

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE CAMPINAS
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM GESTÃO DE ENERGIA E
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

EDUARDO HENRIQUE GIRARDI

**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE CÉLULAS DE BATERIAS
DE VEÍCULOS ELÉTRICOS E HÍBRIDOS PARA SEGUNDA
VIDA COMO MODELO DE NEGÓCIO E
SUSTENTABILIDADE.**

CAMPINAS/SP
2024

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE CAMPINAS
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM GESTÃO DE ENERGIA E
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

EDUARDO HENRIQUE GIRARDI

**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE CÉLULAS DE BATERIAS
DE VEÍCULOS ELÉTRICOS E HÍBRIDOS PARA SEGUNDA
VIDA COMO MODELO DE NEGÓCIO E
SUSTENTABILIDADE.**

Trabalho de Graduação apresentado por **Eduardo Henrique Girardi**, como pré-requisito para a conclusão do Curso Superior de Tecnologia em **Gestão de Energia e Eficiência Energética**, da Faculdade de Tecnologia de Campinas, elaborado sob a orientação do Prof. Me. Dr. **Francisco Del Moral Hernandez**

CAMPINAS/SP
2024

FICHA CATALOGRÁFICA
CEETEPS - FATEC Campinas - Biblioteca

G517a

GIRARDI, Eduardo Henrique

Avaliação da utilização de células de baterias de veículos elétricos e híbridos para segunda vida como modelo de negócio e sustentabilidade.

Eduardo Henrique Girardi.

Campinas, 2024.

88 p.; 30 cm.

Trabalho de Graduação do Curso de Gestão de Energia e Eficiência Energética – Faculdade de Tecnologia de Campinas.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Del Moral Hernandez.

1. Baterias de segunda vida. 2. Modelo de negócio. 3. Reutilização. 4. Economia circular. 5. Sustentabilidade. I. Autor. II. Faculdade de Tecnologia de Campinas. III. Título.

CDD 621.3

Catálogo-na-fonte: Bibliotecária: Aparecida Stradiotto Mendes – CRB8/6553

TG GEEE 24.1

EDUARDO HENRIQUE GIRARDI

Avaliação da utilização de células de baterias de veículos elétricos e híbridos para segunda vida como modelo de negócio e sustentabilidade.

Trabalho de Graduação apresentado como exigência parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Gestão de Energia e Eficiência Energética, pelo CEETEPS / Faculdade de Tecnologia – Fatec Campinas.

Campinas, 24 de junho de 2024.

BANCA EXAMINADORA



Francisco Del Moral Hernandez
Fatec Campinas



Henrique Antonio Mielli Camargo
Fatec Campinas



Sandro Pinheiro de Assis Cosso
Fatec Campinas

AGRADECIMENTOS

A gratidão pela realização desse material é oferecida inicialmente a mim mesmo por todo esforço, dedicação e desbravamento nas pesquisas e aplicações, em meio a tantas adversidades e dificuldades inter e intrapessoais. Aos meus pais Célio e Regina que apesar da pouca orientação, pode transmitir força e confiança. Meus irmãos Rodrigo e Flávio que de forma indireta, me orientam e direcionam. A minha esposa Fernanda e as filhas Gabriela e Rafaela por emprestar o tempo e a paciência, em especial nos momentos de maiores dificuldades. A irmandade de 12 passos que acreditou e me mostrou como viver. Ao corpo docente da instituição de ensino pelo conhecimento aplicado e provocação em relação à busca de novos desafios, em especial a professora Daniela Dal Fabro. Aos caros colegas de classe e ao orientador deste trabalho Prof. Me. Dr. Francisco Del Moral Hernandez pela participação direta na construção de todo conteúdo. Pessoas que me direcionaram a acesso a pesquisas científicas valiosas para continuidade deste estudo como a colega Aline Ribeiro. Ofereço minha sincera gratidão ao Prof. Robson Ferreira Cruz pela ajuda na escolha e desenvolvimento do tema. Ao curso Extecamp, seus professores e colegas pela vasta abertura de horizontes a respeito do tema. Ao meu Poder Superior que me concede todas as oportunidades, todas as horas e em todos os dias. É sim uma honra e uma satisfação poder chegar nesse momento ímpar, e ele divido com todos vocês. Gratidão!

RESUMO

Este trabalho analisa a viabilidade e os impactos de modelos de negócio focados na reutilização de baterias utilizadas inicialmente em veículos elétricos e híbridos plug-in, para outros fins quando atingem 80% nesse primeiro ciclo. O objetivo principal é investigar como a implementação de um modelo de negócio sustentável pode promover a reutilização eficiente dessas baterias, contribuindo para a economia circular e reduzindo o impacto ambiental. A pesquisa adotou uma metodologia mista, combinando análises quantitativas e qualitativas. Foram coletados dados através de entrevistas com especialistas do setor e principalmente com análises de mercado através de pesquisas científicas.

Os resultados demonstram que a reutilização de baterias de segunda vida pode ser economicamente viável quando necessária à sua substituição no valor de propriedade do veículo e em contrapartida, essa variabilidade pode contribuir em benefícios ambientais. No entanto, desafios como a padronização tecnológica, regulamentação e viabilidade econômica precisam ser superados. Conclui-se que um modelo de negócio bem estruturado, aliado a políticas governamentais favoráveis e inovação tecnológica, pode viabilizar a reutilização de baterias de segunda vida, gerando valor econômico e ambiental. Recomenda-se a criação de parcerias entre empresas, governo e instituições de pesquisa para fomentar o desenvolvimento e a implementação dessas soluções.

Palavras-chave: Baterias de segunda vida, modelo de negócio, reutilização, economia circular, sustentabilidade.

ABSTRACT

This work analyzes the feasibility and impacts of business models focused on the reuse of batteries initially used in electric vehicles (EVs) and plug-in hybrid vehicles, for other purposes when they reach 80% capacity in this first cycle. The main objective is to investigate how the implementation of a sustainable business model can promote the efficient reuse of these batteries, contributing to the circular economy and reducing environmental impact. The research adopted a mixed methodology, combining quantitative and qualitative analyses. Data were collected through interviews with industry experts and primarily market analysis through scientific research.

The results demonstrate that the reuse of second-life batteries can be economically viable when necessary to replace them in the vehicle ownership value. Furthermore, this viability brings environmental benefits. However, challenges such as technological standardization, regulation, and economic viability need to be overcome. It is concluded that a well-structured business model, combined with favorable government policies and technological innovation, can enable the reuse of second-life batteries, generating economic and environmental value. It is recommended to create partnerships between companies, government, and research institutions to foster the development and implementation of these solutions.

Keywords: Second life batteries, business model, reuse, circular economy, sustainability.

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 – Taxa de motorização de 2001 a 2023.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2 – Metas propostas no acordo de Paris 2015.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 3 – Classificação dos modelos de veículos elétricos e híbridos.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 4 – Países com leis ou projetos para banir o uso de veículos com motor a combustão.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 5 – Metas de implementação de veículos elétricos em países da América latina e Caribe.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 6 – Ação química simplificada de uma célula voltaica.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 7 – Comparação de densidade de energia em função do tamanho e peso de diferentes tipos baterias.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 8 - Reação simplificada da célula eletroquímica.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 9 – Conjunto de baterias completo retirado da base do carro (a). Conjunto de baterias sendo desmontado (b).....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 10 – Protótipo de BMS em desenvolvimento para modelos da fórmula SAE.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 11 – Estrutura básico de um sistema de gerenciamento de baterias.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 12 – Arranjo de baterias de segunda via para fins de armazenamento.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 13 – Fatores de capacidade média solar fotovoltaica (esquerda) e eólica (direita) em 2022.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 14 – Reutilização de baterias BVS em um sistema de energia distribuída renovável.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 15 – Vista externa do modelo em estudo.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 16 – Posição do conjunto de baterias e controlador de carregamento.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 17 – Pack de bateria instalado e em operante.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 18 – Valor do conjunto de bateria novo.....</i>	<i>70</i>

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Frota de veículos em unidades no Brasil.....	21
Gráfico 2 - Frota de utilitários em unidades no Brasil.....	22
Gráfico 3 - Emissão de composição de gases poluentes locais no período de 2006 a 2019...23	
Gráfico 4 - Relação de preços de modelos de veículos elétricos e híbridos e suas respectivas baterias.....	28
Gráfico 5 - Estoque global de carros elétricos de (2010 a 2022).....	32
Gráfico 6 - Conjunto de dados simulados usado para a análise de sensibilidade à temperatura em função aos números de ciclos. Os valores de temperatura variam de 20 °C a 35° C.....	43
Gráfico 7 - Ponto do joelho da capacidade de retenção de energia em relação ao número de ciclos.....	47
Gráfico 8 - Curva de SoH do ciclo de vida de uma célula de íons de lítio.....	48
Gráfico 9 - Valor estimado da SLB em função da taxa de falha.....	65
Gráfico 10 - Preço das baterias de 2015 a 2023.....	76

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 - Frota de veículos de 2006 a 2022.....</i>	<i>9</i>
<i>Tabela 2 - Tipos, formatos, símbolos e principais aplicações das baterias recarregáveis.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabela 3 - Definição dos termos técnicos comumente utilizados nos diagnósticos de armazenamento de energia.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabela 4 - Especificação técnica do conjunto de propulsão.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabela 5 - Especificação técnica do conjunto de bateria de alta tensão.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabela 6 - Cenário 1, representando o menor valor de venda.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabela 7 - Cenário 2, representando o valor moderado de venda.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabela 8 - Cenário 3, representando o melhor cenário.....</i>	<i>73</i>

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação dos componentes químicos contidos nas baterias de íon lítio.....41

LISTA DE ABREVIACOES

<i>3Rs</i>	<i>Reparo, reuso e reciclagem.</i>
<i>AP</i>	<i>Aprendizado profundo, no ingls deep learning (DL)</i>
<i>BIL</i>	<i>Bateria de ion de ltio</i>
<i>BSV</i>	<i>Bateria de segunda vida</i>
<i>CO</i>	<i>Monxido de carbono</i>
<i>CO²</i>	<i>Dixido de carbono</i>
<i>Cu</i>	<i>Cobre</i>
<i>EDC</i>	<i>Estado de Carga, no ingls state of charge (SoH)</i>
<i>EDS</i>	<i>Estado de Sade, no ingls state of health (SoH)</i>
<i>GEE</i>	<i>Gases de efeito estufa</i>
<i>H</i>	<i>Hidrognio</i>
<i>HC</i>	<i>Hidrocarbonetos</i>
<i>IES</i>	<i>Interfase de eletrlito slido, no ingls solid electrolyte interface (SEI)</i>
<i>Li</i>	<i>Ltio</i>
<i>MCI</i>	<i>Motor de combustão interna</i>
<i>ME</i>	<i>Mobilidade eltrica</i>
<i>NO_x</i>	<i>xidos de nitrognio</i>
<i>O</i>	<i>Oxignio</i>
<i>Pb-A</i>	<i>Bateria de chumbo cido</i>
<i>PdC</i>	<i>Profundidade de descarga, no ingls depth of discharge (DoD)</i>
<i>SAE</i>	<i>Sistema de Armazenamento de Energia</i>
<i>SGB</i>	<i>Sistema de gerenciamento de bateria, no ingls battery management system (BMS)</i>
<i>SO_x</i>	<i>xidos de enxofre</i>
<i>TC</i>	<i>Taxa de carregamento, no ingls Loading rate (C-rate)</i>

<i>VE</i>	<i>Veículo elétrico</i>
<i>VEB</i>	<i>Veículo elétrico a bateria.</i>
<i>VECC</i>	<i>Veículos elétricos movidos a células de combustível</i>
<i>VEH</i>	<i>Veículo elétrico híbrido</i>
<i>VEH</i>	<i>Veículo elétrico híbrido</i>
<i>VEHP</i>	<i>Veículo elétrico híbrido plug-in</i>
<i>VUR</i>	<i>Vida útil restante, no inglês remaining useful life (RUL)</i>
<i>W</i>	<i>Whats</i>
<i>Zn</i>	<i>Zinco</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.2	JUSTIFICATIVA/PROBLEMÁTICA	16
1.3	OBJETIVOS	17
1.3.1	Objetivo Geral	17
1.3.2	Objetivos específicos	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Frota	18
2.2	Resultados do aumento da frota para o meio ambiente	21
2.3	Veículos e Mobilidade Elétrica	27
2.4	Baterias	33
2.4.1	Importância das baterias nos veículos elétricos	36
2.4.2	Baterias de lítio	37
2.4.3	Vida útil das baterias de lítio	41
2.4.4	Identificação da degradação da vida útil das baterias	44
2.4.5	Métodos de análise da vida útil das baterias	47
2.5	Sistema de gerenciamento de bateria (BMS)	51
2.6	Principais aplicações de baterias de segunda vida	55
3	METODOLOGIA	62
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
5.1	MATERIAIS	67
5.2	ELABORAÇÃO DA ANÁLISE	72
5	CONCLUSÃO	75
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78

1 INTRODUÇÃO

O setor de transporte desempenha um papel fundamental na redução das emissões de gases de efeito estufa, com o Brasil aproveitando uma variedade de fontes de energias renováveis, como etanol e biodiesel. No entanto, a propulsão elétrica está ganhando destaque como uma alternativa eficiente, reduzindo ou eliminando as emissões de gases nocivos. O ecossistema da mobilidade elétrica é visto como disruptivo e essencial para a descarbonização do setor de transportes, com avanços significativos na tecnologia. Apesar disso, questões sobre a durabilidade das baterias e o valor de revenda dos veículos elétricos ainda preocupam consumidores e frotistas.

O rápido crescimento urbano aumenta a demanda por transporte, predominantemente alimentado por combustíveis fósseis, resultando em uma significativa taxa de motorização. Isso contribui para problemas como congestionamentos, acidentes e poluição, sendo o setor de transporte responsável por uma parcela considerável das emissões de dióxido de carbono (CO₂). Compromissos internacionais, como o Acordo de Paris, levaram países como o Brasil a adotar metas de redução de emissões. A eletrificação veicular é vista como uma solução promissora, dada a diversidade da matriz energética brasileira, incluindo biocombustíveis como o etanol. Os veículos elétricos (VE), impulsionados por motores elétricos e alimentados por baterias, representam uma alternativa importante para reduzir as emissões de gases de efeito estufa.

Nas últimas duas décadas, houve uma mudança significativa na adoção de VE, impulsionada pela preocupação com a poluição veicular e o CO₂. Os veículos elétricos puros, por não emitirem gases poluentes durante a propulsão, têm impactos positivos na qualidade do ar e na saúde pública, especialmente em áreas urbanas. As baterias de íon de lítio (BIL) são cruciais para alimentar esses veículos, devido à sua alta densidade de energia em relação ao peso. O reuso dessas baterias é uma oportunidade importante devido ao seu potencial para armazenamento de energia em diversas aplicações. A demanda por BIL tem crescido rapidamente, impulsionada pelo aumento da procura por baterias de veículos elétricos, o que requer uma significativa expansão da capacidade de produção para atender às necessidades futuras.

O comportamento das BIL é fortemente influenciado pelas condições térmicas de operação, como temperatura e uniformidade, afetando seu desempenho e vida útil. Enquanto a reciclagem das baterias de chumbo-ácido é bem regulamentada, as de íons de lítio enfrentam desafios nesse aspecto. Com o aumento dos VE, o descarte dessas baterias pode resultar em desperdício de recursos e poluição, tornando o reuso uma alternativa para maximizar seu valor econômico e ambiental. Fatores como temperatura, tensão, corrente e estado de carga influenciam na degradação da bateria, que pode ocorrer de diversas formas, incluindo perda de estoque de lítio e perda de material ativo. O estado de saúde (SoH) é uma medida crucial para avaliar a degradação da bateria, com a capacidade e a resistência interna sendo métricas comuns. O tempo de vida útil é crucial para garantir o uso eficiente das baterias, sendo afetado por fatores como desbalanceamento interno e variações na impedância, destacando a importância da avaliação precisa para resultados confiáveis.

O sistema de gerenciamento de bateria (BMS) desempenha um papel fundamental na segurança e eficiência dos VE, protegendo as células da bateria contra condições adversas. Com o custo da bateria representando cerca de um terço do valor total de um EV, o BMS é essencial para maximizar o desempenho e a vida útil da bateria, evitando danos como descargas profundas e excesso de temperatura. Além da reciclagem, o reuso das baterias em fim de vida útil é uma alternativa promissora, com aplicações em armazenamento estacionário de energia e mobilidade de baixa exigência.

A proposta de integrar baterias de íons de lítio em segunda vida em estações de carregamento de VE, combinadas com fontes renováveis, destaca a utilização de energias limpas e a economia de recursos. A coordenação entre o armazenamento de energia e a geração de energia pode suavizar as flutuações na produção de energia e melhorar a eficiência e confiabilidade do sistema elétrico, contribuindo para a transição para uma matriz energética mais sustentável.

A problemática do trabalho é a desvalorização de VE devido à necessidade de substituição da bateria de alta voltagem. Examina três cenários para estimar o valor das células da bateria usadas, considerando o SoH da bateria e baseando-se em estudos científicos devido à falta de parâmetros nacionais para sua precificação. Para embasar a abordagem, foi realizada uma pesquisa bibliográfica abrangente e sistemática em diversas bases de dados. Propõe-se uma fórmula para estimar o valor das BSV com base na probabilidade de células

defeituosas, e o National Renewable Energy Laboratory desenvolveu uma ferramenta para explorar os efeitos de diferentes estratégias de reaproveitamento. Os preços das baterias reaproveitadas variam entre US\$38,00/kWh e US\$132,00/kWh, dependendo das variáveis consideradas na análise.

Os três cenários delineados destacam a importância de considerar o valor do kWh e a taxa de falha ao decidir entre baterias novas e BSV. Eles revelam que, à medida que o valor do kWh aumenta e a taxa de falha diminui, a vantagem financeira na compra de uma nova bateria também aumenta, chegando a 12,55% no cenário mais favorável. Isso ressalta a relevância do reuso de BSV em veículos elétricos, especialmente no contexto brasileiro, onde o mercado de baterias de segunda vida está em desenvolvimento.

A análise destaca que, apesar dos desafios atuais, como a falta de infraestrutura para reciclagem e reutilização, o mercado tem potencial para crescimento. A reutilização dessas baterias pode reduzir significativamente os custos de produção de novas baterias, além de diminuir o impacto ambiental associado à produção e ao descarte de baterias usadas. No entanto, para que esse mercado se desenvolva de forma sustentável, são necessárias mais pesquisas, infraestrutura adequada e regulamentações claras que incentivem o reuso e a reciclagem de baterias. Essas medidas podem impulsionar a transição para uma economia mais circular e sustentável.

1.2 JUSTIFICATIVA/PROBLEMÁTICA

Com objetivos claros de redução de gases de efeito estufa, o setor de transporte é fundamental para a transformação de baixa ou zero emissão de CO₂. O Brasil conta com ampla gama de fontes de energias renováveis e segundo MME (BRASIL, Ministério de Minas e Energia, 2023) os dois principais biocombustíveis líquidos usados no Brasil são o etanol obtido a partir de cana-de-açúcar e o biodiesel, que é produzido a partir de óleos vegetais ou de gorduras animais e adicionado ao diesel de petróleo em proporções variáveis.

A propulsão tendo como combustível a eletricidade, que cada vez mais percorre caminhos pavimentados por pesquisas, desenvolvimento e tecnologia, está se mostrando eficiente para a modalidade como ótima alternativa pois reduz ou tem emissão nula de gases nocivos ao meio ambiente no ato da locomoção. Em suma, o ecossistema da ME (mobilidade elétrica) é caracterizado como disruptivo, inovador e fundamental para a descarbonização do setor de transportes, e conta com avanços na cadeia. Mesmo com objetivos ambientais e por ser um mercado em expansão e desenvolvimento, consumidores comuns, pequenos, médio e grandes frotistas questionam: **“Quanto tempo dura a bateria? Quanto valerá o carro quando houver a necessidade de troca da bateria?”**

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

O Objetivo geral desta pesquisa está em explorar técnicas de análise, separação e recuperação de células de BIL de VE e VEHP (veículos elétricos híbridos plug-in) para aplicações de segunda vida menos exigentes, transformando o passivo financeiro devido o custo da troca da bateria em ativo econômico e sustentável ambientalmente.

1.3.2 Objetivos específicos

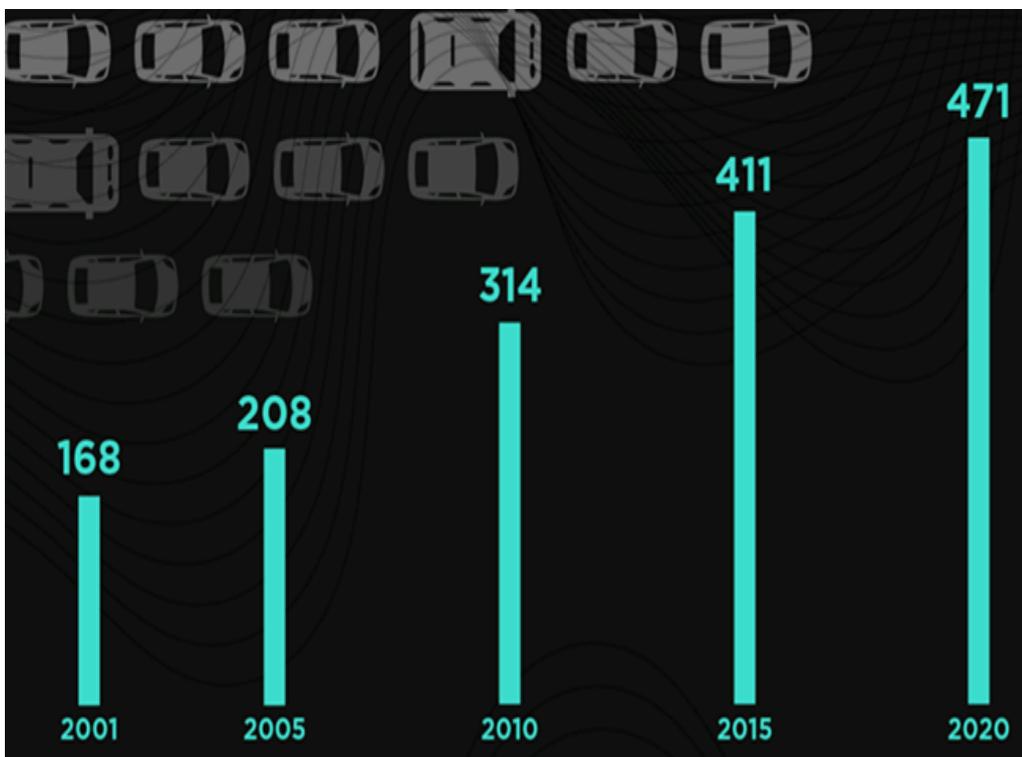
- A) Determinar através de pesquisas e projeções o término do primeiro ciclo de vida útil e possíveis avarias nas células BIL aplicada em VE e VEHP.
- B) Explorar e apresentar os principais fatores que determinem os estados e condições para utilização na segunda vida, em aplicações que exigem carga inferior em relação aos VE e VEHP como exemplo; patinetes, bicicletas, empilhadeiras ou estacionárias em residências ou empresas que possuam geração distribuída.
- C) Através de análise de dados coletados através das pesquisas apresentarem modelos de negócio de remanufatura das BIL destinando-a a equipamentos e produtos aptos ao uso das BSV. Assim, transformar a bateria usada em um ativo para negociação do novo item, reduzindo a depreciação do veículo ao final de sua vida útil especificada para esse fim.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Frota

Fenômenos naturais de sociedade como o rápido crescimento populacional em zonas urbanas geram grande demanda para setores como transportes, que ainda dependem fortemente de combustíveis fósseis como diesel e gasolina. A taxa de motorização, índice que mede o percentual de veículos rodoviários com base na frota, coletados através do Sistema Nacional de Registro de veículos (RENAVAN), sobre o número de habitantes de uma mesma região extraídos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas (IBGE), de periodicidade anual. O resultado indica um crescimento expressivo de veículos automotores individuais registrados nos últimos 20 anos. Os dados apontam que a taxa de motorização passou de 168 em 2001 para expressivos 471 em 2020 (MOBILIZA, 2023) ilustrado pela imagem 1.

Figura 1 - Taxa de motorização de 2001 a 2020.



Fonte - Site Mobilize Brasil.

No Brasil, o total de automóveis, que inclui automóveis, comerciais leves, caminhões e ônibus novos licenciados foi de 2.104.461 unidades, frente aos 2.787.850 de 2019, período pré pandêmico (ANFAVEA, 2023).

Segundo dados do IBGE, a frota de veículos gerais no Brasil de 2006 a 2022 obteve aumento de 2,55 vezes, passando de 45.029.257 para 115.116.532 conforme tabela 1.

Tabela 1 - Frota de veículos de 2006 a 2022.

Tipo	2006	2022	Relação
Automóvel	27.700.608	60.459.290	2,18
Bonde	216	42	0,19
Caminhão	1.761.659	3.022.315	1,72
Caminhão trator	278.468	849.372	3,05

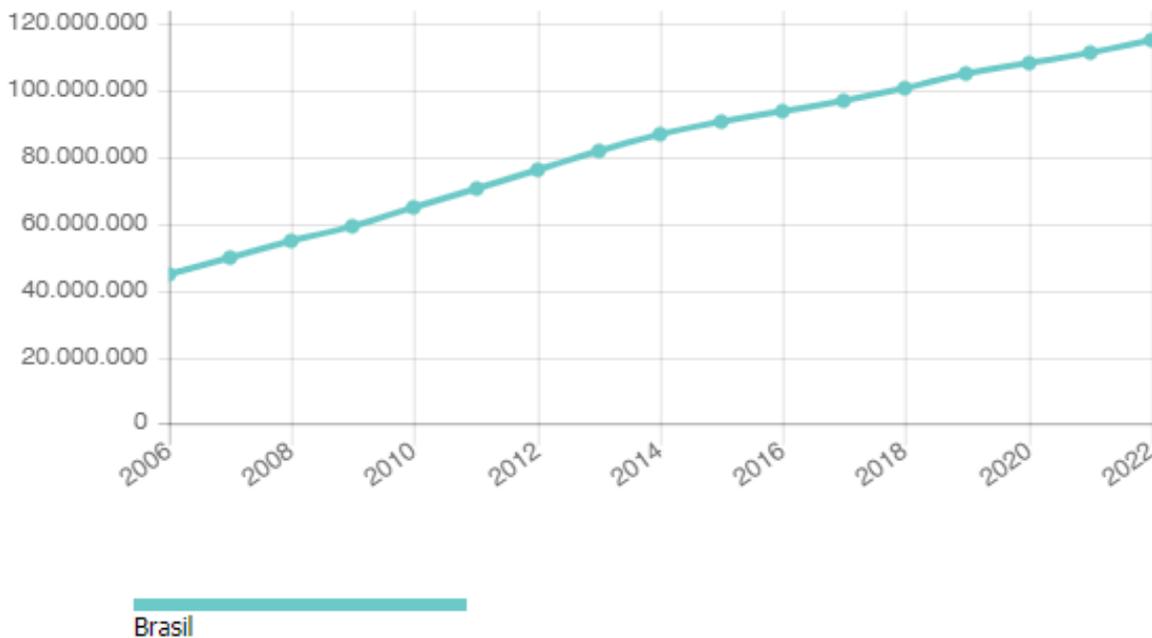
Caminhonete	1.932.907	9.078.740	4,70
Camioneta	2.408.134	4.102.821	1,70
Chassi plataforma	7.079	1.650	0,23
Ciclomotor	83.306	452.778	5,44
Micro ônibus	196.578	434.708	2,21
Motocicleta	7.881.199	25.746.762	3,27
Motoneta	1.348.219	5.372.584	3,98
Ônibus	351.913	688.880	1,96
Quadriciclo	149	282	1,89
Reboque	525.876	2.119.968	4,03
Semirreboque	455.998	1.226.863	2,69
Sidecar	6.600	8.576	1,30
Trator de esteira	78	234	3,00
Trator de rodas	13.227	36.433	2,75
Triciclo	2.305	42.421	18,40
Utilitário	71.139	1.441.234	20,26
Outros	3.599	30.579	8,50
Veículo	45.029.257	115.116.532	2,56

Fonte - IBGE, 2023.

A relação de utilitário é maior 20 vezes no período de apuração. Por ser um veículo movido a diesel possuindo assim maior poder poluente além de espaço físico. Essa modalidade tende a manter o crescimento de vendas em função do atendimento do segmento de comércio eletrônico que se mantém em ascensão principalmente após o período pandêmico.

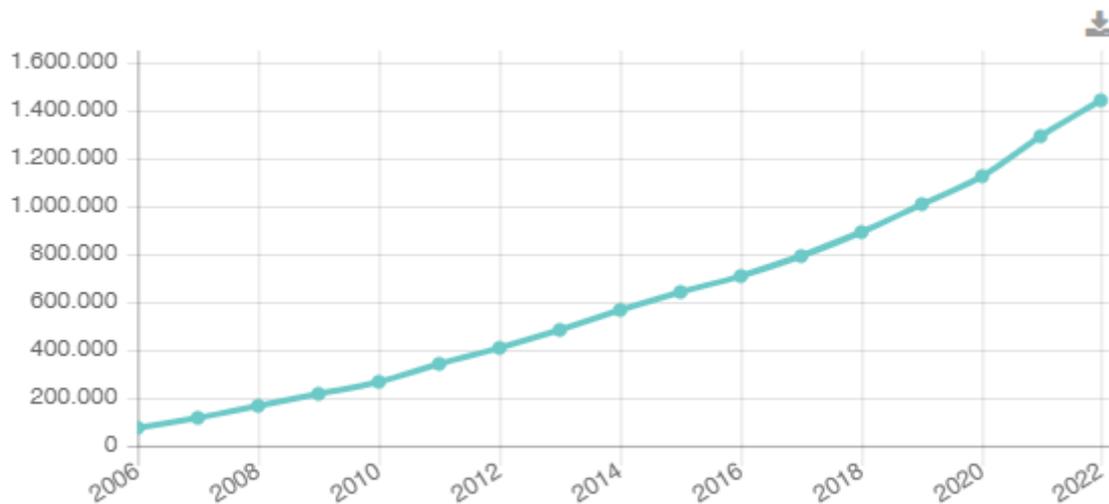
O gráfico 1 demonstra o crescimento da frota de veículos no Brasil e o gráfico 2, a frota de utilitários em evolução de acordo com a série histórica de 2006 a 2022.

Gráfico 1 - Frota de veículos em unidades no Brasil.



Fonte - IBGE, 2023.

Gráfico 2 - Frota de utilitários em unidades no Brasil.



Fonte: IBGE, 2023.

1.2 Resultados do aumento da frota para o meio ambiente

A frota veicular exerce poder de influência sobre a economia não apenas pelo fato de ser diretamente responsável por uma parcela tão relevante da indústria na produção própria, mas também por sua ligação com diversos outros setores industriais, como setores de aços e derivados, materiais eletrônicos e de artigos de borracha e plástico. Tem relevante participação em toda cadeia produtiva de bens e serviços do micro e macroeconomia. Contudo, o aumento de veículos em grande parte com motores a combustão interna (MCI) gera graves problemas de tráfego urbano como aumento dos congestionamentos, aumento dos sinistros de trânsito e conseqüentemente do tempo de deslocamento dos transportes públicos, além dos ruídos causadores de poluição sonora. Em especial, contribui para o aumento da geração do GEE (gases de efeito estufa). Em suma, o setor de transportes respondeu por quase 39% das emissões de CO² em 2022, tido como o setor com maior impacto na geração de poluentes a material particulado na atmosfera e conseqüentemente, causador de mudanças climáticas (PNME, 2022).

As emissões dos veículos rodoviários são a principal fonte de poluição, contendo substâncias tóxicas que afetam a saúde. Apesar dos fatores de emissão dos veículos novos estarem diminuindo, o aumento da frota e congestionamentos comprometem os avanços tecnológicos. A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2023) identifica gases como monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x), hidrocarbonetos (HC), óxidos de enxofre (SO_x) e material particulado nas emissões veiculares.

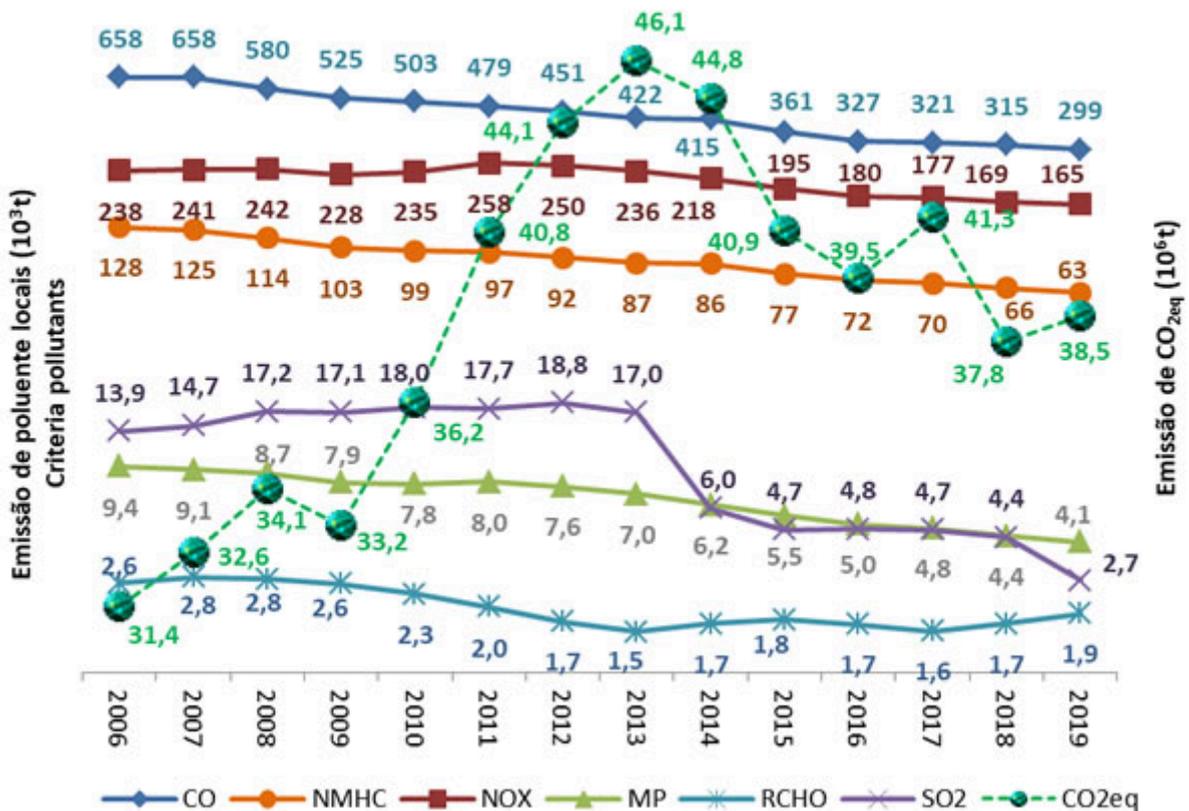
- O monóxido de carbono (CO) é um gás produzido pela queima incompleta de combustíveis. Quando inalado, diminui a capacidade do sangue de transportar oxigênio. Nos anos 70 e 80, a emissão de CO era alta devido aos veículos, mas avanços tecnológicos reduziram significativamente sua emissão.
- Os óxidos de nitrogênio (NO_x) são produzidos quando o nitrogênio reage com o oxigênio em altas temperaturas na câmara de combustão. Esses compostos contribuem para a formação do smog fotoquímico, que é um nevoeiro contaminado por fumaça, sendo o ozônio o principal poluente. O NO_x é considerado um dos poluentes mais preocupantes atualmente e requer tecnologias avançadas de controle, especialmente

em veículos movidos a óleo diesel, pois sua formação tende a aumentar com a eficiência dos motores.

- Os hidrocarbonetos (HC) são uma parte do combustível que não é completamente queimada e é expelida pelo motor. Eles também são emitidos como vapor de combustível de diferentes partes do veículo ou durante o abastecimento do tanque. Assim como o NOx, os hidrocarbonetos precisam ser controlados, pois reagem na atmosfera e contribuem para a formação do smog fotoquímico.
- A fuligem, ou material particulado, é composto por partículas sólidas e líquidas que podem penetrar nas defesas do organismo atingindo os alvéolos pulmonares causando efeitos negativos à saúde. O controle desse poluente é crucial para veículos a diesel, que são os maiores emissores.

O gráfico 3 evidencia a evolução na emissão desses compostos ao longo dos últimos 14 anos e inclui além dos poluentes citados, a emissão de GEE, em CO_{2eq} no estado de São Paulo.

Gráfico 3 - Emissão de composição de gases poluentes locais no período de 2006 a 2019.



Fonte: CETESB, 2023

Ainda que os fatores de emissão dos veículos novos estejam decrescendo, o aumento da frota de veículos e os congestionamentos das vias comprometem em parte os avanços tecnológicos. O gráfico de evolução entre 2006 e 2019 mostra, de modo geral, a redução ou a manutenção das emissões totais dos poluentes tóxicos ao longo desse período. No caso dos GEE, as emissões apresentaram alguma redução nos últimos anos em função da retração econômica e oscilações anuais em função da variação do uso do etanol ou gasolina nos veículos flex. (CETESB, 2023).

Em 2015 na 21ª Conferência das Partes (COP21) de Paris, foi acordado o objetivo de fortalecer a resposta global frente à ameaça da mudança climática e reforçar o compromisso dos países para lidar com os impactos decorrentes dessas mudanças. O compromisso fundamentalmente para redução de emissões de GEE e manter o aumento da temperatura média global em bem menos de 2°C acima dos níveis pré-industriais e de dispor de esforços para limitar o aumento da temperatura a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais. Para o alcance do objetivo final do Acordo, os governos se envolveram na construção de seus próprios compromissos, a partir das chamadas Pretendidas Contribuições Nacionalmente Determinadas (iNDC, na sigla em inglês), seguindo o que cada governo considera viável a partir do cenário social e econômico local.

O Brasil concluiu, em 12 de setembro de 2016, o processo de ratificação do Acordo de Paris após aprovado pelo Congresso Nacional. No dia 21 de setembro, o documento foi entregue às Nações Unidas e com isso, as metas brasileiras deixaram de ser pretendidas e tornaram-se compromissos oficiais. O Brasil comprometeu-se a reduzir as emissões GEE em 37% abaixo dos níveis de 2005, já em 2025, com uma contribuição indicativa subsequente de redução de 43% abaixo dos níveis de 2005, em 2030.

Figura 2 - Metas propostas no acordo de Paris 2015.



Fonte - Ministério do Meio Ambiente, 2023.

Para o alcance do compromisso, o país se propôs a aumentar a participação de bioenergia sustentável na sua matriz energética para aproximadamente 18% até 2030, alcançando uma participação estimada de 45% de energias renováveis, restaurar e reflorestar 12 milhões de hectares de florestas. Assim, a sigla iNDC perdeu a letra “i” (do inglês, *intended*) e passou a ser chamada apenas de NDC, em português, Contribuições Nacionalmente Determinadas. (MMA, 2023).

Para o PNME, 2022, por contribuírem com a intensificação das emissões de CO₂ e GEE, sobretudo em função da queima de combustíveis de origem fóssil nos veículos com MCI, o setor de transporte tem responsabilidade em propor alternativas que eliminem ou reduzam as emissões. A eletrificação veicular se apresenta como uma das mais importantes ações que o setor de mobilidade está empreendendo para promover a desaceleração do efeito estufa causado pelos gases expelidos dos escapamentos.

Neste contexto, ao longo dos anos e em especial a partir de 2021, estreitou-se o debate sobre qual linha tecnológica o Brasil deve adotar. As particularidades do país em relação à ~~matriza~~~~matriz~~ de combustível que, em especial, tem o etanol como elemento histórico e popularizado no início do século XXI com a introdução dos modelos flex (etanol/gasolina) ~~deve~~~~deva~~ se levar em conta. Posto isso, o histórico e legado deve seguir de linha para novas rotas tecnológicas que se apresentam, seja como aplicação racional ou peça chave delas. Logo, não há separação imediata entre eletrificação e biocombustíveis para mobilidade de baixa emissão. Pelo contrário, ambas se complementam. Ainda segundo o relatório, o Brasil tem vocação para diversas soluções que podem ser aplicadas conforme condicionantes próprias contribuintes no impacto da descarbonização, eficiência energética e razoabilidade de custos.

Esse aspecto conduz a uma perspectiva de que na prática, haverá várias rotas tecnológicas coexistindo nos seus aspectos de aplicação. Bermúdez; Consoni (2020) cita exemplos ao se tratar de levíssimos (scooters, patinetes, motos e bicicletas elétricas) notadamente poderá se experimentar a evolução constante da frota elétrica que ocupa majoritariamente os espaços urbanos e se apresenta como resposta de mobilidade que além da descarbonização, impacta na redução dos grandes tráfegos.

Na modalidade de veículos leves (automóveis e comerciais leves) é fato que o país irá experimentar a transição à eletrificação de híbridos, que respondem assertivamente aos parâmetros de exigência de descarbonização, eficiência energética e razoabilidade de custos citados. Por ser uma tecnologia de transição da cadeia de fornecimento e de incentivo da expansão de infraestrutura de recarga, os veículos elétricos puros dependem desse atributo essencial para a adoção e expansão.

Sob as perspectivas dos veículos comerciais leves (utilitários, vans e pequenos caminhões elétricos) com usos tipicamente urbanos de grandes centros, enxerga-se grande vocação pela adoção de veículos elétricos puros. PNME (2022) complementa que as condições operacionais que exigem grande eficiência e autonomia moderada e conhecida, habilitam a expansão dessa frota.

Tratando-se dos veículos pesados para transportes de bens, existem várias opções de deverão ser analisadas sob as condições apresentadas por biodiesel, biometano, gás natural e o óleo vegetal hidrotratado possuem destaque. Fato que essas rotas têm efeito crucial na

transição ao futuro, que pode reservar a introdução da tecnologia das células de combustível nessa aplicação. Caso similar é aos veículos pesados para transporte de passageiros pois tem sido observado o movimento das cidades em pavimentar o caminho de adoção dos elétricos puros por tratar de itinerários estabelecidos, gestando o modelo de carga e descarga do armazenamento de energia (PNME, 2022).

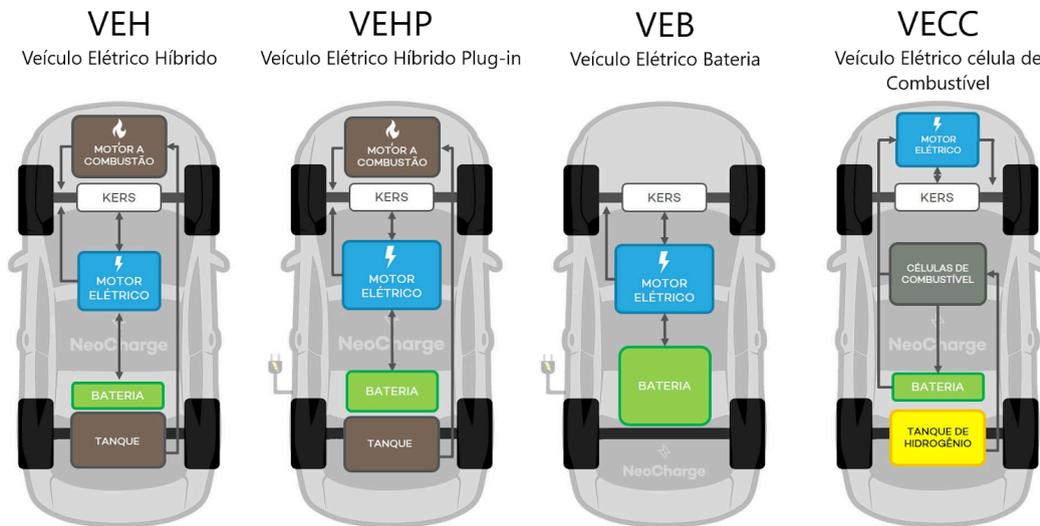
1.3 Veículos e Mobilidade Elétrica

Veículos elétricos são aqueles que utilizam um ou mais motores elétricos, em parte ou completamente, para propulsão. O combustível dos VE é a eletricidade, que pode ser obtida de diferentes maneiras: conectando diretamente à fonte externa de eletricidade, por meio de plugs ou utilizando cabos aéreos; recorrendo ao sistema de indução eletromagnética; a partir da reação do hidrogênio (H) e oxigênio (O) com água em uma célula de combustível; ou por meio da energia mecânica de frenagem (frenagem regenerativa, ao se frear o veículo). Essa eletricidade, em seguida, é armazenada em baterias químicas que alimentam o motor elétrico (FGV, 2017)

- Veículo elétrico híbrido (VEH): possui um trem de força elétrico associado a um motor a combustão. O motor a combustão pode servir somente para carregar as baterias veiculares (híbrido serial), ou também ser fonte direta de propulsão (híbrido paralelo). Usualmente, quando se fala dessa categoria, subentende-se que são veículos eletrificados e sem capacidade de conexão direta com a rede elétrica, como é o caso dos VEHP definidos na sequência.
- Veículo elétrico híbrido plug-in (VEHP): diferencia-se da categoria anterior (VEH), por permitir que a bateria seja carregada diretamente por uma tomada elétrica externa, e não apenas pelo motor a combustão do veículo. Na prática, trata-se de importante distinção, pois muitos proprietários acabam utilizando os VEHP como elétricos puros, uma vez que a autonomia permitida pelo uso exclusivo da bateria interna, embora limitada, é suficiente para a maioria dos trajetos urbanos diários.
- Veículos elétricos a bateria: sua propulsão é gerada somente por energia elétrica e não possuem motor a combustão. Essa categoria, por sua vez, pode ser subdividida em

veículos elétricos movidos a bateria (VEB) ou a células de combustível (VECC) (LEAL; CONSONI, 2007, p 15).

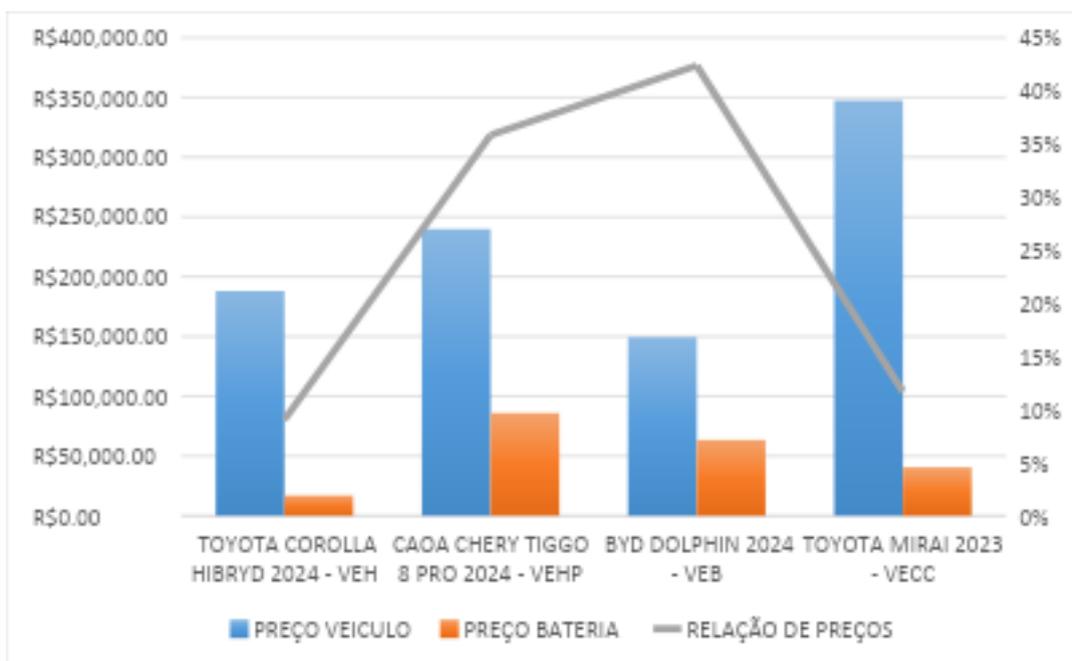
Figura 3 - Classificação dos modelos de veículos elétricos e híbridos.



Fonte - Portal NeoCharge, adaptado pelo autor, 2023

O gráfico 4 traz os valores dos veículos comuns elétricos e híbridos e os valores dos seus conjuntos de baterias de alta voltagem coletados em pesquisas de mercado.

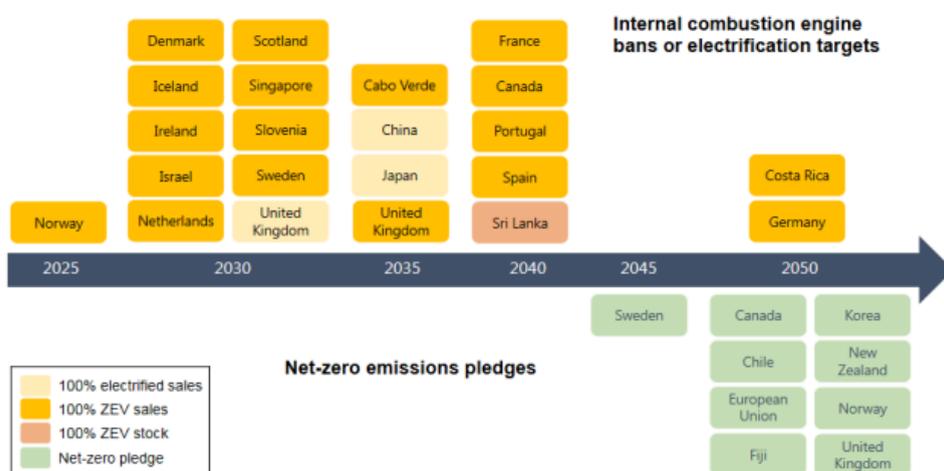
Gráfico 4 - Relação de preços de modelos de veículos elétricos e híbridos e suas respectivas baterias



Fonte: Elaboração própria

O Parlamento Europeu, segundo o grupo Abril (Revista Veja, 2023) oficializou a decisão de banir a venda de carros movidos a combustíveis fósseis na União Europeia a partir de 2035. As novas regras estipulam que, até 2035, as montadoras devem cortar totalmente as emissões de CO₂ dos carros novos vendidos, o que tornaria impossível a venda de veículos movidos a combustíveis fósseis no bloco de 27 países. As empresas devem cumprir a medida gradualmente, com um corte de 55% a partir de 2030. A Figura 5 aponta compromissos formais assumidos por alguns países no sentido de eletrificar suas frotas ou de serem compostas somente por veículos com zero emissão de gases de escape. A Noruega é destaque nesta discussão por ter se posicionado com metas para coibir veículos dependentes de combustíveis fósseis já em 2025.

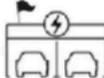
Figura 4 - Países com leis ou projetos para banir o uso de veículos com motor a combustão.



Fonte: Senado Federal, 2022.

Para Leal e Consoli (2022), o estado norte americano da Califórnia, que tem direito de estipular seus próprios limites de emissão e ao fazê-lo, obriga a indústria automotiva americana como um todo a evoluir no sentido de menos emissões. A América Latina está desenvolvendo o assunto mais aceleradamente. Países com compromisso formais se apresentam com metas estipuladas a exemplo: A Argentina, país com o qual temos o maior comércio bilateral de veículos e autopeças, apresentou projeto que proíbe a comercialização, a partir de 1º de janeiro de 2041, de veículos novos movidos exclusivamente por um MCI, ou seja, ficariam permitidos apenas híbridos, elétricos a bateria, etc.; No Chile, a Estratégia Nacional de Eletromobilidade prevê que a partir de 2035 somente possam ser vendidos veículos elétricos puro; Na Colômbia vigora, desde 2019, a Lei nº 1.964, que tem por objetivo gerar esquemas de promoção ao uso de veículos elétricos e zero emissão, ainda que tenha estipulado data limite para a comercialização de veículos com motor a combustão interna na frota em geral; O Equador, o art. 14 de sua Lei Orgânica de Eficiência Energética determina que a partir de 2025, todos os ônibus do transportes urbanos em sua porção continental sejam elétricos ainda segundo Ainda segundo os autores.

Figura 5 - Metas de implementação de veículos elétricos em países da América latina e Caribe.

Tipo de VE	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Transporte Público por Ônibus 	Equador: 3-5% Colômbia: Mínimo 10% Panamá: Mínimo 10%-20% (2027)	Equador: 20-30% Colômbia: Mínimo 60% Panamá: Mínimo 33% Rep. Dominicana: 30%	Colômbia: 100% Chile: 100% novos ônibus Costa Rica: 70%	Equador: 60-70%		Rep. Dominicana: 100% Costa Rica: 100%
Veículos Elétricos Leves 	Equador: 0,2-0,5%	Colômbia: 600 mil VE Equador: 3-5% Panamá: 10%-20% da frota e 25-40% das vendas Rep. Dominicana: 10%	Chile: 100% das vendas Costa Rica: 25%	Equador: 20-25%		Rep. Dominicana: 70% Costa Rica: 100% das vendas e 60% da frota
Frotas públicas 	Colômbia: 30% de VE Panamá: Mínimo 10%-25% (2027)	Panamá: 40% Rep. Dominicana: 30%				Rep. Dominicana: 100% Costa Rica: 60%
Taxis Elétricos 	Equador: 2-4%	Equador: 15-20%	Chile: 100% das vendas Costa Rica: 70%	Equador: 55-60%		Costa Rica: 100%
Caminhões Elétricos 	Equador: 1-3%	Equador: 5-10% Rep. Dominicana: 10%		Equador: 30-40% Chile: 100% das vendas de maquinaria para construção	Chile: 100% vendas de caminhões e ônibus rodoviários	Rep. Dominicana: 50%

Fonte: EPE, 2023

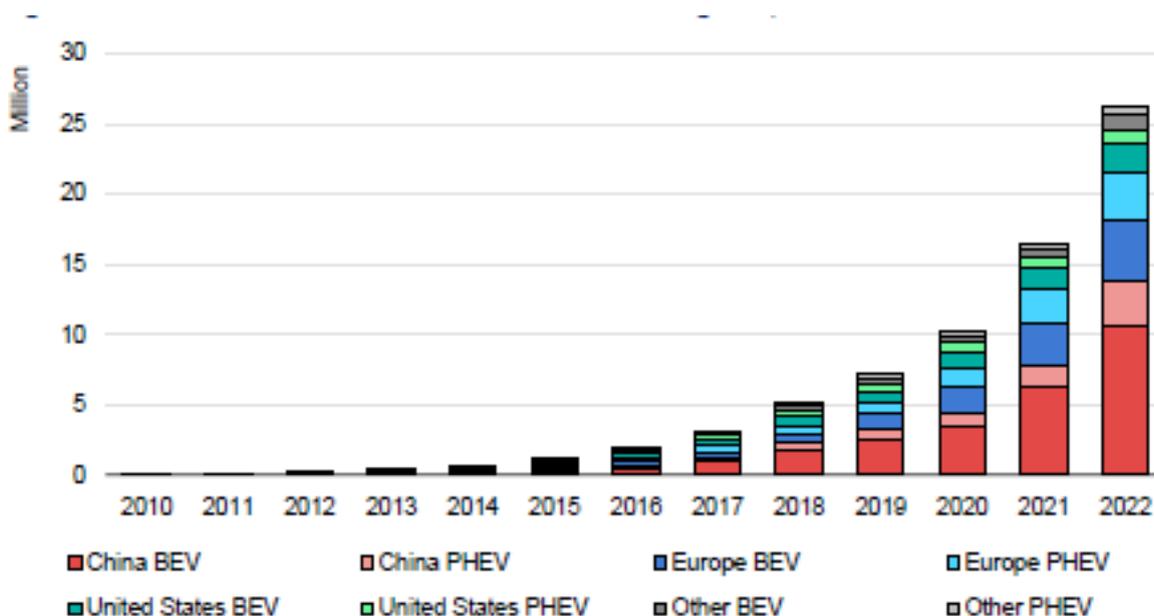
Para Cruz (2022, p. 1) no âmbito global a demanda pela eletrificação no transporte é urgente e incentivada pelas questões climáticas, que levaram muitos países a incluírem essa evolução tecnológica em suas agendas. No Brasil por possuir pautas menos restritivas, o propulsor para a conversão para mobilidade elétrica está na eficiência operacional e de custos com a manutenção e a energia elétrica, fonte combustível para a modalidade. Complementa ainda que apesar do enorme nicho e de grande potencial para o engajamento de eletrificação, há um contraponto crítico: o custo de aquisição. O custo com a aquisição dos VE é onerado em grande parte pela bateria. Assim, a redução de custos deste item pode acelerar a curva de aquisição para esse segmento.

Todos os fatos explanados até aqui na revisão bibliográfica desse trabalho, conduzem o movimento que já ocorre em virtude da eletrificação modal. O relatório da *International Energy Agency* (IEA, 2013) já esmiuçou um mercado em rápido crescimento, mas com o alerta de que o caminho seria longo antes que atingisse taxas elevadas e penetração no mercado. Dados dos últimos relatórios lançados que serão tratados adianta, tanto a quantidade de informações, como de países incorporados foi se expandindo. Esses dados expõem um

claro movimento que reflete a consolidação da tendência de eletrificação veicular, sempre pontuando os desafios da jornada.

A comercialização de carros elétricos mundial tem crescimento exponencial, uma vez que as vendas ultrapassaram 10 milhões em 2022. Um total de 14% de todos os carros novos vendidos foram elétricos em 2022, superior aos 9% em 2021. A China domina a frente respondendo por cerca de 60% das vendas globais de carros elétricos, já superando sua meta para 2025 de veículos de nova energia. A Europa ocupa o segundo maior mercado, as vendas de carros elétricos aumentaram mais de 15% em 2022, o que significa que mais de um em cada cinco carros vendidos é VE. Já nos Estados Unidos, terceiro maior mercado, as vendas chegaram a 8%. O aumento das vendas elevou o número total de VE nas estradas do mundo para 26 milhões, um aumento de 60% em relação a 2021 (IEA, 2023) conforme o gráfico 4.

Gráfico 5 - Estoque global de carros elétricos de (2010 a 2022).



Fonte: IEA, 2023

No Brasil, somente nos primeiros oito meses de 2023, o mercado de veículos eletrificados leves no Brasil emplacou 49.052 unidades, registrando um crescimento de 76%, na comparação com o mesmo período de 2022 (27.812). Se comparar com os oito primeiros meses de 2021, o crescimento é de 129%, (21.397). As vendas de eletrificados mais que

dobraram em dois anos. A participação dos veículos leves eletrificados em relação às vendas de veículos convencionais no mercado doméstico, de janeiro a agosto, foi de 3,6% (ABVE, 2023).

Ainda que inúmeros fatores sociotécnicos retraiam a implementação em massa da tecnologia de eletrificação automotiva, mesmo que suas vantagens sejam conhecidas a certo tempo, tal situação começou a mudar nas últimas duas décadas. Um dos vetores de mudança deve -se à crescente e exponencial preocupação com a redução da poluição proveniente da emissão dos escapamentos veiculares, em especial os GEE e suas consequências nas mudanças climáticas (LEAL; CONSONI, 2007, p 15).

Devido a emissão zero de gases poluentes que os VE puro produzem na geração de sua propulsão, os impactos na qualidade do ar das cidades e na saúde pública são bastantes positivos, particularmente naquelas em que possui grandes frotas de veículos movidos a óleo diesel. Tal tendência de crescimento tem se mostrado rápida e contínua ao longo do tempo, reflexo direto dos avanços tecnológicos incorporados nos VE. Neste contexto, ganha destaque o desenvolvimento das baterias, que trazem diferentes composições químicas e capacidade de produção em grande escala (BERMÚDEZ; CONSONI, 2020).

1.4 Baterias

A priori é importante introduzir alguns conceitos que nos permitiram compreender estes sistemas de forma clara e objetiva.

Gussow (2004, pag. 119) traz que a bateria é criada quando duas ou mais células de pilha voltaica são conectadas. Pilhas voltaicas é um componente químico constituído por uma combinação de materiais usados para converter energia química em energia elétrica. A pilha ou célula química é formada por dois eletrodos de metais ou por compostos metálicos, diferentes, e um eletrólito (ácido sulfúrico (H_2SO_4) diluído em água que funciona como um condutor que transporta os íons elétricos entre as placas positivas e negativas).

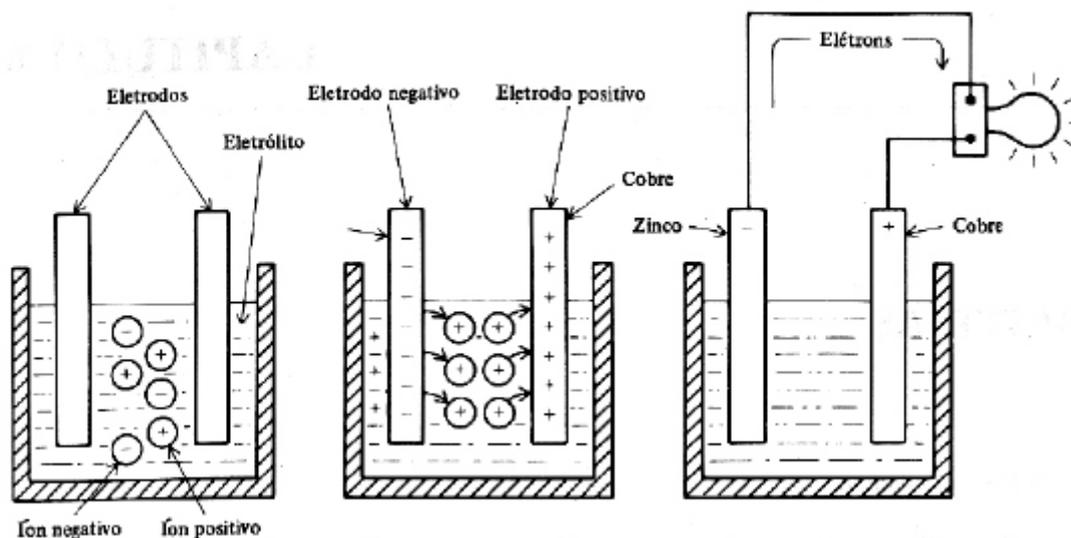
A bateria também pode ser conhecida como um acumulador que por uma reação de oxirredução transforma energia química em energia elétrica e vice-versa. Isso ocorre devido os elétrons correrem do polo negativo, conhecido por anodo, para o polo positivo conhecido como ~~cátodo~~catodo, gerando o fenômeno energia (BNDES, 2013)

Um exemplo prático e eficaz de um par de eletrodos é o zinco (Zn) e o cobre (Cu). O zinco contém uma abundância de átomos carregados negativamente, enquanto o cobre apresenta uma abundância de átomos carregados positivamente. Quando as placas desses metais são emergidas num eletrólito tem início a uma ação química entre eles. O eletrodo constituído pelo zinco acumula uma carga negativa muito maior, pois ele se dissolve lentamente no eletrólito. Os átomos que saem do eletrodo de Zn estão positivamente carregados e atraídos pelos íons carregados negativamente do eletrólito, enquanto repelem os íons com carregamento positivo do eletrólito em direção ao eletrodo de Cu. Isso ocasiona a retirada dos elétrons do cobre deixando-o com carga positiva em excesso.

Na célula, os eletrodos do ânodo e do cátodo são fisicamente separados de modo que fiquem eletronicamente isolados para evitar curto-circuito interno, mas permanecem cercados pelo eletrólito. O separador é utilizado para promover a separação mecânica dos eletrodos, deve ser permeável ao eletrólito para manter a condutividade iônica desejada (ALMEIDA, 2013)

Um modelo prático é ligar uma lâmpada através dos terminais dos eletrodos (carga), as forças de atração e repulsão farão com que os elétrons livres do eletrodo negativo de zinco, dos condutores e do filamento da lâmpada se desloquem em direção ao eletrodo de cobre carregado positivamente. A diferença de potência resultante permite que a pilha funcione como uma fonte de tensão V (GUSSOW, 2004). A figura 7 ilustra o processo de condução dos íons aos eletrodos.

Figura 6 - Ação química simplificada de uma célula voltaica.



Fonte - Eletricidade Básica, 2004.

No processo de carga da bateria, os íons lítio (Li) são removidos do eletrodo positivo, que se oxida e cede um elétron. Os íons lítio e os elétrons são transportados até o eletrodo negativo, sendo que os íons se movem através do eletrólito e os elétrons pelo circuito elétrico externo (fonte/carregador). Quando os elétrons chegam ao eletrodo negativo, é produzida simultaneamente a inserção dos íons lítio na estrutura do material anódico e a redução do estado de oxidação deste material. Durante a descarga, quando a bateria gera energia, esta reação ocorre em sentido inverso, regenerando os materiais utilizados inicialmente (ARANHA, 2018)

Segundo o BNDES (2013) as baterias não recarregáveis, chamadas primárias, podem ser utilizadas nos veículos em sistemas independentes da propulsão como controles de alarmes, destravamento de portas, relógios, sensores de pressão de pneus etc. Porém esse item não será abordado nesse trabalho. Já as baterias recarregáveis, também chamadas de secundárias, servem a uma grande quantidade de equipamentos portáteis, como celulares, telefones sem fio, laptops e máquinas fotográficas, além dos automóveis. Para Quintero (2021), além disso, têm sido utilizados em aplicações mais complexas como veículos elétricos, aeronaves, máquinas industriais, satélites, robôs, entre outros. A seleção do tipo de bateria depende exclusivamente dos requisitos da aplicação onde serão utilizadas. Por exemplo, baterias de íon-lítio têm sido usadas com mais frequência em aplicações de saúde, VE e aeronaves devido às suas características.

Nos automóveis convencionais, a bateria é responsável por alimentar os sistemas elétricos e eletrônicos e é recarregada por um gerador do motor a combustão que move o veículo. O tipo mais frequente nos automóveis é a chamada bateria de chumbo-ácido, VE e VEHP em comercialização, em geral, utilizam outras tecnologias abordadas adiante (BNDES, 2013). O quadro 2 descreve os tipos de baterias e os exemplos de aplicações.

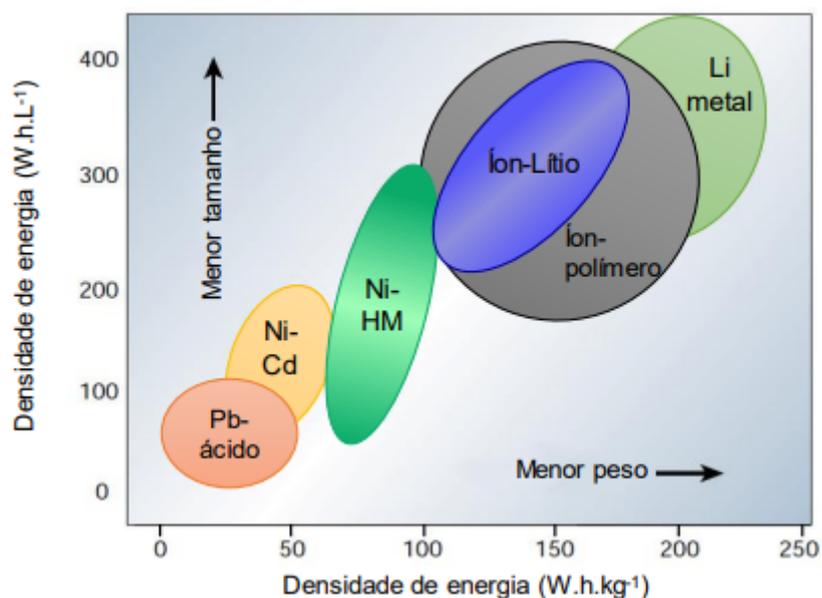
Tabela 2: Tipos, formatos, símbolos e principais aplicações das baterias recarregáveis.

Tipos de baterias	Formato	Símbolo	Principais aplicações
Bateria de níquel-cádmio	Cilíndrica, retangular ou em módulos	Ni-Cd	Equipamentos portáteis (controles remotos, lanternas, relógios, rádios, brinquedos etc.), telefones sem fio, ferramentas, luzes de emergência
Bateria de níquel-hidreto metálico	Cilíndrica, retangular ou em módulos	Ni-MH	Equipamentos portáteis (controles remotos, lanternas, relógios, rádios, brinquedos etc.), telefones sem fio, bicicletas elétricas, veículos híbridos
Bateria de íon-lítio	Cilíndrica, retangular, botão ou em módulos	Li	Incorporadas a equipamentos (barbeadores elétricos, MP3 players, PDA), telefones celulares, filmadoras, câmeras digitais, bicicletas elétricas, ferramentas, jogos eletrônicos, veículos híbridos e elétricos
Baterias de chumbo-ácido	Retangular	Pb-ácido	Automóveis, motocicletas, ônibus, caminhões, máquinas agrícolas, empilhadeiras

Fonte: Elaboração própria com base em *Battery Association of Japan* (BAJ).

A relação da densidade de energia é representada pela quantidade de energia que uma bateria é capaz de fornecer, expressa na forma por unidade de peso ($W.h.kg^{-1}$) ou por unidade de volume ($W.h.L^{-1}$). A representação do esquema de comparação entre os diferentes tipos de baterias está explicitada na figura 8.

Figura 7 - Comparação de densidade de energia em função do tamanho e peso de diferentes tipos de baterias.



Fonte: Almeida, 2021.

1.4.1 Importância das baterias dos veículos elétricos

A bateria é a fonte de energia capaz de alimentar a propulsão do motor, gerando assim a energia motriz responsável em retirar a massa da inércia, ou movimentar o veículo. Suas características físicas e técnicas definem qual sua capacidade em oferecer essa energia. Duas características definem bem seu poder de atuação: a energia específica e a potência específica. Segundo o portal STA (2024) a energia específica de uma bateria é a quantidade de energia que ela contém em relação ao seu peso, medida em watts-horas por quilograma (Wh/kg). Quanto maior esse valor, maior será a autonomia da bateria. Já a potência específica, indica a quantidade de energia que ela pode fornecer rapidamente, sendo medida em watts por quilograma (W/kg). Quanto maior a potência específica, maior a corrente que a bateria pode conduzir em um curto período.

O peso da bateria de um VE é importante para o desempenho do veículo afetando a aceleração, autonomia, manuseio e consumo de energia. Para o portal Cyberswitching (2024), os fabricantes buscam equilibrar o peso da bateria com outros componentes para maximizar a eficiência. Os fatores que afetam o peso da bateria do carro elétrico incluem a química da

bateria sendo as BIL o padrão da indústria devido à sua alta densidade de energia, que é sua capacidade medida em kWh em relação ao seu peso, influencia diretamente gerando baterias de maior capacidade exigindo mais materiais e resultando em aumento da massa. Ainda conforme o portal, os requisitos de autonomia também influenciam o peso da bateria, com veículos projetados para distâncias mais longas exigindo baterias maiores. O peso da bateria VE tem várias implicações para o design e desempenho do veículo. Isso inclui o desempenho do veículo, como aceleração e relação potência/peso. Baterias mais pesadas também podem afetar o manuseio e a agilidade do veículo, exigindo que os fabricantes considerem cuidadosamente a distribuição de peso para uma estabilidade ideal. Além disso, o peso da bateria também afeta os requisitos de infraestrutura de carregamento, como o tempo de carregamento e o consumo de energia durante as sessões de carregamento.

1.4.2 Baterias de lítio

Pelo tema central do trabalho ser o reuso das baterias após seu primeiro ciclo de vida para o tipo específico composta de íon de lítio, essa revisão abordará especificamente as BIL. Esse tipo de armazenador representa o nível mais alto de desenvolvimento em sistemas de conversão de energia, pois há maior densidade de energia em relação ao peso (Wh/g), reduzindo seu custo e desempenho, o que pode expandir muito suas aplicações, viabilizando novas tecnologias que dependem do armazenamento de energia (Ronchini, 2022).

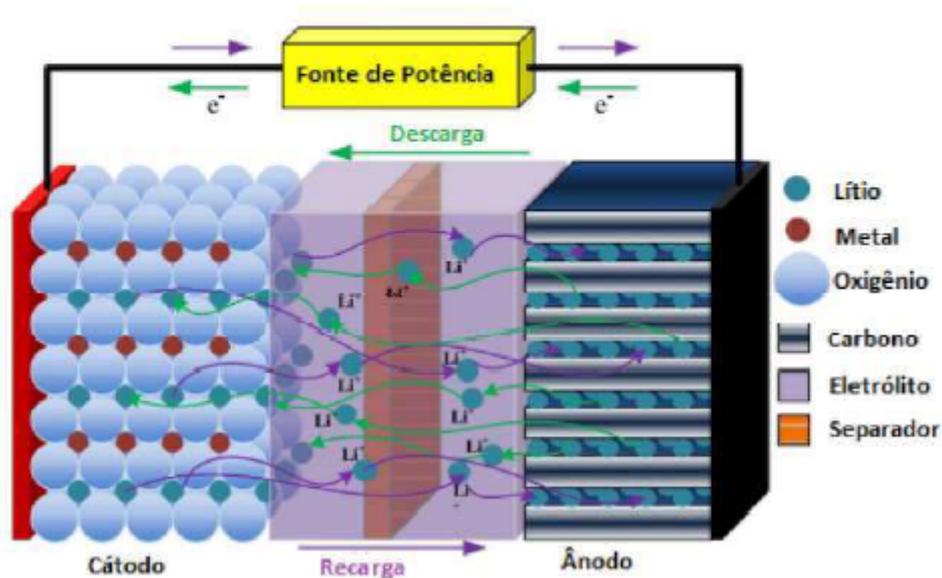
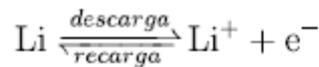
Para Blomgren (2016), há 25 anos atrás (período da publicação desse artigo) a Sony Corporation anunciava um novo produto chamado bateria de íon lítio, ainda que a ideia de uma bateria na qual o íon de lítio se movia reversivelmente entre os eletrodos positivo e negativo foi formulada pela primeira vez no final da década de 1970, usando materiais de intercalação de diferentes potenciais para os dois eletrodos, e é frequentemente chamada de bateria de cadeira de balanço por causa do fluxo de íons de lítio para frente e para trás entre os dois eletrodos.

As características dos elementos anodo, catodo, eletrólito e o separador apresentados anteriormente influenciam o comportamento e desempenho da bateria. As baterias de lítio

secundárias podem ser compostas de carbono no eletrodo negativo, enquanto o eletrodo positivo é feito dos seguintes compostos: óxido de lítio-cobalto (LiCoO₂), óxido de lítio-manganês (LiMnO₂), ferrofosfato de lítio (LiFePO₄), lítio-manganês -óxido de níquel-cobalto (LiNiMnCoO₂), óxido de lítio-níquel-cobalto-alumínio (LiNiCoAlO₂) e titanato de lítio. (QUINTETO et al, 2021, p. 19). Isso se apresenta após longos anos de estudos, testes e desenvolvimento em relação a segurança e eficiência que os componentes de armazenamento com essas composições oferecem aos seus usuários (BLOMGREN, 2016).

Filho (2022) relata que a construção inicial das BIL é feita através de uma mistura a partir dos materiais ativos, ligantes, solventes e negro de fumo (aditivos condutores capaz de produzir redes elétricas robustas nos eletrodos). Em seguida, a mistura é aplicada de forma intermitente sobre uma chapa laminada dos metais que servirão de coletores: alumínio para o cátodo e cobre para o ânodo. A chapa metálica, já recoberta com a mistura, segue para a secagem, limpeza e depois para a calandragem. Após ter sua espessura reduzida a lâmina, é cortado de acordo com o design que a célula e por fim, segue para uma segunda secagem, agora a vácuo. Entre os eletrodos é colocado um separador que geralmente é feito de material polimérico, como polietileno ou polipropileno. Conclui o autor que, depois do empilhamento, a pilha de eletrodos e separador é inserida em um invólucro de alumínio que após selado é preenchido com o eletrólito, como exemplificado na figura 9.

Figura 8 - Reação simplificada da célula eletroquímica.



Fonte - Paixão, 2020.

Quinteto et al (2021 p.17) traz que a escolha do tipo de bateria depende exclusivamente dos requisitos da aplicação onde serão utilizadas. Por exemplo, BIL têm sido usadas com mais frequência em aplicações de saúde, aeronaves e em especial veículos elétricos devido às suas características. A autora complementa que a versatilidade das baterias de lítio para algumas aplicações se mostra eficientes por apresentarem menor peso (densidade de energia gravimétrica) e maior capacidade energética por unidade de volume (densidade volumétrica de energia) quando comparadas a outros tipos de baterias. Para o BNDES (2013) o lítio por ser um elemento pequeno e leve, seu produto apresenta maiores níveis de potência e energia por unidade de massa. A energia específica dessas baterias é duas vezes maior em comparação às baterias NiMH e quatro vezes maior em relação aos níveis da bateria PbA.

Apresentado os dados de emissão de poluentes dos veículos movidos a combustíveis fósseis, os movimentos para redução de GEE para o segmento de transportes, a urgente adesão pela mobilidade com veículos elétricos do mercado mundial, o mercado está agindo fortemente sobre os fabricantes de baterias de íon de lítio, à medida que empresas de

aplicação e governos em todo o mundo pedem aumento de capacidade e energia com custos mais baixos para atender às necessidades de redução de gases de efeito estufa por meio da implementação de veículos elétricos.

O relatório IEA (2022), mostra que a demanda por BIL está em crescimento exponencial atingindo a marca de 340 GWh em 2021, dobrando de tamanho em relação ao nível de 2020. A procura global de baterias de VE aumentou cerca de 65% em 2022, atingindo aproximadamente 550 GWh. A capacidade de fabricação de BIL em 2022 foi de aproximadamente 1,5 TWh no ano, implicando uma taxa de utilização de cerca de 35% em comparação com cerca de 43% em 2021. Esse cenário demanda um aumento significativo até 2030, atingindo cerca de 3,5 TWh no cenário de promessas anunciadas (ambições e metas anunciadas pelos governos de todo o mundo sejam cumpridas na íntegra e dentro do prazo assinadas na declaração da COP 26). Para atender a essa demanda, seriam necessárias mais de 50 gigas fábricas (cada uma com 35 GWh de capacidade de produção anual) até 2030 no STEPS, além da atual capacidade de produção de baterias. Isso aumenta para cerca de 65 novas giga fábricas para atender à demanda de 2030 (IEA, 2023).

Apesar de os VE serem considerados veículos amigáveis ao meio ambiente por sua emissão parcial ou nula a depender do modelo de veículo, há contrapontos a serem levantados considerando sua cadeia de produção que exige a utilização de recursos naturais como energia elétrica, muitas vezes não renováveis, água e extração de minérios para sua construção.

O lítio é um metal raro e a exploração libera toxinas que são danosas à saúde dos mineradores e ao meio ambiente. Sua extração é feita em pequenas quantidades e em locais de difícil acesso. A atividade de mineração também possui emissões na operação. Quanto mais difícil de extrair, maior a possibilidade de utilizar equipamentos potentes que consomem energia nem sempre de fontes renováveis. Como um todo, dependendo do modelo, estima-se que um VE emite entre 15% e 68% mais gases de efeito estufa que um veículo convencional durante sua produção. Contudo, essa diferença é superada após a utilização do veículo dentre 6 a 18 meses, a depender de como a eletricidade que o abastece é gerada (BNDES, 2013).

Após o processo de fabricação e utilização, identificado o término do ciclo de vida para VE, pesa o fato do descarte não estar definido e regulamentado no Brasil para BIL. Conforme NBR 10004 (ABNT, 2004) que se trata de classificação de resíduos sólidos, a composição química contida nas baterias de íon lítio é classificada como um agente tóxico

que pode provocar, em maior ou menor grau, um efeito adverso em consequência de sua interação com o organismo.

Quadro 1 - Classificação dos componentes químicos contidos nas baterias de íon lítio.

Zinco primário	K066	Lodos provenientes do tratamento de efluentes líquidos e/ou purga ácida originados na unidade de produção de zinco primário	Chumbo, cádmio	Tóxico
	K067	Lodos calcários de anodos eletrolíticos originados na produção de zinco primário	Chumbo, cádmio	Tóxico
	K068	Resíduos provenientes da unidade cádmio (óxido de ferro) do processo de produção de zinco primário	Chumbo, cádmio	Tóxico
Cobre primário	K064	Lodos e lamas do adensamento da purga ácida do processo de produção de cobre primário	Chumbo, cádmio	Tóxico
Chumbo primário	K065	Lodos ou poeiras provenientes do sistema de controle de emissão de gases empregado na fundição de chumbo	Chumbo, cádmio	Tóxico
Chumbo secundário	K069	Lodos ou poeiras provenientes do sistema de controle de emissão de gases empregado na fundição de chumbo secundário	Cromo hexavalente, chumbo, cádmio	Tóxico

Fonte - ABNT 10004, 2004.

O quadro 1 consiste na classificação dos componentes químicos e considerados metais pesados são conhecidos pelo seu potencial tóxico, quando descartados de forma incorreta, na sua degradação esse material pode atingir camadas mais profundas do solo, chegando a aquíferos, podendo causar malefícios a todo o bioma, desde vegetais até seres humanos.

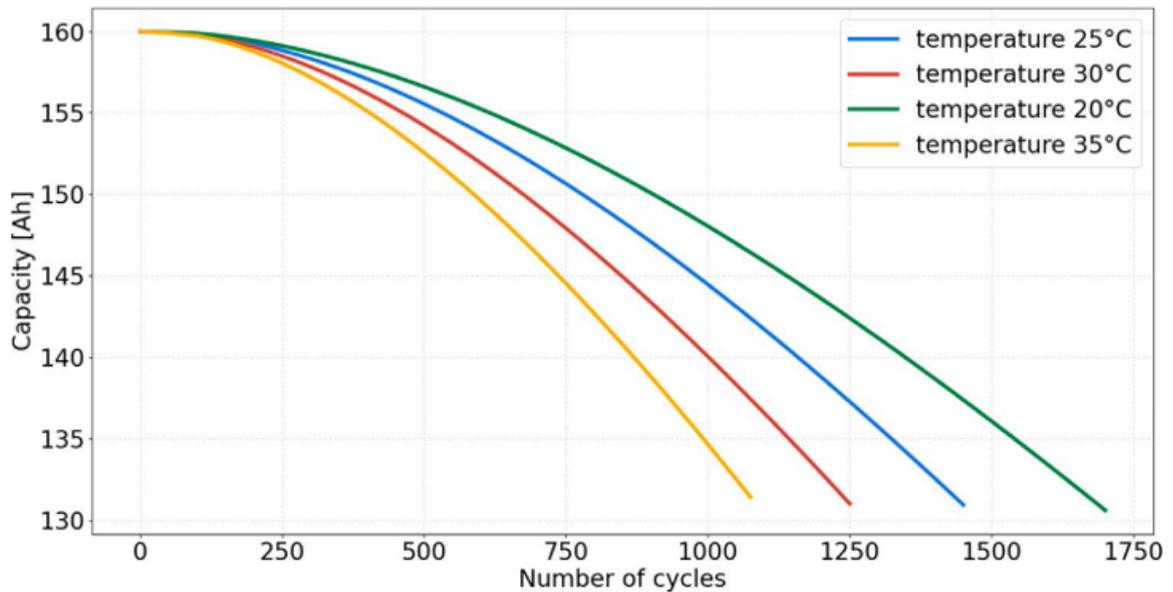
1.4.3 Vida útil das baterias de lítio

Para Huber e Kuhn (2015), por serem praticamente todos os sistemas eletroquímicos, o comportamento da bateria é altamente dependente das condições térmicas de operação. A temperatura, o perfil e a uniformidade têm um impacto representativo nas reações eletroquímicas, e em consequência no desempenho, segurança e vida útil dos sistemas de bateria. As baterias de células de íons de lítio quando descartadas, levantam a questão de um possível segundo uso, ou segunda vida, pois os pontos de reciclagem bem como suas instalações são inadequados. Ainda que o descarte e reciclagem dos modelos de bateria de PbA esteja em patamar consideravelmente aceitável e regulamentado, tecnologias atuais dominantes de Li não compartilham de esse privilégio. Em contrapartida, a utilização desse metal em baterias vem aumentando sem sinais de declínio e, em aplicações de alta capacidade como veículos elétricos, em que seu uso deve proliferar (HOSSAIN et al, 2019, p.8). Com o rápido desenvolvimento dos veículos elétricos, o problema do descomissionamento de baterias se destaca. Muitos novos veículos de energia criam uma pressão potencial de reciclagem de baterias. As baterias de íons de lítio em fim de vida causariam grande desperdício de recursos e poluição ambiental (FAN, 2023). A reciclagem de baterias de íons de lítio sugere custos e potenciais resíduos, tornando ainda mais importante o seu reaproveitamento para uma segunda e possivelmente e a depender de alguns fatores específicos, até terceira vida, com finalidade de maximizar o seu valor econômico e ambiental antes da reciclagem (ELKIND, 2014).

Para CRPS (*Cell Reports Physical Science*, 2021) a operação das baterias em veículo elétrico é um ambiente difícil. Normalmente elas são submetidas a mais de 1.000 ciclos incompletos de carga/descarga entre 5 a 10 anos e ficam sujeitas a uma ampla faixa de temperaturas entre 20°C e 70°C, alto alcance de descarga e carga, além de descarga de alta taxa (alta potência). Quando uma BIL se torna incapaz de satisfazer o padrão de uso de VE, ela geralmente é removida do carro, marcando o fim de sua vida automotiva.

Marchegiani et al (2023) descreve a análise de sensibilidade, que visa avaliar a robustez dos modelos e como estes lidam com uma variação. Este estudo considera a variação tanto da temperatura quanto da corrente, uma vez que elas representam os principais fatores cicláveis que impactam na vida útil da bateria. A gráfico 5 abaixo ilustra como a capacidade de corrente em ampere decai e em consequência o número de ciclos, em função da variação de temperatura que são expostas.

Gráfico 6 - Conjunto de dados simulados usado para a análise de sensibilidade à temperatura em função aos números de ciclos. Os valores de temperatura variam de 20 °C a 35 °C.



Fonte - Marchegiani et al, 2023.

Nesse ponto do trabalho, é importante descrever termos muito utilizados nas revisões bibliográficas pesquisadas. A tabela 3 ajuda a elucidar o significado dos termos e abreviações a fim de facilitar a compreensão do estudo.

Tabela 3 - Definição dos termos técnicos comumente utilizados nos diagnósticos de armazenamento de energia.

Capacidade	Quantidade de corrente que uma bateria pode fornecer em um determinado tempo, em ampère / hora
Ciclismo	Processo de descarga de uma bateria totalmente carregada
Degradação	Processo no qual a capacidade de armazenamento de energia da bateria é diminuída
Eletrodo Negativo:	Local onde um elemento ou componente químico sofre uma reação de oxidação eletroquímica

Eletrólito:	Solução aquosa ou não aquosa de sais, bases e ácidos que permite o fluxo de elétrons
Estado de Carga (SoC):	Energia que está disponível na bateria
Estado de Saúde (SoH):	Percentual de degradação sofrido pela bateria
Impedância Interna:	Medida de oposição ao fluxo de corrente em um circuito quando uma tensão é aplicada.
Processo de Carga:	Processo inverso onde a reação de oxidação ocorre no eletrodo positivo e a reação de redução ocorre no eletrodo negativo
Processo de Descarga:	Fluxo de elétrons do ânodo (reação de oxidação) para o cátodo (reação de redução) através de uma carga externa
Profundidade de Descarga (DoD):	Porcentagem de quanta energia foi utilizada
Tensão Nominal:	Tensão de operação do dispositivo ou instrumento.
Tensão de Corte de Descarga:	Tensão mínima que a bateria pode atingir durante o processo de descarga. É utilizado como medida de proteção para evitar danos irreversíveis à bateria.

Fonte: Elaboração própria.

Por ser um sistema eletroquímico dinâmico e variável no tempo, as BIL possuem comportamento não linear e mecanismos internos complicados. À medida que o número de ciclos de carga e descarga aumenta, o desempenho e a vida útil da bateria de íons de lítio deterioram-se gradualmente. Há muitas causas diferentes para a deterioração da bateria, incluindo mecanismos físicos por estresse térmico e estresse mecânico, e mecanismos químicos do tipo reações colaterais (HU, 2020). A perda do estoque de lítio é causada principalmente pela formação e decomposição do filme em interfase de eletrólito sólido (SEI), decomposição do eletrólito e revestimento de lítio, decorre o autor.

1.4.4 Identificação da degradação da vida útil das baterias

Paixão (2020), decorre que o cátodo sofre com mudanças estruturais cristalinas devido às temperaturas elevadas, liberando oxigênio pelo processo de gaseificação e avalanche térmica. Outra anomalia é a interface sólida impermeável, que é a formação de uma cobertura na superfície catódica. As causas para esses fenômenos químicos é o aumento do número de ciclos, tempo de armazenamento e de temperatura, ocasionando aumento de resistividade do cátodo, fazendo com que haja perda de eficiência e capacidade da bateria. Com a carga e descarga, ou litiação e delitiação, ocorre a formação de íon de lítio e óxido de lítio respectivamente, que provocam mudanças na estrutura cristalina.

A tensão de trabalho do ânodo de grafite é menor do que a janela eletroquímica dos eletrólitos comumente usados, o que leva à formação de filme SEI. A degradação é mais crítica que a do catodo (HU, 2020). Tran et al. (2022) corrobora trazendo que, o mecanismo de envelhecimento mais dominante em uma célula de bateria de íons de lítio é o crescimento da camada de SEI que existe entre materiais de eletrodos negativos carbonáceos, como grafite, e a solução eletrolítica dentro da célula. Paixão (2020) confirma que a degradação ocorre de dois mecanismos principais: degradação da interface sólida e deposição de lítio metálico, que é uma das principais causas do envelhecimento da bateria, devido a limitação do ânodo e a baixa temperatura ambiente. Esse fenômeno ocasiona a supersaturação dos íons de lítio fornecidos pelo catodo, que se reduzem a lítio metálico no ânodo. Em seguida, esse material metálico reage com o eletrólito e forma uma camada insolúvel. Altas temperaturas podem levar à dissolução ou quebra do SEI, gerando sais de lítio, que são menos permeáveis aos íons de lítio e, conseqüentemente, aumento sua impedância, colocando-o a possibilidade de formar uma nova camada SEI (HUBER E KUHN, 2015).

Temperaturas desfavoráveis (menores que 20°C e maiores que 60°C) pode causar alterações na estrutura dos poros e criar vários locais defeituosos na camada SEI. Isso cria acúmulo de espécies nesses locais defeituosos, aumentando as quantidades de produtos de redução que constituem a camada SEI. Uma temperatura baixa geralmente afeta a difusividade das espécies reagentes limitantes, resultante da formação de uma camada SEI fina e instável. A alta temperatura pode criar um desequilíbrio na espessura da camada SEI no

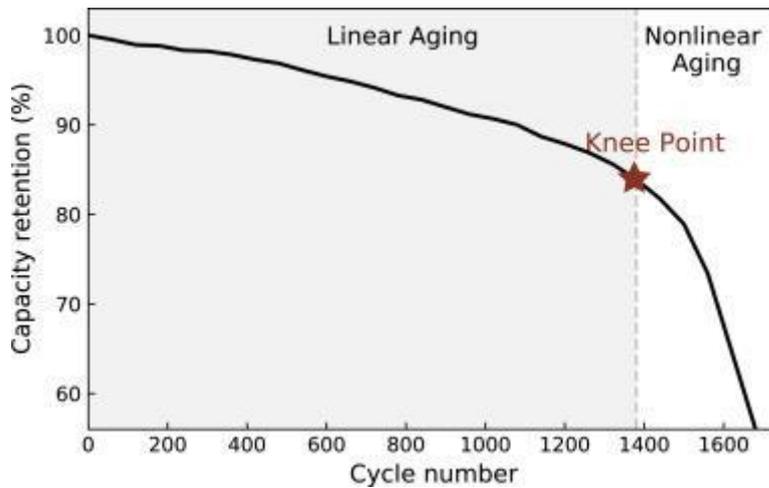
eletrodo anódico de operação, além de iniciar uma ruptura térmica do filme passivo em qualquer tipo de carbono, que depende do tipo de sal eletrolítico nas baterias (AGUBRA, 2014).

Em suma, identificar alguns parâmetros críticos auxiliam no controle de uso e estado de bateria como: (1) temperatura: níveis altos de temperaturas provoca mudanças na estrutura cristalina do catodo e degradação do SEI. Para temperatura baixa, mecanismos cinéticos são comprometidos. Ainda, fortalece a deposição de lítio metálico e potencializa a formação de detritos; (2) tensão: alta tensão eleva a degradação da SEI e do eletrólito. No processo de recarga, quanto maior a tensão final, menor é a vitalidade dos números de ciclos da bateria; (3) corrente: corrente excessivamente alta causa degradação da SEI, perda de contato elétrico e alteração na estrutura cristalina; (4) SoC: baixo estado de carga aumenta a SEI, acúmulo de lítio metálico, corrosão e perda de condutividade. SoC elevado aumenta o crescimento e degradação da SEI e a combustão da bateria (PAIXÃO, 2020).

Diferentes mecanismos contribuem para a degradação da bateria e podem ser divididos em dois modos principais de degradação: 1 - perda de estoque de lítio, que é causada pelo consumo de íons de lítio por meio de reações colaterais. 2 - Perda de material ativo, o que resulta em perda de capacidade de armazenamento. Além destes, quando uma bateria de lítio está carregada significa que 50% dos íons de lítio foram retirados do eletrodo positivo. Se uma sobre carga for imposta à bateria mais de 50% de íons de lítio deixarão o eletrodo, sofrendo uma transformação irreversível que danifica a bateria. De outro modo, quando aplicado uma ~~sobre descargasobre descarga~~, ocorre uma descarga profunda, ocasionando uma corrosão no eletrodo de grafite, causando perda de massa e capacidade de carga (SOUZA, 2018).

Ainda é observado outro fenômeno que exige maiores estudos segundo descreve Attia et al, (2022), que é o ponto do joelho. É a curva de degradação de uma célula que mostra a mudança na capacidade ao longo do número do ciclo. Inicialmente linear, a curva passa por um ponto de transição chamado de ponto do joelho, onde o desempenho da célula declina rapidamente. Após esse ponto, a capacidade da bateria diminui rapidamente e problemas de segurança podem surgir. Os mecanismos responsáveis pelo joelho são complexos e ainda não totalmente compreendidos. A figura 6 detalha o ponto crítico do índice de capacidade de retenção de carga.

Gráfico 7 - Ponto do joelho da capacidade de retenção de energia em relação ao número de ciclos.



Fonte: Xubo et al, 2024.

Complementa o autor que os modos de falha que levam aos joelhos foram categorizados em seis vias: revestimento de lítio, saturação do eletrodo, conectividade limitada por percolação, crescimento de resistência, depleção aditiva e deformação mecânica. No entanto, ainda falta uma estrutura abrangente com modelos precisos para prever joelhos de células de bateria com várias químicas.

1.4.5 Métodos de análise da vida útil das baterias

Singh (2023) traz que o principal desafio em EV que usam BIL é a estimativa precisa de SoC. É através desse dado que o condutor pode planejar o percurso, carga e descarga de VE. O SoC indica a quantidade de carga restante e instantânea em um sistema de armazenamento de bateria. É uma relação da carga disponível no tempo presente (Q_{disp}) para a capacidade de carga total da bateria (Q_{total}). Sendo medido em termos de tensão e corrente, a medição precisa do SoC não é possível devido a capacidade de carga total não ser a mesma durante toda a vida útil da bateria, pois depende de diferentes parâmetros como temperatura,

pressão, idade da bateria e as várias mudanças químicas. Sua equação se dá na seguinte forma:

Equação 1: Estado de carga da bateria

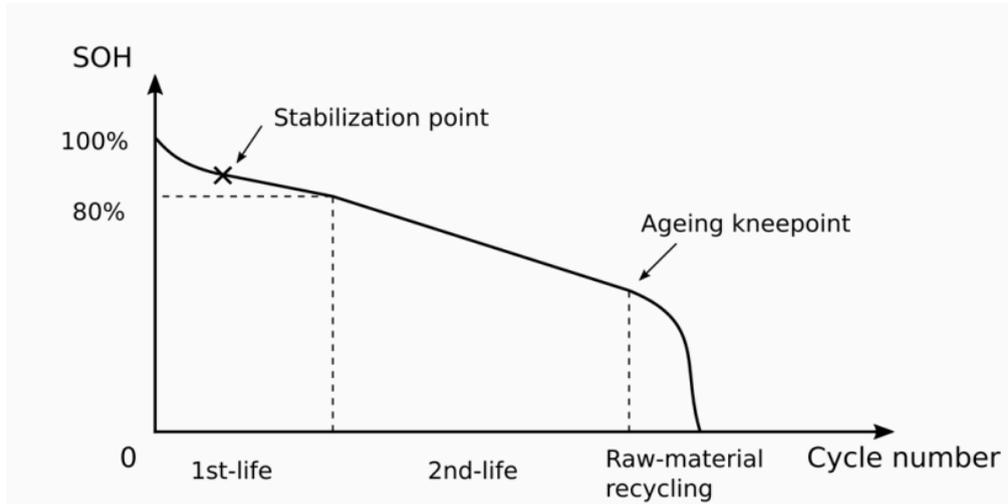
$$SoC [\%] = \frac{Q_{DISP}}{Q_{total}} \cdot 100$$

Para Chen (2023), a SoH reflete o nível de degradação atual de uma bateria em comparação com o seu ponto de partida do ciclo de uso. Através de avaliação quantitativa, o SoH avalia o estado de saúde de uma bateria em relação a capacidade específica como capacidade ou resistência interna. Na BIL onde a energia disponível assume a função fundamental, a capacidade é adotada para descrever o SoH. Em uma aplicação de potência como em um veículo elétrico ou híbrido, a resistência interna é frequentemente assumida como a métrica SoH, dado que um aumento na resistência interna pode limitar a capacidade de potência dos sistemas e diminuir a eficiência dos propulsores elétricos. Seger et al (2022) descreve o SoH como a capacidade real (Q_{real}) da célula dividida por sua capacidade nominal ($Q_{nominal}$). Assumimos a definição comum de que a segunda vida de uma BIL começa em torno de 80%. representa a equação na seguinte forma como descreve o gráfico 1.

Equação 2: Estado de saúde da bateria

$$SoH [\%] = \frac{Q_{REAL}}{Q_{nominal}} \cdot 100$$

Gráfico 8 - Curva de SoH do ciclo de vida de uma célula de íons de lítio



Fonte - Tran et al. 2022.

Para Santos; Passos (2021) um parâmetro importante a considerar é a profundidade de descarga (PdC), ou DoD (*depth of discharge*) que indica, em termos percentuais, quanto da capacidade nominal da bateria foi retirado a partir do estado de plena carga, presumindo o número de vezes que a bateria pode ser carregada e descarregada até que atinja o fim da sua vida útil. O portal Federal Batteries (2023) traz que essa profundidade de descarga é definida como a capacidade descarregada de uma bateria totalmente carregada, dividida pela capacidade nominal da bateria. Por exemplo, se uma bateria de 100Ah for descarregada durante 20 minutos a uma corrente de 50 A, a profundidade de descarga é $50 * 20/60/100 = 16,7\%$. A profundidade da descarga é o complemento do estado de carga SoC e à medida que um aumenta, o outro diminui.

Equação 1: percentual de degradação da bateria

$$\text{DoD (\%)} = 100 - 100 \times \frac{\text{Capacidade remanescente da bateria (Ah)}}{\text{Capacidade nominal da bateria (Ah)}}$$

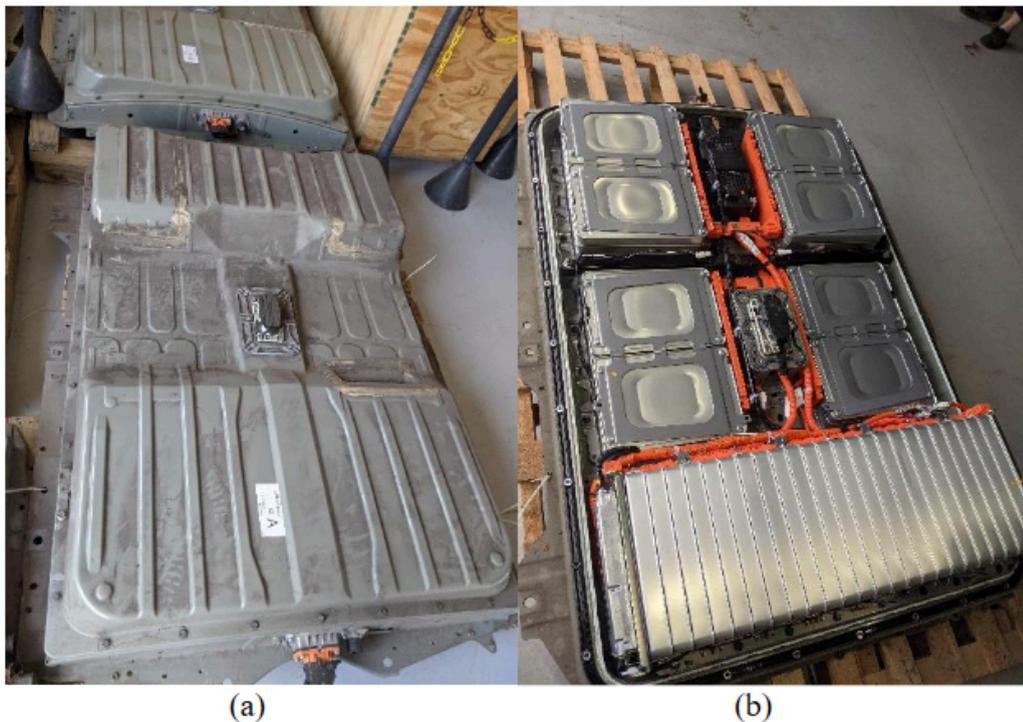
Fonte: Santos; Passos (2021)

Durante a operação das baterias de íons de lítio, algumas reações químicas irreversíveis ocorrem no interior da bateria, resultando em aumento da resistência interna e degradação do desempenho. Portanto, a tecnologia confiável de RUL não é apenas importante para o uso eficiente das baterias, mas também reduz sua taxa de falha de operação. A previsão RUL é principalmente para prever os tempos de uso restantes da bateria de acordo

com o estado atual da bateria (Li, 2023). Fatores como desbalanceamento interno das células comprometem o armazenamento devido a pequenas diferenças ocorridas durante a manufatura, impedância interna variada e fatores de envelhecimento das unidades, além de temperaturas diferentes entre conjuntos de células. Desta forma, o balanceamento obtido pelo algoritmo e ação da BMS tem função determinante, apresenta o autor.

Hohmann et al (2022), através do IX Congresso Brasileiro de Energia Solar apresentou os resultados de testes de diferentes baterias de segunda vida utilizados em táxis na cidade de São Paulo no período de 5 anos, participantes de um projeto piloto de viabilidade econômica promovido pela Nissan do Brasil em parceria com as prefeituras do Rio de Janeiro e São Paulo. As baterias foram desmontadas e testadas através de um aparelho de carga eletrônica que proporciona maior confiabilidade dos resultados devido sua capacidade elevada de estabilidade da corrente visto sua capacidade de mitigar as variações de tensão e resistências das células em cargas convencionais. A figura 10 detalha o banco de BIL retirado do veículo proposto em testes.

Figura 9 - Conjunto de baterias completo retirado da base do carro (a). Conjunto de baterias sendo desmontado (b).



Fonte - Hohmann et al (2022).

Os testes demonstraram variações de capacidade existentes em diferentes arranjos de células avaliados, utilizando o valor médio da capacidade medida, para representar como diferentes perfis de utilização do veículo interferem no SoH da bateria. Essa diferença de utilização contempla jornadas de trabalho, tipo de cargas e percursos. Outro fator determinante é a frequência de carregamento e os tipos de carregadores, em especial os modelos com carregamento rápido, uma vez que durante o carregamento, os arranjos de células de bateria são submetidos a situações heterogêneas cuja repetição leva a uma degradação mais ou menos acentuada. A variação entre as baterias de diferentes veículos pode ser observada na ordem de 35% de capacidade remanescente. Essa disparidade pode representar uma diferença de 23 Ah entre as células nos casos mais extremos, em casos mais moderados, de 10 a 15%.

O autor ainda decorre de que testes de capacidade para classificação das células em bancos de segunda vida ~~têm~~ elevada importância no resultado da segunda aplicação, em especial para módulos de origens diferentes quando em sua atividade em primeira vida. Os testes de capacidade podem não sanar os problemas de operação, mas indicarão as melhores baterias bem como as configurações mais indicadas para atingir os objetivos iniciais do banco.

1.5 Sistema de gerenciamento de bateria (BMS)

Os avanços químicos e técnicos no desenvolvimento tecnológico de células de baterias, o sistema de gerenciamento de baterias, ou BMS (em inglês para *battery management systems*) é o componente primordial de proteção e segurança de um sistema de armazenamento de energia para VE, responsável por garantir a operação confiável e segura de células de bateria conectadas e fornecer níveis de tensão e corrente elevados para propulsão (HAUSER E KUHN, 2015).

Sendo o componente que funciona como o coração dos veículos elétricos, a LIB representa um terço do custo dos EV. Cada bateria é composta de várias células ou unidades primárias. A deterioração ou degradação em qualquer célula afeta diretamente o desempenho e a vida útil da bateria. A unidade do sistema de gerenciamento de bateria (BMS) executa a função de monitoramento da função de cada célula da bateria. (MARCHEGANI et al, 2023).

O gerenciamento de segurança tem que proteger a bateria contra condições críticas de operação. No caso de um BMS para um veículo elétrico, as tarefas do sistema de gestão de segurança são de proteção contra descargas profundas, proteção de células individuais contra descargas excessivas, proteção contra excesso de temperatura e o desligamento da bateria em caso de acidente, além da sobrecorrente e a sobretensão devem ser detectadas (JOSSEN, 1999). Hauser e Kuhn, (2015) reforça a tese de que os objetivos fundamentais para o BMS para veículos elétricos decorrem de aumentar a segurança e confiabilidade dos sistemas de bateria, proteger células individuais e sistemas de bateria contra danos, melhorar a eficiência do uso de energia da bateria (maior autonomia de condução) e prolongar a vida útil da bateria etc. As condições de funcionamento rigorosas da BIL, que em grande parte se aplicam a outras químicas de baterias, juntamente com os objetivos acima mencionados, conduzem a um conjunto de requisitos que devem ser cumpridos pelo BMS.

Para Waseem (2023) o BMS tem como função a execução supervisória, desde o estado de carga até o diagnóstico em células de bateria ou qualquer outro bloco associado dentro de sua estrutura. O sistema otimiza controlando o desempenho da bateria, integrando baterias de tecnologia avançada com interface do veículo.

Hauser e Kuhn (2015) ainda destacam a função dos BMS para executar algoritmos de cálculo de SoC, saúde entre outros. A monitorização, o controle, a otimização e a segurança contra riscos maciços de desempenho da bateria são efetuadas pela BMS em veículos energizados. Diversos algoritmos, modelos e sinais, além de sensores, atuadores, controladores compõe o conjunto supervisório.

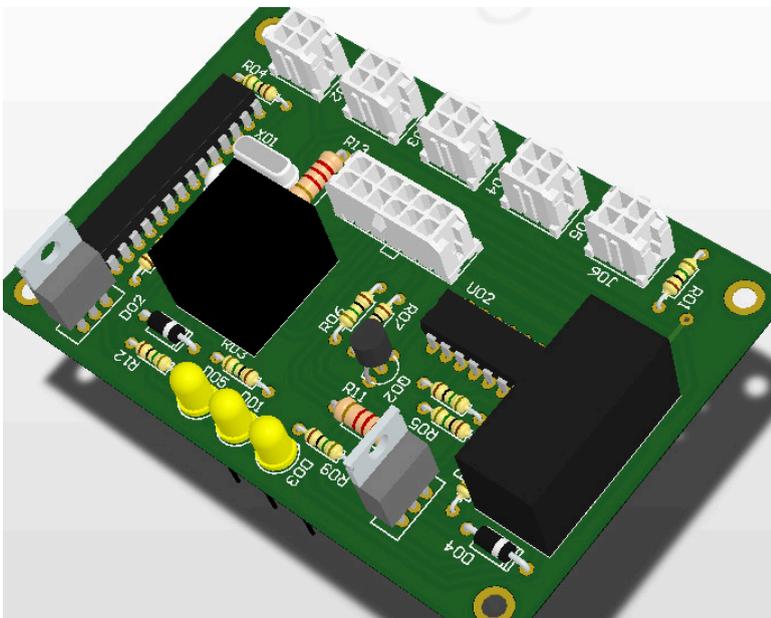
O BMS é constituído de componentes básicos de hardware e software com programação definida para uso em veículos elétricos.

- Hardware: cumpre a função de, através de sensores posicionados no BMS, medir a temperatura da bateria, tensão, contenção de sobrecarga, descarga e aquecimento das células de bateria, sendo este último, necessário um sistema de gerenciamento térmico.

Dispositivo de estado potencial é empregado no BMS para monitorar a tensão celular. Um transceptor monitora, transfere e informa os dados dentro da unidade. Com os avanços tecnológicos de carregamento sem fios ou inteligente, os dados podem ser facilmente comunicados entre o carregador e a bateria.

- Software: Conhecido popularmente como sistema central, controla o funcionamento de hardware e software no BMS. Além de controlar a operação, também faz avaliações e cálculos do estado dos sensores montados no BMS. A detecção de falhas e a avaliação do estado são o fator crucial para o funcionamento efetivo da célula (WASEEM, 2023) proposto na figura 11.

Figura 10 - Protótipo de BMS em desenvolvimento para modelos da fórmula SAE.

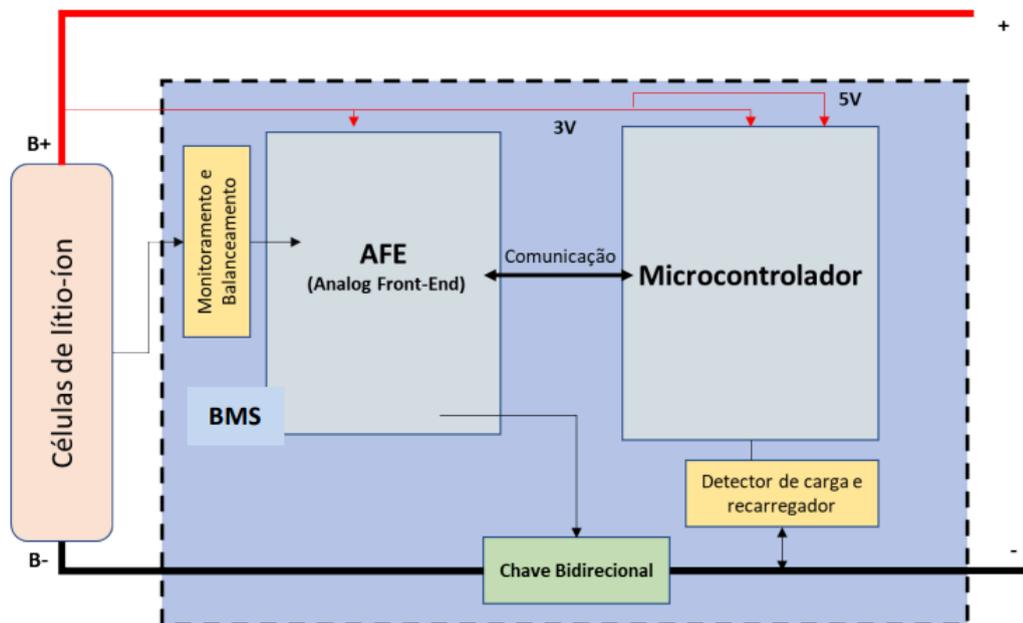


Fonte: Portal Peteel (UFSC).

Ainda, o BMS é também composto por três placas de circuitos eletrônicos: frente analógico, o microcontrolador e a placa de potência. A placa de frente analógica é responsável pela leitura, monitoramento e tratamento dos dados de tensão, corrente e temperatura, além de

realizar o balanceamento das células de lítio-íon. O microcontrolador possui os algoritmos embarcados de SoC, SoH e RUL e a interface de 30 comunicação. A placa de potência é encarregada de acionar as chaves bidirecionais para permitir a recarga e descarga e abri-las caso haja alguma anomalia. A figura a seguir exemplifica e ilustra os três circuitos.

Figura 11 - Estrutura básica de um sistema de gerenciamento de baterias.



Fonte - Galhardo, 2023.

Em veículos elétricos e híbridos, o BMS executa e analisa várias operações, incluindo carga precisa e estimada, equalização de bateria, controle de temperatura, eletrônica de potência interface, análise de falhas e segurança de carga-descarga. Dentre eles o SoC, SoC e o RUL tornaram-se temas críticos que demandam considerável atenção. A estimativa precisa de SoC, SoH e RUL evita que as baterias obtenham anomalias, superaquecimento e ocorrência indesejada de quebra de energia, operando de forma segura e confiável. Entretanto, SoC, SoH e RUL são os estados internos das baterias, que estão sujeitas e submetidas a várias questões relacionadas ao desenvolvimento de algoritmos, projeto de modelos de baterias, computação complexa, velocidade de convergência lenta e baixa robustez devido a ruídos e variações de temperatura (HOSSAIN LIPU et al, 2022).

Durante a operação das baterias de íons de lítio, algumas reações químicas irreversíveis ocorrem no interior da bateria, resultando em aumento da resistência interna e degradação do desempenho. Portanto, a tecnologia confiável de previsão de vida útil, ou RUL, não é apenas importante para o uso eficiente das baterias, mas também reduz sua taxa de falha de operação. A previsão RUL é principalmente para prever os tempos de uso restantes da bateria de acordo com o seu estado atual (Li, 2023).

Santos; Passos (2023), decorrem de que durante a operação, as baterias ficam sujeitas a condições críticas como sobretensão e subtensão, excesso de temperatura, sobrecorrente e curto-circuito. São implementados, a fim de evitar ocorrências desses fatores, um sistema de chaves bidirecionais, responsáveis pelo controle do processo de recarga e descarga, garantindo a proteção do conjunto de células.

1.6 Principais aplicações de baterias de segunda vida

Aplicada a pesquisa acerca dos conceitos de baterias lítio, sua vida útil, monitoramentos e controles e os modos de degradação, bem como o crescimento significativo dos veículos elétricos e híbridos e questões ambientais, se coloca agora a questão do futuro das baterias que estão sendo instaladas nesses veículos. Como foi abordado sistematicamente, deve-se considerar que uma bateria de veículos elétricos está no final da sua vida útil quando a sua capacidade cai 20% em relação ao seu valor nominal. Isso representa que as BIL ainda mantêm um potencial significativo para uso posterior em demais aplicações menos exigentes. As baterias de íons de lítio são um dos tipos de armazenamento de energia mais desejáveis devido à sua vida útil relativamente longa, resposta rápida, altas densidades de energia e energia e custos de fabricação decrescentes.

Mandrile et al (2023) enfatiza que inicialmente, baterias são fabricadas e uma nova bateria está disponível. Em seguida, elas são empregadas em sua primeira aplicação de vida, como VE. No final da primeira vida, eles podem enfrentar um dos três caminhos a seguir: 1- descarte: baterias não são utilizadas para qualquer outro uso produtivo, mas tornam-se um

resíduo, que deve ser devidamente manuseado e isso é um problema face visto a ausência regulatória para descarte de resíduos de BIL.; 2 - reciclagem: uma segunda possibilidade é desmantelar os sistemas de baterias e utilizar as matérias-primas para construir novos sistemas de baterias. Este modelo se assemelha a opção 1, uma vez que pontos de coleta e reciclagem ainda enfrentam escassez.; 3 - reutilização/segundo uso: esta terceira opção consiste em remanejar os sistemas de bateria e empregá-los em outros contextos e aplicações. Isso abre para uma segunda aplicação de vida útil para essas baterias e será discutida mais adiante nesta seção.

A economia circular afirma Kulkov (2023), é um sistema econômico que visa eliminar desperdícios, reduzir o consumo de recursos e promover práticas regenerativas. Os princípios da economia circular incluem o prolongamento dos ciclos de vida dos produtos, a eliminação de desperdícios, a utilização de recursos renováveis e a maximização da eficiência dos recursos. No contexto do mercado da BIL, a adoção de uma abordagem de economia circular envolve considerar todo o ciclo de vida da bateria.

Vale salientar que os termos reutilização e segundo uso são frequentemente utilizados como sinônimos e não há uma definição oficial e clara da diferença entre eles. Ainda segundo Mandrile et al (2023) essa nomenclatura fornece uma definição um pouco mais precisa desses termos. Enquanto a reutilização destina-se a usar o sistema de bateria novamente para o mesmo objetivo, a segunda vida envolve o emprego da bateria para uma aplicação diferente da original.

Assim, surge o desafio de encontrar possíveis aplicações que aceitem a inclusão de BSV, considerando que uma bateria com ainda 80% de sua capacidade nominal apresenta uma vida útil considerável e podem ser aplicadas em outras atividades (PRADO et al, 2021, p. 2).

As baterias de íon-lítio de veículos elétricos a bateria geralmente é substituída quando sua capacidade cai abaixo de 80% da capacidade nominal. Desta forma, muitas baterias de veículos elétricos (REVB) aposentadas será produzidas em pouco tempo e causará nova poluição ambiental se as REVB não forem tratadas adequadamente. Para resolver esse problema, uma das principais soluções é realizar a utilização escalonada do REVB com base nos requisitos de diferentes cenários de aplicação (XU et al 2021, p.3).

Baterias de celulares e notebooks entre outros dispositivos, quando descartadas, levantam a preocupação de um possível segundo uso, ou segunda vida, pois os pontos de reciclagens bem como suas instalações são inadequados. Ainda que o descarte e reciclagem dos modelos de bateria de chumbo-ácido (Pb-â) esteja em patamar consideravelmente aceitável e regulamentado, tecnologias atuais dominantes de Li não compartilham de esse privilégio. Em contrapartida, a utilização desse metal em baterias vem aumentando sem sinais de declínio e, em aplicações de alta capacidade como veículos elétricos, em que seu uso deve proliferar (HOSSAIN et al, 2019, p.8). O processo de reciclagem, ainda que possa melhorar a taxa de utilização dos recursos, evitar desperdícios dos materiais e reduzir a poluição ambiental, ela depende de processos complexos e pode causar alto consumo de energia além de poderem causar poluição secundária se manuseadas de forma inadequada devido a tecnologias ainda imaturas. Ainda, quando a vida útil da bateria termina, a maior parte da energia ainda é deixada, causando um grande desperdício de energia se submetidas a recicladas logo após a primeira fase de uso (FAN, 2023).

O final da vida útil total de uma BIL é atualmente esperado para atingir cerca de 50% de sua capacidade original. Desta forma, os cenários de segunda vida têm o potencial de gerar receitas adicionais e, por consequência, podem contribuir para reduzir o custo total de propriedade de um veículo elétrico se tornando um ativo financeiro (MANDRILLE ET AL, 2023).

O periódico *Jornal da USP* (2022), relata que os países mais avançados no uso dos carros elétricos estão determinando que as principais montadoras façam a reciclagem das baterias com as tecnologias já existentes. As baterias possuem diversos componentes de fácil reciclagem, como o plástico e o alumínio. Também existem outros tipos de metais raros como cobre, cobalto e neodímio, que estão entre os principais componentes, além de produtos químicos utilizados que precisam ter esse processo melhorado. Segundo o jornal, uma alternativa seria utilizar as baterias em fim de vida útil em outros processos, por exemplo, como acumuladores de carga nas próprias fábricas, estendendo seu tempo de uso.

No que tange a aplicação das BSV, há um enorme nicho de possibilidades, a depender do estado residual da bateria e a carga que ela irá recepcionar. Bolognesi (2021) detalha que a bateria pode ser remodelada para operar em modelos estacionários de energia, armazenamento de energia ou em serviços de mobilidade diversos de menor exigência.

Existem modelos de mobilidade para BSV de viagem diária e programada a ser percorrida que seja menor que o VE da primeira vida ou em veículos de menor porte em relação à sua operação inicial, como motocicletas, bicicletas, patinetes ou empilhadeiras. Há ainda a possibilidade que a bateria seja retirada de veículos de grande porte, como ônibus e caminhões, e remanejada para operar em VE leves. No entanto, a intensa atividade da BSV em mobilidade pode acelerar a degradação e a aplicação se tornar inviável financeiramente.

Segundo Mandrile et al (2023) as aplicações de transporte elétrico aquaviário são promissoras e especialmente interessantes. Essa modalidade exige grandes volumes de sistemas de armazenamento, uma vez que o complexo sistema elétrico envolve diferentes fontes de energia e atuadores. O uso de baterias de segunda vida como fonte de energia para sistemas de propulsão naval é uma escolha que caminha para um transporte naval mais sustentável.

Jiao et al (2021) pesquisou a viabilidade da substituição das baterias de chumbo-ácido por baterias de íons de lítio de segunda vida em empilhadeiras. Trouxe que a análise de variação paramétrica é realizada para especificar as diferentes vidas e intensidade de operação desse modelo de mobilidade. Conclui que apesar dos custos iniciais para empilhadeiras de Pb-A parecerem torná-las economicamente viáveis, a manutenção elevada e substituição em curto intervalo de tempo adicionam custos extras significativos em sua operação, além dos custos intangíveis com tempo de manutenção e carregamento. Complementa o autor que as BSV, se mostra uma alternativa potencial no mercado de substituição de baterias. Ainda que diversas incertezas enfrentadas nesse seguimento persistam como gerenciamento de consistência, confiabilidade, segurança e custos de testes e atualização das remanufaturadas, a aplicação efetiva das BSV pode ser tornar um caminho sedimentado com a combinação de nova tecnologias, padronizações, modelos de negócio e políticas governamentais.

É notável as diversas possibilidades de estudos de viabilidade e aplicações das BSV em aplicações de menores exigências. No entanto, durante a investigação das pesquisas bibliográficas, fica claro o grande acervo no que tange a utilização dessa modalidade em sistema estacionário de armazenamento de energia para equalização e resposta às oscilações e perturbações da frequência da rede elétrica.

Para Hamidi (2013) a possível saturação crescente de veículos elétricos exigirá uma expansão de estações de carregamento e o suprimento dessa demanda está na integração da

geração de energia eólica e energia solar fotovoltaica em estações de carregamento equipadas com e sistema armazenamento de energia por BSV, conectadas em sistemas de redes inteligentes. O estudo do autor propõe que os veículos elétricos serão carregados nas estações quando as fontes combinadas de energia fotovoltaica e eólica não forem capazes de fornecer energia devido às suas respectivas intermitências. Nesse momento, a energia armazenada BSV supre a demanda. O modelo enfatiza a utilização de energias renováveis e a logística reversa das baterias dos próprios veículos. A figura 13 exemplifica um arranjo de armazenamento de energia através de BSV de Li.

Figura 12 - Arranjo de baterias de segunda via para fins de armazenamento.

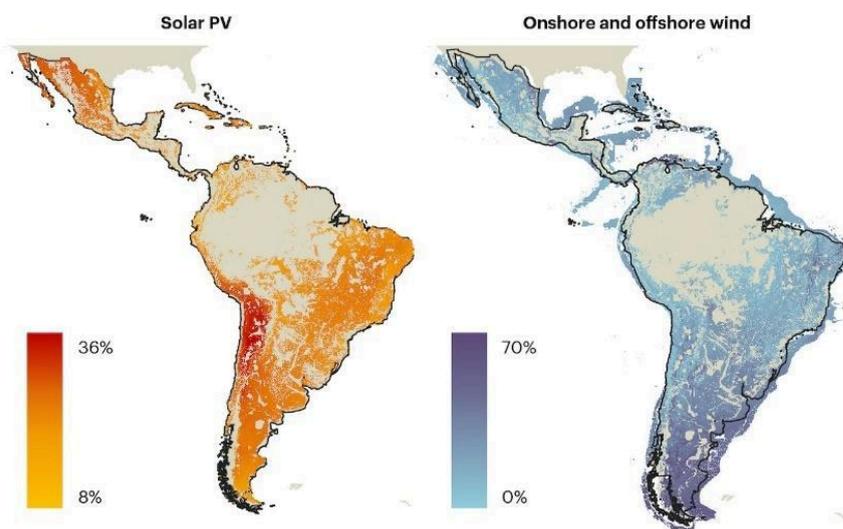


Fonte - Portal oleodieselnaveia, 2023.

A geração de energia renovável, como a energia eólica e a energia solar, por exemplo, está em patamares exponenciais de crescimento, com acréscimo de 3,2 e 3 GW à matriz energética brasileira, segundo o Ministério de Minas e Energia (MME, 2023). Ao todo, estima-se que a capacidade de energias renováveis deverá aumentar 107 GW ainda este ano, totalizando 440 GW (IEA, 2022). No entanto, devido à limitação de condições naturais como intensidade luminosa e energia eólica, a energia gerada é intermitente e sujeita a flutuações de tensão, tornando-a indisponível para fornecer energia à rede de forma estável. A figura 14

ilustra os fatores de capacidade de geração de origem solar e eólica na América Latina e Caribe.

Figura 13 - Fatores de capacidade média solar fotovoltaica (esquerda) e eólica (direita) em 2022.



Fonte - IEA, 2023.

O Sistema de Armazenamento de Energia (SAE), é um importante dispositivo que garante a operação da geração de energia renovável. Um SAE é um sistema que converte energia de uma forma, geralmente eletricidade, para outra forma que pode ser reservada em um ambiente de armazenamento e quando exigida, é convertida de volta em eletricidade. Esse sistema armazena energia quando o sistema de geração de energia está funcionando e descarrega energia quando o sistema exige alta demanda, reduzindo assim a intermitência e melhorando a segurança das redes de transporte e distribuição (TAO, 2023).

Embora muitas tecnologias tenham sido desenvolvidas para fins de armazenamento de energia em larga escala, como hidrelétricas bombeadas e instalações de armazenamento de energia de ar comprimido, bem como volantes, capacitores e armazenamento magnético supercondutor, muitos são limitados em sua dependência de site, capacidade ou capacidade de resposta (LAWDER et al, 2014).

Fu-Bao et al, (2019) traz que a aplicação de um novo sistema de energia conectado à rede em grande escala fez com que a taxa de rampa da unidade tradicional não pudesse se ajustar às flutuações bruscas e de curto prazo de energia, limitando assim a saída da nova energia para a rede. No entanto, o avanço da tecnologia de armazenamento de energia em larga escala permitiu uma flutuação de energia mais suave, aliviando efetivamente a pressão sobre a rede para regular a frequência no pico, aumentando o controle, a continuidade e a estabilidade da nova geração de energia, bem como melhorando a compatibilidade da rede com o novo sistema de geração de energia. A carga/descarga do sistema de armazenamento de energia pode controlar a potência de saída da nova geração de energia elétrica. A operação coordenada entre o sistema de armazenamento e a geração de energia pode facilmente identificar mudanças na nova geração de energia e ajustar sua potência para suavizar a flutuação de energia e garantir que o sistema esteja operando com segurança e estabilidade (COLARULLO; THAKUR, 2022).

O autor ainda acrescenta que a regulação de pico, em essência, é para encontrar um equilíbrio entre a geração de energia e a demanda de carga no sistema elétrico. Se o sistema elétrico não puder controlar efetivamente o equilíbrio entre oferta e demanda, isso afetará a confiabilidade da eletricidade para os usuários e poderá resultar em uma ampla gama de acidentes de energia. Geralmente, a capacidade de regulação de pico do sistema elétrico deve ser maior do que a diferença pico de carga equivalente. A flutuação da potência de saída da nova energia é muitas vezes inconsistente com a flutuação de carga do sistema, geralmente mais violenta. Durante o processo de conexão da rede em grande escala à nova geração de energia elétrica, o sistema elétrico não apenas enfrenta o risco de capacidade de regulação de pico insuficiente, mas também um grande desafio em sua capacidade de regulação de pico. Portanto, dispositivos de armazenamento de energia são necessários para reduzir a demanda por unidades de regulação de pico sobressalentes e, em seguida, evitar as dificuldades causadas por essas unidades (FU-BAO, 2019).

Figura 14 - Reutilização de baterias BSV em um sistema de energia distribuída renovável.



Fonte: Song et al, 2022.

3 METODOLOGIA

Menezes et al (2019) descreve que a pesquisa corresponde a um conjunto de ações que deve seguir uma série de procedimentos definidos previamente através de um método baseado na racionalidade a fim de se buscar resultados e respostas a um problema previamente apresentado. Como bem ressalta o autor, a pesquisa desenvolve-se ao longo de um processo que inclui inúmeras fases, desde a adequada formulação do problema até a satisfatória apresentação dos resultados.

Compreendido os conceitos que envolvam a necessidade pela demanda, o início do processo, a funcionalidade, o diagnóstico e o encerramento do primeiro ciclo de vida, bem como a cadeia produtiva para a aplicação de baterias de segunda vida, buscamos agora emergir no conceito econômico da pesquisa. Ou seja, o quanto esse processo beneficia seus atores dentro da cadeia produtiva de reutilização de baterias de segunda vida substituídas dos VE e VEHP a partir do momento que estas atingem o patamar de aproximadamente 80% de vida útil para mobilidade dos veículos de origem, e principalmente, qual impacto econômico esse processo surtirá nos atuais e futuros proprietários de veículos elétricos e híbridos. Vale ressaltar ainda o impacto positivo e soluções no quesito ambiental, fator primordial da essência da eletrificação veicular

Uma vez exposto a problemática do trabalho que questiona a desvalorização do bem veículo elétrico ou híbrido quando for necessário realizar a substituição da bateria de alta voltagem, esse tópico irá explorar 3 cenários, partindo do valor de uma bateria nova em comparação com a perspectiva do valor estimado de uma bateria já utilizada e que atingiu seu primeiro ato de vida útil, acompanhando pesquisas científicas publicadas, uma vez que para a atual conjuntura nacional, não há parâmetro estabelecido ou históricos para precificação das células de baterias utilizadas. Os 3 cenários irão apresentar a estimativa de valor do Kwh de BIL a depender do seu estado de saúde. Isso se faz necessário devido à relação com a forma de uso do veículo enquanto a bateria cumpre seu primeiro ciclo de vida útil. Seu estado de saúde, já mencionado no capítulo 3.4.3, pode variar a depender da forma e tempo de carregamento, modelo de condução que pode incluir: velocidade média, carga média, tempo e forma de descarga, geologia média do terreno de uso, temperatura média da região de uso etc.

Maiores estudos estão em andamento e se fazem necessários para investigar a real condição do estado de saúde das células de bateria durante e ao final do ciclo em questão, a fim de precificar seu ativo.

Lakatos (2012, p. 43) traz que uma pesquisa bibliográfica ou de fontes secundárias é o que dá embasamento a um trabalho. Esta revisão sistemática acompanhou critérios com o objetivo de identificar os estudos mais relevantes na área e tornar a pesquisa reproduzível e sem vies. Foi realizada uma ampla revisão de artigos relacionados à avaliação da utilização BIL, com foco na segunda vida das baterias para VE, bem como um possível modelo de negócio. A pesquisa por tais estudos foi feita por meio do Google Scholar, Elsevier, Science Direct e Institute of Electrical and Electronics Engineers, além do portal do fabricante do veículo novo utilizado nessa comparação, utilizando as palavras-chave: “avaliação do ciclo de vida”, "baterias de íon-lítio", "bateria de segunda vida", “análise do ciclo de vida de baterias de íon-lítio”, “ciclo de vida de baterias de íon-lítio”, “utilização de baterias de segunda vida”, “valor das células de baterias de segunda vida”.

Os estudos foram agrupados de acordo com suas similaridades, como proximidade de objetivos, fronteiras, análise do estado das baterias, relações consideradas e categorias de impacto utilizadas. Além disso, para que as comparações e discussões sobre os resultados dos trabalhos revisados fossem feitos de maneira mais adequada e que levassem em conta a melhor comparabilidade possível, os estudos foram reunidos e separados de acordo com suas semelhanças e quanto ao seu alinhamento em relação aos tópicos discutidos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para Colarullo; Thakur (2022) há uma preocupação comum em relação ao comportamento de degradação das BSV em comparação com as baterias novas. O crescimento da frota de VE e VEHP e a notória percepção de que a reutilização pode ser um negócio lucrativo, muitos estudos e simulações estão em andamento acerca do envelhecimento do BSV. Isso demonstra que há grandes obstáculos e o de acessar dados de

degradação de baterias após o SoH de 80% se destaca, devido a proteção dos dados pelas montadoras como segredos comerciais. O valor potencial do uso de BSV pode ser afetado por muitos fatores, principalmente por haver incertezas na taxa de degradação da bateria. A taxa de degradação basal no modelo é obtida durante testes em condições constantes em laboratório, o que pode ser muito diferente do ambiente operacional dos veículos elétricos e híbridos em uso e variar de diferentes fabricantes de baterias (WU et al. 2022).

O procedimento de avaliação unificado de BIL aposentadas pode ser difícil, considerando que o fator de forma, o design e a química dos módulos existentes e a degradação da célula variam muito entre si (NEUBAUER et al 2012)

Xobu et al. (2024) destaca que três pontos chave devem ser considerados para garantir que os passaportes de bateria possam informar as decisões de revenda ou reaproveitamento: (1) pelo menos três medições do SoH devem ser feitas em diferentes pontos de tempo para estabelecer uma trajetória de envelhecimento, e cada medição de SOH deve ser suficientemente precisa; (2) uma imprecisão de SoH de 5% ou mais não pode fornecer previsões de vida útil remanescentes confiáveis; (3) O BMS deve permitir a previsão precisa da vida útil restante em casos de uso variáveis, o que pode exigir a adoção de algoritmos.

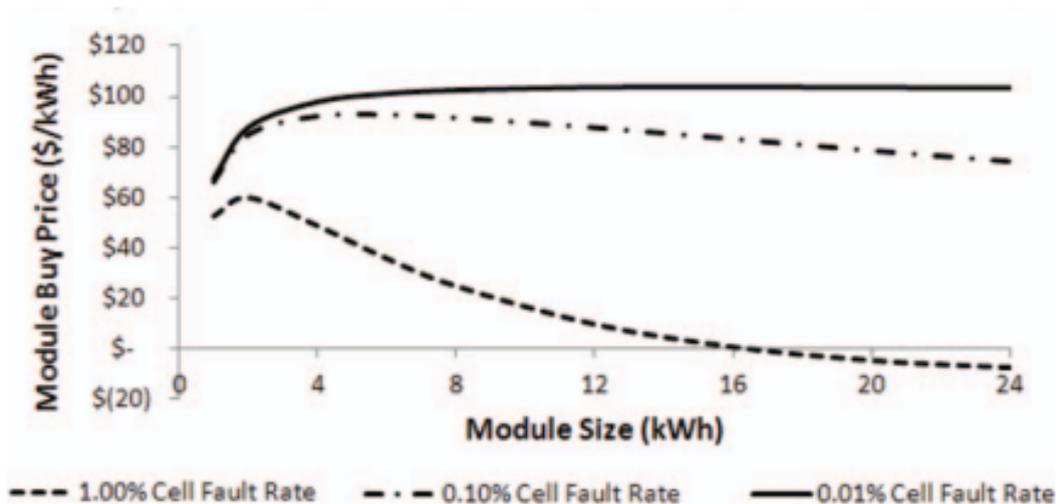
Casals et al. (2019) decorre que habitualmente se colocam duas abordagens para calcular a vida útil das baterias. A mais precisa, porém, ainda inviável por consumir muitos anos, é os testes empíricos de aplicações de casos reais. O outro método é a execução de simulações, se tornando o mais acessível por fornecerem resultados mais rápidos a custos mais baixos e permitem testar diferentes condições ou parâmetros de operação de estimativa de estado baseados em física no BMS. O autor cita nas simulações as diferentes condições como o envelhecimento causado pela janela de tempo e pela ciclagem, além de incluir fatores de envelhecimento mais relevantes como: Temperatura; SoC ou tensão; DoD; Intensidade da corrente que atravessa a bateria (C-rate) e o tempo sob cada condição.

Para apresentar os cenários propostos, Xobu et al. (2024) através da exploração de estudos contemporâneos descreve que os valores para a aquisição das BSV através de estudos de mercado que calculam os preços do BSV subtraindo as despesas de renovação, de US\$ 72,00 o kWh. Outros autores apontam um valor estimado para venda das baterias na faixa de US\$100,00 Kwh (REINHARDT, 2019 e WU, 2022). O estudo em questão não abordará o valor de venda da bateria de segunda vida já remanufaturada, que exige um aditivo ao custo

de US\$ 400/kWh para converter essas baterias para fins aplicações de armazenamento estacionário por exemplo (XOBU et al, 2024).

Neubauer et al. (2012) através do Escritório de Informações Científicas e Técnicas do Departamento de Energia dos Estados Unidos da América (OSTI.Gov) propuseram a fórmula de rendimento das BSV com base na probabilidade em que as células defeituosas estejam presentes em conjuntos, denominado pack destinado ao reaproveitamento. O autor construiu uma estrutura para, baseado na taxa de falha de célula que propõe 3 variáveis, estimar o custo apresentado no gráfico 8, em dólares o kWh (US\$/kWh). Nesse gráfico, o autor estima o valor do módulo, ou conjunto de células em função da potência entregue no tempo. Ou seja, uma BSV com uma taxa de falha de 0,01% tem seu valor estimado em cerca de US\$100,00 o kWh. Esse valor decai à medida que a taxa de falha de célula aumenta, proporcional à disponibilidade de potência.

Gráfico 9 - Valor estimado da SLB em função da taxa de falha.



Fonte: OSTI.Gov, 2012.

A identificação de taxas de falhas das células apropriadas para aplicação é simples, pois a escassez de dados disponível sobre o decaimento da eficiência das células, sendo pouca base justificável para escalonar taxas de falhas nas células. Para o cenário em que dados avançados de diagnóstico a bordo não estão disponíveis no veículo antes da compra do remanufaturador, a taxa de falha da célula foi assumida como baixa de 0,001%, ou 1 em 100.000 células. (NEUBAUER et al. 2015). Hipoteticamente, o comprador que compre

exclusivamente baterias de 22 kWh, cada uma contendo 297 células, encontrará uma célula defeituosa em 1 de cada 337 pacotes que comprar. Ainda sob hipótese pelo fato da ausência de dados concretos, foram aplicadas taxas de falha de célula mais altas de 0,01%, 0,1% e 1,0%. Na pior das hipóteses, cada pacote de 22 kWh comprados teria três células avariadas, resultando no descarte de 1 a 3 módulos do pacote (NEUBAUER et al. 2012).

O National Renewable Energy Laboratory (NREL), laboratório vinculado ao U.S. Department of Energy e Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (OSTI) desenvolveu e disponibilizou uma ferramenta de cálculos para explorar os efeitos de diferentes estratégias e suposições de reaproveitamento na economia de BSV de VE E VEHP, baseado em diversas variáveis possíveis para análise de precificação de venda da bateria reaproveitada. Baseado nessa análise que Neubauer et al. (2015) apresentou em publicação que os preços das baterias reaproveitadas automotivas podem oscilar a depender das variáveis, entre US\$38,00 kWh a US\$132,00 kWh, dado esse utilizado para a montagem dos cenários propostos no início deste artigo.

O preço de venda de bateria reutilizada pode ser usado somente se os custos envolvidos nos processos entre retirar uma bateria do serviço automotivo e vendê-la para um mercado secundário (coleta, teste, reembalagem, garantia etc.) são conhecidos, fato que não será abordado nessa pesquisa. O preço das baterias reutilizadas é intrincado a diversos fatores, reforçando a necessidade da análise econômica, bem como da comparação dos custos das baterias novas (XOBU et al. 2024).

1.7 MATERIAIS

O modelo do veículo e conseqüentemente a bateria de alta tensão utilizado nesta abordagem para a projeção dos cenários será o Caoa Chery Tiggo 8 Pro PHVE 2024, com dados conforme data sheet disponibilizado pelo fabricante conforme tabela 4 e imagem 16.

Imagem 15 - Vista externa do modelo em estudo.



Fonte: Portal Caoa Chery, 2024.

Tabela 4 - Especificação técnica do conjunto de propulsão.

Componentes	Especificação
Motor tipo	1.5 TCI
Cilindros (unid.)	4
Válvulas (unid.)	16
Potência máxima (cv) - motor a combustão	147
Torque máximo (kgfm) - motor a combustão	22,4
Injeção Eletrônica	Multi point injection
Combustível	Gasolina
Motores Elétricos (unid.)	2
Potência elétrica máxima (cv)	170
Potência máxima elétrico e combustão (cv)	317
Torque máximo elétrico e combustão (kgfm)	56,6
Transmissão	DHT 9 velocidades

Tração

Dianteira

Peso da massa

1.829 kg

Fonte - Portal D21 Motors, 2024.

O conjunto de bateria de alta tensão para o veículo em questão, que é fonte desse estudo, está localizado na região central entre eixos e na parte externa inferior do veículo. A imagem 17 demonstra a posição específica em bem como seu conjunto de carregamento e a bateria 12v de chumbo ácido responsável pelo acionamento do sistema operacional. A imagem 17 e 18 detalham a posição de instalação do pack bateria e em operação no veículo.

Imagem 16 - Posição do conjunto de baterias e controlador de carregamento.



Fonte - Portal Caoa Chery, 2024.

Imagem 17 - Pack de bateria instalado e em operante.



Fonte - Própria do autor.

A ficha técnica da BIL está descrita na tabela 5, detalhando suas especificações técnicas.

Tabela 5: Especificação técnica do conjunto de bateria de alta tensão.

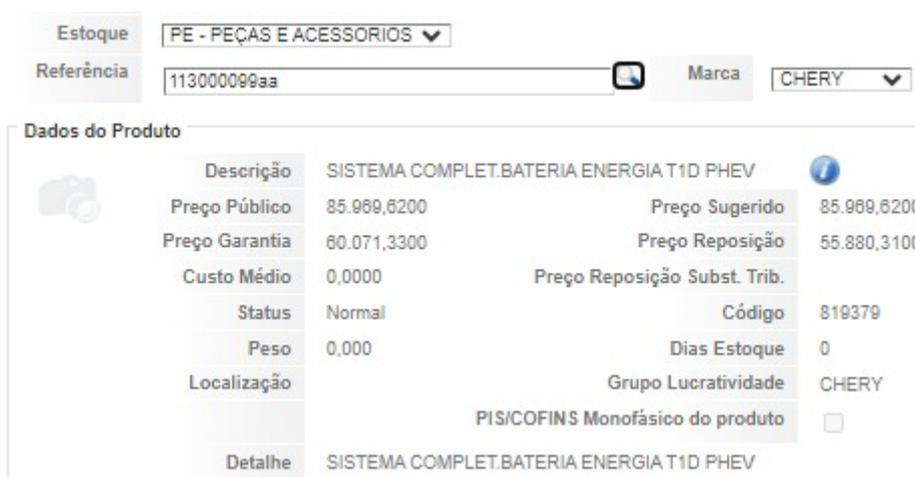
Itens	Especificação
Tipo de produto	Sistema de bateria
Tipo da célula da bateria	Bateria de lítio ternário
Aplicação de alta potência	Sob a cabine de passageiros
Tipo de refrigeração	Refrigeração líquida
Tensão nominal (V)	350,4
Capacidade nominal (Ah)	55
Energia nominal (Wh)	19270
Tensão de finalização de carregamento do sistema (V)	408
Tensão de finalização de descarregado sistema (V)	268,8
Condições de temperatura máxima de ciclo de calor (°C)	60
Tamanho (m)	1099 x 875 x 174
Peso (kg)	134
Número de células	96

Fonte - Portal Caoa Chery, 2024.

Determinado o modelo de BIL pesquisado, sua ficha técnica e orientação em relação ao modelo de negócio proposto, foi realizada a pesquisa de preço do conjunto de bateria, uma

vez que não é fornecido à célula individualmente. O valor do item “*SISTEMA COMPLET. BATERIA ENERGIA T1D PHEV*” de numeração 113000099AA, específico para o modelo de estudo é de R\$ 85.969,62, ou US\$ 16.229,80 na cotação do dia 07 de junho de 2024 segundo Banco Central do Brasil, de R\$ 5,53. Esse valor é constatado através da cotação na rede de concessionárias da marca demonstrado na imagem 19.

Imagem 18 - Valor do conjunto de bateria novo.



The screenshot shows a web interface for a Chery inventory system. At the top, there are filters for 'Estoque' (Inventory) set to 'PE - PEÇAS E ACESSORIOS' and 'Referência' (Reference) set to '113000099aa'. The 'Marca' (Brand) is set to 'CHERY'. Below this is a section titled 'Dados do Produto' (Product Data) which contains the following information:

Descrição	SISTEMA COMPLET.BATERIA ENERGIA T1D PHEV		
Preço Público	85.969,6200	Preço Sugerido	85.969,6200
Preço Garantia	60.071,3300	Preço Reposição	55.880,3100
Custo Médio	0,0000	Preço Reposição Subst. Trib.	
Status	Normal	Código	819379
Peso	0,000	Dias Estoque	0
Localização		Grupo Lucratividade	CHERY
		PIS/COFINS Monofásico do produto	<input type="checkbox"/>
Detalhe	SISTEMA COMPLET.BATERIA ENERGIA T1D PHEV		

Fonte - Próprio do autor em pesquisa na rede de concessionárias Caoa Chery.

Apresentados os dados necessários de estimativa de valor para venda das BSV pelos proprietários dos veículos elétricos e híbridos Plug In, e o custo de aquisição de uma nova bateria para o modelo proposto, seguiremos com a elaboração de três cenários possíveis. Estes cenários analisarão se há vantagens financeiras na venda da bateria já utilizada pelo veículo e a compra da nova para reposição, escalonado entre a baixa, média e alta. O cenário baixo é o mais pessimista e atende a taxa de falha de 1% e que pode incluir um saldo negativo, o cenário médio que atenderá a taxa de falha de 0,1% e o cenário alto, apontado como o mais promissor e atende a taxa de falha de 0,01%, todos assumindo um SoH de 80%, faixa em que o sistema atende com entrega aceitável de potência para segunda vida.

1.8 ELABORAÇÃO DA ANÁLISE

Aplicado às variáveis como o valor do kWh/US\$, a potência real da bateria, a taxa de falha, obtemos o valor resultante e seu percentual em relação a bateria nova, obtemos os cenários a seguir com o possível resultado proposto para a venda da BSV.

Tabela 6 - Cenário 1, representando o menor valor de venda.

CENÁRIO BAIXO	
Valor do kWh (US\$)	38
Potência nominal da bateria (kWh)	19,30
SoH (%)	80
Potência real (kWh)	15,44
Taxa de falha (%)	1
Células restantes após taxa de falha	95
Valor resultante para venda (US\$)	586,72
Vantagem financeira na compra da nova bateria (%)	3

No cenário 1, o valor do kWh é o mais baixo projetado, resultando em um valor de venda menor para a BSV. A taxa de falha de 1% é relativamente alta, resultando em uma redução do número de células utilizáveis. A vantagem financeira na compra de uma nova bateria é de apenas 3%, o que indica que a compra de uma nova bateria não trará um grande benefício financeiro. Este cenário pode ser ideal em um mercado onde os preços são baixos, mas não incentiva significativamente em um cenário de recompra de baterias.

Tabela 7 - Cenário 2, representando o valor moderado de venda.

CENÁRIO MÉDIO	
Valor do kWh (US\$)	85
Potência nominal da bateria (kWh)	19,30

SoH (%)	80
Potência real (kWh)	15,44
Taxa de falha (%)	0,1
Células restantes após taxa de falha	96
Valor resultante para venda (US\$)	1312,40
<hr/>	
Vantagem financeira na compra da nova bateria (%)	8
<hr/>	

Para o cenário 2, a tabela apresenta um valor do kWh mais do que o dobro do cenário 1, resultando em um valor de venda significativamente maior. A taxa de falha de apenas 0,1% mantém quase todas as células utilizáveis. A vantagem financeira de 8% na compra de uma nova bateria é moderada, indicando um benefício razoável na negociação do ativo BSV por uma nova. Este cenário representa um equilíbrio entre custo e benefício, sendo atrativo para usuários que buscam uma compensação substancial ao vender a bateria já utilizada para compra de uma nova.

Tabela 8 - Cenário 3, representando o melhor cenário.

CENÁRIO ALTO	
Valor do kWh (US\$)	132
Potência nominal da bateria (kWh)	19,30
SoH (%)	80
Potência real (kWh)	15,44
Taxa de falha (%)	0,01
Células restantes após taxa de falha	96
Valor resultante para venda (US\$)	2038,08
<hr/>	
Vantagem financeira na compra da nova bateria (%)	12,55
<hr/>	

No melhor cenário pelo valor do kWh mais elevado segundo as análises financeiras apresentadas nessa pesquisa, resulta no maior valor de venda. A taxa de falha é a estimada é de apenas 0,01%, garantindo que quase todas as células permaneçam utilizáveis. A vantagem

financeira de 12,55% na compra de uma nova bateria é a maior entre os cenários, tornando atrativa a substituição da bateria antiga por uma nova. Este cenário se mostra ideal em relação aos demais e proporciona um atrativo convidativo em uma projeção para aquisição de um veículo elétrico ou híbrido.

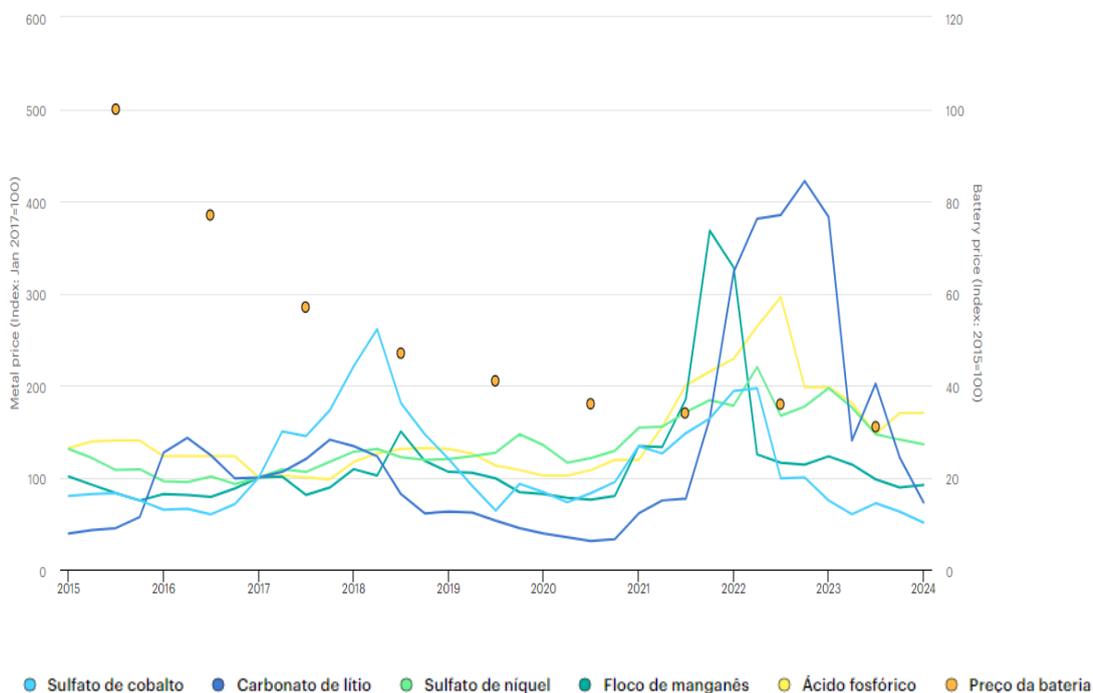
5 CONCLUSÃO

As projeções apontadas pelos cenários propostos apontam ao proprietário do veículo VE e VEHP um subsídio de U\$\$ 2038,08, em um melhor cenário, na compra de um conjunto de BIL para reposição em seu veículo, reduzindo esse passivo em 12,55% com a venda do conjunto ainda com 80% do seu SoH íntegro, fomentando a cadeia circular e sustentável. Ainda, em uma hipótese de revenda do veículo, o novo proprietário poderá pleitear a dedução do valor para troca da bateria de R\$ 11.270,58 em relação ao custo total.

Em qualquer dos cenários, o valor da bateria em relação ao conjunto novo poderia se aproximar da paridade se o custo de um conjunto de bateria novo não fosse elevadamente alto. Esse fato pode ser explicado levando em consideração a aquisição de todos os componentes do conjunto, componentes estes que não são contabilizados na remanufatura do produto de segunda vida como carcaça, refrigeradores, isolamentos, fio e cabos etc., trazendo limitações no que tange a vantagem financeira, e os custos de matéria prima para fabricação.

No entanto, é promissor o cenário futuro levando em consideração a cronologia temporal dos preços das baterias devido a estabilização do valor dos minerais críticos, que causou a queda dos preços das baterias recentemente, como aponta o gráfico 9 da International Energy Agency (IEA, 2023). Isso impulsiona a queda de preço de toda cadeia, inclusive das BSV, apontando para uma desmistificação do questionamento acerca da aquisição de um VE ou VEHP.

Gráfico 10 - Preço das baterias de 2015 a 2023.



Fonte - IEA, 2024.

O mercado brasileiro de BSV de Li está em um estágio inicial de desenvolvimento, mas começando a ganhar tração devido ao aumento da adoção de veículos elétricos e sistemas de armazenamento de energia no país. No entanto, é importante notar que este cenário, ainda está em fase de crescimento enfrenta desafios, como a falta de infraestrutura para reciclagem e reutilização de baterias, a necessidade de regulamentações mais claras e o custo de transporte e logística. Isso trouxe muitas limitações na formulação desse trabalho como coleta de dados em relação a valores de aquisição.

Foi realizada uma visita na empresa Energy Source, na cidade de São João del-Rei da Boa Vista, especializada em remanufatura de baterias de íon lítio e reciclagem de seus materiais, e o engenheiro chefe não tinha ainda como precisar, devido ausência dos fatores mencionados acima, além da dificuldade de acessar os dados da bateria ainda aplicada no veículo por parte das montadoras, um parâmetro de custos e valores de compra das BSV. Ainda que tenha sido encontrada diversas frentes de pesquisa nessa linha, vale reforçar a importância de pesquisas futuras sob a ótica de construir caminhos que levem a uma melhor compreensão e estimule o

mercado. No geral, o mercado de baterias de segunda vida no Brasil tem potencial para crescimento, especialmente à medida que o país avança em direção à eletrificação de sua frota de veículos e busca soluções de energia mais sustentáveis.

A reutilização de baterias de segunda vida pode reduzir os custos de produção de novas baterias, considerando que as baterias representam uma parte significativa do custo total de um veículo elétrico e híbrido. Sua reutilização prolonga seu ciclo de vida útil e reduz a necessidade de fabricar novas baterias, consumidor de recursos naturais e energia, além de contribuir para a redução do volume de resíduos eletrônicos evitando a disposição inadequada de baterias usadas.

A sugestão de pesquisas e formulação de trabalhos futuros fica no campo de coletas de dados das baterias, bloqueado pelas montadoras e fabricantes de baterias por questões de segurança de dados e divulgação de tecnologias, a fim de se formular modelos matemáticos de telemetria e com isso aproximar a precisão do SoH, e o aprofundamento de estudos e sugestões de normas e marcos regulatórios de parâmetros de custos com transportes e mão de obra.

Em resumo, expandindo a cadeia produtiva, a pluralização das empresas especializadas em reutilização de baterias de segunda vida, esse modelo de negócio oferece uma série de benefícios econômicos, ambientais e sociais, desempenhando um papel importante na transição para uma economia mais sustentável e na redução do impacto ambiental associado à produção e descarte de baterias.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Jenifer Rigo. **Avaliação da composição química do material ativo do cátodo de baterias de íon-Lítio exauridas após lixiviação com ácido cítrico e análise por ICP OES.** (Mestrado) - Universidade de São Paulo. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2020.

AGUBRA, Victor A.; FERGUS, Jeffrey. **The formation and stability of the solid electrolyte interface on the graphite anode.** Journal of Energy Storage. V. 268, 2014. Disponível em <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775314008775>>. Acessado em 29/10/2023.

ARANHA, Wesley Monteiro. **Caracterização De Bateria Recarregável De Lítio De Veículos Visando Sua Reciclagem.** (Graduação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnica. Rio de Janeiro, 2018.

Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA). **Anuário da Indústria Automotiva Brasileira 2023.** Reindustrialização. São Paulo, 2023.

ATTIA, Pedro M. at al. **Review—"Knees" in Lithium-Ion Battery Aging Trajectories.** Journal of The Electrochemical Society, volume 6, junho de 2022. Acesso disponível em: <[Review—"Knees" in Lithium-Ion Battery Aging Trajectories - IOPscience](#)>. Acessado em abril de 2024.

ABHISHEK, Singh at al. **State of Charge Estimation Techniques of Li-Ion Battery of Electric Vehicles, e-Prime** - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy (2023). Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.prime.2023.100328>>. Acessado em 29 de agosto de 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação. 2ª edição. Rio de Janeiro, 2004.

BOLOGNESI, Hugo Muniz. **Panorama Da Segunda Vida De Baterias Veiculares E Análise Da Pegada Ambiental Para Uma Aplicação Em Gerenciamento De Energia Residencial No Brasil.** (Mestrado Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2021.

BRASIL. Portal Instituto Brasileiro de Pesquisas e Estatísticas (IBGE). Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/22/28120>>. Acessado em 16 de outubro de 2023.

BRASIL. Portal Ministério de Minas e Energia (MME). Disponível em: <<https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris.html>>. Acessado em 17 de outubro de 2023.

BRASIL. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES). Bibliografia: p. 489-494. **Baterias Automotivas: Panorama Da Indústria No Brasil, As Novas Tecnologias E Como Os Veículos Elétricos Podem Transformar O Mercado Global.** Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <<http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/1511>>. Acessado em 20 de outubro de 2023.

BRASIL. Portal Ministério de Minas e Energia (MME). Disponível em: <[BRASIL. Banco Central do Brasil \(BCB\). Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/estabilidadefinanceira/fechamentodolar>>. Acessado em 08 de junho de 2024.](https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2021/07/brasil-avanca-no-setor-de-biocombustiveis#:~:text=Os%20biocombust%C3%ADveis%20s%C3%A3o%20derivados%20de,%C3%ADndice%20de%20emiss%C3%A3o%20de%20poluentes.>>, Acessado em 01 de maio de 2023.</p></div><div data-bbox=)

CELL REPORTS PHYSICAL SCIENCE. **End-Of-Life Or Second-Life Options For Retired Electric Vehicle Batteries.** Publicação em agosto de 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2021.100537>>. Acessado em 09 de outubro de 2023.

CHEN, Minzhi et al. **An Overview Of Data-Driven Battery Health Estimation Technology For Battery Management System.** Neurocomputing, v. 532. 2023. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925231223001686>>. Acessado em 05 de dezembro de 2023.

COLARULLO, Linda; THAKUR, Jagruti. **Second-life EV batteries for stationary storage applications in Local Energy Communities.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 169, 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032122007948>>. Acessado em 08 de outubro de 2023.

CRUZ, Robson Ferreira. **Análise do TCO (Total Cost of Ownership) de um Veículo Comercial Leve elétrico considerando a produção local de baterias de Lítio.** (Monografia) - Centro de Ciências Exatas, Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2017.

CARROS ELÉTRICOS. **Caderno FGV Energia.** Rio de Janeiro, pag. 15, maio 2017. Disponível em: <https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/caderno_carros_eletricos-fgv-book.pdf>. Acessado em 08 de outubro de 2023.

ELKIND, Ethan. **Reuse and Repower: How to Save Money and Clean the Grid with Second-Life Electric Vehicle Batteries**. UC Berkeley: Berkeley Law. Disponível em <<https://escholarship.org/uc/item/32s208mv>>. Acessado em 18 de novembro de 2023.

FAN, Tao et al. **Life Cycle Assessment Of Electric Vehicles' Lithium-Ion Batteries Reused For Energy Storage**. Journal of Energy Storage. Volume 71, 2023. Disponível em <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X23015232>>. Acessado em 18 de outubro de 2023.

FILHO, Cleber Marcos de Oliveira. **Análise do ciclo de vida de baterias íon-lítio**. (Monografia em Engenharia de Materiais) - Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de São Paulo, campus São José dos Campos. São José dos Campos, 2022.

GUSSOW, Milton. **Eletricidade Básica Revisada e Ampliada**. 2 ed. São Paulo: Makron Books, 2004.

HAMIDI, L. Weber e A. Nasiri. **EV Charging Station Integrating Renewable Energy And Second-Life Battery**. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Madrid, Espanha, 2013. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6749937>>. Acessado em 16 de agosto de 2023.

HOSSAIN, Eklas et al. **A Comprehensive Review on Second-Life Batteries: Current State, Manufacturing Considerations, Applications, Impacts, Barriers & Potential Solutions, Business Strategies, and Policies**. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Volume 7. Nova York, 2019. Disponível em: <[10.1109/ACCESS.2019.2917859](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2917859)>. Acessado em 16 de agosto de 2023.

HAUSER, Andreas; KUHN, Robert. **High-Voltage Battery Management Systems (BMS) For Electric Vehicles**. In Woodhead Publishing Series in Energy, Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles. Woodhead Publishing, 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978178242377500011X>>. Acessado em 20 novembro 2023.

HOHMANN, Matheus et al. **Análise De Viabilidade Técnica Da Utilização De Baterias De Segunda Vida Retiradas De Veículos Elétricos**. IX Congresso Brasileiro de Energia Solar. Florianópolis, 2022.

HUBER, Christian; KUHN, Robert M. **Thermal Management Of Batteries For Electric Vehicles**. Woodhead Publishing Series in Energy. Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles, Woodhead Publishing, EUA, 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781782423775000133?via%3Dihub>>. Acessado em 16 de agosto de 2023.

HU, Xiaosong et al. **Battery Lifetime Prognostics**. *Joule*, v. 4. 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542435119305859>>. Acessado em 29 de outubro de 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Global EV Outlook 2022. Securing Supplies For An Electric Future**. França 2022. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/global-supply-chains-of-ev-batteries>>. Acessado em 29 de outubro de 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Global EV Outlook 2023. Catching Up With Climate Ambitions**. França 2023. Disponível em: <<https://www.iea.org/search?q=Catching%20Up%20With%20Climate%20Ambitions>>. Acessado em 25 de abril de 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Global EV Outlook 2024. Trends In Electric Vehicle Batteries**. França 2024. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/trends-in-electric-vehicle-batteries>>. Acessado em 16 de junho de 2024.

JIAO, Mingyue et al. **Application Potential Of Second-Life Lithium-Ion Battery On Forklift**. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), International Electrical and Energy Conference (CIEEC), Wuhan, China, 2021. Disponível em : <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9510368/authors#authors>>. Acesso em 05 de novembro de 2023.

JOSSEN, Andreas et al. **RELIABLE BATTERY OPERATION — A CHALLENGE FOR THE BATTERY MANAGEMENT SYSTEM**. *Journal of Power Sources*, v. 84, 1999. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775399003298>>. Acessado em 16 de dezembro de 2023.

JUNIOR, Carlos Antônio Rufino et al. **Towards A Business Model For Second-Life Batteries: Barriers, Opportunities, Uncertainties, And Technologies**. *Journal of Energy Chemistry*, Volume 78, 2023. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095495622006842>>. Acessado em 16 de outubro de 2023.

LAWDER, Matthew, et al. **Battery Energy Storage System (BESS) and Battery Management System (BMS) for Grid-Scale Applications**. In *Proceedings of the International Electrical and Energy (IEEE)*, 2014. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6811152>>. Acessado em 20 de novembro de 2023.

LEAL, Tulio A. C. B.; CONSOLI, Flavia L. Texto para discussão nº 308. **Eletrificação Veicular: Definições, Tendências, E Possíveis Impactos Na Indústria Automotiva**

Nacional. Núcleo de Estudos e Pesquisas/CONLEG/ Senado, 2022. Disponível em: www.senado.leg.br/estudos. Acessado em 17 maio de 2023.

LI, Jie et al. **Emaining Useful Life Prediction Of Lithium-Ion Batteries Via An EIS Based Deep Learning Approach**, Energy Reports, v.10, 2023. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484723014592>>. Acessado em 05 de novembro de 2023.

MANDRILE, Fabio et al. **Second Life Management From Battery Storage System of Electric Waterborne Transport Applications: Perspectives and Solutions**. Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) Acesso disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/10093885>>. Acessado em abril de 2024.

MARCHEGIANI, Enrico et al. **Li-Ion Battery Aging Model Robustness: An Analysis Using Univariate And Multivariate Techniques**, Journal of Energy Storage, Volume 72, 2023, Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X23019886>>. Acessado em 12 de novembro de 2023.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Metodologia do Trabalho Científico: Procedimentos Básicos, Pesquisas Bibliográficas, projeto e relatório, publicações e trabalhos científicos**. Edição 7, São Paulo. Editora Atlas, 2019.

MENEZES, Afonso Henrique Novaes et al. **Metodologia Científica Teoria e Aplicação na Educação a Distância**. 1º Ed. Petrolina: UNIVASF, 2019.

MOBILIZA BRASIL. Disponível em <<https://www.mobilize.org.br/estatisticas/70/taxa-de-motorizacao-no-brasil-veja-o-aumento-em-20-anos.html>>. Acessado o em 07 de maio de 2023.

NEUBAUER, Jeremy et al. **Economic Analysis of PEV Battery Second Use: Repurposed-Battery Selling Price and Commercial and Industrial End-User Value**. U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information. United States, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.4271/2012-01-0349>>. Acessado em 27/05/2024.

NEUBAUER, Jeremy et al. **Identifying and Overcoming Critical Barriers to Widespread Second Use of PEV Batteries**. U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information. United States, 2015. Disponível em: <<https://www.osti.gov/servlets/purl/1171780>>. Acessado em 07/06/2024.

NASCIMENTO, Vitor Emanuel Morais. **Desenvolvimento de um conceito de bateria – MAD (Magnetic Spring Disk)**. (Mestrado) – Faculdade de Ciências e Tecnologia. Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade de Coimbra. Coimbra, 2018.

PAIXÃO, Bárbara Aparecida Lemes. **Comparação De Vida Útil Entre Bancos De Baterias De Íon-Lítio E Chumbo-Ácido No Contexto Da Compensação De Energia Com Geração Distribuída Fotovoltaica E Tarifa Branca.** (Mestrado Engenharia Elétrica) –. Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. Dezembro de 2020.

PORTAL SISTEMA E TECNOLOGIA APLICADA (STA). Disponível em: <<https://www.sta-eletronica.com.br/artigos/baterias-recarregaveis/baterias-de-litio/bateria-s-de-litio-ion-energia-especifica-x-potencia-especifica>>. Acessado o em 23 de janeiro de 2024.

PORTAL DA USP. Sustentabilidade: **Descarte De Baterias Dos Carros Elétricos Ainda Precisa Ser Aperfeiçoado.** Publicado em novembro de 2012. Disponível em <<https://jornal.usp.br/?p=588757>>. Acessado em 22 de outubro de 2023.

PORTAL CAOACHERY. Disponível em: <<https://caoachery.com.br/tiggo8-pro-plugin-hybrid>>. Acessado em 09 de junho de 2023.

PORTAL D21 MOTORS. Disponível em: <https://d21motors.com.br/pdf/Hybrid_Tiggo8pro-ficha-tecnica-v5.pdf>. Acessado em 09 de junho de 2023.

PORTAL OLEODIESELNAVEIA. Disponível em: <<https://oleodieselnaveia.com/2020/11/03/uma-segunda-vida-para-as-baterias-usadas-dos-carros-eletricos-oportunidade-de-negocio/>>. Acessado em 20 novembro 2023.

PORTAL FEDERAL BATTERIES. Acesso disponível em: <<https://federalbatteries.com.au/news/what-depth-discharge-and-why-it-so-important>>. Acessado em 21 de novembro de 2023.

PRADO, R. M. B. et at. **Análise Econômica para Inclusão de Baterias de Segunda Vida para Prossumidores no Brasil.** XV Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. SBAI, 2021. Rio Grande: FURG, 2021. p. 526 – 531.

Plataforma Nacional da Mobilidade Elétrica (PNME). 2º Anuário Brasileiro da Mobilidade Elétrica. **O Brasil Em Direção Ao Mixo De Tecnologias Para Descarbonização E Digitalização Dos Transportes.** Brasília, 2022.

Projeto e Relatório, Publicações e Trabalhos Científicos. 7 ed. São Paulo. Atlas, 2012.

QUINTERO, Vanessa. **Baterias De Íons De Lítio: Características E Aplicações.** Universidade Tecnológica do Panamá. P&D Tecnológico. pág. 14-22, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.33412/idt.v17.1.2907>>. Acessado em 23 de março de 2024.

REVISTA ELETRÔNICA VEJA. Acesso disponível em:

<

<https://veja.abril.com.br/mundo/uniao-europeia-aprova-proibicao-de-veiculos-a-gasolina-a-partir-de-2035>> Acessado em 19 de outubro de 2023.

REINHARDT, R. **Sustainable Business Model Perspectives For The Electric Vehicle Industry : The Case Of Battery Second Use**. (Doutorado), UPC, Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental, Universitat Politècnica de Catalunya. 2019. Acesso disponível em: <<http://hdl.handle.net/2117/173362>>. Acessado em 07 de junho de 2024.

RONCHINI, Carolina Bassoto. **Separação Do Material Catódico E Anódico De Baterias De Íon Lítio**. (Mestrado) – Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba e o Campus de São João da Boa Vista. Universidade Estadual Paulista. São João da Boa Vista, 2022.

RODRIGUEZ, T. B.; CONSONI, F. L. Revista Brasileira de Inovação. **Uma Abordagem Da Dinâmica Do Desenvolvimento Científico E Tecnológico Das Baterias Lítio-Íon Para Veículos Elétricos**. Campinas, 2020.

SÃO PAULO. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB). Disponível em: < <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/>>. Acessado em 16 outubro de 2023.

SOUZA, Magali Helena. Reprocessamento De Baterias Íons-Lítio. (Tecnologia Gestão Ambiental) – Universidade São Francisco. Bragança Paulista, 2008.

SHAHADAT, Hossain Lipu Molla Shaheer Ansari et al. **Deep Learning Enabled State Of Charge, State Of Health And Remaining Useful Life Estimation For Smart Battery Management System: Methods, Implementations, Issues And Prospects**, Journal of Energy Storage, v. 55, 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X22017406>>. Acessado em 05 de novembro de 2023.

SANTOS, Bruno de Oliveis; PASSOS, Rafael Schimmelpfeng. **A Sistemas De Armazenamento De Energia E Geração Distribuída: Um Estudo De Caso**. (Graduação Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2023.

SEGER, Pedro et al. **A Second Life Li-Ion Battery Ageing Model With Uncertainties: From Cell To Pack Analysis**. Journal of Power Sources. Volume 541, 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775322006619>>. Acessado em 06 de maio de 2024.

SONG, Ziyou et al. **Benefit Assessment of Second-life Electric Vehicle Lithium-ion Batteries in Distributed Power Grid Applications**. Journal of Energy Storage, Volume

56, 2022. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X22019272>>. Acessado em 20 de novembro de 2023.

TRAN, Minh et al. **Used Lithium-Ion Batteries in Second-Life Applications: Feasibility Stud.** IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Detroit, MI, EUA, 2022. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9947891>>. Acessado em 07 de maio de 2023.

UNITED STATES OF AMERICA. National Renewable Energy Laboratory (NREL). Disponível em: <<https://www.nrel.gov/transportation/b2u-calculator.html>>. Acessado em 01 de junho de 2024.

UNITED STATES OF AMERICA. National Renewable Energy Laboratory (OSTI). Disponível em: <<https://www.osti.gov/biblio/1171780>>. Acessado em 01 de junho de 2024.

XU, X. et al. Study On The Economic Benefits Of Retired Electric Vehicle Batteries Participating In The Electricity Markets. **Journal Of Cleaner Production**. Volume 286. 2021. Acessado em <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620354603?via%3Dihub>>. Acessado em: 12 de abril de 2023.

WU, Wei et al. **Does Energy Storage Provide A Profitable Second Life For Electric Vehicle Batteries?**. Energy Economics, Vol. 92, 2020. Disponível em <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140988320303509>>. Acessado em 23 de maio de 2024.

WU, Fu-Bao et al. **Application Of Energy Storage Technology In Grid-Connected New Energy Power Generation**. Grid-scale Energy Storage Systems and Applications, Academic Press, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012815292800006X>>. Acessado em 20 de novembro de 2023.

WASEEM, M et al. **Battery technologies and functionality of battery management system for EVs: Current status, key challenges, and future prospectives**. Journal of Power Sources, v. 580. 2023. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775323007255>>. Acessado em 05 de novembro de 2023.

PORTAL SISTEMA E TECNOLOGIA APLICADA (STA). Disponível em: <<https://www.sta-eletronica.com.br/artigos/baterias-recarregaveis/baterias-de-litio/bateria-s-de-litio-ion-energia-especifica-x-potencia-especifica>>. Acessado em 23 de janeiro de 2024.