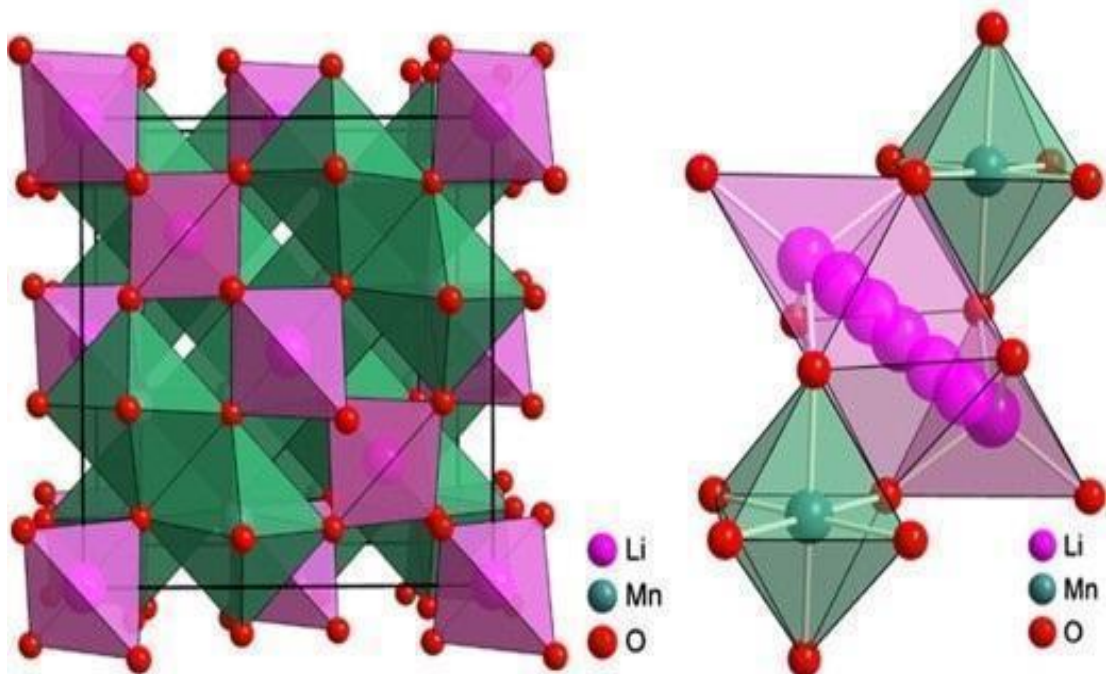
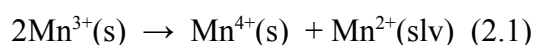


FIGURA 2.4 Estrutura cristalina do LiMn_2O_4 tipo espinélio. Fonte: Adaptado de ZHANG *et al.*, 2013.

No entanto, este óxido possui como desvantagens a baixa ciclabilidade e a queda de capacidade específica ao longo dos ciclos de carregamento e descarregamento. Esses problemas são decorrentes de dois fenômenos (AMARAL, 2005; LYU *et al.*, 2015):

1. Dissolução lenta do eletrodo em Mn^{2+} no eletrólito por meio da reação de desproporcionamento (equação 2.1), e;
2. Ocorrência do efeito Jahn-Teller no qual os íons Mn^{3+} , de simetria cúbica, formados no processo de descarregamento, passam para simetria tetragonal após vários ciclos, promovendo uma distorção irreversível na rede cristalina.



Devido a essas desvantagens, este material do eletrodo positivo é normalmente combinado com o NMC nas baterias de veículos elétricos visando aumentar a vida útil e a ciclabilidade (MAO *et al.*, 2016). Outras estratégias incluem a substituição do manganês por outros elementos como o níquel, ferro e zinco, por exemplo, além do uso dos materiais em escala nanométrica que proporcionam maior área superficial, reduzindo o caminho do transporte eletrônico e iônico e, conseqüentemente, aumentando a velocidade das reações redox (LYU *et al.*, 2015; BOCCHI *et al.*, 2019).

Além do manganês, há os óxidos de espinélio que empregam titânio e vanádio ($LiTi_2O_4$ e LiV_2O_4). No entanto, ambos não são adequados para aplicação em baterias comerciais devido aos baixos potenciais, de 1,5 V e 3,0 V, respectivamente, obtidos com esses metais de transição (MANTHIRAM, 2020). Também foram realizados estudos sobre os óxidos do tipo espinélio empregando cobalto e níquel ($LiCo_2O_4$ e $LiNi_2O_4$). Porém, as sínteses desses óxidos a partir de seus óxidos lamelares resultaram na formação incompleta da fase espinélio devido à instabilidade dos cátions $Co^{3+/4+}$ e $Ni^{3+/4+}$ em altas temperaturas, com desempenho eletroquímico insatisfatório para uso comercial (MANTHIRAM, 2020).

Por fim, o óxido de lítio níquel e manganês (*Lithium Nickel Manganese Oxide* - LNMO) ($LiNi_{0,5}Mn_{1,5}O_4$) se destaca por fornecer um potencial de célula superior aos potenciais de eletrodo positivo já disponíveis no mercado (5,0 V vs. Li/Li^+) e por não empregar cobalto. Apesar disso, a instabilidade da estrutura e a perda rápida de capacidade do material são obstáculos para a sua aplicação comercial (YAO *et al.*, 2023).

2.1.3) Óxido de Níquel Manganês Cobalto e Lítio ($\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_{1-x-y}\text{O}_2$) - NMC

Este material de eletrodo positivo combina o óxido de níquel, de baixa estabilidade, mas com altos valores de capacidade específica, com o óxido de manganês que possui baixa capacidade específica, mas alta estabilidade devido à estrutura do tipo espinélio que permite minimizar a resistência interna (MIAO *et al.*, 2019). Assim, obtém-se, ao mesmo tempo, um material de menor custo, devido à menor proporção de cobalto, e com altos valores de capacidade específica.

O NMC pode apresentar-se em diversas proporções dos óxidos metálicos. Dessa forma, diferentes valores de capacidade específica, estabilidade térmica e retenção de carga podem ser obtidos variando-se a proporção dos três óxidos metálicos, conforme ilustrado na Figura 2.5, sendo que a performance desejável é aquela de altos valores desses três parâmetros. É possível observar que o aumento da proporção de níquel no óxido aumenta a capacidade específica, mas reduz a estabilidade térmica da bateria. Em contrapartida, o aumento da proporção de manganês no óxido garante maior estabilidade ao dispositivo, mas com perda de capacidade específica (NOH *et al.*, 2013; HU *et al.*, 2023).

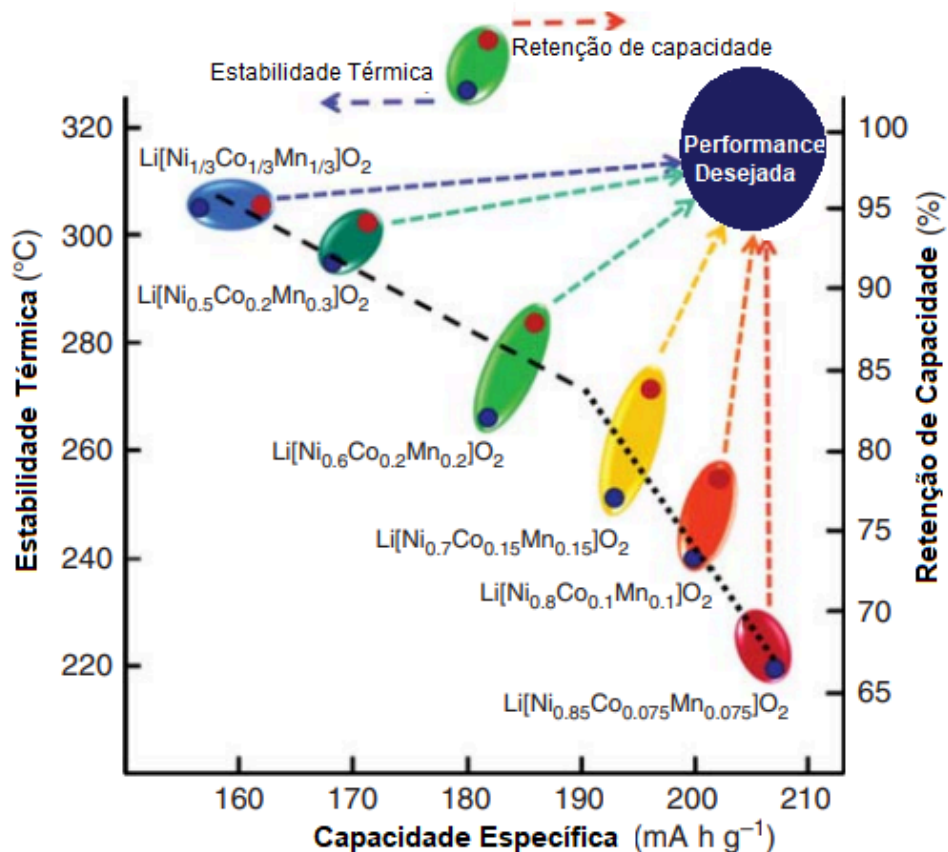


FIGURA 2.5 Valores de estabilidade térmica, capacidade específica e de retenção de capacidade dos óxidos do tipo NMC ($\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_{1-x-y}\text{O}_2$). Fonte: Adaptado de NOH *et al.*, 2013.

Conforme mencionado, os óxidos do tipo NMC de alto teor de níquel são os materiais de eletrodo positivo com maior participação no mercado mundial. Estes possuem elevada capacidade específica, apesar da menor estabilidade térmica. Nesse sentido, a faixa aceitável de temperatura de operação da BIL é de -20 a 60 °C, sendo 15 a 35 °C a sua faixa de maior performance. Em condições extremas de temperatura, além da retenção de capacidade, a autonomia, o tempo de recarga e a vida útil da bateria também são afetados. No entanto, como discutido em 1.2.6, a temperatura da bateria é monitorada pelo BMS, sendo controlada através do resfriamento por fluidos (líquidos e gases) ou por materiais de mudança de fase (*Phase Change Materials* – PCMs), garantido, assim, a operação da bateria nas condições ideais (MA *et al.*, 2018).

2.1.4) Fosfato de Ferro e Lítio (LiFePO_4)

O fosfato de ferro e lítio apresenta uma estrutura cristalina do tipo olivina, conforme apresentado na Figura 2.6. Enquanto os materiais de eletrodo positivo de óxidos metálicos apresentam problemas de segurança, pois podem desprender oxigênio e ocasionar a explosão do dispositivo, além de suas toxicidades, o fosfato de ferro e lítio apresenta maior segurança em decorrência das fortes ligações do fosfato (P=O), que tornam a estrutura mais estável em temperaturas elevadas (GRAF, 2018). Além disso, é um material ambientalmente amigável, de baixo custo e alta ciclabilidade. (MIAO *et al.*, 2019; DUAN *et al.* 2019).

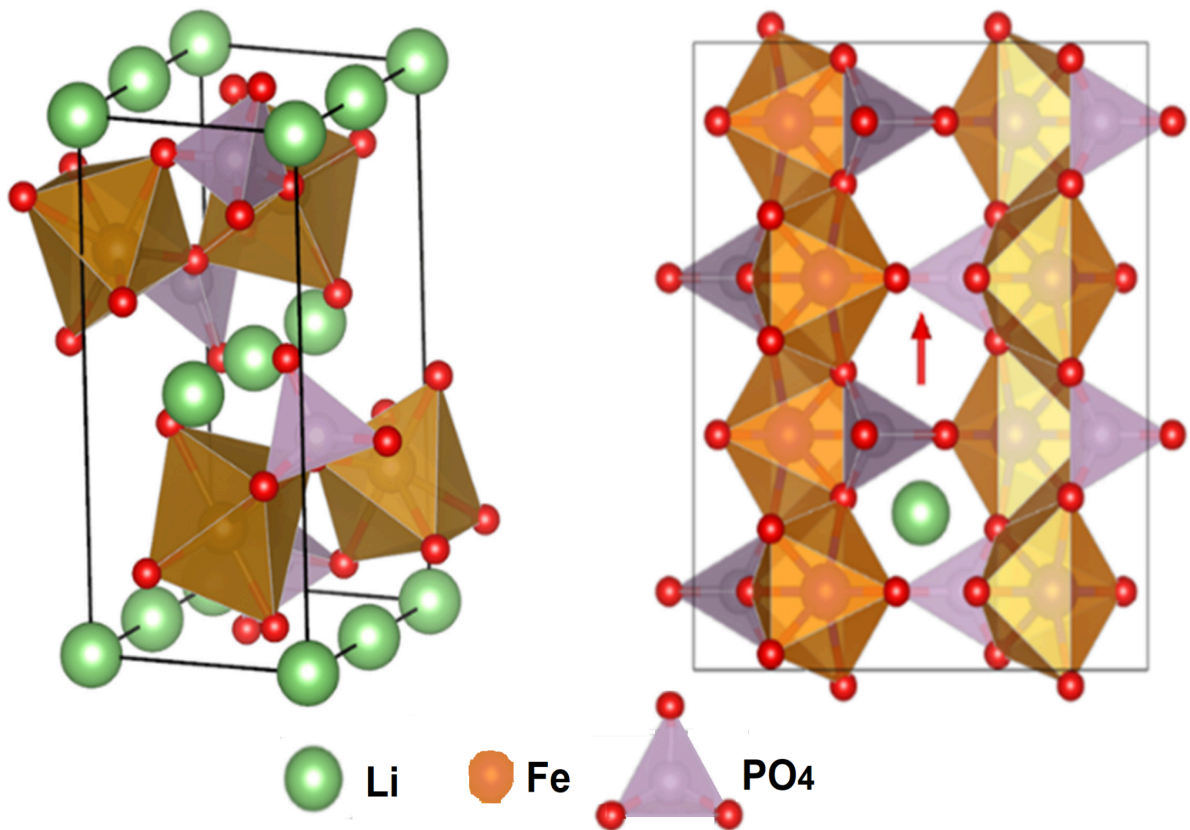


FIGURA 2.6 Estrutura cristalina do LiFePO_4 do tipo olivina. Fonte: Adaptado de TOLGANBEK *et al.*, 2021.

Com a relativa escassez do cobalto, a participação deste material de eletrodo positivo no mercado vem crescendo cada vez mais, dada a maior abundância do ferro. Na última década, cerca de 95% das baterias de íons lítio contendo o fosfato de ferro e lítio foram produzidas para veículos leves na China, com a empresa BYD respondendo sozinha por 50% dessa demanda. Na empresa Tesla, 30% das baterias de íons lítio foram produzidas com esse material em 2022 (MIAO *et al.*, 2019; IEA, 2023c).

Apesar das vantagens mencionadas, o fosfato de ferro e lítio possui como desvantagens o auto descarregamento mais acentuado que os demais materiais de eletrodo positivo, exigindo o uso de programas computacionais de gerenciamento (MIAO *et al.*, 2019), bem como menores valores de capacidade específica e volumétrica e menor potencial de célula (3,4 V vs. Li/Li^+) (MIAO *et al.*, 2019; MANTHIRAM, 2017).

No entanto, há pesquisas sendo conduzidas visando melhorar o desempenho eletroquímico desse material de eletrodo positivo através de revestimentos à base de carbono, polímero, ligas e sais inorgânicos. Dentre eles, os materiais de carbono têm se mostrado bem sucedidos, proporcionando como vantagens o aumento da condutividade elétrica, da

estabilidade térmica e da estabilidade química em diversos eletrólitos. Os materiais de carbono comumente pesquisados são grafite, grafeno, nanotubos, nanofibras, carbono derivados de estruturas orgânicas metálicas (*Metallic Organic Framework* - MOF) ou de biomassa (RAMASUBRAMANIAN *et al.*, 2022).

2.2) Materiais de Eletrodo Negativo

A Figura 2.7 apresenta a comparação da quantidade dos materiais usados em eletrodos negativos de baterias de lítio e íons lítio em quilogramas por quilowatt horas (kg/kW h), bem como a percentagem de participação desses materiais no mercado no ano de 2022. É possível observar que a maior participação no mercado mundial corresponde ao grafite puro (70 %) seguida das ligas de silício-grafite que entraram mais recentemente no mercado (IEA, 2023c).

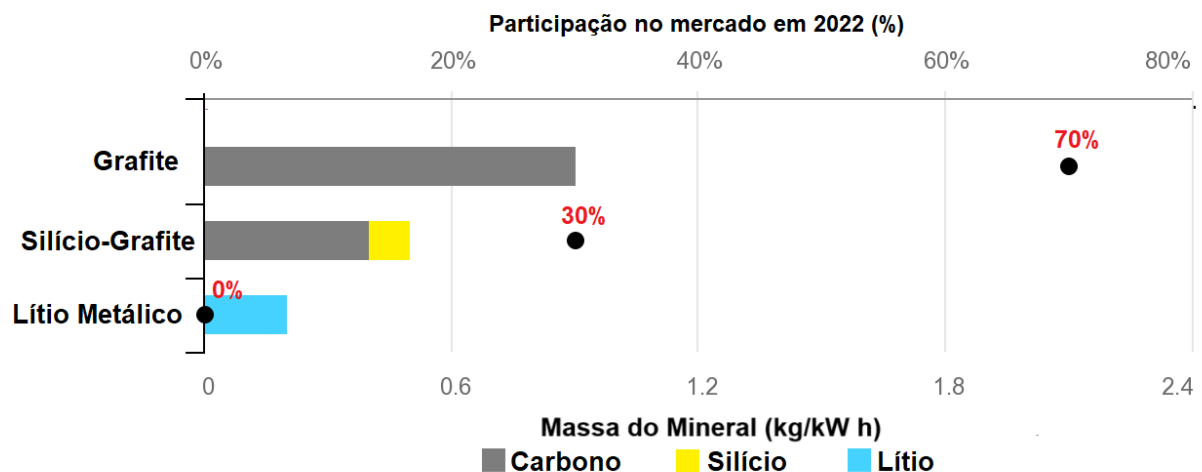


FIGURA 2.7 Quantidade dos materiais usados em eletrodos negativos de baterias de lítio e íons lítio (em kg/kW h) e a percentagem de suas participações no mercado no ano de 2022. Fonte: Adaptado de IEA 2023c.

Durante os primeiros ciclos de carregamento e descarregamento das baterias de lítio e íons lítio, forma-se no eletrodo negativo uma camada denominada SEI (*Solid Electrolyte Interphase* - Interfase de Eletrólito Sólido) decorrente da degradação do eletrólito. Esta camada é constituída por compostos orgânicos e inorgânicos, tais como carbonato de lítio, fluoreto de lítio, óxidos de lítio e poliolefinas, como ilustrado na representação esquemática da Figura 2.8 (DUAN *et al.* 2019). Essa camada é responsável por proteger o

eletrodo negativo de esfoliações, garantindo, assim, uma melhor durabilidade e segurança da bateria. No entanto, caso a espessura dessa camada seja muito grande, pode atuar como elemento resistivo, proporcionando sobreaquecimento e perda de capacidade específica da bateria (GIALAMPOUKI *et al.*, 2019).

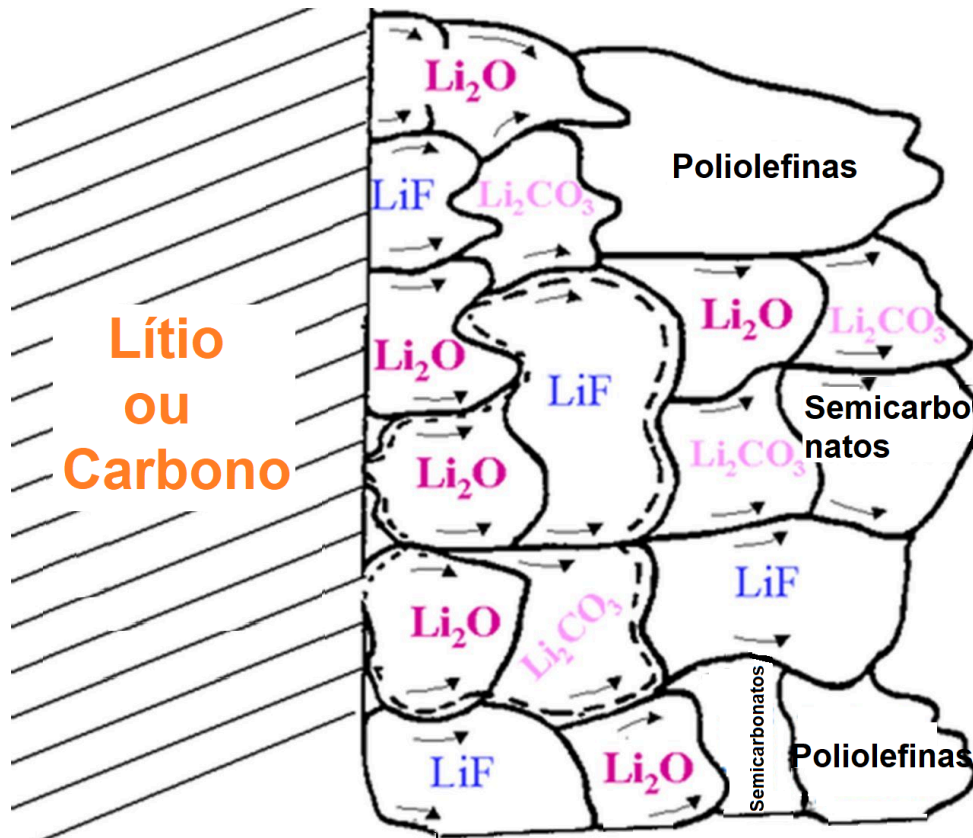


FIGURA 2.8 Composição da SEI (*Solid Electrolyte Interphase* - Interfase de Eletrólito Sólido) formada nos eletrodos negativos de baterias de lítio e íons lítio. Fonte: Adaptado de PELED & MENKIN, 2017.

2.2.1) Lítio Metálico

Lítio metálico é um excelente candidato a ser usado como eletrodo negativo de baterias de lítio, apresentando as seguintes vantagens (WANG *et al.*, 2020):

1. Elevada capacidade específica (3860 mA kg^{-1});
2. Menor potencial de redução ($-3,04 \text{ V}$), e;
3. Baixa densidade.

Porém, ao longo do uso da bateria, há a deposição não homogênea de lítio metálico na forma de dendritas desse metal, como apresentado esquematicamente na Figura 2.9, ocasionando um curto-circuito entre os eletrodos negativo e positivo (WURM *et al.*, 2018).

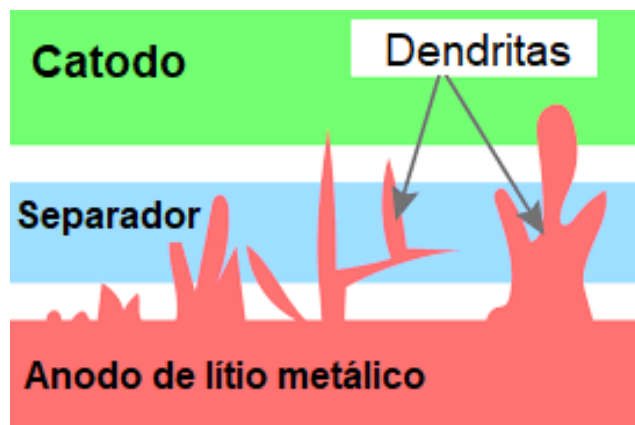


FIGURA 2.9 Representação esquemática da formação de dendritas de lítio metálico no eletrodo negativo de baterias de lítio. Fonte: Adaptado de UPS BATTERY CENTER, 2022b.

Essa desvantagem incentivou o desenvolvimento das baterias de íons lítio (BOCCHI *et al.*, 2019). Nesse sentido, a descoberta dos compostos de intercalação, como o cobaltato de lítio (LiCoO_2) e outros, eliminou a necessidade de se empregar lítio metálico como eletrodo negativo, uma vez que o próprio eletrodo negativo contém íons lítio, permitindo que novos materiais de eletrodo negativo fossem utilizados, a exemplo do carbono grafite (MANTHIRAM & GOODENOUGH, 2021). Candidatos excelentes para esse propósito são aqueles que possuem um potencial eletroquímico próximo ao do lítio metálico (sistema redox Li/Li^+).

Vale ressaltar que há pesquisas dedicadas a minimizar o crescimento das dendritas de lítio metálico mediante a adoção das seguintes estratégias (HARTNIG & SCHMIDT, 2018; WANG *et al.*, 2020):

1. Formação de uma camada SEI pela substituição de eletrólito líquido por eletrólito sólido (eletrólitos poliméricos), levando à deposição de uma camada fina e uniforme de lítio; esta camada fina não permite a passagem do eletrólito para o eletrodo negativo e a consequente formação das dendritas;
2. Uso de uma matriz hospedeira de lítio à base de nanotubos de carbono ou grafeno que minimiza a expansão de volume, e;

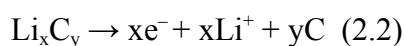
3. Emprego de eletrólitos de estado sólido, sobretudo os poliméricos, que não são permeáveis ao solvente.

2.2.2) Carbono Grafite

O grafite é o alótropo do carbono mais estável que apresenta bons valores de condutividade elétrica e térmica devido à hibridação sp^2 que confere um sistema π conjugado de orbitais p, resultando na deslocalização dos elétrons. Além disso, é um material resistente à corrosão e ataques químicos, sendo, portanto, quimicamente inerte (ZARBIN & ORTH, 2019).

Quando utilizado como material de eletrodo negativo, o grafite apresenta uma capacidade específica maior do que os materiais de eletrodo positivo (370 A h kg^{-1}) (MIAO *et al.*, 2019). Além disso, seu potencial eletroquímico ligeiramente maior do que o lítio metálico ($150 \text{ mV vs. Li/Li}^+$) pode prevenir a formação das dendritas, mas desloca o potencial de célula operacional das BILs da faixa de $4,0 \text{ V}$ para $3,0 \text{ V}$ (EFTEKHARI, 2017; MIAO *et al.*, 2019).

Durante o descarregamento, os íons Li^+ são extraídos do grafite litiado para serem difundidos para o eletrodo positivo, como apresentado na Equação 2.2 (NZEREOGU *et al.*, 2022).



Porém, o material apresenta poucos sítios de intercalação de íons lítio, proporcionando, em condições de carregamento rápido do dispositivo, a queda do potencial da célula e o recobrimento de lítio metálico na superfície do grafite, ocasionando o curto-circuito do dispositivo (CHENG *et al.*, 2015; LI *et al.*, 2021). Para contornar esses problemas, modificações na superfície do grafite têm sido estudadas. Dentre elas, o tratamento do material com hidróxido de potássio sob altas temperaturas proporciona a formação de canais na estrutura, conforme apresentado esquematicamente na Figura 2.10.

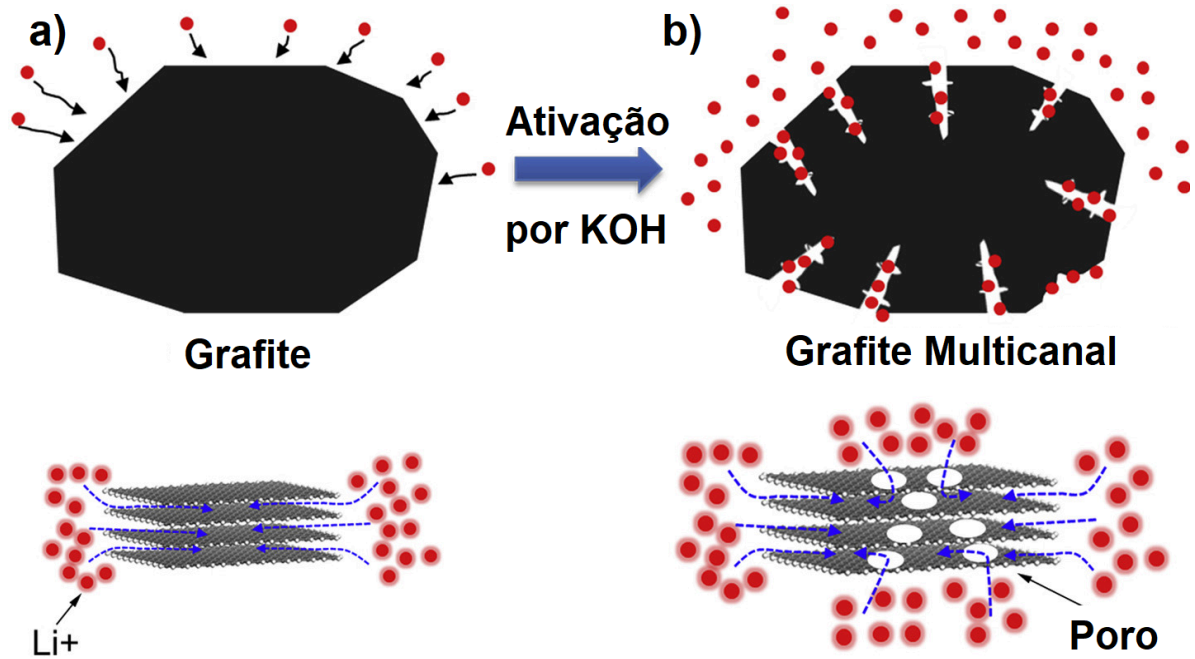


FIGURA 2.10 Representação esquemática: (a) da estrutura do carbono grafite e (b) da formação de poros no grafite mediante o tratamento com hidróxido de potássio. Fonte: Adaptado de CHENG *et al.*, 2015.

A modificação da superfície do grafite com hidróxido de potássio em altas temperaturas proporciona as seguintes vantagens (CHENG *et al.*, 2015; LI *et al.*, 2021):

1. Limpeza da superfície do material;
2. Aumento da taxa de intercalação de íons lítio na estrutura;
3. Redução do sobrepotencial de concentração, uma vez que a distância de difusão dos íons lítio é reduzida, e;
4. Melhores ciclabilidade, capacidade específica e taxas de recarga e descarregamento, conforme mostra a Figura 2.11.

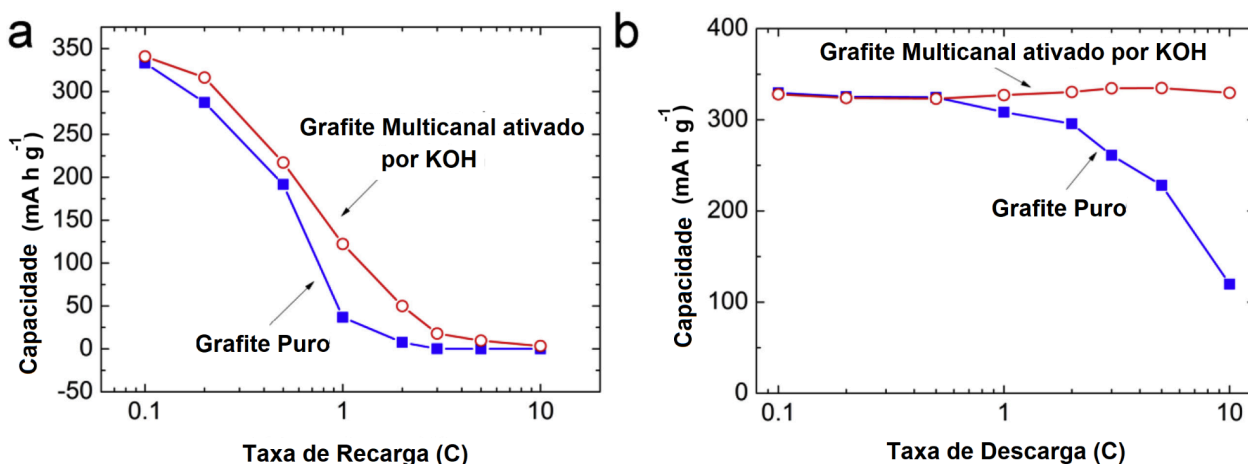


FIGURA 2.11 Dependência da capacidade específica do grafite (azul) e do grafite multicanal (vermelho) com (a) a taxa de recarga e (b) a taxa de descarga. Fonte: Adaptado de CHENG *et al.*, 2015.

Outras estratégias de modificação da superfície do grafite são baseadas na adição de metais como alumínio (Al), estanho (Sn), magnésio (Mg), prata (Ag) e antimônio (Sb) para a formação de ligas metálicas que proporcionam à bateria maiores valores de capacidade específica do que as oferecidas pelos eletrodos de grafite convencionais (MIAO *et al.*, 2019; NZEREOGU *et al.*, 2022). Outra alternativa promissora são os eletrodos negativos constituídos por ligas à base de silício, como descrito a seguir.

2.2.3) Ligas de Silício

Assim como o grafite, o silício é um material abundante e de custo relativamente baixo. As ligas de silício-grafite apresentam um valor de capacidade específica elevado (em torno de 4200 A h kg⁻¹) e não apresentam riscos de segurança devido ao baixo potencial eletroquímico (0,4 V vs. Li/Li⁺) (RAIĆ *et al.*, 2020; NZEREOGU *et al.*, 2022). Porém, os problemas desse material de eletrodo negativo devem-se à grande variação de volume durante os processos de entrada e saída de íons lítio, apresentados esquematicamente na Figura 2.12. Em especial, a formação da fase de Li₁₅Si₄ à temperatura ambiente representa um aumento de 280% do volume em relação ao silício. Essa grande expansão, após muitos ciclos, é responsável pelos seguintes fenômenos indesejáveis (MIAO *et al.*, 2019; RAIĆ *et al.*, 2020; NZEREOGU *et al.*, 2022):

1. Pulverização: fratura mecânica das partículas de silício;

2. Delaminação: as partículas de silício passam a atuar como isolante elétrico no coletor de corrente, causando a perda de contato elétrico e de capacidade;
3. Instabilidade da SEI: a pulverização das partículas de silício expõe uma nova superfície ao eletrólito, ocasionando o espessamento da camada SEI. Esta, por sua vez, além de ser instável por conta da expansão das partículas, é responsável por consumir os íons lítio, gerando perdas de retenção de capacidade da bateria, e;
4. Baixa difusão de íons lítio e alta resistividade elétrica.

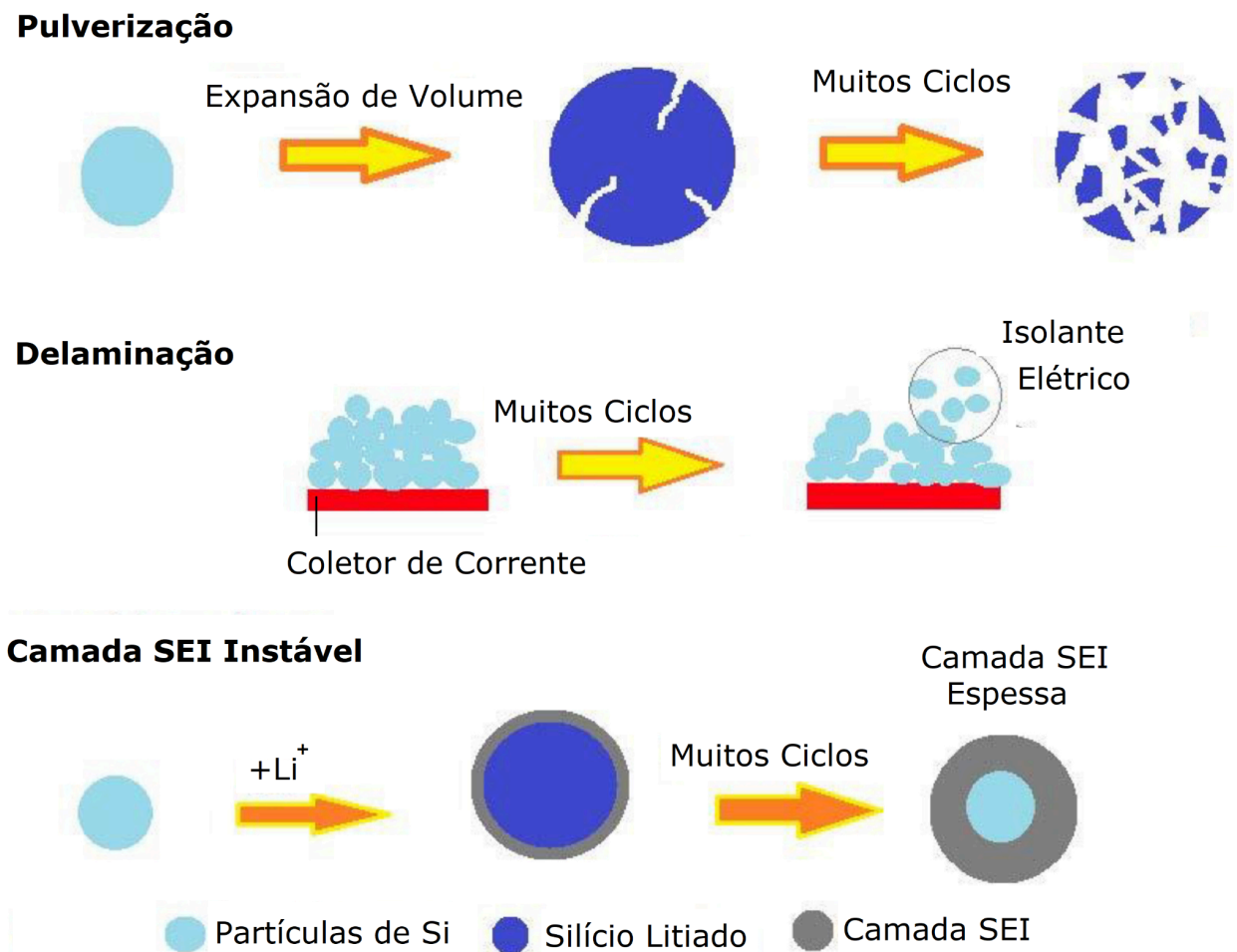


FIGURA 2.12 Representação esquemática dos mecanismos de degradação do silício como material de eletrodos negativos. Fonte: Adaptado de NZEREOGU *et al.*, 2022.

Para solucionar esses problemas, novas pesquisas estão aplicando nanomateriais de silício, que abrangem os nanotubos, as nanopartículas e as nanocamadas,

além de compósitos com carbono e estruturas porosas tridimensionais, para minimizar a expansão das partículas de silício na sua litiação (CHOI & AURBACH, 2016; RAIĆ *et al.*, 2020).

2.3) Eletrólitos

De maneira geral, um bom eletrólito de baterias deve apresentar as seguintes características (PLETCHER & WALSH, 1990; HARTNIG & SCHMIDT, 2018):

1. Alta condutividade em uma ampla faixa de temperatura, de modo a minimizar as perdas por queda ôhmica;
2. Baixa viscosidade, a fim de aumentar a molhabilidade dos materiais de eletrodo e a mobilidade dos íons pela solução;
3. Baixa densidade, tornando a bateria mais leve, e;
4. Ambientalmente amigável.

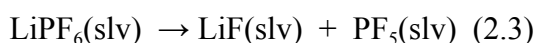
No caso das baterias de lítio ou íons lítio, além desses fatores, o eletrólito deve ser não aquoso, dada a alta reatividade do lítio com a água, e nem ser prático devido à possibilidade de reação com os materiais de eletrodo (HARTNIG & SCHMIDT, 2018; BOCCHI *et al.*, 2019). Nesse sentido, são empregados sais de lítio dissolvidos em misturas de solventes orgânicos à base de carbonatos cíclicos de alta viscosidade com carbonatos lineares que apresentam baixa viscosidade, conferindo boas propriedades químicas e eletroquímicas ao eletrólito, tais como (XU, 2004; DUAN *et al.*, 2019; PENG *et al.*, 2022):

1. Permissividade elétrica (ϵ) relativamente elevada, garantindo uma boa dissolução do sal de lítio;
2. Viscosidade baixa, facilitando o transporte dos íons pela solução;
3. São líquidos em uma faixa de temperatura razoavelmente ampla, evitando a perda do solvente por vaporização ou solidificação e;
4. Estabilidade oxidativa relativamente boa.

Além dos sais de lítio dissolvidos em um solvente não aquoso, outras classes de eletrólitos abrangem os líquidos iônicos, os eletrólitos poliméricos e os eletrólitos gelificados.

2.3.1) Sais de lítio dissolvidos em solventes orgânicos

Dentre os sais de lítio, o mais utilizado é o hexafluorofosfato de lítio (LiPF_6), de alta estabilidade eletroquímica e boa condutividade. No entanto, é termicamente instável, sendo decomposto lentamente em temperatura ambiente a fluoreto de lítio e pentafluoreto de fósforo (vide equação 2.3 a seguir), sendo este último um gás tóxico. Essa decomposição é acelerada em temperaturas acima de $70\text{ }^\circ\text{C}$ (HARTNIG & SCHMIDT, 2018; DUAN *et al.*, 2019).



Outros sais de lítio e flúor ou cloreto também têm sido estudados, como, por exemplo, o tetrafluoroborato de lítio (LiBF_4), o hexafluoroarsenato de lítio (LiAsF_6) e o perclorato de lítio (LiClO_4) que exibem valores de condutividade muito similares ao do hexafluorofosfato de lítio, mas apresentam a desvantagem de serem altamente tóxicos (DUAN *et al.*, 2019).

O solvente empregado para a dissolução dos sais de lítio é, usualmente, uma mistura de carbonatos orgânicos, como, por exemplo, o carbonato de etileno, o carbonato de dimetileno e o carbonato de propileno, todos inflamáveis. Assim, em condições de elevados potenciais, há a ocorrência de problemas indesejáveis, conforme ilustrado esquematicamente na Figura 2.13. Essas ocorrências incluem (BARRÉ *et al.*, 2013; DUAN *et al.*, 2019):

1. Sobreaquecimento do dispositivo;
2. Dissolução da camada protetora SEI;
3. Redução da superfície ativa do eletrodo;
4. Reação dos íons lítio intercalados com o eletrólito, liberando gases que contribuem para o aumento da pressão interna da bateria, e;
5. Deposição de lítio metálico no eletrodo, ocasionando o curto-circuito da bateria.

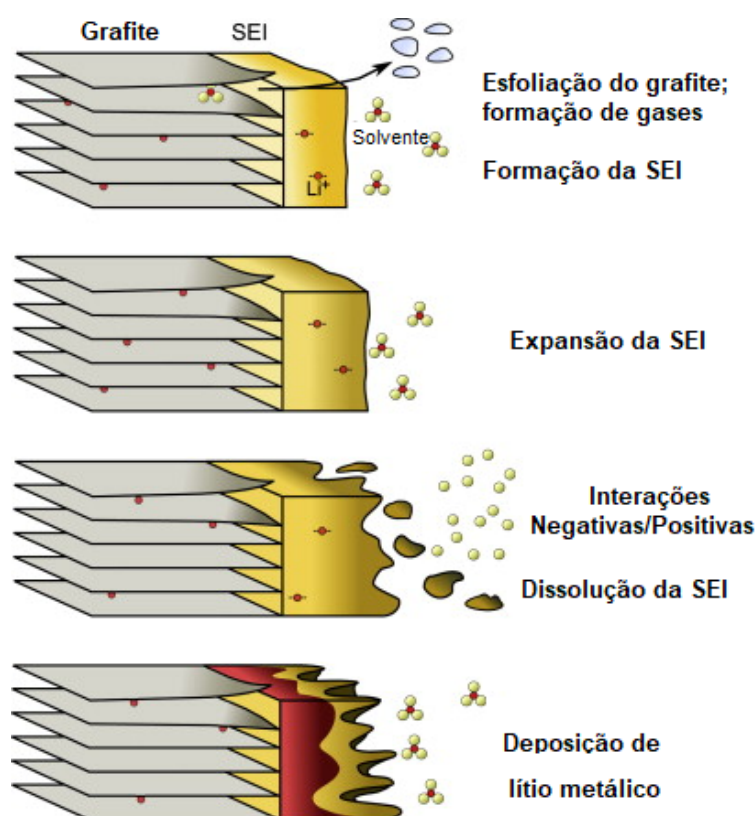


FIGURA 2.13 Representação esquemática da dissolução da SEI (*Solid Electrolyte Interphase*) em potenciais elevados, ocasionando a degradação do eletrodo negativo e a deposição de lítio metálico. Fonte: Adaptado de BARRÉ *et al.*, 2013.

2.3.2) Líquidos Iônicos

Os líquidos iônicos (LI) são sais fundidos, constituídos por um cátion orgânico grande coordenado com um ânion orgânico ou inorgânico, que são divididos em duas classes: líquidos iônicos apróticos e líquidos iônicos próticos. Esses eletrólitos apresentam as seguintes vantagens (BALDUCCI, 2017):

1. Baixa pressão de vapor, evitando a liberação de gases nocivos à saúde humana e ao ambiente;
2. Não inflamabilidade;
3. Excelente estabilidade química e térmica, e;
4. Boa condutividade em uma ampla janela eletroquímica.

Os LIs apróticos abrangem a combinação dos cátions imidazólio, piridínio ou piperidínio com os ânions tetrafluoroborato, dicianoamida ou (trifluorometilsulfonyl)amida.

Diversas combinações de pares cátion-ânion foram estudadas tendo em conta as distintas propriedades que conferem às baterias, como a formação da SEI, tamanho da janela eletroquímica e condutividade. Entretanto, os fatores que restringem o uso desses eletrólitos nas baterias de íons lítio comerciais são (BALDUCCI, 2017):

1. Alto custo devido à necessidade de purificação do líquido iônico, e;
2. Queda significativa de performance em relação aos demais eletrólitos em razão da maior viscosidade que contribui para a redução da difusão dos íons lítio em taxas de descarregamento muito elevadas.

Por outro lado, os LIs próticos apresentam as vantagens de serem mais baratos e sintetizados mais facilmente em relação aos apróticos, uma vez que são oriundos de uma reação de neutralização de um ácido e uma base de Brønsted. Como mencionado anteriormente, eletrólitos que apresentam prótons são muito reativos com o lítio. No entanto, essa classe de eletrólitos é preparada na forma anidra, a qual possui baixo teor de água, impedindo que o próton esteja livre em solução (BALDUCCI, 2017).

Outras alternativas que empregam esses eletrólitos são baseadas nas misturas de líquidos iônicos com solventes orgânicos. Apesar da inflamabilidade desses solventes, foi demonstrado que os líquidos iônicos contribuem para a redução da tendência à ignição (BALDUCCI, 2017).

2.3.3) Eletrólitos Poliméricos e Eletrólitos em Gel

Ao invés de um sal de lítio dissolvido em um solvente orgânico, os eletrólitos poliméricos substituem o eletrólito líquido e o separador e evitam o uso de solventes orgânicos inflamáveis que podem contaminar o meio ambiente em caso de rompimento da bateria. Tratam-se de sais de lítio retidos em um polímero sólido (HARTNIG & SCHMIDT, 2018; MIAO *et al.*, 2019). Os mais comuns são a poli(acrilonitrila) (PAN - *polyacrylonitrile*), o poli(óxido de propileno) (PPO - (*poly(propylene oxide)*) e o poli(óxido de etileno) (PEO - *polyethylene oxide*) (ZHAO *et al.*, 2019). Este último é o mais utilizado e envolve a interação dos íons lítio com os grupos polares da cadeia do polímero. Na presença de um campo elétrico, os cátions são transportados pela matriz polimérica, como ilustrado esquematicamente na Figura 2.14. A condutividade dos eletrólitos poliméricos é mais significativa nas regiões amorfas do que nas regiões cristalinas do polímero. Por esse motivo, a temperatura de transição vítrea (T_g), definida como a temperatura na qual o polímero fica

mais amorfo, deve ser atingida de modo a garantir uma condutividade elevada (HARTNIG & SCHMIDT, 2018; ZHOU *et al.*, 2019).

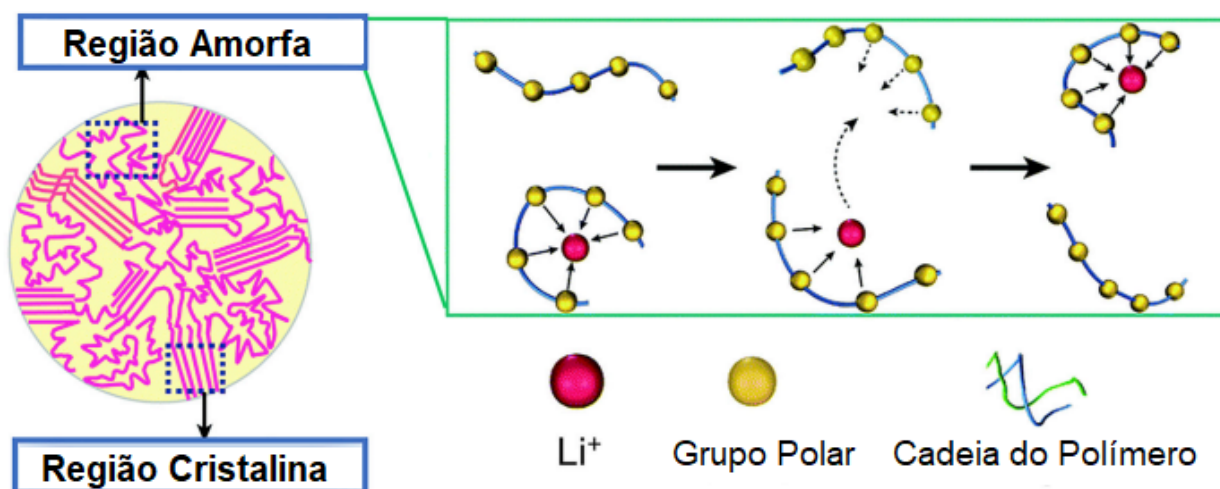


FIGURA 2.14 Representação esquemática do mecanismo de transporte dos íons lítio através do eletrólito polimérico de PEO. Fonte: Adaptado de ZHOU *et al.*, 2019.

No entanto, os eletrólitos sólidos poliméricos apresentam como limitações a baixa condutividade em temperatura ambiente, decorrente da predominância da fase cristalina, e a baixa estabilidade eletroquímica, pois em potenciais acima do potencial de operação da bateria ocorre a oxidação das ligações C-O, causando uma queda de condutividade. Portanto, são desejáveis eletrólitos poliméricos de alta condutividade e ampla janela eletroquímica, para garantir que o eletrólito se mantenha estável em valores de potencial muito positivos e muito negativos (FAN *et al.*, 2021).

Por sua vez, os eletrólitos poliméricos em gel apresentam uma estrutura híbrida de um eletrólito polimérico sólido e de um eletrólito líquido, devido ao emprego de aditivos para diminuir a temperatura de transição vítrea (T_g). Esses aditivos plastificantes possibilitam que o eletrólito apresente uma boa condutividade em temperatura ambiente (MORAIS *et al.*, 2015; HARTNIG & SCHMIDT, 2018; AZIAM *et al.*, 2022). O mecanismo de transporte dos íons lítio se dá pelos plastificantes, enquanto a matriz polimérica proporciona a estabilidade mecânica, evitando o vazamento do eletrólito (ZHOU *et al.*, 2019).

O eletrólito em gel mais utilizado é o copolímero de poli(fluoreto de vinilideno hexafluoropropileno) (PVDF-HFP), cuja estrutura está ilustrada na Figura 2.15. Este copolímero apresenta as seguintes vantagens:

1. Ampla janela eletroquímica;
2. Boa resistência mecânica, e;
3. Estabilidade térmica.

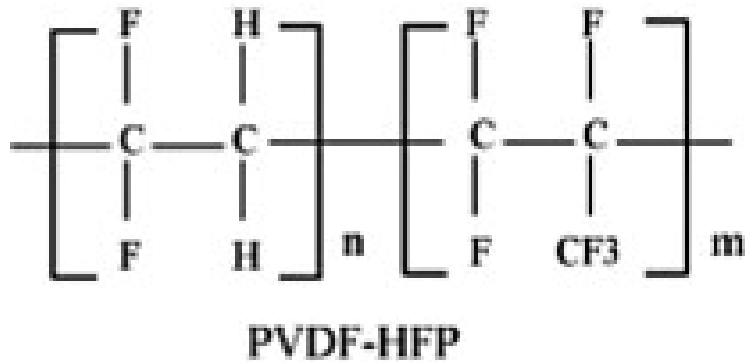


FIGURA 2.15 Estrutura química do copolímero poli(fluoreto de vinilideno hexafluoropropileno) (PVDF-HFP). Fonte: Adaptado de FENG *et al.*, 2013.

Compósitos usando esse copolímero também foram estudados. Nesses casos, há o uso de preenchedores inorgânicos, tais como óxido de alumínio e óxido de titânio que aumentam a resistência mecânica e reduzem a cristalinidade do polímero, contribuindo para um aumento da condutividade (ZHAO *et al.*, 2019; ZHOU *et al.*, 2019)

3. CONCLUSÕES

Com base na descrição dos itens anteriores, foi possível inferir algumas conclusões sobre os veículos elétricos no Brasil. Assim como ocorreu nos Estados Unidos e China, onde investimentos e ações governamentais foram fundamentais para a rápida disseminação dos veículos elétricos, essa política também deveria ser adotada de forma similar no Brasil para incentivar a adesão a esses veículos e reduzir seus custos. No momento atual, a produção de veículos elétricos no Brasil não está em larga escala (poucos modelos de HEVs são produzidos pelas indústrias automotivas brasileiras), dificultando a redução do preço de venda. Já os modelos de BEVs são importados, cuja tributação de importação entrará em vigor em janeiro de 2024, o que poderá deixar o preço final menos competitivo com os preços dos veículos a combustão.

Como apresentado anteriormente, o número de pontos de recarga disponíveis atualmente no Brasil é muito baixo, exigindo o investimento em infraestrutura de carregamento. Além disso, com a maior demanda por energia elétrica para recarga das baterias (quase sempre de íons lítio) dos veículos elétricos e híbridos *plug-in*, faz-se necessário a expansão da matriz energética brasileira. Infelizmente, isso pode acarretar um aumento das fontes não renováveis, a exemplo das termelétricas, como já ocorre na Europa, e possivelmente aumentar o custo da energia elétrica. Logo, o uso em massa de veículos elétricos exigirá o estabelecimento de uma matriz energética formada principalmente por fontes renováveis. Além da demanda por eletricidade, haverá um aumento da demanda de minerais, não só para a produção das baterias dos veículos elétricos, mas também para a implementação de fontes de energia renováveis e de sistemas de armazenamento de energia elétrica em baterias em larga escala. Essas tecnologias utilizam como matéria-prima o cobre, níquel e, especialmente para as células fotovoltaicas, o silício.

Tendo em vista essas questões, uma alternativa possível é implementar os veículos híbridos e híbridos *plug-in* abastecidos por biocombustíveis oriundos da cana-de-açúcar, soja, milho etc. O uso destas fontes renováveis já está consolidado no Brasil, sendo o segundo maior produtor mundial, e as pesquisas na área de eletrocatalise já atuam no sentido de converter a biomassa em produtos de mais alto valor agregado. Ademais, essas categorias de veículos elétricos, em relação aos BEVs, possuem uma bateria menor, minimizando, assim, o impacto gerado na exploração dos minerais essenciais para a confecção das baterias e das fontes renováveis. Por fim, os PHEVs são menos dependentes dos pontos de carregamento, ao passo que os HEVs não os utilizam. Consequentemente, não

é necessária, portanto, a implantação imediata de uma infraestrutura massiva de eletropostos, visto que esses veículos podem aproveitar os postos de combustíveis já existentes no país. Já os veículos totalmente elétricos são vantajosos no cenário brasileiro quando utilizados para percorrer pequenas distâncias, principalmente dentro das cidades, tendo em vista que esses veículos dependem dos pontos de carregamento.

Com relação às baterias de íons lítio empregadas nos veículos elétricos, programas de recolhimento e reciclagem das baterias devem ser incentivados pelo poder público e, posteriormente, implementados pelo setor privado, dada a escassez relativa dos minerais envolvidos na produção desses dispositivos. A expectativa é que em um futuro próximo a taxa de reciclagem das baterias de íons lítio, atualmente em 5% em nível mundial, seja equivalente à taxa de reciclagem das baterias de chumbo-ácido, tanto no Brasil como nos demais países. Espera-se ainda que os diferentes materiais usados nas baterias de íons lítio sejam cada vez mais ambientalmente amigáveis, de elevada abundância e de baixo custo. Ademais, é essencial a seleção de materiais que tenham estabilidade térmica, química e eletroquímica em condições extremas de operação das baterias, a fim de garantir a segurança de seus usuários. Finalmente, espera-se que uma maior adesão aos veículos elétricos ocorra em futuro próximo e, com isso, as baterias de íons lítio passem a ter um custo de produção cada vez menor, tornando os veículos elétricos mais acessíveis à população.

Qualquer que seja o caminho a ser seguido, as pesquisas, principalmente nas áreas de materiais, eletrocatalise e eletroquímica, têm papel importante na transição energética do setor automotivo. Seja na pesquisa e desenvolvimento de baterias mais eficientes e seguras, quanto na utilização da biomassa para a produção de energia e biocombustíveis, visando garantir um futuro mais sustentável.

4. REFERÊNCIAS

- ABIPET. Associação Brasileira da Indústria do PET. Reciclagem. Disponível em: <<https://abipet.org.br/reciclagem/#:~:text=O%20%C3%ADndice%20de%20reciclagem%20brasileiro,o%20volume%20registrado%20m%202019>>. Acesso em: 14 jul. 2023.
- ABVE. Associação Brasileira do Veículo Elétrico. 10 mil em novembro, e novo recorde a caminho. 2023a. Disponível em: <<http://www.abve.org.br/em-novembro-eletrificados-superam-10-mil-previsao-de-novo-recorde-em-diezembro/>>. Acesso em: 18 dez. 2023.
- ABVE. Associação Brasileira do Veículo Elétrico. Oito Meses que Mudaram o Mercado de Eletromobilidade. 2023b. Disponível em: <<http://www.abve.org.br/oito-meses-que-mudaram-o-mercado-de-eletromobilidade/>>. Acesso em: 02 out. 2023.
- ADEGBOHUN, F.; VON JOUANNE, A. & LEE, K.Y. Autonomous Battery Swapping System and Methodologies of Electric Vehicles. *Energies*. 12: 667, 2019.
- AKHILASH, M.; SALINI, P.S.; JOHN, B. & MERCY, T.D. A journey through layered cathode materials for lithium ion cells – From lithium cobalt oxide to lithium-rich transition metal oxides. *J. Alloys Compd.* 869: 159239, 2021.
- AMARAL, F.A. Propriedades Estruturais e Eletroquímicas de Espinélios de Lítio e Manganês Dopados para Uso em Baterias de Lítio. Programa de Pós Graduação em Química - UFSCar. Tese de Doutorado, 2005. 149 p.
- ATKINS, P.W; JONES, L. & LAVERMAN, L. Princípios de química: questionando a vida moderna e o meio ambiente. 7a. ed. Porto Alegre: Bookman, 2018.
- AUTOESPORTE. Novo Renault Kwid: veja 5 motivos para comprar e 5 para fugir dele. 2022. Disponível em: <<https://autoesporte.globo.com/mercado/noticia/2022/01/novo-renault-kwid-veja-5-motivos-para-comprar-e-5-para-fugir-dele.ghtml>>. Acesso em: 29 jun. 2023.
- AZIAM, H.; LARHRIB, B.; HAKIM, C.; SABI, N.; YUCEF, H.B.; SAADOUNE, I. Solid-state electrolytes for beyond lithium-ion batteries: A review. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 167: 112694, 2022.
- BAIRD, C. & CANN, M. *Environmental Chemistry*. 5a. ed. Nova Iorque, Freeman, 2012.
- BALDUCCI, A. Ionic Liquids in Lithium-Ion Batteries. *Top. Curr. Chem.* 20: 375, 2017.
- BANKS, A. Lithium. *J. Chem. Educ.* 66: 745, 1989.
- BARAN, R. & LEGEY, L.F.L.. Veículos elétricos: história e perspectivas no Brasil. *BNDES Setorial*. 33: 207, 2011.
- BARRÉ, A.; DEGUILHEM, B.; GROLLEAU, S.; GÉRARD, M.; SUARD, F. & RIU, D. A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications. *J. Power Sources*. 241: 680, 2013.
- BCI. BATTERY COUNCIL INTERNATIONAL. Economic Contribution of the U.S. Lead Battery Industry in 2021. 2023. Disponível em:

<<https://batteryCouncil.org/resource/economic-contribution-of-the-u-s-lead-battery-industry/>>. Acesso em 27 jun. 2023

BCI. BATTERY COUNCIL INTERNATIONAL. Infinite Recycling and Beyond. Disponível em: <<https://batteryCouncil.org/recycling-sustainability/recycling/>>. Acesso em 12 jun. 2023.

BEARD, K.W. Linden's Handbook of Batteries. 5a ed. Nova Iorque, McGraw-Hill Education, 2019.

BOCCHI, N., FERRACIN, L.C. & BIAGGIO, S.R. Pilhas e baterias: funcionamento e impacto ambiental. Quim. Nova na Esc. 11: 3, 2000.

BOCCHI, N., BIAGGIO, S.R. & ROCHA-FILHO, R.C. Prêmio Nobel de Química de 2019, Láurea pelo Desenvolvimento das Baterias de Íons Lítio. Quim. Nova na Esc. 41: 320, 2019.

BOCCHI, N.; ROCHA-FILHO, R. C. & BIAGGIO, S.R. Veículos elétricos: perspectivas de uso de baterias de íons lítio. IN: VELLOSO, J. P. R. (Org.). Estratégia de Implantação do Carro Elétrico no Brasil. Rio de Janeiro: Instituto Nacional de Altos Estudos, INAE - Fórum Nacional, 2010, v. 1, p. 158-180.

CARNEIRO, R.L. ; MOLINA, J.H.A. ; TAVARES, B.A. ; MAGDALENA, A.G. & PINTO, E.M. Aspectos Essenciais das Baterias Chumbo-Ácido e Princípios Físico-Químicos e Termodinâmicos do seu Funcionamento. Rev. Virtual Quím. 9: 889, 2017.

CEMPRE. Compromisso Empresarial para a Reciclagem. Taxas de Reciclagem. Disponível em: <<https://cempre.org.br/taxas-de-reciclagem/#:~:text=47%2C1%25,s%3%A3o%20transformadas%20em%20novo%20a%C3%A7o.>>. Acesso em: 14 jul. 2023.

CHENG, Q.; YUGE, R.; NAKAHARA, K.; TAMURA, N. & MIYAMOTO, S. KOH etched graphite for fast chargeable lithium-ion batteries. J. Power Sources. 284: 258, 2015.

CHOI, J. & AURBACH, D. Promise and reality of post-lithium-ion batteries with high energy densities. Nat. Rev. Mater. 1: 16013, 2016.

COUTINHO, L.G.; CASTRO, B.H.R. & FERREIRA, T.T. Veículo elétrico, políticas públicas e o BNDES: oportunidades e desafios. IN: VELLOSO, J.P.R. (Org.). Estratégia de Implantação do Carro Elétrico no Brasil. Rio de Janeiro: Instituto Nacional de Altos Estudos, INAE - Fórum Nacional, 2010, v. 1, p. 158-180.

DA SILVA, C.T. Sistema de Gerenciamento de Baterias de Lítio com Estimção de Estados com Filtro de Kalman Estendido Adaptativo. 146p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas. São Paulo, 2022.

DENG, D. Li-ion batteries: Basics, progress, and challenges. Energy Sci. Eng. 3: 385, 2015.

DING, Y.; CANO, Z.P.; YU, A.; LU, J. & CHEN, Z. Automotive Li-Ion Batteries: Current Status and Future Perspectives. Electrochem. Energy Rev. 2: 1, 2019.

DUAN, J.; TANG, X.; DAI, H.; YANG, Y.; WU, W.; WEI, X. & HUANG, Y. Building Safe Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles: A Review. Electrochem. Energ. Rev. 3: 1, 2020.

EFTEKHARI, A. Low voltage anode materials for lithium-ion batteries. Energy Storage Mater. 7: 157, 2017.

EFTEKHARI, A. Lithium batteries for electric vehicles: from economy to research strategy, ACS Sustain. Chem. Eng. 7: 5602, 2019.

EIA. U.S. Energy Information Administration. How Electricity is Generated. Disponível em: <<https://www.eia.gov/energyexplained/electricity/how-electricity-is-generated.php>>. Acesso em: 20 dez. 2023.

Embarcados. Sistema de Gerenciamento de Baterias (BMS). 2023a. Disponível em: <<https://embarcados.com.br/sistema-de-gerenciamento-de-baterias-bms/>>. Acesso em: 21 jul. 2023.

Embarcados. Por que os veículos elétricos ainda precisam de baterias de chumbo-ácido? 2023b. Disponível em: <<https://embarcados.com.br/por-que-os-veiculos-eletricos-ainda-precisam-de-baterias-de-chumbo-acido/>>. Acesso em: 18 jul. 2023.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Fontes de Energia. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/fontes-de-energia>>. Acesso em: 14 jul. 2023.

ENERGYSAGE. How Do Electric Car Batteries Work? Disponível em: <<https://www.energysage.com/electric-vehicles/101/how-do-electric-car-batteries-work/#:~:text=Lead%2Dacid%2Dbatteries%20are%20only,to%20use%20in%20electric%20vehicles.>>. Acesso em: 04 jul. 2023.

Environmental Protection Agency (EPA). Explaining Electric Plug-in Hybrid Electric Vehicles. 2023 Disponível em: <<https://www.epa.gov/greenvehicles/explaining-electric-plug-hybrid-electric-vehicles>>. Acesso em: 29 jun. 2023.

ERBER, P. Automóveis elétricos a bateria: uma política para sua utilização no Brasil. In: VELLOSO, J.P.R. (Org.). Estratégia de Implantação do Carro Elétrico no Brasil. Rio de Janeiro: Instituto Nacional de Altos Estudos, INAE - Fórum Nacional, 2010, v. 1, p. 87-111.

EPA. Environmental Protection Agency. Advancing Sustainable Materials Management: 2018 Fact Sheet. 2020. Disponível em <https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-11/documents/2018_ff_fact_sheet.pdf>. Acesso em 27 jun. 2023.

FALQUETO, J.B. Desenvolvimento de uma nova rota de síntese hidrotermal assistida por micro-ondas para a obtenção de nanopartículas de espinélio de manganês e lítio dopados com alumínio para aplicação em baterias de íons lítio. Programa de Pós Graduação em Química - UFSCar. Dissertação de Mestrado, 2018. 85 p.

FENG, C.Y.; KHULBE, K.C.; MATSUURA, T. & ISMAIL, A.F. Recent progresses in polymeric hollow fiber membrane preparation, characterization and applications, Separation and Purification Technology, 111:43-71, 2013.

FIAT MOBI. Disponível em: <<https://mobi.fiat.com.br/performance/motor-economico>>. Acesso em: 08 jan. 2024.

FLORA G, GUPTA D. & TIWARI A. Toxicity of lead: A review with recent updates. Interdiscip Toxicol. 5: 47, 2012.

Fuel Economy. Where the Energy Goes: Gasoline Vehicles. Disponível em: <<https://www.fueleconomy.gov/feg/atv.shtml>>. Acesso em: 21 dez. 2023.

GARAGEM 360. Fiat Mobi Like 2023. 2022. Disponível em: <<https://garagem360.com.br/fiat-mobi-like-2023/#:~:text=Cidade%3A%2013%2C5%20km%2F,4%20km%2F1%20com%20etanol>>. Acesso em: 29 jun. 2023.

GAUTO, M.A. & ROSA, G.R. Processos e Operações Unitárias da Indústria Química. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda. 2011.

GIALAMPOUKI, M.A.; HASHEMI, J. & PETERSON, A.A. The Electrochemical Mechanisms of Solid-Electrolyte Interphase Formation in Lithium-Based Batteries. *J. Phys. Chem. C.* 123: 20084, 2019.

Governo do Estado de São Paulo. Governo de SP propõe isentar IPVA a veículos híbridos e movidos a hidrogênio. 2023. Disponível em: <<https://www.saopaulo.sp.gov.br/ultimas-noticias/projeto-que-isenta-ipva-a-veiculos-hibridos-e-movidos-a-hidrogenio-esta-no-legislativo/>>. Acesso em 09 jan. 2024.

GRAF, C. Cathode materials for lithium-ion batteries. In: KORTHAUER, R. (Ed.) *Lithium-Ion-Batteries: Basics and Applications*, p. 29–40. Springer, Berlin. 2018.

HARTNIG, C. & SCHMIDT, M. Electrolytes and conducting salts. In: KORTHAUER, R. (Ed.) *Lithium-Ion-Batteries: Basics and Applications*, p. 59–75. Springer, Berlin. 2018.

HU, P.; DOU, L.; HUANG, T. & YU, A.: Cathode Materials for Lithium-Ion Batteries. In: AIFANTIS, K.E.; KUMAR, R.V. & HU, P. *Rechargeable Ion Batteries: Materials, Design, and Applications of Li-Ion Cells and Beyond*. p. 115-136. WILEY-VCH Weinheim, Germany. 2023.

IEA. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. 2021a. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>>. License: CC BY 4.0. Acesso em 13 jun. 2023.

IEA. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Minerals used in electric cars compared to conventional cars. 2021b. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/minerals-used-in-electric-cars-compared-to-conventional-cars>>. Acesso em 13 jun. 2023.

IEA. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Energy Statistics Data Browser. 2022. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser>> Acesso em 17 jul. 2023.

IEA. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. CO2 Emissions in 2022. 2023a. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>>. Acesso em 12 jun. 2023.

IEA. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Electric car sales, 2016-2023. 2023b. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/electric-car-sales-2016-2023>>. Acesso em 31 mai. 2023.

IEA. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Global EV Outlook 2023: Catching up with climate ambitions. 2023c. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>>. Acesso em 16 jun. 2023.

IEA. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Share of top three producing countries in mining of selected minerals, 2022. 2023d. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/share-of-top-three-producing-countries-in-mining-of-selected-minerals-2022>>. Acesso em 09 jan. 2024.

IEA. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Electric LDV battery capacity by chemistry, 2018-2022. 2023e. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/electric-ldv-battery-capacity-by-chemistry-2018-2022>> IEA. Acesso em 25 jul. 2023.

JAC MOTORS. E-JS1. Disponível em: <<https://www.jacmotors.com.br/veiculos/eletricos-detalhes/e-js1>>. Acesso em: 29 jun. 2023.

JAISWAL, A. & CHALASANI, S.C. The role of carbon in the negative plate of the lead–acid battery. *J. Energy Storage* 1: 15, 2015.

JANZEN, A.F. Photoelectrochemistry II - The Photogalvanic Cell. In: DIXON, A.E.; LESLIE, J.D. (Eds). *Solar Energy Conversion*, p. 923-937, Pergamon, 1979.

JEEP. Jeep 4xe. Disponível em: <<https://www.jeep.com.br/4xe.html>>. Acesso em: 18 set. 2023.

Jornal do Carro. IPVA 2024: Estados que dão desconto ou isentam eletrificados. 2024. Disponível em: <<https://jornaldocarro.estadao.com.br/servicos/ipva-2024-estados-que-dao-desconto-ou-isentam-eletrificados/>>. Acesso em 10 jan. 2024.

KHARBACHI, A.E.; ZAVOROTYNSKA, O.; LATROCHE, M.; CUEVAS, F.; YARTYS, V. & FICHTNER, M. Exploits, advances and challenges benefiting beyond Li-ion battery technologies, *J. Alloys Compd.* 817: 153261, 2020.

KHARE, V.; KHARE, C. J.; NEMA, S. & BAREDAR, P. Fundamental and basic principles. In: Vikas KHARE, V.; KHARE, C. J.; NEMA, S. & BAREDAR, P. (Eds). *Decision Science and Operations Management of Solar Energy Systems*, p. 1-33. Academic Press, United Kingdom. 2023.

LACH, J.; WRÓBEL, K.; WRÓBEL, J.; PODSADNI, P. & CZERWIŃSKI, A. Applications of carbon in lead-acid batteries: a review. *J. Solid State Electrochem.* 23:693, 2019.

LI, L.; ZHANG, D.; DENG, J.; GOU, Y.; FANG, J.; CUI, H.; ZHAO, Y. & CAO, M. Carbon-based materials for fast charging lithium-ion batteries. *Carbon.* 183: 721, 2021.

LI, M. & LU, J. Cobalt in lithium-ion batteries. *Science.* 367: 979, 2020.

LOPES, P.P. & STAMENKOVIC, V.R. Past, present, and future of lead–acid batteries. *Science* 369: 923, 2020.

LYU, Y.C.; HUANG J.; LI, H.: Layered and Spinel Structural Cathodes. In: ZHANG, Z., ZHANG, S. S. (Eds). *Rechargeable Batteries: Materials, Technologies and New Trends*, p. 291–310. Springer, Switzerland. 2015.

MA, S; JIANG, M.; TAO, P.; SONG, C.; WU, J.; WANG, J.; DENG, T. & SHANG, W. Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A review. *Prog. Nat. Sci.* 28: 653, 2018.

MACHADO, C. T. & MIRANDA, F. S. Energia Solar Fotovoltaica: Uma Breve Revisão *Rev. Virtual Quim.* 7: 126, 2015.

MANTHIRAM, A. An outlook on lithium ion battery technology. *ACS Cent. Sci.* 3: 1063, 2017.

MANTHIRAM. A reflection on lithium-ion battery cathode chemistry. *Nat. Commun.* 11: 1550, 2020.

- MANTHIRAM, A & GOODENOUGH, J.B. Layered lithium cobalt oxide cathodes. *Nat. Energy*. 6: 323, 2021.
- MAO, Z.; FARKHONDEH, M.; PRITZKER, M.; FOWLER, M. & CHEN, Z. Dynamics of a Blended Lithium-Ion Battery Electrode During Galvanostatic Intermittent Titration Technique. *Electrochim. Acta*. 222: 1741, 2016.
- MIAO, Y.; HYNAN, P.; VON JOUANNE, A. & YOKOCHI, A. Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements. *Energies*. 12: 1074, 2019.
- MME. Ministério de Minas e Energia. MME atua para garantir ao Brasil novos investimentos internacionais com o lítio no Vale do Jequitinhonha (MG). Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-atua-para-garantir-ao-brasil-novos-investimentos-internacionais-com-o-litio-no-vale-do-jequitinhonha-mg>>. Acesso em: 29 maio 2023.
- MORAIS, L.C.T.; AMARAL F.A.; MARQUES, D.M.; SOUSA, R.M. & CANOBRE, S.C. Preparação e caracterização de eletrólitos sólidos poliméricos a partir de pan/pva para utilização em baterias recarregáveis de lítio. *Horizonte Científico (Uberlândia)*, v. 9, p. 1-35, 2015.
- NG SOLAR. Preço da energia elétrica CPFL. 2023. Disponível em: <<https://www.ngsolar.com.br/single-post/preco-kwh-cpfl#:~:text=Com%20o%20reajuste%20de%202023,%24%200%2C73%20por%20KWh>>. Acesso em 29 jun. 2023.
- NIEHS. National Institutes of Environmental Health Sciences. Air Pollution and Your Health. 2020. Disponível em: <https://www.niehs.nih.gov/health/materials/air_pollution_and_your_health_508.pdf> Acesso em 29 jun. de 2023.
- NOH, H.J.; YOUN, S.; YOON, C.S. & SUN, Y.K. Comparison of the structural and electrochemical properties of layered Li[NixCoyMnz]O2 (x = 1/3, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 and 0.85) cathode material for lithium-ion batteries. *J. Power Sources*. 233: 121, 2013.
- NZEREOGU, P.U.; OMAH, A.D.; EZEMA, F.I.; IWUOHA, E.I. & NWANYA, A.C. Anode materials for lithium-ion batteries: A review. *App. Surf. Sci. Adv.* 9: 100233, 2022.
- OBER, S.; MESNIER, A. & MANTHIRAM, A. Surface Stabilization of Cobalt-Free LiNiO2 with Niobium for Lithium-Ion Batteries. *ACS App. Mater. Interfaces*. 15: 1442, 2023.
- PAVLOV, D. *Lead-Acid Batteries: Science and Technology*. Elsevier Science, 2011.
- PECKHAM, G.D. & MCNAUGHT, I.J. Heat and Work are Not “Forms of Energy”. *J. Chem. Educ.* 70: 89, 1993.
- PELED, E. & MENKIN, S. Review—SEI: Past, Present and Future. *J. Electrochem. Soc.* 164: A1703. 2017.
- PENG, Y.; NISHIKAWA, K. & KANAMURA, K. Effects of Carbonate Solvents and Lithium Salts in High-Concentration Electrolytes on Lithium Anode. *J. Electrochem. Soc.* 169: 060548, 2022.
- PLETCHER, D. & WALSH, F.C. *Industrial electrochemistry*. 2nd ed. Chapman and Hall, London, 1990.
- RAIĆ, M.; MIKAC, L.; MARIĆ, I.; ŠTEFANIĆ, G.; ŠKRABIĆ, M.; GOTIĆ, M. & IVANDA, M. Nanostructured Silicon as Potential Anode Material for Li-Ion Batteries. *Mol.* 25: 891, 2020.

RÁDIO SENADO. Projeto prevê pontos de recarga de carros elétricos em postos de abastecimento nas rodovias. Disponível em:

<[RAMASUBRAMANIAN, B.; SUNDARRAJAN, S.; CHELLAPPAN, V.; REDDY, M.V.; RAMAKRISHNA, S. & ZAGHIB, K. Recent Development in Carbon-LiFePO₄ Cathodes for Lithium-Ion Batteries: A Mini Review. Batteries. 8: 133, 2022.](https://www12.senado.leg.br/radio/1/noticia/2023/03/06/projeto-preve-pontos-de-recarga-de-carros-eletricos-em-postos-de-abastecimento-nas-rodovias#:~:text=Projeto- Projeto%20prev%C3%AA%20pontos%20de%20recarga%20de%20carros%20el%C3%A9tricos%20em%20postos,de%20abastecimento%20nas%20rodovias%20federais.> Acesso em: 24 jul. 2023.</p></div><div data-bbox=)

RENAULT BRASIL. Kwid E-Tech. Disponível em:

<<https://www.renault.com.br/veiculos-eletricos/kwid-etech.html>>. Acesso em: 29 jun. 2023.

REUTERS. EU proposes effective ban on new fossil-fuel car sales by 2035. Reuters, 14 jul. 2021.

Disponível em:

<<https://www.reuters.com/business/retail-consumer/eu-proposes-effective-ban-new-fossil-fuel-car-sales-2035-2021-07-14/>>. Acesso em: 30 mai. 2023.

REUTERS. EU countries poised to approve 2035 phaseout of CO₂-emitting cars. Reuters, 28 mar. 2023. Disponível em:

<<https://www.reuters.com/business/autos-transportation/eu-countries-poised-approve-2035-phaseout-co2-emitting-cars-2023-03-28/#:~:text=The%20EU%20law%20will%20require,new%20car%20fleets%20in%20Europe>>. Acesso em: 30 mai. 2023.

ROCHA-FILHO, R.C. & TOLENTINO, M. . A Química no Efeito Estufa. Quím. Nova na Esc. 8: 10, 1998.

ROSOLEM, M.F.N.C.; BECK, R.F.; SANTOS, G.R. & ARIOLI, V.T. Bateria de Lítio-Íon: conceitos básicos e potencialidades. Cad. CPqD Tecnologia. 8: 59, 2012.

SANGUESA, J.A.; TORRES-SANZ, V.; GARRIDO, P.; MARTINEZ, F.J. & MARQUEZ-BARJA, J.M. A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges. Smart Cities. 4: 372, 2021.

SEEG. Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa. Análise das Emissões de Gases de Efeito Estufa e Suas Implicações Para as Metas Climáticas do Brasil / 1970-2021. 2023.

Disponível em: <<https://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2023/03/SEEG-10-anos-v4.pdf>> Acesso em: 17 jul. 2023.

STAMPATORI, D.; RAIMONDI, P.P. & NOUSSAN, M. Li-Ion Batteries: A Review of a Key Technology for Transport Decarbonization. Energies. 13: 2638, 2020.

TICIANELLI, E.A. & GONZALEZ, E.R.: Eletroquímica: Princípios e Aplicações. 2.ed. São Paulo: Edusp, 2005.

TOLGANBEK, N; YERKINBEKOVA, Y.; KALYBEKKYZY, S.; BAKENOV, Z. & MENTBAYEVA, A. Current state of high voltage olivine structured LiMPO₄ cathode materials for energy storage applications: a review. J. Alloys Compd. 882: 160774, 2021.

TOMA, H.E. Energia, Estados e Transformações Químicas. (Coleção de Química Conceitual v.2). São Paulo: Blucher, 2013.

TOYOTA. Toyota Corolla Cross. Disponível em: <<https://www.toyota.com.br/modelos/corolla-cross>> Acesso em: 18 set. 2023.

UE, M.; SAKAUSHI, K. & UOSAKI, K. Basic Knowledge in Battery Research Bridging the Gap between Academia and Industry. *Mater. Horiz.* 7: 1937, 2020.

UPS BATTERY CENTER (2022a). Lead Batteries at the Heart of Electric Cars. Disponível em: <<https://www.upsbatterycenter.com/blog/lead-batteries-at-the-heart-of-electric-cars/>>. Acesso em: 04 jul. 2023.

UPS BATTERY CENTER (2022b). Solid-State Lithium Batteries Without Dendrites. 2022. Disponível em: <<https://www.upsbatterycenter.com/blog/solid-state-lithium-batteries-without-dendrites/>>. Acesso em: 01 ago. 2023.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. History of the Electric Car. Disponível em: <<https://www.energy.gov/articles/history-electric-car>>. Acesso em 04 jul. 2023.

WANG, R.; CUI, W.; CHU, F. & WU, F. Lithium metal anodes: Present and future, *J. Energy Chem.* 48: 145, 2020.

WURM, C.; OETTINGER, O.; WITTKAEMPER, S.; ZAUTER, R. & VUORILEHTO, K. Anode materials for lithium-ion batteries. In: KORTHAUER, R. (ed.) *Lithium-Ion-Batteries: Basics and Applications*, p. 44–57. Springer, Berlin. 2018.

XU, K. Nonaqueous Liquid Electrolytes for Lithium-Based Rechargeable Batteries. *Chem. Rev.* 104: 4303, 2004.

YAO, W.; CHOUCANE, M.; LI, W.; BAI, S.; LIU, Z.; LI, L.; CHEN, A. X.; SAYAHPOUR, B.; SHIMIZU, R.; RAGHAVENDRAN, G.; SCHROEDER, M. A.; CHEN, Y. T.; TAN, D. H. S.; SREENARAYANAN, B.; WATERS, C. K.; SICHLER, A.; GOULD, B.; KOUNTZ, D. J.; LIPOMI, D. J.; ZHANG, M. & MENG, Y. S. A 5 V-class cobalt-free battery cathode with high loading enabled by dry coating. *Energy Environ. Sci.* 16: 1620, 2023.

ZARBIN, A. & ORTH, E. Algumas Estruturas do Carbono Elementar e sua Importância para o Desenvolvimento e Soberania do Brasil. *Quím. Nova.* 42: 1225, 2019.

ZHANG, T.; LI, D.; TAO, Z. & CHEN, J. Understanding electrode materials of rechargeable lithium batteries via DFT calculations, *Prog. Nat. Sci.: Mater. Int.* 23: 256, 2013.

ZHAO, W.; YI, J. & HAOSHEN, Z. Solid-State Electrolytes for Lithium-Ion Batteries: Fundamentals, Challenges and Perspectives. *Electrochem. Energ. Rev.* 2: 574, 2019.

ZHOU, D.; SHANMUKARAJ, D.; TKACHEVA, A.; ARMAND, M. & WANG, G. Polymer Electrolytes for Lithium-Based Batteries: Advances and Prospects. *Chem.*, 5: 2326, 2019.

ZLETRIC. Zletric - Rede de recarga para veículos elétricos. Disponível em: <<https://www.zletric.com.br/>>. Acesso em: 16 jun. 2023.

5. ANEXOS

A - CÁLCULO DOS CUSTOS DE RODAGEM

O cálculo do custo de abastecimento e carregamento (em dólares) foi determinado levando-se em consideração a cotação do dólar, o preço médio do litro de gasolina na cidade de São Carlos e da energia elétrica apresentados na Tabela 5A.1.

TABELA 5A.1. Cotação do dólar, preço médio do litro de gasolina na cidade de São Carlos, SP e preço da energia elétrica no mês de abril de 2023.

Cotação do Dólar (R\$/US\$)	Preço do Litro de Gasolina (R\$/L)	Preço da Energia Elétrica (R\$/kW h)
4,99	5,24	0,89

Fonte: Próprio autor e NG SOLAR 2023.

Para os BEVs, os custos de abastecimento foram determinados a partir da Equação 5A.1 com base nos dados das Tabelas 5A.1 e 5A.2.

TABELA 5A.2. Autonomia e capacidade energética da bateria de dois veículos elétricos selecionados.

Montadora / Modelo do Veículo	Autonomia (km)	Capacidade Energética da Bateria (kW h)
Renault / Kwid E-Tech	185	26,8
JAC / E-JS1	161	30,0

Fonte: RENAULT BRASIL e JAC MOTORS.

Custo de carregamento = capacidade energética (kW h) × preço da energia elétrica (R\$/kW h) × cotação do dólar (US\$/R\$) (5A.1)

Com relação aos veículos a combustão e veículos elétricos híbridos, o cálculo do custo de abastecimento foi realizado a partir da Equação 5A.2 com base nos dados da Tabelas 5A.1 e 5A.3. Como o E-JS1 é o veículo elétrico que oferece menor autonomia

quando sua bateria está totalmente carregada, a distância de 160 km foi escolhida para a comparação dos custos de abastecimento e carregamento dos veículos apresentados nas Tabelas 5A.2 e 5A.3.

TABELA 5A.3. Valores da distância percorrida por litro de gasolina de dois veículos elétricos híbridos e dois veículos a combustão selecionados.

Montadora / Modelo do Veículo	Tipo de Veículo	Distância Percorrida por Litro de Gasolina (km/L)
Jeep / Compass 4xe	HEV	25,4
Toyota / Corolla Cross XRX Hybrid	HEV	17,8
Renault / Kwid Zen	Combustão	15,3
Fiat / Mobi Like	Combustão	13,5

Fonte: AUTOESPORTE, 2022; GARAGEM 360, 2022; JEEP e TOYOTA.

$$\text{Custo de abastecimento} = (\text{preço da gasolina (R\$/L)} \times \text{distância (km)} \times \text{cotação do dólar (US\$/R\$)}) \div (\text{consumo (km/L)}) \quad (5A.2)$$

B - CUSTOS DE MANUTENÇÃO A LONGO PRAZO NA CIDADE DE SÃO PAULO

Para a determinação dos custos de manutenção no primeiro ano, os dados da Tabela 5B.1 e as equações 5B.1 e 5B.2 foram utilizadas. É importante ressaltar que os custos de abastecimento mensal têm como referência os valores obtidos no Anexo A e foram considerados fixos para o cálculo do custo anual. Ademais, a política vigente em São Paulo estabelece a isenção de 50 % do valor IPVA sobre os BEVs e HEVs.

TABELA 5B.1. Valores do preço do veículo, alíquota do IPVA, e custo mensal de abastecimento de dois modelos de veículos 100 % elétricos, dois modelos de veículos híbridos e dois veículos a combustão.

Veículo	Preço do veículo (R\$)	Preço do veículo (US\$)	Alíquota do IPVA (%)	Gasto IPVA (US\$)	Custo de abastecimento mensal (US\$/mês)
Kwid E-Tech	123.490	24.747	2	494,95	4,78
E-JS1	126.900	25.431	2	508,62	5,35
Compass 4xe	347.300	69.599	2	1391,98	6,61
Corolla Cross XRX	210.990	42.283	2	845,65	9,44
Kwid Zen	71.190	14.267	4	570,66	10,98
Mobi Like	69.900	14.008	4	560,32	12,45

Fonte: Próprio autor com dados de FIAT MOBI; JAC MOTORS; JEEP; JORNAL DO CARRO, 2024; RENAULT BRASIL e TOYOTA.

$$\text{Gasto IPVA (US\$)} = \text{preço do veículo (US\$)} \times \text{alíquota do IPVA} \div 100 \quad (5B.1)$$

$$\text{Custo (US\$)} = \text{Gasto IPVA (US\$)} + \text{custo abastecimento (US\$/mês)} \times 12 \text{ meses} \quad (5B.2)$$

C - CÁLCULO DA ENERGIA LIVRE DE GIBBS PADRÃO DE REAÇÃO DA BATERIA DE CHUMBO-ÁCIDO

Segundo ATKINS *et al.* (2018), a energia livre de Gibbs padrão de reação ($\Delta_r G^\circ$) pode ser obtida a partir da combinação das energias livre de Gibbs de formação ($\Delta_f G^\circ$), como expresso pela Equação 5C.1, sendo n os coeficientes estequiométricos da equação química.

$$\Delta_r G^\circ = \sum n \Delta_f G^\circ(\text{produtos}) - \sum n \Delta_f G^\circ(\text{reagentes}) \quad (5C.1)$$

A reação global da bateria chumbo-ácido está apresentada na Equação 5C.2. Para o cálculo de $\Delta_r G^\circ$, os valores de $\Delta_f G^\circ$ contidos na Tabela 5C.1 foram utilizados. O resultado pode ser calculado aplicando-se a Equação 5C.1, como mostrado a seguir na Equação 5C.3.

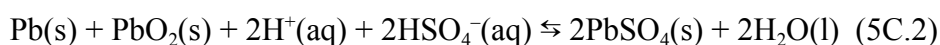


TABELA 5C.1. Valores de energia livre de Gibbs de formação para algumas substâncias selecionadas.

Substância	Energia livre de Gibbs de formação ($\Delta_f G^\circ$) / (kJ mol ⁻¹)
Pb(s)	0
PbO ₂ (s)	-217,33
H ⁺ (aq)	0
HSO ₄ (aq)	-755,91
PbSO ₄ (s)	-813,14
H ₂ O(l)	-237,13

Fonte: Adaptado de ATKINS *et al.*, 2018.

$$\begin{aligned} \Delta_r G^\circ &= \{(2 \text{ mol}) \times (-813,14 \text{ kJ mol}^{-1}) + (2 \text{ mol}) \times (-237,13 \text{ kJ mol}^{-1})\} - \{(1 \text{ mol}) \times (0) + (1 \\ &\text{ mol}) \times (-217,33 \text{ kJ mol}^{-1}) + (2 \text{ mol}) \times (0) + (2 \text{ mol}) \times (-755,91 \text{ kJ mol}^{-1})\} = \\ &= -371,39 \text{ kJ mol}^{-1} \quad (5C.3) \end{aligned}$$