

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Curso de ENGENHARIA ELÉTRICA

ALBERTO RACHEWSKY FRANTZ

DESAFIOS ATUAIS DO MERCADO DE CARROS ELÉTRICOS

PORTO ALEGRE
2023

ALBERTO RACHEWSKY FRANTZ

DESAFIOS ATUAIS DO MERCADO DE CARROS ELÉTRICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial à obtenção do título de
bacharel em Engenharia Elétrica da Escola de
Engenharia da Universidade Federal do Rio
Grande do Sul.

Orientador: Prof. Gilson Inacio Wirth

PORTO ALEGRE

2023

FICHA CATALOGRÁFICA

CIP - Catalogação na Publicação

Frantz, Alberto
Desafios Atuais do Mercado de Carros Elétricos /
Alberto Frantz. -- 2023.
58 f.
Orientador: Gilson Inacio Wirth.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Elétrica, Porto
Alegre, BR-RS, 2023.

1. Veículos Elétricos. 2. Custo de Veículos
Elétricos no Brasil. 3. Infraestrutura de Recarga. I.
Inacio Wirth, Gilson, orient. II. Título.

ALBERTO RACHEWSKY FRANTZ

DESAFIOS ATUAIS DO MERCADO DE CARROS ELÉTRICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial à obtenção do título de
bacharel em Engenharia Elétrica da Escola de
Engenharia da Universidade Federal do Rio
Grande do Sul.

Orientador: Prof. Gilson Inacio Wirth

BANCA EXAMINADORA:

Prof, Dr. Raphael Martins Brum
UFRGS

Prof, Dr. Ivan Muller
UFRGS

Prof, Dr. Gilson Inácio Wirth
Orientador - UFRGS

AGRADECIMENTOS

Agradeço profundamente ao Prof. Gilson Inacio Wirth, meu orientador, por sua disponibilidade constante e pelos valiosos *insights* que proporcionou ao longo deste trabalho. Sua orientação foi fundamental para o desenvolvimento e conclusão deste projeto.

Aos meus colegas do curso de Engenharia Elétrica, expresso minha eterna gratidão pelo incontável apoio que recebi desde o primeiro semestre. Foram anos de aprendizado, desafios e conquistas, e em todos esses momentos, pude contar com a parceria de cada um de vocês. Agradeço pelos bons momentos compartilhados, pelas risadas, pelos estudos em grupo e pela parceria nos momentos mais desafiadores.

Aos meus pais, agradeço por serem minha base sólida e por me inspirarem a buscar sempre o melhor. Em especial, agradeço ao meu pai por ser meu grande mentor de vida, orientando-me nas grandes decisões. À minha mãe, agradeço por ser a fortaleza que me sustentou nos momentos mais desafiadores, sendo sempre meu porto seguro.

“Sou otimista. Não me parece útil ser outra coisa.”

Winston Churchill

RESUMO

O objetivo deste trabalho é definir, categorizar e analisar os principais desafios e obstáculos que dificultam com que veículos elétricos (VEs) tornem-se mais populares e dominem o mercado de veículos leves mundialmente. Diversos estudos acadêmicos, relatórios e estudos governamentais foram analisados para mapear os desafios enfrentados pelo mercado de VEs, bem como discutir as soluções mais modernas que estão sendo utilizadas para superar tais problemas. Os principais itens identificados como detratores do mercado de VEs podem ser resumidos pela ausência de uma infraestrutura de recarga apropriada de forma global, baixa capacidade da matriz energética em suprir a demanda por VEs, baixa autonomia e elevado custo de aquisição. As análises foram elaboradas utilizando dados mundiais, considerando os principais mercados de VEs no mundo. No entanto, foi possível detalhar análises específicas para o cenário brasileiro, levando em consideração sua matriz energética e seus custos médios de compra e uso de automóveis.

Palavras-chave: Veículo elétrico; Infraestrutura; Carregamento; Bateria; Autonomia; Híbridos.

ABSTRACT

The objective of this work is to define, categorize, and analyze the main challenges and obstacles that hinder electric vehicles (EVs) from becoming more popular and dominating the global light vehicle market. Various academic studies, reports, and government studies were analyzed to map the challenges faced by the EV market, as well as to discuss the most modern solutions being used to overcome such problems. The main items identified as detractors from the EV market can be summarized by the absence of appropriate global charging infrastructure, low capacity of the energy matrix to meet the demand for EVs, low autonomy, and high acquisition costs. The analyses were carried out using global data, considering the main EV markets in the world. However, it was possible to detail specific analyses for the Brazilian scenario, taking into account its energy matrix and its average costs of purchasing and using cars.

Keywords: Electric Vehicle; Infrastructure; Charging; Battery; Autonomy; Hybrids; Range Anxiety.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Relação entre os tipos de VEs no mercado.	16
Figura 2 – Número de Veículos Elétricos Emplacados no Brasil por ano (2012-2022).....	17
Figura 3 – Número de Veículos Elétricos Emplacados no Brasil - Acumulado até 2022.....	17
Figura 4 – Número de Veículos Elétricos Vendidos no Mundo.....	18
Figura 5 – Principais tipos níveis e tipos de carregadores disponíveis comercialmente.	21
Figura 6 – Carregadores públicos instalados para VES, globalmente, por tipo e potência (2015-2022).	23
Figura 7 – Número de VEs por carregador público e kW por VE em 2022, por país.....	24
Figura 8 – Comparativo de diferentes tipos de bateria por densidade energética.	31
Figura 9 – Autonomia Média de BEVs e PHEVs por ano (km).....	32
Figura 10 – Autonomia Máxima e Mediana entre Carros ICE e BEVs, modelos 2021 (km)..	33
Figura 11 – Distância percorrida em rodovias por país, per capita (2011-2019).	35
Figura 12 – SoH médio entre 21 VEs de 14 montadoras diferentes durante 6 anos.	37
Figura 13 – Cadeia produtiva de baterias para VEs.	39
Figura 14 – Variação de preço das principais matéria-primas de baterias de íon-lítio.	40
Figura 15 - Custos acumulados projetados (em reais) - Cenário 1.....	45
Figura 16 - Custos acumulados projetados (em reais) - Cenário 2.....	47
Figura 17 - Custos acumulados projetados (em reais) - Cenário 3.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quadro de Variáveis do Cenário 1 (veículos populares em condições atuais)	44
Tabela 2 - Quadro de Variáveis do Cenário 2 (veículos populares em condições otimistas) ..	46
Tabela 3 - Quadro de Variáveis do Cenário 3 (veículos de alto padrão em condições atuais)	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABVE	Associação Brasileira do Veículo Elétrico
APS	<i>Announced Pledges Scenario</i>
BEV	<i>Battery Electric Car</i>
BMS	<i>Battery Management System</i>
CAGR	<i>Compound Annual Growth Rate</i>
EDM	<i>Electric Drive Module</i>
E-REV	<i>Extended Range Electric Vehicle</i>
FCEV	<i>Fuell Cell Electric Vehicle</i>
GEEE	Gases De Efeito Estufa
HEV	<i>Hybrid Electric Vehicle</i>
ICE	<i>Internal Combustion Engine</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IPVA	Imposto Sobre Propriedade de Veículos Automotores
OECD	<i>Organisation for Economic Co-operation and Development</i>
PEV	<i>Plug-in Electric Vehicle</i>
PHEV	<i>Plug-in Hybrid Electric Vehicle</i>
RPEV	<i>Road-powered Electric Vehicle</i>
SoH	<i>State of Health</i>
TCO	<i>Total Ownership Cost</i>
VE	Veículo Elétrico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	CONTEXTO ATUAL DO MERCADO DE CARROS ELÉTRICOS	14
2.1	CATEGORIAS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS	14
2.2	O MERCADO ATUAL.....	16
3	INFRAESTRUTURA DE RECARGA	20
3.1	TIPOS DE CARREGAMENTO	21
3.2	CONTEXTO GLOBAL	22
3.3	INSTALAÇÃO DE ELETROPOSTOS	24
3.4	MATRIZ ENERGÉTICA E <i>SMART CHARGING</i>	26
4	BATERIAS.....	29
4.1	TIPOS DE BATERIA	29
4.2	AUTONOMIA	31
4.3	CICLO DE VIDA E DESGASTE.....	35
4.4	CUSTO	38
5	CUSTO TOTAL DE PROPRIEDADE	43
6	CONCLUSÕES.....	50
7	REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

Conforme a economia global avança tecnologicamente e a população global aumenta, maior tem se tornado o consumo energético do planeta (Leitão, 2020). Cada vez mais, observa-se os efeitos danosos gerados pela queima de combustíveis fósseis para produção de energia elétrica e transporte de cargas e pessoas.

Atualmente, o segundo maior setor poluidor do meio ambiente, em termos de emissões de gases efeito estufa (GEEs), é o setor de transportes. Coletivamente, o transporte marítimo, ferroviário, rodoviário e aéreo são responsáveis por aproximadamente um quinto de todas as emissões de CO₂ no mundo (Howell, 2023). Essas emissões ocorrem, pois, a vasta maioria dos veículos de transporte utilizados por esse setor utiliza motores de combustão interna, cujos combustíveis são derivados de petróleo. Um dos combustíveis mais utilizados em carros é a gasolina. A gasolina contém átomos de carbono e hidrogênio. Durante a combustão, o carbono (C) do combustível faz ligações covalentes com os átomos de oxigênio (O₂) do ar, formando moléculas de dióxido de carbono CO₂. A queima de petróleo e derivados produz diversos gases que contribuem para o efeito estufa e conseqüentemente para a mudança climática do planeta terra.

Nas últimas duas décadas, a temática acerca da utilização de veículos elétricos (VEs) em substituição de veículos movidos à combustão interna (ICE, do inglês, *Internal Combustion Engine*) tem recebido cada vez mais relevância, evidenciado pelo aumento drástico de *market share* dos VEs em relação a carros convencionais (Sheldon, 2021). Avanços no processo de fabricação em massa de veículos elétricos, melhoria na qualidade e durabilidade de baterias e aumento de geração de energia renovável são os principais fatores que permitiram com que carros elétricos obtivessem melhor custo-benefício ao longo dos anos (Delgado, 2017). Além de carros elétricos apresentarem um preço de aquisição cada vez menor e uma eficiência energética cada vez maior, a crescente preocupação por parte da sociedade com o meio ambiente tem sido um forte motivo para a ascensão de VEs e híbridos no mercado automobilístico.

Adicionado aos fatores mencionados acima, diversas medidas governamentais têm sido implementadas, em diferentes países, para incentivar a compra e uso de veículos elétricos. Governos têm aprovado não apenas legislações que promovem incentivos fiscais e tributários para produtoras de carros elétricos, mas também leis

que proíbem a venda e circulação de carros movidos a motor de combustão até uma data limite. Por exemplo, a Noruega, país na qual 25% de sua frota de carros já são elétricos, construiu um plano para proibir as vendas de carros movidos a combustíveis fósseis até 2025 (Roadmaps for Energy, 2022).

No entanto, mesmo com avanços tecnológicos, incentivos governamentais e um aumento global na preocupação pela sustentabilidade, o mercado de VEs ainda se encontra em uma fase incipiente. Existem diversos desafios que ainda precisam ser superados para que os VEs sejam adotados em massa e superem o *market share* de veículos convencionais.

Um dos principais obstáculos para a disseminação em massa de carros elétricos está relacionado ao fator econômico-financeiro. Atualmente, quando se contabiliza o custo de aquisição de um veículo, custo de manutenção e custo de combustível por distância rodada, a compra e utilização de um carro ICE muitas vezes acaba se tornando mais barata do que de um carro movido a motor elétrico, dependendo da região e do tipo de VE.

Além do alto custo atrelados ao uso de VEs, esses veículos possuem autonomia reduzida em comparação com veículos tradicionais. Embora as baterias tenham passado por avanços significativos nos últimos anos, elas ainda não possuem capacidade de armazenagem suficiente para superar o tanque de combustível fóssil em carros ICE.

Por fim, a infraestrutura de carregamento desses veículos precisa ser exponencialmente aprimorada. Para garantir que VEs possam transitar por todas as rodovias de determinado país, é necessária a instalação de milhares de eletropostos de carregamentos distribuídos estrategicamente pelas rodovias. Além da distribuição em massa de pontos de carregamento, os impactos sobre a matriz energética, originados pela ampla utilização de VEs devido ao aumento de demanda por energia, também, deverão ser considerados.

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo bibliográfico para categorizar e discutir, em detalhe, os desafios mencionados acima. Ademais, possíveis soluções para esses obstáculos serão discutidas, trazendo casos reais de onde foram implementados e de seus resultados. Embora as questões discutidas neste artigo sejam relevantes em termos globais, algumas análises serão detalhadas também para o cenário brasileiro, de forma a auxiliar o mercado brasileiro de VEs.

Essa análise será útil para qualquer um interessado na situação atual de carros elétricos no mundo, seja para fins de elaboração de políticas governamentais e tributárias, análise de consumo por possíveis compradores de VEs ou para qualquer pessoa ou empresa interessada em investir em alguma etapa da cadeia do mercado de VEs.

2 CONTEXTO ATUAL DO MERCADO DE CARROS ELÉTRICOS

Nesta etapa, será feita uma síntese do panorama atual do mercado de carros elétricos no Brasil e no mundo. Primeiro será feita a caracterização e diferenciação dos diferentes tipos de veículos elétricos que serão levados em consideração neste trabalho. Após essa etapa, o contexto mercadológico deste setor será discutido, no qual será analisado o atual nível de penetração de VEs na frota global e brasileira de carros. Além disso, serão apresentadas projeções de crescimento do mercado de VEs que serão utilizadas como premissas para as discussões dos desafios encontrados por esse mercado.

2.1 CATEGORIAS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

Para a realização deste trabalho, é necessária a contextualização das diferentes categorias e tipos de VEs que existem em circulação. Veículos elétricos são veículos automotivos que utilizam motores elétricos para propulsão. A energia elétrica utilizada nos motores pode ser obtida de diversas maneiras: conexão do veículo a uma fonte externa, indução eletromagnética via cabos aéreos, utilização de célula de combustível de hidrogênio e oxigênio, por meio da conversão de energia mecânica em elétrica do motor a combustão interna (como é o caso de algumas categorias de carros híbridos) ou por meio da frenagem do veículo (Delgado, 2017).

Durante o restante deste trabalho, todas referências ao termo VE, estão referenciando somente os automóveis eletrificados leves, ou seja, automóveis, veículos comerciais leves, SUVs e utilitários (não incluindo ônibus, caminhões e levíssimos), conforme definição da ABVE (Associação Brasileira de Veículos Elétricos).

A maioria dos VEs disponíveis atualmente no mercado podem ser categorizados, majoritariamente, em duas categorias: *plug-in electric vehicles* (PEVs) e híbridos (Delgado, 2017). Os tipos de VEs são definidos da seguinte forma:

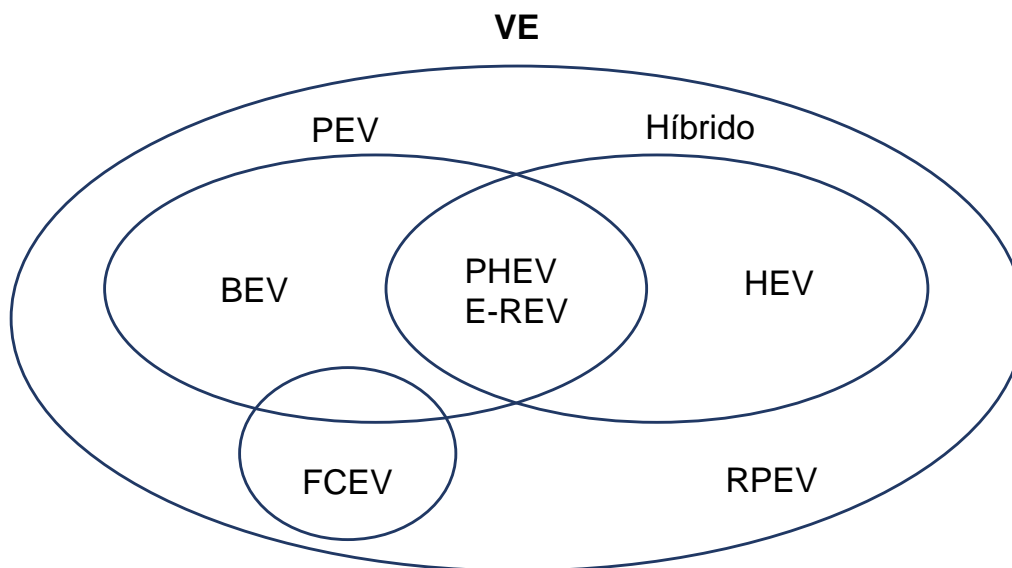
- I. Veículos Elétricos Plug-in (PEV): Os PEVs são veículos que podem ser carregados a partir de uma fonte de energia externa e armazenar essa energia em uma bateria. Esses veículos são usualmente carregados em tomadas de energia, sejam elas em garagens residenciais, comerciais, estacionamentos públicos ou privados. Os PEVs usam a energia armazenada para alimentar um motor elétrico e podem incluir veículos totalmente elétricos (BEVs) e híbridos plug-in (PHEV).

- a. Veículos Elétricos a Bateria (*Battery Electric Vehicles* - BEV): Veículos totalmente elétricos que dependem exclusivamente de baterias recarregáveis para armazenar energia. Eles não possuem um motor de combustão interna e são carregados conectando-se a uma fonte de energia externa.
- II. Veículos Híbridos (*Hybrid Electric Vehicles* - HEV): Os HEVs, considerados veículos híbridos puros, possuem um motor de combustão interna como principal motor propulsor. O motor elétrico do HEV serve apenas para melhorar a eficiência do motor à combustão interna e auxiliar na tração em baixa potência (Delgado, 2017). Diferentemente dos PHEVs, a bateria dos HEVs é carregada através do motor a gasolina e da frenagem regenerativa, e não pode ser carregada a partir de uma fonte externa.
- III. Veículos Híbridos Plug-in (*Plug-in Electric Hybrid Vehicle* - PHEV): Os PHEVs combinam um motor de combustão interna com um motor elétrico e uma bateria recarregável. A combinação dos motores ocorre de forma paralela, permitindo com que os motores possam ser usados de forma independente. Isso possibilita com que o VE atinga maior autonomia, pois pode operar em modo totalmente elétrico para curtas distâncias, enquanto o motor a gasolina pode ser usado para viagens mais longas.
- IV. Veículos Elétricos de *Alcance* Estendido (*Extended Range Electric Vehicle* - E-REV): Os E-REVs são semelhantes aos PHEVs, mas dependem principalmente do motor elétrico para propulsão. O motor de combustão interna é usado apenas como gerador para recarregar a bateria quando esta se esgota.
- V. Veículos Elétricos Recarregáveis por Estrada (*Road Powered Electric Vehicle* - RPEV): são um tipo de veículo elétrico que recebe energia diretamente de redes elétricas instaladas na estrada, em vez de depender exclusivamente de baterias internas. Essa tecnologia, também conhecida como "eletrificação de estradas" ou "estradas elétricas", permite que os veículos elétricos recarreguem suas baterias enquanto estão em movimento. A energia pode ser transferida para o veículo via cabos externos e trilhos ou via indução eletromagnética.

- VI. Veículos Elétricos de Célula de Combustível (FCEV): Os FCEVs utilizam uma célula de combustível para gerar eletricidade a partir de uma reação entre hidrogênio e oxigênio. Eles emitem apenas água como subproduto e têm a vantagem de tempos de reabastecimento rápidos e longo alcance.

A relação entre as diferentes categorias e subcategorias expressas acima está ilustrada na Figura 1.

Figura 1 – Relação entre os tipos de VEs no mercado.



Fonte: Elaboração própria, adaptado FGV Energia. (Delgado, 2017).

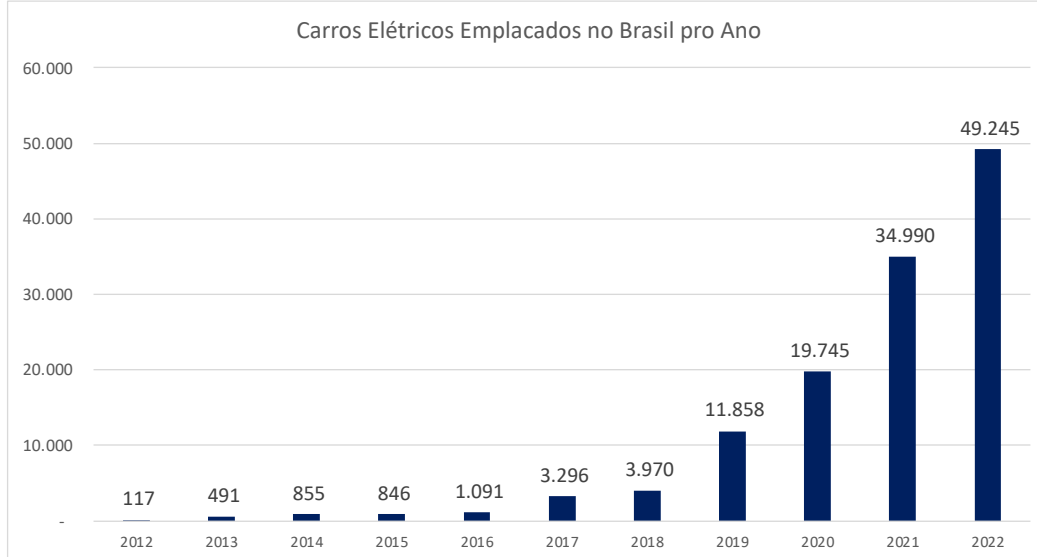
Cada uma dessas categorias de veículos elétricos tem suas vantagens e desvantagens, e a escolha entre elas depende de uma variedade de fatores, incluindo as necessidades de condução individuais, a infraestrutura de carregamento disponível e as considerações ambientais. À medida que a tecnologia continua a evoluir, é provável que vejamos ainda mais inovações e refinamentos nessas categorias.

2.2 O MERCADO ATUAL

O mercado de VEs testemunhou um crescimento exponencial na última década. À medida que as preocupações sobre a sustentabilidade ambiental e a natureza finita dos combustíveis fósseis se intensificaram, a demanda por alternativas mais limpas de transporte aumentou. Esta seção explora o tamanho atual do mercado de VEs, sua trajetória de crescimento e os fatores que impulsionam essa expansão.

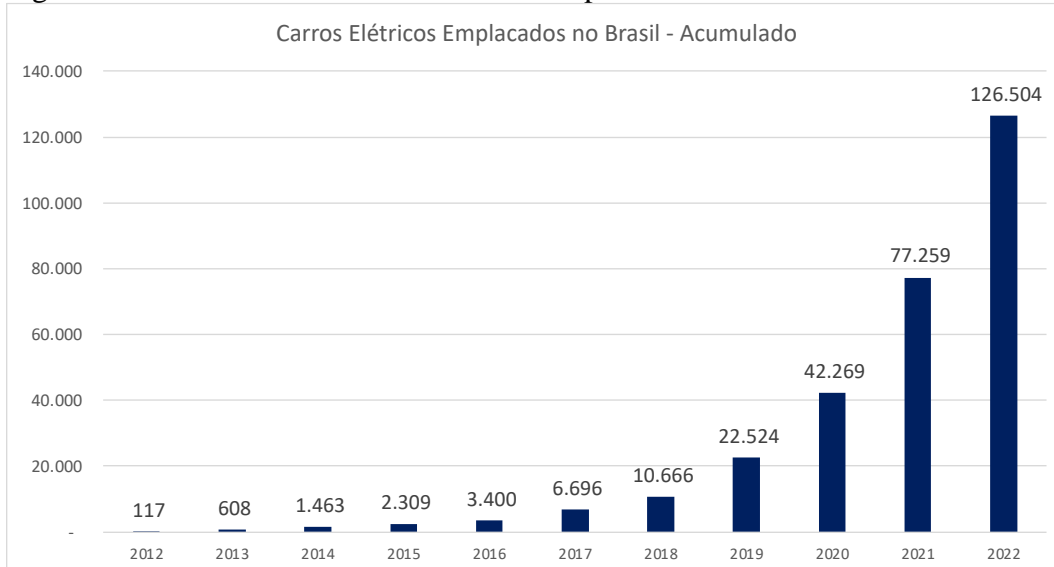
O mercado de carros elétricos no Brasil tem apresentado crescimento exponencial desde 2012, conforme expresso nas Figuras 2 e 3.

Figura 2 – Número de Veículos Elétricos Emplacados no Brasil por ano (2012-2022).



Fonte: Adaptado da ABVE – Associação Brasileira do Veículo Elétrico (2023).

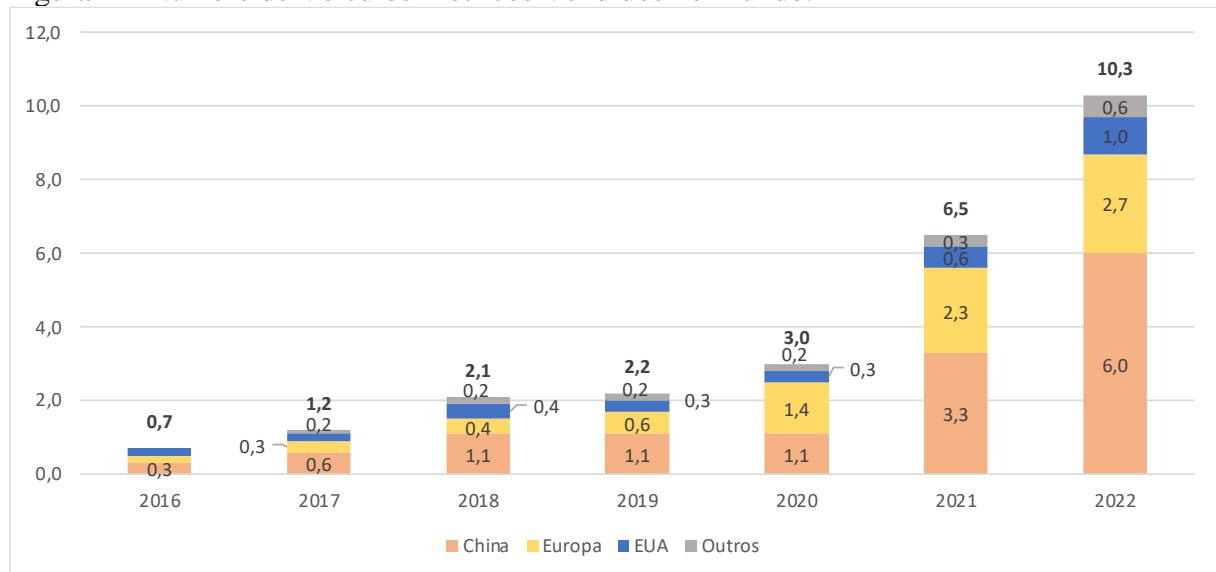
Figura 3 – Número de Veículos Elétricos Emplacados no Brasil - Acumulado até 2022.



Fonte: Adaptado da ABVE – Associação Brasileira do Veículo Elétrico (2023).

A taxa de crescimento anual composta (CAGR – Compound Annual Growth Rate) das vendas de VEs no Brasil de 2012 até 2022 equivale a 83,0%, representando crescimento exponencial agressivo. Esse avanço é similar ao crescimento do mercado global de VEs, que possui um CAGR de 56,5% (2016-2022). A Figura 4 ilustra as vendas de VEs no mundo, classificando as vendas por região/país de maior relevância.

Figura 4 – Número de Veículos Elétricos Vendidos no Mundo.



Fonte: Adaptado da *International Energy Agency* – IEA (2023).

Em 2022, as vendas globais de VEs atingiram aproximadamente 10,3 milhões de unidades, marcando um aumento significativo em relação aos 6,5 milhões de unidades vendidas no ano anterior. O aumento nas vendas de carros elétricos é dominado pela República Popular da China, representando mais de 58% das vendas globais. Em 2022, as vendas de veículos elétricos a bateria (BEV) na China aumentaram 60% em relação a 2021, atingindo 4,4 milhões, enquanto as vendas de veículos elétricos híbridos plug-in (PHEV) quase triplicaram, chegando a 1,5 milhão (IEA, 2023).

Os países europeus, impulsionados por regulamentações rigorosas de emissões e substanciais incentivos governamentais, viram uma rápida adoção de VEs. Noruega, Holanda e Alemanha estão na vanguarda deste movimento. Os EUA e o Canadá juntos representam uma parte significativa do mercado global de VEs. A taxa de adoção, especialmente em estados como a Califórnia, tem sido notável devido a incentivos a nível estadual e a uma crescente rede de infraestrutura de carregamento.

Diversos fatores distintos contribuíram para o rápido crescimento do mercado de VEs:

- I. Incentivos Governamentais: Muitos governos em todo o mundo oferecem isenções fiscais, reembolsos e outros incentivos para promover a adoção de VEs.

- II. Redução dos Custos das Baterias: O custo das baterias de íon-lítio, um componente significativo dos VEs, tem diminuído constantemente, tornando os veículos elétricos mais acessíveis (Kurzweil, 2015).
- III. Consciência Ambiental: À medida que a consciência sobre as mudanças climáticas e a degradação ambiental cresce, os consumidores estão optando cada vez mais por opções de transporte sustentáveis (Nasrudin, 2013).
- IV. Avanços Tecnológicos: Melhorias na tecnologia de baterias, aumento da autonomia dos veículos e soluções de carregamento aprimoradas tornaram os VEs mais atraentes para os consumidores.

Embora esses fatores tenham sido chave no crescimento do mercado de VEs, esses também são alguns dos desafios que devem ser superados de forma que o mercado continue crescendo de forma exponencial. Para que os VEs atinjam um *market share* similar aos de carros ICE, governos terão que providenciar mais incentivos, o custo de baterias e manutenção terá que diminuir, novos avanços tecnológicos terão que ocorrer e a infraestrutura de recarga global terá de ser aprimorada.

3 INFRAESTRUTURA DE RECARGA

Um dos principais obstáculos para a proliferação de VEs na frota global de veículos é a dificuldade no aprimoramento e expansão da infraestrutura de recarga. Embora seja possível realizar o carregamento do veículo em residências e estacionamentos, viagens de distâncias largas acabam sendo prejudicados pela ausência de postos de carregamentos distribuídos pelas rodovias, especialmente em áreas rurais. A autonomia reduzida dos VEs, em comparação carros ICE, aliada a ausência de uma rede extensa de postos de recarga, contribui para o sentimento de *Range Anxiety*, a ansiedade causada pelo medo de não conseguir carregar o VEs quando em viagem.

A adoção em massa de qualquer tecnologia está intrinsecamente ligada à conveniência e à funcionalidade que ela oferece. Nesse contexto, o tempo de carregamento dos VEs assume uma importância excepcional, uma vez que afeta a experiência do usuário e a viabilidade prática desses veículos no cenário cotidiano. Ao optar por um VE, os consumidores não apenas buscam uma alternativa ecologicamente correta, mas também esperam uma transição suave em termos de uso e operação. No entanto, quando os tempos de carregamento se estendem consideravelmente, a conveniência é comprometida, e a percepção dos consumidores pode se inclinar para uma visão negativa.

Com tempos de carregamento lento, os proprietários de VEs podem se encontrar em situações inconvenientes, como ter que planejar suas rotas estritamente em torno das estações de carregamento ou aguardar por longos períodos durante viagens mais longas. Isso contrasta com a experiência de abastecimento rápido em postos de combustível tradicionais, o que pode causar apreensão e resistência por parte dos consumidores, desestimulando assim a adoção generalizada de VEs.






Uma das principais métricas utilizadas para indicar a qualidade da infraestrutura de recarga de determinada região é a razão entre o número de VEs circulantes pelo número de estações públicas de recarga (IEA, 2022a). O grande desafio de carregamento enfrentado pelo mercado é fazer com que a taxa de crescimento de novas estações de recarga construídas cresça de forma similar a taxa da quantidade de VEs em circulação. A instalação de infraestrutura pública de recarga é crucial para a adoção generalizada de VEs (IEA, 2023).

3.1 TIPOS DE CARREGAMENTO

Para realizar a análise desse desafio, é necessário o entendimento dos diferentes tipos de carregamento e estações de recarga de VEs. Conforme Delgado (2017, p. 23), “Estações de recarga (também conhecidas como eletropostos, pontos de recarga, *Electric Vehicle Supply Equipment – EVSE* ou *Electric Vehicle Charging Station – EVCS*) fornecem eletricidade para recarregar VEs”. Esses pontos carregam as baterias dos VEs via uma fonte externa de energia elétrica, podendo ser tanto públicos ou privados.

Atualmente, a vasta maioria dos pontos de carregamento podem ser encontrados em i) residências; ii) estacionamentos comerciais e locais de trabalho; iii) estacionamentos públicos como em supermercados, universidades, *shopping centers* e rodovias. Existem diversas categorias diferentes de carregadores de EVs, as quais são distinguidas pelo seu nível de recarga e modelo. O nível de recarga se refere à quantidade de carga proporcionada por unidade de tempo pelo carregador, portanto, está diretamente relacionada com o tempo de recarga dos veículos. As principais categorias de carregadores estão expressas na tabela abaixo (Figura 5).

Figura 5 – Principais tipos níveis e tipos de carregadores disponíveis comercialmente.

	Level 1	Level 2	DC Fast Charging
Connector Type²	J1772 connector 	J1772 connector 	CCS connector  CHAdeMO connector  Tesla connector 
Typical Power Output	1 kW	7 kW - 19 kW	50 - 350 kW
Estimated PHEV Charge Time from Empty³	5 - 6 hours	1 - 2 hours	N/A
Estimated BEV Charge Time from Empty⁴	40 - 50 hours	4 - 10 hours	20 minutes - 1 hour ⁵
Estimated Electric Range per Hour of Charging	2 - 5 miles	10 - 20 miles	180 - 240 miles
Typical Locations	Home	Home, Workplace, and Public	Public

Fonte: U.S. Department of Transportation (Nelson, 2022).

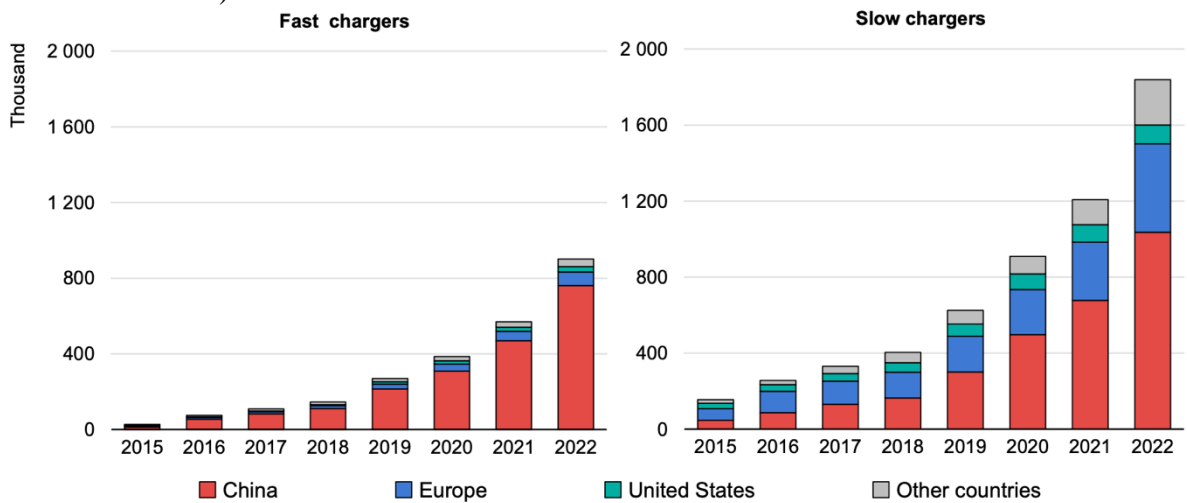
Os carregadores nível 1 e 2 são denominados “carregadores lentos”, enquanto os carregadores de maior potência são chamados de “carregadores rápidos”. Embora o tempo de carregamento de carregadores rápidos seja de apenas 20 minutos, esse tempo ainda é cerca de 10 vezes maior do que o tempo de abastecimento de um carro convencional ICE.

3.2 CONTEXTO GLOBAL

Em regiões urbanas densamente povoadas, especialmente onde o carregamento residencial é restrito, a infraestrutura pública de carregamento torna-se fundamental para a popularização dos VEs (IEA, 2023). No final de 2022, existiam 2,7 milhões de estações de carregamento público no mundo: dessas, 900.000 foram construídas somente em 2022. Isso representa um crescimento de aproximadamente 55% em relação a 2021, similar à taxa de crescimento observada antes da pandemia, que foi de 50% entre 2015 e 2019 (IEA, 2022a).

Conforme podemos observar na Figura 6, tanto os carregadores rápidos quanto lentos apresentam crescimento global nos últimos anos. Ao final de 2022, existiam mais de 850 mil carregadores rápidos disponíveis globalmente e mais de 1,8 milhão de carregadores lentos instalados. Além disso, é possível observar que a popularidade entre carregadores rápidos e lentos variam conforme região. A decisão de um país em investir mais em carregadores rápidos ou lentos pode depender de vários fatores. Países com grandes extensões territoriais e uma cultura de viagens longas podem priorizar carregadores rápidos para facilitar viagens intermunicipais ou interestaduais. Além disso, regiões cujo mercado de VEs é predominantemente composto por BEVs também tendem a priorizar a infraestrutura de carregadores rápidos, pois a maioria de seus VEs não possuem motores à combustão interna para auxílio em viagens longas. Em contraste, países com cidades densamente povoadas e curtas distâncias de viagem podem focar em carregadores lentos, incentivando os cidadãos a carregar seus VEs durante a noite ou enquanto trabalham. Além disso, considerações econômicas, políticas de infraestrutura e objetivos ambientais também desempenham um papel crucial na decisão de investimento.

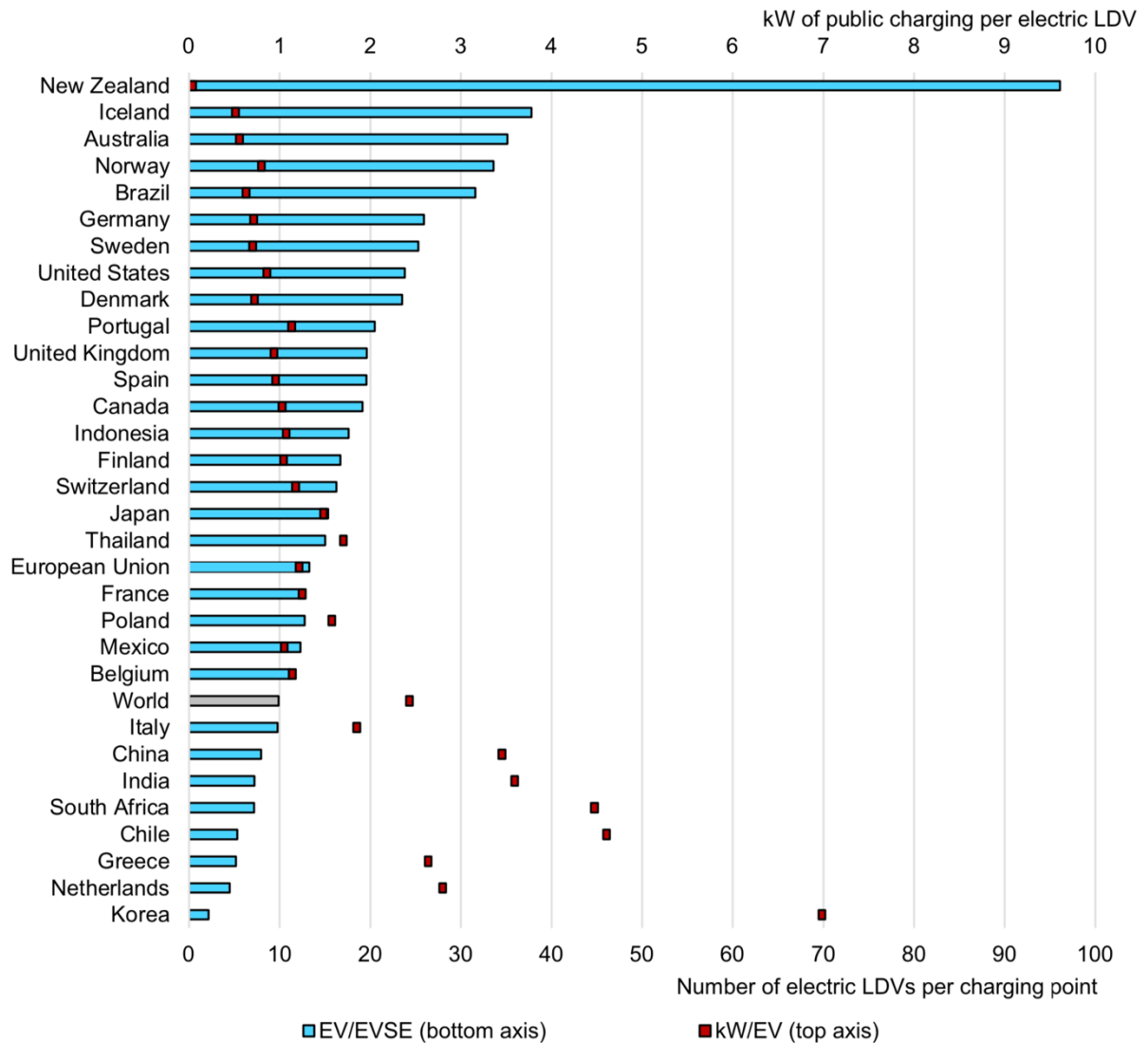
Figura 6 – Carregadores públicos instalados para VES, globalmente, por tipo e potência (2015-2022).



Fonte: *International Energy Association – IEA (2023)*.

Outra métrica que deve ser levada em consideração, além da razão entre VEs por número de estações de carregamento, é a capacidade total de carga de carregamento publicamente disponível por VE. Esse número é relevante pois diferentes estações podem proporcionar diferentes cargas de energia por tempo, visto que uma estação de carregamento rápido pode carregar mais VEs por unidade de tempo do que uma estação de carregamento lenta.

Figura 7 – Número de VEs por carregador público e kW por VE em 2022, por país.



Fonte: *International Energy Association – IEA (2023)*.

Com uma média de aproximadamente 31 VEs por pontos de recarga pública e menos de 1kW de energia pública por EV, o Brasil se encontra em uma posição desfavorável no ranking global de infraestrutura de recarga. A capacidade de carregamento brasileira está significativamente abaixo da média global de 2,4kW por VE (IEA, 2023). Ademais, devido a extensa região territorial do Brasil, essa métrica deve ser analisada por região para entender quais cidades e estados possuem boa concentração de eletropostos e quais regiões estão deficitárias.

3.3 INSTALAÇÃO DE ELETROPOSTOS

De acordo com, a IEA, estima-se que o número ideal de VEs por estação de recarga seja aproximadamente 10. Considerando a meta da IEA, o Brasil precisaria triplicar seu número de postos públicos de recarga para atingir a infraestrutura

adequada. No entanto, assumindo que o mercado de VEs no Brasil será predominantemente composto por HEVs e PHEVs, assim como é hoje, podemos projetar que esse número será menor, visto que a necessidade de recarga de híbridos é menor do que as de BEVs. Além disso, grande parte dos carregadores poderão ser compostos por carregadores lentos. De acordo com uma previsão da Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL), o Brasil atingirá a marca de 80.000 pontos de recarga de eletropostos instalados até 2040 (Loiola, 2021).

Atualmente, parcerias entre empresas de estacionamento, energia, *startups*, distribuidoras de combustível e montadoras de automóveis estão liderando a frente de carregamento no Brasil via instalação de postos semipúblicos. A Raízen, empresa de energia subsidiária da empresa Shell, é uma das líderes nesta evolução, planejando instalar 20 carregadores rápidos em postos Shell até 2024 via investimento de R\$ 24 milhões. Outro *player* relevante neste mercado é a parceria entre a empresa de estacionamentos Estapar e Enel, empresa de energia, denominada Ecovagas. As ecovagas são estações de carregamento localizadas em estacionamentos privados, como em prédios comerciais e *shoppings centers*.

No entanto, mesmo com o investimento de diversas iniciativas privadas, a expectativa, de acordo com o CEO da Tupinimbá Energia, empresa de soluções para VEs, é que o Brasil atinja somente 5.000 eletropostos ao final de 2024, em comparação com os 3.200 mil postos que existem em maio de 2023. A distância significativa entre o número de postos de recarga previstos para 2024 e a meta para 2030 ameaça o crescimento do mercado de VEs no Brasil.

Além da instalação de diversos eletropostos, o tipo do conector utilizado pelos carregadores também deve ser levado em consideração. O problema de padronização de *plugs* de carregadores de VEs é uma questão significativa que afeta a adoção e a conveniência da mobilidade elétrica. Atualmente, existem diversos padrões de *plugs* e conectores de carregamento utilizados em diferentes regiões e fabricantes de VEs. Alguns dos padrões mais conhecidos incluem o conector CCS (*Combined Charging System*), o conector CHAdeMO e o conector Tesla, expressos na Figura 5. Essa fragmentação dificulta a vida dos motoristas, uma vez que é necessário garantir que o *plug* do carregador seja compatível com o VE.

A falta de padronização também afeta a expansão da infraestrutura de carregamento. Empresas e governos que investem em estações de carregamento precisam tomar decisões sobre qual padrão adotar, o que pode resultar em

instalações incompatíveis com determinados tipos de VEs, limitando a acessibilidade e a utilidade da infraestrutura.

A solução ideal para o problema de padronização de *plugs* de carregadores de VEs é a adoção de um padrão globalmente aceito. Isso permitiria que os VEs fossem carregados em qualquer estação de carregamento, independentemente do fabricante ou localização geográfica. A padronização não apenas simplificaria a vida dos usuários, mas também impulsionaria a expansão da infraestrutura de carregamento, tornando a mobilidade elétrica mais acessível e atraente.

Felizmente, existem esforços em andamento para promover a padronização. Organizações como o CharIN (*Charging Interface Initiative*) estão trabalhando para desenvolver e promover padrões globais para os conectores de carregamento. A adoção de padrões de carregamento semelhantes aos utilizados em outras regiões também pode ajudar a resolver esse problema. Além disso, estão sendo fabricados adaptadores que permitem que um carregador conecte em um VE com *plugs* diferentes. Por exemplo, um adaptador permite com que um VE com carregamento tipo 1 possa ser conectado em um carregador tipo 2.

3.4 MATRIZ ENERGÉTICA E *SMART CHARGING*

Os VEs possuem impacto direto na redução das emissões de gases de efeito estufa e poluentes atmosféricos. No entanto, em países nos quais as matrizes energéticas são predominantemente compostas por geração de energia não renovável, VEs acabam não se tornando opções tão sustentáveis, pois utilizam energia que também geram impactos negativos ao meio ambiente durante sua produção.

A matriz energética brasileira, caracterizada por uma proporção considerável de fontes renováveis, como hidrelétricas e biomassa, permite que a eletrificação dos transportes contribua para a diminuição das emissões ligadas ao setor de transporte. Fontes de energia renováveis representam 47,7% na oferta de energia interna no Brasil (Empresa de Pesquisa Energética, 2019). De acordo com dados do Ministério de Minas e Energia, o transporte rodoviário é responsável por aproximadamente 10% das emissões totais de CO₂ no país. A adoção de VEs pode auxiliar na redução significativa desse número, fortalecendo as metas climáticas estabelecidas pelo Brasil.

No entanto, a introdução em massa de VEs traz consigo desafios relacionados à demanda de energia e à capacidade de geração. De acordo com estimativas da consultoria PricewaterhouseCoopers (PwC), a incorporação de 35 milhões de VEs até 2040 no Brasil corresponderia a 14% de toda demanda energética brasileira. O aumento da demanda energética pode ocasionar a elevação exacerbada de preços de energia e até mesmo levar a problemas de qualidade de energia elétrica. Isso requer investimentos em infraestrutura para garantir que a rede elétrica possa atender à crescente demanda sem sobrecarga.

Uma das soluções mais discutidas é a implementação *smart charging*, também conhecido como carregamento inteligente. A tecnologia refere-se a uma abordagem avançada de carregamento de VEs que utiliza sistemas de comunicação e controle para otimizar o processo de carregamento (IEA, 2022b), tendo como principais objetivos maximizar a eficiência energética, minimizar os impactos na rede elétrica e oferecer flexibilidade aos usuários de VEs.

Em um sistema de carregamento inteligente, os VEs se comunicam com a infraestrutura de carregamento e a rede elétrica por meio de tecnologias de conectividade e sistemas de comunicação sem fio. Isso permite que os VEs e a rede troquem informações em tempo real, possibilitando uma coordenação mais eficiente do carregamento. Os principais benefícios desse tipo de carregamento inteligente são:

- Gerenciamento de carga dinâmico: Os sistemas de *smart charging* podem ajustar a taxa de carregamento dos VEs de acordo com a demanda da rede elétrica. Isso evita picos de demanda que podem sobrecarregar a rede, distribuindo a carga de maneira uniforme ao longo do tempo. Carregamento de BEVs durante a noite podem mitigar aumentos de pico de demanda que ocorrem tipicamente ao final da tarde e início da noite (Needell, 2023).
- Integração com energias renováveis: Os sistemas de *smart charging* podem ser programados para carregar os VEs durante os períodos em que a produção de energia renovável, como a solar ou eólica, está em alta. Isso otimiza o uso de energia limpa e reduz a dependência de fontes não renováveis.
- Priorização de usuários e horários: Com o *smart charging*, os usuários podem programar seus VEs para carregar em horários específicos,

como durante a noite ou em momentos de tarifas de eletricidade mais baixas. Isso permite que os proprietários de VEs escolham quando é mais conveniente para eles e ajuda a evitar picos de demanda.

- Integração com a rede elétrica inteligente: O *smart charging* pode ser integrado a sistemas de rede elétrica inteligente, conhecidos como *smart grids*. Isso permite uma comunicação bidirecional entre os VEs e a rede, possibilitando ações coordenadas para otimizar a utilização da energia.

No entanto, vários desafios técnicos precisam ser superados para a instalação de uma rede de carregamento inteligente. Por exemplo, embora o carregamento planejado para horários de baixa demanda possa ser feito de forma manual (pois necessita apenas que o carregamento seja ligado e desligado de acordo com os horários de pico de demanda), a regulação de frequência exige controle automático e constante (IEA, 2023). Para que os VEs possam apoiar objetivos maiores do sistema elétrico, eles precisam ser capazes de ajustar o carregamento assim que o sistema enviar um sinal. Níveis tão elevados de coordenação só podem ocorrer por meio da digitalização e cooperação entre telecomunicações, empresas de conectividade e provedores de serviços de carregamento.

Além da utilização de *smart charging*, o planejamento logístico da distribuição de eletropostos pode aliviar os impactos negativos na matriz de energia elétrica. De acordo com um estudo feito em 2023, cientistas do Massachusetts Institute of Technology (MIT) concluíram que o carregamento planejado e a localização estratégica de estações de carregamento para VEs poderiam ajudar a reduzir as demandas de energia adicionais causadas pela adoção mais ampla de VEs, reduzindo a necessidade de aumento de oferta energética. Por exemplo, uma melhora na disponibilidade de estações de carregamento nos locais de trabalho, poderia ajudar a absorver a energia de pico gerada ao meio-dia a partir das instalações de energia solar, que, de outra forma, seria provavelmente desperdiçada. Assim, os carregadores nos locais de trabalho podem fornecer um benefício duplo, ajudando a reduzir a carga de pico à noite do carregamento de VEs e também aproveitando a produção de eletricidade solar (Trancik, 2023).

De acordo com o mesmo estudo do MIT, caso a organização de carregamento não for aprimorada, os picos noturnos de carregamento de VEs poderão demandar

uma instalação de geração energética 20% maior que a atual de forma global (Trancik, 2023).

4 BATERIAS

A tecnologia de baterias é peça fundamental para funcionamento adequado de VEs. À medida que a indústria se esforça para posicionar os VEs como alternativas superiores aos veículos ICE, fatores como autonomia da bateria, custo e longevidade surgem como considerações críticas. A necessidade de inovar baterias que não apenas possuam uma autonomia estendida e durações de carregamento reduzidas, mas que também sejam financeiramente acessíveis ao público em geral é o ponto central nas discussões sobre o futuro dos VEs. Paralelamente, com a crescente demanda por esse tipo de veículo, a aquisição de materiais utilizados como matéria-prima, incluindo lítio, cobalto e níquel, passou a ser tornar cada vez mais competitivo e caro para indústrias e consumidores finais.

4.1 TIPOS DE BATERIA

O princípio físico básico utilizado para armazenagem energética de VEs é bastante similar entre os diferentes tipos de baterias: utilizam reações químicas entre eletrodos e eletrólitos, convertendo-a em energia elétrica. Quando uma bateria é carregada, íons movem-se do eletrodo positivo (cátodo) para o eletrodo negativo (ânodo) através de um eletrólito. Quando o veículo está em uso, o processo é invertido. Os íons movem-se do ânodo para o cátodo, liberando energia elétrica no processo (Guo, 2021). Essa energia elétrica é então usada para alimentar o motor elétrico, que impulsiona o veículo.

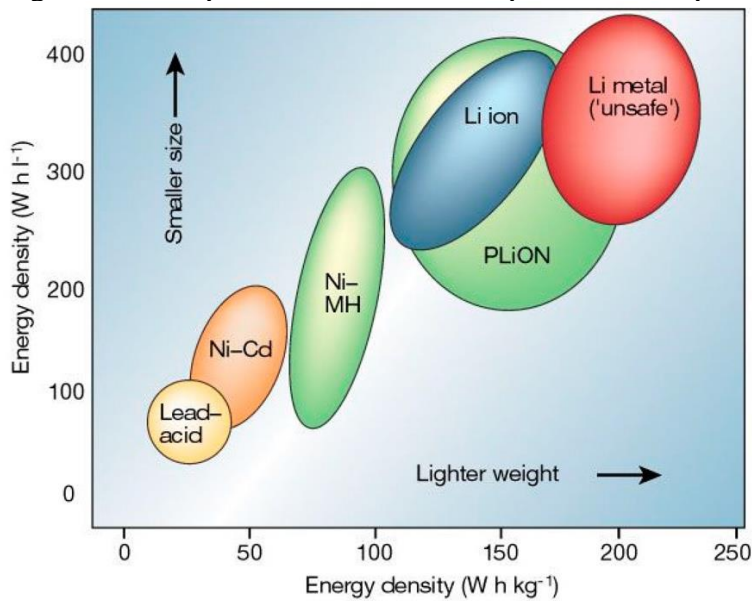
As diferenças nos materiais e elementos utilizados como cátodo e ânodo definem o tipo da bateria do VE. Os principais tipos de baterias comumente encontrados em VEs são os seguintes:

- Baterias de íon-lítio (Li-ion): Além de dominarem o mercado de veículos elétricos, estas baterias também dominam o mercado de eletrônicos portáteis. A popularidade desse tipo de bateria ocorre devido à sua alta densidade energética, que possibilita maior armazenamento de carga e, nos casos de veículos elétricos, maior autonomia em comparação a outras tecnologias de

baterias com o mesmo peso. Ademais, as baterias de íon-lítio possuem um bom ciclo de vida e uma taxa de autodescarga relativamente baixa. No entanto, requerem sistemas de gerenciamento de bateria (BMS, do inglês, *Battery Management System*) para garantir que funcionem de maneira otimizada e segura, uma vez que são sensíveis a altas temperaturas e sobrecargas (Hauser, 2015). Atualmente, a maioria dos VEs modernos são equipados com BMS que, além de monitorar e gerenciar o desempenho da bateria, também equilibra a carga entre as células da bateria, prolongando sua vida útil.

- Baterias de fosfato de ferro lítio (LiFePO_4): Uma subcategoria das baterias de íon-lítio, as baterias de fosfato de ferro lítio são notáveis pela sua segurança e estabilidade térmica. (Miao, 2019). Elas tendem a ter uma longa vida útil – cerca de 4 a 5x maior do que as de íon-lítio convencionais (Syue, 2010) – e são menos propensas a superaquecimento ou combustão quando comparadas a outras baterias de íon-lítio. No entanto, sua densidade energética é ligeiramente inferior, o que pode se traduzir em um alcance um pouco menor para os VEs, além de possuírem uma taxa de autodescarga mais elevada, podendo ser mitigada por um BMS (Miao, 2019).
- Baterias de níquel-hidreto metálico (NiMH): Antes do advento das baterias de íon-lítio, as baterias de níquel-hidreto metálico eram principal tipo de bateria em veículos elétricos híbridos (Hariprakash, 2009). Elas possuem uma densidade energética mais baixa do que as baterias de íon-lítio, mas são robustas e possuem um bom ciclo de vida (Zhang, 2016). A suas maiores desvantagens são seu peso e tamanho, custo elevado, superaquecimento em altas temperaturas e menor eficiência energética comparada às modernas baterias de íon-lítio.

Figura 8 – Comparativo de diferentes tipos de bateria por densidade energética.



Fonte: Miao (2019).

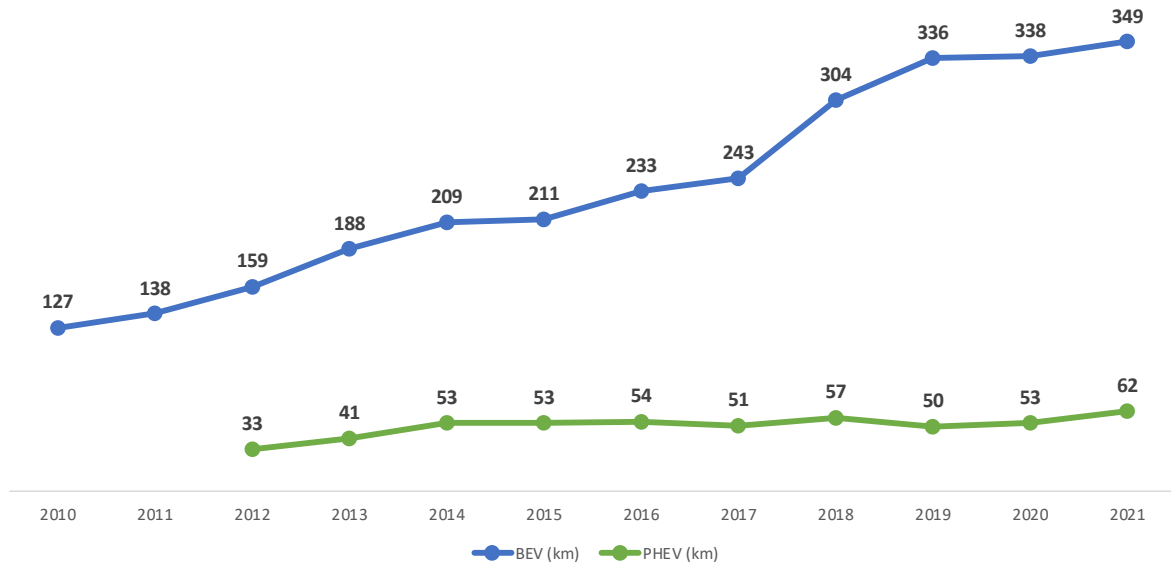
Na Figura 8 está expressa a relação de diferentes tipos de bateria, considerando sua densidade energética em termos de massa e volume. No eixo x está descrita a densidade energética em Watts hora por unidade de massa (kg), enquanto no eixo y está descrita a densidade energética em Watts hora por unidade de volume (L). O tipo de bateria com melhor relação de densidade energética é a bateria de lítio-metal, porém, essa não é utilizada em VEs pois possui tendência de gerar curto-circuito devido a pequenas fissuras no eletrólito. Assim, fica evidente que as baterias de íon-lítio são as mais apropriadas entre as baterias comumente disponíveis comercialmente.

4.2 AUTONOMIA

Conforme expresso anteriormente, um dos maiores desafios enfrentados pelo mercado de VEs é a baixa autonomia oferecida pelas baterias, após uma carga completa, em comparação com a autonomia oferecida por veículos ICE. De acordo com o estudo *Mobility Consumer Index* de 2022, da Ernest Young, o sentimento de *range anxiety* é responsável por um terço dos motivos pelos quais consumidores que possuem veículos ICE ainda não substituíram seus carros por VEs.

A autonomia média de VEs vem aumentando nos últimos anos, conforme expresso na Figura 9. Desde 2012 até 2021, o aumento da autonomia média dos BEVs e PHEVs foi de 190km (119,5%) e 29km (87,9%), representando um *CAGR* de 9,1% e 7,3%, respectivamente.

Figura 9 – Autonomia Média de BEVs e PHEVs por ano (km).

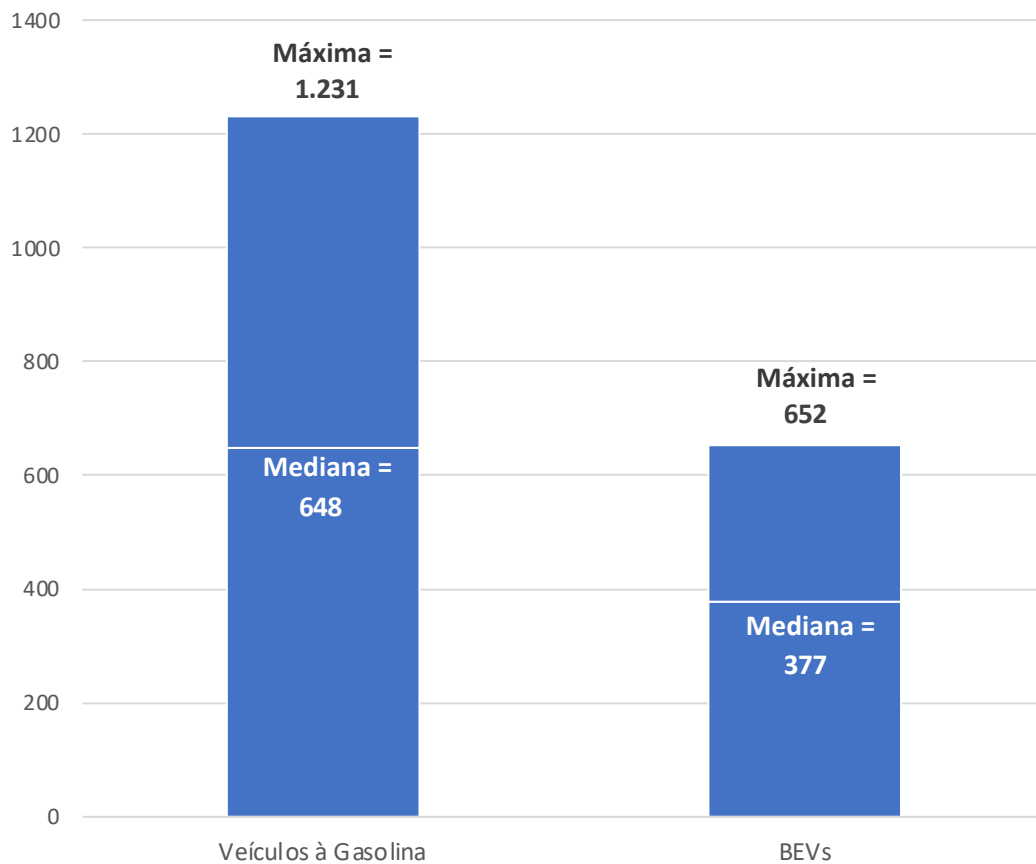


Fonte: Adaptado da *International Energy Agency* – IEA (2022b).

O crescimento na autonomia média dos VEs ocorreu principalmente por conta de avanços na eficiência dos motores elétricos, melhorias na capacidade de armazenagem de baterias e instalação de baterias maiores (IEA, 2022b). Embora os PHEVs tenham ultrapassado o marco de 60km de autonomia em 2021, devido principalmente a baterias maiores, sua evolução não foi tão significativa quanto a dos BEVs. Isso ocorre por conta de limitações de espaço geradas pela presença de motores a combustão interna, diminuindo o espaço disponível para baterias.

Embora a autonomia média dos BEVs tenha dobrado na última década, essa continua abaixo da autonomia média de carros movidos à gasolina (Figura 10). De acordo com dados do departamento de energia dos EUA, a mediana da autonomia de carros movidos à gasolina, modelo 2021, chega a ser mais de 71% maior do que a a dos BEVs do mesmo ano. Em comparação, o veículo à gasolina de maior autonomia vendido nos EUA possui uma capacidade 88,9% maior que o BEV de maior autonomia.

Figura 10 – Autonomia Máxima e Mediana entre Carros ICE e BEVs, modelos 2021 (km).



Fonte: Adaptado de Kane (2022).

A autonomia dos VEs pode ser ainda mais reduzida dependendo da temperatura ambiente na qual o carro se encontra. Em temperaturas frias, as reações químicas que ocorrem dentro de suas baterias desaceleram, reduzindo a capacidade da bateria de produzir corrente. Além disso, as temperaturas baixas podem aumentar sua resistência interna. Essa resistência se opõe ao fluxo de corrente elétrica, dificultando o fornecimento de energia de forma eficiente. A combinação de reações químicas mais lentas com o aumento da resistência interna impacta diretamente o desempenho de uma bateria em clima frio, diminuindo a autonomia do VE e aumentando as chances de autodescargas.

De acordo com um estudo feito pela American Automobile Association em 2019, na qual a autonomia de diversos VEs foi testada sob diferentes condições, uma temperatura ambiente de $-6,6^{\circ}\text{C}$ pode reduzir a autonomia de um VE em 12%, quando comparados a uma temperatura ambiente de $23,9^{\circ}\text{C}$. Ademais, caso o sistema de climatização do veículo esteja sendo utilizado, ainda em uma temperatura de $-6,6^{\circ}\text{C}$, sua autonomia pode ser reduzida em aproximadamente 41%.

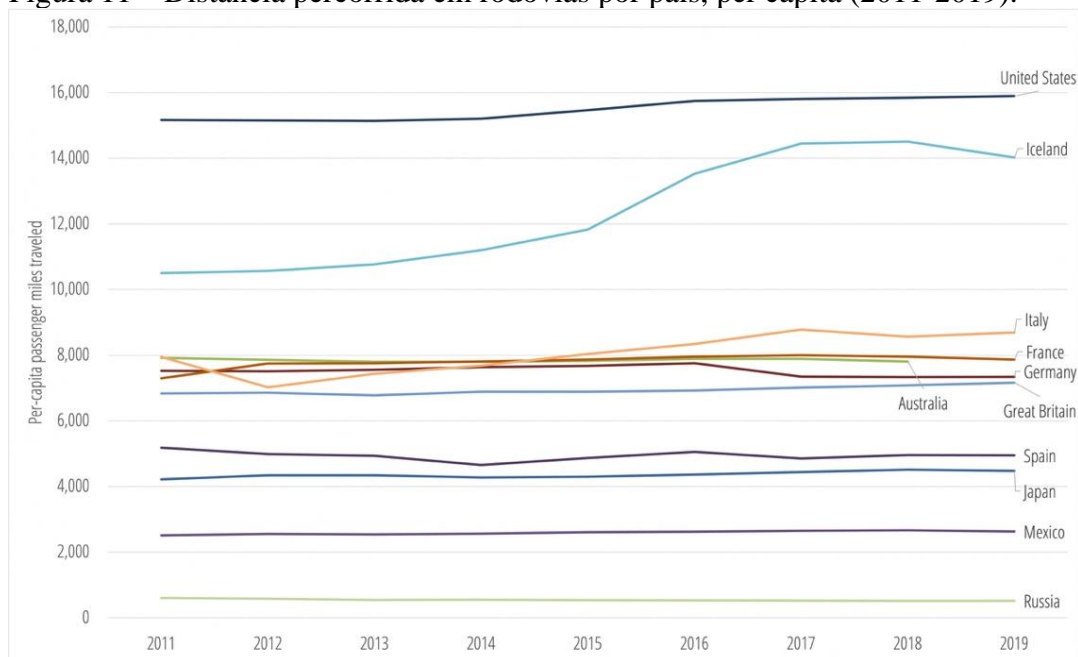
No entanto, existe o argumento de que embora a autonomia de VEs seja de fato menor que as de veículos ICE, isso não necessariamente apresentará um problema no futuro. É importante considerarmos que veículos ICE não costumam ser abastecidos diariamente, passando por períodos de dias ou até mesmo semanas sem receber combustível enquanto rodam diariamente, justificando uma autonomia mais alta. Já os PEVs possuem o benefício de serem carregados residencialmente, permitindo com que obtenham carga completa no início de todos os dias, diminuindo a necessidade de maior autonomia.

Embora um dos motivos pelo qual parte da população rejeita VEs seja devido à autonomia, existe a possibilidade da autonomia existente já ser significativamente maior do que os consumidores de fato necessitam. De acordo com dados do Departamento de Transporte dos EUA, 95,1% das viagens feitas em veículos pessoais são menores de 49,9km. Além disso, quase 60% de todas as viagens são de menores de 9,7km. Apenas 5% das viagens nos EUA são maiores do que 48km (Osaka, 2023), ultrapassando a autonomia de alguns PHEVs.

No entanto, devemos considerar, também, as viagens de longa distância, mesmo que ocorram de forma esporádica e rara. Nesses casos, a ausência de uma autonomia equivalente à de um veículo ICE poderá ser mitigada via a expansão de uma rede de carregadores rápidos, aliados ao uso extensivo de PHEVs que contam com motores ICE para auxílio em viagens distantes.

Portanto, fica evidente que a autonomia dos VEs atuais é diversas vezes superior a necessidade de autonomia da esmagadora maioria da população americana. Visto que os EUA é um dos países com maior número de distância viajada em rodovias, per capita – maior do que a França, Itália, Alemanha, Espanha, Japão, México, Rússia, Austrália, Islândia e Grã-Bretanha (OECD – Organization for Economic Co-operation and Development) – podemos extrapolar suas distâncias médias de viagens para o mundo e adota-las como premissas para os demais países.

Figura 11 – Distância percorrida em rodovias por país, per capita (2011-2019).



Fonte: Huxley-Reicher (2022).

Assim, estabelecendo que a vasta maioria da população global provavelmente não necessita autonomias de VEs maiores que as disponíveis atualmente, é cabível considerarmos que o desafio atual não seja mais a busca por baterias maiores e com maior alcance, mas sim a busca pela conscientização e educação populacional, com o objetivo da mudança de hábitos dos consumidores de veículos. Além disso, deve-se investir na infraestrutura de carregadores rápidos espalhados estrategicamente pelas rodovias para garantir viagens de longa-distância quando necessárias.

De acordo com a IEA (2023, p. 21),

Driving range remains an important consideration for consumers. Automakers typically aim for longer ranges to boost sales. On the other hand, increasing driving range typically implies larger batteries, increased resource needs and higher prices. In the long run, driving range is likely to plateau, as a market optimal vehicle range is reached and fast charging becomes more widely available.

4.3 CICLO DE VIDA E DESGASTE

As baterias de VEs sofrem reduções em sua capacidade total de armazenagem de carga conforme o veículo é utilizado. Cada ciclo de carga e descarga induz reações químicas dentro das células da bateria, levando ao acúmulo gradual de interface de eletrólito sólido (*SEI – solid electrolyte interface*) no ânodo, o que pode aumentar a resistência interna e reduzir a mobilidade dos íons. Simultaneamente, a expansão e

contração repetidas dos materiais do eletrodo durante o ciclo podem causar tensão mecânica, levando a microfissuras e perda de material do eletrodo (Wang, 2022). Além disso, a operação em altas temperaturas ou sob alta corrente pode acelerar esses processos de degradação, reduzindo a capacidade e eficiência geral da bateria ao longo de sua vida útil.

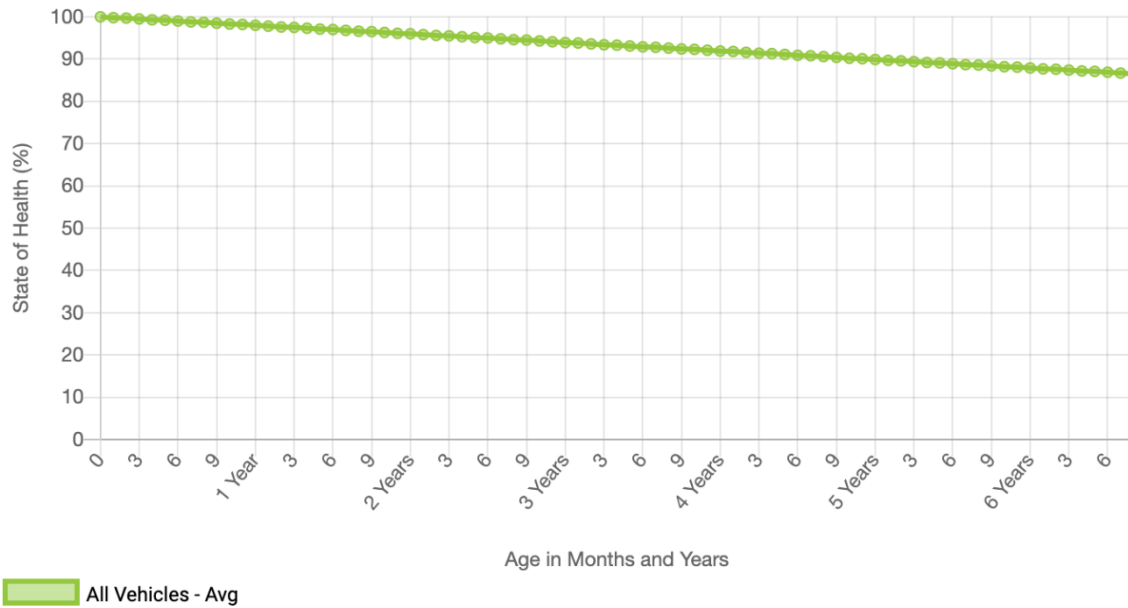
Conforme será discutido em maior detalhe no decorrer deste trabalho, as baterias correspondem ao componente mais caro na composição de um EV (Slowik, 2022). Portanto, muitos consumidores expressam preocupação em eventualmente terem de investir em baterias novas após suas baterias atuais se desgastarem parcialmente ou completamente.

A principal métrica utilizada para medição da degradação de baterias recarregáveis é denominada estado de saúde (state of health – SoH) (Urbano, 2009). O estado de saúde de uma bateria descreve a diferença entre uma bateria em estudo e uma bateria nova, considerando o envelhecimento da célula. É definido como a razão entre a carga máxima da bateria (Q_{max}) e sua capacidade original (C_r), sendo expressa como uma porcentagem, conforme abaixo.

$$SoH (\%) = 100 \frac{Q_{max}}{C_r} \quad (1)$$

De acordo com um estudo realizado pela Geotab, na qual avaliou-se a SoH de 21 VEs diferentes, estima-se que a média do SoH de VEs após 5 anos de uso seja de 89,9% (Figura 12).

Figura 12 – SoH médio entre 21 VEs de 14 montadoras diferentes durante 6 anos.



Fonte: Argue (2020).

Diferentes veículos possuem taxas de degradação de bateria diferentes. Por exemplo, alguns modelos de veículos possuem uma queda linear de 1,5-2,0% ao ano, enquanto outros experienciam queda de 2-3% nos primeiros anos antes de se estabilizar em 1% ao ano. Já no Tesla Model S, muitas unidades perdem menos de 5% da autonomia de 80.000 a 320.000 km (Wiesenfelder, 2022).

Tipicamente, montadores de VEs oferecem garantias para suas baterias de 8 a 10 anos de uso ou 160.000km a 241.401km rodados, variando por empresa e veículo. Por exemplo, a empresa Tesla Inc., oferece a troca completa da bateria de seu veículo “Model S” caso a bateria apresente capacidade abaixo de 70% sua capacidade original após 8 anos ou após 160 mil km rodados.

De acordo com expectativas atuais da indústria, espera-se que baterias de veículos elétricos durem entre 160.000 e 320.000 km, ou cerca de 15 a 20 anos. No entanto, mesmo quando as baterias de VE envelhecem, sua grande capacidade inicial combinada com pequenas perdas na capacidade da bateria significa que o envelhecimento é quase imperceptível para os motoristas (Wiesenfelder, 2022). De acordo com um estudo realizado por Consumer Reports, o ciclo de vida médio para um carro ICE convencional é de aproximadamente 240.000km.

Ao compararmos VEs com carros ICE, observamos que seus ciclos de vida são similares, mesmo com uma gradual degeneração da capacidade de armazenamento de baterias dos VEs.

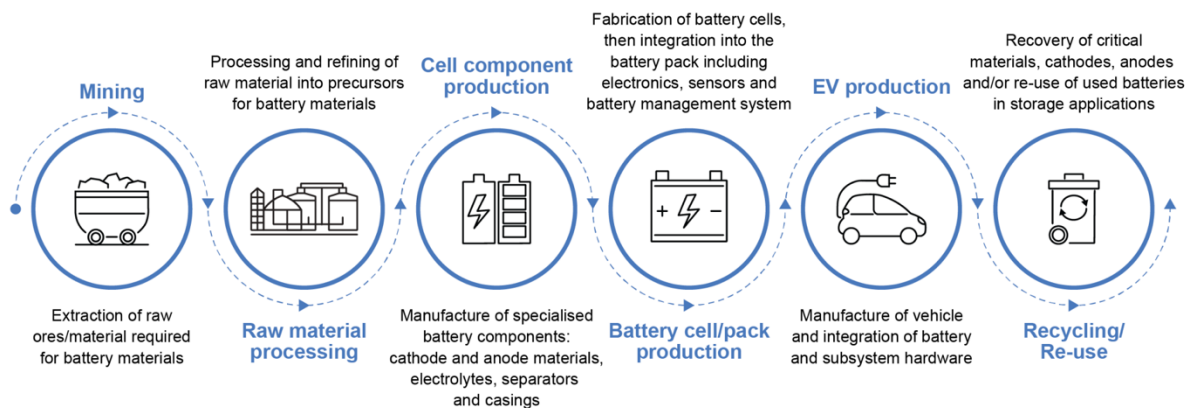
4.4 CUSTO

O custo elevado da bateria é um dos maiores desafios enfrentados pela indústria de VEs. A bateria é responsável pela maior parte do alto custo de produção de VEs, representando aproximadamente, 72,7% do custo de produção médio de BEVs em relação aos componentes e peças relacionados ao trem de força (Slowik, 2022). O segundo componente com maior custo no processo produtivo de um BEV é o *Electric Drive Module (EDM)*, responsável pela integração entre a transmissão, motor elétrico e demais componentes de potência. O custo da bateria é aproximadamente 11,25x mais caro do que o EDM, representando enorme discrepância entre o custo de bateria e o custo do restante do veículo.

Embora seja o custo mais relevante de um VE, o custo de bateria vem decrescendo exponencialmente nos últimos anos. Nos EUA, o custo médio de uma bateria decresceu mais de 80% de 2012 até 2022 (Slowik, 2022). Essa queda ocorreu principalmente pela realização de inovações tecnológicas originadas por pesquisa e desenvolvimento, financiadas tanto pelo setor privado quanto público. No entanto, a taxa na qual o custo das baterias decresce está reduzindo desde 2021, sinalizando uma possível estagnação no preço desse componente. Para o entendimento dos motivos pelos quais os custos de bateria continuam elevados, é necessário a explicação do processo fabril de uma bateria.

A fabricação e cadeia de suprimentos das baterias de VEs envolvem diversas etapas críticas (Figura 13). Inicia-se com a mineração de matérias-primas, como lítio, cobalto, níquel e manganês. Estes materiais são refinados e processados para produzir componentes da bateria, como cátodos, ânodos e eletrólitos. Em seguida, esses componentes são montados para formar células de bateria, que são agrupadas em módulos e, posteriormente, em pacotes de baterias. Uma vez fabricadas, as baterias são integradas aos VEs. Ao longo desta cadeia, é crucial garantir a logística e o transporte adequados, bem como a reciclagem e o descarte responsável das baterias no final de sua vida útil.

Figura 13 – Cadeia produtiva de baterias para VEs.



Fonte: *International Energy Agency - IEA (2022b)*.

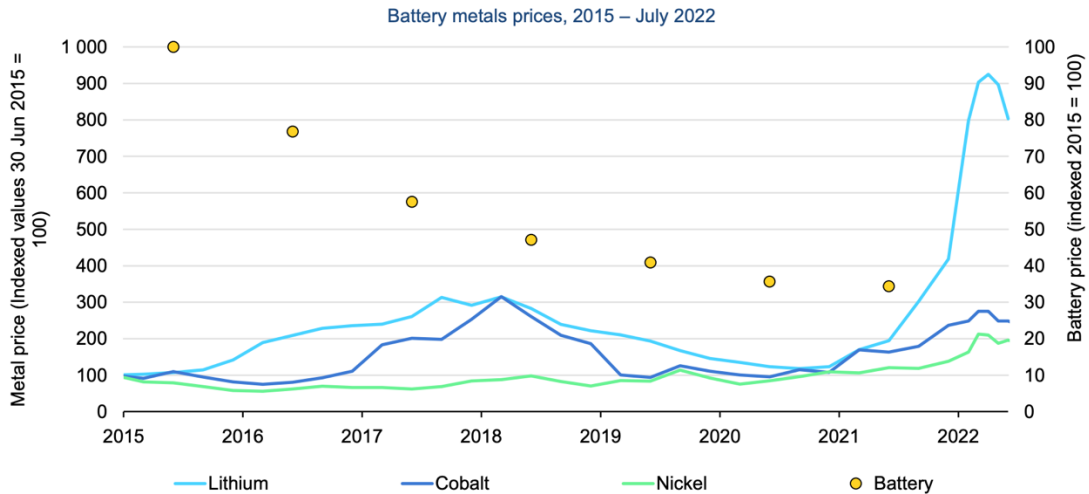
O alto custo das baterias de VE é um complexo intercâmbio entre dois principais fatores: elevado custo de matéria-prima e dificuldades na cadeia de fornecimento e produção. As principais matérias-primas para as baterias de VE, especialmente as baterias de íon-lítio, são lítio, cobalto, níquel e manganês. Esses materiais possuem diversos desafios particulares que tornam seu processo de obtenção caros e complicados. Por exemplo, o lítio e o cobalto são relativamente raros, e seus depósitos estão concentrados em regiões específicas do mundo. Essa concentração geográfica pode levar a restrições de fornecimento, especialmente se houver tensões geopolíticas ou restrições comerciais nessas regiões.

O cobalto, em particular, é principalmente obtido da República Democrática do Congo (RDC), uma região conhecida por sua instabilidade política e preocupações éticas relacionadas às práticas de mineração. Aproximadamente 73% da produção global de cobalto é oriundo da RDC (Cobalt Institute, 2022). Isso adiciona uma camada de complexidade e potencial volatilidade ao seu fornecimento. Níquel e manganês, embora mais abundantes, ainda requerem energia e recursos significativos adicionais para mineração e refino aos níveis de pureza necessários para a produção de baterias.

Com o aumento da demanda por VEs, os preços desses materiais passaram por aumentos dramáticos em 2022 (Figura 14). Os principais fatores que levaram ao aumento dos preços dessas matérias-primas incluem inflação, guerra entre Ucrânia e Rússia e atritos comerciais (Slowik, 2022). A oferta global de matéria-prima para os próximos anos pode ficar mais escassa, com o risco de diminuição da taxa na qual o custo de baterias diminuí com o tempo, caso os preços desses materiais continuem

elevados (Slowik, 2022). Em maio de 2022, os preços do lítio eram mais de sete vezes superiores aos de início de 2021, devido à demanda sem precedentes por baterias e à falta de investimento suficiente em capacidade de fornecimento (IEA, 2022b).

Figura 14 – Variação de preço das principais matéria-primas de baterias de íon-lítio.



Fonte: *International Energy Agency - IEA (2022b)*.

A pressão no fornecimento de matéria-primas tende a aumentar conforme o transporte rodoviário tende a zerar suas emissões de carbono. De acordo com o cenário de compromissos anunciados (APS, do inglês, *Announced Pledges Scenario*), a demanda por baterias de VEs aumentará de cerca de 340 GWh hoje para mais de 3500 GWh até 2030 globalmente. Além disso, o nível de oferta de lítio terá de aumentar em um terço até 2030 para atingir os níveis do APS (IEA, 2022b). O APS é um cenário desenvolvido pela IEA que leva em consideração os vários compromissos e promessas feitos por países e organizações globalmente em relação às metas de energia e clima. Para cumprir com essa demanda, investimentos adicionais em mineração e extração terão de ser realizados. A cadeia de fornecimento desses materiais é especialmente complicada, pois seus *lead times* são muito mais longos do que para outras partes da cadeia de fornecimento - em alguns casos, exigindo mais de uma década de preparo desde estudos de viabilidade iniciais até a produção, e depois vários anos adicionais para atingir a capacidade de produção nominal (IEA, 2022b). Essa camada adicional de complexidade dificulta sua atratividade para possíveis investidores, consequentemente dificultando inovação no setor.

Além dos custos relacionados a matéria-prima, o processo inteiro de fabricação de uma bateria ainda requer uma alta demanda de energia e mão-de-obra, tornando

o produto final ainda mais caro. As baterias requerem materiais de alta pureza e, portanto, fontes de alta qualidade, bem como um refinamento significativo. Esses processos de refino geralmente envolvem processos industriais pesados baseados em calor ou tratamento químico (tipicamente pirometalurgia e/ou hidrometalurgia) para refinar o minério bruto nos produtos químicos comumente necessários, carbonato de lítio ou hidróxido, ou sulfato de cobalto e níquel (IEA, 2022b). A alta concentração do mercado de empresas de refinamento também contribuem para o encarecimento das baterias, visto que apenas 5 empresas são responsáveis três quartos de toda produção mundial (IEA, 2022b).

A terceira etapa da produção de baterias, a produção dos componentes que farão parte das células de energia, também exige elevado consumo financeiro para sua realização. Essa etapa consiste na transformação dos materiais refinados em cátodos, ânodos eletrólitos e separadores. Para tanto, é necessário a utilização técnicas avançadas de química de materiais e engenharia (IEA, 2022b). Novamente, a produção dos componentes que compõem a célula da bateria também é concentrada em poucas companhias globais.

Após a elaboração desses componentes, inicia-se as etapas de montagem das células de bateria para serem agrupadas em módulos e, finalmente, em pacotes. A produção de células é um processo de várias etapas com duas principais etapas: fabricação do eletrôdo e fabricação da célula. Embora os fabricantes de células utilizem diferentes designs, os processos de fabricação de células são semelhantes, utilizando tecnologias maduras e bem estabelecidas. Esses processos são intensivos em energia, sendo conduzidos em condições de sala limpa e seca altamente controladas para evitar quaisquer impurezas e umidade. A produção de células é um processo que exige intensivo uso de capital, sendo 63% de sua produção global em 2021 concentrada por 3 empresas: CATL, LG Energy Solution e Panasonic (IEA, 2022b).

Por fim, a fabricação do pacote de bateria pode ser concluída tanto pelo fabricante da célula quanto pelo fabricante do automóvel. As células são primeiro acomodadas juntas em molduras de módulo. Em seguida, o pacote de bateria é montado através da integração de módulos, do sistema de gerenciamento de bateria, eletrônicos e sensores, todos encapsulados em uma estrutura final.

Em síntese, o alto custo das baterias de VE, sob a perspectiva de matérias-primas e cadeia de fornecimento, é resultado dos desafios associados à obtenção de

materiais raros e geograficamente concentrados, das complexidades da cadeia de fornecimento global e das dificuldades associadas à ampliação da produção para atender à crescente demanda.

5 CUSTO TOTAL DE PROPRIEDADE

No cenário automobilístico atual, os VEs são frequentemente aclamados como uma alternativa mais sustentável e econômica em comparação aos carros ICE. No entanto, ao se aprofundar na análise financeira de possuir um VE, pode-se descobrir que o custo total de propriedade pode, em alguns casos, ser mais elevado do que o de um carro convencional. O custo total de propriedade (TCO, do inglês, *Total Cost of Ownership*), refere-se ao custo total de aquisição e operação de um produto ou sistema ao longo de sua vida útil. Em vez de apenas considerar o preço de compra inicial, o TCO leva em conta todos os custos associados ao produto, desde a aquisição até o descarte, incluindo custos diretos e indiretos. Este capítulo busca realizar uma análise do TCO de diferentes tipos de VEs em diferentes regiões, comparando-os com os de carros convencionais. Assim, pode-se determinar o verdadeiro custo de longo prazo entre as diferentes modalidades de transporte. Para determinar o TCO, os seguintes custos são tipicamente analisados:

- Custo de aquisição: Preço de compra inicial do veículo.
- Custos de carregamento/combustível: Custo da eletricidade para carregar VEs e possíveis atualizações de infraestrutura, como a instalação de um carregador doméstico. No caso dos veículos ICE, serão analisados os custos de combustíveis como gasolina e diesel.
- Custos de manutenção: Custos de troca de peças, trocas de equipamento, óleo e reparos gerais.
- Incentivos e subsídios: Muitos governos oferecem incentivos fiscais ou subsídios para a compra de VEs, o que pode reduzir o TCO.
- Depreciação: Perda de valor dos veículos ao longo do tempo, que pode ser influenciada pela evolução da tecnologia de baterias e pela infraestrutura de carregamento.
- Custos de descarte: Custos associados à venda, reciclagem ou descarte do veículo no final de sua vida útil.

Para estimar o TCO de VEs no Brasil em comparação com veículos ICE, foram projetados diversos cenários utilizando diferentes modelos de veículos, taxas de subsídios, tipos de VEs e formas de carregamento. O primeiro cenário faz uma comparação entre os custos de dois veículos de porte e potência similar, ambos sendo

entre os veículos mais vendidos no Brasil em suas respectivas categorias: Renault Zoe E-Tech (BEV) e Chevrolet Onix (ICE). As projeções de custo foram elaboradas para um período de 10 anos a partir de 2023. Os custos de gasolina, energia elétrica, seguros e manutenção foram projetadas com base em seus custos respectivos no ano de 2023. As variáveis utilizadas para as projeções do cenário 1 estão expressas abaixo (Tabela 1).

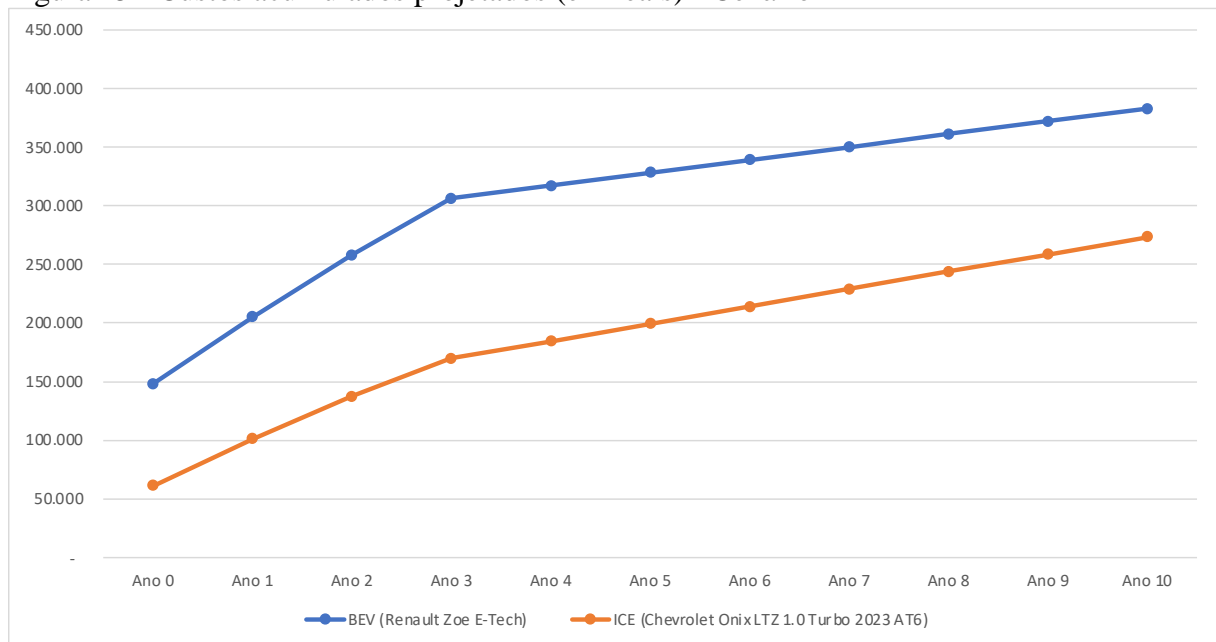
Tabela 1 - Quadro de Variáveis do Cenário 1 (veículos populares em condições atuais)

Cenário 1	BEV	ICE	Fonte
Custos de Aquisição			
Custo do veículo	R\$240.000	R\$102.350	Fabricante
Imposto de importação	0%	0%	
Imposto por CO ₂	0%	0%	
Instalação de carregador residencial	R\$7.000	N/A	Média elaborada pelo autor
Custos de Operação			
Seguro anual	R\$5.340	R\$4.000	Média elaborada pelo autor
IPVA (% sobre valor do veículo)	1,50%	3,00%	Média elaborada pelo autor
Manutenção anual	R\$613	R\$913	Fabricante
Consumo energético (km/kWh)	6,6	N/A	Fabricante
Custo de eletricidade médio (R\$/kWh)	R\$0,70	N/A	Aneel
Consumo de gasolina (km/L)	N/A	11,1	Fabricante
Custo eletricidade médio carregador público	R\$2,00	N/A	Média elaborada pelo autor
Custo gasolina (R\$/L)	N/A	5,82	Petrobrás
Estrutura de Financiamento			
Pagamento de entrada sobre o total	60%	60%	
Taxa de juros (anual)	13,4%	28,0%	Banco Central e Banco do Brasil
Prazo de pagamento	3 anos	3 anos	Banco Central e Banco do Brasil
Carregamento e Consumo			
Carregamento residencial	100%	N/A	
Carregamento rápido e/ou público	0%	N/A	
Distância anual rodada (km)	13.000	13.000	KBB Brasil

Fonte: Elaboração própria

Todas informações que não são oriundas das fabricantes dos veículos, como IPVA, distância média rodada por carros no Brasil, manutenção anual, prêmio de seguro anual e custos médios de energia elétrica, são valores médios obtidos via agências públicas, Banco Central e pesquisas de mercado. Utilizando os dados dispostos na tabela anterior como premissa dos custos de cada veículo, projetou-se o TCO abaixo (Figura 15).

Figura 15 - Custos acumulados projetados (em reais) - Cenário 1



Fonte: Elaboração própria

Conforme podemos observar no gráfico acima, nos parâmetros atuais de custos no Brasil, o BEV em análise tende a possuir maior TCO do que o veículo ICE em análise. Os custos do BEV em questão superam os custos do veículo popular à combustão desde o momento de sua aquisição até seus custos recorrentes anuais de propriedade e operação. Assumindo que os veículos utilizados no Cenário 1 possuem custo de aquisição e demais variáveis similares aos demais veículos de suas categorias, pode-se extrapolar as conclusões dessa projeção para as modalidades BEV e carros ICE populares em geral.

Pode-se observar que a principal diferença entre os custos de cada veículo ocorre no custo de aquisição, com o custo do BEV sendo mais que o dobro do custo de aquisição do carro ICE. Atualmente, para VEs, existem opções de financiamento com juros mais baixos do que os juros de mercado, permitindo com que consumidores posterguem parte de seu custo inicial para os anos subsequentes. Além disso, diversos estados brasileiros possuem isenção total ou parcial da alíquota de IPVA para VEs, reduzindo drasticamente o custo anual do veículo. No entanto, essas vantagens ainda não foram suficientes para tornar o custo total do BEV inferior ao custo total de um carro ICE. O custo projetado acumulado de 10 anos do Renault e do Chevrolet é de R\$ 382,8 mil e R\$ 273,3 mil, respectivamente, representando uma diferença de 40,1%.

Para o próximo cenário, projetou-se condições otimistas para o mercado de VEs, com a eliminação do IPVA para BEVs, decréscimo de 30% do custo de aquisição do veículo e a criação de um imposto para carros ICE na qual suas emissões de CO₂ são taxadas anualmente. As mudanças das variáveis estão destacadas em amarelo, na tabela abaixo (Tabela 2).

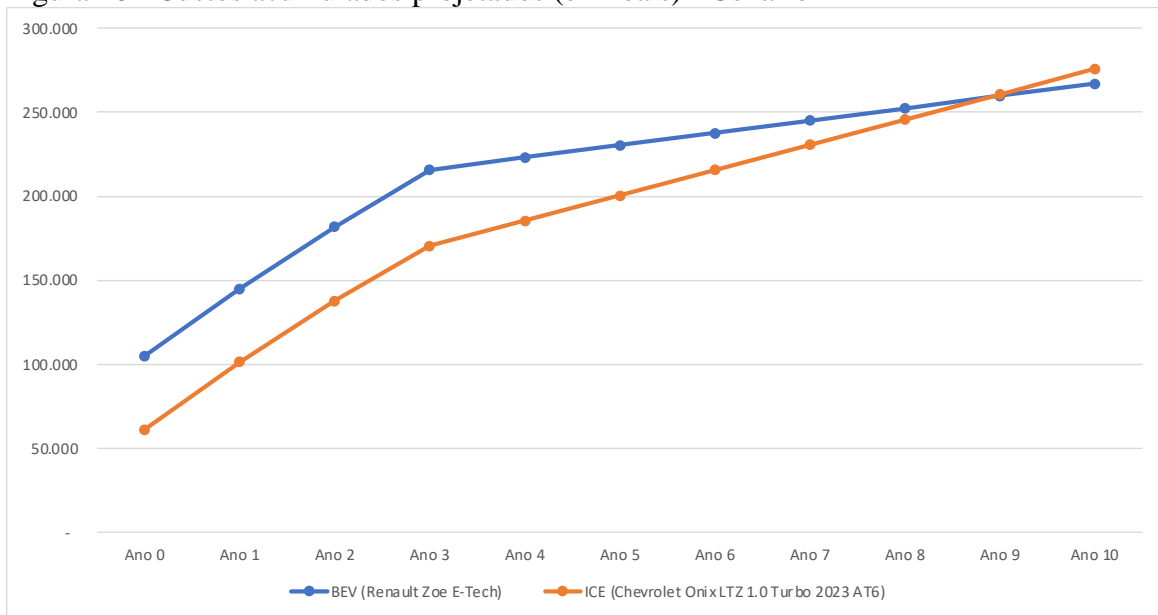
Tabela 2 - Quadro de Variáveis do Cenário 2 (veículos populares em condições otimistas)

Cenário 2	BEV	ICE	Fonte
Custos de Aquisição			
Custo do veículo	R\$168.000	R\$102.350	Fabricante
Imposto de importação	0%	0%	
Instalação de carregador residencial	R\$7.000	N/A	Média elaborada pelo autor
Custos de Operação			
Seguro anual	R\$5.340	R\$4.000	Média elaborada pelo autor
IPVA (% sobre valor do veículo)	0,00%	3,00%	Média elaborada pelo autor
Imposto por CO ₂	N/A	R\$ 200/ton	
Manutenção anual	R\$613	R\$913	Fabricante
Consumo energético (km/kWh)	6,6	N/A	Fabricante
Custo de eletricidade médio (R\$/kWh)	R\$0,70	N/A	Aneel
Consumo de gasolina (km/L)	N/A	11,1	Fabricante
Custo eletricidade médio carregador público	R\$2,00	N/A	Média elaborada pelo autor
Custo gasolina (R\$/L)	N/A	5,82	Petrobrás
Estrutura de Financiamento			
Pagamento de entrada sobre o total	60%	60%	
Taxa de juros (anual)	13,4%	28,0%	Banco Central e Banco do Brasil
Prazo de pagamento	3 anos	3 anos	Banco Central e Banco do Brasil
Carregamento e Consumo			
Carregamento residencial	100%	N/A	
Carregamento rápido e/ou público	0%	N/A	
Distância anual rodada (km)	13.000	13.000	KBB Brasil

Fonte: Elaboração própria

Mesmo com mudanças significativas e otimistas nos parâmetros do mercado automobilístico, o TCO dos carros ICE ultrapassa os custos dos BEVs apenas após o 9º ano, encerrando o ciclo de 10 anos com seus custos apenas 3,3% mais elevados (Figura 16).

Figura 16 - Custos acumulados projetados (em reais) - Cenário 2



Fonte: Elaboração própria

Assim, fica evidente que para BEVs obterem maior espaço no mercado de carros populares no Brasil, diversas mudanças terão de ocorrer para tornar o custo dos veículos mais acessível aos consumidores. Avanços tecnológicos de bateria, otimização de processos produtivos, maior oferta de matéria-prima e subsídios governamentais serão necessários para redução do custo de aquisição desses veículos. Já no âmbito de operação, incentivos fiscais e maior oferta de energia elétrica por preços menores serão peças-chaves na redução do custo total de propriedade de VEs.

Por fim, realizou-se a projeção de um terceiro cenário, no qual foram utilizados veículos de alto padrão para a análise do TCO. Para o BEV foi escolhido a SUV iX3 M Sport da BMW, enquanto o ICE analisado foi a SUV X3, também da BMW. Abaixo encontra-se a tabela com os parâmetros utilizados nas projeções (Tabela 3).

Tabela 3 - Quadro de Variáveis do Cenário 3 (veículos de alto padrão em condições atuais)

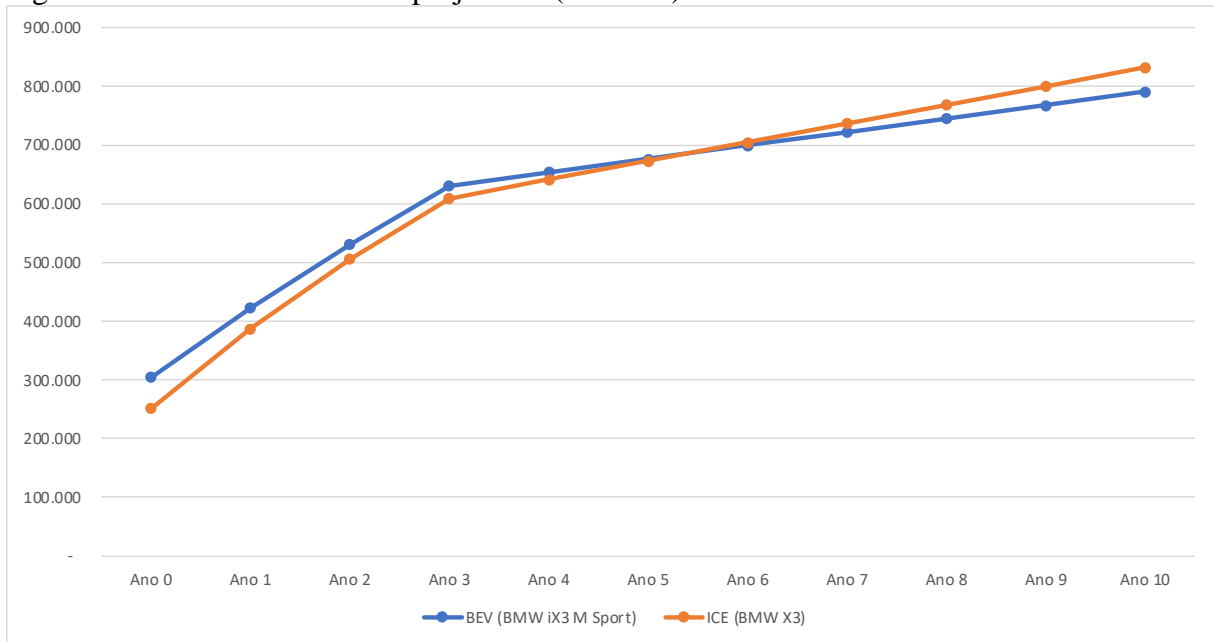
Cenário 3	BEV	ICE	Fonte
Custos de Aquisição			
Custo do veículo	R\$500.950	R\$419.950	Fabricante
Imposto de importação	0%	0%	
Instalação de carregador residencial	R\$7.000	N/A	Média elaborada pelo autor
Custos de Operação			
Seguro anual	R\$12.500	R\$8.903	Média elaborada pelo autor
IPVA (% sobre valor do veículo)	1,50%	3,00%	Média elaborada pelo autor
Manutenção anual	R\$1.200	R\$1.450	Fabricante
Consumo energético (km/kWh)	5,4	N/A	Fabricante
Custo de eletricidade médio (R\$/kWh)	R\$0,70	N/A	Aneel
Consumo de gasolina (km/L)	N/A	8,5	Fabricante
Custo eletricidade médio carregador público	R\$2,00	N/A	Média elaborada pelo autor
Custo gasolina (R\$/L)	N/A	5,82	Petrobrás
Estrutura de Financiamento			
Pagamento de entrada sobre o total	60%	60%	
Taxa de juros (anual)	13,4%	28,0%	Banco Central e Banco do Brasil
Prazo de pagamento	3 anos	3 anos	Banco Central e Banco do Brasil
Carregamento e Consumo			
Carregamento residencial	100%	N/A	
Carregamento rápido e/ou público	0%	N/A	
Distância anual rodada (km)	13.000	13.000	KBB Brasil

Fonte: Elaboração própria

Conforme o padrão dos veículos aumenta, a discrepância entre o custo de aquisição de suas versões elétricas, híbridas ou à gasolina tendem a diminuir. Essa diminuição oferece vantagem aos VEs, pois esses tendem a possuir menor custo de operação e manutenção, diminuindo seus custos acumulados de longo prazo quando comparados a carros ICE.

Os custos de manutenção utilizados são valores de pacotes de revisões periódicas oferecidas pela fabricante, que incluem troca de filtro do ar-condicionado, troca de filtro do óleo, troca de óleo e outras manutenções básicas. Por possuírem menos peças móveis e não necessitarem de óleo, VEs acabam tendo menor custo de manutenção periódica básica. No entanto, eventuais manutenções ocasionadas por danos nos veículos podem ser mais custosas em VEs. Por exemplo, por serem mais pesados e possuírem maior habilidade de aceleração, VEs utilizam pneus de maior qualidade, aumentando o custo de troca de pneu em caso de desgaste ou perfuração. Além disso, danos a bateria podem ser extremamente custos, pois é necessária a reposição dos módulos de bateria ou até mesmo da bateria em sua totalidade.

Figura 17 - Custos acumulados projetados (em reais) - Cenário 3



Fonte: Elaboração própria

Na figura 17 observa-se que o BEV possui menor TCO no longo prazo quando comparada a sua versão movida à gasolina. No entanto, essa diferença de apenas 5,22% ainda é pequena, podendo ser facilmente mitigada pelo aumento do custo da energia elétrica ou pela diminuição do preço da gasolina. Além disso, embora VEs de alto padrão tipicamente possuam TCO menor do que os ICE de mesma categoria, o mercado de veículos ainda é dominado por carros populares e econômicos. O preço médio dos veículos vendidos no Brasil é de R\$ 148 mil (Paixão, 2023), valor inferior a maioria dos VEs disponíveis no mercado. Portanto, o elevado custo dos VEs para a maioria dos consumidores ainda segue como principal impedimento para a adoção em massa de veículos elétricos.

6 CONCLUSÕES

Embora o mercado de veículos elétricos (VEs) tenha crescido exponencialmente, tanto no Brasil quanto no mundo, sua representatividade na frota de veículos ainda é marginal no Brasil. Em síntese, dois obstáculos principais se destacam para o sucesso do mercado de VEs: a falta de infraestrutura adequada e os custos associados à aquisição e manutenção dos VEs.

A ausência de eletropostos de recarga aliada a falta de preparo da rede elétrica para suprir as demandas de energia ocasionada pelo potencial aumento de VEs nas ruas não permitem com que VEs possam ser utilizados em escala massiva no Brasil. Será necessária a instalação de uma extensiva rede de eletropostos para garantir viagens de longa distância para VEs, reduzindo o sentimento de *range anxiety* por parte dos consumidores e, conseqüentemente, aumentando o *market share* desse setor no mercado de transportes. Além disso, novas tecnologias como o smart charging e baterias mais longevas/autônomas são avanços na direção da massificação do consumo de carros elétricos no Brasil e no mundo.

A autonomia dos VEs, outro ponto crítico para muitos consumidores, está diretamente ligada à capacidade e eficiência de suas baterias. Atualmente, baterias proporcionam menor autonomia para veículos quando comparados a motores movidos à combustão interna (ICEs, do inglês, *Internal Combustion Engine*), contribuindo para o sentimento de *range anxiety* e causando resistência na adoção de VEs por grande parte da população. Em climas mais frios, as baterias podem enfrentar maiores perdas em suas capacidades de armazenamento de carga, gerando obstáculo adicional para a adoção de VEs em regiões com temperaturas mais baixas.

Por outro lado, uma perspectiva otimista sugere que, embora a autonomia dos VEs possa ser menor em comparação com os veículos de combustão interna tradicionais, isso não necessariamente se traduz em uma desvantagem prática. Os VEs têm o benefício adicional de poderem ser carregados em casa, permitindo que comecem cada dia com uma carga completa. Esta rotina de carregamento diário pode reduzir a necessidade de uma autonomia extremamente alta, especialmente para aqueles que fazem principalmente viagens curtas no dia a dia. Além da autonomia, outros desafios relacionados às baterias incluem seu ciclo de vida, custo de reposição e impacto ambiental. Com o avanço contínuo da tecnologia de baterias, espera-se que

esses desafios sejam progressivamente superados, tornando os VEs uma opção cada vez mais viável e atraente para um público mais amplo.

Em relação aos seus custos gerais, a aquisição de VEs ainda é percebida como um investimento inicial alto. Entretanto, quando analisamos o Custo Total de Propriedade em modelos de alto padrão, os VEs tendem a apresentar vantagens econômicas de longo prazo em comparação com seus equivalentes de combustão interna. Ainda assim, a realidade do mercado automobilístico brasileiro, dominado por carros econômicos, faz com que o custo represente uma barreira significativa para a adoção em massa de VEs.

Os custos altos atrelados aos EVs são ocasionados, majoritariamente, pelo alto custo de matéria-prima de baterias, alta complexidade tecnológica dos VEs e desafios logísticos e produtivos. Conforme a produção de VEs ganha maior escala, seu custo de produção tende a diminuir, assim como tem ocorrido historicamente. Projeta-se que o custo médio de um pacote de bateria nos EUA decrescerá de aproximadamente 175 USD/kWh em 2018 para 60 USD/kWh até 2035 (Slowik, 2022).

Para que o Brasil possa acompanhar a tendência global de eletrificação veicular, será necessário um esforço conjunto entre governo, indústria e sociedade civil. Iniciativas de incentivo, pesquisa e desenvolvimento, bem como a educação da população sobre os benefícios e particularidades dos VEs, serão cruciais para moldar o futuro do transporte no país. A perspectiva futura aponta para um crescimento contínuo da participação dos VEs no mercado brasileiro, mas é imperativo que os desafios atuais sejam enfrentados de maneira estratégica e coordenada para garantir que este crescimento seja sustentável e benéfico para todos.

7 REFERÊNCIAS

ABVE. **Em ano de recordes, veículos plug-in avançam.** [S. l.], 2023. Disponível em: <http://www.abve.org.br/em-ano-de-recordes-veiculos-plug-in-ganham-mercado/>.

ARGUE, C. **What can 6,000 electric vehicles tell us about EV battery health?** [S. l.], 2020. Disponível em: <https://www.geotab.com/blog/ev-battery-health/>.

BATRA, G. **EY Mobility Consumer Index 2022 Study.** [S. l.]: Ernst & Young, 2022. Disponível em: https://assets.ey.com/content/dam/ey-sites/ey-com/en_gl/topics/automotive-and-transportation/automotive-transportation-pdfs/ey-mobility-consumer-index-2022-study.pdf. Acesso em: 1 set. 2023.

BHUTADA, G. **Visualizing the Range of Electric Cars vs. Gas-Powered Cars.** [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.visualcapitalist.com/visualizing-the-range-of-electric-cars-vs-gas-powered-cars/>.

BRASIL TERÁ MAIS DE 35 MILHÕES DE VEÍCULOS ELÉTRICOS ATÉ 2040, PROJETA ESTUDO. [S. l.], 2015. Disponível em: <https://febrabantech.febraban.org.br/blog/brasil-tera-mais-de-35-milhoes-de-veiculos-eletricos-ate-2040-projeta-estudo>. Acesso em: 4 set. 2023.

COBALT INSTITUTE. **Cobalt Market Report 2022.** [S. l.: s. n.], 2023.

DELL, R. M.; MOSELEY, P. T.; RAND, D. A. J. Chapter 5 - Progressive Electrification of Road Vehicles. *In*: DELL, R. M.; MOSELEY, P. T.; RAND, D. A. J. (org.). **ScienceDirect**. Boston: Academic Press, 2014. p. 157–192. *E-book*.

EDITORS, A. Electric vehicles and range anxiety. **McGraw Hill's AccessScience**, [s. l.], 2014. Disponível em: <https://www.accessscience.com/content/briefing/aBR1031141>. Acesso em: 4 set. 2023.

ELECTRIC VS. GAS: IT'S TIME WE TALK ABOUT MAINTENANCE COSTS. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://ev-lectron.com/blogs/blog/electric-car-maintenance-cost#:~:text=Based%20on%20real%2Dworld%20data>.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **MATRIZ ENERGÉTICA.** [S. l.], 2019. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>.

EV BASICS - EV BATTERIES. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.evenergi.com/ev-basics-ev-batteries/#:~:text=The%20most%20common%20type%20of>.

EVANS, G. **Sharing insights elevates their impact**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.spglobal.com/mobility/en/research-analysis/a-reckoning-for-ev-battery-raw-materials.html>.

FACILITATING DECARBONISATION IN EMERGING ECONOMIES THROUGH SMART CHARGING. **IEA**. [S. l.: s. n.], 2022. Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/5a566669-2883-4d8d-9c2f-61dbd92a6a6f/Decarbonisationthroughsmartcharging_.pdf. Acesso em: 4 set. 2023.

FERNANDA DELGADO *et al.* **Carros Elétricos FGV Energia**. [S. l.]: FGV Energia, 2017. Disponível em: https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/caderno_carros_eletricos-fgv-book.pdf.

GUO, J. *et al.* Lithium-Ion Battery Operation, Degradation, and Aging Mechanism in Electric Vehicles: An Overview. **Energies**, [s. l.], v. 14, n. 17, p. 5220, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en14175220>. Acesso em: 5 nov. 2021.

HARIPRAKASH, B.; SHUKLA, A. K.; VENUGOPLAN, S. SECONDARY BATTERIES – NICKEL SYSTEMS | Nickel–Metal Hydride: Overview. **ScienceDirect**, Amsterdam, p. 494–501, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-044452745-5.00158-1>

HAUSER, A.; KUHN, R. **11 - High-voltage battery management systems (BMS) for electric vehicles**. [S. l.], 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B978178242377500011X?via%3Dihub>. Acesso em: 4 set. 2023.

HOWELL, B. **Top 7 Most Polluting Industries**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.theecoexperts.co.uk/blog/top-7-most-polluting-industries>.

SYUE, B. Z.-W. Charge and discharge characteristics of lead-acid battery and LiFePO₄ battery. **The 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA -**, [s. l.], 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ipeec.2010.5544506>. Acesso em: 1 jan. 2021.

HUXLEY-REICHER, B. Fact file: Americans drive the most. **Frontier Group**, [s. l.], 2022. Disponível em: <https://frontiergroup.org/resources/fact-file-americans-drive-most/#:~:text=Americans%20drive%20a%20lot.,emissions%20in%20the%20United%20States>

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Executive summary – Global EV Outlook 2023 – Analysis**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023/executive-summary>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Trends in electric light-duty vehicles – Global EV Outlook 2022 – Analysis**. [2022a]. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022/trends-in-electric-light-duty-vehicles>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global Supply Chains of EV Batteries**. [2022b]. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/4eb8c252-76b1-4710-8f5e-867e751c8dda/GlobalSupplyChainsOfEVBatteries.pdf>.

KANE, M. **US: Median Range Of 2021 Gasoline Vehicles Is 72% Higher Than BEVs**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://insideevs.com/news/561634/us-median-range-gasoline-bevs/>.

KURZWEIL, P. **7 - Post-lithium-ion battery chemistries for hybrid electric vehicles and battery electric vehicles**. [S. l.]: Woodhead Publishing, 2015. p. 127–172 *E-book*.

LOIOLA, V. **CPFL projeta 80 mil pontos de recarga de veículos elétricos no Brasil até 2030**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/noticias/tecnologia/mobilidade-eletrica/cpfl-projeta-80-mil-pontos-de-recarga-de-carros-eletricos-no-brasil-ate-2030>. Acesso em: 4 set. 2023.

MCLAUGHLIN, T. Creaky U.S. power grid threatens progress on renewables, EVs. **Reuters**, [s. l.], 12 maio 2022. Disponível em: <https://www.reuters.com/investigates/special-report/usa-renewables-electric-grid/>

MIAO, Y. *et al.* Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements. **Energies**, [s. l.], v. 12, n. 6, p. 1074, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en12061074>

NAIK, M. V. Recent advancements and key challenges with energy storage technologies for

electric vehicles. **International Journal of Electric and Hybrid Vehicles**, [s. l.], v. 13, n. 3/4, p. 256, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1504/ijehv.2021.123480>. Acesso em: 10 jul. 2022.

NASRUDIN, N.; NOR, Abd. R. Md. Travelling to School: Transportation Selection by Parents and Awareness towards Sustainable Transportation. **Procedia Environmental Sciences**, [s. l.], v. 17, p. 392–400, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.02.052>. Acesso em: 25 out. 2021.

NEEDELL, Z.; WEI, W.; TRANCIK, J. E. Strategies for beneficial electric vehicle charging to reduce peak electricity demand and store solar energy. **Cell Reports Physical Science**, [s. l.], v. 4, n. 3, p. 101287, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2023.101287>. Acesso em: 25 abr. 2023.

NELSON, J. **A Primer on Electric Vehicles (EVs) and Charging Station Types**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.swrpc.org/a-primer-on-electric-vehicles-evs-and-charging-station-types/>.

NITTA, N. *et al.* Li-ion battery materials: present and future. **Materials Today**, [s. l.], v. 18, n. 5, p. 252–264, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.10.040>. Acesso em: 6 maio 2019.

NUNO CARLOS LEITÃO; BALSALOBRE-LORENTE, D. **The Causality Between Energy Consumption, Urban Population, Carbon Dioxide Emissions, and Economic Growth**. [S. l.: s. n.], 2020. p. 111–130 Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-030-46847-7_5. Acesso em: 4 set. 2023.

OSAKA, S. Analysis | The obsession with EV range is all wrong. **Washington Post**, [s. l.], 19 jul. 2023. Disponível em: <https://www.washingtonpost.com/climate-solutions/2023/07/07/ev-range-anxiety-battery-myth/>. Acesso em: 4 set. 2023.

PAIXÃO. **Preço médio dos carros novos alcança maior nível antes dos descontos do governo**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://autoesporte.globo.com/mercado/noticia/2023/07/preco-medio-dos-carros-novos-alcanca-maior-nivel-antes-dos-descontos-do-governo.ghtml>.

ROADMAPS FOR ENERGY. **The Facts on: Norway’s alleged plan to “prohibit sales of all vehicles using fossil fuels by 2025”**. [S. l.], 2016. Disponível em:

<https://roadmapsforenergy.eu/norway-fossilfuel-car-ban/>.

SHELDON, T. Are Electric Vehicle Subsidies Becoming More Impactful Over Time?

KAPSARC, [s. l.], 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.30573/KS--2021-DP04>. Acesso em: 4 set. 2023.

SLOWIK, P.; ISENSTADT, A.; PIERCE, L. **Assessment of light-duty electric vehicle costs and consumer benefits in the United States in the 2022–2035 time frame** ICCT. [S. l.]:

ICCT, 2022. Disponível em: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/10/ev-cost-benefits-2035-oct22.pdf>.

URBANO, A. *et al.* **Método rápido de análise do estado de saúde (SOH) de baterias de íon lítio de telefones celulares descartados empregando os conceitos da técnica de titulação galvanostática intermitente (GITT)**. [S. l.: s. n.], 2009.

WANG, L. *et al.* Insights for understanding multiscale degradation of LiFePO₄ cathodes. **eScience**, [s. l.], v. 2, n. 2, p. 125–137, 2022. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.esci.2022.03.006>. Acesso em: 17 set. 2022.

WIESENFELDER, J. **Your Guide to EV Batteries: Premature Death, Range Loss and Preservation**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.cars.com/articles/your-guide-to-ev-batteries-premature-death-range-loss-and-preservation-446126/>.

WORLD BANK. **Carbon Pricing Dashboard | Up-to-date overview of carbon pricing initiatives**. [S. l.], 2019. Disponível em:

https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/map_data.

ZHANG, L. Batteries, Rechargeable. **ScienceDirect**, Oxford, p. 463–483, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/00092-9>. Acesso em: 4 set. 2023.