



MODELAGEM DA OFERTA DE BATERIAS AUTOMOTIVAS EM SEGUNDA VIDA PARA O SETOR ELÉTRICO

Jorge Luiz Garioli Corrêa Júnior

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Planejamento Energético, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Planejamento Energético.

Orientadores: Alexandre Salem Szklo
Roberto Schaeffer

Rio de Janeiro
Janeiro de 2024

MODELAGEM DA OFERTA DE BATERIAS AUTOMOTIVAS EM SEGUNDA
VIDA PARA O SETOR ELÉTRICO

Jorge Luiz Garioli Corrêa Júnior

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM PLANEJAMENTO ENERGÉTICO.

Orientadores: Alexandre Salem Szklo

Roberto Schaeffer

Aprovada por: Prof. Alexandre Salem Szklo

Prof. Roberto Schaeffer

Dr. Bruno Soares Moreira Cesar Borba

Dr. Bruno Fânzeres dos Santos

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JANEIRO DE 2024

Corrêa, Jorge Luiz Garioli

Modelagem da oferta de baterias automotivas em segunda vida para o setor elétrico/ Jorge Luiz Garioli Corrêa Júnior. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2024.

XII, 102 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Alexandre Salem Szklo

Roberto Schaeffer

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético, 2024.

Referências Bibliográficas: p. 86-102.

1. Veículos Elétricos. 2. Baterias em segunda vida. 3. Sistemas de armazenamento de energia em baterias. 4. Energia e transporte. I. Szklo, Alexandre Salem *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético. III. Título.

“Essa necessidade de justificar a vida se impõe quando a própria vida não se basta mais. Ou seja, é quando os gestos cotidianos perdem sua graça que surge a obrigação de fundamentar a vida por outra coisa do que ela mesma.”

-Contardo Calligaris

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela força e perseverança durante todo o mestrado e ao logo desse trabalho.

Agradeço à minha família. Em especial à minha mãe Giane, ao meu pai Jorge e a minha irmã Maria Clara por todo apoio, carinho, amor e educação ao longo de minha vida.

Aos meus avós Conceição, Jorge, José e Maria por todo amor e carinho.

À Jahde, pelo seu apoio e paciência durante a conclusão desta dissertação, pois o seu carinho e compreensão foram fundamentais ao longo de todo esse processo.

Agradeço aos amigos que fiz durante o mestrado. Em especial ao Adriano, Gabriel, Nathalia e Mariana por todas as interações ao longo desses anos.

Aos meus orientadores Alexandre Szklo e Roberto Schaeffer pelo auxílio e orientação inestimáveis durante todo o desenvolvimento desta dissertação. Suas experiências e compromisso com a excelência foram fundamentais para moldar minha pesquisa e melhorar minha compreensão do assunto.

A COPPE/UFRJ, em especial ao Programa de Planejamento Energético, pela oportunidade de crescimento profissional e pessoal.

A todos os funcionários do PPE, especialmente à Sandrinha e ao Paulo, por serem sempre tão prestativos.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

MODELAGEM DA OFERTA DE BATERIAS AUTOMOTIVAS EM SEGUNDA VIDA PARA O SETOR ELÉTRICO

Jorge Luiz Garioli Corrêa Júnior

Janeiro/2024

Orientadores: Alexandre Salem Szklo

Roberto Schaeffer

Programa: Planejamento Energético

A evolução da frota de veículos elétricos apresenta desafios e oportunidades relacionados à gestão do estoque crescente de baterias, exigindo estratégias eficientes para lidar com esse aumento. O objetivo desta dissertação é construir um modelo que estime a quantidade de baterias em segunda vida a ser absorvida pelo setor elétrico e calcule o valor gerado por essa atividade. Deste modo, propõe-se uma metodologia baseada na construção de um laço causal que estabelece a conexão entre o setor elétrico e o de transporte por meio das baterias reutilizadas. O modelo realiza o cálculo da quantidade anual de baterias automotivas que atingem o final de sua primeira vida útil, utilizando uma previsão da frota de veículos elétricos em operação e premissas a respeito da durabilidade das mesmas. Esse dado de quantidade é convertido em energia disponível, a partir de dados da tecnologia dessas baterias. Além disso, o modelo estima o valor a ser pago por esses dispositivos usados por duas rotas, a da reciclagem e a da reutilização. Também são consideradas as restrições relacionadas à demanda ou à infraestrutura, para determinar a quantidade de baterias que pode ser encaminhada por cada via. O elo com o setor elétrico se dá pela demanda por Sistemas de Armazenamento de Energia a Baterias. Assume-se que essa demanda pode ser preenchida por baterias em segunda vida desde que vendidas a um preço que capture a diferença entre consumir um produto usado e um novo. Por fim, realiza-se um estudo de caso e análises de sensibilidade utilizando o Reino Unido como referência, para testar os resultados do modelo. O resultado obtido sugere que a segunda vida pode não resultar diretamente em uma redução significativa no preço dos veículos elétricos a bateria, mas destaca que a reutilização é uma atividade economicamente preferível a reciclagem no curto e no médio prazo.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/ UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

MODELING THE SUPPLY OF SECOND LIFE AUTOMOTIVE BATTERIES FOR THE POWER SECTOR

Jorge Luiz Garioli Corrêa Júnior

January/2024

Advisors: Alexandre Salem Szklo

Roberto Schaeffer

Department: Energy Planning

The evolution of the electric vehicle fleet poses challenges and opportunities related to the management of the increasing battery stock, requiring efficient strategies to address this growth. This dissertation aims at developing a model that estimates the quantity of second-life batteries that could be absorbed by the power sector and calculates the value generated by this activity. Therefore, a methodology is proposed based on the construction of a causal loop that establishes a connection between the power and transportation sectors through reused batteries. The model calculates the annual quantity of automotive batteries reaching the end of their first useful life by using a forecast of electric vehicles in operation and assumptions on retirement. This data on quantity of batteries is converted into available energy, based on the technology of these batteries. Additionally, the model estimates the value to be paid for these used devices through two routes, recycling and reuse. The model also considers constraints related to demand or infrastructure, to determine the quantity of batteries that can be directed through each route. The link with the power sector is established by the demand for Battery Energy Storage Systems. It is assumed that this demand can be met with second-life batteries, provided they are sold at a price that captures the difference between buying a used product and a new one. Finally, a case study and sensitivity analyses are conducted, with the United Kingdom as a reference, to test the model's results. The result obtained suggests that second life may not directly result in a significant reduction in the price of battery electric vehicles, but it highlights that reutilization is an economically preferable activity to recycling in the short and medium term.

Sumário

1-	Introdução.....	14
2-	Contextualização do Problema.....	20
	2.1 – Veículos Elétricos a Bateria	20
	2.2 - Sistemas de armazenamento de energia em bateria	27
	2.3 - Opções de Fim de Vida para Baterias	34
	2.3.1 – Reciclagem	36
	2.3.2 – Reutilização	39
3-	Metodologia	46
	3.1 – Desenvolvimento do Modelo	46
	3.1.1 – Perfil de Durabilidade.....	49
	3.1.2 – Fluxo de Veículos.....	51
	3.1.3 – Demanda por Armazenamento	53
	3.1.4 – Valoração da Bateria Usada	53
	3.1.4.1 – Rota da Reutilização	53
	3.1.4.2 – Rota da Reciclagem	54
	3.1.5 – Receita Gerada.....	55
	3.2 – Estudo de Caso.....	56
4-	Resultados	62
5-	Análises de sensibilidade	75
	5.1 – Capacidade ao Fim da Primeira Vida (CFPV).....	75
	5.2 – Capacidade Fim de Segunda Vida (CFSV).....	76
	5.3 – Custo de reciclagem	78
	5.4 – Casos extremos.....	79
	5.5 – Análise dos resultados.....	80
6-	Conclusão	82
7-	Referências	86

Lista de Figuras

Figura 1: Primeiro veículo elétrico bruto, desenvolvido por Robert Anderson	15
Figura 2: Comparação de diferentes tipos de bateria de íon lítio	24
Figura 3: Tecnologias com menor LCOS dado taxa de uso e tempo de descarga contínuo	32
Figura 4: Profundidade de descarga versus ciclo de vida da bateria de íon de lítio.....	33
Figura 5: Opções de fim de vida para baterias automotivas.....	35
Figura 6: Métodos típicos de reciclagem de baterias de íons de lítio.....	38
Figura 7: Diferentes fases na vida de uma bateria automotiva.....	40
Figura 8: Diagrama do Laço Causal que descreve o sistema modelado	47
Figura 9: Perfil de durabilidade de baterias em primeira vida	49
Figura 10: Perfil de durabilidade de baterias em segunda vida.....	50
Figura 11: Perfil de durabilidade de sistemas de armazenamento de energia em baterias	51
Figura 12: Frota de Veículos Elétricos em circulação.....	57
Figura 13: Evolução da capacidade média das baterias dos automóveis	57
Figura 14: Market share das diferentes composições de baterias.....	58
Figura 15: Volume instalado de armazenamento de energia a bateria	59
Figura 16: Adição anual de baterias automotivas.....	62
Figura 17: Quantidade anual de baterias atingindo fim de primeira vida	63
Figura 18: Disponibilidade anual de materiais para reciclagem.....	64
Figura 19: Capacidade disponível para segundo uso.....	65
Figura 20: Demanda incremental por BESS	66
Figura 21: Comparação de demanda por BESS com capacidade disponível para reutilização.....	67
Figura 22: Preço de compra de uma bateria usada de acordo com a rota da reutilização	68
Figura 23: Preço de compra de uma bateria usada de acordo com a rota da reciclagem	69
Figura 24: Comparação da rota da reciclagem e rota da reutilização.....	70
Figura 25: Quantidade de baterias que seguem a rota da reutilização por caso de CFPV	71

Figura 26: Comparação entre baterias que optam pela reutilização e o total de baterias retiradas	72
Figura 27: Valor gerado pelo serviço de segunda vida por veículo vendido no mesmo ano	73
Figura 28: Variação no preço de compra de uma bateria usada de acordo com o <i>input</i> de CFPV	75
Figura 29: Variação no valor gerado pelo serviço de segunda vida por veículo de acordo com diferentes CFPV	76
Figura 30: Variação no preço de compra de uma bateria usada de acordo com o <i>input</i> de CFSV	77
Figura 31: Variação no valor gerado pelo serviço de segunda vida por veículo de acordo com diferentes CFSV	77
Figura 32: Variação no preço de compra de uma bateria usada de acordo com o <i>input</i> de Custo de Reciclagem	78
Figura 33: Variação no valor gerado pelo serviço de segunda vida por veículo de acordo com diferentes custos de reciclagem	79
Figura 34: Comparação do preço de compra para os casos extremos	80
Figura 33: Comparação do valor gerado pelo serviço de segunda vida por veículo de acordo com os casos extremos.....	80

Lista de Tabelas

Tabela 1: Serviços que BESS podem proporcionar ao setor elétrico	30
Tabela 2: Características de diversos tipos de bateria	34
Tabela 3: Quantidade de cada elemento por tecnologia de bateria (kg/kWh).....	58
Tabela 4: Preço adotado para cada material (\$/kg)	61

Lista de Abreviaturas e Siglas

CO₂ – Dióxido de Carbono

PPM – Parte por milhão

COP26 – Vigésima sexta sessão da Conferência das Partes

GEE – Gases de Efeito Estufa

VE – Veículo Elétrico

IEA – *International Energy Agency*

DOE - *U.S. Department of Energy*

BEV – Battery Electric Vehicle

STEPS – *Stated Policies Scenario*

LCA – *Life Cycle Assessment*

SAE – Sistemas de Armazenamento de Energia

LCO – Óxido de lítio-cobalto

LMO – Óxido de lítio-manganês

LFP – Fosfato de ferro-lítio

LTO – Titanato de lítio

ESS – *Energy Storage Systems*

NMC111 – Óxido de lítio-níquel-manganês-cobalto com proporção molar equânime

NMC622 – Óxido de lítio-níquel-manganês-cobalto com proporção molar de 60% Níquel, 20% Manganês, 20% Cobalto

NMC811 – Óxido de lítio-níquel-manganês-cobalto com proporção molar de 80% Níquel, 10% Manganês, 10% Cobalto

NCA – Óxido de alumínio e níquel-lítio-cobalto

LTO – Titanato de Lítio

NiMH – Baterias de níquel-hidreto metálico

CAES – *Compressed Air Energy Storage*

LAES – *Liquid Air Energy Storage*

VRFB – *Vanadium Redox Flow Battery*

BESS – *Battery Energy Storage Systems*

ISO – *Independent System Operator*

LCOS – *Levelized Cost of Storage*

DoD – *Depth of Discharge*

TCO – *Total Cost of Ownership*

HCl – *Ácido clorídrico*

HNO₃ – *Ácido nítrico*

H₂SO₄ – *Ácido sulfúrico*

H₃PO₄ – *Ácido fosfórico*

H₂O₂ – *Peróxido de hidrogênio*

BSV – *Baterias em Segunda Vida*

USABC – *The United States Advanced Battery Consortium*

SoH – *State of Health*

OEM – *Original Equipment Manufacturer*

SEI – *Solid electrolyte interface*

CFPV – *Capacidade ao fim da primeira vida*

EoL – *End of Life*

CFSV – *Capacidade ao fim da segunda vida*

V2G – *Vehicle-to-Grid*

FES23 – *Future Energy Scenarios 2023*

BNEF – *Bloomberg New Energy Finance*

RC – *Recycling Costs*

1- Introdução

Desde a revolução industrial, a crescente queima de combustíveis fósseis para atender as demandas da sociedade tem acarretado um forte e rápido aumento da concentração de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera. Conforme indicado por Ritchie *et al.* (2023), de 1980 a 2023, a concentração de CO₂ atmosférica cresceu de cerca de 340 ppm (partes por milhão) para mais de 415 ppm. Meinshausen *et al.* (2022) apontam que, de acordo com quantificações dos compromissos climáticos estabelecidos antes da Conferência das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas de 2021 (COP26), a probabilidade de se manter o aquecimento médio do planeta abaixo dos 2°C ao longo do século XXI é inferior a 50%. Para evitar mudanças catastróficas e reduzir a emissão de gases de efeito estufa (GEE), diversas ações têm sido tomadas ao redor do mundo (*World Economic Forum*, 2023).

De acordo com a *International Energy Agency* (IEA), em 2022 o setor de transporte foi responsável por cerca de 22% das emissões globais de CO₂ (IEA, 2023a). Veículos Elétricos (VEs) têm sido tratados na literatura científica como uma opção-chave para lidar com os desafios de se reduzir as emissões de carbono causadas pelo setor de transporte (Zhao *et al.*, 2023). Surpreendentemente, os primeiros testes de veículos elétricos modernos remontam a quase 200 anos atrás (U.S. *Department of Energy* (DOE), 2014). No início do século XIX, visionários na Hungria, Holanda e nos Estados Unidos, começaram a experimentar a ideia de veículos movidos a bateria, levando à criação de alguns dos primeiros carros elétricos de pequena escala. Embora o inventor britânico Robert Anderson tenha desenvolvido o primeiro carro elétrico rudimentar no mesmo período (Figura 1), foi somente na segunda metade do século XIX que inventores franceses e ingleses construíram alguns dos primeiros carros elétricos funcionais (DOE, 2014).



Figura 1: Primeiro veículo elétrico bruto, desenvolvido por Robert Anderson

Fonte: *United States Department of Energy*¹

No entanto, o surgimento dos carros movidos a gasolina no início do século XX ofuscou os veículos elétricos, relegando-os a aplicações de nicho (*National Grid*, 2021). A vitória dos veículos movidos a gasolina se dá por várias razões-chave. A infraestrutura bem estabelecida e a acessibilidade dos postos de gasolina, juntamente com a maior autonomia dos carros movidos a gasolina, proporcionaram uma vantagem significativa. Taalbi e Nielsen (2021) sugerem que uma expansão da rede elétrica 15 ou 20 anos antes teria inclinado a balança a favor dos veículos elétricos. Além disso, a maior densidade de energia da gasolina em comparação com as baterias disponíveis na época permitiu armazenamentos superiores, abordando preocupações sobre a autonomia limitada dos veículos elétricos (Wakefield, 1993).

Apesar de uma queda na popularidade, a década de 1970 trouxe um renovado interesse nos veículos elétricos devido a preocupações ambientais e crises do petróleo (Santini, 2011). O final do século XX e o início do século XXI testemunharam um

¹ Disponível em: <<https://www.energy.gov/articles/history-electric-car>>. Acesso em: 16 Set. 2023.

ressurgimento moderno, marcado pela introdução do Roadster pela Tesla e do acessível Leaf pela Nissan (Tesla 2010 e Nissan 2020). Governos em todo o mundo começaram a apoiar a adoção de veículos elétricos por meio de incentivos e regulamentações, enquanto avanços tecnológicos, especialmente na tecnologia de baterias, continuaram a aprimorar autonomia e desempenho (IEA, 2021). A década de 2020 viu uma diversificação nas ofertas de veículos elétricos, com vários fabricantes contribuindo para um mercado global em expansão (IEA, 2023b).

O relatório *Global EV Outlook 2023* da IEA mostra que a quantidade de Veículos Elétricos a Bateria (*Battery Electric Vehicle – BEVs*) em trânsito tem crescido exponencialmente ao longo da última década e alcançou a marca de mais de 18 milhões de unidades em 2022 (IEA, 2023b). Além disso, o cenário STEPS (*Stated Policies Scenario*) da agência estima que 180 milhões de unidades estarão em circulação até 2030 (IEA, 2023c). Apesar de sólidas projeções de crescimento, um dos principais fatores que dificultam hoje a adoção de BEVs é seu alto custo, que se deve principalmente à bateria, o elemento mais caro (She *et al.*, 2017).

A produção de veículos elétricos tem um impacto duplo na sociedade e no ambiente. Do lado positivo, os VE contribuem para a sustentabilidade ambiental, reduzindo significativamente as emissões de escape, promovendo a eficiência energética e diminuindo a dependência de combustíveis fósseis, especialmente quando carregados com fontes de energia renováveis. Bieker (2021) realiza uma comparação das emissões de GEE ao longo do ciclo de vida de veículos de motor a combustão interna (MCI) e veículos elétricos a partir de uma avaliação de ciclo de vida (*Life-cycle Assessment – LCA*). O autor relata que, na Europa, as emissões ao longo do ciclo de vida de BEVs são 66-69% inferiores às de MCIs. A projeção do autor para 2030 é de que, à medida que o *mix* de eletricidade passa por uma maior descarbonização, espera-se que a disparidade de emissões ao longo do ciclo de vida entre BEVs e MCIs aumente para 74%-77%.

No entanto, surgem desafios no espectro negativo, particularmente na produção de baterias de íons lítio, o que acarreta preocupações ambientais e sociais relacionadas com a extração e processamento das matérias-primas (Thies *et al.*, 2019). A extração de lítio, um componente crítico dessas baterias, consome muitos recursos e é prejudicial ao meio ambiente. O processo demanda uma quantidade substancial de água – aproximadamente 500.000 galões por tonelada métrica de lítio – e se dá pela realização de furos nas salinas, seguido do bombeamento da salmoura rica em minerais para a superfície e depois a filtragem e evaporação da água para extrair carbonato de lítio (Vera

et al., 2023). Este processo pode levar à escassez de água e perturbações ecológicas. A mineração de cobalto, outro mineral importante para diversos tipos de baterias, está associada a condições de trabalho perigosas, incluindo trabalho infantil (Zheng, 2023). Além disso, a extração de outros minerais necessários para a produção de baterias também acarreta diversos problemas sociais e ambientais (Farjana, 2019). Por conta disso, a economia circular é muito importante para mitigar a atividade de mineração necessária para produção de baterias automotivas. Dentro desse escopo, duas práticas se destacam: a reciclagem e a reutilização (Lander *et al.*, 2021; Zhu *et al.*, 2021).

A reciclagem de baterias é um processo vital que envolve a coleta, desmontagem e reutilização de materiais de baterias usadas para criar novas baterias ou outros produtos (Baum *et al.*, 2022). Sua importância reside em vários aspectos. Primeiramente, ela auxilia na conservação de recursos valiosos e não renováveis, como o lítio, cobalto e níquel presentes nas baterias. Ao recuperar esses materiais, a reciclagem reduz a demanda por novas atividades de mineração (Ma *et al.*, 2021). Em segundo lugar, a reciclagem de baterias é essencial para a proteção ambiental. A disposição inadequada de baterias, especialmente em aterros sanitários, apresenta riscos de vazamento de produtos químicos perigosos e metais pesados, podendo contaminar o solo e a água (Yu *et al.*, 2022). Em terceiro lugar, o processo contribui para a economia de energia, pois a reciclagem de baterias requer menos energia em comparação com a extração de matérias-primas (Zhu *et al.*, 2021).

A reutilização de baterias envolve a prática de estender a vida útil de uma bateria, ao fornecer uma segunda vida a ela em diferentes aplicações ou reintegrá-la em sistemas semelhantes após seu uso inicial (Engel *et al.*, 2019). Esse método contribui para a conservação de recursos valiosos, como minerais citados anteriormente, usados na produção de baterias, ao reduzir a necessidade de novas fabricações (Zhu *et al.*, 2021). Além disso, a reutilização de baterias aborda preocupações ambientais relacionadas ao descarte, mitigando possíveis riscos e reduzindo o impacto ambiental ligado à fabricação e descarte de novas baterias. Isso ocorre, porque, ao se reutilizar baterias, estende-se a sua vida útil, o que oferece mais tempo para que uma infraestrutura robusta de coleta e reciclagem seja desenvolvida. Em resumo, a reutilização de baterias é uma prática multifacetada que contribui para a conservação de recursos, a sustentabilidade ambiental, a eficiência energética, a redução de resíduos, os princípios da economia circular, o impacto social e a inovação tecnológica. Mesmo que as baterias se encontrem num estado de degradação em que não são mais adequadas para o uso em automóveis, existem outras

aplicações em que a capacidade remanescente desses dispositivos ainda é suficiente, como serem usadas para armazenamento estacionário de energia. Dessa forma, as baterias migrariam do setor de transporte para o setor elétrico, o que beneficiaria ambos. O setor elétrico, por proporcionar, em tese, uma opção mais barata para o mesmo serviço realizado por novas baterias e o de transporte pelo potencial de se capturar o valor residual que esses dispositivos têm, possivelmente reduzindo o custo de propriedade dos automóveis.

Por sua vez, o crescimento da oferta de energia limpa proveniente de parques eólicos e solares tem trazido diversos desafios para o setor elétrico devido à natureza intermitente e estocástica desses recursos (Ferrasse *et al.*, 2022). A geração de energia elétrica proveniente dessas tecnologias está condicionada a variações de acordo com a incidência de luz solar e de vento. Portanto, ambas as fontes fornecem energia de forma extremamente variável, com previsibilidade estocástica; simplesmente despacham quando há adequada incidência de irradiação solar ou quando a velocidade do vento supera o limite mínimo para a partida do aerogerador, sem a possibilidade de se estocar essa energia para uso em momentos mais necessários (Ueckerdt *et al.*, 2015). Uma forma de habilitar uma maior adição de fontes limpas de energia sem a complementação de outras fontes, como usinas térmicas de rápida partida, é o desenvolvimento de tecnologias que permitam o armazenamento da eletricidade gerada (SAE – Sistemas de Armazenamento de Energia) pelos parques solares e eólicos (McKinsey & Company, 2023). Uma das tecnologias de armazenamento de eletricidade de maior destaque hoje são as baterias devido a sua versatilidade, modularidade e escalabilidade (IEA, 2023d). Encontrar maneiras mais baratas de desenvolver esses sistemas é de extrema importância para que o setor elétrico possa seguir expandindo a adição de fontes limpas de energia de forma sustentável. Dentro dessa questão, baterias em segunda vida se posicionam como uma alternativa muito interessante tendo em vista que as mesmas podem ser mais baratas que novas baterias e entregar o mesmo serviço (Dong *et al.*, 2023).

Tendo em vista a capacidade de uma nova conexão entre o setor elétrico e o de transporte, viabilizando um novo mercado orientado a economia circular e que capture ao máximo o valor da bateria, esse trabalho tem como objetivo analisar o potencial que esse mercado secundário possui. Com isso, pode-se também investigar se a captura do valor residual das baterias viabilizaria uma popularização de veículos elétricos, ao reduzir seu custo de propriedade. Para isso, desenvolve-se um modelo que calcula a oferta de baterias em segunda vida, ou seja, de todas as baterias automotivas que entram no sistema, quantas

são destinadas à reutilização. As perguntas que se busca responder são: dado um cenário de crescimento da frota de veículos elétricos, evolução tecnológica das baterias, demanda por parte do setor elétrico e diversos gargalos, como infraestrutura disponível, quantas baterias podem ser reutilizadas? Que valor isso gera? Além disso, para fornecer uma visão mais concreta do funcionamento do modelo, realiza-se um estudo de caso com foco no Reino Unido. A escolha dessa região se dá pela extensa disponibilidade de dados (histórico e previsão), providenciados pelo *National Grid* (operador do sistema elétrico britânico), tanto a respeito do mercado de veículos elétricos quanto do setor elétrico como um todo. Assim, é possível testar o modelo com diversos dados de entrada provenientes de uma mesma fonte, o que por sua vez contribui com a consistência da análise.

A estrutura deste trabalho está dividida da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta uma contextualização do problema aqui estudado, estabelecendo um vínculo entre veículos elétricos, a prática da reutilização de baterias, e o setor elétrico. O capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada para se estimar a oferta de baterias em segunda vida e a receita gerada por esse serviço, cobrindo também as especificidades do estudo de caso realizado. O capítulo 4 apresenta os resultados do estudo de caso e o capítulo 5 aborda análises de sensibilidade, variando diversos parâmetros para analisar o impacto que isso realiza no resultado final. Por fim, o capítulo 6 apresenta as conclusões da dissertação e provê sugestões de melhorias e pesquisas não abordadas.

2- Contextualização do Problema

2.1 – Veículos Elétricos a Bateria

Ao contrário da premissa que frequentemente permeia o imaginário popular, os veículos elétricos a bateria surgiram no final do século XIX, antecedendo os veículos equipados com motor a combustão interna (Geels, 2006). Todavia, ao longo do tempo os automóveis de propulsão por combustão interna gradualmente se tornaram mais populares em virtude de diversos fatores, como custo mais baixo, maior autonomia, melhor infraestrutura disponível (MCIs se beneficiaram de uma rede bem estabelecida de postos de combustível e oficinas de reparação, tornando-os mais convenientes e acessíveis) além de um forte *marketing* e *lobby* realizado pelo setor de petróleo (DOE, 2014).

Tais elementos se mostraram preponderantes na trajetória ascendente e dominante dos veículos de combustão interna nas primeiras décadas do século XX. No entanto, o setor de transporte vem experimentando transformações significativas em anos recentes devido à necessidade de se reduzir a emissão de poluentes, como o dióxido de carbono, por conta da urgência climática. Assim, veículos elétricos se posicionam como uma solução promissora para mitigar as preocupações ambientais associadas aos veículos tradicionais de motor a combustão interna e espera-se que a sua adoção e inovação se acelerem nos próximos anos (IEA, 2023b).

Este capítulo fornece uma análise dos BEVs, com foco em seus fundamentos tecnológicos, princípios operacionais e nas diversas famílias de baterias que alimentam esses veículos. Essas famílias variam de acordo com a sua composição química. A análise abrange a história, o estado atual e as perspectivas futuras dos BEVs, com ênfase particular nas tecnologias de baterias de íon-lítio, estado sólido e emergentes.

O desenvolvimento de tecnologias avançadas de baterias e as crescentes preocupações ambientais têm impulsionado a rápida evolução dos BEVs. De acordo com a *International Energy Agency*, o estoque global de carros elétricos era de 10 milhões em 2020, o que configurou um aumento de 43% em relação a 2019 (IEA, 2021). Já em 2021, as vendas duplicaram em relação ao ano anterior, atingindo o valor de 6,6 milhões de unidades (IEA, 2023b). A agência também informa que em 2022, as vendas de BEVs alcançaram o patamar de 7,3 milhões de unidades, a mesma quantidade que representava o estoque total desses veículos em 2020.

Esses veículos funcionam com base no princípio de armazenar energia elétrica em baterias, que é então usada para alimentar motores elétricos que acionam o veículo. Os principais componentes incluem a bateria, o motor elétrico, a eletrônica de potência e o sistema de controle do veículo.

Existem diversas composições químicas para baterias de veículos elétricos, cada uma com seu próprio conjunto de vantagens e limitações:

- **Baterias de íon lítio:** Estas são o tipo mais comum de bateria usada em veículos elétricos atualmente (IEA, 2023b). Elas têm uma alta densidade energética, 50-260 Wh/kg (Etekwere, 2022), o que significa que podem armazenar muita energia em um espaço reduzido, tornando-as uma ótima opção para VEs, além de apresentarem uma longa vida útil (DOE, 2023). No entanto, podem ser caras de produzir (média ponderada de preço em 2023 é de 152 US\$/kWh de acordo com BNEF, 2023), e há preocupações sobre o impacto ambiental da mineração dos materiais necessários para fabricá-las (Kosai *et al.*, 2021). De acordo com Chen *et al.* (2012), existem seis tipos principais de baterias de íon de lítio que serão brevemente descritos a seguir:
 - **Óxido de lítio-cobalto (LiCoO₂ ou LCO):** Esse tipo de bateria é comumente usado em laptops, smartphones e outros dispositivos eletrônicos portáteis. Foi um dos primeiros tipos de bateria de íon lítio desenvolvidos (Chen *et al.*, 2012). Possui alta densidade energética, ao redor de 150 a 200 Wh/kg (ESN, 2017), no entanto apresentam vida útil relativamente curta, cerca de 500 ciclos (ESN, 2017; Chen *et al.*, 2012).
 - **Óxido de lítio-manganês (LiMn₂O₄ ou LMO):** Este tipo de bateria é usado em ferramentas elétricas, bicicletas elétricas e outras aplicações que exigem alta potência. Tem uma densidade energética menor que as baterias LCO, em torno de 100 a 140 Wh/kg (Porzio e Scown, 2021), mas é mais estável e menos propensa a superaquecimento. Essas baterias têm perdido espaço para as LFPs (próximo tipo a ser descrito), por apresentarem características muito semelhantes, enquanto as LMOs possuem vida útil consideravelmente mais curta, de 1000 a 2000 ciclos (Porzio e Scown, 2021; Chen *et al.*, 2012).
 - **Fosfato de ferro-lítio (LiFePO₄ ou LFP):** Este tipo de bateria é usado em veículos elétricos, sistemas de armazenamento de energia (*Energy Storage Systems* - ESS) e outras aplicações que exigem alta potência e longo ciclo de vida. Uma das principais vantagens das baterias LiFePO₄ é justamente o seu

longo ciclo de vida. Elas podem durar milhares de ciclos. Atualmente baterias LFP comercialmente disponíveis duram mais de 3000 ciclos (Ioakimidis *et al.*, 2019), o que as torna ideais para aplicações que exigem carga e descarga frequentes. Além disso, esses modelos são mais estáveis e menos propensos a superaquecimento do que outros tipos de baterias de íon de lítio (Chen *et al.*, 2012). No entanto, as baterias LiFePO_4 , têm uma menor densidade energética do que outros tipos (Chen *et al.*, 2012), como níquel manganês cobalto (NMC) e níquel cobalto alumínio (NCA). Como resultado, elas tendem a ser maiores e mais pesadas do que as demais baterias de mesma capacidade, o que não representa uma limitação caso a aplicação seja em ESS, mas pode ser um empecilho para automóveis.

- **Óxido de lítio-níquel-manganês-cobalto (LiNiMnCoO_2 ou NMC):** As baterias NMC, abreviação de níquel-manganês-cobalto, são um tipo de bateria de íon-lítio comumente usado em uma ampla gama de aplicações, incluindo veículos elétricos e sistemas de armazenamento de energia. A proporção molar desses elementos pode variar e diferentes formulações de NMC são geradas a partir disso, como NMC111, NMC622 e NMC811² (Pražanová *et al.*, 2023). Essas baterias são conhecidas por seu equilíbrio entre densidade energética e estabilidade térmica e são o tipo mais comum encontrado no setor de BEVs atualmente. Em 2022, de acordo com a IEA (2023b), a fatia de mercado das baterias de NMC foi de 60%. Apesar disso, essas baterias oferecem um ciclo de vida consideravelmente mais curto que as LFP, em geral ao redor de 2000 ciclos (ESN, 2017). Além disso, esse modelo é composto por Níquel e Cobalto, metais que têm levantado não apenas preocupações ambientais, pelo dano causado por suas extrações, como também a respeito de suas disponibilidades (Zheng, 2023).
- **Óxido de alumínio e níquel-lítio-cobalto (LiNiCoAlO_2 ou NCA):** As baterias NCA são semelhantes às baterias NMC, mas usam alumínio em vez de manganês em sua fórmula. Essa composição pode fornecer maiores densidades energéticas em comparação com as baterias NMC. No entanto, as

² Os números após a sigla indicam a proporção molar de cada modelo da bateria NMC. No caso da 111, partes iguais de Níquel, Manganês e Cobalto, um terço de cada. No caso da NMC622, 60% de Níquel, 20% de Manganês e 20% de Cobalto. Já para NMC811, 80%, 10% e 10%, seguindo a mesma ordem.

baterias NCA tendem a ser mais suscetíveis à fuga térmica³ e podem exigir um gerenciamento térmico cuidadoso para evitar problemas de segurança (Börger *et al.*, 2019). A escolha entre NCA e outras opções de baterias de íon lítio depende dos requisitos específicos da aplicação e do balanço entre densidade energética, segurança e custo.

- **Titanato de lítio ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ou LTO):** LTO é um tipo de bateria que usa nano cristais de titanato de lítio na superfície de seu anodo em vez de carbono, permitindo que os elétrons entrem e saiam do anodo rapidamente (Sandhya *et al.*, 2014). No entanto, as baterias LTO têm uma densidade energética muito inferior aos demais tipos. Diversos modelos de baterias de íon lítio têm uma tensão nominal de cerca de 3,6 V, enquanto as baterias LTO têm uma tensão de cerca de 2,4 V (Sandhya *et al.*, 2014) o que leva a uma densidade energética de cerca de 70 Wh/kg (ESN, 2017).

A Figura 2 apresenta um gráfico de radar, resumindo as características principais de cada tipo de bateria de íon lítio descrito anteriormente. As métricas incluídas são: Custo (*cost*), Energia específica (*Specific energy*), Potência específica (*Specific power*), Segurança (*Safety*), Performance e vida útil (*life span*).

³ Fuga térmica é um incidente com células eletroquímicas, nos quais a célula aquece e é destruída ou gravemente danificada. A fuga térmica começa quando o calor gerado dentro de uma bateria excede a quantidade de calor que é dissipada para o ambiente.

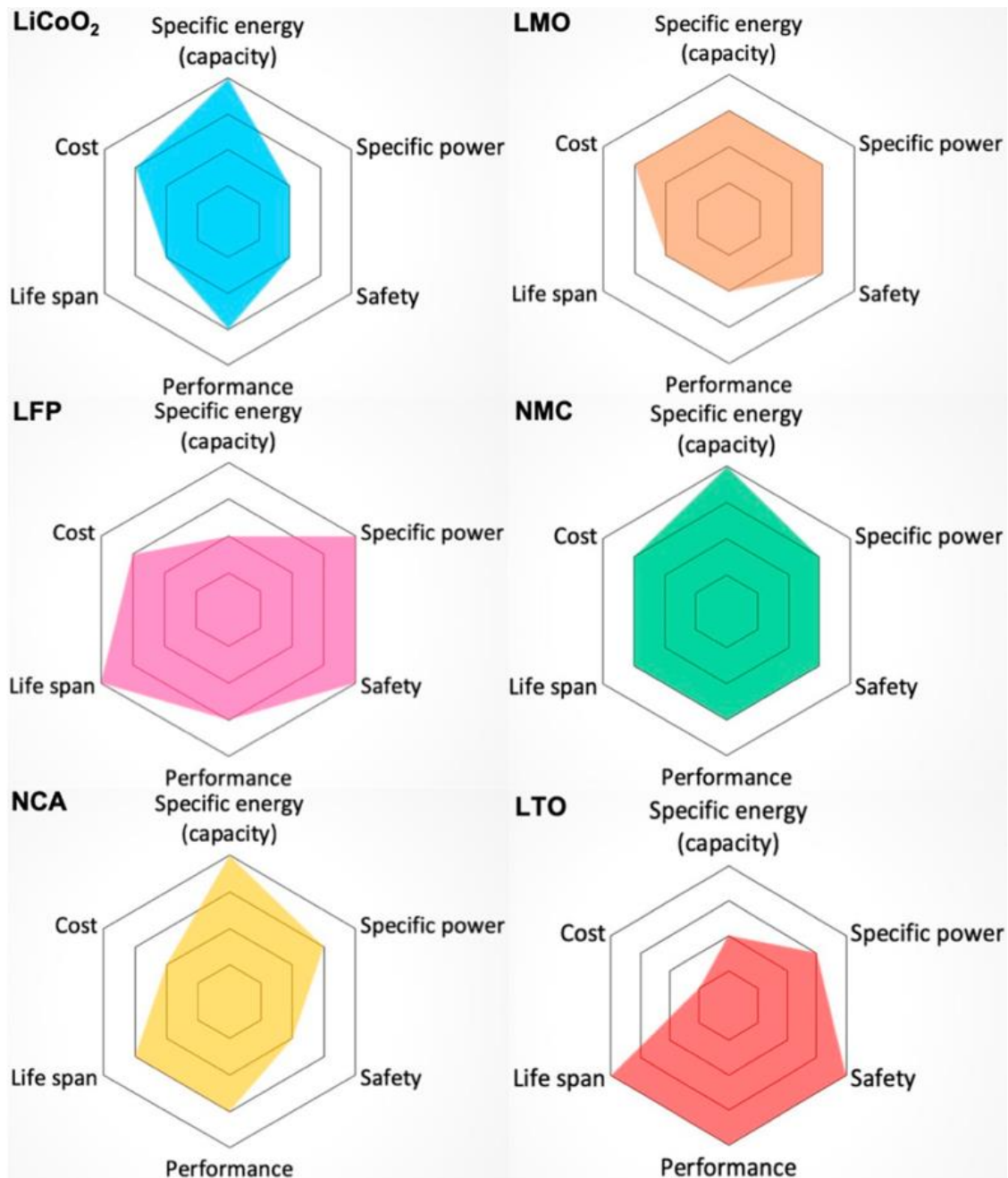


Figura 2: Comparação de diferentes tipos de bateria de íon lítio

Fonte: Adaptado de Miao *et al.*, 2019

- Baterias de chumbo-ácido:** Estas baterias são o tipo mais antigo de bateria recarregável e ainda são usadas em alguns VEs (Road & Track, 2023). São menos caras do que outros tipos de baterias, por volta de 65 a 100 US\$/kWh de acordo com Eco Tree Lithium (2022), e não há as mesmas preocupações acerca da disponibilidade de materiais como no caso do íon lítio. Apesar disso, têm uma baixa densidade energética, ao redor de 35 Wh/kg (Etekwere, 2022), pobre performance em baixas temperaturas e uma vida útil pequena (DOE, 2023).

- **Baterias de níquel-hidreto metálico (NiMH):** Estas baterias são menos comuns do que as baterias Li-ion, mas ainda são usadas em alguns VEs. Têm uma vida útil mais longa que baterias de chumbo-ácido e oferecem uma densidade energética razoável, cerca de 70 Wh/kg (Etekwere, 2022; DOE, 2023). No entanto, essa família de baterias apresenta alto custo, com um intervalo de preço de 83 – 530 US\$/kWh, ineficiência em altas temperaturas e elevada taxa de autodescarga, o que prejudicou sua popularização (Chen *et al.*, 2018).
- **Baterias de estado sólido:** Uma bateria de estado sólido é um tipo de bateria que usa um eletrólito sólido em vez de um eletrólito líquido ou gel, o que as colocam como uma opção potencialmente mais segura e estável do que outros tipos de baterias (Xiao *et al.*, 2020). Elas também oferecem mais que o dobro da densidade energética de baterias de íon lítio (Janek; Zeier, 2020). As baterias de estado sólido podem atingir mais de 75% de carga em menos de 15 minutos e sofrem menos desgaste do que as de íon lítio padrão após múltiplos ciclos de recarga (ASME, 2022). Apesar das vantagens citadas, atualmente o custo de produção de tais baterias ainda é muito elevado para que sejam comercialmente competitivas, o intervalo estimado para o preço desses dispositivos em 2026 é entre 400 e 800 US\$/kWh (Allied Market Research, 2022). Além disso, as baterias de estado sólido também enfrentam outros desafios, como baixa condutividade iônica e desempenho abaixo do esperado (Famprakis *et al.*, 2019). Até que esses desafios sejam resolvidos, as baterias de estado sólido não serão capazes de destronar as tradicionais baterias de íons lítio.

A mineração de minerais necessários para a produção das baterias dos veículos elétricos, como lítio, cobalto e outros metais, tem impactos ambientais e sociais que exigem cuidados (McManus, 2012). De maneira popular, a compra de um carro elétrico é entendida como uma ação pró-sustentabilidade. Foge do senso comum os impactos ambientais causados ao longo de toda a vida útil de um VE, mais ainda os sociais. Apesar disso, a mineração dos principais metais que compõe a bateria desses veículos tem causado enormes danos, principalmente em países em desenvolvimento por ser onde se encontram as maiores reservas como também a ausência de uma forte regulação voltada a proteção social e ambiental (UNCTAD, 2020). A respeito do Lítio, a extração do mesmo nos desertos de sal Chilenos tem acarretado grandes problemas devido à altíssima intensidade de consumo de água no processo (Institute for Energy Research, 2020). A mineração de Cobalto, muito concentrada na República Democrática do Congo, está

associada à diversas questões ambientais e sociais gravíssimas como a presença de trabalho infantil e a poluição da água local com resíduos como o chumbo, tornando seu uso muito perigoso (Pico Analytics, 2022). No caso do Manganês, sua extração tem causado problemas como a acidificação do solo e da água, principalmente na África do Sul (maior exportador do minério no mundo) (*The Washington Post*, 2023). Além disso, o pó de manganês que naturalmente se dispersa ao longo do seu transporte e armazenamento, tem causado diversos problemas de saúde devido à absorção do mesmo pelos pulmões da população que vive em áreas próximas à cadeia logística do Manganês (Daily Maverick, 2022). Por fim, a extração de níquel tem causado grandes desflorestamentos, dado que para aumentar a produção do minério é necessário expandir a exploração horizontalmente, o que significa destruir a vegetação local (*Philippine Center for Investigative Journalism*, 2021).

Além disso, os processos de utilização intensiva de energia envolvidos na mineração e refino destes minerais podem contribuir para as emissões de gases de efeito estufa, comprometendo parcialmente os benefícios ambientais dos VE durante a sua fase operacional, conforme apresentado por Dai *et al.* (2019). Além disso os autores, na avaliação de ciclo de vida realizada, indicam que a produção do pó de NMC111, para a fabricação de uma bateria de 23,5 kWh é responsável por emitir cerca de 670 quilogramas de CO₂ equivalente além de consumir mais de 5610 litros de água.

A procura global desses minerais também levanta preocupações sobre o esgotamento dos recursos e as tensões geopolíticas, à medida que os países se esforçam para garantir o acesso a estes recursos finitos (IRENA, 2023). Enfrentar estes desafios exige práticas de mineração responsáveis, iniciativas de reciclagem e reutilização, além da busca por baterias com composições alternativas que sejam mais sustentáveis e ajudem a reduzir o impacto social e ambiental da produção de BEVs.

Assim, a reutilização e reciclagem de baterias de veículos elétricos são de suma importância na abordagem dos aspectos ambientais e econômicos do transporte sustentável. Essas baterias, embora possam já não fornecer a autonomia necessária para os BEVs, ainda mantêm uma capacidade significativa de armazenamento de energia (Engel *et al.*, 2019). A reutilização envolve o reaproveitamento dessas baterias para aplicações secundárias, como armazenamento estacionário de energia em residências ou sistemas de rede (Shahjalal *et al.*, 2022). Isso não só prolonga a sua vida útil, mas também reduz a necessidade de produção de novas baterias. A reciclagem, por outro lado, é essencial para mitigar o impacto ambiental do descarte de baterias (Harper *et al.*, 2019).

As baterias de veículos elétricos contêm materiais valiosos e potencialmente tóxicos, como lítio, cobalto e níquel, que podem ser recuperados e reutilizados, reduzindo a necessidade de novas operações de mineração. Além disso, a reciclagem reduz os resíduos gerados, diminui as emissões de gases de efeito estufa e conserva os recursos (Harper *et al.*, 2019). Assim, priorizar a reutilização e a reciclagem no ciclo de vida das baterias dos BEVs é crucial para minimizar a pegada ecológica da mobilidade elétrica e promover uma economia circular.

2.2 - Sistemas de armazenamento de energia em bateria

Sistemas de Armazenamento de Energia (SAE) consistem em mecanismos capazes de armazenar energia elétrica gerada por alguma fonte de forma que seja possível converter essa energia de volta à eletricidade quando necessário (Chen *et al.*, 2009). Assim, desbalanços entre oferta e demanda podem ser resolvidos pelo uso de SAE. Caso a oferta esteja muito alta, armazena-se energia para uso posterior e, caso a demanda esteja muito alta, despacha-se a energia armazenada. Esses dispositivos podem ser classificados como mecânico, eletroquímico, elétrico, térmico, químico, ou eletromecânico, dependendo de como a eletricidade é convertida e armazenada (Mitali *et al.*, 2022). Existem outros tipos de classificação como quanto a escala do projeto ou com base na duração da descarga, que se refere a quanto tempo eles podem fornecer uma saída sustentada de energia (Pärnamäe *et al.*, 2020).

Dentro dessa categorização, ESS podem ser divididos em quatro principais grupos (Cárdenas *et al.*, 2021):

- **Curtíssima duração:** Refere-se a sistemas que podem descarregar energia por um período muito breve, normalmente na faixa de segundos a alguns minutos (Cárdenas *et al.*, 2021). Esses sistemas são projetados para fornecer rajadas rápidas de energia e são frequentemente usados para lidar com flutuações de demanda de curto prazo. Um exemplo de armazenamento de energia de curtíssima duração são os supercapacitores (Yadlapalli *et al.*, 2022). Ao contrário das baterias, que dependem de cargas produzidas mais lentamente através de reações químicas, os supercapacitores funcionam acumulando cargas elétricas estáticas em sólidos (Kong *et al.*, 2022). Além dos supercapacitores, volantes de inércia (*Flywheel energy storage*) também se enquadram nessa categoria. Esse ESS é uma tecnologia que armazena energia cinética em uma massa rotativa. Funciona acelerando um rotor a uma velocidade muito alta e mantendo a energia no sistema

como energia rotacional. Quando se deseja descarregar essa energia, o rotor funciona como um gerador, transformando a energia cinética acumulada em elétrica (Kamran, 2023).

- **Curta duração:** O armazenamento de energia de curta duração normalmente se refere a sistemas que podem descarregar energia por um período que varia de alguns minutos a poucas horas (Cárdenas *et al.*, 2021). Esses sistemas são projetados para lidar com flutuações de curto prazo na demanda ou no fornecimento de energia, especialmente durante horários de pico⁴ (NASDAQ, 2022). Alguns exemplos de sistemas de armazenamento de energia de curta duração incluem: baterias de íon lítio, tecnologia que domina essa categoria de ESS (Cárdenas *et al.*, 2021); armazenamento de energia por ar comprimido (*Compressed Air Energy Storage – CAES*): essa tecnologia armazena energia ao comprimir ar e armazena-lo em uma caverna subterrânea ou tanque acima do solo (CTCN, 2023); armazenamento de energia por ar líquido (*Liquid Air Energy Storage – LAES*): se refere ao armazenamento de energia pressurizando e resfriando o ar até que se torne líquido e, em seguida, armazenando-o em tanques isolados (Vecchi *et al.*, 2021); outros tipos de bateria, como por exemplo, baterias de fluxo. Uma bateria de fluxo, como descrito por Dincer e Erdemir (2021), é um tipo de célula eletroquímica que armazena energia usando dois componentes químicos dissolvidos em líquidos que são bombeados através do sistema em lados separados de uma membrana. Os dois líquidos são armazenados em tanques externos e são bombeados para a célula, onde reagem entre si para produzir eletricidade. A capacidade de energia de uma bateria de fluxo é determinada pelo volume do eletrólito, enquanto a potência é determinada pela área superficial dos eletrodos. Assim como apontado por Lourenssen *et al.* (2019), um dos modelos mais famosos de bateria de fluxo são as baterias redox de vanádio (*Vanadium Redox Flow Battery - VRFB*).
- **Média duração:** O armazenamento de energia de média duração normalmente se refere a sistemas de armazenamento de energia que podem armazenar e liberar energia por períodos que variam de 4 horas a alguns dias, por volta de 200 horas (Cárdenas *et al.*, 2021). Em geral, as tecnologias citadas na categoria anterior

⁴ Os horários de pico de eletricidade são momentos específicos do dia em que o consumo de energia elétrica atinge seu ápice.

também se enquadram aqui tendo em vista que elas são capazes de despachar energia dentro do intervalo que determina um armazenamento de média duração. Apesar disso, baterias de íon de lítio disponíveis atualmente podem descarregar com potência total por cerca de 4 a 6 horas (*Argonne National Laboratory, 2021*), o que se encontra na margem inferior de um armazenamento de média duração. Já as outras opções são capazes de despachar por mais tempo. As baterias de fluxo podem liberar energia continuamente a uma alta taxa de descarga por até 10 horas (*Chen et al., 2022*) enquanto o CAES ultrapassa 24h, como indicado por *Hunt et al. (2023)*. Além dessas tecnologias, conforme mostrado pelos autores, hidroelétricas reversíveis e hidrogênio também se enquadram nessa divisão, mas serão descritas na última categoria por serem frequentemente associadas à armazenamento de longo prazo.

- **Longa duração:** O armazenamento de energia de longa duração é um tipo de ESS que é capaz de descarregar a energia armazenada continuamente por um período de pelo menos 200 horas (*Cárdenas et al., 2021*). *Twitchell et al. (2022)* indicam que uma rede descarbonizada⁵ requer uma classe de armazenamento com duração de até 20 horas para gerenciar os ciclos diários e outra com duração de semanas ou meses para gerenciar os ciclos sazonais. Os ciclos sazonais estão relacionados por exemplo a disponibilidade, ao longo do ano, de água para geração hidroelétrica, um caso muito relevante para o setor elétrico brasileiro (*Lucena et al., 2009*). Outro caso, dessa vez associado à demanda, é a variação mensal de demanda por eletricidade, que está muito associada à temperatura de cada período do ano (*Ceran et al., 2021*). A capacidade de mover grandes blocos de energia para poder lidar com essa sazonalidade é vital para a transição energética (*Twitchell et al., 2022*). Alguns exemplos de tecnologia capazes de prover esse serviço são: hidroelétricas reversíveis, um tipo ESS que envolve bombear água de uma elevação mais baixa para uma elevação mais alta, quando o excesso de energia está disponível, e, em seguida, liberá-la para gerar eletricidade quando a demanda é alta (*McKinsey & Company, 2021*); e hidrogênio, que pode ser utilizado como um ESS a partir do uso de eletricidade excedente para realizar o processo de eletrólise da água, produzindo hidrogênio. O hidrogênio pode então

⁵ Uma rede elétrica descarbonizada refere-se a um sistema de geração e distribuição de energia que reduziu ou eliminou significativamente as suas emissões de dióxido de carbono (CO₂).

ser armazenado e posteriormente utilizado como combustível para várias aplicações, como geração de energia ou transporte, convertendo-o de volta em eletricidade por meio de células de combustível ou combustão (Breeze, 2018).

Existem diversos tipos de ESS, cada um com suas vantagens e desvantagens. Os sistemas de armazenamento de energia em baterias (*Battery Energy Storage Systems* – BESS) representam uma tecnologia transformadora, na vanguarda do cenário energético global. Em comparação a outras tecnologias, o armazenamento de energia em baterias possui algumas vantagens, como a possibilidade de ser modular e escalonável, ao mesmo tempo que oferece alta eficiência (praticamente 100% no caso de íon lítio), longa vida útil, baixa necessidade de manutenção e baixas taxas de autodescarga (Pathak; Gupta, 2018). O rápido tempo de acionamento, característica dos BESS é de extrema importância para lidar com a necessidade crescente de oferta de energia flexível dado o aumento da geração intermitente (Pathak; Gupta, 2018).

Além disso, os BESS podem executar diversos tipos de serviços de suporte à rede que melhoram sua eficiência e estabilidade e tornam sua operação e expansão mais eficientes, assim como mostrado por um estudo realizado pelo *Rocky Mountain Institute* (RMI, 2015). O mesmo relatório mostra que BESS podem prover 13 tipos diferentes de serviços para o setor elétrico. Esses serviços foram divididos de acordo com três grupos de *stakeholders*: Consumidores finais, Concessionárias e Operadores de Sistemas Elétricos (ISO – *Independent System Operator*) e estão resumidos na tabela a seguir:

Tabela 1: Serviços que BESS podem proporcionar ao setor elétrico

Stakeholder	Serviço
Operador do Sistema	Arbitragem de energia
	Regulação de frequência
	Reserva girante
	Suporte de tensão
	<i>Black start</i>
Concessionárias	Adequação de recursos ⁶
	Evitar expansão desnecessária da malha de distribuição
	Alívio de congestionamentos de transmissão
	Evitar expansão desnecessária da malha de transmissão

⁶ Significa evitar investir em novas térmicas a gás natural para atendimento do pico de carga ao utilizar alternativas como sistemas de armazenamento de energia (RMI, 2015).

Consumidores finais	Gerenciamento da conta de luz pelo tempo de uso
	Aumento da utilização de painéis solares
	Redução de cobranças pela demanda
	Capacidade de <i>backup</i>

BESS são extremamente versáteis, desde grandes escalas como o parque de 300 MW/1200 MWh instalado no fim de 2020 na Califórnia (*Energy Storage News*, 2021) até sistemas pequenos focados no setor residencial como os serviços de bateria oferecido pela Tesla (Bulman, 2015). Podem ser instalados em praticamente todo lugar (Hameed *et al.*, 2021), não dependendo de atributos geográficos como no caso de hidroelétricas reversíveis (Ali *et al.*, 2021). Além disso, não emitem gases poluentes em sua operação, diferentemente de termoelétricas que dependem da queima combustíveis fósseis. Ohtaka et al (2002) apontaram que um armazenamento de energia com duração de 10 minutos (quantidade de tempo que o ESS pode reter e fornecer energia elétrica antes de precisar ser recarregado) já é o suficiente para permitir que mais 10% de energia eólica seja absorvida pela rede sem necessidade de reforço.

Devido às previsões indicando uma crescente demanda por baterias, com aplicações em diversas áreas como o setor elétrico e o de transporte, e considerando o amplo espaço para avanços tecnológicos nessa tecnologia, diversos centros de pesquisa têm concentrado seus esforços no aprimoramento das baterias (IEA, 2020). Esse investimento resultou em uma notável curva de redução de custos (BNEF, 2023), proporcionando produtos cada vez mais aprimorados tanto do ponto de vista técnico quanto econômico. Tal evolução facilita significativamente a aplicação desses sistemas de armazenamento de energia em baterias, tornando-os cada vez mais economicamente viáveis para o armazenamento de energia conectada à rede.

Schmidt *et al.* (2019) indicam que BESS de íon lítio seriam o ESS de menor custo nivelado de armazenamento (*Levelized Cost of Storage – LCOS*) em 2020 para aplicações que requerem de 0.25 horas a pouco mais de 1 hora de descarga contínua, com uma taxa de utilização anual de 1 a cerca de 500 descargas (Figura 3). Os autores também preveem que em 2040 esse espectro se ampliará para descargas contínuas de 16 horas e taxas de utilização que ultrapassem 1000 descargas por ano. Isso demonstra, de acordo com o estudo realizado, o alto grau de competitividade que se espera de BESS, dominando o mercado de ESS.

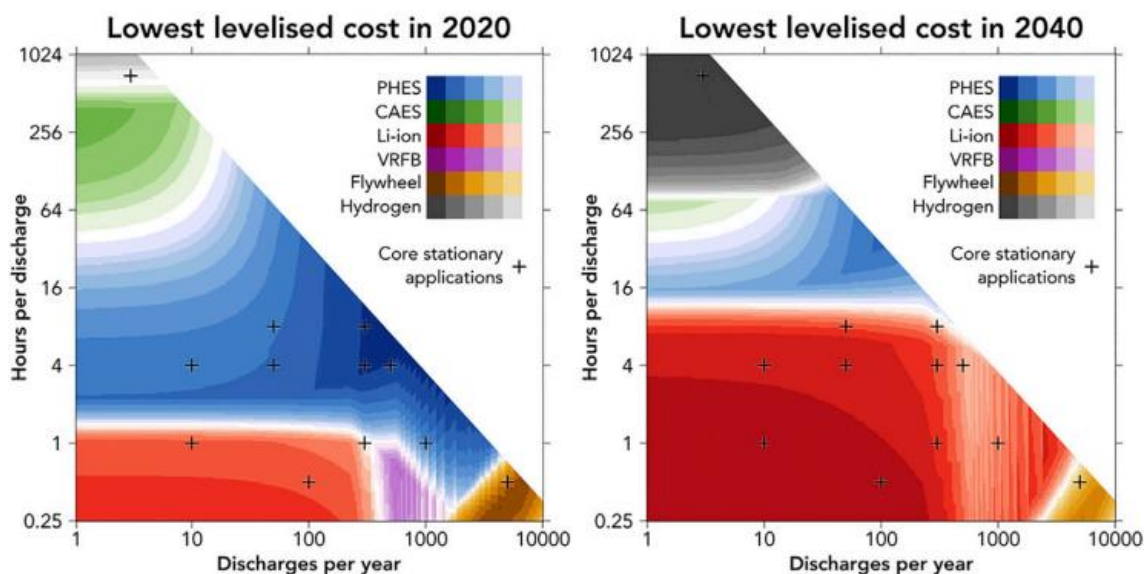


Figura 3: Tecnologias com menor LCOS dado taxa de uso e tempo de descarga contínuo

Fonte: Schmidt *et al.* (2019)

Por conta de todas essas características, baterias têm chamado muita atenção para armazenamento em *grid-scale* (Davies *et al.*, 2019). São poucas as tecnologias que possuem um tempo de descarga/resposta tão rápido, escalabilidade, custos tão decrescentes, modularidade, relativamente alta capacidade de manter a energia estocada, além de fácil e rápida instalação.

Um BESS é composto por dois principais componentes: a bateria e o sistema de controle e condicionamento de energia (Divya; Østergaard, 2009). Baterias são conjuntos de pilhas conectadas em série e em paralelo, que produzem corrente elétrica a partir de reações de oxirredução reversíveis. Dessa forma, a energia pode ser convertida de forma bidirecional, ou seja, de energia elétrica para química ou de química para elétrica. Há dois polos opostos, o catodo e o anodo, juntos do eletrólito que pode ser líquido, gel ou sólido (*Solid-state Batteries*). Quando a descarga ocorre, um fluxo de elétrons é gerado a partir das reações eletroquímicas. É comum ler em projetos de BESS informações sobre a energia armazenável (Wh) e capacidade (W), porque é assim que as baterias são classificadas. Além disso, como informado por Divya e Østergaard (2009), outras características importantes são: eficiência, vida útil (número de ciclos), temperatura de operação, profundidade de descarga (DoD – *Depth of Discharge*), autodescarga (taxa de descarga natural que ocorre quando a bateria está em repouso) e densidade energética. É de extrema importância estudar cada uma das características técnicas anteriormente mencionadas para dimensionar e operar um BESS, de forma a maximizar sua utilização

e vida útil. A profundidade de descarga por exemplo está muito relacionada à vida útil da bateria. Caso se opere um BESS sempre de sua carga total até o total esgotamento de energia, ou seja, um DoD de 100%, a bateria durará muito menos ciclos que um sistema que não descarregue tanto a mesma (Mallon *et al.*, 2017). A Figura 4 mostra como o ciclo de vida de uma bateria de íon lítio é reduzido conforme se aumenta o DoD. Ao se operar na faixa dos 20%, a bateria é capaz de realizar 30000 ciclos, enquanto que ao se operar com DoD de 80%, a vida da bateria é reduzida para cerca de 5000 ciclos.

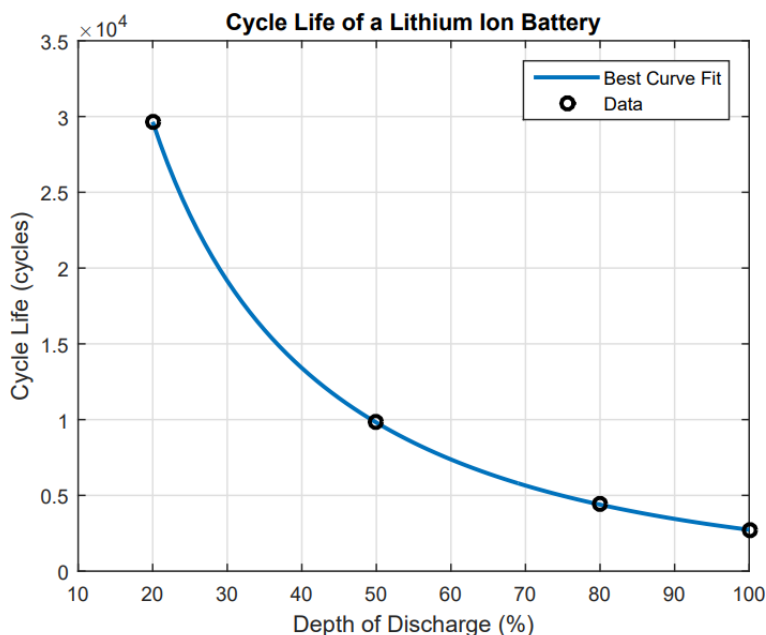


Figura 4: Profundidade de descarga versus ciclo de vida da bateria de íon de lítio.

Fonte: Mallon *et al.* (2017)

A Tabela 2, resume diversas características importantes dos principais tipos de baterias existentes. O fato de as baterias de lítio serem altamente eficientes, oferecerem uma grande vida útil e trabalharem em temperaturas moderadas explica porque estão sendo extensivamente usadas tanto no setor de transporte quanto no setor elétrico. É importante lembrar que, como descrito anteriormente no capítulo 2.1, existem diversos tipos diferentes de baterias de íon lítio. Os intervalos apresentados a seguir, como por exemplo o da densidade energética, refletem as diversas opções dentro desse amplo espectro.

Tabela 2: Características de diversos tipos de bateria

Característica	Chumbo-Ácido	Níquel-Cádmio	Sódio-Enxofre	Íon Lítio	Fluxo
Eficiência (%)	72 – 80	72 – 78	75 – 90	~100%	75 – 85%
Densidade energética (Wh/kg)	30 – 50	50 – 75	150 – 240	70 – 250	10 – 85
Vida útil (ciclos)	500 – 1200	2000 – 2500	2.500 (100% DoD ⁷)	1.000 – 10.000	12.000 – 18.000
Custo (US\$/kWh)	300 – 600	800 – 1500	300 – 500	150 – 1000	600 – 1200
Duração da descarga contínua	Segundos – horas	Segundos – horas	Segundos – horas	Segundos – horas	Segundos – 10 horas
Autodescarga (por mês)	2-5%	5-20%	~0%	1%	~0%
Temperatura de Operação (°C)	18 – 45	-40 – 50	300 – 350	-20 – 65	5 – 40

Fonte: Chen *et al.*, 2009; Divya *et al.*, 2009; Mariano *et al.*, 2017; Fan *et al.*, 2017; BNEF, 2023

Em resumo, os sistemas de armazenamento de energia em baterias são uma pedra angular do panorama energético moderno, facilitando a transição para um futuro energético mais sustentável e resiliente. A sua versatilidade, eficiência e capacidade de integração com fontes de energia renováveis torna-as uma ferramenta vital para enfrentar os desafios de um setor energético em rápida evolução. À medida que a tecnologia continua a evoluir, o BESS desempenhará um papel cada vez mais essencial na consecução de um ecossistema energético mais verde.

2.3 - Opções de Fim de Vida para Baterias

Baterias de veículos elétricos enfrentam condições desafiadoras ao longo de seu uso. São submetidas a uma ampla faixa de temperatura, entre 20 e 70 °C (Waldmann *et al.*, 2014), e passam por mais de 1.000 ciclos incompletos de carga e descarga (Zhao, 2017). Além disso, esses dispositivos frequentemente enfrentam descargas de alta profundidade e operações de rápidas carga e descarga envolvendo níveis de potência

⁷ DoD é uma abreviação para Depth of Discharge. Representa, em termos percentuais, a profundidade em que a bateria é descarregada de acordo com sua capacidade nominal.

substanciais. O fim de vida de uma bateria automotiva é marcado pelo ponto em que ela se torna incapaz de atender as demandas de seus usuários, geralmente devido a uma degradação da sua capacidade, o que reduz sua autonomia. Quando esse momento chega, a mesma é retirada do veículo e poderá seguir distintas rotas de fim de vida.

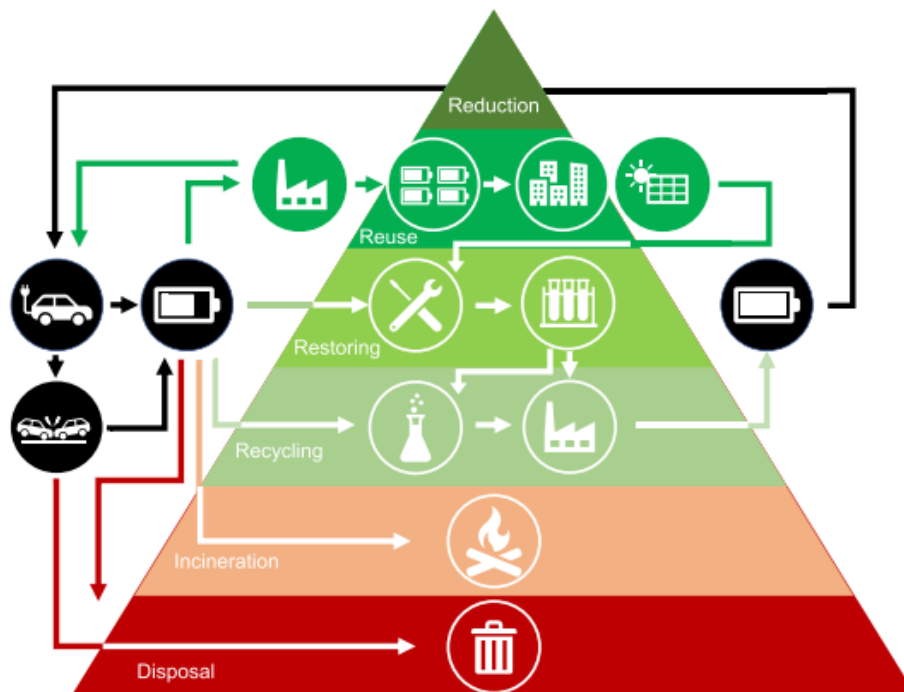


Figura 5: Opções de fim de vida para baterias automotivas

Fonte: Zhu *et al.* (2021)

De acordo com Zhu *et al.* (2021) (Figura 5), existem cinco opções de fim de vida para baterias automotivas: reutilização (*Reuse*), restauração (*Restoring*), reciclagem (*Recycling*), incineração (*Incineration*) e descarte (*Disposal*). Apenas uma delas oferece uma extensão da vida útil da bateria, a reutilização. Descarte é a opção menos sustentável, em que as baterias são simplesmente enviadas para aterros de baterias. Dependendo da infraestrutura disponível, o descarte pode ser a única opção viável. Incineração é quando baterias são queimadas após serem descartadas, mas isso pode gerar subprodutos nocivos como poeira ou pequenas partículas que podem poluir a atmosfera.

A restauração de baterias de EV é um processo que envolve o diagnóstico e reparo dos problemas identificados a partir da reforma, recondicionamento e restauração das baterias. O objetivo é prolongar a vida útil das mesmas, maximizar o desempenho do veículo e economizar custos. Pesquisas feitas pelo SLAC *National Accelerator*

Laboratory e pela Universidade de Stanford (SLAC, 2022) encontraram maneiras de revitalizar baterias de lítio, prolongando sua vida útil em até 30%.

A reciclagem e a reutilização são opções capazes de capturar o valor residual que ainda existe nas baterias em fim de primeira vida. Esse valor é simplesmente perdido quando esses dispositivos são descartados ou incinerados. Capturar o valor residual, ou seja, adicionar uma nova fonte de receita a esse mesmo dispositivo, é uma forma de reduzir o custo total de propriedade (TCO – *Total Cost of Ownership*) dessa bateria durante sua aplicação primária. Isso tem o potencial de baratear os BEVs, tendo em vista que as baterias são o elemento de maior custo dos mesmos (She *et al.*, 2017). Ambas as rotas serão abordadas a seguir:

2.3.1 – Reciclagem

A reciclagem de baterias é um componente crucial da gestão sustentável de resíduos e da conservação ambiental. Envolve a coleta, processamento e recuperação de materiais valiosos de baterias usadas. A reciclagem de baterias ajuda a prevenir a liberação de produtos químicos nocivos e metais pesados, como chumbo, cádmio e mercúrio, no meio ambiente, que podem contaminar o solo e as fontes de água. Além disso, conserva recursos valiosos, como lítio e cobalto, essenciais para a fabricação de novas baterias. Esse processo é estimulado por diversos países e regiões ao redor do mundo (Zhu *et al.*, 2021). A eficiência de reciclagem de baterias de veículos elétricos (EV) pode variar dependendo do método de reciclagem e da tecnologia utilizada. Existem diversos, cada um com suas próprias vantagens e desafios:

- **Hidrometalurgia:** é um ramo da metalurgia extrativa que se concentra no uso de soluções aquosas (normalmente ácidos ou bases) para extrair e recuperar metais de seus minérios ou outros materiais que contenham metais (Ren, 2022). O processo utiliza reagentes como ácido clorídrico (HCl), ácido nítrico (HNO₃), ácido sulfúrico (H₂SO₄), ácido fosfórico (H₃PO₄), ácidos orgânicos e peróxido de hidrogênio (H₂O₂) para extrair e separar os metais catódicos (Ren, 2022). Uma conclusão importante de um estudo recente foi que o processo hidrometalúrgico pode ser realizado à temperatura ambiente, o que pode produzir grandes benefícios na forma de redução de impactos ambientais e custos mais baixos de reciclagem das baterias (Chalmers University of Technology, 2022). Em um estudo onde foram testados diferentes tipos de baterias, o processo de separação física e lixiviação recuperou mais de 90% dos minerais de interesse, que eram Níquel, Cobalto, Lítio, Manganês, Cobre

e Alumínio (Ferrarese *et al.*, 2023). No entanto, a eficiência exata pode variar dependendo do processo específico utilizado e do tipo de bateria que está sendo reciclada. Kim e Bae (2021) reportam um intervalo que vai de 76% a 98.2% para a eficiência desse processo.

- **Pirometalurgia:** Este processo envolve a queima de baterias de veículos elétricos em altas temperaturas (acima de 1100°C) para remover qualquer plástico ou matéria orgânica indesejada (Ali *et al.*, 2022). Este método permite a recuperação de 50 a 98,9% da massa negra, mistura contendo elementos valiosos como grafite, manganês, cobalto, níquel e lítio, provenientes do tratamento mecânico de baterias usadas (Kim; Bae, 2021).
- **Processamento Mecânico:** O processamento mecânico na reciclagem de baterias EV é um método que envolve desmontar fisicamente as baterias e dividi-las em seus diferentes materiais: fios, circuitos, plásticos e as próprias células (Sheth *et al.*, 2023).
- **Abordagens combinadas:** Muitas instalações de reciclagem utilizam uma combinação de métodos para maximizar a eficiência. Por exemplo, podem utilizar processos mecânicos para pré-processar baterias antes de aplicar métodos químicos para extrair metais valiosos (Fortum, 2021). A escolha do método de reciclagem depende de fatores como a química da bateria, a condição das mesmas, as regulamentações ambientais e a viabilidade econômica.

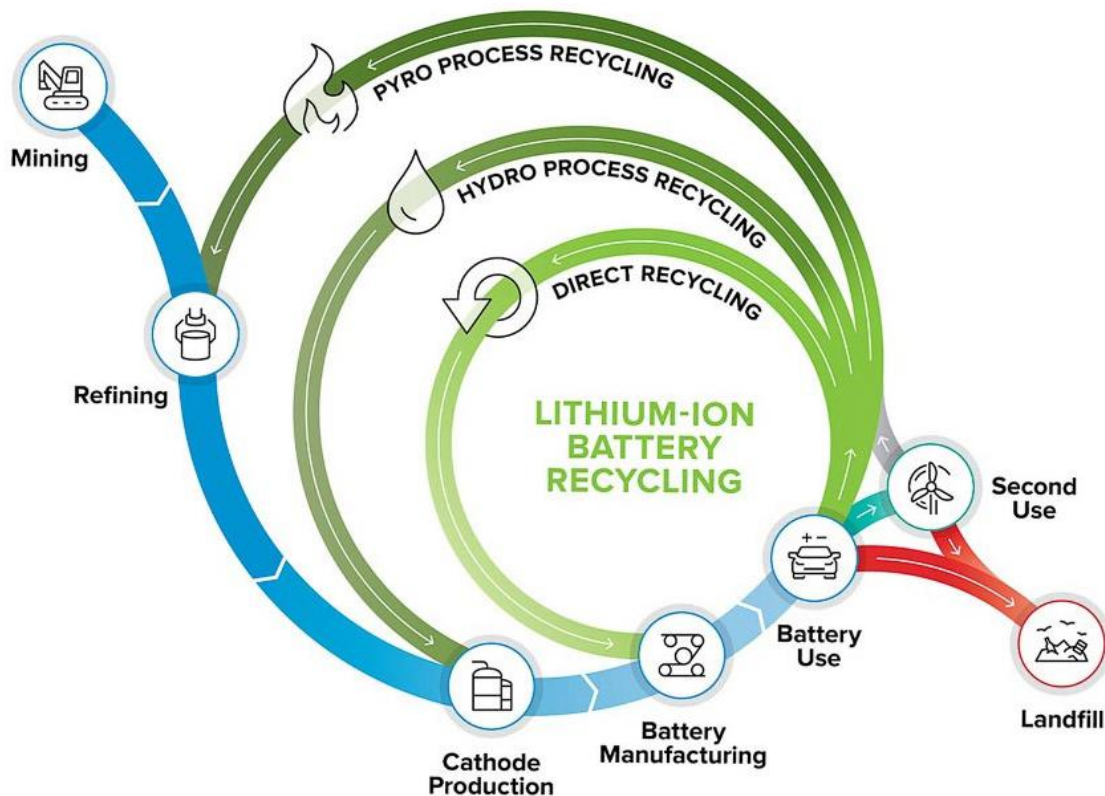


Figura 6: Métodos típicos de reciclagem de baterias de íons de lítio

Fonte: ReCell (2019)

Na Figura 6, *Pyro process* se refere ao processo de pirometalurgia, *Hydro* à hidrometalurgia e *direct recycling* aos processos mecânicos citados. É interessante ressaltar que o produto da pirometalurgia precisa ser refinado (*refining*) antes de ir para a etapa de produção do material catódico (*Cathode Production*) enquanto o da Hidrometalurgia vai diretamente para esse processo.

O processo de reciclagem é complexo e envolve diversos custos, como o de coleta e transporte das baterias, custos associados à desmontagem dos dispositivos, o processo de reciclagem em si e possíveis pós processamentos (Lander *et al.*, 2021):

- **Recolha e Transporte:** Inclui o custo de recolha de baterias usadas de diversas fontes e de transporte para a instalação de reciclagem. Dada a natureza perigosa destas baterias, são necessários métodos especiais de manuseamento e transporte, o que pode aumentar o custo.
- **Pré-processamento:** Antes do início do processo de reciclagem propriamente dito, as baterias precisam ser classificadas, descarregadas e desmontadas. Esta etapa também envolve a remoção de materiais perigosos, o que precisa ser feito de forma segura e ecologicamente correta.

- Processo de reciclagem: O custo do próprio processo de reciclagem pode variar dependendo da tecnologia utilizada. Embora alguns métodos sejam relativamente baratos, outros que permitem uma maior taxa de recuperação de materiais valiosos podem ser mais caros.
- Pós-processamento: Após a recuperação dos materiais valiosos, eles precisam ser preparados para reutilização. Isso envolve refinar os materiais e transformá-los em uma forma que possa ser utilizada na produção de novas baterias.

Lander *et al.* (2021) reportam que os custos de transporte na cadeia de reciclagem de baterias no Reino Unido variam de 0,39 \$/kWh a 0,83 \$/kWh, que os custos de desmontagem chegam a 2,84 \$/kWh e os referentes ao processo de reciclagem variam de 20 \$/kWh a 14 \$/kWh, dependendo do método utilizado. Assim, o processo como um todo soma no máximo 23,67 \$/kWh e no mínimo 17,23 \$/kWh.

Assim, o processo de reciclagem terá 3 principais *drivers* para definir sua atratividade que são: custo de reciclagem, eficiência da reciclagem e o preço dos materiais reciclados.

A faixa de custo que o processo de reciclagem se encontra é de extrema importância na identificação da rota preferível de fim de vida. Dependendo da lucratividade dessa atividade, ela pode ser preferível frente à reutilização e essa dinâmica será analisada no modelo construído nesse trabalho.

2.3.2 – Reutilização

A segunda vida útil da bateria, também conhecida como “baterias de segunda vida” (BSV) ou “reutilização de baterias”, refere-se a uma abordagem sustentável para prolongar a vida útil das baterias após seu uso inicial em veículos elétricos ou outras aplicações (NREL, 2015). Em vez de descartar as baterias quando elas não atendem mais às demandas de alto desempenho de sua aplicação primária, essas baterias são reaproveitadas para aplicações secundárias, reduzindo assim o desperdício e o impacto ambiental. A proposição é que baterias passem por três estágios principais em seu ciclo de vida (Figura 7). A “primeira vida” (*First life*), em que são usadas em sua aplicação primária, como operar num veículo elétrico, uma tarefa muito demandante. À medida que envelhecem e a sua capacidade de reter energia diminui, entram na fase de “segunda vida” (*Second life*), onde são removidas da aplicação primária, mas ainda têm uma quantidade

substantial de capacidade utilizável em outros tipos de aplicação. Finalmente, quando a sua capacidade se degrada ainda mais, entram na fase de “fim de vida” e as resta a reciclagem ou o descarte.

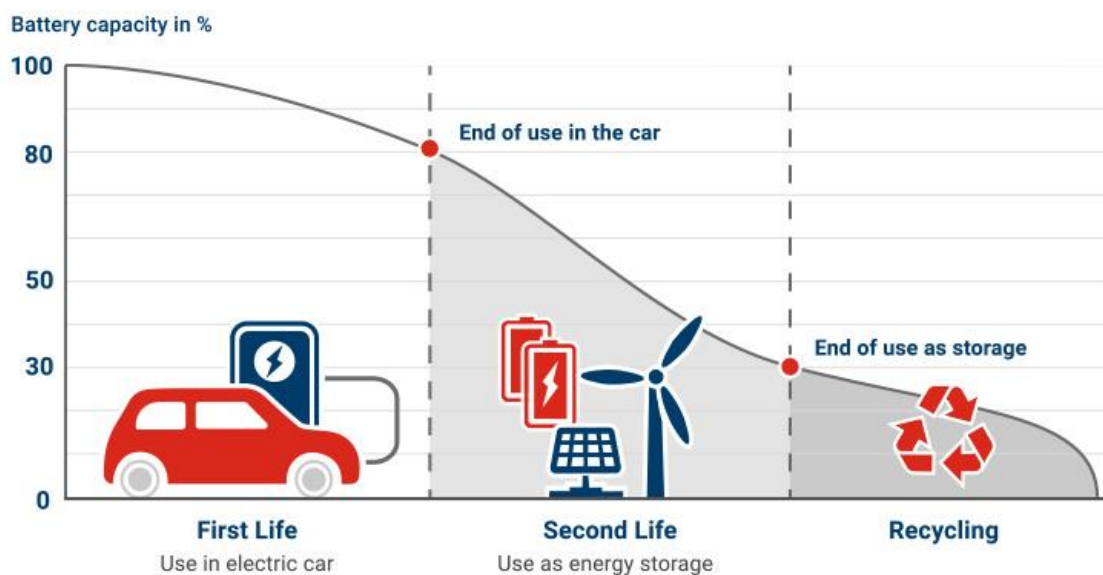


Figura 7: Diferentes fases na vida de uma bateria automotiva

Fonte: *Elektro-Automatik*⁸

O conceito de reutilização engloba várias interpretações que se referem às distintas rotas que as baterias podem seguir dentro do escopo de reuso. Esses caminhos diferem, como apresentado por Zhu *et al.* (2021), dependendo se os dispositivos são reutilizados em algum outro veículo ou para diferentes aplicações, como também se foram reutilizados diretamente ou se passaram por algum processo de reforma como também.

Em 1996, o Consórcio de Baterias Avançadas dos Estados Unidos (USABC) estabeleceu um padrão preeminente para aposentadoria de baterias (Hunt, 1996). Conforme estipulado por este critério, a substituição de uma bateria se faz necessária no momento em que sua capacidade inicial apresentar uma redução de 20%, ou seja, estado de saúde (SoH – *State of Health*) de 80% (Groenewald, 2017). A questão é que a autonomia dos veículos elétricos evoluiu muito com o passar dos anos a partir do desenvolvimento tecnológico dos automóveis (IEA, 2022). De acordo com a *International Energy Agency*, a média de autonomia cresceu quase três vezes de 2010 a 2021, saltando de 127 para 349 km. Dessa forma, mesmo com a degradação da capacidade inicial, as baterias automotivas mais modernas seguem oferecendo uma autonomia

⁸ Disponível em: < <https://elektroautomatik.com/en/industries/battery-recycling/second-life/>>. Acesso em: 28 Set. 2023.

considerável, ainda sendo capazes de atender a demanda de grande parte de seus usuários. Isso tem colocado em xeque o padrão definido em 1996 de que as mesmas devem ser substituídas quando seu estado de saúde reduzir a 80%.

Em adição a esse novo paradigma tecnológico, há também novos fatores do lado econômico que podem impactar a tomada de decisão da aposentadoria das baterias. Isso porque a inclusão de um mercado para baterias em segunda vida, complexifica a determinação do fim da primeira vida. Nesse novo paradigma, deve-se considerar o benefício gerado pela decisão de continuar operando no veículo elétrico e o gerado por aplicações alternativas que utilizariam a bateria em segunda vida, o que abre espaço para uma retirada prematura desses dispositivos (Martinez-Laserna *et al.*, 2018). Assim, a determinação do fim de primeira vida está sujeita à uma nova dinâmica de oferta e demanda dentro de um escopo de economia circular.

Alguns exemplos de aplicações de baterias em segunda vida são bicicletas elétricas, BESS de pequena escala sendo usados em residências ou para iluminação pública, BESS de grande escala para fornecer *backup* de energia à edifícios, para lidar com a intermitência da geração de energia renovável, para deslocar o pico de carga, ajudando a aliviar a rede elétrica, ou também para adiar a necessidade de investimentos em redes de transmissão e distribuição (Zhao, 2017; Zhu *et al.*, 2021; Pagliaro *et al.*, 2019; Neubauer e Pesaran, 2011; Engel *et al.*, 2019).

Prolongar a vida útil das baterias através de aplicações de segunda vida oferece diversas vantagens. Contribui significativamente para os esforços de sustentabilidade, prolongando a vida útil desses dispositivos para além da sua utilização inicial no automóvel, reduzindo a necessidade de produção de novas baterias e minimizando o desperdício eletrônico. Isso não só conserva recursos valiosos, mas também reduz a pegada ambiental associada à fabricação de baterias. Pode ser uma opção mais econômica para oferecer os mesmos serviços que uma bateria nova, o que tem o potencial de agilizar a penetração desses dispositivos em diversos mercados. Além disso, é uma forma de capturar o valor residual que baterias automotivas possuem, o que pode reduzir o preço desses dispositivos. Isso pode acelerar a transição energética do setor elétrico ao mesmo tempo que o do transporte, promovendo uma trajetória mais econômica e acessível ao garantir que as baterias de BEVs obsoletas continuem agregando valor depois de saírem das estradas.

Como apontado por Zhu *et al.* (2021), a viabilidade econômica da aplicação de baterias em segunda vida ainda é uma questão em aberto. Sua compreensão requer o

entendimento de diversos parâmetros-chave como o estado de saúde das baterias ao fim da primeira vida ou uma estimativa da performance que esses dispositivos terão em seu novo ambiente. O problema é que em diversos casos esses dados são de conhecimento apenas dos fabricantes (*Original Equipment Manufacturer – OEM*) das baterias, o que dificulta o desenvolvimento de soluções para os pontos de dúvida dentro do escopo da reutilização. De acordo com Engel *et al.* (2021), em 2025, as baterias reutilizadas poderão apresentar uma redução de custos de 30% a 70% em comparação com as novas baterias, resultando em um gasto de capital consideravelmente inferior por ciclo realizado.

O custo de reaproveitamento de baterias de veículos elétricos pode variar muito dependendo do modelo da bateria e seu estado de saúde (Dong *et al.*, 2023). O cálculo dessa cadeia de custos inclui os estágios de coleta, desmontagem, avaliação de performance e empacotamento, assim como mostrado por Zhu *et al.* (2021). Os autores também indicam que a logística da coleta representa um dos principais elementos de custo, seguido pelos testes de performance e a separação física e reembalagem de células, módulos e pacotes.

Um estudo da NREL publicado em 2015 (NREL, 2015) reporta um intervalo para o custo de reaproveitamento que vai de 26 a 49 \$/kWh. O laboratório também afirma que a disponibilidade de dados a respeito do estado de saúde das baterias antes de suas compras é vital para reduzir os custos de reaproveitamento para 20 \$/kWh. Para isso, seria necessário ter mecanismos, sensores nas baterias automotivas que acompanhem em detalhe a condição da mesma.

Além de compreender os custos desse processo, é necessário entender a que preço as baterias podem ser vendidas para avaliar um potencial lucro gerado por baterias em segunda vida a seus proprietários primários. Assim, subtraindo esse preço de venda dos custos de reaproveitamento pode-se estimar o benefício potencial gerado por essa atividade.

Tendo em vista a premissa de que esses dispositivos serão usados pelo setor elétrico em uma das aplicações mencionadas anteriormente, o preço de venda das baterias usadas depende da relação entre oferta e demanda de armazenamento elétrico por baterias. Entender a relação de competição dentro do escopo da oferta desse serviço é vital para compreender a viabilidade econômica de baterias em segunda vida. Assim, naturalmente, baterias em segunda vida competem com novas baterias como também com outros tipos de baterias.

Existirá espaço para baterias de íon lítio usadas, se as mesmas custarem menos do que baterias novas igualmente capazes (Neubauer *et al.*, 2012). Portanto, o valor de revenda de uma bateria recondicionada dependerá do custo da bateria nova, levando em consideração a condição da bateria usada, até qual nível de fator de saúde (SoH) ela poderá operar em sua segunda vida, além de um fator de ajuste que represente a disposição do cliente a pagar por um item usado em comparação com um novo de capacidade equivalente.

Entre 1991 e 2022, o preço das baterias de íon lítio experimentou uma notável queda de cerca de 97% (IEA, 2023b). Dados coletados pela BloombergNEF revelam que o preço médio ponderado pelo volume de uma bateria típica de íon lítio reduziu em quase US\$ 1.000 desde 2010 (BNEF, 2023). Em 2020, a média era de aproximadamente 137 US\$/kWh, marcando uma surpreendente queda em relação aos 1.191 US\$/kWh registrados apenas uma década antes. No entanto, após mais de dez anos de quedas consistentes, os preços médios das baterias de íon lítio aumentaram pela primeira vez em 2022, chegando a 151 US\$/kWh, o que representou um aumento de 7% em relação ao ano anterior. Esse aumento de preços pode ser atribuído ao aumento nos custos das matérias-primas e dos componentes das baterias, assim como à elevação da inflação (BNEF, 2023). Mesmo a crescente adoção de modelos de bateria de menor custo, como o fosfato de ferro-lítio (LFP) (IEA, 2023b), não foi capaz de contrabalançar o aumento dos custos na cadeia de suprimentos desses dispositivos. Este acontecimento recente evidencia que a evolução dos custos das baterias de íon lítio talvez não siga uma trajetória de quedas tão acentuadas como se imaginava. Caso essa tendência de declínio mais lento com acréscimos eventuais persista, haverá mais espaço para aplicações de segunda vida.

Além disso, compreender a condição das baterias ao fim da primeira vida e sua performance ao longo da segunda vida é vital para determinar a viabilidade econômica da reutilização. Braco *et al.* (2021) apontam a partir de resultados experimentais que o desempenho de baterias em segunda vida é especialmente prejudicado quando esses dispositivos são operados em baixas temperaturas e altas taxas de corrente. Por conta disso, recomendam temperaturas de operação em torno de 25 °C. Os autores também afirmam que os módulos em segunda vida operam com sucesso abaixo do SoH de 80%, mas que há riscos de segurança associados a operação desses dispositivos assim que o estágio de degradação acelerada se inicia (*knee-point*⁹). Já Martinez-Laserna *et al.* (2018)

⁹ O “ponto de joelho” é o momento em que a curva de degradação da bateria se curva, iniciando uma trajetória de degradação acelerada.

indicam que há uma forte influência da trajetória de envelhecimento da bateria em sua primeira vida sobre o desempenho e degradação da mesma bateria em segunda vida. Com isso, os autores concluem que o monitoramento adequado e a seleção da bateria são cruciais para certificar a viabilidade técnica de segunda vida.

A gestão de baterias de segunda vida envolve enfrentar vários desafios, incluindo a avaliação da capacidade restante e do estado das baterias, a normalização de interfaces e ligações para diferentes aplicações e a garantia de segurança e confiabilidade.

As baterias usadas geralmente são menos confiáveis do que as baterias novas devido ao seu desempenho degradado, tornando necessária uma avaliação abrangente sob perspectivas econômicas e de segurança antes de sua posterior utilização (Gu *et al.*, 2023). A utilização efetiva de baterias de segunda vida é um problema multifacetado. Em primeiro lugar, a determinação do estado interno das BSV é uma tarefa complicada. O estado das BSV consiste em características internas como a camada SEI (*Solid electrolyte interface*) e a deposição de lítio (*Lithium plating* – formação de lítio metálico ao redor do ânodo das baterias de íon-lítio durante o carregamento), características externas (como capacidade e energia) e a expectativa de vida remanescente (Gu *et al.*, 2023). Em segundo lugar, células de bateria de veículos elétricos possuem diferentes composições e formatos dependendo do modelo do automóvel, de modo que os módulos não podem ser misturados, ao usá-los em aplicações de segunda vida. Isso requer a classificação das baterias com base nas químicas, capacidades e formatos.

As baterias devem ser certificadas, se usadas em tipos de aplicação de armazenamento de rede, onde a segurança não pode ser comprometida (Pol, 2022). Em terceiro lugar, são necessárias técnicas de triagem rápida e reagrupamento para melhorar o desempenho e a segurança das BSV (Gu *et al.*, 2023). Por fim, há a necessidade de um exame abrangente e comparação de tecnologias de eletrônica de potência que possam melhorar substancialmente o desempenho desses dispositivos, incluindo tecnologias de transformação de energia de alta eficiência, tecnologias de equalização ativa e tecnologias para melhorar a confiabilidade e a segurança (Gu *et al.*, 2023).

Zhu *et al.* (2021) detalhou todo o procedimento de desmontagem, inspeção, triagem e classificação para baterias de segunda vida, identificando três principais desafios: operações dispendiosas com auxílio humano, falta de indicadores e modelos padronizados, e ausência de algoritmos de alta eficiência. Para lidar com eles, os autores apontam tecnologias chave como: desmontagem e inspeção automática das baterias; rápidos processos de triagem e classificação; testes não destrutivos com ondas acústicas;

prognósticos baseados em dados e técnicas baseadas em EIS (espectroscopia de impedância eletroquímica) e IC-DV (tensão diferencial e capacidade incremental).

Em resumo, a reutilização de baterias automotivas pode proporcionar benefícios para o setor elétrico e o de transporte. O primeiro se beneficiaria de opções mais baratas de ESS. Enquanto o segundo se beneficiaria de uma rota adicional para lidar com a enorme quantidade de baterias automotivas que se aposentaram ao longo dos anos, além de poder baratear o elemento mais caro dos BEVs. Simular esse novo link entre os setores é de extrema importância para a compreensão dessa nova dinâmica de oferta e demanda de baterias.

Visando estimar a oferta de baterias em segunda vida a longo prazo e possibilitar análises de sensibilidade para compreender os principais *drivers* e inibidores dessa rota, desenvolveu-se o modelo que será apresentado nos próximos capítulos.

3- Metodologia

Este capítulo está dividido em dois grupos distintos de conteúdo. O primeiro grupo concentra-se na explicação do algoritmo por trás do desenvolvimento do modelo referente à oferta de baterias automotivas em segunda vida para o setor elétrico. O segundo grupo de conteúdo, por sua vez, fornece uma descrição detalhada da metodologia empregada no estudo de caso que será conduzido. O código do algoritmo é desenvolvido em *python*.

3.1 – Desenvolvimento do Modelo

O propósito fundamental do modelo é calcular a quantidade de baterias automotivas que serão direcionadas para a reutilização, permitindo, assim, uma análise mais aprofundada da interação dinâmica entre os setores de energia elétrica e transporte. Essa análise visa aprofundar a discussão sobre como essa interconexão pode ser mutuamente benéfica. Para atingir esse objetivo, foi desenvolvido um sistema dinâmico destinado a capturar essa intrincada rede de relações que envolve as diversas variáveis do processo.

O modelo construído se concentra exclusivamente nos veículos leves puramente elétricos (*Light-duty BEVs*). Portanto, os dados relativos à frota, tecnologia das baterias e outros fatores estarão estritamente dentro desse escopo. Além disso, tendo em vista a grande fatia de mercado (60% em 2022) que baterias do tipo NMC possuem atualmente no setor de veículos elétricos (IEA, 2023b) e as expectativas de que essa tendência se intensifique com o passar dos anos (Kamath *et al.*, 2023), optou-se por modelar apenas essa família de baterias de íon lítio.

É importante destacar que a introdução da reutilização de baterias transforma significativamente o panorama tanto do mercado de veículos elétricos quanto do mercado de baterias de armazenamento estacionário. Isso impulsiona uma evolução em direção a uma cadeia mais integrada e circular, que aproveita o valor residual das baterias ao término de sua primeira vida útil.

A Figura 8 apresenta o laço causal que descreve o sistema de relações construído no modelo:

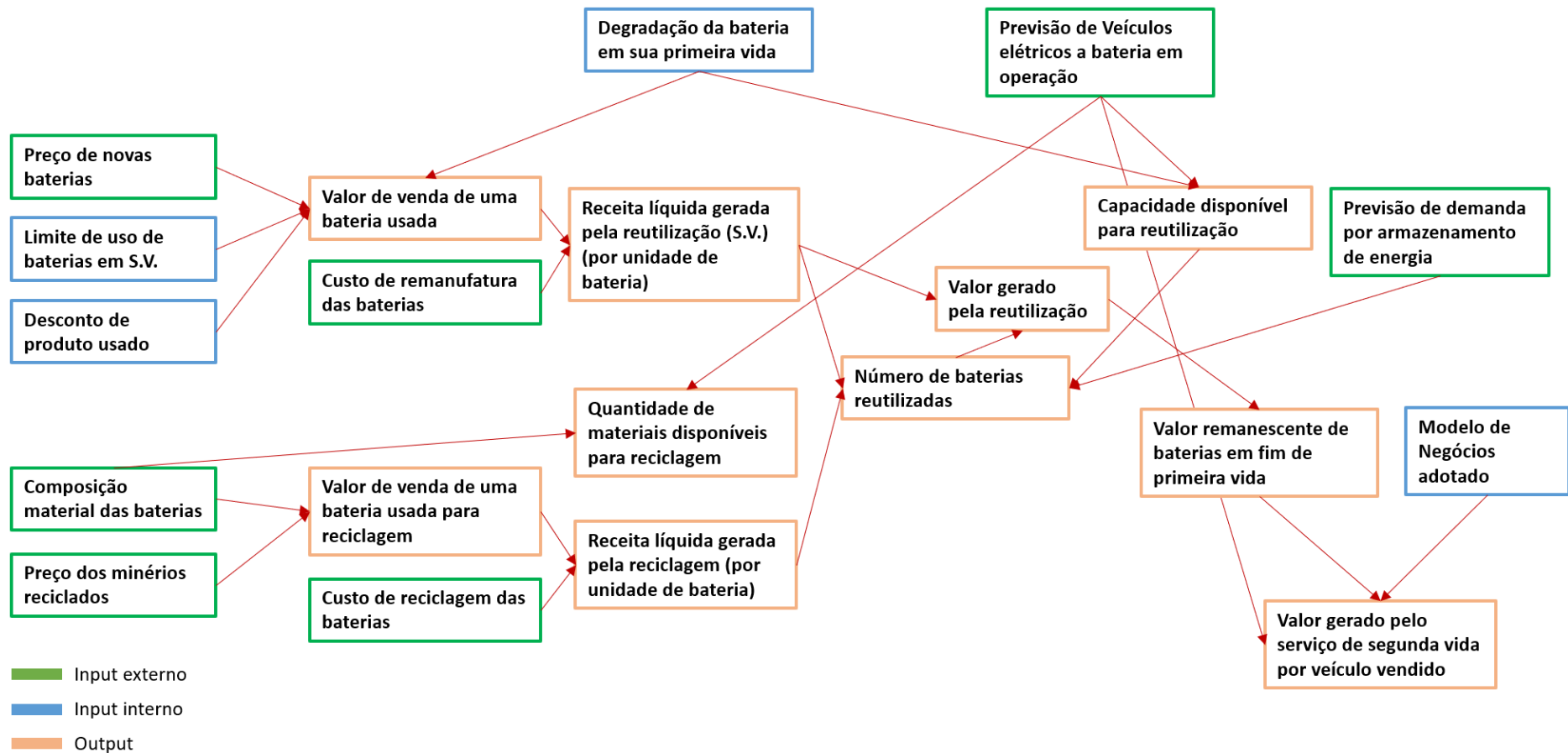


Figura 8: Diagrama do Laço Causal que descreve o sistema modelado

Fonte: Elaboração própria.

As caixas com borda na cor verde representam dados de entrada (*input*) que são retirados de fontes externas. Por exemplo, a série de dados a respeito da evolução do preço de baterias de íon lítio ao longo dos próximos anos tem como referência o panorama fornecido pela BNEF (2023). Já as caixas com borda azul descrevem dados de entrada definidos internamente no modelo por meio de funções ou variáveis. Um exemplo é o dado a respeito do quanto as baterias se degradam até atingirem o fim de primeira vida. Como não existe um valor fixo que define esse momento, opta-se por abordar esse dado como uma variável, respeitando um intervalo realista de acordo com a literatura (Neubauer *et al.*, 2012). Isso também permitirá análises de sensibilidade que serão conduzidas posteriormente. Já as caixas com borda alaranjada representam todos os dados de saída (*output*), frutos dos cálculos realizados no modelo.

Em síntese, o modelo realiza o cálculo da quantidade anual de baterias automotivas que atingem o final de sua primeira vida útil, utilizando dados provenientes das vendas de veículos elétricos. Além disso, para cada uma das duas rotas de pós-primeira vida consideradas neste contexto (reciclagem e reutilização), calcula o quanto cada uma delas valora o valor residual presente nas baterias retiradas, visando à escolha da opção mais rentável. O modelo também leva em consideração as restrições existentes, sejam elas relacionadas à demanda ou à infraestrutura, para determinar a quantidade de baterias que pode ser encaminhada por cada via. Por fim, realiza uma estimativa da quantidade de baterias encaminhadas para a rota de reutilização, bem como a quantificação do valor gerado por esse mercado em potencial.

Os dados necessários para a realização dessa tarefa incluem: informações históricas e projeções sobre a frota de veículos elétricos, a demanda por armazenamento de energia, a evolução tecnológica das baterias, dos preços das baterias em si como também dos minerais que as compõe. Adicionalmente, o modelo exige premissas relacionadas ao custo de remanufatura das baterias (no caso da rota de reutilização), a respeito dos custos de reciclagem das mesmas, necessita também da definição de um perfil de durabilidade desses dispositivos para sua primeira e segunda vida, o limite mínimo do estado de saúde (SoH) que as baterias podem atingir ao longo de sua segunda vida e o desconto que será dado para capturar a disposição a pagar por um produto usado. A partir dessas informações, calcula-se a oferta de baterias em segunda vida além do valor gerado por essa aplicação.

3.1.1 – Perfil de Durabilidade

Os perfis de durabilidade das baterias são desenvolvidos internamente no modelo através da construção de curvas normais. O eixo x representa por quantos anos os dispositivos foram usados e o y a porcentagem deles que são aposentados após x anos de uso. Parte-se do pressuposto de que a capacidade remanescente, ao término da vida útil, é uniforme para todas as baterias automotivas, sendo definida pelo momento em que esses dispositivos já não conseguem mais atender adequadamente às necessidades dos usuários. Considerando a incerteza intrínseca à variável capacidade ao fim da primeira vida (CFPV), o código é desenvolvido de forma flexível, sendo assim possível testar um intervalo de valores e os resultados associados a cada um, visando compreender os impactos na estimativa final. Em relação ao processo de retirada das baterias ao término de sua primeira vida, a média e o desvio padrão da curva normal são determinados com base nos parâmetros estabelecidos por Richa *et al.* (2014), que correspondem a 9 anos e 1 ano, respectivamente.

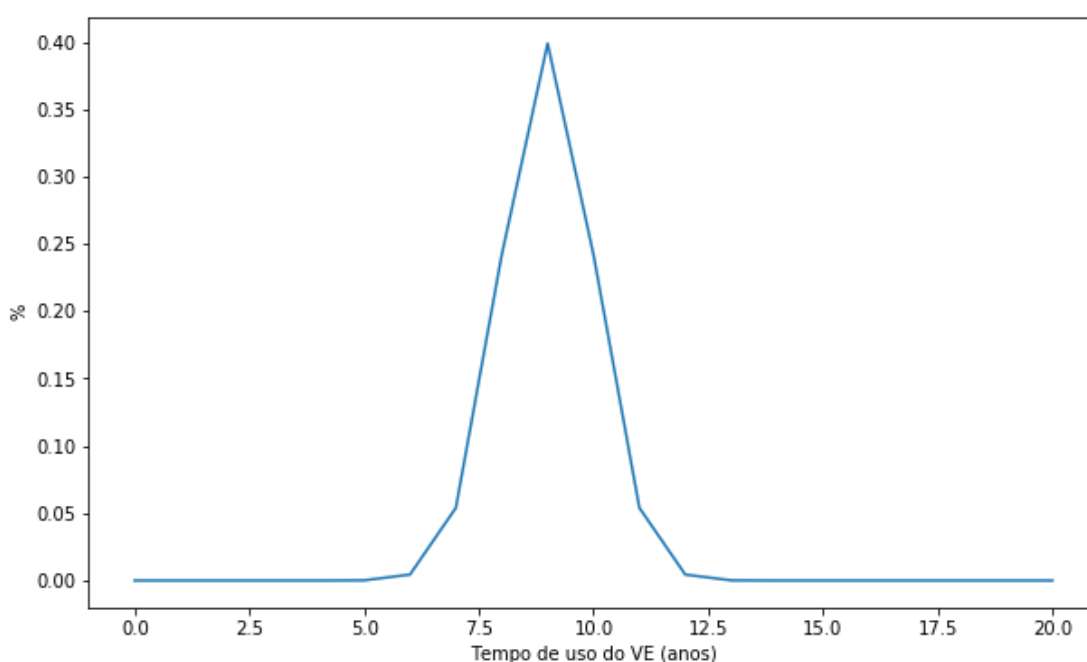


Figura 9: Perfil de durabilidade de baterias em primeira vida

Fonte: Elaboração própria.

Para o perfil de durabilidade de baterias já em segunda vida, utiliza-se a média e desvio padrão de acordo com (Kamath *et al.*, 2023), sendo esses respectivamente 4,5 e 1,0 ano (Figura 10).

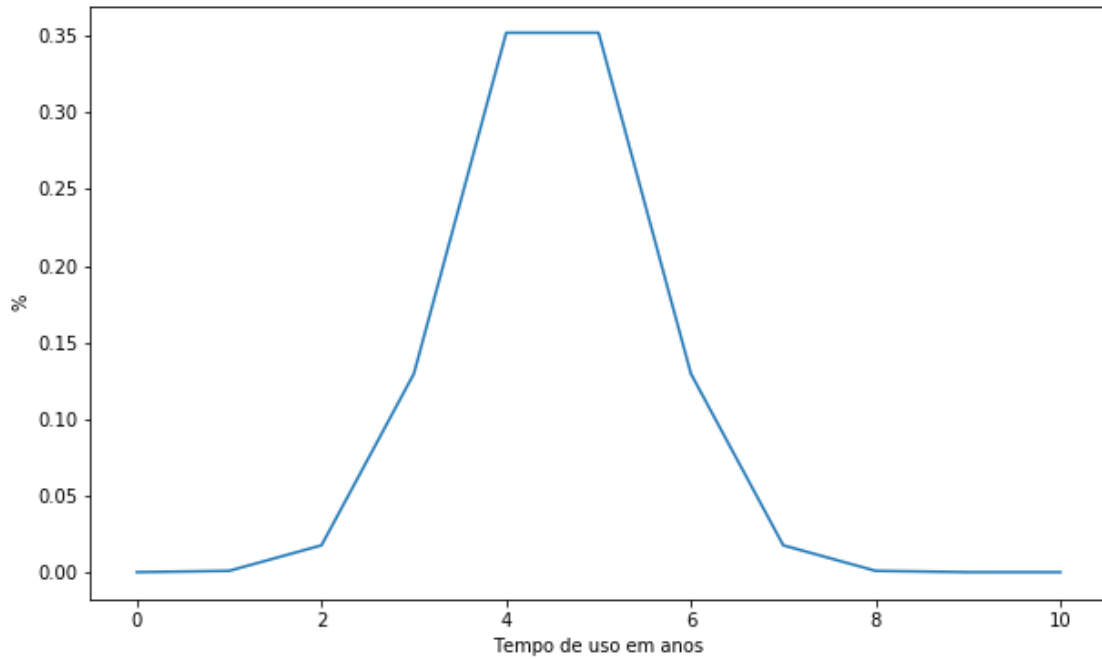


Figura 10: Perfil de durabilidade de baterias em segunda vida

Fonte: Elaboração própria.

Além disso, também se desenvolve o perfil de durabilidade de sistemas de armazenamento de energia em baterias (BESS), tendo em vista que isso fará parte do cálculo de adições necessárias desses mesmos sistemas, para repor o que saiu de operação. Os dados a respeito da duração dos BESS são baseados no estudo de Gräf *et al.* (2022). Assume-se uma média 12 anos e um desvio padrão 2.5 anos (Figura 11).

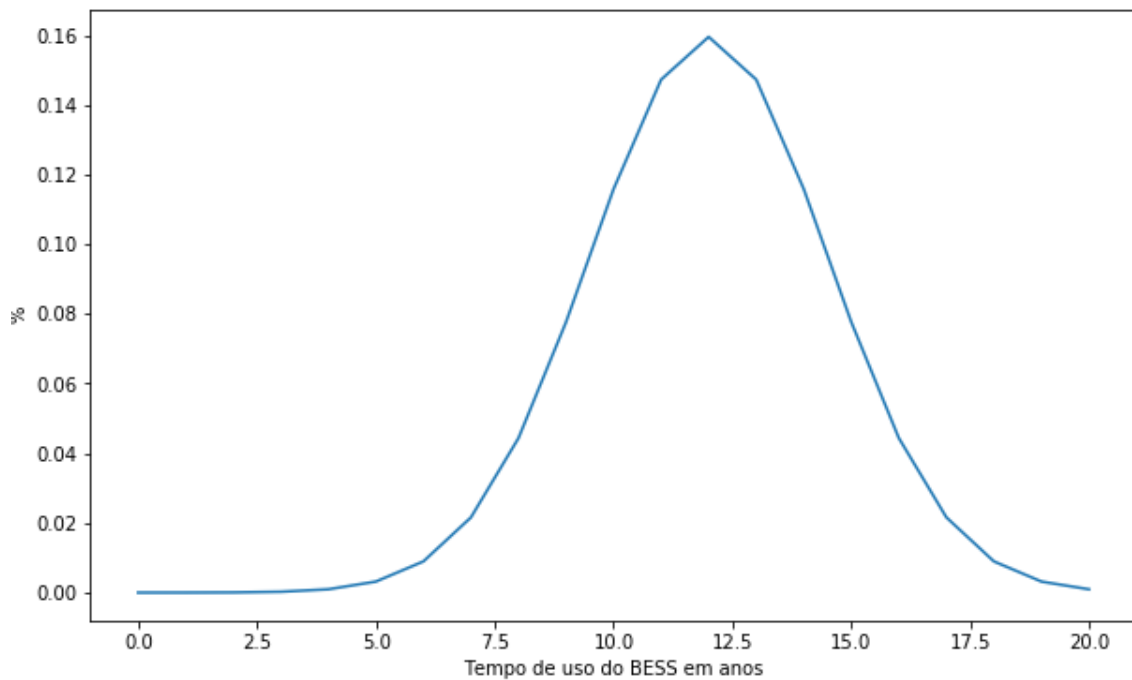


Figura 11: Perfil de durabilidade de sistemas de armazenamento de energia em baterias

Fonte: Elaboração própria.

3.1.2 – Fluxo de Veículos

Calcula-se conjuntamente as adições e as retiradas anuais de veículos, utilizando os dados de frota de veículos elétricos em operação e o perfil de durabilidade apresentado no capítulo anterior a partir das seguintes fórmulas:

$$Adc_a = Frt_a - Frt_{a-1} + Ret_a \quad \text{Equação 1}$$

$$Ret_a = \sum_{t=0}^{20} Adc_{a-t} \times PRet_t \quad \text{Equação 2}$$

Em que,

a = ano de referência;

t = tempo de uso do veículo em anos;

Adc_a = Quantidade de veículos adicionados no ano a;

Frt_a = Frota em operação no ano a;

Frt_{a-1} = Frota em operação no ano a-1;

Ret_a = Quantidade de veículos que são retirados no ano a;

Adc_{a-t} = Quantidade de veículos adicionados no ano a-t;

PRet_t = Parcela de veículos que se aposentam após t anos de uso, resultado do perfil de retirada;

Desse modo, torna-se viável rastrear o momento em que cada veículo adicionado atingirá o fim de sua primeira vida útil. Uma vez que a tecnologia empregada na época da venda de cada automóvel é um dado de entrada, pode-se estimar a quantidade total de capacidade desse agregado de baterias usadas que alcança o fim de suas respectivas vidas a cada ano. Calcula-se essa grandeza, ao realizar o somatório da multiplicação da capacidade inicial de cada bateria de cada veículo pelo grau de degradação associado ao seu uso, conforme apresentado na equação a seguir:

$$Cp_{saída(a+t)} \quad \text{Equação 3}$$

$$= \sum_{a=2010}^{2050} \sum_{t=0}^{20} Adc_a \times PRet_t \times [(NMC111_a \times Cap111_a) + (NMC622_a \times Cap622_a) + (NMC811_a \times Cap811_a)] \times CFPV$$

Em que,

$Cp_{saída(a+t)}$ = Capacidade, em forma de bateria, disponível para ser reutilizada no ano $a+t$;

a = ano de referência;

t = tempo de uso do veículo em anos;

Adc_a = Quantidade de veículos adicionados no ano a ;

$PRet_t$ = Parcela de veículos que se aposentam após t anos de uso, resultado do perfil de durabilidade;

$NMCa$ = Porcentagem referente a fatia de mercado no ano a de cada tipo de bateria;

Cap_a = Capacidade média, em kWh, referente a cada tipo de bateria vendida no ano a ;

$CFPV$ = Premissa a respeito da porcentagem de degradação que representa o fim da primeira vida;

É importante destacar que a capacidade remanescente, ou seja, o que permanece após a degradação, é uma variável endógena.

A tecnologia da bateria utilizada no veículo fornece a composição material da mesma, o que possibilita o cálculo dos materiais que estarão disponíveis para reciclagem quando o dispositivo atingir o final de sua vida útil conforme apresentado pela seguinte equação:

$$\begin{aligned} & \text{Material}_{saída(a+t)} && \text{Equação 4} \\ & = \sum_{a=2010}^{2050} \sum_{t=0}^{20} Adc_a \times PRet_t \times [(NMC111_a \times Cap111_a \times Massa111_a) \\ & + (NMC622_a \times Cap622_a \times Massa622_a) \\ & + (NMC811_a \times Cap811_a \times Massa811_a)] \end{aligned}$$

Em que,

$Material_{saída(a+t)}$ = Massa, em forma de bateria, disponível para ser reciclada no ano $a+t$;

$Massa111$ = Massa por unidade de energia do material em questão para baterias do tipo NMC111;

$Massa622$ = Massa por unidade de energia do material em questão para baterias do tipo NMC622;

$Massa811$ = Massa por unidade de energia do material em questão para baterias do tipo NMC811;

Assim, ao concluir essa fase inicial, o modelo terá calculado, para todos os anos de dados considerados, a quantidade de veículos elétricos que alcançam o fim de sua vida,

a capacidade disponível em watt-hora passível de reutilização e a quantidade de materiais em quilogramas que podem ser reciclados.

3.1.3 – Demanda por Armazenamento

O cálculo da demanda por armazenamento de energia segue a mesma lógica empregada anteriormente para a frota de veículos. Inicialmente, utiliza-se os dados originais da capacidade instalada de *Battery Energy Storage Systems* (BESS). Para determinar a demanda incremental anual de armazenamento em baterias, é necessário avaliar como a capacidade instalada evolui de um ano para o próximo, bem como considerar o que é retirado nesse processo. Com o perfil de retirada e o prospecto de capacidade instalada, é então possível calcular as adições brutas de armazenamento. Essas adições representam, em essência, a demanda por capacidade, indicando o quanto é necessário expandir anualmente a capacidade de BESS para atender a uma demanda em constante crescimento por esses sistemas. Assim, basta aplicar as Equações 1 e 2 para calcular a demanda por armazenamento a partir da mudança de Frota de Veículos para Volume Instalado de BESS (em Watt-hora) e Adição e Retirada de veículos para Adição e Retirada de BESS (também em Wh).

A demanda por flexibilidade do setor elétrico está intrinsecamente vinculada à penetração de veículos elétricos no mesmo. Essa relação é bidirecional, pois os veículos elétricos não apenas consomem energia elétrica, exercendo pressão sobre a rede elétrica, mas também têm o potencial de oferecer flexibilidade por meio do conceito V2G (do inglês, "*Vehicle-to-Grid*"), aliviando a carga sobre a rede elétrica. Portanto, o cenário ideal envolve uma previsão da quantidade de veículos elétricos em operação que interaja de forma coesa com modelos que descrevem e preveem a capacidade instalada de armazenamento por baterias.

3.1.4 – Valoração da Bateria Usada

A valoração de baterias usadas está diretamente ligada à escolha da estratégia adotada para extrair seu valor residual. Este modelo foi concebido com a flexibilidade de contemplar duas alternativas: a reutilização e a reciclagem.

3.1.4.1 – Rota da Reutilização

O valor de venda de BSV após sua remanufatura e subsequente disponibilização no mercado representa o preço de venda pago pelo consumidor. De acordo com a

metodologia proposta por Neubauer *et al.* (2011), o cálculo desse preço deve incorporar um fator de desconto que expresse a disposição do consumidor a pagar por um produto usado. A Equação 5 descreve a relação entre o preço de venda da BSV, o preço das baterias novas, a disposição do consumidor em adquirir produtos usados e os fatores de saúde da bateria ao término de sua primeira e segunda vida.

$$P_{BSV} = K_S \times K_U \times P_{BN} \quad \text{Equação 5}$$

Em que,

P_{BSV} = Preço de venda de baterias em segunda vida;

K_S = Fator de saúde = $\frac{C_{FPV} - C_{FSV}}{1 - C_{FSV}}$;

C_{FPV} = Capacidade remanescente (%) ao fim da primeira vida;

C_{FSV} = Capacidade remanescente (%) ao fim da segunda vida;

K_U = Fator de desconto de produto usado;

P_{BN} = Preço de uma bateria nova;

Para determinar o quanto do preço de venda será repassado ao proprietário da bateria automotiva, é necessário compreender os custos do processo de reaproveitamento. Isso só se torna possível mediante a avaliação dos gastos associados aos diversos estágios envolvidos, desde a retirada da bateria do serviço automotivo até sua comercialização no mercado secundário. Esses estágios incluem atividades como coleta, testes, reembalagem e garantias, que coletivamente são referidos como "custos de reaproveitamento". Esses custos são adotados como dados de entrada no modelo, trazido de fontes externas. Por fim, para determinar o valor remunerado ao proprietário da bateria, conhecido como o "Preço de Compra", é realizado o seguinte cálculo:

$$P_{CBU} = P_{BSV} - C_R \quad \text{Equação 6}$$

Em que,

P_{CBU} = Preço de compra da bateria usada;

C_R = Custo de reaproveitamento;

3.1.4.2 – Rota da Reciclagem

A determinação da receita potencial proveniente do processo de reciclagem envolve uma estimativa da massa recuperável de cada material, que é posteriormente

multiplicada pelo valor de mercado correspondente a esses materiais. Esta quantia é então subtraída dos custos associados à operação de reciclagem.

A massa recuperável de cada material por unidade de energia é variável e depende da composição química da bateria em questão. Os custos de reciclagem representam todas as despesas associadas ao processo de reciclagem de baterias no final de sua vida útil. Dessa forma, o valor a ser pago ao proprietário da bateria pode ser expresso através da seguinte equação:

$$P_{CBUR} = \left(\sum_{n=1}^N (M_n \times P_n) \right) - Cr \quad \text{Equação 7}$$

Em que,

P_{CBUR} = Preço de compra da bateria usada pela rota da reciclagem;

M_n = Massa por unidade de energia do n-ésimo material considerado;

P_n = Preço de mercado por unidade de massa do n-ésimo material considerado;

C_R = Custo de reciclagem;

3.1.5 – Receita Gerada

Após calcular o número de veículos adicionados e retirados anualmente, avaliar a disponibilidade dos subprodutos em análise (baterias usadas e seus componentes), a demanda por esses elementos, bem como estimar os valores a serem pagos em cada rota de pós fim de primeira vida, o próximo passo consiste na integração de todos esses dados.

O objetivo é calcular a quantidade anual de baterias que seguirão a rota da reutilização (segunda-vida) e posteriormente a receita total gerada por esse serviço. Para realizar esse cálculo, é necessário definir a parcela de baterias em fim de primeira vida que podem ser reutilizadas anualmente, levando em consideração perdas técnicas devido a dispositivos inadequados para reuso e eventuais gargalos na infraestrutura de remanufatura. Além disso, a rota da reciclagem também está sujeita a restrições determinadas pela infraestrutura disponível. Portanto, é igualmente essencial estabelecer um limite para a quantidade de baterias que podem ser recicladas a cada ano. Com base em dados relativos a limitações técnicas, de infraestrutura, demanda por cada produto, disponibilidade dos mesmos e o valor a ser pago por cada um, é possível calcular a oferta de baterias em segunda vida e a receita gerada por essa atividade.

Após calcular a receita anual gerada, uma etapa adicional incorporada ao modelo consiste na sua divisão pelo número de veículos elétricos novos vendidos anualmente.

Isso possibilita a obtenção da receita média por veículo, permitindo identificar se a segunda vida das baterias possui o potencial de influenciar a redução do valor de venda desses veículos.

Em resumo, o passo a passo realizado pelo modelo pode ser expresso pela seguinte sequência:

- 1- Calcula-se quantas baterias chegam ao fim da primeira vida a cada ano juntamente de suas respectivas CFPV e massa de cada material analisado (Equação 1-4);
- 2- Calcula-se a demanda por sistemas de armazenamento a bateria;
- 3- Calcula-se o valor pago por cada rota de fim de vida (Equação 6 e 7);
- 4- Calcula-se as perdas técnicas associadas à rota do reuso e da reciclagem;
- 5- Escolhe-se a rota mais lucrativa e destina-se todas as baterias, dadas as limitações de infraestrutura e demanda, para a mesma.
- 6- Caso ainda exista sobra, destina-se a rota menos lucrativa.
- 7- Calcula-se a receita total gerada pela reutilização de baterias e a oferta de baterias em segunda vida.
- 8- Divide-se a receita pelo número de veículos vendidos para obter a receita média por automóvel.

3.2 – Estudo de Caso

O estudo de caso conduz uma simulação, utilizando o Reino Unido como referência devido à disponibilidade de dados (*National Grid ESO, 2023*). O período de análise abrange o intervalo de 2010 a 2050, com os dados históricos indo até 2022. A frota de veículos elétricos é derivada do relatório "Future Energy Scenarios 2023" (*National Grid ESO, 2023*) e é apresentada na figura a seguir.

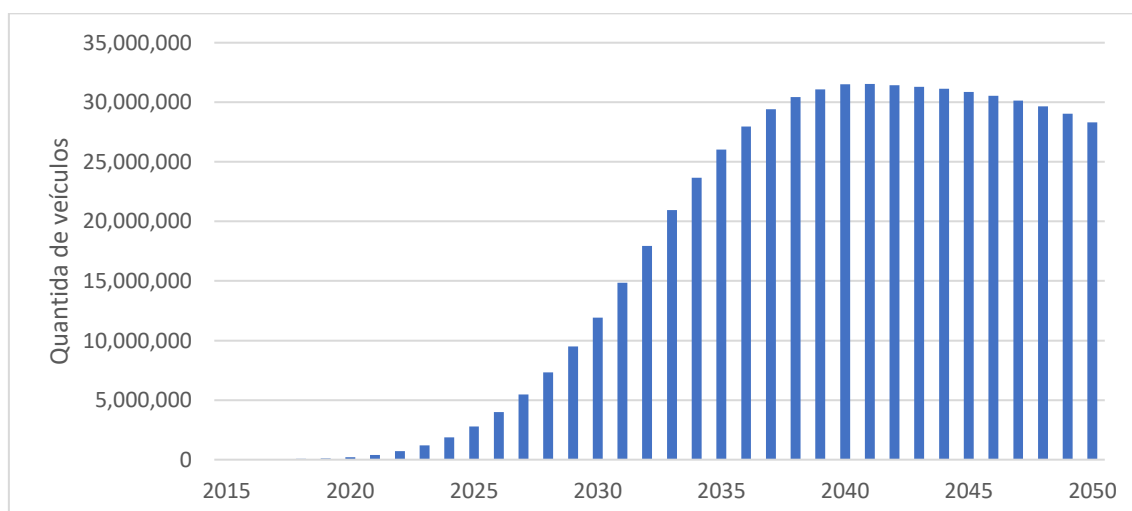


Figura 12: Frota de Veículos Elétricos em circulação

Fonte: *National Grid ESO*, 2023

A partir dos perfis de durabilidade de baterias em primeira vida descritos na metodologia e de dados históricos de vendas de automóveis novos fornecidos pelo Departamento de Transporte do Reino Unido no relatório Road traffic statistics (TRA) (DfT, 2023), calcula-se a quantidade de baterias que são adicionadas e retiradas anualmente.

Para transformar os valores de quantidade para capacidade, é necessário saber a tecnologia das baterias no ano em que elas são adicionadas. Isso porque essa informação fornecerá o valor médio da capacidade das baterias vendidas no ano em questão. Nesse estudo, parte-se de uma média de 33 kWh por veículo em 2010, passando por 55 kWh por veículo em 2020 (*Automotive Cells Company*, 2022). A partir de 2021, assume-se um crescimento de 5% ao ano, ao que resulta numa capacidade média de 250 kWh por veículo em 2050, conforme ilustrado pela Figura 13.

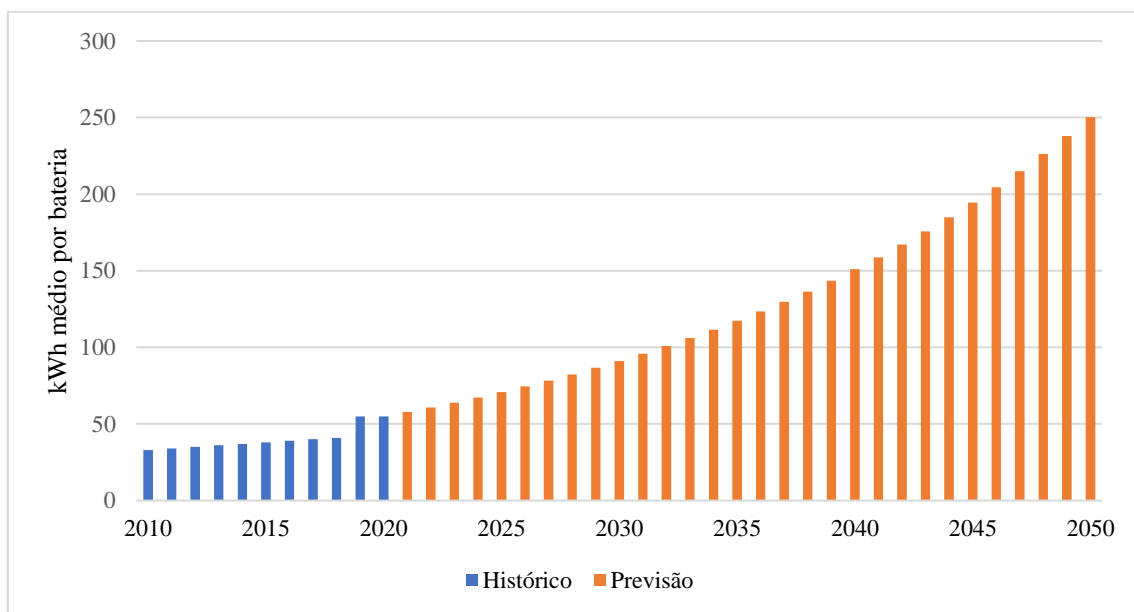


Figura 13: Evolução da capacidade média das baterias dos automóveis

Fonte: *Automotive Cells Company* (2022) e elaboração própria

A fim de converter a quantidade de baterias em massa de materiais, é essencial possuir conhecimento da composição das baterias. Neste estudo, consideram-se apenas baterias do tipo LiNiMnCoO_2 (NMC) com proporções molares de 111, 622 e 811. Os dados referentes à quantidade de cada elemento por unidade de energia (kWh) são extraídos de Olivetti *et al.* (2017) e Richa *et al.* (2014) e estão apresentados na tabela a seguir:

Tabela 3: Quantidade de cada elemento por tecnologia de bateria (kg/kWh)

Tecnologia	Li	Co	Ni	Mn	Al	Cu	Aço
NMC111	0.139	0.394	0.392	0.367	0.263	0.390	0.866
NMC622	0.126	0.214	0.641	0.200	0.263	0.390	0.866
NMC811	0.111	0.094	0.75	0.088	0.263	0.390	0.866

Fonte: Olivetti *et al.* (2017); Richa *et al.* (2014)

No contexto atual, é relevante notar que as baterias de veículos elétricos puros são majoritariamente representadas pelo tipo NMC111 (Mining, 2021). Essa denominação reflete uma proporção molar igualitária entre Níquel, Manganês e Cobalto. No entanto, devido à crescente preocupação com a disponibilidade limitada de Cobalto a médio e longo prazo (IEA, 2023b), os fabricantes de baterias estão empenhados em desenvolver configurações alternativas que contenham uma quantidade reduzida de cobalto por unidade de energia. Observa-se que a tendência de médio prazo aponta para um aumento das baterias NMC622 e, a longo prazo, das baterias NMC811 (Merriman, 2019). Isso destaca a crescente importância do Níquel como elemento-chave na produção de baterias, suscitando preocupações a respeito do suprimento desse minério. A distribuição de participação de mercado de cada uma dessas variantes da NMC é obtida a partir de Kamath *et al.* (2023), e é apresentada de forma ilustrativa no gráfico subsequente.

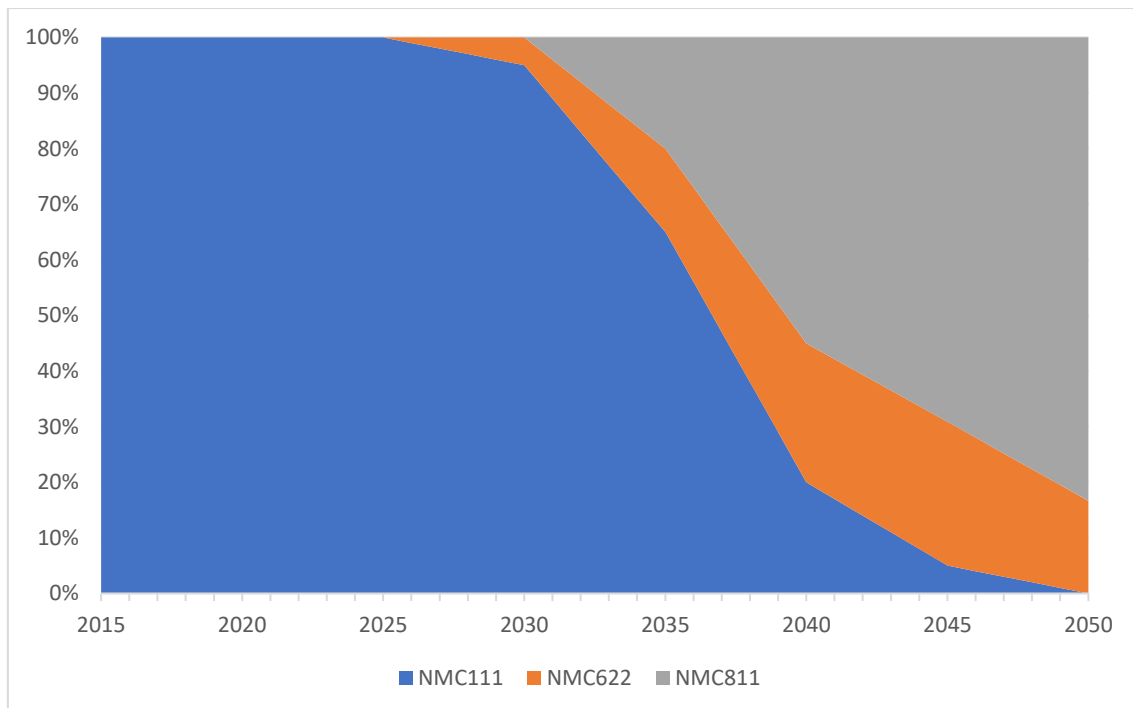


Figura 14: Market share das diferentes composições de baterias

Fonte: Kamath *et al.* (2023)

Iniciando a lógica sequencial apresentada no capítulo 3.1.5, calculam-se quantas baterias atingem o ponto de fim de primeira vida a cada ano, juntamente com os subprodutos considerados: capacidade reutilizável e massa reciclável. Faz-se isso ao aplicar as equações 3 e 4, a partir de informações da quantidade de cada material por unidade de energia (Tabela 3) para cada tipo de bateria, a fatia de mercado de cada um desses modelos distintos (Figura 14), os dados de vendas anuais de veículos elétricos (a partir da Figura 12), o perfil de durabilidade das baterias em primeira vida (Figura 9) além de premissas a respeito da capacidade remanescente ao fim de primeira vida. Para o estudo de caso em questão, assume-se uma CFPV de 75%.

Prosseguindo para o passo número 2, a capacidade instalada de armazenamento a bateria também é retirada do relatório FES2023 (*National Grid ESO, 2023*), optando-se pelo cenário *Consumer Transformation*, que prevê que a capacidade instalada de *battery storage* em 2030 e 2050 será de respectivamente 24 e 55 GWh (16 e 32 GW), como mostrado na Figura 15.

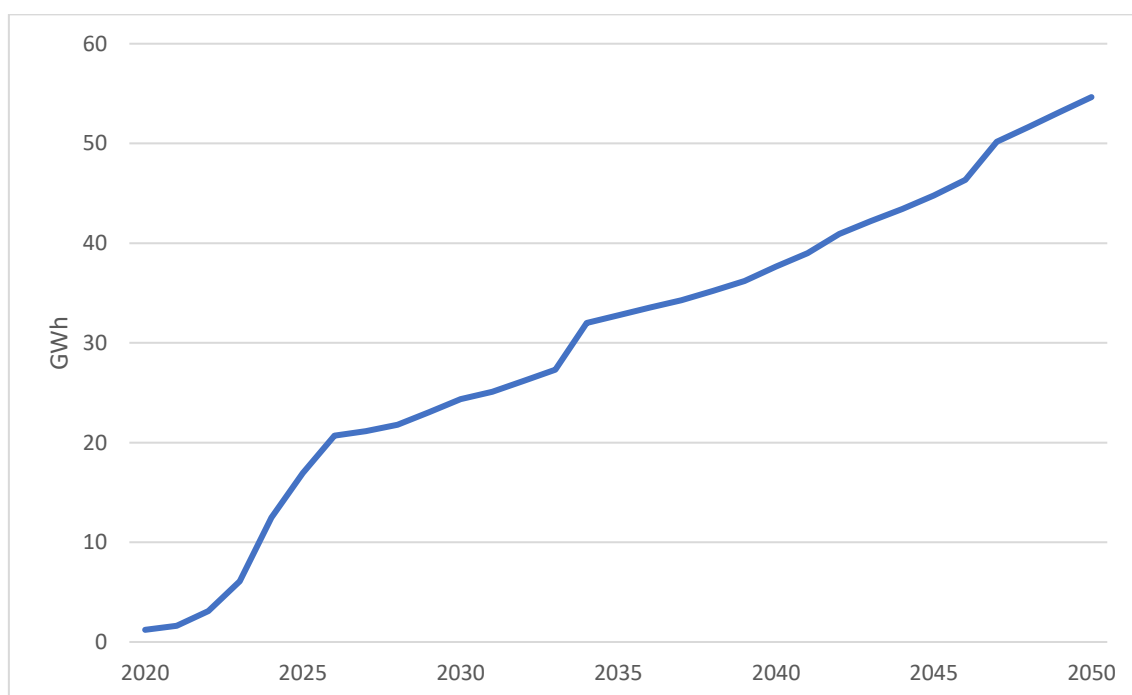


Figura 15: Volume instalado de armazenamento de energia a bateria

Fonte: *National Grid ESO (2023)*

Com o perfil de retirada de BESS apresentado no capítulo 3.1.1, calcula-se o quanto se deve adicionar anualmente para alcançar o valor já sabido de capacidade instalada. Esse valor de quanto deve ser adicionado é interpretado como a demanda por armazenamento novo. A respeito da demanda pelos minerais, assume-se que ela não seja

um fator limitante. Sempre que a decisão for pela rota da reciclagem, haverá demanda por todos os seus subprodutos.

A respeito do passo 4, a premissa a respeito da eficiência de reciclagem para o lítio, cobalto, níquel, manganês, alumínio, cobre e aço é de 90% (Ferrarese *et al.*, 2023). Assume-se que não existe gargalo na infraestrutura de reciclagem, toda decisão de se reciclar uma bateria será uma possibilidade viável. A respeito da reutilização, assume-se que a fração de baterias que chega a uma instalação de remanufatura e que pode ser remanufaturada é de 95% (Kamath *et al.*, 2023). Além disso, assume-se que o serviço de recondição só estará disponível a partir de 2025. A partir desse ano, espera-se que a infraestrutura necessária seja desenvolvida aos poucos, começando com uma limitação de 10% das baterias que podem ser reutilizadas (em 2025), ou seja, só é possível recondição 10% do que está disponível para ser reutilizado. Após esse primeiro ano, assume-se que a capacidade de processamento crescerá a passos de 10% ao ano, até atingir 100% em 2034.

Para estimar o valor a ser pago pela bateria usada a partir da rota da reutilização, utiliza-se a Equação 5. Para o cálculo do fator de saúde, assume-se que o Ponto de fim da segunda vida ocorra no “joelho” da curva de degradação da bateria. Após atingir esse marco, a degradação acelerada reduz significativamente a utilidade de qualquer ganho adicional de capacidade, além de tornar o uso do dispositivo potencialmente perigoso (Zhang; White, 2008). De acordo com Casals *et al.* 2019, para aplicações como oferecer suporte para carregamento rápido de VEs e gerenciamento de carga para consumo próprio, pode-se utilizar a BSV até uma capacidade remanescente de 40% (CFSV – Capacidade ao fim da segunda vida). A partir desse ponto, muito provavelmente o joelho de degradação já teria sido atingido e seria inseguro continuar operando o dispositivo nessas condições. Por isso, no caso aqui apresentado, a CFSV é estabelecida como 40%. A respeito da capacidade ao fim de primeira vida, 75% como informado anteriormente, resultando num fator de saúde de 58%. O fator de desconto para produtos usados adotado no modelo é de 75% (Neubauer, 2012). A previsão de preços das novas baterias é obtida a partir de (Kamath *et al.*, 2023), que se baseia em dados da Bloomberg New Energy Finance (BNEF) até o ano de 2026. A partir desse ponto, prevê-se uma redução de 25% até 2032, seguida por uma redução anual de 1% de 2032 a 2050. Com isso, calcula-se o preço de venda das baterias usadas.

Para saber o quanto o proprietário da bateria recebe desse valor de venda, basta subtrair o custo de reaproveitamento do preço calculado. Assume-se o caso mais otimista

do estudo realizado pela NREL (2015), em que caso dados sobre o estado de saúde de baterias estejam disponíveis antes de sua aquisição, o custo de reaproveitamento pode ser de 20 \$/kWh. Tendo em vista as discussões na Europa a respeito da obrigatoriedade do rastreamento da condição das baterias no apelidado *battery passport*, entende-se que essa é uma premissa válida (Circularise, 2023). Além disso, dentro do escopo de custo de recondicionamento, assume-se que a margem de lucro do agente que realiza a remanufatura é de 10% do valor do custo.

No caso da rota da reciclagem, os valores utilizados para o preço de cada material considerado são resumidos na Tabela 4.

Tabela 4: Preço adotado para cada material (\$/kg)

	Li	Co	Ni	Mn	Al	Cu	Aço
Preço (\$/kg)	43	33	0.00419	21	0.6	2.2	8.3

Fonte: Daily Metal Prices, 2023

Assume-se que o custo de reciclagem, conforme relatado por Lander *et al.* (2021), seja de 17,75 dólares por quilowatt-hora (\$/kWh) em 2020, com uma projeção de redução anual de 1% até o ano de 2050.

Os demais passos da sequência serão abordados no capítulo de resultados.

4- Resultados

O presente capítulo dedica-se à apresentação e análise dos resultados obtidos, ao se rodar o modelo construído com os valores de entrada descritos na metodologia do estudo de caso. Os dados coletados e as informações processadas ao longo do estudo são sistematicamente expostos, a fim de proporcionar uma visão abrangente e objetiva das constatações alcançadas.

A partir das informações referentes à frota de veículos elétricos em circulação e às características de durabilidade das baterias durante sua primeira utilização, efetuou-se o cálculo das adições e retiradas anuais dos mesmos. Os resultados destas análises são a seguir apresentados.

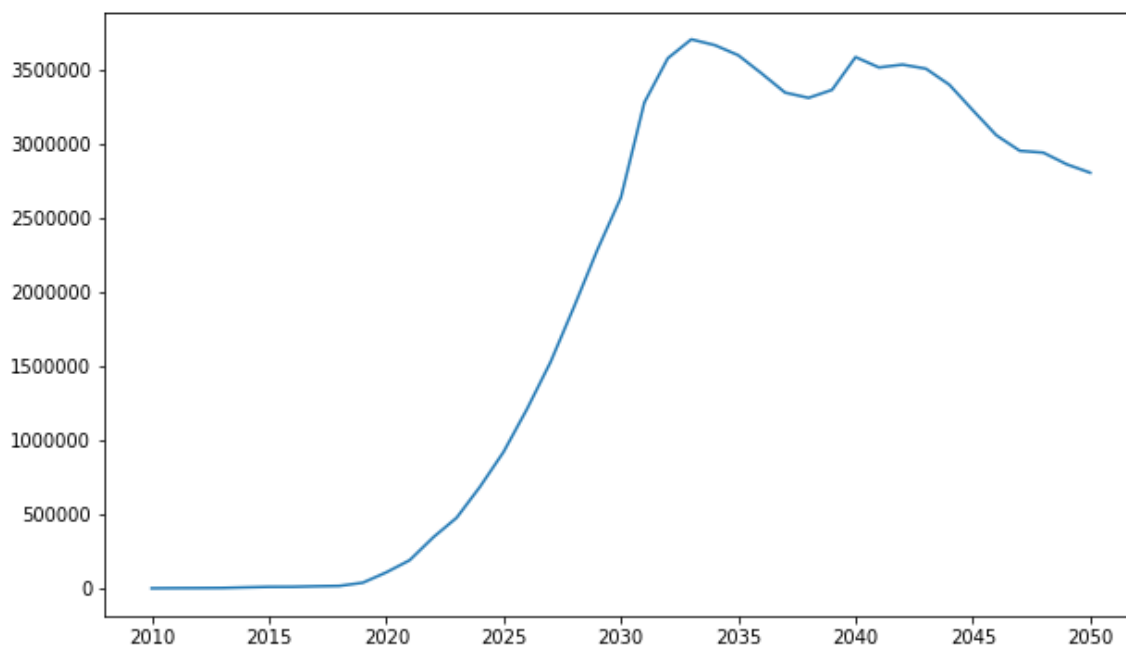


Figura 16: Adição anual de baterias automotivas

Fonte: *National Grid ESO* (2023) e elaboração própria

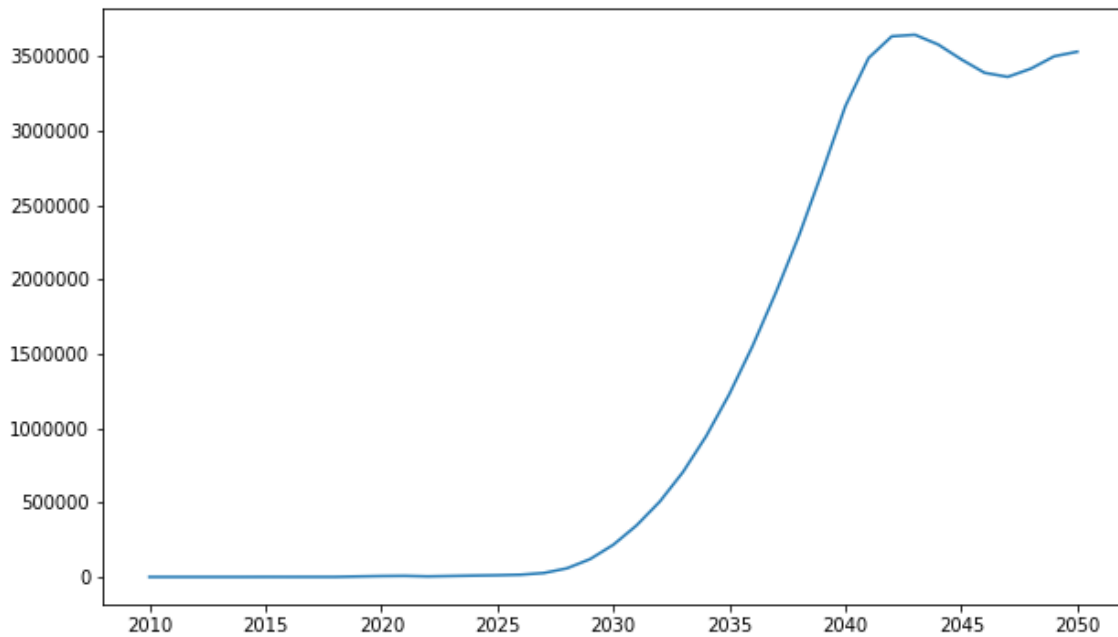


Figura 17: Quantidade anual de baterias atingindo fim de primeira vida

Fonte: *National Grid ESO* (2023) e elaboração própria

Analisando os dados de venda de novos BEVs, que se refletem na Figura 16, percebe-se que as mesmas, no caso do Reino Unido, demonstraram resiliência, apesar de certos desafios. Em 2022, de acordo com o relatório FES23, o surgimento de diversos novos modelos de carros elétricos contribuiu para uma adoção crescente dessa tecnologia (*National Grid ESO*, 2023). O mesmo estudo indica que as perspectivas de crescimento a curto prazo de BEVs permanecem positivas, no entanto, o setor enfrenta alguns obstáculos.

Os preços das baterias, que estavam em declínio constante, têm enfrentado uma pressão crescente de subida devido ao aumento dos preços das matérias-primas necessárias. Isso, somado ao aumento no custo de vida devido à crise energética causada pela guerra da Ucrânia, resulta em vendas de carros novos que permanecem abaixo dos níveis pré-pandemia. Assim, embora os BEVs estejam ganhando gradualmente participação de mercado, o problema do preço das baterias dificulta a adoção em massa.

Apesar disso, todos os casos apresentados no relatório *Future Energy Scenarios 2023* apontam para um forte crescimento na frota de veículos elétricos. Além disso, no cenário *Consumer Transformation* (escolhido como referência de dados nesse estudo de caso), prevê-se que a introdução de Veículos Autônomos após 2035 levará a uma redução no número total de carros nas estradas. Espera-se também que alguns consumidores no

longo prazo optarão por soluções de mobilidade como serviço e reduzirão a quantidade de carros em suas residências. Por conta disso, o panorama anual de adições de BEV (Figura 16) tem seu pico entre 2030 e 2035 e segue uma trajetória decrescente deste ponto em diante.

A partir da metodologia descrita na Seção 3.2, o número absoluto de baterias que chegam ao fim de primeira vida, ilustrado na Figura 17, pode ser traduzido em disponibilidade de material que pode ser reciclado ou também em energia disponível, em forma de bateria, que pode ser reutilizada, conforme será apresentado pelas Figuras 18 e 19, respectivamente. Além disso, para de fato apresentar o que estaria disponível nos potenciais mercados secundários, devem-se considerar as a eficiência de reciclagem e de reutilização mencionadas anteriormente.

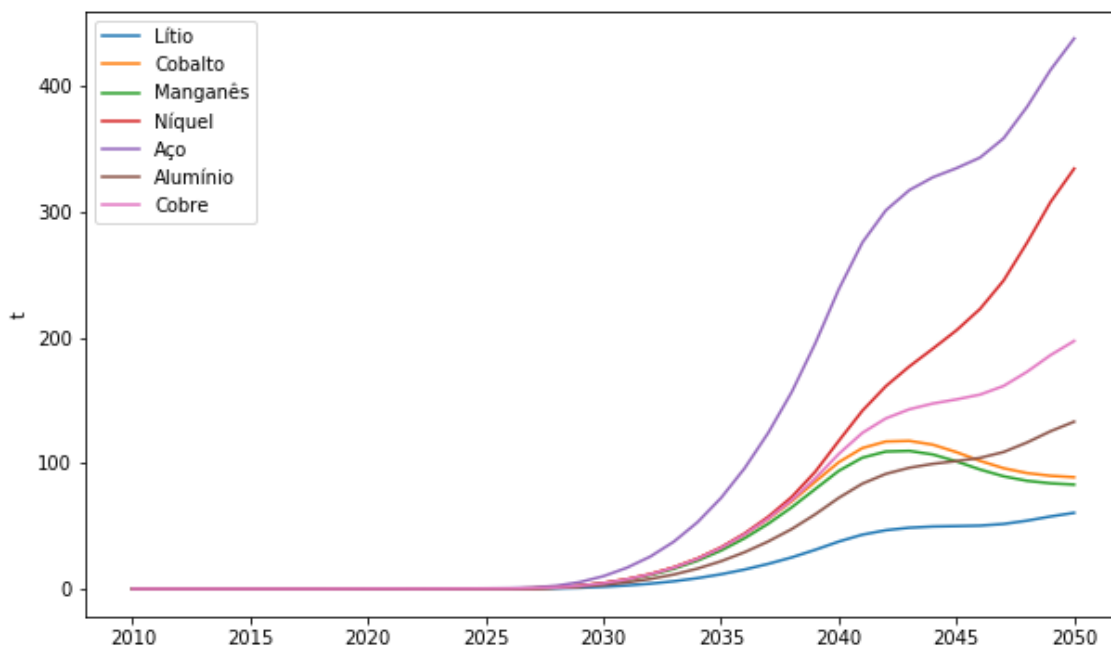


Figura 18: Disponibilidade anual de materiais para reciclagem

Fonte: Elaboração própria

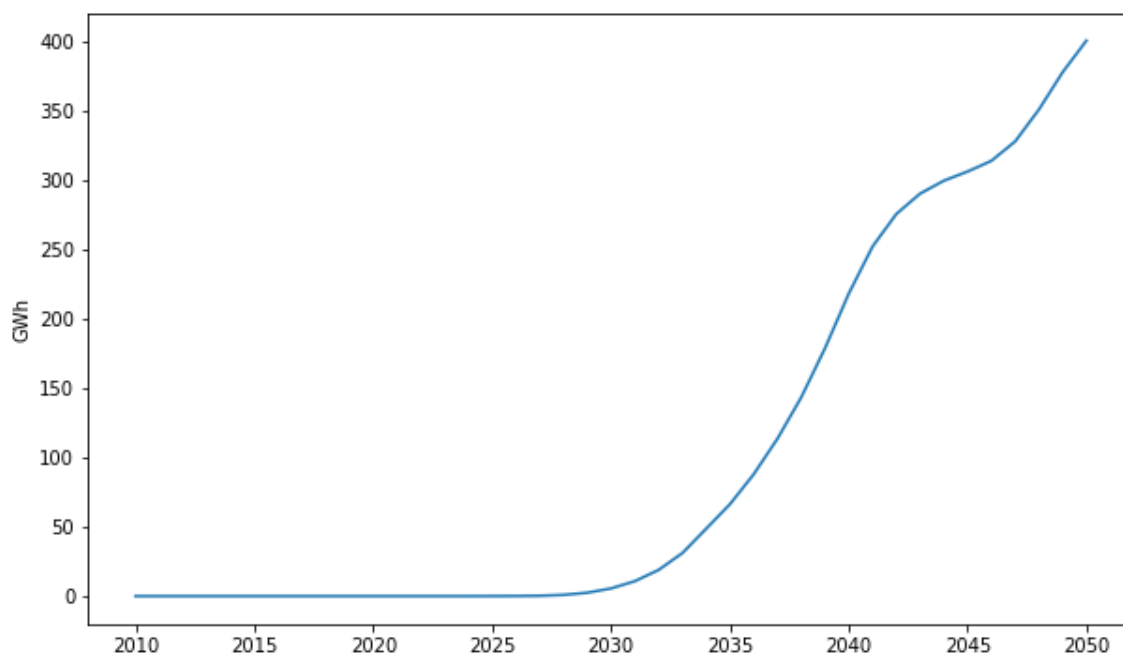


Figura 19: Capacidade disponível para segundo uso

Fonte: Elaboração própria

Devido à mudança tecnológica que se prevê, ao longo do tempo, nessa simulação, de baterias tendendo a modelos com menor concentração de cobalto e manganês, para maiores concentrações de níquel, os resultados indicam, a partir do fim dos anos 2030, uma bifurcação nas linhas que representam a disponibilidade dos materiais citados.

Apesar de uma estabilização na quantidade de baterias que chegam ao fim da primeira a partir de 2040, conforme mostrado pela Figura 17, o aumento na capacidade média desses dispositivos (Figura 13) impede que a trajetória da disponibilidade de materiais para reciclagem e de capacidade disponível para segundo uso siga uma tendência decrescente ao fim do período de análise (próximo a 2050).

Seguindo em frente para ao passo 2 do roteiro apresentado no capítulo 3.1.5, o resultado da modelagem para calcular a demanda por novos BESS é apresentado a seguir (é importante notar que a Figura 15 apresenta o volume instalado desses dispositivos e não a adição anual de novos sistemas).

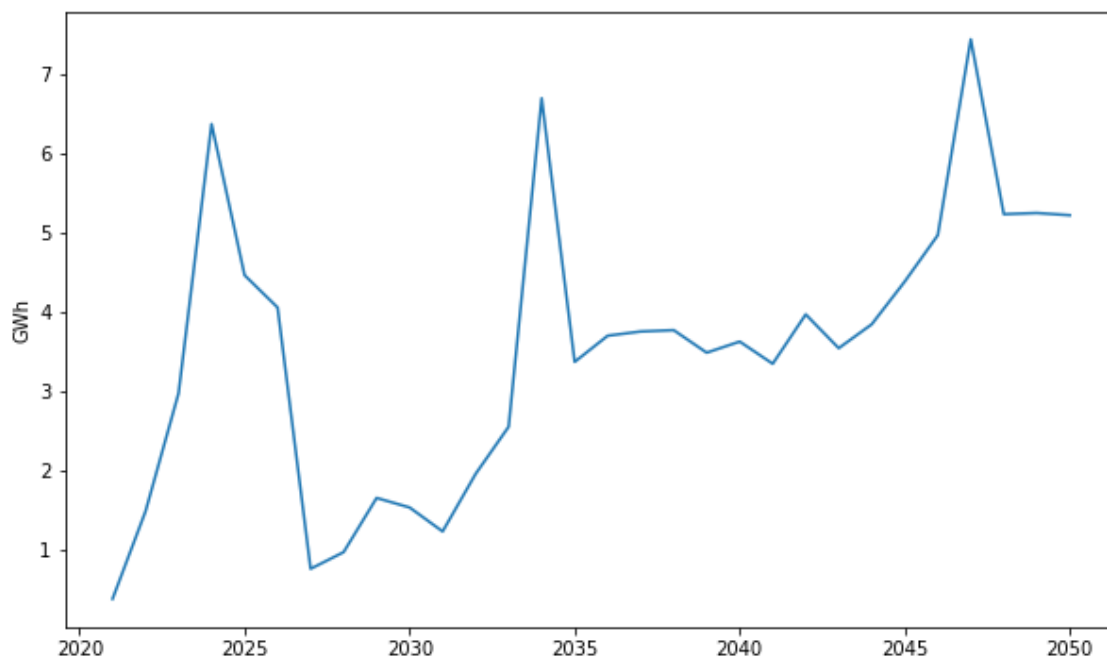


Figura 20: Demanda incremental por BESS

Fonte: *National Grid ESO (2023)* e elaboração própria

Em 2022, último ano com dado histórico de acordo com a base de dados utilizada, a capacidade instalada de armazenamento a bateria era de 2,8 GW. Sendo que a maior parte dos dispositivos tem capacidade de descarga de no máximo uma hora. Assim, o volume instalado nesse mesmo ano é muito semelhante à capacidade, sendo 3,1 GWh. De acordo com FES23 (*National Grid ESO, 2023*), espera-se que o volume instalado de armazenamento a bateria cresça 51 GWh de 2022 a 2050, proporcionando um panorama robusto de adições anuais para atingir esse marco, conforme apresentado pela Figura 20.

Compara-se a demanda por BESS com a capacidade final disponível para reutilização visando entender quando a demanda pode ser um gargalo para a aquisição dos dispositivos retirados.

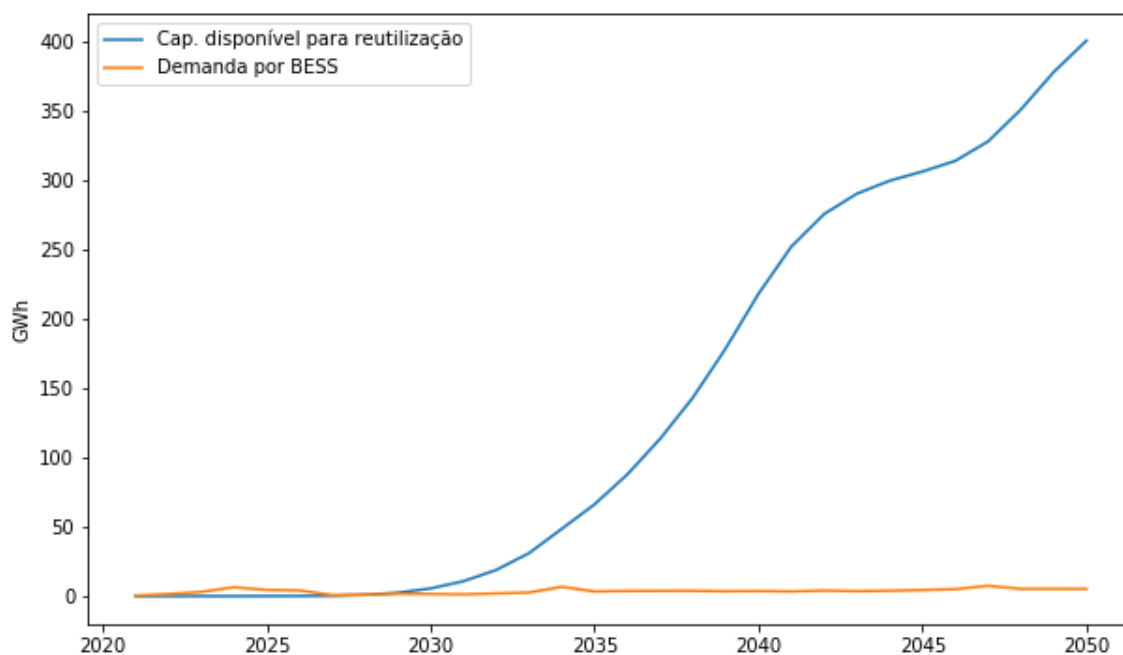


Figura 21: Comparação de demanda por BESS com capacidade disponível para reutilização

Fonte: *National Grid ESO (2023)* e elaboração própria

Analisando a Figura 21, fica evidente a diferença de magnitude entre a previsão de demanda por novos sistemas de armazenamento de energia e a quantidade de capacidade disponível para segunda vida. A aquisição de baterias usadas fica muito restringida por quanto o setor elétrico demanda desses dispositivos. Dessa forma, mesmo em períodos em que a rota da reutilização for a melhor opção de fim de vida para as baterias, opções alternativas como reciclagem serão extremamente necessárias para lidar com essa imensa expectativa de quantidade de baterias que serão retiradas anualmente. Isso devido à capacidade limitada da reutilização de absorver esse volume.

A próxima etapa na análise da oferta de baterias em segunda vida consiste em estimar o quanto cada rota valoriza os dispositivos de acordo com as equações 5 e 7. No que se refere à reutilização, como mencionado anteriormente, adotou-se um desconto de produto usado de 75% conforme Neubauer *et al.* (2012). O fator de saúde é de 58%, o que se encontra dentro do intervalo testado por Kamath *et al.* (2023). Quanto ao preço das baterias de íon-lítio novas, ele segue a metodologia previamente descrita e, no que tange ao custo de reaproveitamento, considera-se apenas o valor mínimo reportado pelo estudo realizado pela NREL (2015), que é de 20 dólares por quilowatt-hora (\$/kWh). Com os quatro dados de entrada definidos, pode-se calcular o valor de compra de baterias usadas. O resultado é apresentado a seguir:

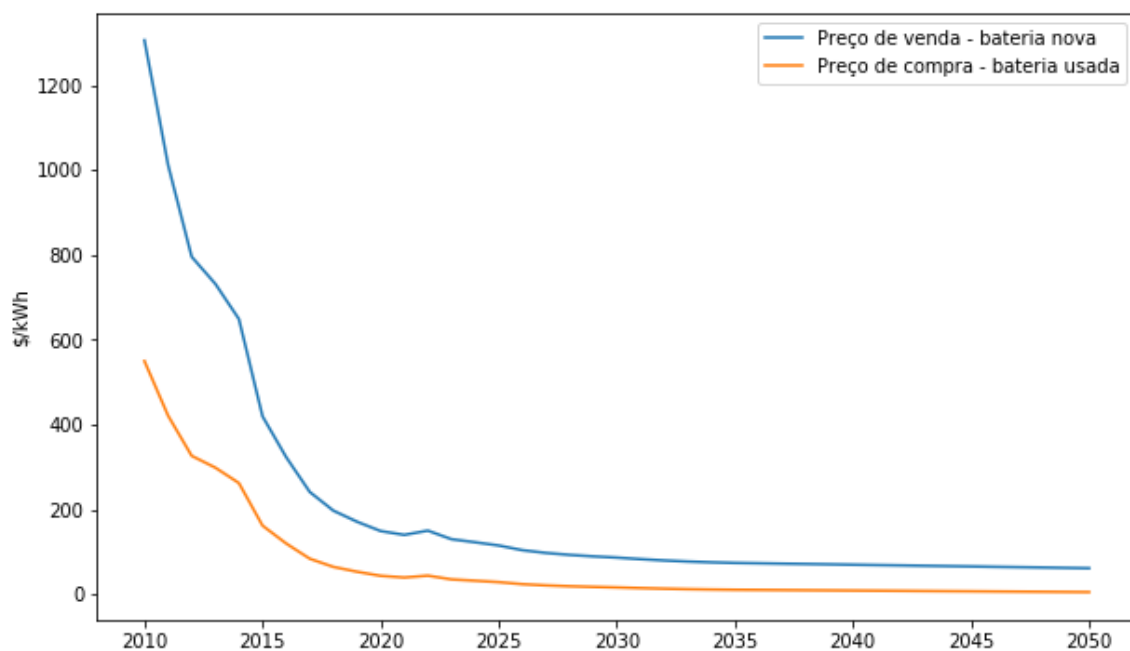


Figura 22: Preço de compra de uma bateria usada de acordo com a rota da reutilização

Fonte: BNEF (2023), Neubauer *et al.* (2012) e elaboração própria

De acordo com a metodologia apresentada no capítulo 3, o preço de compra de baterias usadas será uma porção do preço de venda de baterias novas (Figura 22). Assim, ambas as curvas terão o mesmo formato. Quanto maior o preço de novas baterias, maior será a lucratividade da rota da reutilização.

Há um consenso na indústria e na academia de que baterias de íon lítio continuarão seguindo uma forte trajetória decrescente de custo, o que a médio e longo prazo reduz substancialmente a viabilidade econômica de aplicações de segunda vida.

Em 2021, o preço médio de baterias de íon lítio reportado pela *Bloomberg New Energy Finance* (BNEF, 2023) foi de 151 \$/kWh. Nessa faixa de preço, há todo um espaço para acomodar os custos de reaproveitamento, o que possibilita altos valores para o preço de compra, que é o preço repassado ao detentor da bateria. Já em 2036, o preço modelado nesse estudo de caso para novas baterias é de 74 \$/kWh, pouco mais da metade do valor em 2021. Essa grande queda consome grande parte do espaço existente para acomodar os custos citados, lembrando que o cálculo do preço de compra inclui também decréscimos associados ao fator de saúde e ao desconto de produto usado. Já em 2050, último ano de análise nesse caso, o preço esperado de baterias novas é de 62,5 \$/kWh. O resultado do preço de compra para esse ano é de apenas 7 \$/kWh, muito próximo a um ponto de inviabilidade econômica.

O resultado da valoração da rota da reciclagem de acordo com os dados de entrada definidos anteriormente é expresso a seguir, para cada tecnologia que se encontra no escopo, tendo em vista que a composição material delas é diferente, conforme apresentado na Tabela 3.

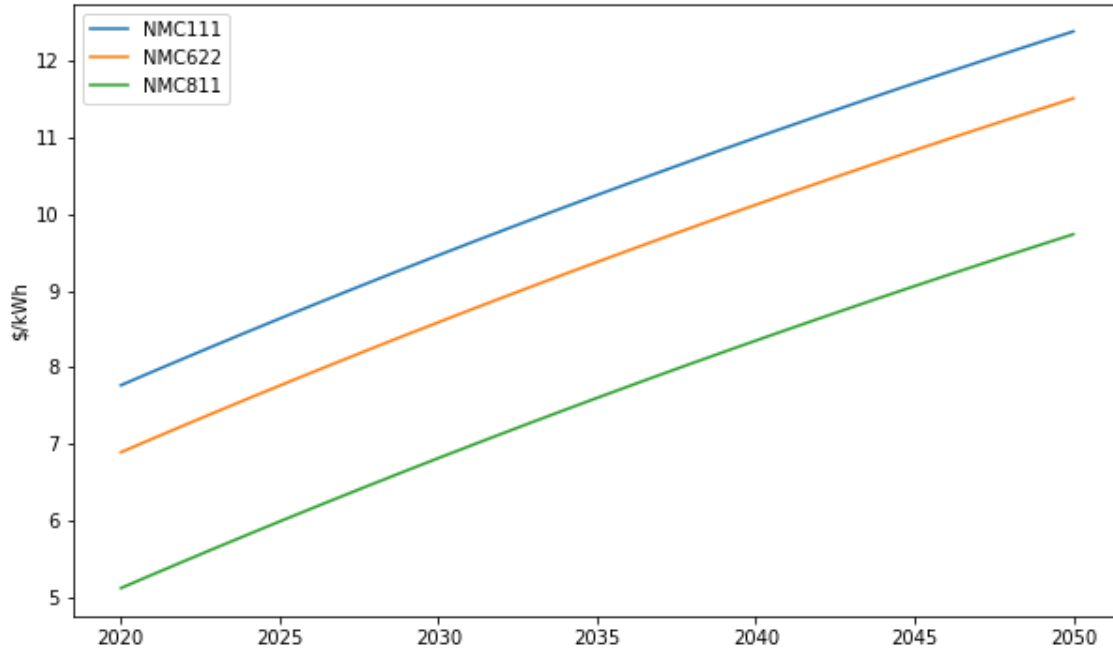


Figura 23: Preço de compra de uma bateria usada de acordo com a rota da reciclagem

Fonte: Olivetti *et al.* (2017), Richa *et al.* (2014) e elaboração própria

Tendo em vista o alto preço do cobalto em comparação aos demais materiais, (Tabela 4), baterias com menor concentração desse mineral oferecerão um menor valor para reciclagem, assim como mostra a Figura 23. Assim, a decisão a respeito da opção de fim de vida dependerá do tipo de bateria em questão, conforme apresentado pela figura a seguir:

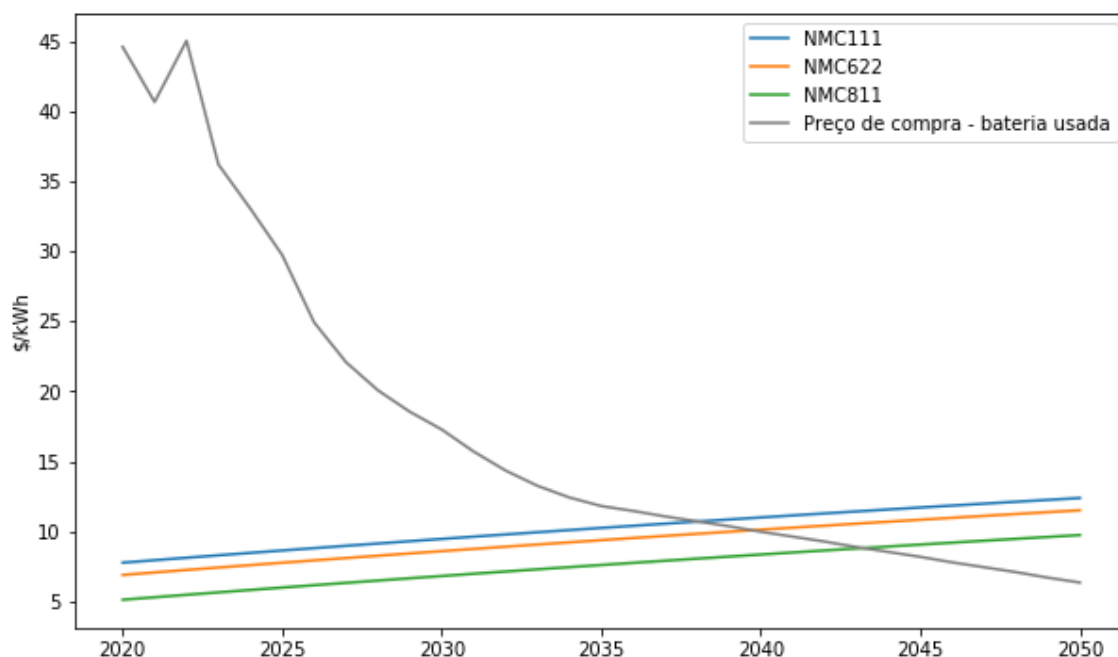


Figura 24: Comparação da rota da reciclagem e rota da reutilização

Fonte: BNEF (2023), Olivetti *et al.* (2017), Richa *et al.* (2014) e elaboração própria

Analisando a Figura 24, percebe-se que a reutilização será a opção prioritária até a segunda metade dos anos 2030. Após isso, haverá um intervalo de anos em que, dependendo do tipo da bateria a rota da reciclagem pode ser mais rentável. Já a partir do início da década de 2040, será sempre preferível seguir com a reciclagem, não havendo mais aquisição de baterias para serem reutilizadas. Essa é uma tendência natural ao se considerar que o custo de fabricação de uma bateria nova daqui a 20 anos será tão baixo que não fará sentido técnico e econômico adquirir uma bateria usada quando se pode comprar uma nova por um preço muito baixo.

Após a identificação das rotas de maior rentabilidade e suas respectivas limitações, é possível avançar para a etapa derradeira desse trabalho, que é estimar tanto a disponibilidade de baterias automotivas em segunda vida quanto a receita decorrente da introdução desse mercado. O gráfico a seguir ilustra a quantidade de baterias usadas que são compradas para realização de segunda vida.

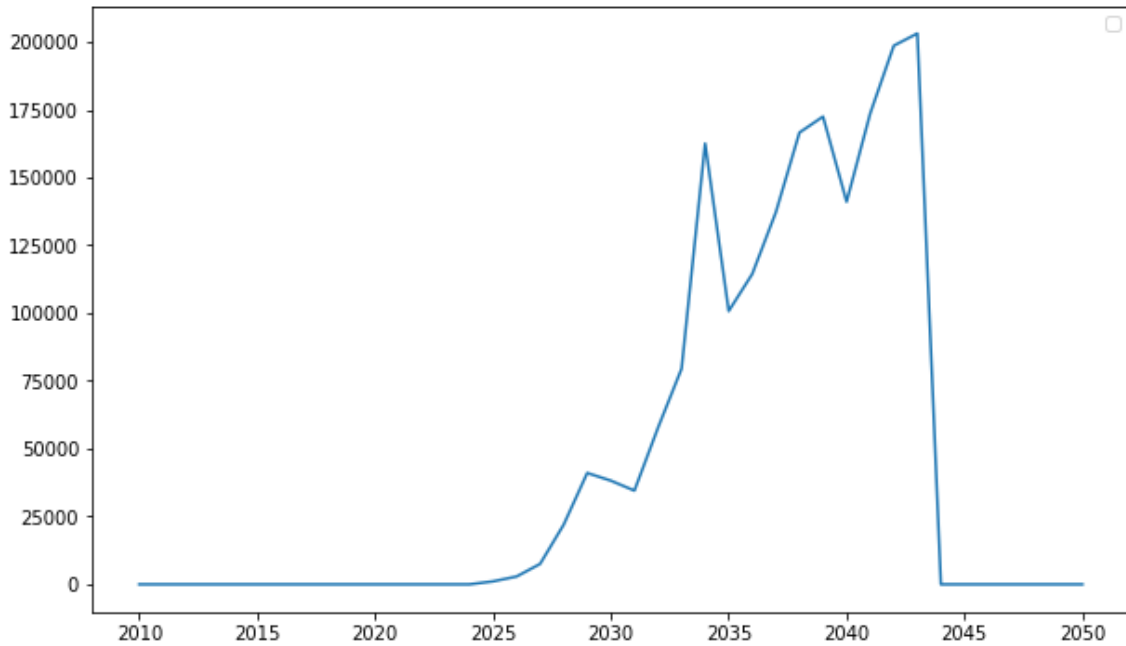


Figura 25: Quantidade de baterias que seguem a rota da reutilização por caso de CFPV

Fonte: Elaboração própria

A evolução do cenário de aquisição de baterias usadas inicia-se com uma inclinação acentuada tão logo a segunda vida se torna uma alternativa disponível, como ilustrado pela Figura 25. O ano de 2029 marca o momento em que a demanda por capacidade de armazenamento se torna um fator limitante para esse mercado. Considerando a reduzida necessidade de novos sistemas de armazenamento de energia (BESS) em torno desse ano, observa-se uma diminuição nas aquisições de baterias em fim de vida.

À medida que a demanda por BESS aumenta, conforme ilustrado na Figura 20, a quantidade de baterias em segunda vida volta a seguir uma trajetória ascendente até que atinge um ponto de estabilização. Isso ocorre devido às restrições impostas pelo lado da demanda ou pela crescente atratividade da reciclagem em comparação à reutilização, que gradativamente se torna a opção preferível, não havendo mais mercado para baterias em segunda vida.

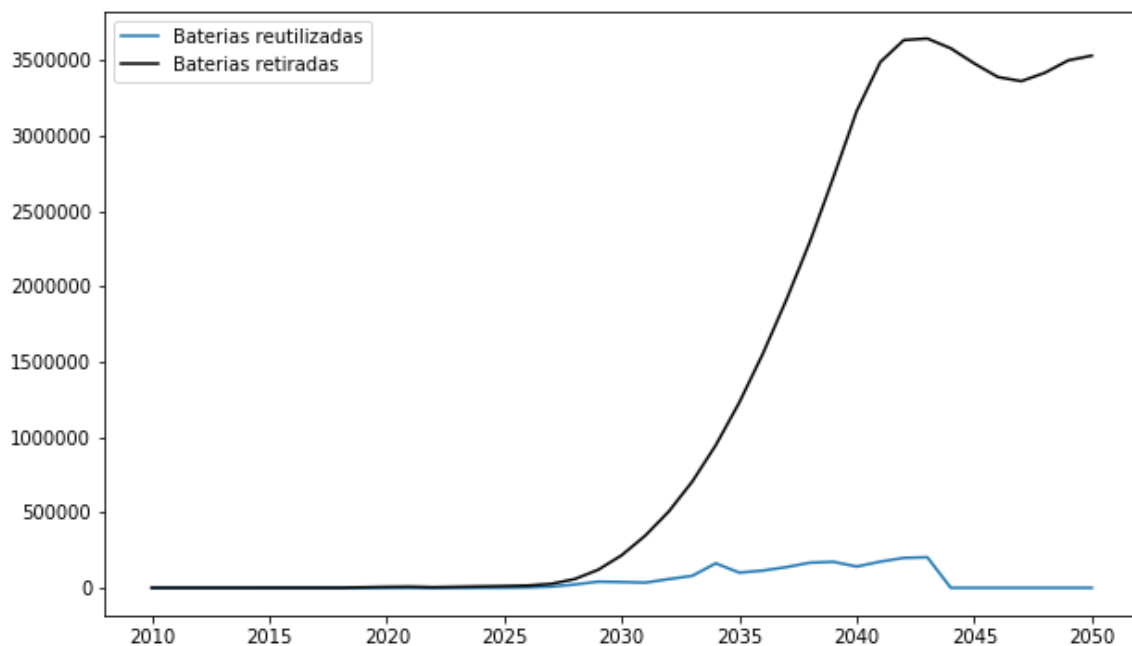


Figura 26: Comparação entre baterias que optam pela reutilização e o total de baterias retiradas

Fonte: Elaboração própria

Ao analisar o número de baterias que atingem o fim de sua primeira vida útil, torna-se evidente que a reutilização, dentro do contexto atual, não será uma alternativa amplamente adotada para gerenciar o crescente volume de baterias retiradas. A Figura 26 ilustra essa ideia ao mostrar a diferença de magnitude entre as variáveis. Vale ressaltar que, neste estudo de caso, não foram estabelecidas limitações no que diz respeito à cadeia da reciclagem. Foi presumido que essa via seria capaz de absorver todas as baterias que optassem por seguir esse caminho. Contudo, a realidade é consideravelmente mais complexa; seria necessária uma infraestrutura extremamente robusta para viabilizar a reciclagem dessa considerável quantidade de materiais, que requerem algum tipo de tratamento ou serão simplesmente descartados.

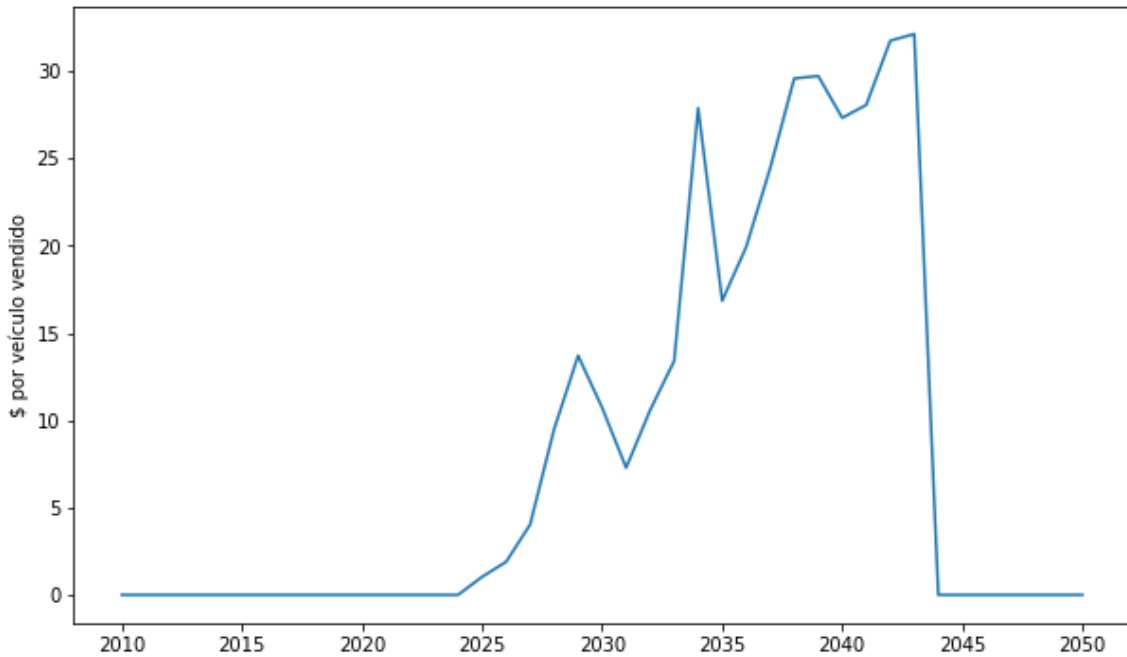


Figura 27: Valor gerado pelo serviço de segunda vida por veículo vendido no mesmo ano

Fonte: Elaboração própria

O último cálculo realizado pelo modelo é a divisão da receita que é gerada pelo serviço de segunda vida pelo número de veículos elétricos novos que são adicionados todo ano, resultado que é mostrado pela Figura 27. Faz-se isso visando entender se a captura desse valor residual pode de alguma forma proporcionar possíveis descontos no preço de novos automóveis elétricos, o que poderia popularizar o acesso à BEVs, acelerando o crescimento do mercado.

Essa opção de certa forma considera que o *ownership* das baterias é das montadoras dos veículos, o que as permite definir o mesmo CFPV (padronizando o processo) e distribuir essa receita adicional em forma de descontos. Caso o *ownership* seja dos compradores dos veículos, poucos conseguiriam vender suas baterias nesse mercado secundário tendo em vista que a demanda por BESS é um fator extremamente limitante (Figura 21), não havendo demanda para a grande maioria. Esses poucos seriam capazes de obter uma receita extra considerável por suas baterias (Figura 22), mas esse mercado não ajudaria na popularização/redução de preço de BEVs.

Observando a Figura 27, percebe-se que os valores se encontram numa faixa consideravelmente abaixo do preço total de um BEV que atualmente se encontra na faixa de EUR 81,969 (European Alternative Fuels Observatory, 2023). Por conta disso, dada as condições estabelecidas nesse cenário, segunda vida não será uma prática capaz de

baratear/popularizar BEVs. Por outro lado, assim como mostrado pela NREL (2015), embora o resultado apresentado não indique que SLB promoverá uma redução significativa no preço de BEVs, essa rota pode eliminar/abater custos associados ao fim de vida das baterias (extração da bateria, descarte, reciclagem), servir como ESS, evitando a operação de térmicas de pico. Assim, o benefício global para a sociedade pode ser bastante grande.

Visando entender o impacto que algumas variáveis podem ter nos outputs do modelo, o capítulo posterior conduz diversas análises de sensibilidade, variando dados de difícil previsão como o custo de reciclagem e a capacidade ao fim da primeira vida (CFPV).

5- Análises de sensibilidade

O presente capítulo está dividido de acordo com a variável de entrada, que será modificada para gerar os cenários alternativos, além de um capítulo final apresentando os casos mais extremos das combinações de todas as variações.

5.1 – Capacidade ao Fim da Primeira Vida (CFPV)

O valor escolhido no cenário base para a variável em foco aqui foi de 75%. Assim como reportado por diversos artigos na literatura (Martinez-Laserna *et al.*, 2018), os critérios de fim de primeira vida definem que as baterias automotivas serão retiradas de uso quando apresentarem uma degradação de 70 a 80% de sua capacidade inicial, tendo em vista que não são mais úteis para seus fins primários.

Dessa forma, o primeiro teste simula o impacto nos *outputs* que a variação da CFPV de 70% a 80% realiza. A Figura 28 apresenta o intervalo de preço de compra resultado dessa variação enquanto a Figura 29 ilustra o intervalo do valor gerado pela segunda vida de acordo com os diferentes *inputs* de CFPV.

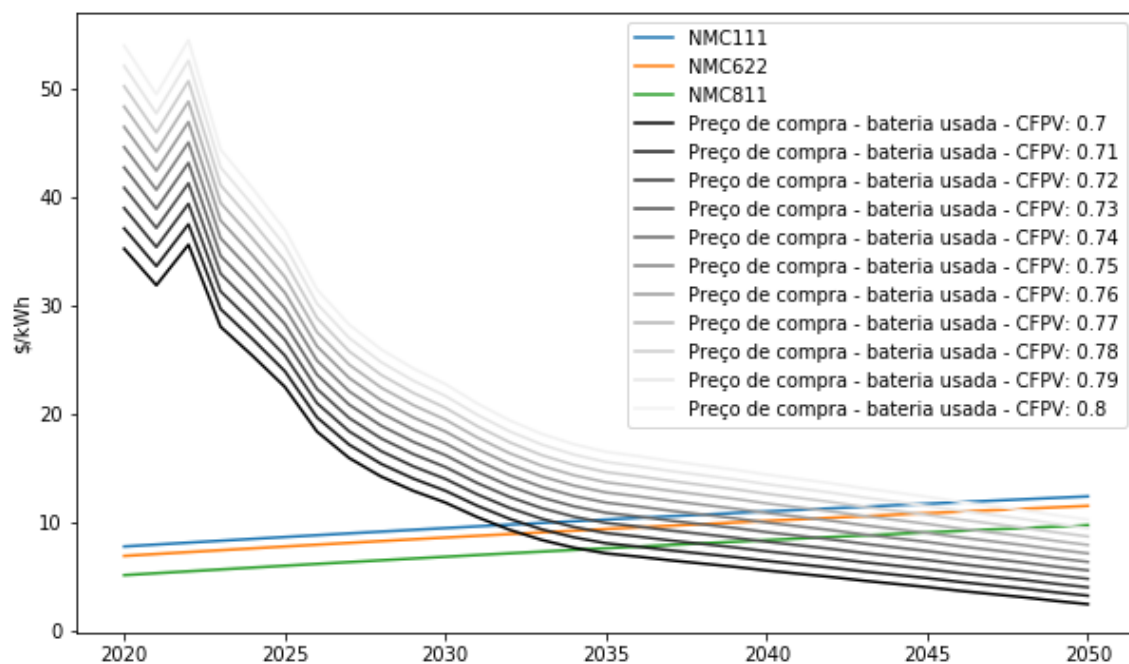


Figura 28: Variação no preço de compra de uma bateria usada de acordo com o *input* de CFPV

Fonte: Elaboração própria

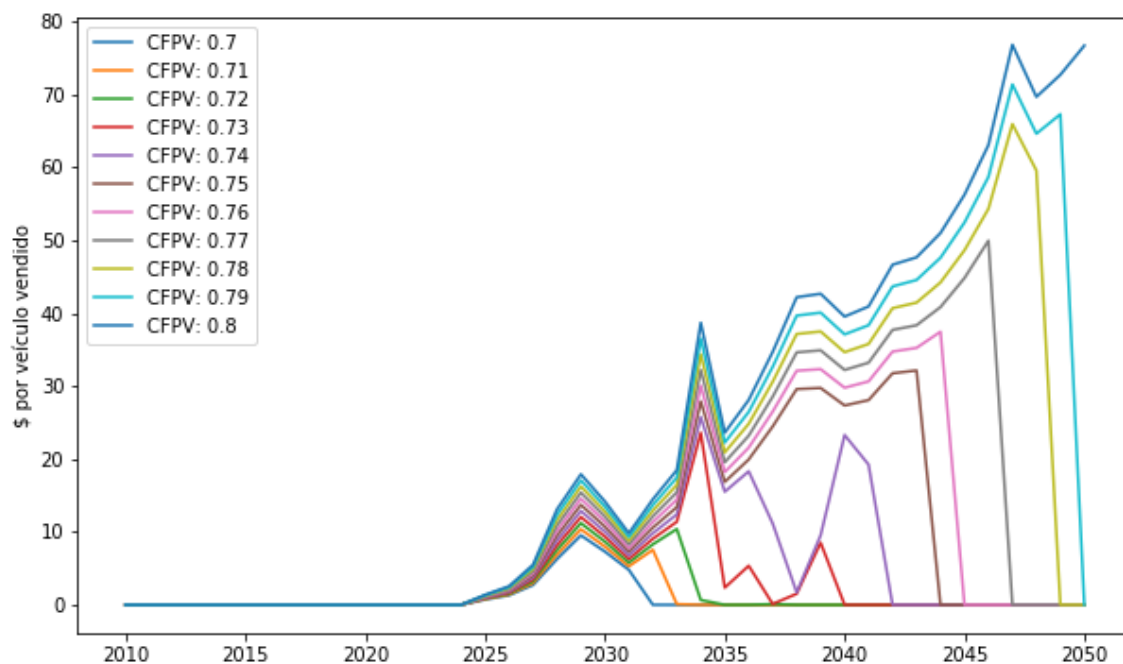


Figura 29: Variação no valor gerado pelo serviço de segunda vida por veículo de acordo com diferentes CFPV

Fonte: Elaboração própria

5.2 – Capacidade Fim de Segunda Vida (CFSV)

Além de incertezas relacionadas ao momento que define o fim da primeira vida da bateria, o mesmo ocorre em relação à segunda vida. Casals *et al.* (2019) apontam que o estado de saúde (SoH) mínimo que BSV podem alcançar depende da aplicação a qual elas foram designadas. No caso de suporte para carregamento rápido de VEs e gerenciamento de carga para consumo próprio, é possível ir até 40%. Valores inferiores a esse limite poderiam apresentar um risco de segurança elevado além de entregar uma performance já muito comprometida. Para outras aplicações como oferecer suporte de energia para um transformador da rede, um limite de 60% é estabelecido.

O caso base do estudo utilizou uma CFSV de 40%. Assim, testa-se elevar essa variável ao passo de 2 em 2% até 60% para visualizar a mudança nos resultados. É relevante notar que todas as análises de sensibilidade partem do cenário base, assim, os valores para todas as outras variáveis permanecerão inalterados. Assim como a Figura 28 e 29 apresentaram as variações de acordo com os casos de CFPV, as Figuras 30 e 31, respectivamente, mostram os resultados referentes à variações de CFSV.

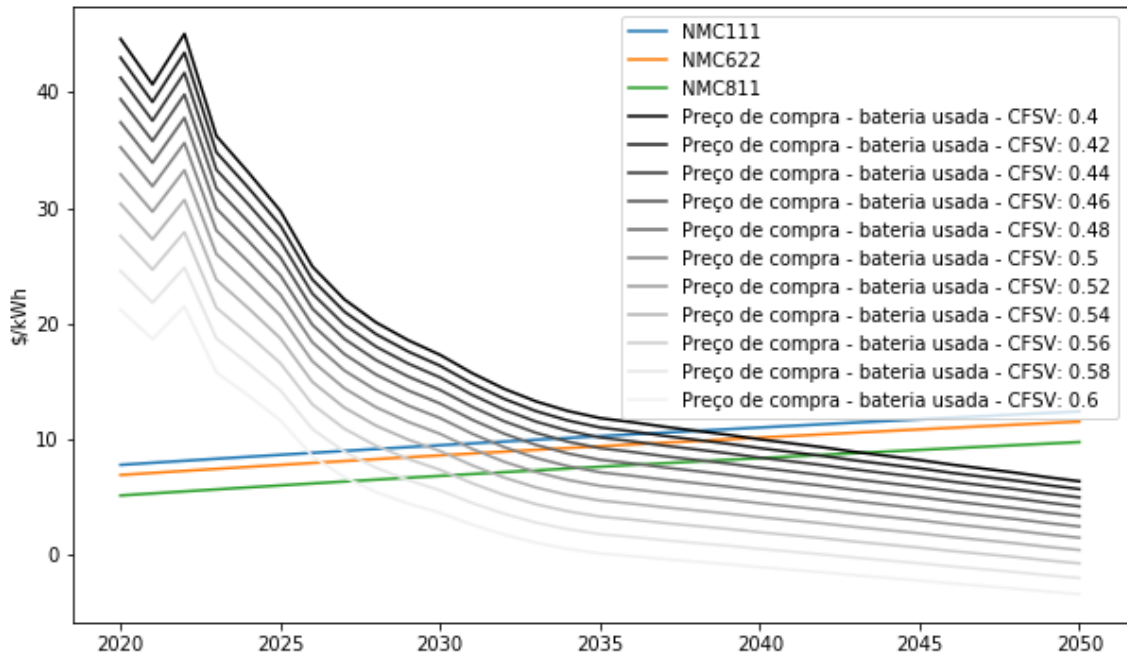


Figura 30: Variação no preço de compra de uma bateria usada de acordo com o *input* de CFSV

Fonte: Elaboração própria

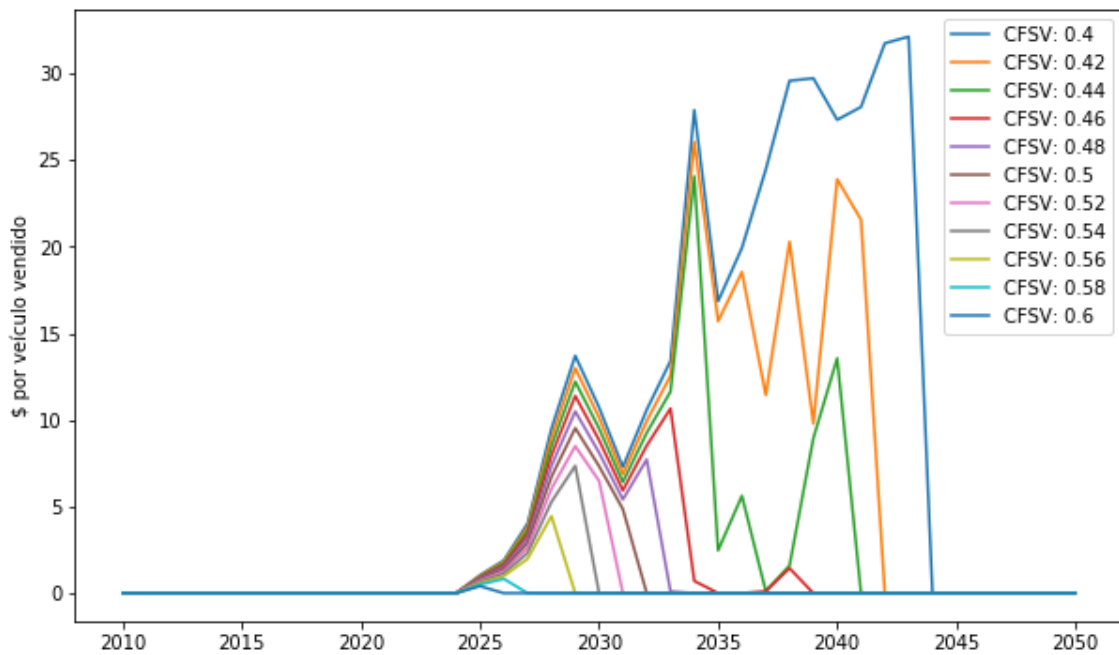


Figura 31: Variação no valor gerado pelo serviço de segunda vida por veículo de acordo com diferentes CFSV

Fonte: Elaboração própria

5.3 – Custo de reciclagem

Em relação ao custo de reciclagem (*Recycling Cost – R.C.*), o caso base assumiu 17,75 \$/kWh em 2020 com redução anual de 1% até 2050. Esse valor se encontra na parte inferior do intervalo reportado por Lander *et al.* (2021) para o Reino Unido. Visando entender como um custo superior impactaria a decisão entre a rota da reciclagem e da reutilização, realiza-se o seguinte teste. Nesse caso alternativo, parte-se de um custo de 23,67 \$/kWh (maior valor reportado pelos mesmos autores) em 2020 com a mesma taxa de redução de 1% ao ano. Os diferentes valores do preço de compra da rota da reciclagem para cada custo são ilustrados na Figura 32 e a Figura 33 mostra o impacto no valor gerado por veículo vendido.

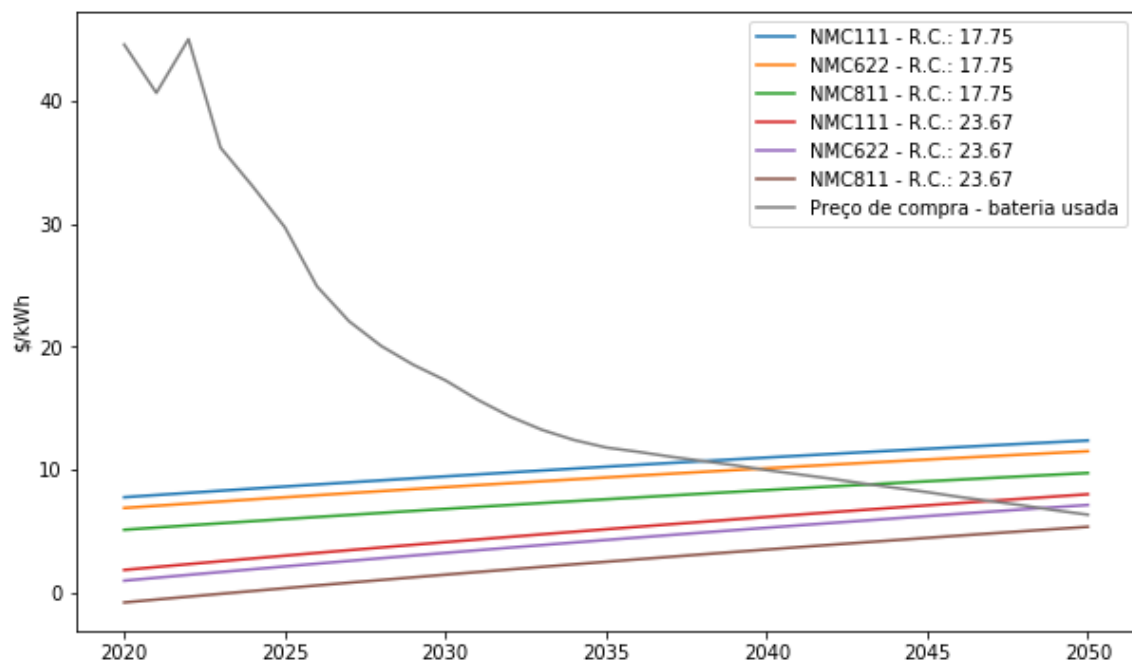


Figura 32: Variação no preço de compra de uma bateria usada de acordo com o *input* de Custo de Reciclagem

Fonte: Elaboração própria

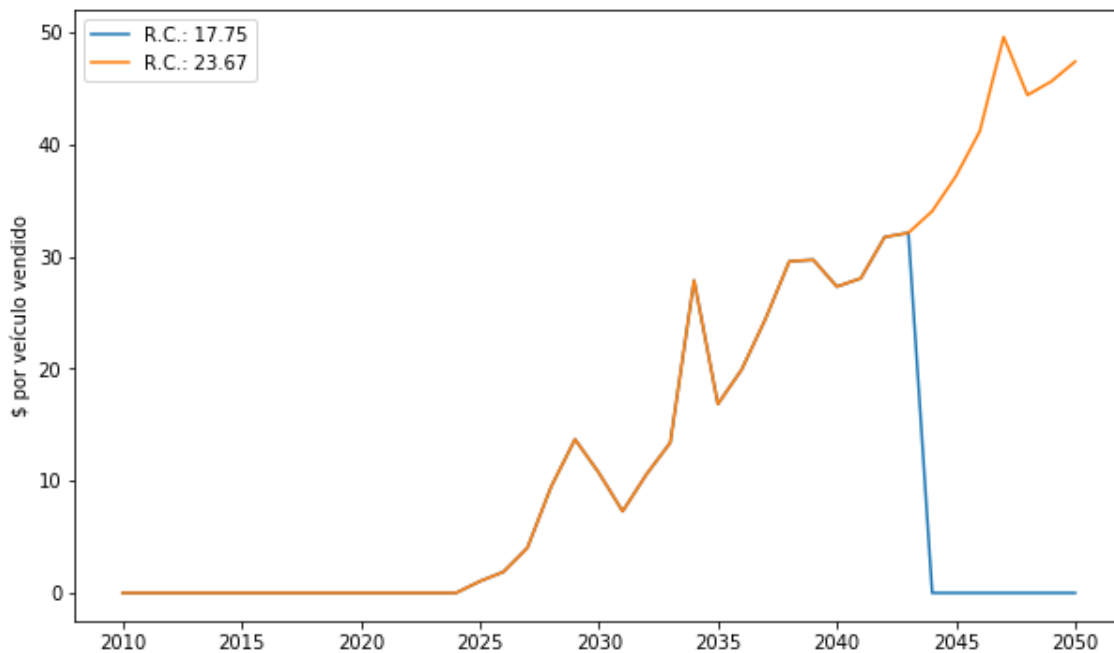


Figura 33: Variação no valor gerado pelo serviço de segunda vida por veículo de acordo com diferentes custos de reciclagem

Fonte: Elaboração própria

5.4 – Casos extremos

Por fim, apresenta-se os casos mais extremos que são os representados pelas combinações que mais ou contribuem ou dificultam a rentabilidade da rota de reutilização.

Os dados de entrada para a simulação mais otimista em relação a segunda vida são: Capacidade ao Fim de Primeira vida de 80%, Capacidade ao Fim da Segunda Vida de 40% e Custo de Reciclagem de 17,75 \$/kWh. Por outro lado, o caso mais difícil à viabilidade da segunda vida tem como variáveis de entrada: Capacidade ao Fim de Primeira vida de 70%, Capacidade ao Fim da Segunda Vida de 60% e Custo de Reciclagem de 23,67 \$/kWh.

As Figuras 34 e 35 apresentam o resultado do modelo para essa seleção de *inputs*.

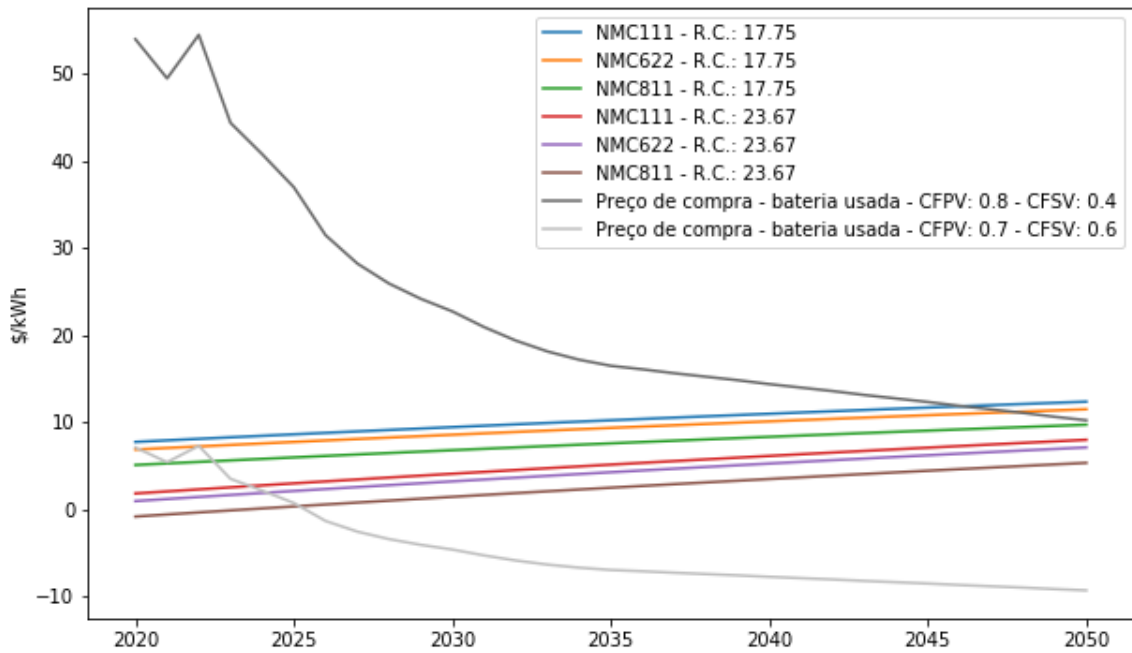


Figura 34: Comparação do preço de compra para os casos extremos

Fonte: Elaboração própria

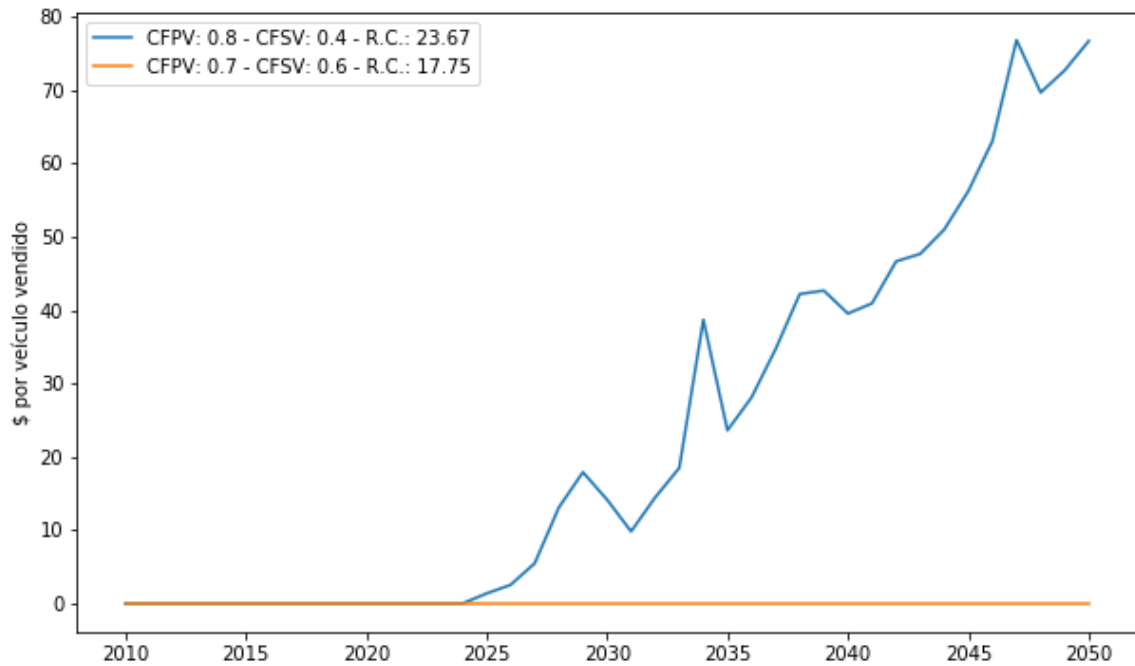


Figura 35: Comparação do valor gerado pelo serviço de segunda vida por veículo de acordo com os casos extremos

Fonte: Elaboração própria

5.5 – Análise dos resultados

A análise das figuras mostra que a rentabilidade de se reutilizar baterias usadas é substancialmente sensível aos *inputs* variados.

No caso da CFPV, aposentar baterias com 80% de sua capacidade remanescente desloca o momento em que, para baterias NMC111, a rota da reciclagem se torna preferível de 2037 (Figura 24) para pós 2045 (Figura 28). Indo na direção contrária, retirar as baterias com 70% de suas capacidades iniciais desloca esse mesmo momento para pouco após 2030. Assim, o intervalo entre esses dois casos é de mais de 10 anos.

Partindo para CFSV, a mudança também é significativa. Caso o limite de uso de baterias em segunda vida seja de 60%, a rota da reciclagem para baterias NMC111 se torna preferível já pouco após 2025 (Figura 30) frente a 2037 no caso base em que a CFSV é de 40%. Assim, de acordo com as simulações realizadas, aplicações de BESS que demandem estados de saúde das baterias de no mínimo 60% dificilmente serão consumidores de baterias em segunda vida.

O processo completo de recondicionamento das baterias, conforme apresentado no capítulo 2, é custoso. Além disso, introduzir um desconto referente à disposição do consumidor a pagar por um produto usado de mesma qualidade prejudica ainda mais a rentabilidade de BSV. Assim, acaba não fazendo sentido realizar todas essas operações a um dispositivo para que o mesmo opere por uma faixa extremamente limitada de estado de saúde. Seria um esforço muito grande para um proveito reduzido.

Em relação à variação do custo de reciclagem, nota-se como um aumento nessa variável muda substancialmente o panorama de preferência entre as rotas (Figura 32). No caso do custo de reciclagem de 23,67 \$/kWh, a opção da reutilização é preferível para baterias NMC811 inclusive em 2050, último ano representado nessas simulações. O que difere do caso base em que antes de 2045 a reciclagem já era a opção preferível para os três tipos de baterias NMC incluídos no escopo do presente estudo.

A respeito da receita gerada por automóvel vendido, nota-se que em nenhum cenário os valores alcançam ordens de grandeza que podem causar um grande impacto no mercado de BEVs.

Os casos extremos providenciam *insights* transmitidos nas análises anteriores. Destaca-se que a rota da reutilização nunca é a opção preferível no caso mais negativo e que, mesmo no caso facilitador, a tendência é de que eventualmente a reciclagem seja a opção a ser escolhida. O que indica que reutilização pode ser uma modalidade usada durante um período de transição e que, no futuro, com uma infraestrutura de reciclagem bem estabelecida e custos reduzidos, as baterias poderão ser utilizadas ao máximo em suas aplicações primárias e recicladas logo em seguida para facilitar a produção de novas.

6- Conclusão

O mercado de veículos elétricos tem crescido exponencialmente e desempenhado um papel cada vez mais relevante no setor de transporte rodoviário. Além disso, é uma tecnologia chave para descarbonizar esse mesmo setor, que é responsável por uma grande parcela das emissões globais de CO₂. Esse forte crescimento resultará numa grande quantidade de baterias atingindo o fim de suas vidas úteis, com o passar dos anos. Esse número substancial de resíduo necessitará de algum tipo de tratamento para evitar o descarte de materiais valiosos e tóxicos, como o lítio e o cobalto.

Além disso, a crescente participação de fontes intermitentes de energia, como solar e eólica, na rede elétrica tem trazido desafios para o setor elétrico. A carência de flexibilidade torna difícil a tarefa de se operar o sistema elétrico. Atender a demanda tendo uma oferta imprevisível e extremamente variável, necessita de mecanismos capazes de lidar essa questão. Dentro desse âmbito, sistemas de armazenamento de energia em baterias se apresentam como uma tecnologia chave para fornecer a tão importante flexibilidade, apesar de ainda existirem desafios no que tange a viabilidade econômica dos mesmos.

Quando a saúde das baterias chega num ponto em que torna seu uso em automóveis inadequado, elas ainda retêm capacidade o suficiente para serem reutilizadas em outras aplicações, como em BESS. Assim, por um lado se tem a necessidade de se lidar com um número crescente de resíduos sendo gerados e, por outro, há uma busca por fontes de flexibilidade, que sejam mais economicamente acessíveis.

Com o objetivo de modelar essa nova possibilidade de elo entre o setor elétrico e o de transporte, este trabalho desenvolveu e apresentou uma metodologia que se propõe calcular a quantidade de baterias que podem ser reutilizadas pelo setor elétrico e o valor gerado por tal aplicação. Para isso, um código em Python foi desenvolvido para implantação do algoritmo proposto. Este código permitiu a importação de dados de entrada como a previsão da frota de BEVs e do preço de baterias de íon lítio, além de abordar de forma flexível dados de entrada que podem ser construídos dentro do modelo como a degradação da bateria durante sua primeira vida. Tendo em vista o caráter incerto de diversos dados, destaca-se a importância de se construir um código que permita a variação dos mesmos, abrindo margem para uma combinação de casos diversos para diferentes variáveis assim como feito no presente trabalho. Cumpre destacar que os

benefícios geopolíticos e sócio ambientais advindos do reaproveitamento de baterias não foram objeto de avaliação, sendo a análise restrita exclusivamente ao domínio econômico.

O objetivo principal do trabalho foi atingido, mas com algumas simplificações que podem ser complexificadas futuramente. A demanda por baterias por parte do setor elétrico está fundamentalmente associada ao preço desses dispositivos. Para capturar com maior precisão o quanto o setor elétrico está disposto a absorver desses dispositivos, é vital que o modelo de baterias em segunda vida esteja integrado com um modelo que simule o setor elétrico, visando entender o quão diferente a demanda por BESS pode ser ao se considerar uma oferta abundante e possivelmente mais barata de baterias, o que poderia catalisar a implementação de fontes intermitentes de geração de eletricidade. Também acrescenta-se como sugestão para futuras melhorias expandir o módulo de degradação da capacidade de baterias para além de uma premissa de CFPV e CFSV. Ao invés disso, acoplar ao presente modelo um módulo que retorne o SoH das baterias ao fim de primeira vida de acordo com a decisão que maximize o valor gerado para seu proprietário (entendendo que vender essa bateria usada é uma opção) e considerando como tipos diferentes de bateria degradam. Outro tópico relevante é avaliar, por meio de pesquisa em diversos mercados diferentes, qual a disposição dos consumidores a pagar por um produto usado que retorna o mesmo serviço.

Em conclusão, a exploração de baterias de segunda vida revelou um caminho promissor para o avanço de sistemas energéticos sustentáveis. A crescente procura por soluções de armazenamento de energia para apoiar a integração de fontes renováveis na rede elétrica sublinhou a importância de reaproveitar baterias usadas de veículos elétricos e outras aplicações. Esta dissertação aprofundou-se em vários aspectos das baterias em segunda vida, visando compreender o potencial tamanho desse mercado, ao modelar a competitividade desses dispositivos frente à rota da reciclagem e a baterias novas.

Destaca-se que os resultados apresentam um futuro predisposto, porém, desafiador para BSV tendo em vista que apenas três casos apresentaram preço de compra negativo ao caminhar em direção a 2050 (os cenários de CFSV de 56%, 58% e 60%). Todos os cenários restantes, dentro do espectro do que foi testado, resultaram em preços de compra positivos, o que representa uma receita adicional para proprietários da bateria automotiva. Atentando para o fato de que preço de compra é o valor recebido pelo proprietário do dispositivo no processo de venda do mesmo.

Apesar disso, a decrescente trajetória de preço de novas baterias de íon lítio, seguindo as expectativas da indústria, é um fator que segura o potencial do mercado do reuso tendo em vista que quanto mais barato for o produto novo, menor será o incentivo para se aplicar o usado. Por outro lado, questiona-se se essas previsões de decaimento de custo de produção de baterias de íon lítio não são muito otimistas considerando os recentes choques na cadeia de suprimentos de diversas tecnologias no mundo das energias renováveis que tem atrasado e cancelado projetos ao redor do mundo (Reuters, 2022). Por conta disso, propõe-se estudos que analisem a evolução e a curva de aprendizado da produção de baterias, visando entender as possíveis trajetórias do custo desses dispositivos. Caso o valor dessas *commodities* sofra eventuais picos de aumento ao longo dos anos, o benefício da reutilização pode ser outro. Por isso é importante entender os impactos causados por subidas de preço de materiais como Lítio, Níquel e Cobalto. O quanto isso contribui para a rota da reciclagem já que o valor recuperado seria superior e o quanto isso contribui com a rota da reutilização já que o preço de baterias novas seria maior, o que elevaria o preço de venda das baterias usadas. Compreender essa relação de forças é vital para o entendimento do futuro do mercado de baterias em segunda vida. Por isso, também inclui-se como sugestão para trabalhos futuros estudar a influência que o preço das matérias-primas das baterias exerce na escolha entre reciclar ou reutilizar, além de realizar mais simulações com diferentes famílias de baterias incluídas para além das NMC.

Dentro do escopo dos materiais que compõe as baterias, recomenda-se a produção de estudos que abordem a geopolítica e os efeitos associados aos mesmos, proporcionando fundamentos para a compreensão das vantagens de se estabelecer estratégias de economia circular.

A respeito da relação com o setor elétrico, nota-se que a demanda por BESS é um fator limitante para o crescimento do mercado de BSV. De acordo com as previsões de crescimento de BEVs utilizadas no presente trabalho, a quantidade de energia, em forma de bateria em fim de primeira vida, que estará disponível nas próximas décadas é substancialmente superior a necessidade prevista por BESS no mercado analisado (Reino Unido).

Assim, a dissertação enfatizou as potenciais vantagens de custo associadas às baterias de segunda vida. O alto custo inicial de fabricação de novas baterias pode ser mitigado estendendo a vida útil das baterias obsoletas, tornando as soluções de armazenamento de energia mais viáveis economicamente. No entanto, são necessários

mais investigações e desenvolvimento para aperfeiçoar os modelos de negócio e otimizar os benefícios econômicos das BSV.

No que tange a possibilidade de se popularizar a adoção de BEVs por uma redução de preço acarretada pela venda da bateria usada, os resultados indicam que essa prática não será suficiente para permitir reduções consideráveis de preço. Apesar disso, fornecer uma extensão de vida útil às baterias automotivas desloca a necessidade de se lidar com esses resíduos em alguns anos. Isso provê mais tempo para o desenvolvimento de uma infraestrutura robusta capaz de absorver as baterias retiradas e evitar o descarte desregulado.

Como o estudo de caso aqui realizado utilizou o Reino Unido como referência, recomenda-se a aplicação do modelo no contexto brasileiro, o que demandaria a coleta e o tratamento de dados específicos.

Frente a tantas incertezas e uma quantidade substancial de variáveis que podem mudar o panorama desse novo mercado, é importante que modelos flexíveis e adaptáveis sejam desenvolvidos para analisar esse amplo espectro de possibilidades. E é justamente esse objetivo que serve como pedra angular para o presente trabalho.

7- Referências

ALI, Atif; MANZAN, Marcellin; ADJOURMANE, Andre. Science-Policy Brief for the Multistakeholder Forum on Science, Technology and Innovation for the SDGs, 2022: Hydrometallurgy for EV batteries. SUNY, USA. Disponível em: <https://sdgs.un.org/documents/hydrometallurgy-ev-batteries-atif-ali-marcellin-manzan-andre-adjourmane-suny-usa-46397>. Acesso em: 10/10/2023.

ALI, Shahid; STEWART, Rodney A.; SAHIN, Oz. Drivers and barriers to the deployment of pumped hydro energy storage applications: Systematic literature review. Cleaner Engineering and Technology, v. 5, 2021, p. 100281. ISSN 2666-7908. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100281>. Acesso em: 09/10/2023.

ALLIED MARKET RESEARCH. Electric Vehicle Solid State Battery Market: Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2025-2035. 2022. Disponível em: <https://www.alliedmarketresearch.com/electric-vehicle-solid-state-battery-market-A31607>. Acesso em: 07/10/2023.

ARGONNE NATIONAL LABORATORY. Reshaping the future of the electric grid through low-cost, long-duration discharge batteries. 2021. Disponível em: <https://www.anl.gov/article/reshaping-the-future-of-the-electric-grid-through-lowcost-longduration-discharge-batteries>. Acesso em: 08/10/2023.

ASME, The American Society of Mechanical Engineers. Solid-State Batteries Drive the Future of the EV Market. 2022. Disponível em: <https://www.asme.org/topics-resources/content/solid-state-batteries-drive-the-future-of-the-ev-market>. Acesso em: 07/10/2023.

AUTOMOTIVE CELLS COMPANY. Battery trends 2022: an industry view on the development of the electric vehicles market (infographic). 2022. Disponível em: <https://www.acc-emotion.com/stories/battery-trends-2022-industry-view-development-electric-vehicles-market-infographic>. Acesso em: 17/05/2023.

BAE, Hyuntae; KIM, Youngsik. Technologies of lithium recycling from waste lithium ion batteries: a review. Materials Advances. [S. l.]: Royal Society of Chemistry

(RSC), 2021. DOI 10.1039/d1ma00216c. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1039/D1MA00216C>. Acesso em: 10/10/2023.

BAUM, Z. J.; BIRD, R. E.; YU, X.; MA, J. Lithium-Ion Battery Recycling—Overview of Techniques and Trends. *ACS Energy Letters*, 2022, 7 (2), 712-719. Disponível em: [10.1021/acseenergylett.1c02602](https://doi.org/10.1021/acseenergylett.1c02602). Acesso em: 17/11/2023.

BIEKER, G. (2021). A global comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of combustion engine and electric passenger cars. The International Council on Clean Transportation (ICCT). Disponível em: <https://theicct.org/publication/a-global-comparison-of-the-life-cycle-greenhouse-gas-emissions-of-combustion-engine-and-electric-passenger-cars/>. Acesso em: 17/11/2023.

BNEF, BloombergNEF. Top 10 Energy Storage Trends in 2023. 2023. Disponível em: <https://about.bnef.com/blog/top-10-energy-storage-trends-in-2023/>. Acesso em: 05/11/2023.

BÖRGER, A.; MERTENS, J.; WENZL, H. Thermal runaway and thermal runaway propagation in batteries: What do we talk about? *Journal of Energy Storage*, Volume 24, 2019, 100649. ISSN 2352-152X. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.01.012>. Acesso em: 06/10/2023.

BRACO, E.; SAN MARTIN, I.; BERRUETA, A.; SANCHIS, P.; URSUA, A. Experimental Assessment of First- and Second-Life Electric Vehicle Batteries: Performance, Capacity Dispersion, and Aging. *IEEE Transactions on Industry Applications*. [S. l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/TIA.2021.3075180>. Acesso em: 10/10/2023.

BREEZE, Paul. Hydrogen Energy Storage. In: BREEZE, Paul (Ed.). *Power System Energy Storage Technologies*. Academic Press, 2018. Chapter 8, p. 69-77. ISBN 9780128129029. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812902-9.00008-0>. Acesso em: 08/10/2023.

BULMAN, Phil. Tesla's Powerwall battery production requires 'super-charged' supply chain. *Renewable Energy Focus*, v. 16, n. 5-6, 2015, p. 126-127. ISSN 1755-0084. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ref.2015.10.012>. Acesso em: 09/10/2023.

CÁRDENAS, B. et al. Short-, Medium-, and Long-Duration Energy Storage in a 100% Renewable Electricity Grid: A UK Case Study. *Energies*, v. 14, p. 8524, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en14248524>. Acesso em: 08/10/2023.

CASALS, L. C.; GARCÍA, B. A.; CANAL, C. Second life batteries lifespan: Rest of useful life and environmental analysis. *Journal of Environmental Management*. [S. l.]: Elsevier BV, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.046>. Acesso em: 18/05/2023.

CERAN, Bartosz et al. PV systems integrated with commercial buildings for local and national peak load shaving in Poland. *Journal of Cleaner Production*, v. 322, 2021, p. 129076. ISSN 0959-6526. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129076>. Acesso em: 08/10/2023.

CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY. Perfecting the EV battery recycling process. *ScienceDaily*, 2022. Disponível em: www.sciencedaily.com/releases/2022/02/220222134712.htm. Acesso em: 10/10/2023.

CHEN, Haisheng et al. Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in Natural Science*, v. 19, n. 3, 2009, p. 291-312. ISSN 1002-0071. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.07.014>. Acesso em: 09/10/2023.

CHEN, Haisheng et al. Storing energy in China—an overview. In: LETCHER, Trevor M. (Ed.). *Storing Energy (Second Edition)*. Elsevier, 2022. Chapter 32, p. 771-791. ISBN 9780128245101. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824510-1.00016-7>. Acesso em: 08/10/2023.

CHEN, W.; JIN, Y.; ZHAO, J.; LIU, N.; CUI, Y. Nickel-hydrogen batteries for large-scale energy storage. Peidong Yang, University of California, Berkeley. 2018. Disponível em: [10.1073/pnas.1809344115](https://doi.org/10.1073/pnas.1809344115). Acesso em: 07/10/2023.

CHEN, X. et al. An overview of lithium-ion batteries for electric vehicles. In: 2012 10th International Power & Energy Conference (IPEC). Ho Chi Minh City, Vietnam, 2012. pp. 230-235. Disponível em: [10.1109/ASSCC.2012.6523269](https://doi.org/10.1109/ASSCC.2012.6523269). Acesso em: 05/10/2023.

CIRCULARISE. Battery Regulation EU: Learn about battery passports. 2023. Disponível em: <https://www.circularise.com/blogs/battery-regulation-eu-what-you-need-to-know-about-battery-passports>. Acesso em: 18/05/2023.

CTCN, Climate Technology Centre and Network. Compressed Air Energy Storage (CAES). 2023. Disponível em: <https://www.ctc-n.org/technologies/compressed-air-energy-storage-caes>. Acesso em: 08/10/2023.

DAI, Q. et al. Life Cycle Analysis of Lithium-Ion Batteries for Automotive Applications. *Batteries*, 5, 48, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/batteries5020048>. Acesso em: 08/10/2023.

DAILY MAVERICK. Gqeberha's role as key port for export of manganese comes with high environmental and health costs. 2022. Disponível em: <https://www.dailymaverick.co.za/article/2022-05-30-gqeberhas-role-as-key-port-for-export-of-manganese-comes-with-high-environmental-and-health-costs/>. Acesso em: 08/10/2023.

DAILY METAL PRICES. Metal Spot Price Charts. 2023. Disponível em: <https://www.dailymetalprice.com/metalpricecharts.php?c=li&u=kg&d=240>. Acesso em: 18/05/2023.

DAVIES, D. M. et al. Combined economic and technological evaluation of battery energy storage for grid applications. *Nat Energy*, v. 4, p. 42–50, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0290-1>. Acesso em: 09/10/2023.

DfT, Department for Transport of the United Kingdom. Road traffic statistics (TRA). 2023. Disponível em: <https://www.gov.uk/government/statistical-data-sets/road-traffic-statistics-tra>. Acesso em: 17/05/2023.

DINCER, Ibrahim; ERDEMIR, Dogan. Fundamentals and Concepts. In: DINCER, Ibrahim; ERDEMIR, Dogan (Eds.). *Heat Storage Systems for Buildings*. Elsevier, 2021. Chapter 1, p. 1-35. ISBN 9780128235720. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823572-0.00007-2>. Acesso em: 08/10/2023.

DIVYA, K. C.; ØSTERGAARD, Jacob. Battery energy storage technology for power systems—An overview. *Electric Power Systems Research*, v. 79, n. 4, 2009, p.

511-520. ISSN 0378-7796. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2008.09.017>. Acesso em: 09/10/2023.

DOE, U.S. Department of Energy. Batteries for Electric Vehicles. 2023. Disponível em: https://afdc.energy.gov/vehicles/electric_batteries.html. Acesso em: 05/10/2023.

DOE, U.S. Department of Energy. The History of the Electric Car. 2014. Disponível em: <https://www.energy.gov/articles/history-electric-car>. Acesso em: 15/11/2023.

DONG, Q.; LIANG, S.; LI, J.; KIM, H. C.; SHEN, W.; WALLINGTON, T. J. Cost, energy, and carbon footprint benefits of second-life electric vehicle battery use. iScience. [S. l.]: Elsevier BV, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.isci.2023.107195>. Acesso em: 10/10/2023.

ECO TREE LITHIUM. Lead acid vs. Lithium batteries – Which one utilize the better technology. 2022. Disponível em: <https://ecotreelithium.co.uk/news/lead-acid-vs-lithium-batteries/>. Acesso em: 07/10/2023.

ENERGY-STORAGE.NEWS. At 300MW / 1,200MWh, the world's largest battery storage system so far is up and running. Disponível em: <https://www.energy-storage.news/at-300mw-1200mwh-the-worlds-largest-battery-storage-system-so-far-is-up-and-running/>. Acesso em: 09/10/2023.

ENGEL, H.; HERTZKE, P.; SICCARDO, G. Second-life EV batteries: The newest value pool in energy storage. 2019. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/second-life-ev-batteries-the-newest-value-pool-in-energy-storage>. Acesso em: 17/11/2023.

ESN, Energy Systems Network. Energy Storage Roadmap Report. 2017. Disponível em: <https://energysystemsnetwork.com/projects/energy-storage-roadmap-report/>. Acesso em: 05/10/2023.

ETEKWARE. What Is the Energy Density of a Lithium-ion Battery? 2022. Disponível em: <https://etekware.com/energy-density-lithium-ion-battery/>. Acesso em: 05/10/2023.

EUROPEAN ALTERNATIVE FUELS OBSERVATORY. Electric vehicle model statistics. 2023. Disponível em: <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/policymakers-and-public-authorities/electric-vehicle-model-statistics>. Acesso em: 18/05/2023.

FAMPRIKIS, T. et al. Fundamentals of inorganic solid-state electrolytes for batteries. *Nat. Mater.*, 18, 1278–1291, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41563-019-0431-3>. Acesso em: 07/10/2023.

FAN, X. et al. Battery Technologies for Grid-Level Large-Scale Electrical Energy Storage. *Trans. Tianjin Univ.*, v. 26, 2020, p. 92–103. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12209-019-00231-w>. Acesso em: 09/10/2023.

FARJANA, S. H.; HUDA, N.; MAHMUD, M. A. P. Life cycle assessment of cobalt extraction process. *Journal of Sustainable Mining*, Volume 18, Issue 3, 2019, Pages 150-161. ISSN 2300-3960. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jsm.2019.03.002>. Acesso em: 17/11/2023.

FERRARESE, A. et al. Flexible hydrometallurgy process for electric vehicle battery recycling. *SAE Technical Paper 2022-36-0072*, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.4271/2022-36-0072>. Acesso em: 10/10/2023.

FORTUM. Fortum expands its EV battery recycling operations with a new mechanical processing plant in Finland. 2021. Disponível em: <https://www.fortum.com/media/2021/01/fortum-expands-its-ev-battery-recycling-operations-new-mechanical-processing-plant-finland>. Acesso em: 10/10/2023.

GEELS, F. W. The dynamics of transitions in socio-technical systems: A multi-level analysis of the transition pathway from horse-drawn carriages to automobiles (1860–1930). *Technology Analysis & Strategic Management*, 17:4, 445-476, 2005. Disponível em: [10.1080/09537320500357319](https://doi.org/10.1080/09537320500357319). Acesso em: 17/11/2023.

GRÄF, D.; MARSCHEWSKI, J.; IBING, L.; HUCKEBRINK, D.; FIEBRANDT, M.; HANAU, G.; BERTSCH, V. What drives capacity degradation in utility-scale battery energy storage systems? The impact of operating strategy and temperature in different grid applications. *Journal of Energy Storage*. [S. l.]: Elsevier BV, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.est.2021.103533>. Acesso em: 17/05/2023.

GROENEWALD, J.; GRANDJEAN, T.; MARCO, J. Accelerated energy capacity measurement of lithium-ion cells to support future circular economy strategies for electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. [S. l.]: Elsevier BV, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.017>. Acesso em: 10/10/2023.

GU, X.; BAI, H.; CUI, X.; ZHU, J.; ZHUANG, W.; LI, Z.; HU, X.; SONG, Z. Challenges and Opportunities for Second-life Batteries: A Review of Key Technologies and Economy. 2023. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2308.06786>. Acesso em: 11/10/2023.

HAMEED, Zeenat; HASHEMI, Seyedmostafa; IPSEN, Hans Henrik; TRÆHOLT, Chresten. A business-oriented approach for battery energy storage placement in power systems. *Applied Energy*, v. 298, 2021, p. 117186. ISSN 0306-2619. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117186>. Acesso em: 09/10/2023.

HARPER, G. et al. Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature*, 575, 75–86, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1682-5>. Acesso em: 08/10/2023.

HUNT, G. USABC electric vehicle battery test procedures manual. U.S. Council for Automotive Research, 1996. Disponível em: https://avt.inl.gov/sites/default/files/pdf/battery/usabc_manual_rev2.pdf. Acesso em: 10/10/2023.

HUNT, Julian David et al. Compressed air seesaw energy storage: A solution for long-term electricity storage. *Journal of Energy Storage*, v. 60, 2023, p. 106638. ISSN 2352-152X. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106638>. Acesso em: 08/10/2023.

IEA, International Energy Agency. CO2 Emissions in 2022. Paris: IEA, 2023a. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>. Acesso em: 16/11/2023.

IEA, International Energy Agency. Evolution of average range of electric vehicles by powertrain, 2010-2021. IEA, Paris. 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/data->

and-statistics/charts/evolution-of-average-range-of-electric-vehicles-by-powertrain-2010-2021. Acesso em: 10/10/2023.

IEA, International Energy Agency. Global EV Data Explorer. Paris: IEA, 2023c. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/global-ev-data-explorer>. Acesso em: 17/11/2023.

IEA, International Energy Agency. Global EV Outlook 2021. Paris: IEA, 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>. Acesso em: 17/11/2023.

IEA, International Energy Agency. Global EV Outlook 2023. Paris: IEA, 2023b. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>. Acesso em: 17/11/2023.

IEA, International Energy Agency. Innovation in Batteries and Electricity Storage. Paris, 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/innovation-in-batteries-and-electricity-storage>. Acesso em: 09/10/2023.

IEA, International Energy Agency. Tracking Clean Energy Progress 2023. Paris: IEA, 2023d. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/tracking-clean-energy-progress-2023>. Acesso em: 18/11/2023.

IER, Institute for Energy Research. The Environmental Impact of Lithium Batteries. 2020. Disponível em: <https://www.instituteforenergyresearch.org/renewable/the-environmental-impact-of-lithium-batteries/>. Acesso em: 08/10/2023.

IOAKIMIDIS, C. S. et al. Life Cycle Assessment of a Lithium Iron Phosphate (LFP) Electric Vehicle Battery in Second Life Application Scenarios. Sustainability, 2019, 11, 2527. Disponível em: 10.3390/su11092527. Acesso em: 05/10/2023.

IRENA, International Renewable Energy Agency. Geopolitics of the Energy Transition: Critical Materials. Abu Dhabi. IRENA, 2023. Disponível em: <https://www.irena.org/Digital-Report/Geopolitics-of-the-Energy-Transition-Critical-Materials>. Acesso em: 08/10/2023.

JANEK, J.; ZEIER, W.G. Challenges in speeding up solid-state battery development. *Nat Energy*, 8, 230–240, 2023. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41560-023-01208-9>. Acesso em: 07/10/2023.

KAMATH, D.; MOORE, S.; ARSENAULT, R.; ANCTIL, A. A system dynamics model for end-of-life management of electric vehicle batteries in the US: Comparing the cost, carbon, and material requirements of remanufacturing and recycling. *Resources, Conservation and Recycling*. [S. l.]: Elsevier BV, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107061>. Acesso em: 17/05/2023.

KAMRAN, Muhammad. Energy storage in smart grids. In: KAMRAN, Muhammad (Ed.). *Fundamentals of Smart Grid Systems*. Academic Press, 2023. Chapter 9, p. 393-429. ISBN 9780323995603. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99560-3.00001-6>. Acesso em: 08/10/2023.

KONG, Lingbin et al. Supercapacitors for Short-term, High Power Energy Storage. In: HAUER, Andreas (Ed.). *Advances in Energy Storage: Latest Developments from R&D to the Market*. 1st ed. USA: John Wiley & Sons, 2022. Chapter 5. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/9781119239390.ch5>. Acesso em: 08/10/2023.

KOSAI, S.; TAKATA, U.; YAMASUE, E. Natural resource use of a traction lithium-ion battery production based on land disturbances through mining activities. *Journal of Cleaner Production*, Volume 280, Part 2, 2021, 124871. ISSN 0959-6526. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124871>. Acesso em: 05/10/2023.

LANDER, L. et al. Financial viability of electric vehicle lithium-ion battery recycling. *iScience*, Volume 24, Issue 7, 2021, 102787. ISSN 2589-0042. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102787>. Acesso em: 17/11/2023.

LOURENSSSEN, Kyle et al. Vanadium redox flow batteries: A comprehensive review. *Journal of Energy Storage*, v. 25, 2019, p. 100844. ISSN 2352-152X. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100844>. Acesso em: 08/10/2023.

LUCENA, André Frossard Pereira de et al. The vulnerability of renewable energy to climate change in Brazil. *Energy Policy*, v. 37, n. 3, 2009, p. 879-889. ISSN 0301-4215. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.10.029>. Acesso em: Acesso em: 08/10/2023.

MA, X.; AZHARI, L.; WANG, Y. Li-ion battery recycling challenges. *Chem*, Volume 7, Issue 11, 2021, Pages 2843-2847. ISSN 2451-9294. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2021.09.013>. Acesso em: 17/11/2023.

MALLON, K. R.; ASSADIAN, F.; FU, B. Analysis of On-Board Photovoltaics for a Battery Electric Bus and Their Impact on Battery Lifespan. *Energies*, v. 10, 2017, p. 943. <https://doi.org/10.3390/en10070943>. Acesso em: 09/10/2023.

MARIANO, J. D. et al. PV - Battery Energy Storage Progress in Brazil: A Review. *Preprints*, 2021, 2021050507. <https://doi.org/10.20944/preprints202105.0507.v1>. Acesso em: 09/10/2023.

MARTINEZ-LASERNA, E.; GANDIAGA, I.; SARASKETA-ZABALA, E.; BADEDA, J.; STROE, D.-I.; SWIERCZYNSKI, M.; GOIKOETXEA, A. Battery second life: Hype, hope or reality? A critical review of the state of the art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. [S. l.]: Elsevier BV, out. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.035>. Acesso em: 10/10/2023.

MCKINSEY & COMPANY. Enabling renewable energy with battery energy storage systems. 2023. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/enabling-renewable-energy-with-battery-energy-storage-systems>. Acesso em: 18/11/2023.

MCKINSEY & COMPANY. Net-zero power: Long-duration energy storage for a renewable grid. 2021. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/net-zero-power-long-duration-energy-storage-for-a-renewable-grid>. Acesso em: 08/10/2023.

MCMANUS, M.C. Environmental consequences of the use of batteries in low carbon systems: The impact of battery production. *Applied Energy*, Volume 93, 2012, Pages 288-295, ISSN 0306-2619. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.12.062>. Acesso em: 08/10/2023.

MEINSHAUSEN, M. et al. Realization of Paris Agreement pledges may limit warming just below 2 °C. *Nature*, v. 604, p. 304–309, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04553-z>. Acesso em: 15/11/2023.

MERRIMAN, D. The EV Revolution: Impacts on critical raw material supply chains. Roskill, 2019. Disponível em: <https://www.minersoc.org/wp-content/uploads/2019/05/3ICM-Merriman.pdf>. Acesso em: 17/05/2023.

MIAO, Y. et al. Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements. *Energies*, 2019, 12, 1074. Disponível em: [10.3390/en12061074](https://doi.org/10.3390/en12061074). Acesso em: 06/10/2023.

MINING.COM. NMC to remain the dominant EV battery cathode type until 2030 – report. 2021. Disponível em: <https://www.mining.com/nmc-to-remain-the-dominant-ev-battery-cathode-type-until-2030-report/>. Acesso em: 17/05/2023.

MITALI, J.; DHINAKARAN, S.; MOHAMAD, A. A. Energy storage systems: a review. *Energy Storage and Saving*, v. 1, n. 3, p. 166-216, 2022. ISSN 2772-6835. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enss.2022.07.002>. Acesso em: 08/10/2023.

NASDAQ. Short- and Long-Duration Energy Storage Essential to the Clean Energy Transition. 2022. Disponível em: <https://www.nasdaq.com/articles/short-and-long-duration-energy-storage-essential-to-the-clean-energy-transition>. Acesso em: 08/10/2023.

NATIONAL GRID ESO. Future Energy Scenarios (FES) 2023. 2023. Disponível em: <https://www.weforum.org/publications/fostering-effective-energy-transition-2023/digest/>. Acesso em: 17/05/2023.

NATIONAL GRID. The surprisingly long history of electric vehicles. 2021. Disponível em: <https://www.nationalgrid.com/stories/journey-to-net-zero-stories/surprisingly-long-history-electric-vehicles>. Acesso em: 16/11/2023.

NEUBAUER, J. S.; PESARAN, A.; WILLIAMS, B.; FERRY, M.; EYER, J. A Techno-Economic Analysis of PEV Battery Second Use: Repurposed-Battery Selling Price and Commercial and Industrial End-User Value. SAE Technical Paper Series. [S. l.]: SAE International, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4271/2012-01-0349>. Acesso em: 10/10/2023.

NEUBAUER, J.; PESARAN, A. The ability of battery second use strategies to impact plug-in electric vehicle prices and serve utility energy storage applications.

Journal of Power Sources. [S. l.]: Elsevier BV, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.06.053>. Acesso em: 10/10/2023.

NISSAN. Decade of Innovation – The LEAF’s Incredible Journey. 2020. Disponível em: <https://www.nissan-global.com/EN/STORIES/RELEASES/nissan-leaf-10years/>. Acesso em: 17/11/2023.

NREL, National Renewable Energy Laboratory. Identifying and Overcoming Critical Barriers to Widespread Second Use of PEV Batteries. NREL Technical Report, 2015. Disponível em: <https://www.nrel.gov/transportation/battery-second-use-analysis.html>. Acesso em: 10/10/2023.

OHTAKA, T.; IWAMOTO, S. Possibility of using NAS battery systems for dynamic control of line overloads. In: IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Yokohama, Japan, 2002. Yokohama: IEEE, 2002, p. 44-49 vol.1. Disponível em: [10.1109/TDC.2002.1178258](https://doi.org/10.1109/TDC.2002.1178258). Acesso em: 09/10/2023.

OLIVETTI, E. A.; CEDER, G.; GAUSTAD, G. G.; FU, X. Lithium-Ion Battery Supply Chain Considerations: Analysis of Potential Bottlenecks in Critical Metals. Joule. [S. l.]: Elsevier BV, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.joule.2017.08.019>. Acesso em: 17/05/2023.

PAGLIARO, M.; MENEGUZZO, F. Lithium battery reusing and recycling: A circular economy insight. Heliyon. [S. l.]: Elsevier BV, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01866>. Acesso em: 10/10/2023.

PÄRNAMÄE, R. et al. The Acid–Base Flow Battery: Sustainable Energy Storage via Reversible Water Dissociation with Bipolar Membranes. Membranes, v. 10, p. 409, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/membranes10120409>. Acesso em: 08/10/2023.

PATHAK, P. K.; GUPTA, A. R. Battery Energy Storage System. In: International Conference on Computational Intelligence & Communication Technology (CICT), 4th, Ghaziabad, India, 2018. IEEE, 2018, p. 1-9. Disponível em: [10.1109/CICT.2018.8480377](https://doi.org/10.1109/CICT.2018.8480377). Acesso em: 08/10/2023.

PHILIPPINE CENTER FOR INVESTIGATIVE JOURNALISM. Rise of electric cars threatens Philippine forests. 2021. Disponível em: <https://pcij.org/article/7649/rise-of-electric-cars-threatens-philippine-forests>. Acesso em: 08/10/2023.

PICO ANALYTICS. The Environmental, Social and Governance Impacts of Cobalt and Mineral Mining in the Democratic Republic of the Congo and Beyond. 2022. Disponível em: <https://www.picoanalytics.co.uk/insights/lfguuras0xa8e3q4qkvijt134fzm79>, Acesso em: 08/10/2023.

POL, Vikram Balasaheb. Second life Batteries and their applications and challenges. 2022. Disponível em: <https://batteryline.com/sustainable-manufacturing/second-life-batteries-and-their-applications-and-challenges/>. Acesso em: 11/10/2023.

PORZIO, J.; SCOWN, C. D. Life-Cycle Assessment Considerations for Batteries and Battery Materials. *Advanced Energy Materials*, 2021. Disponível em: 10.1002/aenm.202100771. Acesso em: 05/10/2023.

PRAŽANOVÁ, A. et al. Pre-Recycling Material Analysis of NMC Lithium-Ion Battery Cells from Electric Vehicles. *Crystals*, 2023, 13, 214. Disponível em: 10.3390/cryst13020214. Acesso em: 05/10/2023.

RECELL CENTER. Developing a cost-effective and environmentally sound recycling process for lithium-ion batteries requires a suite of complex techniques rooted in fundamental chemistry and materials science. 2019. Disponível em: <https://recellcenter.org/research/>. Acesso em: 10/10/2023.

REN, X. Hydrometallurgy of Lithium Batteries. *Encyclopedia*. 2022. Disponível em: <https://encyclopedia.pub/entry/20579>. Acesso em: 10/10/2023.

REUTERS. EV battery production faces supply chain, geopolitical headwinds - report. 2022. Disponível em: <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/ev-battery-production-faces-supply-chain-geopolitical-headwinds-report-2022-10-31/>. Acesso em: 11/28/2023.

RICHA, K.; BABBITT, C. W.; GAUSTAD, G.; WANG, X. A future perspective on lithium-ion battery waste flows from electric vehicles. *Resources, Conservation and*

Recycling. [S. l.]: Elsevier BV, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.11.008>. Acesso em: 17/05/2023.

RITCHIE, H.; ROSADO, P.; ROSER, M. CO₂ and Greenhouse Gas Emissions. Our World in Data, 2023. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions>>. Acesso em: 15/11/2023.

RMI, ROCKY MOUNTAIN INSTITUTE. The Economics of Battery Energy Storage. 2015. Disponível em: <https://rmi.org/insight/economics-battery-energy-storage/>. Acesso em: 08/10/2023.

ROAD & TRACK. From Lead-Acid to Lithium: A History of the Automotive Battery. 2023. Disponível em: <https://www.roadandtrack.com/car-culture/a45597186/history-of-automotive-batteries/>. Acesso em: 06/10/2023.

SANDHYA, C. P.; JOHN, B.; GOURI, C. Lithium titanate as anode material for lithium-ion cells: a review. *Ionics*, 20, 601–620, 2014. Disponível em: 10.1007/s11581-014-1113-4. Acesso em: 06/10/2023.

SANTINI, D. J. Electric Vehicle Waves of History: Lessons Learned about Market Deployment of Electric Vehicles. In: SOYLU, S. (Ed.). *Electric Vehicles – The Benefits and Barriers*. ISBN: 978-953-307-287-6. InTech, 2011. Disponível em: <<http://www.intechopen.com/books/electric-vehicles-the-benefits-and-barriers/plug-in-electric-vehicles-a-century-later-historical-lessons-on-what-is-different-what-is-not>>. Acesso em: 17/11/2023.

SCHMIDT, Oliver; MELCHIOR, Sylvain; HAWKES, Adam; STAFFELL, Iain. Projecting the Future Levelized Cost of Electricity Storage Technologies. *Joule*, v. 3, n. 1, 2019, p. 81-100. ISSN 2542-4351. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.12.008>. Acesso em: 09/10/2023.

SHAHJALAL, M. et al. A review on second-life of Li-ion batteries: prospects, challenges, and issues. *Energy*, Volume 241, 2022, 122881, ISSN 0360-5442. Disponível em: 10.1016/j.energy.2021.122881. Acesso em: 08/10/2023.

SHE, Z.-Y.; SUN, Q.; MA, J.-J.; XIE, B.-C. What are the barriers to widespread adoption of battery electric vehicles? A survey of public perception in Tianjin, China.

Transport Policy, Volume 56, 2017, Pages 29-40. ISSN 0967-070X. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.03.001>. Acesso em: 17/11/2023.

SHETH, R. P. et al. The Lithium-Ion Battery Recycling Process from a Circular Economy Perspective—A Review and Future Directions. *Energies*, v. 16, 2023, p. 3228. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en16073228>. Acesso em: 10/10/2023.

SLAC, National Accelerator Laboratory. Revitalizing batteries by bringing ‘dead’ lithium back to life. 2022. Disponível em: <https://www6.slac.stanford.edu/news/2022-01-03-revitalizing-batteries-bringing-dead-lithium-back-life>. Acesso em: 09/10/2023.

TAALBI, J.; NIELSEN, H. The role of energy infrastructure in shaping early adoption of electric and gasoline cars. *Nature Energy*, v. 6, p. 970–976, 2021. DOI: 10.1038/s41560-021-00898-3. Acesso em: 15/11/2023.

TESLA. Tesla Motors Receives Prestigious ‘Breakthrough Award’ from Popular Mechanics. 2010. Disponível em: <https://www.tesla.com/blog/tesla-motors-receives-prestigious-%E2%80%98breakthrough-award%E2%80%99-popular-mechanics>>. Acesso em: 17/11/2023.

THE WASHINGTON POST. In scramble for EV metals, health threat to workers often goes unaddressed. 2023. Disponível em: <https://www.washingtonpost.com/world/interactive/2023/ev-mineral-manganese-south-africa/>. Acesso em: 08/10/2023.

THIES, C.; KIECKHÄFER, K.; SPENGLER, T. S.; SODHI, M. S. Assessment of social sustainability hotspots in the supply chain of lithium-ion batteries. *Procedia CIRP*, Volume 80, 2019, Pages 292-297. ISSN 2212-8271. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.12.009>. Acesso em: 17/11/2023.

TWITCHELL, Jeremy; DESOMBER, Kyle; BHATNAGAR, Dhruv. Defining long duration energy storage. *Journal of Energy Storage*, v. 60, 2023, p. 105787. ISSN 2352-152X. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105787>. Acesso em: 08/10/2023.

UECKERDT, F.; BRECHA, R.; LUDERER, G. Analyzing major challenges of wind and solar variability in power systems. *Renewable Energy*, Volume 81, 2015, Pages

1-10. ISSN 0960-1481. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.03.002>. Acesso em: 17/11/2023.

UNCTAD. Developing countries pay environmental cost of electric car batteries. 2020. Disponível em: <https://unctad.org/news/developing-countries-pay-environmental-cost-electric-car-batteries>. Acesso em: 08/10/2023.

VECCHI, Andrea et al. Liquid air energy storage (LAES): A review on technology state-of-the-art, integration pathways and future perspectives. *Advances in Applied Energy*, v. 3, 2021, p. 100047. ISSN 2666-7924. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2021.100047>. Acesso em: 08/10/2023.

VERA, M. L.; TORRES, W. R.; GALLI, C. I. et al. Environmental impact of direct lithium extraction from brines. *Nat Rev Earth Environ*, v. 4, p. 149–165, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00387-5>. Acesso em: 17/11/2023.

WAKEFIELD, E. H. *History of the Electric Automobile: Hybrid Electric Vehicles*. United States of America: SAE International, 1993.

WALDMANN, Thomas et al. Temperature dependent ageing mechanisms in Lithium-ion batteries – A Post-Mortem study. *Journal of Power Sources*, v. 262, 2014, p. 129-135. ISSN 0378-7753. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.03.112>. Acesso em: 09/10/2023.

WORLD ECONOMIC FORUM. *Fostering Effective Energy Transition 2023*. Disponível em: <https://www.weforum.org/publications/fostering-effective-energy-transition-2023/digest/>. Acesso em: 15/11/2023.

XIAO, Y. et al. Understanding interface stability in solid-state batteries. *Nat Rev Mater*, 5, 105–126, 2020. Disponível em: [10.1038/s41578-019-0157-5](https://doi.org/10.1038/s41578-019-0157-5). Acesso em: 07/10/2023.

YADLAPALLI, Ravindranath Tagore et al. Super capacitores for energy storage: Progress, applications and challenges. *Journal of Energy Storage*, v. 49, 2022, p. 104194. ISSN 2352-152X. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104194>. Acesso em: 08/10/2023.

YU, X.; LI, W.; GUPTA, V.; GAO, H.; TRAN, D.; SARWAR, S.; CHEN, Z. Current Challenges in Efficient Lithium-Ion Batteries' Recycling: A Perspective. 2022. Disponível em: [10.1002/gch2.202200099](https://doi.org/10.1002/gch2.202200099). Acesso em: 18/11/2023.

ZHANG, Q.; WHITE, R. E. Capacity fade analysis of a lithium ion cell. *Journal of Power Sources*. [S. l.]: Elsevier BV, 2008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.01.028>. Acesso em: 18/05/2023.

ZHAO, G. *Reuse and Recycling of Lithium-Ion Power Batteries*. John Wiley & Sons, 2017. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781119321866>. Acesso em: 09/10/2023.

ZHAO, X.; HU, H.; YUAN, H.; CHU, X. How does adoption of electric vehicles reduce carbon emissions? Evidence from China. *Heliyon*, v. 9, n. 9, 2023, e20296. ISSN 2405-8440. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20296>. Acesso em: 16/11/2023.

ZHENG, M. The environmental impacts of lithium and cobalt mining. *Earth.Org*, 2023. Disponível em: <https://earth.org/cobalt-mining-in-congo/>. Acesso em: 17/11/2023.

ZHU, J. et al. End-of-life or second-life options for retired electric vehicle batteries. *Cell Reports Physical Science*, Volume 2, Issue 8, 2021, 100537. ISSN 2666-3864. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2021.100537>. Acesso em: 17/11/2023.