

ELABORAÇÃO DE FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO PARA ESTIMAR O CUSTO
TOTAL DE PROPRIEDADE DE VEÍCULOS ELÉTRICOS A BATERIA E
VEÍCULOS A MOTOR DE COMBUSTÃO

Rodrigo Goi Jacob

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de
Planejamento Energético, COPPE, 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

Fevereiro de 2025

ELABORAÇÃO DE FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO PARA ESTIMAR O CUSTO
TOTAL DE PROPRIEDADE DE VEÍCULOS ELÉTRICOS A BATERIA E
VEÍCULOS A MOTOR DE COMBUSTÃO

Rodrigo Goi Jacob

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA 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: Prof. Alexandre Salem Szklo

Prof. Roberto Schaeffer

Aprovada por: Prof. Alexandre Salem Szklo

Prof. Roberto Schaeffer

Prof. Luan dos Santos

Prof. Bruno Soares Moreira Cesar Borba

RIO DE JANEIRO, RJ BRASIL

FEVEREIRO DE 2025

Jacob, Rodrigo Goi

Elaboração de ferramenta de simulação para estimar o Custo Total de Propriedade de veículos elétricos a bateria e veículos a motor de combustão / Rodrigo Goi Jacob. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2025.

XIV, 110 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Alexandre Salem Szklo

Roberto Schaeffer

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético, 2025.

Referências Bibliográficas: p. 80-104.

1. Veículos Elétricos 2. Custo Total de Propriedade 3. Troca de baterias I. Szklo, Alexandre Salem et al.. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético. III. Título.

“All models are wrong, but some are useful.”

– George E. P. Box

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família. Em especial, minha mãe Silvia e meu pai Jorge por todo amor, apoio e inspiração acadêmica que foram fundamentais para que eu pudesse chegar até aqui.

À minha noiva, Ana Julia, minha eterna gratidão pelo apoio incondicional, carinho e compreensão, que tornaram este percurso mais leve e significativo.

Aos meus sogros, Clovis e Ivanete, obrigado por toda torcida.

Aos meus orientadores, Alexandre Szklo e Roberto Schaeffer, agradeço por suas valorosas orientações e contribuições para minha evolução pessoal e acadêmica. Obrigado por serem exemplo de pesquisadores e docência.

Aos colegas do PPE, agradeço pela colaboração, pelas discussões enriquecedoras e pela parceria ao longo desse trajeto.

Aos meus amigos que ganhei ao longo da vida, que foram compreensivos e sabiam que minha ausência era por uma boa razão.

À COPPE/UFRJ, em especial o Programa de Planejamento Energético pela oportunidade de desenvolvimento profissional.

A todos os funcionários do PPE, pela dedicação à excelência do programa.

Ao CNPQ, agradeço o apoio financeiro através da bolsa de mestrado.

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

ELABORAÇÃO DE FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO PARA ESTIMAR O CUSTO
TOTAL DE PROPRIEDADE DE VEÍCULOS ELÉTRICOS A BATERIA E
VEÍCULOS A MOTOR DE COMBUSTÃO

Rodrigo Goi Jacob

Fevereiro/2025

Orientadores: Alexandre Salem Szklo

Roberto Schaeffer

Programa: Planejamento Energético.

Em um período marcado pela crescente urgência de mitigar o aquecimento global decorrente das mudanças climáticas e pelo fortalecimento da temática da transição energética, a eletrificação dos transportes emerge como uma das soluções tecnológicas para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Apesar da crescente presença desses veículos nos mercados globais, sua adoção apresenta grandes desafios em países emergentes, como o Brasil. Nesse contexto, o presente trabalho propõe uma metodologia e desenvolve um modelo linear para o cálculo do Custo Total de Propriedade (TCO) de veículos a combustão e elétricos, considerando os horizontes de 2023 e 2050 para diferentes períodos de propriedade. Com o objetivo de facilitar a análise, as projeções e até mesmo a discussão de políticas públicas, o modelo desenvolvido engloba tributos locais, características dos veículos e o padrão de uso específico à realidade brasileira. Ademais, não só são considerados os custos diretos —tais como os de aquisição e operação dos veículos—, mas o modelo também possibilita a criação de diferentes cenários e a realização de testes de sensibilidade, levando em conta variáveis indiretas, tais como subsídios à aquisição de veículos, incentivos fiscais em âmbito estadual e federal, uso de energia elétrica proveniente do mercado livre, custos de substituição de baterias e cenários de recompensação tributária decorrentes da redução na arrecadação proveniente da diminuição das vendas de combustíveis fósseis. Adicionalmente, é apresentado um estudo de caso fundamentado em referências da literatura e do mercado. Os resultados sugerem que a paridade de custo pode ser atingida a partir de 2024 em cenários combinados de incentivos fiscais; entretanto, em um cenário neutro, sem contabilizar a troca das baterias, a paridade ocorre somente a partir de 2035. Indica, também, que, ao se incluir os custos de substituição das baterias, a paridade verifica-se apenas para casos específicos a partir de 2048, não ocorrendo no período de análise quando se contabiliza a recompensação tributária.

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

DEVELOPMENT OF A SIMULATION TOOL TO ESTIMATE THE TOTAL COST
OF OWNERSHIP OF BATTERY ELECTRIC VEHICLES AND INTERNAL
COMBUSTION ENGINE VEHICLES

Rodrigo Goi Jacob

February/2025

Advisors: Alexandre Salem Szklo

Roberto Schaeffer

Department: Energy Planning.

In a living period marked by the increasing urgency to mitigate global warming caused by climate change and, also, by the strengthening of the energy transition theme, the electrification of transport emerges as one of the technological solutions for reducing greenhouse gas emissions. Despite the growing adherence of these vehicles in global markets, their adoption still faces significant challenges in emerging countries such as Brazil. In this context, this study has developed a methodology and a linear model to calculate the Total Cost of Ownership (TCO) of combustion and electric vehicles, between 2023 and 2050 for different ownership periods. Aiming to leverage significant analysis, projections, and even the discussion of public policies, this model has been developed to comprehend Brazil taxes, the pattern of vehicles used locally, as well as Brazilian geographic conditions (weather and territorial extension). Moreover, it also evaluates how direct costs – such as vehicle acquisition and operation – would impact BEV's TCO, and empower sensitivity tests by considering some indirect variables, as subsidies for vehicle acquisition, state and federal tax incentives, battery replacement costs, scenarios of tax compensation from reduced government income from fossil fuel sales, and others. Additionally, this thesis contains a case study based on literature and market references. The results suggest that cost parity may be achieved starting in 2024 in scenarios where multiple taxes incentives are combined; however, in a neutral scenario, without accounting for battery replacement, parity would occur only from 2035 and, when including battery replacement costs, only from 2048, if tax compensation is not in place.

Sumário

1.	Introdução	1
2.	Contextualização do problema	3
2.1	Evolução e surgimento dos veículos como transporte.....	3
2.2	Ensaio de ressurgimento dos EV's.....	9
2.3	As mudanças climáticas e o ressurgimento dos EV's	14
2.4	O ressurgimento definitivo dos EVs.....	20
2.5	O contexto brasileiro	25
3.	Metodologia.....	31
3.1	Custo Total de Propriedade / <i>Total cost of Ownership</i> – TCO.....	31
3.2	Desenvolvimento do modelo	33
3.3	Custo Total de Manufatura – Cm	36
3.3.1	Custo do conjunto motriz e transmissão	37
3.3.2	Custo do Conjunto da Bateria.....	39
3.3.3	Custos diretos e indiretos.....	41
3.4	Custo Total de Aquisição, Margens e Impostos	42
3.5	Custo Operacional e Valor de Revenda.....	43
3.6	Modelagem de variáveis indiretas	44
3.6.1	Incentivo fiscal para aquisição e operação de veículos elétricos.....	44
3.6.2	Recompensação tributária pela perda de arrecadação dos combustíveis fósseis	45
3.6.3	Cenário de uso de energia elétrica do mercado livre de energia	47
3.6.4	Cenário de substituição da bateria	47

4.	Estudo de caso	49
4.1	Cenário base	49
4.2	Cenário alternativos – variáveis indiretas.....	54
5.	Resultados.....	56
5.1	Cenário base	56
5.2	Cenários alternativos – variáveis indiretas	68
6.	Conclusão	77
	Referências bibliográficas	80
	Apêndice I.....	105

Lista de Figuras

Figura 1: Emissões globais de GEE por setor	19
Figura 2: Vendas globais de BEV e PHEV	22
Figura 3: Relação de venda de veículos e crescimento econômico no Brasil	27
Figura 4: Diagrama que descreva as interações de custos do sistema modelado	35
Figura 5: Ilustração da premissa de diferença de custos entre BEV e ICEV	37
Figura 6: Curva de custo do conjunto de bateria de BEV de 60kWh de capacidade	56
Figura 7: Custo do Conjunto Motriz e Transmissão e Custo da Bateria para ICEV e BEV em 2023 e 2050	58
Figura 8: Custo de Aquisição (Caq) e seu subgrupos de custos.....	59
Figura 9: Custo de Aquisição (Caq) dos ICEVs e BEVs entre 2023 e 2050.....	60
Figura 10: Curva de valor residual dos BEVs e ICEVs para 2023.....	61
Figura 11: Custo Operacional de acordo com o tempo de propriedade em 2023 e 2050	62
Figura 12: TCO para BEV e ICEV – Tempo de propriedade: 5 anos	64
Figura 13: TCO para BEV e ICEV – Tempo de propriedade: 10 anos	64
Figura 14: TCO para BEV e ICEV – Tempo de propriedade: 15 anos	65
Figura 15: TCO BEV em cenários alternativos para 5 anos de propriedade do veículo	70
Figura 16: TCO BEV em cenários alternativos para 10 anos de propriedade do veículo	71
Figura 17: TCO BEV em cenários alternativos para 15 anos de propriedade do veículo	72

Lista de Tabelas

Tabela 1: Metas de eletrificação por país	24
Tabela 2: Exemplos de veículos da categoria modelada no estudo de caso.....	50
Tabela 3: Valores dos tributos incidentes sobre o Custo de Aquisição (<i>Caq</i>).....	52
Tabela 4: Tributos incidentes sobre a tarifa de energia elétrica (%)	53
Tabela 5: Valores finais de TCO para BEV e ICEV em 2023	66
Tabela 6: Valores finais de TCO para BEV e ICEV em 2050	67
Tabela 7: Percentual de carga tributária incidente no TCO (%).....	68
Tabela 8: Comparativo das variáveis do cenário alternativo e o cenário base	69
Tabela 9: TCO final dos veículos BEV em cenários combinados em comparação ao Cenário Base (%).....	73

Lista de Siglas e Abreviaturas

AFOLU: Agricultura Florestas e Uso do solo (*Agriculture, Forests and Other Land Use*)

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

ANFAVEA: Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores

AR6: Sexto relatório de avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

B : Custo do Conjunto da Bateria

BEV: Veículo Elétrico à Bateria (*Battery Electric Vehicle*)

B_s : Capacidade da bateria

B_{swing} : Battery swing

C_{aq} : Custo de aquisição do veículo,

CARB: *California Air Resources Board*

C_d : Custos diretos de manufatura

CEM: *Clean Energy Ministerial*

Ch_{eff} : Eficiência do carregador

C_i : Custos indiretos de manufatura

CIDE: Contribuição de Intervenção no Domínio Econômico (CIDE)

C_m : Custo Total de Manufatura

C_{mee} : Conjunto do Motor Elétrico

CO: Monóxido de Carbono

COFINS: Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social

CONFAZ: Conselho Nacional de Política Fazendária

CO₂: Gás Carbônico

CO₂-eq: Gás Carbônico Equivalente

C_{op} : Custo Operacional

C_{me} : Custo do Motor a Combustão Interna

E : Potência do motor

EPA: Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*Environmental Protection Agency*)

EVs: Veículo Elétrico (*Electric Vehicles*)

EVI: *Electric Vehicles Initiative*

FCEVs: *Fuel Cell Electric Vehicles*

FIPE: Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas

GEE: Emissões de Gases de Efeito Estufa

GEE: Gases Efeito Estufa (*Greenhouse Gases*)

HEV: Motorização Híbrida (*Hybrid Electric Vehicle*)

ICE: Motor à combustão interna

ICMS: Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços

IPVA: Imposto sobre a propriedade de Veículos Automotores

I_{mp} : Impostos sobre a venda do veículo.

IPCC: Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change*)

IPI: Imposto sobre Produtos Industrializados

LFP: Fosfato de Ferro-Lítio

M_m : Margem de lucro da montadora;

MP: Materiais Particulados

M_r : Margem de lucro do revendedor;

NCA: Óxido de lítio-níquel-cobalto-alumínio

NDC's: Contribuições Nacionalmente Determinadas

NEVs: New Energy Vehicles

NMC: Óxido de lítio-níquel-manganês-cobalto

NMCA: Óxido de lítio-níquel-manganês-cobalto-alumínio

NOx: Óxidos de Nitrogênio

ONU: Organização das Nações Unidas

P : Custo do conjunto motriz e transmissão

PBEV: Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular

PHEV: *Plug-in Hybrid Electric Vehicle*

PIB: Produto Interno Bruto

PIS: Programa de Integração Social

P&D: Pesquisa e Desenvolvimento

R : Autonomia do veículo elétrico (km)

RAB: Regime Automotivo Brasileiro

SOx: Óxidos de Enxofre

SSPs: Trajetórias Socioeconômicas Compartilhadas (*Shared Socio-economic Pathways*)

TCO: Custo Total de Propriedade

UBS: *Union Bank of Switzerland*

EV's: Veículos elétricos

V_e : Consumo energético do veículo (kWh/km)

V_r : Valor de Revenda

1. Introdução

Em meio à urgência de reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera para mitigar o aquecimento global, constatou-se que o setor de transporte foi responsável, em 2022, por 15 % das emissões globais de GEE, dos quais 70% sendo proveniente do transporte rodoviário (CALVIN, DASGUPTA, *et al.*, 2022). Nesse contexto, após diversos ensaios do surgimento de um grande mercado (CONSONI, *et al.*, 2018, HOYER, 2008), os veículos elétricos (EVs) têm conquistado seu espaço como uma opção tecnológica sustentável e como alternativa aos veículos tradicionais com motor de combustão interna. Esse reconhecimento dos veículos como tecnologia limpa tem impulsionado as vendas em escala global e desafiado o sistema tecno-econômico estabelecido na indústria petrolífera, na qual os motores a combustão interna, diretamente responsáveis pelas emissões do setor de transportes, representam uma parcela significativa da demanda por derivados do petróleo (BARAN, 2012, ITF, 2019).

Adicionalmente, o crescimento da presença de EVs nos mercados globais é observado mais expressivamente em países desenvolvidos, nos quais, além de estarem presentes políticas públicas robustas de incentivo e metas de eletrificação, a população também possui maior capacidade financeira de arcar com os custos dessas novas tecnologias (CALVIN, DASGUPTA, *et al.*, 2022, IEA, 2023a, b). Em países emergentes como o Brasil, por sua vez, a adoção de EVs ainda enfrenta desafios, decorrentes da menor capacidade aquisitiva da população, bem como de especificidades locais do mercado, tais como a estrutura da indústria automotiva, políticas de incentivo, o padrão de uso dos veículos, as características geográficas (como clima e a extensão territorial) e as alternativas locais de descarbonização como etanol (EPE, 2018, IEA, 2024).

Nessa conjuntura, com o objetivo de analisar a paridade de custo entre EVs e a combustão no Brasil, no período compreendido entre 2023 e 2050, foi desenvolvida uma metodologia e um modelo linear que permitem a projeção do Custo Total de Propriedade (TCO) para o horizonte temporal desejado para diferentes períodos de propriedade (5, 10 e 15 anos). Adaptado de forma a representar a realidade mercadológica brasileira, o modelo considera custos diretos – tais como impostos, custo de fabricação, custo de aquisição, custo de manutenção e custo energético –, como também possibilita analisar o

comportamento do TCO em função das seguintes variáveis indiretas: subsídios à aquisição de veículos, incentivos fiscais em âmbito estadual e federal, uso de energia elétrica oriunda do mercado livre, custo de substituição das baterias e cenários de recompensação tributária decorrentes da perda de arrecadação resultante da diminuição das vendas de combustíveis fósseis.

Assim, o objetivo deste estudo consiste em desenvolver uma metodologia e um modelo adaptados à realidade brasileira e capazes de responder a questões como: quando será atingida a paridade econômica entre EVs e veículos de combustão no Brasil, sob a perspectiva do TCO? Em que medida os incentivos fiscais podem antecipar essa paridade? Qual o peso econômico de cada incentivo? Qual o impacto do uso de uma fonte de energia mais barata no TCO final? Qual o efeito da inclusão do custo de substituição das baterias? Qual o efeito de uma eventual recompensação tributária da receita perdida com o menos uso de combustíveis fósseis?

Para melhor entender o mercado de EVs e responder às perguntas levantadas, este trabalho está estruturado da seguinte forma: o capítulo 2 apresenta a contextualização do problema e explora tanto o passado, como momento atual do veículo elétrico no mundo e no Brasil. Posteriormente, no capítulo 3, é apresentada a metodologia desenvolvida para se estimar a paridade de custos entre veículos elétricos a bateria (BEVs) e veículos à combustão interna (ICEVs), assim como as adaptações realizadas para o cenário brasileiro e as variáveis indiretas que são cobertas nas análises dos capítulos seguintes. Após, no capítulo 4, é apresentado um estudo de caso utilizando dados da literatura e da indústria brasileira, de forma a explorar o modelo desenvolvido. Já no capítulo 5, são apresentados os resultados do estudo de caso obtidos através do modelo. Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões da dissertação e as sugestões de aprimoramento do modelo e de pesquisas futuras.

2. Contextualização do problema

2.1 Evolução e surgimento dos veículos como transporte

O surgimento do automóvel como é conhecido atualmente está correlacionado ao período de urbanização e industrialização durante a segunda metade do século XIX, principalmente na Europa e nos Estados Unidos (FLINK, 1990). Nesse período, a disponibilidade de linhas férreas e de acesso a carvão permitiram que fábricas se instalassem nas cidades e, por consequência, também atraíssem mão de obra proveniente de zonas rurais. Dessa forma, rapidamente as cidades se expandiram e longas distâncias passaram a ser percorridas diariamente a pé pela população (GEELS, 2005). A classe média, como alternativa, começou a se deslocar por pequenas carruagens-ônibus tracionadas por cavalos, e a classe alta por carruagens particulares ou por carruagens-táxi. O cenário típico das ruas de uma grande cidade da época, como Nova Iorque, era de uma combinação caótica de pessoas andando entre carruagens, cavalos e uma grande quantidade de excremento equino que deixavam as ruas com aparência e odores desagradáveis (MCSHANE, TARR, 2003). Fato que levou os animais a terem uma conotação negativa no debate público, abrindo uma janela de oportunidade para novas opções de transporte (GEELS, 2005).

No mesmo período, diversas inovações surgiam em meio à corrida tecnológica que mais tarde ficou conhecida como a Segunda Revolução Industrial. A década de 1880 foi considerada a década mais inovadora da História (SMIL, 2006). Novos materiais, formas de fabricação, e protótipos de conversores energéticos disputavam o protagonismo no setor de transportes. Os primeiros protótipos de automóveis eram basicamente construídos com a instalação de motores em carruagens e triciclos (FLINK, 1990). Três tecnologias de motores se destacavam: motores a vapor, a gasolina e elétricos (HOYER, 2008). O motor movido a vapor já havia sido inventado no século anterior (XVIII) e era largamente aplicado em locomotivas e navios. Porém, sua elevada relação de massa e potência (g/W) e seu elevado consumo de água dificultavam sua aplicação em pequenos veículos, além de ser considerado perigoso devido à sua fama de causar explosões (COWAN, HULTÉN, 1996, SMIL, 2010).

Em 1874, o primeiro motor a combustão e compressão interna de quatro tempos foi desenvolvido por Nicolaus August Otto (FLINK, 1990). Tinha como característica o uso de um combustível de baixa densidade energética, o gás de carvão e sua eficiência de conversão energética era de apenas 17%. Um dos diferenciais dessa invenção era a baixa relação peso e potência (250g/W) em comparação a motores a vapor da época. Posteriormente, foi adaptado para usar gasolina como combustível, com densidade energética 1600 vezes maior que o gás de carvão (SMIL, 2010). Logo após, em 1885 e 1886, surgiriam os primeiros protótipos de automóveis, apresentados separadamente por Daimler e Maybach e outro por Karl Benz (Flink, 1976; Geels, 2005; Smil, 2010).

Os motores e geradores elétricos, por outro lado, haviam sido desenvolvidos com as descobertas de Faraday, em 1830, período em que foram apresentados os princípios da indução magnética que serviram de base para seu desenvolvimento (AL-KHALILI, 2015). Pouco após, houve também o desenvolvimento de baterias de chumbo ácido pelo belga Gaston Planté, em 1860 (KURZWEIL, 2010). O primeiro veículo elétrico utilizando baterias foi apresentado por Mr. Trouvé, na França, em 1881 (HOYER, 2008).

Nesse contexto de expansão da locomoção, outros modais de transporte também emergiam: as bicicletas passaram a se tornar populares em conjunto com uma revolução cultural que vinha acontecendo. Novos hábitos e opções de lazer moldavam os desejos do consumidor e seus anseios em como se locomover. Associada à juventude e à saúde, as corridas de bicicleta ficaram famosas e populares. Ainda assim, o meio de transporte que iria substituir os ônibus tracionados por cavalos e o transporte de pessoas em massa, não era a bicicleta, tampouco os carros, mas os bondes elétricos (GEELS, 2005). Em poucos anos (de 1889 até 1895), essa opção se tornou vantajosa técnico e economicamente. As empresas distribuidoras de energia rapidamente identificaram essa nova oportunidade de mercado e realizaram a expansão da infraestrutura necessária, o que seria aproveitado também pelos carros elétricos. Em 1902, 97% das ruas americanas adaptadas para bondes já eram eletrificadas (HILTON, 1969a).

Dessa forma, iniciava-se uma transformação no regime sócio-técnico estabelecido na época, na qual o transporte animal seria substituído por outras tecnologias. Os autores Geels e Sovacool (GEELS, 2005, SOVACOO, 2017) destacam que sistemas em escala técnico sociais são relacionados a uma série de engessamentos e custos afundados, o que

dificultava o surgimento de inovações disruptivas. Assim, essas inovações acabam por surgir em nichos específicos. Neste caso, os primeiros carros elétricos emergiram em quatro nichos distintos. O primeiro deles foi entre empresas de táxi, onde o carro elétrico foi utilizado largamente por cooperativas em grandes cidades como Londres, Paris e Berlim, onde, até então, a baixa autonomia dos veículos era sobreposta com outras vantagens como facilidade de condução e acesso à infraestrutura (GEELS, 2005, KIRSCH, 1997). O segundo nicho foi como um produto de luxo, o qual permitiria a elite passear por parques e ir aos seus encontros. O terceiro nicho, por sua vez, foram as corridas de automóveis. Nelas, veículos de todos os tipos competiam em ruas pela cidade, se aproveitando e criando valores culturais para a época. Corridas eram excitantes, perigosas e serviram para dar uma nova percepção do que os automóveis eram capazes. Por último, o quarto nicho explorado foi a de viagens recreativas para o interior dos campos, onde o carro passou a ser um objeto de desejo por proporcionar uma viagem à longas distâncias de forma mais rápida. Em paralelo, uma nova expansão imobiliária ocorria em direção aos subúrbios pelas classes altas, em busca de lugares mais calmos e menos tumultuados, o que também era facilitado com a disponibilidade de se locomover para cidade de carro (GEELS, 2005, HILTON, 1969b).

O veículo elétrico era considerado tecnologicamente superior aos demais devido a sua confiabilidade, baixo nível de ruído e facilidade de condução. Já os veículos a gasolina possuíam diversos problemas técnicos a serem transpostos. A partida do motor necessitava ser feita manualmente e a inconstância do seu funcionamento levava ao seu desligamento constantemente. Além disso, eram vistos como ruidosos, perigosos e cheiravam mal devido aos gases da exaustão. Apesar disso, a baixa autonomia dos elétricos era um problema (GEELS, 2005, HOYER, 2008, SMIL, 2006).

Na virada do século, ainda não estava claro que ocorreria a transição de cavalos para automóveis. Em 1900, havia 18 milhões de cavalos nos EUA e apenas 8000 veículos registrados (STRUBEN, STERMAN, 2008), tampouco qual tecnologia motriz se tornaria dominante. Em 1903, Nova Iorque possuía 4000 veículos registrados, sendo 53% deles movidos a vapor, 27% a gasolina e 20% elétricos (U.S. BUREAU, 1975). A energia elétrica era considerada a invenção do século, e por isso uma visão simplista diria que o carro elétrico seria a solução mais acertada para a época. Porém, aos poucos os veículos

a gasolina amadureceram, os problemas de transmissão foram suavizados, os motores se tornaram mais eficientes e mais leves, assim como ocorreram melhorias na química dos combustíveis (SMIL, 2006). Entre 1899 e 1909, o crescimento de vendas de veículos a gasolina foi de 120 vezes, enquanto a de EV's apenas dobrou (COWAN, HULTÉN, 1996). Em 1920, o mercado de carros a gasolina era claramente dominante, e a mesma tendência continuaria ao longo dos anos. Em 1923, os EUA produziram somente 381 EV's enquanto 3,18 milhões de veículos a gasolina foram produzidos, dos quais metade era do tipo Ford T (NICHOLSON, 1984).

Ao comparar as tecnologias existentes, já inúmeros fatores que poderiam indicar porque os carros a gasolina se difundiram mais rapidamente do que os elétricos. Diversos autores propõem uma visão técnico-social para analisar a difusão de tecnologias (KEMP, SCHOT, *et al.*, 1998, SCHOT, GEELS, 2008, SCHOT, HOOGMA, *et al.*, 1994). Essa visão se baseia no argumento que as transições tecnológicas de larga escala, à exemplo do setor de comunicações, transporte e sistemas de saúde, ocorrem em função de um complexo sistema de fatores, como disponibilidade tecnológica, preferência dos usuários, mercado, política, regulação, cultura local, infraestrutura, disponibilidade de manutenção e rede logística. Nesse contexto, uma transição tecnológica em escala social ocorre de um sistema tecno-econômico para outro e depende de diversos atores. Assim, pode-se dizer que o domínio do mercado pelo veículo a gasolina não foi deflagrado pontualmente por algum evento ou acidente. A história do início da indústria automotiva sugere que a interação de diversos fatores econômicos e técnicos, que ocorriam separadamente e de forma não linear, deram uma vantagem decisiva para o domínio do carro a gasolina. (COWAN, HULTÉN, 1996, GEELS, 2005).

Entre essa diversidade, alguns eventos importantes podem ser destacados, como: o lançamento do Ford T por Henry Ford em 1909 e seu sistema de produção em série que permitiu que os carros a gasolina tivessem um preço final de U\$850 em 1908 e \$360 em 1916 (GEELS, 2005), a metade do preço de um carro elétrico; a estratégia das fabricantes de EV's que era focada no mercado de luxo e de baixo volume, enquanto as de veículos a gasolina já vislumbravam a produção em massa; a criação do dispositivo de partida a manivela, em 1912, eliminando um dos maiores problemas dos motores a gasolina (BARAN, 2012); a condição e distância usual percorrida em rodovias – em 1920,

rodovias interconectavam diversas cidades dos EUA, demandando veículos de maior autonomia. Apesar dos avanços técnicos nas baterias e tecnologias de regeneração de energia, os veículos a gasolina possuíam autonomia superior; por fim, as descobertas de petróleo no Texas, no início do século XX, permitiram a redução no preço da gasolina e o fornecimento em áreas rurais. Aos poucos, postos de gasolina surgiam por todo o EUA, enquanto as redes de transmissão de eletricidade eram pouco difundidas pelo interior (ANDERSON & ANDERSON, 2010).

Se, por um lado, em 1900, o carro ainda era considerado um item de luxo e pouco difundido, ao longo do século XX a indústria automotiva se desenvolveu e proliferou, formando um complexo regime sócio-técnico interligado. Em 1930, ela já era considerada uma grande consumidora de aço, vidro, borracha, tinta, além de outros componentes como maquinários industriais. Esse sistema, por sua vez, estava inserido em um regime sócio-técnico mais amplo, caracterizado pela interdependência de diversos níveis de sistemas tecnoindustriais, tais como a construção civil responsável pela construção de rodovias, pontes e túneis, que ainda era gerido por uma série de instituições públicas e privadas (GEELS, 2005, UNRUH, 2000).

Para além desses setores já citados, para se compreender a predominância da tecnologia do motor a gasolina faz-se necessário entender que ele estava inserido dentro do contexto dos motores a combustão interna, também representado por motores a diesel e turbinas a gás. Em conjunto, formavam um sistema tecnoindustrial que catalisou a indústria de petróleo com o aumento do consumo de seus derivados. Assim, o bloco tecno-econômico formado pela indústria automobilística e a indústria petrolífera representam um dos blocos mais significativos para a economia do século XX (COWAN, HULTÉN, 1996).

Além disso, o domínio da tecnologia motriz e a geopolítica do petróleo tiveram papel fundamental na Primeira e Segunda Guerra Mundial e serviram como catalisadores dos motores a combustão interna (GEELS, 2005, SMIL, 2006). O coronel britânico Ernest Swinton concebeu que o problema de logística de tropas só seria solucionado com o “antídoto correto”: veículos a combustão interna resistentes a arames farpados e a tiros, e assim surgiram os primeiros tanques de guerra utilizados em 1916. O acesso a combustíveis e o uso de carros, tanques, aviões e navios eram parte fundamental da

estratégia dos exércitos. Outros exemplos são a adoção de motores a diesel, mais eficientes, no lugar dos motores a vapor pela marinha inglesa, denominada “A vantagem dos 33%” por Winston Churchill (1911) e pelas sucessivas investidas do regime nazista em dominar a região de Baku e suas linhas de suprimento de petróleo e combustível (1941-1942), responsável por abastecer 80% da gasolina da União Soviética (YERGIN, 1991).

Durante a Segunda Guerra, porém, parte das linhas de produção das fábricas de automóveis civis foi substituída por linhas de produção de equipamentos militares, prejudicando momentaneamente a produção e a venda de carros civis. Em contrapartida, ao longo da guerra, os EUA investiram mais de US\$12 bilhões na expansão das fábricas e esse custo afundado seria aproveitado ao final dos conflitos (KAEN, 2012). Além disso, faziam parte do pacote de recuperação econômica pós-guerra a retomada da indústria automotiva e a reconstrução das fábricas destruídas, principalmente na Europa e no Japão (MARSHALL, 1947).

Curiosamente, o uso do carro elétrico foi intensificado durante os períodos de conflito, quando o abastecimento de combustível era priorizado para os veículos de combate. E no Japão pós-guerra enquanto sofriam com a falta de gasolina. Apesar disso, a produção de EV's permaneceu inexpressiva, sendo apenas continuada exclusivamente em nichos específicos como para carrinhos de golfe ou vans de entrega de leite, usados na Inglaterra devido ao seu baixo nível de ruído pelas manhãs (YERGIN, 1991)

Em 1950, a produção de veículos nos EUA já era maior que no período pré-guerra. Nessa época, apenas os EUA e o Canadá possuíam uma alta taxa de propriedade de veículos, mas a influência americana pós-guerra logo trouxe a Europa e o Japão para o mesmo patamar (SMIL, 2006). Em 1950, 59% das famílias americanas possuíam ao menos um veículo em sua garagem, e em 1970 esse valor já era de 82% (U.S. BUREAU, 1975). Uma aceleração da taxa de motorização também ocorria em diversos países emergentes pelo mundo, assim como no Brasil (DARGAY, GATELY, *et al.*, 2007).

Como consequência, a crescente demanda global por veículos colaborou para o petróleo se consolidar como a principal fonte de energia primária do mundo (SMIL, 2006, YERGIN, 1991). Atualmente, a gasolina e o diesel representam os principais produtos com finalidade energética obtidos no refino mundial e possuem um prêmio de preço em

relação ao petróleo Brent (EIA, 2024). A economia mundial tornou-se altamente dependente do regime sócio-técnico sustentado pelo setor petrolífero, configurando uma complexa estrutura que hoje representa um obstáculo à transição tecnológica no setor de transportes (UNRUH, 2000).

Esse regime sócio-técnico pode ser analisado sob uma perspectiva da demanda e da oferta. Do lado da demanda, incluem-se o transporte terrestre de passageiros e cargas, bem como o transporte aéreo e marítimo, todos interligados à geração de energia e à indústria petroquímica. Já do lado da oferta, destacam-se as cadeias de exploração e produção de petróleo, as refinarias de processamento de derivados e uma vasta rede logística que garante a distribuição global de petróleo e seus produtos (SMIL, 2006).

Por fim, ao se analisar a predominância do motor a combustão interna no início do século XX, nota-se que um conjunto de sistemas industriais e econômicos dependentes entre si, fomentaram essa tecnologia, aumentaram seu volume de produção e entraram em um período de ganhos em escala e retornos crescentes, fazendo com que ocorresse um trancamento tecnológico (*lock-in*) do motor a combustão interna. Esse processo se retroalimentou positivamente durante a Segunda Guerra Mundial e persiste até hoje, onde diversos sistemas tecnoindustriais possuem custos afundados e estão voltados para a utilização do motor a combustão interna e o uso do petróleo como fonte energética, criando uma barreira para o surgimento de novas tecnologias, mesmo que fossem mais eficientes (ARTHUR, 1989, BARAN, 2012).

Entre 1960 e os anos 1990, diversos ensaios de ressurgimento do veículo elétrico ocorreram, porém, todos sem sucesso (HOYER, 2008). Estes estavam associados a duas problemáticas que podem ser destacadas: (i) problemas de saúde pública causados pela poluição do ar local e (ii) a busca pela segurança energética dos países (CONSONI, *et al.*). Esses dois tópicos serão o destaque do próximo subcapítulo.

2.2 Ensaios de ressurgimento dos EV's

O crescimento da industrialização e a utilização de combustível fósseis como fonte energética tiveram como consequência o aumento da poluição ar em diversas cidades do mundo (PERERA, 2018). Episódios de neblinas de poluição foram associados

a mortes prematuras e ao desenvolvimento de doenças respiratórias e cardíacas (WHO, 2005). Em 1948, o desastre de *Donora Smog* na Pensilvânia (EUA) afetou 42% da sua população, quando um nevoeiro de poluição encobriu a cidade (SCHRENK, HEIMANN, *et al.*, 1949). De forma parecida, o *Great Smog of London* (1952) foi associado a morte de ao menos 4000 ingleses (Polivka, 2018).

Apesar de as indústrias serem responsáveis por parte da poluição, o aumento do tráfego motorizado nas cidades a partir de 1960 levou os veículos a também serem associados aos problemas de qualidade do ar local e a problemas ambientais regionais (WALLINGTON, ANDERSON, *et al.*, 2022). Nesse período, o chumbo era utilizado como aditivo da gasolina e os veículos não possuíam filtros ou catalisadores e, por isso, os gases de exaustão dos veículos eram considerados um dos principais causadores da poluição do ar. (BARAN, 2012). Como resultado da combustão, poluentes como monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NOx), óxidos de enxofre (SOx), materiais particulados (MP), dentre outros, viriam comprovadamente a serem associados a problemas de saúde (WHO, 2005, 2016).

Nesse contexto, foi promulgada a lei *Clean Air Act* (1963) nos EUA, seguida da *Motor Vehicle Air Pollution Control Act* (1965) (CONSONI, *et al.*, 2018); ambas tinham como objetivo controlar o nível de poluentes emitidos no ar. A partir daí, diversos ensaios de ressurgimento do veículo elétrico como solução aconteceram, porém nenhum chegou a ser produzido em escala até o ano de 2010, devido a sua baixa performance técnica e econômica quando comparado aos veículos a combustão (BARAN, 2012, IEA, 2023a).

Em 1966, foi pedido ao centro de pesquisa da *British Ford Motor Company* que desenvolvesse um veículo pequeno, simples e de baixa poluição. Desse projeto, nasceu o carro elétrico chamado *Comuta* com uma autonomia de 60km e velocidade média de 40km/h. Contudo, o projeto foi encerrado devido a sua inviabilidade comercial. O mesmo aconteceria com o protótipo *Electrovair* da *General Motors* (HOYER, 2008).

Ainda na década de 1960, a poluição local no Japão passou a ter uma conotação de “invisível” para “visível”, devido à fumaça cinza que permitia uma visibilidade de apenas 100 m no inverno. Essa condição levou ao governo japonês a promulgar a *Anti-Pollution Law* em 1967 (Consoni, *et al.*, 2018).

Em 1970, a geração e o consumo de energia fóssil passaram a fazer parte da discussão ambiental de forma mais contundente. Nesse período, três eventos internacionais foram particularmente influentes no debate sobre o impacto no meio ambiente e a dependência global dos combustíveis fósseis (HOYER, 2008):

- 1- O lançamento do livro “Os limites do crescimento” em 1972 pelo Clube de Roma (MEADOWS, MEADOWS, *et al.*, 1972). Esse livro se tornou um marco pois nele se propunha um limite para o consumo de recursos naturais não renováveis;
- 2- A Crise do Petróleo de 1973. Como consequência de desentendimentos políticos causados pela guerra do Yom Kippur, o momento foi marcado por embargos comerciais praticados pelos produtores da Arábia Saudita e Oriente Médio, o qual resultou na elevação do preço do barril de petróleo e, por consequência, uma necessidade de racionamento (YERGIN, 1991); e
- 3- O debate sobre a Energia Nuclear, quando se elevou a preocupação com a segurança de operação das usinas e sobre o armazenamento dos rejeitos nucleares.

Naquela época, os embates políticos levaram a choques no preço do petróleo, impactando negativamente a economia mundial, e causando aumento de 400% dos preços do barril. Com isso, a dependência econômica e energética do petróleo passou a ser questionada e serviu como gatilho pela busca por alternativas que garantissem a segurança energética dos países.

Nesse contexto, o veículo elétrico ressurgiu como uma opção para resolver problemas relacionados ao tema. A combinação do uso de um veículo de “zero emissões” abastecido com energia elétrica oriunda de fontes renováveis, como solar e eólica, fez parte do conjunto de soluções apresentadas.

Em 1976, o Congresso Norte-Americano promulgou a “*Electric and Hybrid Vehicle Research, Development and Demonstration Act of 1976*”¹, a qual autorizava projetos financiados pelo governo com intuito de promover a venda e a viabilidade comercial de veículos híbridos e elétricos, assim como o desenvolvimento de novas

¹ Lei de Pesquisa, Desenvolvimento e Demonstração de Veículos Elétricos e Híbridos de 1976.

tecnologias atreladas a eles, como as baterias. O programa contava com o financiamento de US\$60 milhões e tinha como objetivo a produção de 7500 carros até 1978 (94TH CONGRESS (1975-1976), 1976). Apesar das agressivas apostas e investimentos, o programa nunca cumpriu seus objetivos e foi encerrado pelo presidente Reagan (1981-1989) (BARAN, 2012).

Ainda na década de 1970, outro programa parecido liderado pela empresa de energia francesa EDF procurava expandir as opções de veículos sustentáveis disponíveis. Novamente, porém, o resultado encontrado foi similar: inviabilidade comercial. Apesar do aumento de espaço para discussão, os EV's continuaram com dificuldade de encontrar espaço no mercado e, ao longo da década de 70, menos de 4000 EV's foram vendidos no mundo (DIJK, ORSATO, *et al.*, 2013).

A discussão sobre a necessidade de diversificação, porém, continuava a ganhar espaço e, no início da década de 1990, a CARB (*California Air Resources Board*) promulgou uma nova regulamentação voltada para veículos de zero emissões. Projetada em conjunto com metas de redução de emissões de longo prazo do estado, a lei exigia que os fabricantes oferecessem este tipo de veículo em um percentual mínimo de 2% em 1998, 5% em 2001 e 10% em 2003. Como esperado, a medida não foi bem aceita e, entre os diversos protestos e reações contrárias a medida imposta, montadoras e associações de fabricantes alegaram que não só que o projeto não teria custo competitivo, mas também que o chumbo, presente nas baterias, causaria danos ambientais. Contrárias às imposições, estavam também as companhias de petróleo (como Exxon, Shell e Texaco), as quais financiaram campanhas políticas e publicidades desacreditando os EV's (CALEF, GOBLE, 2007). Como resultado, as pretensões estabelecidas não foram cumpridas e os prazos foram postergados (SOVACOOOL, HIRSH, 2009).

Pouco após, em 1992, a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento – Rio 92 trouxe novamente para o centro do debate as consequências do crescimento econômico com o uso extensivo de recursos naturais, como o petróleo (UNFCCC, 1992b). Na Agenda 21, as discussões a respeito dos transportes estavam inseridas em um contexto mais amplo de desenvolvimento sustentável, dando destaque para os problemas relacionados à intensidade do uso de combustíveis fósseis (UNFCCC, 1992a). No mesmo ano, a União Europeia divulgou seus termos para a

política de transporte sustentável, onde o veículo elétrico aparecia com uma solução comum tanto para os problemas locais quanto globais (EUROPEAN COMMISSION, 1992).

Apesar da crescente pauta em discussões políticas e ambientais, o primeiro veículo eletrificado a ser produzido em escala surge apenas em 1997, com o lançamento do Toyota Prius no Japão. Este modelo possuía motorização híbrida (HEV) – tecnologia que permite com que um motor a combustão trabalhe em conjunto com um motor elétrico, de forma a aproveitar a máxima eficiência dos dois. Esse tipo de modelo permite que o veículo tenha a mesma praticidade de um veículo somente a combustão, mas com maior economia de combustível; ou seja, reduzia um dos pontos de maior resistência do mercado para a expansão de EV's. Em 2000, o Prius chegou ao mercado americano e teve uma boa aceitação do público, superando, inclusive, o número de vendas esperado pela montadora. Mais tarde, o sucesso de vendas e aceitação acontecia, também, no mercado europeu (BARAN, 2012).

Esse cenário positivo trazido pelas boas vendas do Prius serviu também de estímulo para o lançamento de outros HEV: entre 2000 e 2010, ao menos 38 modelos HEV foram lançados no mercado mundial, com destaque para o Chevrolet Volt (PHEV) e o Honda Civic (HEV), que disputaram espaço nesse crescente nicho. Em 2005, 3% dos veículos de passageiros vendidos nos EUA já eram do tipo híbrido, e em 2010 esse valor já era de 5% (BTS, 2022).

Nessa conjuntura, o interesse pela eletrificação ganha nova dimensão e, em 2010, quase todas as montadoras já estavam planejando o lançamento dos primeiros veículos eletrificados. Esse mesmo ano foi marcado pelo primeiro lançamento de um veículo 100% elétrico à bateria produzido em escala (em inglês “BEV” – *battery electric vehicle*), o Nissan Leaf, com uma bateria de 24kWh e uma autonomia média de 120km (EPA). Com preço reduzido devido à incentivos fiscais, o veículo era vendido por um valor próximo a \$25.000,00 dólares, e passava a se tornar competitivo comercialmente com outros veículos semelhantes a combustão (BARAN, 2012).

A partir daquela década, a crescente por EV's continuava e alguns anos depois foi lançado o BEV Tesla Model S, com a proposta de ser o veículo mais rápido e mais seguro a ser vendido no mercado. Totalmente focada na produção de BEV, a Tesla teve um papel

importante na demonstração do potencial desse mercado que vem crescendo desde então (IEA, 2023a).

Além da (i) busca por soluções para os problemas ambientais locais e a (ii) busca pela independência energética dos países, o ressurgimento (a partir desse momento definitivo) do mercado de veículos 100% elétricos ocorre pelo somatório de duas novas motivações que ganham destaque nos anos 2000: (iii) a busca pela descarbonização do setor de transportes, devido às mudanças climáticas; e (iv) a busca pelo protagonismo e desenvolvimento tecno-econômico dos países (CONSONI, *et al.*, 2018). Segundo a (ONU, 2021), as mudanças climáticas são o maior desafio que a civilização moderna já enfrentou. O aumento da temperatura média do planeta pode afetar o bem-estar econômico e físico do planeta, por isso é necessário formas de se mitigar o aquecimento e seus impactos. Parte dessa mitigação deve ser realizada com a descarbonização do setor de transportes. No próximo subcapítulo esse tema será abordado.

2.3 As mudanças climáticas e o ressurgimento dos EV's

As mudanças climáticas podem ser compreendidas como o conjunto de mudanças de estado do clima que persistem por um longo período, normalmente décadas ou mais. Essas alterações podem ser devido a processos internos naturais ou forças externas, como modulações dos ciclos solares, erupções vulcânicas e mudanças na composição da atmosfera ou no uso da terra, podendo elas terem sido causadas pelo homem ou não (IPCC, 2022a).

Ao longo do século XIX, os principais mecanismos que influenciam mudanças no sistema climático foram estudados e cientistas apontaram a radiação solar sobre a Terra, as emissões de gases pela atividade vulcânica, os ciclos orbitais naturais do planeta e os ciclos biogeoquímicos como as principais causas naturais (IPCC, 2023a). No mesmo período, também se iniciaram estudos sobre o balanço energético do planeta. Na década de 1820, Joseph Fourier publicou um estudo sobre o balanço de energia solar que chegava à superfície e a quantidade de energia reemitida. Nele, se observou que o planeta deveria ter uma temperatura mais fria caso não houvesse uma camada intermediária retendo calor (FLEMING, 1999). Posteriormente, esse fenômeno seria denominado efeito estufa pela

publicação *Circumstances Affecting the Heat of Sun's Rays*² de (FOOTE, 1856). As contribuições de Foote auxiliaram a compreensão do mecanismo de retenção de energia pelos gases efeito estufa (GEE) da atmosfera, principalmente do CO₂ e, desde sua descoberta, se levantou a hipótese de que o homem poderia ter influência nesse processo natural através da queima de combustíveis fósseis pela indústria.

Desde então, a ciência do clima foi se desenvolvendo, criando métodos e otimizando ferramentas a partir de estudos com verificação de pares por cientistas de todo o mundo. Em 1938, o engenheiro inglês Guy Stewart publicou um artigo que trazia as primeiras evidências do aquecimento do planeta após o início da era industrial (Eggleton, 2012). Apesar do crescente interesse no assunto, pesquisas a respeito do tema ganham espaço e visibilidade somente a partir da década de 1950, momento em que o volume de carros a combustão já era bastante significativo globalmente, tal qual explanado no capítulo anterior. Entre os cientistas que tiveram importante contribuição para a exposição da temática, esteve o geofísico norte-americano Wallace S. Broecker, ao usar o termo “aquecimento global” em sua publicação de 1975 (BROECKER, 1975).

Nos estudos da época, além do consumo de combustíveis fósseis, outras relações antropogênicas com o aquecimento global foram encontradas, como a emissão de aerossóis, o manejo da terra, o desmatamento e a emissão de outros GEE diferentes do CO₂, como o metano. Ao final da década de 1970, a problemática finalmente ganha espaço na agenda política internacional e a influência antropogênica evolui da teoria para um fato constatado (CHEN, ROJAS, *et al.*, 2021, EDWARDS, 2013).

Nesse contexto, uma das iniciativas de maior contribuição para o conhecimento na área de ciência do clima é o *Intergovernmental Panel on Climate Change*³ (IPCC), criado em 1988 com o objetivo de consolidar a crescente pesquisa científica sobre o tema, assim como suas implicações e riscos futuros para líderes e gestores políticos. O IPCC não tem como finalidade realizar a pesquisa em si, mas revisar, sintetizar e publicar os

² Circunstâncias que afetam o calor dos raios solares.

³ Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas.

mais recentes achados científicos, técnicos e socioeconômicos sobre as mudanças climáticas, suas causas e os possíveis caminhos de mitigação (IPCC, 2022).

Até 2022, o IPCC publicou seis grandes relatórios de avaliação (*Assessment Reports*), todos baseados nas mais recentes descobertas de estudos internacionais. Em sua última publicação, o IPCC afirma que é “inequívoca” a influência humana na crescente concentração de GEE na atmosfera desde 1750, e que cada uma das quatro últimas décadas foram sucessivamente mais quentes que qualquer outra década antes de 1850. Além disso, indica que a temperatura média da superfície terrestre entre 2011-2020 foi 1,09°C maior que em 1850-1900, com amplitudes de até 1,83°C em algumas regiões. Dessa forma, adverte que a influência humana nesse aquecimento é de no mínimo 0,8°C (com estimativas indicando aumento próximo a 1,02°C), e discorre ser a queima de carvão e petróleo a principal fonte de emissão antropogênicas de GEE (EYRING, 2023).

Com o avanço computacional das últimas décadas (LE TREUT, 2007), simulações dos ciclos de aquecimento e resfriamento da temperatura terrestre, comparando o que seria o comportamento natural – ou seja, sem as emissões antropogênicas de GEE – com os valores observados nos últimos anos foram viabilizados. Nessas análises, foram obtidas evidências robustas de que a concentração de CO₂ encontrado na atmosfera em 2019 é maior do que a verificada em qualquer período dos últimos 2 milhões de anos. Além disso, indicam que a temperatura da superfície terrestre vem crescendo desde 1970 de forma mais acelerada do que observado nos últimos 2000 anos (CALVIN, DASGUPTA, *et al.*, 2022).

Entre as consequências desse aumento de temperatura, estão as mudanças climáticas que já podem ser observadas em todas as regiões do mundo. As evidências mostram um aumento significativo de temperaturas extremas e de ondas de calor desde 1950, e, conseqüentemente, aumento também do degelo das calotas polares desde 1990. Além disso, o aumento de intensidade e frequência de chuvas torrenciais, inundações e ciclones tropicais podem ser relacionados à ação humana e já possuem graves consequências econômicas e financeiras para as regiões atingidas (ECKSTEIN, KÜNZEL, *et al.*, 2021).

Por isso, tanto a comunidade científica e como a política veem com grande preocupação a manutenção dessa trajetória crescente de emissões de gases de efeito

estufa (GEE). Como alternativa de mitigação, o IPCC examina, no seu sexto relatório de avaliação (AR6), como a sociedade e as economias podem se adaptar a um mundo de menor emissões de GEE e propõe uma série de alternativas. Essas trajetórias de mitigação ilustrativas são chamadas de *Shared Socio-economic Pathways*⁴ (SSPs) e são divididas em cinco níveis combinados com os *Representative Concentration Pathways* RCP's, variando da trajetória mais desejável (SSP1-1.9) até a trajetória onde nenhuma medida de mitigação seria adotada (SSP5-8.5), na qual a primeira almejava limitar o aumento da temperatura terrestre em até 1,5°C em 2100, em comparação a valores pré-industriais (CALVIN, DASGUPTA, *et al.*, 2022).

Ao se observar a última década, porém, os dados indicam uma continuidade das emissões e aumento das temperaturas das décadas anteriores, com poucas ou nenhuma medida de mitigação sendo adotada (IPCC, 2023b). Na hipótese da continuidade dessas políticas, o cenário correspondente seria o SSP5-8.5, onde o IPCC estima que a temperatura média global poderia subir em 2,4°C no médio prazo (2041-2060) e 4,4°C no longo prazo (2081-2100) (IPCC, 2022b).

Com isso, é inequívoco apontar que a manutenção de trajetórias de baixa mitigação levará ao aumento da temperatura média global com sérias implicações ao ecossistema natural e humano. O que se espera, na verdade, é um aumento na intensidade e frequência de eventos climáticos extremos, como inundações, chuvas torrenciais, ciclones tropicais, ondas de calor, além de perdas de biodiversidade e da mudança permanente de ecossistemas, como a desertificações de regiões, perdas de áreas agricultáveis e aumento do nível dos oceanos. Ou seja, essas alterações têm o potencial de instabilizar a segurança alimentar do planeta e de causar perdas tanto econômicas como não-econômicas (HOEGH-GULDBERG, 2018).

Com resultados similares, um estudo (WARSZAWSKI, FRIEND, *et al.*, 2013) realiza uma análise não econômica sobre as alterações de biomas e estima que 13% dos biomas terrestres serão alterados na trajetória de 2°C em comparação a 7% na de 1,5°C até 2050. Para além do consenso de impacto ambiental do aumento da temperatura, há

⁴ Trajetórias Socioeconômicas Compartilhadas.

estudos que medem os possíveis impactos econômicos da limitação do aumento da temperatura global a 1,5°C. Entre eles, o estudo (BURKE, DAVIS, *et al.*, 2018) estima que, limitando o aquecimento global em 1,5°C ao invés de 2°C, se evitaria também a perda de 1,5-2% do produto interno bruto (PIB) do mundo até 2050, o que representa um valor de 8,1-11,6 trilhões calculados a valor presente (3% a.a.).

Por mais que esses (e outros) estudos já indiquem os impactos das mudanças climáticas e a ações que mitiguem o aumento de temperatura, um dos grandes desafios do combate às mudanças climáticas é sua característica transfronteiriça; ou seja, a atmosfera da terra é compartilhada entre todos, sem distinção de fronteiras. Logo, organizações internacionais como a ONU possuem importante papel em ajudar no diálogo e implementação dos planos especialmente de longo prazo. Nesse contexto, apesar de o tema ter ganhado maior exposição a partir de 1970, o primeiro acordo internacional acontece somente em 1997 com a assinatura do Protocolo de Kyoto por 192 nações com o objetivo de reduzir as emissões de GEE entre os anos de 2008 e 2012. Como resultado, o impacto dos acordos teve resultados limitados e as emissões totais de GEE aumentaram no período (PATT, 2022).

Apesar de limitado, o Protocolo de Kyoto teve importante papel simbólico e serviu de base para que em dezembro de 2015 fosse firmado o Acordo de Paris na Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima; dessa vez, mais ambicioso e com maior abrangência de países (UNFCCC, 2015). Nele, cada um dos 195 países apresentou propostas voluntárias chamadas de Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs), que continham um conjunto de metas e ações para lidar diversos temas de desenvolvimento sustentável, mas também para, sobretudo, reduzir as emissões totais de GEEs (ROGELJ, DEN ELZEN, *et al.*, 2016).

Nesse contexto, para atender aos objetivos de mitigação climática, são necessárias, também, profundas transformações no setor de transportes (CALVIN, DASGUPTA, *et al.*, 2022). Em 2019, o setor foi considerado a quarta maior fonte de emissões globais de GEE, seguido do setor de energia, indústria e por último, do setor agregado com agricultura, florestas e uso da terra (AFOLU), como pode ser visto na Figura 1 (IEA, 2020). Nesse mesmo ano, as emissões diretas de GEEs provenientes do setor de transportes foi de 8,9 Gt CO₂-eq, em comparação a 5.0 Gt CO₂-eq em 1990,

representando 23% do total de emissões globais de CO₂ do setor de energia e 15% do valor total de emissões de gases de efeito estufa (GEE). Sendo 70% dessas emissões oriundas do transporte rodoviário, e 1%. 11% e 12% respectivamente dos setores ferroviários, marítimo e aviação (CALVIN, DASGUPTA, *et al.*, 2022).

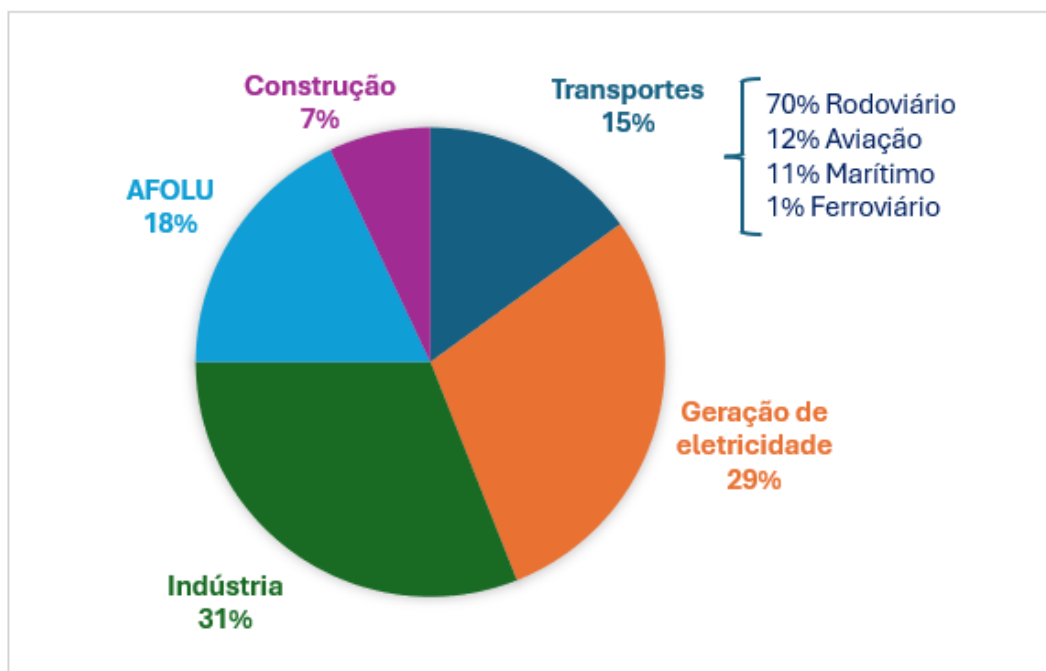


Figura 1: Emissões globais de GEE por setor

Fonte: (CALVIN, DASGUPTA, *et al.*, 2022, IEA, 2020)

Além disso, nas últimas décadas as emissões de GEE do setor de transportes vêm crescendo rapidamente, e desde 2010 o crescimento vem ocorrendo a uma taxa média de +1,8% ao ano, tornando-o o de o setor de uso final com maior crescimento (CALVIN, DASGUPTA, *et al.*, 2022). Dessa forma, endereçar as emissões dos transportes é crucial para as estratégias de mitigação de emissão de GEE de diversos países, uma vez que ele representa o setor de maior consumo de energia em 40% dos países (Gota, 2015).

O rápido crescimento das emissões do setor ocorre principalmente por causa do crescimento da atividade, que cresceu 73% entre 2000 e 2018. O crescimento na atividade de passageiros e transportes de carga ultrapassou as melhorias de eficiência e economia de combustível atingidas durante o período (ITF, 2019). Além disso, as emissões de veículos de passeio, motos, triciclos e miniônibus representam 75% as emissões do CO₂-eq por passageiro, enquanto transportes coletivos representam apenas 7%, apesar de

transportarem 20% dos passageiros do mundo (Gota et al., 2019; Halim et al., 2018; Rodrigue, 2020; Sheng et al., 2018; SLoCaT, 2018, apud Calvin et al., 2022).

Evidências sugerem que, para cumprir o Acordo de Paris, será necessário reduzir as emissões de CO₂-eq do setor de transportes em 70-80% abaixo dos níveis de 2015 até 2050 (HOEGH-GULDBERG, 2018). Alcançar essa transformação no sistema global de transportes requer mudanças sistêmicas além da adoção de novas tecnologias de propulsão, pois a dinâmica populacional, os sistemas financeiros e econômicos, a forma urbana, a cultura e as políticas também impulsionam as emissões do setor. Assim, as propostas de mitigação de emissões incluem alterações urbanísticas na infraestrutura das vias e cidades, com a implementação de tecnologias digitais, além de maior uso de transporte coletivo, aumento da eficiência logística e uso de modais mais eficientes.

Ainda assim, a adoção de novos conversores energéticos e métodos de armazenamento de energia constitui um elemento essencial na estratégia de descarbonização. Entre as inovações tecnológicas voltadas para a redução das emissões de GEE em veículos leves, destacam-se o uso de biocombustíveis, gás natural, melhorias na eficiência dos motores de combustão interna e a implementação de veículos híbridos. Nesse contexto, os EV's com baterias eletroquímicas destacam como parte relevante da solução (JARAMILLO, 2022).

Dessa forma, a pressão pela descarbonização do setor de transportes, aliada ao avanço tecnológico, surge como um dos principais fatores para o ressurgimento definitivo dos EV's, especialmente se somado à busca melhorar condições ambientais locais e a segurança energética dos países.

2.4 O ressurgimento definitivo dos EVs

Desde 2010, mas sobretudo a partir do Acordo de Paris em 2015, houve uma crescente adesão de governos à mobilização global para descarbonizar o setor de transportes. Ao longo da última década, diversos países anunciaram a implementação de políticas públicas para incentivar a adoção de EVs e estabeleceram planos e metas para a transição para veículos de zero emissão (ITF, 2018).

As iniciativas governamentais podem variar entre diversas formas de incentivo e subsídios, como: incentivos na forma de tributos no momento da compra e operação do veículo, na criação de zonas de banimento de veículos poluentes, na criação de metas e objetivos de vendas de veículos de emissão zero, no livre pagamento de estacionamento em áreas públicas e privadas para EV's, na construção de redes de recarga para EVs entre outros (HALL, Dale, XIE, *et al.*, 2021).

Em 2016, o programa *Electric Vehicles Initiative* (EVI) criado pelo *Clean Energy Ministerial* (CEM) já contava com a participação de 16 países, dentre eles China e Estados Unidos, os quais possuíam a maior frota de veículos no mundo, e tinha como objetivo acelerar a adoção de EVs (IEA, 2016). Na Conferência da ONU sobre Mudanças Climáticas de Glasgow (UNFCCC, 2021) em novembro de 2021, 28 governos nacionais assinaram a Declaração de Glasgow sobre a aceleração da transição para carros e vans com emissão zero, comprometendo-se a trabalhar para tornar todas as vendas de novos carros e vans com emissão zero até 2040 em nível global e até 2035 nos principais mercados (HALL, Dale, XIE, *et al.*, 2021).

Concomitante, os gastos dos governos com subsídios e incentivos vêm crescendo ao longo dos últimos anos, alcançando o valor de US\$30 bilhões em 2021. O governo chinês dobrou seus gastos relativos ao ano de 2020, com o total de US\$12 bilhões em 2021. A Europa também vem constantemente aumentando os gastos desde 2016, alcançando o valor de US\$12,5 bilhões de dólares em 2021. Nos EUA, os gastos em 2021 foram por volta de US\$2,0 bilhões (IEA, 2022b). Em 2021, a Noruega possuía os incentivos fiscais mais agressivos para EVs do mundo, chegando à média de 8.800 dólares por veículo. Com os incentivos, o valor de aquisição líquido de um veículo elétrico é menor do que o de um veículo equivalente a combustão (LI, 2021).

Como resultado, o que se viu entre os anos de 2010 e 2022 foi um crescimento exponencial na venda de EVs. Em 2022, foram vendidos cerca de 206 mil carros elétricos por semana, o equivalente as vendas anuais de 2013. Em 2022, as vendas anuais tiveram um incremento de 55% com relação a 2021, alcançando o valor total de 10,5 milhões de EVs vendidos globalmente. Cerca de 14% das vendas globais de carros foram de carros elétricos em 2022, o equivalente 5,6 vezes a participação de mercado em 2019 (Figura 2). Isso elevou o número total de carros elétricos nas estradas do mundo para cerca de 27

milhões em 2022, quintuplicando a quantidade em 2018 (EV VOLUME, 2023, IEA, 2022a).

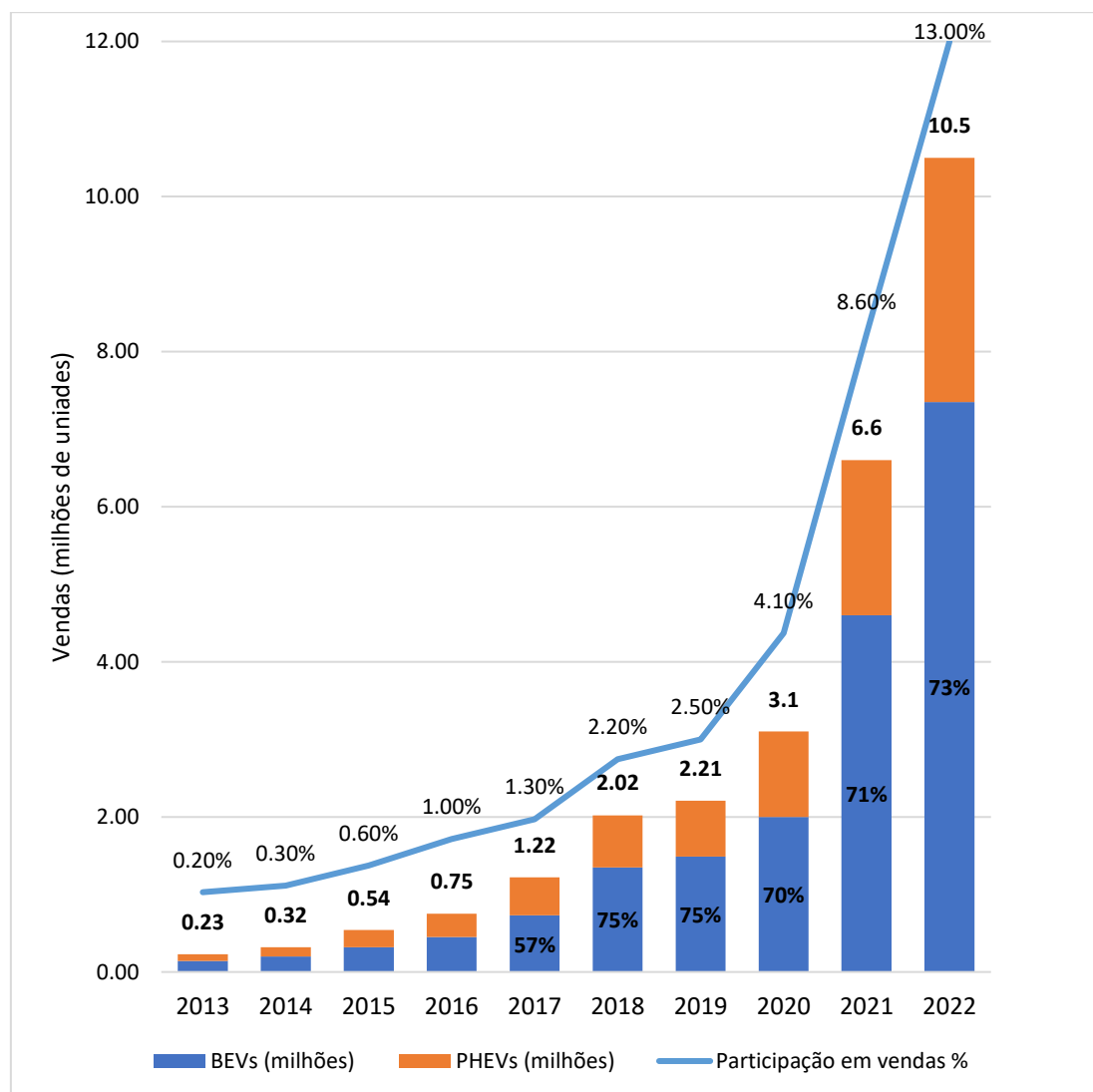


Figura 2: Vendas globais de BEV e PHEV

Fonte: (EV VOLUME, 2023).

A China desempenha um papel crucial na expansão global das vendas de EVs, consolidando-se como o maior mercado em volume total de vendas. Apenas em 2022, foram comercializados cerca de 5,92 milhões de EVs no país, um número que supera todas as vendas globais combinadas de EV's (INSIDE EV, 2023). Esse crescimento expressivo está associado ao esforço do governo chinês para descarbonizar o setor de transportes, por meio do fortalecimento de subsídios voltados ao lançamento de veículos de emissão zero, alinhados ao objetivo de que 20% das vendas de veículos em 2025 sejam

de modelos elétricos, conforme estabelecido no 14º Plano Quinquenal (2021-2025) (IEA, 2022a). Ademais, a estratégia chinesa transcende as metas de descarbonização, configurando-se como parte de uma abordagem industrial e comercial que busca expandir a presença da indústria automotiva chinesa e do setor de baterias eletroquímicas no mercado global (YANG, Z., 2023).

Dessa forma, em todo o mundo, o mercado de EVs vem se consolidando, com a expectativa de se tornar a tecnologia dominante (CALVIN, DASGUPTA, *et al.*, 2022). Mais de 20 países já anunciaram a eliminação completa das vendas de carros com motor de combustão interna (ICE) nos próximos 10 a 30 anos, incluindo economias emergentes como Cabo Verde, Costa Rica e Sri Lanka. Ademais, mais de 120 países (que respondem por cerca de 85% da frota global de veículos rodoviários, excluindo motocicletas e triciclos) anunciaram compromissos de emissões líquidas zero em toda a economia (IEA, 2022a).

Além disso, muitos países têm anunciado objetivos de longo prazo, estabelecendo metas mínimas para a venda de EVs ou de emissão zero. A tabela 1 apresenta algumas dessas medidas anunciadas pelos países mais representativos em relação à frota total e às vendas de veículos.

Tabela 1: Metas de eletrificação por país

País	Meta Principais (Veículos Elétricos / Zero Emissões)	Prazo
EUA	- Alcançar 50% de vendas de veículos livres de emissões (EVs, híbridos plug-in, célula de combustível) entre automóveis leves e caminhonetes.	2030 (50%); 2035 (100% em alguns estados)
China	- Elevar participação de NEVs (New Energy Vehicles: BEVs, PHEVs e FCEVs) a 20% das vendas de veículos novos em 2025.	2025 (20%); 2035 (maior parte)
	- A meta oficial de longo prazo prevê que a maior parte das vendas seja de veículos elétricos a bateria ou híbridos até 2035.	
Japão	- Vendas de 100% de “veículos eletrificados” (elétricos a bateria, híbridos plug-in, híbridos convencionais e célula de combustível) até meados de 2030.	Até meados de 2030
Alemanha	- Atingir pelo menos 15 milhões de carros elétricos em circulação até 2030.	2030 (15 milhões)
	- O governo também apoia a proibição de venda de carros a combustão novos na UE a partir de 2035 (alinhada à decisão do Parlamento Europeu).	
Reino Unido	- Banir a venda de carros e vans novos a gasolina e diesel até 2030.	2030 (proibição gasolina/diesel), 2035 (híbridos)
Canadá	- Tornar 100% das vendas de carros de passeio e caminhonetes novos livres de emissões até 2035.	2035 (100%)
	- Metas intermediárias de 20% até 2026 e 60% até 2030.	
Tailândia	- Produzir 30% de EV's no total de fabricação doméstica até 2030 (incluindo automóveis e motocicletas).	2030 (30% da produção)
	- Tornar-se um “centro de produção de EVs” no Sudeste Asiático.	
Chile	- 100% das vendas de veículos leves e médios novos sejam zero emissões até 2035.	2035 (leves e médios), 2040 (transporte público)
	- 100% do transporte público urbano e equipamentos de mineração zero emissões até 2040.	

Fonte: (CANADA, 2023, 2024, DEUTSCHLAND BUNDESREGIERUNG, 2021, METI, 2021, MINENERGI, 2021, TAILÂNDIA, 2021, THE STATE COUNCIL, 2020, THE WHITE HOUSE, 2021, UK GOV, 2023, 2024).

Portanto, a significativa demanda expressada pelos países impulsionou a corrida tecnológica para atender às necessidades do mercado e por isso, as montadoras de veículos têm progressivamente criado estratégias de negócios que consideram a eletrificação não apenas como uma forma de cumprir regulamentações políticas ou responder a incentivos governamentais, mas também como uma oportunidade de capturar uma fatia de mercado e manter uma vantagem competitiva (IEA, 2022). Algumas montadoras estabeleceram metas agressivas de eletrificação, anunciando novas linhas de produto totalmente eletrificados e a conversão de linhas já existentes, como a Volvo, que

pretende que 90% das suas vendas sejam de 100% elétricos até 2030 (VOLVO, 2024), assim como a General Motors que anunciou o fim de veículos que usam combustível até 2035 (GM, 2023). Além disso, diversas outras montadoras anunciaram planos para acelerar a transição para um futuro totalmente elétrico, desenvolvendo novas linhas de produtos e convertendo a capacidade de fabricação existente (HONDA, 2024, TOYOTA, 2024).

Apesar do expressivo aumento nas vendas de EV's em mercados desenvolvidos, como China, Europa e Estados Unidos, em 2023, essas vendas ainda representaram uma parcela limitada em países emergentes. Em nações como Brasil, Índia e Indonésia, os EV's corresponderam a menos de 5% do total de vendas, mesmo com o crescimento registrado nos últimos anos (ANFAVEA, 2022, IEA, 2024). Em geral, nesses mercados existe pouca disponibilidade de modelos de EVs, falta de infraestrutura de recarregamento acessível e políticas regulatórias contribuem para adoção mais lenta desses veículos nesses mercados. Mas um dos grandes obstáculos para adoção em massa é o alto preço de aquisição frente ao poder de compra da população (MESZAROS, SHATANAWI, *et al.*, 2021). Porém, existe a expectativa que a os EV's se tornem mais acessíveis globalmente, colaborando ainda mais para sua maior adoção (BNEF, 2024a).

2.5 O contexto brasileiro

O Brasil é um país com dimensões continentais, possuindo a quinta maior extensão territorial do mundo e 7,5 mil km de litoral (IBGE, 2021, THE WORLD BANK, 2020). O início do desenvolvimento do sistema de transportes se deu no período no colonial com a criação de portos e posteriormente com ênfase no modal ferroviário nas décadas de 1930 e 1940, para o escoamento de *commodities* em direção ao litoral (IPHAN, 2010, SPNT, 2012). Até então, poucas estradas haviam sido construídas no país e o modal rodoviário tinha pouco destaque no planejamento governamental. Em 1942, havia apenas 1300km de estradas pavimentadas e poucos tipos de veículos eram produzidos localmente (PREGO, 2001). Entretanto, a partir de 1950 o modal rodoviário viria a ganhar protagonismo.

Em 1957, o governo de Juscelino Kubitschek iniciou uma série de políticas desenvolvimentistas que tinham como objetivo o desenvolvimento econômico através da

industrialização do país. Um dos seus principais pilares era a criação de uma indústria automobilística nacional, não só de montadoras, mas também de fabricantes de autopeças e motores. Como resultado, uma série de montadoras estrangeiras se instalou no país ou instalou novas fábricas, como a Volkswagen (1957), General Motors (1958) e a Ford (1953) (ANFAVEA, 2023c). A produção de automóveis acelerou rapidamente e teve constante apoio governamental para garantir seu estabelecimento no país, como liberação de linhas de crédito, incentivos fiscais e estímulo às exportações (Daudt & Willcox, 2018). Parte da estratégia envolvia a proibição do uso de motores a diesel em veículos de passeio e a restrição da importação de veículos, mas com o objetivo de fortalecer ainda mais o mercado interno as importações foram restringidas em quase sua totalidade em 1976 (FRAINER, 2010, GEISEL, SIMONSEN, *et al.*, 1976).

Com isso, ao final da década de 1980, a indústria nacional de automóveis era considerada ultrapassada e não havia se desenvolvido em comparação à de outras regiões do mundo. Apesar dos esforços da criação de algumas montadoras nacionais, como a Puma e a Gurgel, o plano fracassou no objetivo de se criar uma indústria genuinamente nacional (BORBA, 2012).

A partir de 1990, uma nova linha econômica foi instalada no país e a importação de veículos foi liberada novamente. Na ocasião, os veículos vendidos no país foram comparados a carroças pelo então presidente Collor (DI SERIO, SAMPAIO, *et al.*, 2007). Nos anos seguintes, um acelerado crescimento de produção e vendas no setor automotivo foi observado, mas dessa vez com uma maior competitividade com os veículos importados. Como parte da estratégia de abertura de mercado, os impostos de importação sobre veículos foram reduzidos de 40% em 1990 para 13% em 1995. No mesmo ano, foi criado o Regime Automotivo Brasileiro (RAB), com o objetivo de atrair investimentos e estimular exportações de veículos (BNDES, 2008). Diversas novas montadoras foram instaladas no país, o que forçou a modernização dos veículos produzidos localmente (LUEDEMAN, 2003). Além disso, a melhora da economia nacional com o estabelecimento do Plano Real, quando se tinha um maior controle do câmbio, permitiu um maior comércio de importados (LACERDA, 2010).

Nos anos 2000, a indústria passou por um período de contínuo crescimento com novas instalações de fábricas e praticamente dobrando a produção de veículos no país até

2010 (ANFAVEA, 2022, 2023c). Esse fato está relacionado com o período de crescimento econômico nacional como pode ser visto na Figura 3. Além disso, a renda real familiar aumentou em 43% entre 2003 e 2011 e a houve a expansão do crédito sobre o PIB de 20% em 2002 para 50% em 2012 (SALERNO, ARBIX, *et al.*, 2015). Esse último dado é muito relevante pois mais da metade das vendas dos veículos eram feitas com operações de crédito (DAUDT, Gabriel Marino, WILLCOX, 2018).

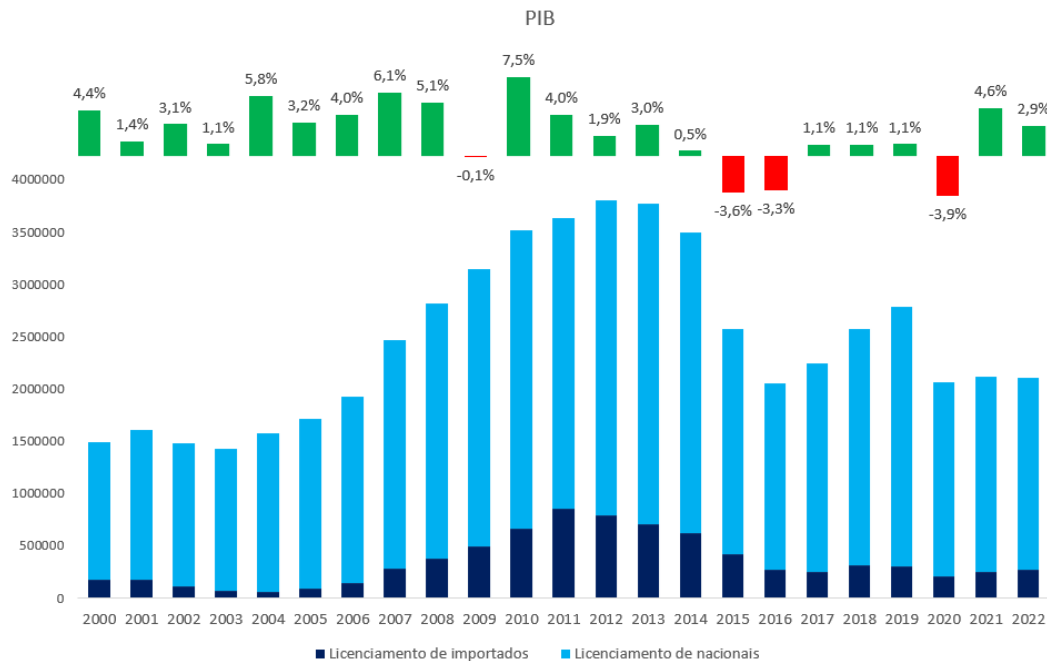


Figura 3: Relação de venda de veículos e crescimento econômico no Brasil

Fonte:(ANFAVEA, 2023b, 2024, BACEN, 2024a) .

Em 2008, a Crise Financeira de 2008 chegou ao Brasil e atingiu momentaneamente as vendas, em fevereiro de 2008 a venda de veículos foi 25% menor que o mês anterior (ANFAVEA, 2024) . Entretanto, a implementação de políticas anticíclicas, como redução da alíquota de imposto sobre produtos industrializados – IPI, e atuação de bancos públicos no mercado de crédito permitiram a indústria atingir seu pico de produção e vendas em 2013 (DAUDT & WILLCOX, 2018)

Neste mesmo ano de 2013, o governo criou o regime automotivo Inovar-Auto, que tinha como objetivo fortalecer a indústria automotiva nacional e aumentar sua competitividade. Além disso, o programa visava incentivar investimentos em pesquisa,

desenvolvimento e engenharia local, concedendo crédito presumido de IPI, entre outros benefícios (MDIC, 2019).

No entanto, a subida da taxa de juros e a deterioração gradual da capacidade de crédito do mercado resultou em uma queda de 8% do PIB no biênio 2015-2016, prejudicando diretamente o setor automotivo. A produção de veículos regrediu para 2,2 milhões de unidades produzidas por ano - um valor que havia sido ultrapassado em 2004. Esse declínio resultou em demissões e fechamento de fábricas do setor (DAUT & WILLCOX, 2018)

No âmbito de políticas industriais automotivas e em substituição do programa Inovar-Auto que se encerrou em 2017, o governo lançou o programa Rota 2030 Mobilidade e Logística em 2018 (MDIC, 2020). O programa possui objetivos e estratégias parecidas com o antigo programa, como a inserção da indústria automotiva brasileira na cadeia global, por meio da exportação de veículos e autopeças. Porém, teve maior foco em estimular a pesquisa e desenvolvimento (P&D) em toda cadeia do setor e o aumento da eficiência energética dos veículos (FILHO, 2022).

Em 2017, a retomada do crescimento econômico deu início a uma recuperação do mercado. Contudo, em 2020, a pandemia de Covid-19 novamente ocasionou uma queda na demanda e produção de veículos, que continuou sem uma retomada expressiva até o ano de 2022 (ANFAVEA, 2024). O baixo desempenho do setor foi citado como parte da justificativa para o fechamento de duas grandes fábricas no país: a unidade da Toyota em São Bernardo do Campo - SP em 2022, e a saída definitiva da Ford como fabricante com o fechamento da unidade de Camaçari-BA em 2021 (G1, 2021, REUTERS, 2022).

Dessa forma, o Brasil encerrou o ano de 2022 com 14 fabricantes automotivos instalados no país e uma capacidade ociosa de aproximadamente 50% do parque industrial automotivo (ANFAVEA, 2023).

Além disso, ao se analisar o impacto das políticas setoriais RAB (1995 - 1999) e Inovar-Auto (2013 - 2017), constatou-se que seus objetivos não foram cumpridos. Investimentos de longo prazo não foram atraídos, um ecossistema e infraestrutura local robustos de pesquisa e desenvolvimento não foram criados, a cadeia de fornecedores locais não foi fortalecida, empregos não foram gerados e mantidos, a produção não foi

mantida e aumentada, e aspectos ambientais não foram abordados (FERREIRA FILHO, 2022).

Ao se analisarem as políticas fiscais implementadas após os anos 2000, observa-se que o governo brasileiro utilizou barreiras à importação de veículos como estratégia para estimular a produção e o investimento local. Entre 2012 e 2017, o programa Inovar-Auto estabeleceu uma alíquota adicional de 30% sobre o Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) incidente sobre veículos produzidos fora do país, excetuando aqueles provenientes da Argentina e do México, em razão de acordos comerciais específicos (MÁXIMO, 2018). No momento da escrita desse estudo, o imposto de importação sobre veículos a combustão é de 18% e, após anos com a alíquota zerada para EV's, o governo decidiu a retomada gradual do imposto para incentivar sua produção localmente, começando por 10% no ano de 2024 (MDIC, 2023a).

Segundo Vargas (2019), o desenvolvimento, o crescimento e as crises na indústria automotiva brasileira estão diretamente ligados ao comportamento da economia local e aos planos, políticas e subsídios realizados pelos diferentes governos. Além disso, as políticas protecionistas limitam a entrada de novos produtos e obrigam as montadoras a se estabelecerem no país para obterem maior competitividade (BBC, 2018). No entanto, segundo (SAMOR, ARBEX, 2021), tais medidas não foram capazes de inserir a indústria automotiva brasileira na cadeia global de forma competitiva.

Apesar disso, no ano de 2024 as vendas de EV's no Brasil aumentaram significativamente, registrando um crescimento de 319% em relação ao ano anterior (ANFAVEA, 2024). Esse fato está relacionado à chegada de montadoras chinesas no mercado, que têm praticado preços competitivos, como a BYD (INSIDEEV, 2025). Contudo, esse aumento ocorre em meio a um cenário de incertezas, tanto no âmbito global quanto no local, decorrente da discussão e implementação de medidas protecionistas, tais como os atos presidenciais do presidente eleito em 2025, Donald Trump, o aumento das tarifas de importação no Brasil e a elevação das tarifas para a importação de EV's chineses, imposta pela União Europeia (EUROPEAN COMMISSION, 2024, MDIC, 2023a, US, 2025).

Dessa forma, para se analisar possíveis cenários de adoção de EV's no Brasil, torna-se necessário o uso de ferramentas que capturem a complexidade de fatores que

influenciam essa adoção. Nesse contexto, desenvolveu-se a metodologia exposta no capítulo a seguir.

3. Metodologia

Este capítulo está estruturado em dois grupos principais de conteúdo. O primeiro grupo apresenta a definição e os conceitos relacionados à metodologia de cálculo do Custo Total de Propriedade (TCO), incluindo suas aplicações. O segundo grupo foca na explicação da lógica que fundamenta o desenvolvimento do modelo utilizado para analisar o TCO de veículos elétricos a bateria (BEV) e veículos à combustão interna (ICEV) no mercado brasileiro, além das premissas gerais aplicadas aos diferentes grupos de custos.

3.1 Custo Total de Propriedade / *Total cost of Ownership* – TCO

O conceito de “total cost of ownership” (TCO) ou sua tradução direta, custo total de propriedade, foi proposto em 1993 por Ellram (ELLRAM, 1993), mas sua ideia já havia sido abordada anteriormente por outros autores com nomenclaturas correlatas, como “custo de ciclo de vida” (JACKSON, OSTROM, 1980) e “custo total” (CAVINATO, 1992). Além disso, sua concepção básica pode ser vista em práticas de gestão em empresas desde 1928 (ELLRAM, 1993). Seu conceito é baseado na análise de custo sob uma perspectiva de longo prazo do produto e não apenas no seu preço de compra. Nele, devem ser considerados não apenas o preço pago na aquisição do bem, mas também todos os custos subjacentes, como os envolvidos na posse, manutenção e descarte do produto.

Sua concepção visa compreender os custos reais de se fazer negócio com um fornecedor específico, conhecendo assim, todos os custos relevantes em sua cadeia de valor. A ferramenta reconhece que o custo inicial de aquisição representa apenas uma parcela dos custos reais relacionados à decisão de aquisição daquele item. Custos extras como manutenção, troca de peças, tempo de paradas, atrasos de entrega e descarte de resíduos costumam não ser contabilizados na decisão de compra e ficam escondidos em outros custos operacionais, mascarando assim, o custo real do produto ou serviço (CHING, 2000, VISANI, BARBIERI, *et al.*, 2016).

Ellram e Siferd (1993) originalmente propuseram uma organização dos componentes a serem analisados em seis categorias: qualidade, gestão, entrega, serviço,

comunicação e preço. Porém, esses indicadores analisavam apenas os custos diretos envolvidos no TCO (ELLRAM, SIFERD, 1993, FERRIN, PLANK, 2002). Posteriormente, foi proposta uma organização com relação às transações financeiras correlacionadas ao produto, separadas em pré-transacionais, transacionais e pós-transacionais. Dessa forma, se conseguiria captar em maiores detalhes os custos indiretos. Os custos pré-transacionais estão relacionados aos custos de identificação da necessidade e busca dos produtos. Os custos transacionais estão relacionados aos tributos e custos de entrega e valor de compra, e a fase pós-transacional seriam todos os custos relacionados ao ciclo de vida do produto como manutenção, descarte e logística reversa (ELLRAM, 1993).

Na literatura é possível encontrar uma variedade de estudos sobre a abordagem TCO de acordo com sua classe de compra, como para bens de consumo, serviços, escolha de fornecedores (FLUCKER, TOZER, 2013, SACCANI, PERONA, *et al.*, 2017). Porém, sua aplicação na prática não se demonstra uma tarefa fácil, podendo ela possuir diferentes níveis de detalhamento e arquiteturas para cada situação proposta. Ainda assim, ela se mostra uma ferramenta valiosa para empresas que a aplicam de forma correta. Ferrin e Plank (2002) concluem que não existe um modelo universal de TCO, e que por isso, toda análise deve ser feita de forma taxonômica para se identificar os principais indicadores a serem incorporados. No referido estudo, identificou-se que alguns fatores são mais comuns que outros e por isso podem ser usados como padrão para o início da análise (FERRIN, PLANK, 2002).

Com isso, observa-se que o TCO tem sido amplamente aplicado na indústria por compradores, gestores e agentes públicos para uma correta valoração de suas decisões de compras (ELLRAM, 1995, FERRIN, PLANK, 2002). Também tem sido aplicado para o estudo dos custos envolvidos na compra de veículos, contribuindo de forma compreensiva e transparente para a tomada de decisões racionais de agentes compradores.

Apesar disso, é importante ressaltar que do ponto de vista do consumidor, os compradores potenciais podem atribuir diferentes níveis de importância para diversos atributos de um novo veículo. Ou seja, nem sempre o preço de compra e o custo de propriedade ao longo do tempo são fatores determinantes para a decisão de compra. Contudo, o cálculo de TCO de veículos automotores se mostra como um forte indicador

de decisão de compra, por ser um bem de consumo de longa duração, com alto custo de aquisição e que apresenta variados custos pós-compra como manutenção, combustível, seguro, garantias, revenda etc. (Sakurai Michiharu, 1997).

Nas últimas décadas, novas abordagens para se recalcular o TCO para diferentes veículos e diferentes métodos de propulsão tem sido aplicado, juntamente com uma crescente variedade de opções que vem surgindo com a pressão por veículos menos poluentes(LIU, Zhe, SONG, *et al.*, 2021a).

3.2 Desenvolvimento do modelo

Diante do desafio de compreender como pode se dar a adoção de BEVs no Brasil, um país com diversas particularidades quanto ao uso, mercado, modelos e vendas de veículos, foi elaborada uma metodologia para analisar a competitividade entre BEVs e ICEVs sob a perspectiva do TCO. Para tanto, desenvolveu-se um modelo cujo propósito central é investigar possíveis cenários de paridade de custo total entre BEVs e ICEVs no período de 2023 a 2050 no Brasil.

Além de examinar os custos diretos, que incluem aquisição e operação dos veículos, o modelo permite a avaliação de cenários de paridade de custo considerando variáveis indiretas, tais como: subsídios à aquisição, incentivos fiscais estaduais e federais, uso de energia elétrica proveniente do mercado livre, custos de substituição das baterias e cenários de compensação tributária devido à perda de arrecadação decorrente da redução das vendas de combustíveis fósseis. Assim, possibilita-se uma análise mais aprofundada do potencial de paridade de preço dos veículos elétricos no Brasil, não apenas considerando a possível redução dos custos de fabricação no mercado internacional, mas também em relação a diferentes cenários de subsídios fiscais e tributários, custo residual das baterias e custos da energia de recarga ou dos combustíveis fósseis.

Para atingir esse objetivo, foi desenvolvido um modelo *bottom-up* técnico-econômico no programa *Microsoft Excel*, baseado na metodologia de Hamza et al. (2021a) desenvolvida para veículos elétricos e híbridos e no modelo publicamente disponível em (HAMZA, K., LABERTEAUX, *et al.*, 2020), o qual foi escolhido por

sintetizar a metodologia aplicada em (HAMZA, Karim, LABERTEAUX, *et al.*, 2021a, HUMMEL, ANALYST, *et al.*, 2017, LUTSEY, CUI, *et al.*, 2021, LUTSEY, MESZLER, *et al.*, 2017, NREL, 2023).

Para atingir o objetivo desse trabalho, o modelo foi adaptado para a realidade brasileira e foram adicionadas equações para permitir a avaliação da sensibilidade das diferentes variáveis indiretas mencionadas e que serão tema dos capítulos subsequentes. Além disso, devido à relevância que o tempo de propriedade do veículo possui em um comparativo de TCO, o modelo também foi desenvolvido de forma a poder simular o TCO de acordo com o tempo de propriedade de 5, 10 e 15 anos com o primeiro proprietário.

Para o cálculo de TCO, considerou-se a metodologia de Ellran (1993), apresentada no capítulo 3.1. Para tal, foram considerados três grandes grupos de custos, definido pela equação 1 a seguir:

$$TCO = C_{aq} + C_{op} - V_r \quad \text{Equação 1}$$

Em que,

- C_{aq} = Custo de aquisição do veículo,
- C_{op} = Valor presente do Custo operacional, e
- V_r = Valor presente do valor obtido na revenda do veículo;

A primeira parte da equação se refere ao Custo de Aquisição do veículo (C_{aq}), sendo este o resultado agregado de diversos custos que podem ser subdivididos entre custo de manufatura do veículo somado a margem de lucro da montadora e do revendedor. A segunda parte, representando o Custo Operacional (C_{op}) trazido à valor presente, representando as despesas com manutenção, impostos de circulação, seguro e combustível (eletricidade ou combustível líquido) ao longo do tempo de propriedade do veículo. Por último, o V_r representa o Valor de Revenda do veículo que também é trazido ao seu valor presente.

O esquema representado na Figura (4) demonstra como os diferentes grupos de custos interagem entre si.

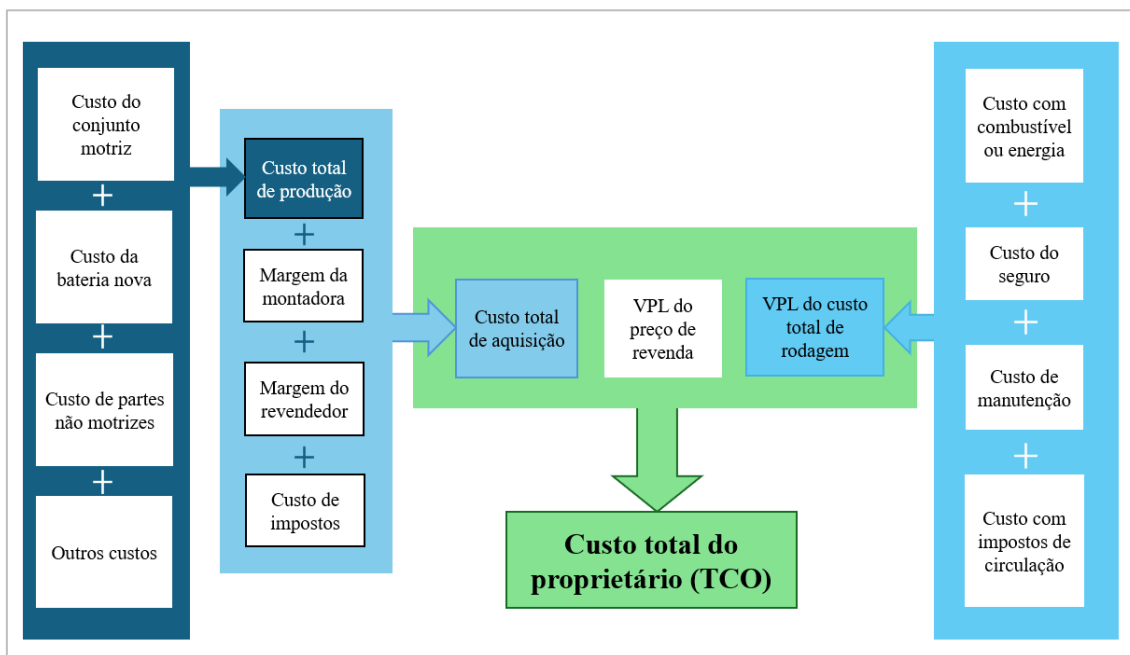


Figura 4: Diagrama que descreva as interações de custos do sistema modelado

Fonte: Elaboração Própria

As projeções dos custos pós-transacionais, representados por (C_{op}) e (V_r), são expressas em valores reais, sem ajuste pela inflação. Dessa forma, o cálculo do valor presente do fluxo de caixa futuro é realizado com base na taxa nominal de juros, correspondente ao custo de oportunidade do capital.

Para melhor se compreender os cenários paridade de TCO brasileiro, o modelo foi construído de forma a representar duas categorias de veículos: médio e grande. O padrão de construção de cada modelo foi seguindo o padrão e nomenclatura do Programa Brasileiro de Etiquetagem (MDIC, 2024) Ambas as categorias fazem parte dos dois grupos mais significativos de vendas no Brasil em 2022 e, por isso, foram selecionadas para essa metodologia (ANFAVEA, 2022).

Além disso, conforme discutido no capítulo 2.5, foi levado em consideração que a indústria automotiva possui um alto grau de interconexão e dependência global, uma vez que o país não desenvolveu uma cadeia manufatureira totalmente local. Isso permite concluir que o custo de fabricação de veículos nacionais está alinhado com o mercado internacional. Dessa forma, o modelo foi estruturado para representar os valores em dólares, possibilitando a utilização de dados de entrada baseados em referências internacionais.

Por fim, o modelo trabalha com diversas variáveis que são obtidas de fontes externas e podem ser alteradas conforme a necessidade do modelador. Posteriormente, no capítulo do estudo de caso, será indicado as escolhidas para tal.

3.3 Custo Total de Manufatura – C_m

A metodologia aplicada para se encontrar o Custo Total de Manufatura (C_m) do veículo foi baseada na concepção utilizada em (HAMZA, Karim, LABERTEAUX, *et al.*, 2021a, HUMMEL, ANALYST, *et al.*, 2017), que por sua vez é baseada na metodologia usada no modelo FASTsim – modelo publicamente disponibilizado pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL, 2023, SIMPSON, 2006) para, entre outros objetivos, realizar a análise comparativa do TCO entre diferentes tecnologias de propulsão veiculares.

A metodologia baseia-se na concepção de que a diferença de custo de manufatura entre um EV e um ICEV, de características semelhantes, reside no conjunto motriz e no sistema de baterias. Em outras palavras, veículos com dimensões e especificações equivalentes apresentam o mesmo custo de produção para componentes como carroceria, bancos, vidros, interior, faróis, acessórios, rodas e pneus – tal qual exposto na figura 5. Assim, ao subtrair-se o custo do motor a combustão interna e da transmissão de um ICEV e adicionar o conjunto de baterias, motor elétrico e da nova transmissão, é possível estimar o valor correspondente do veículo elétrico.

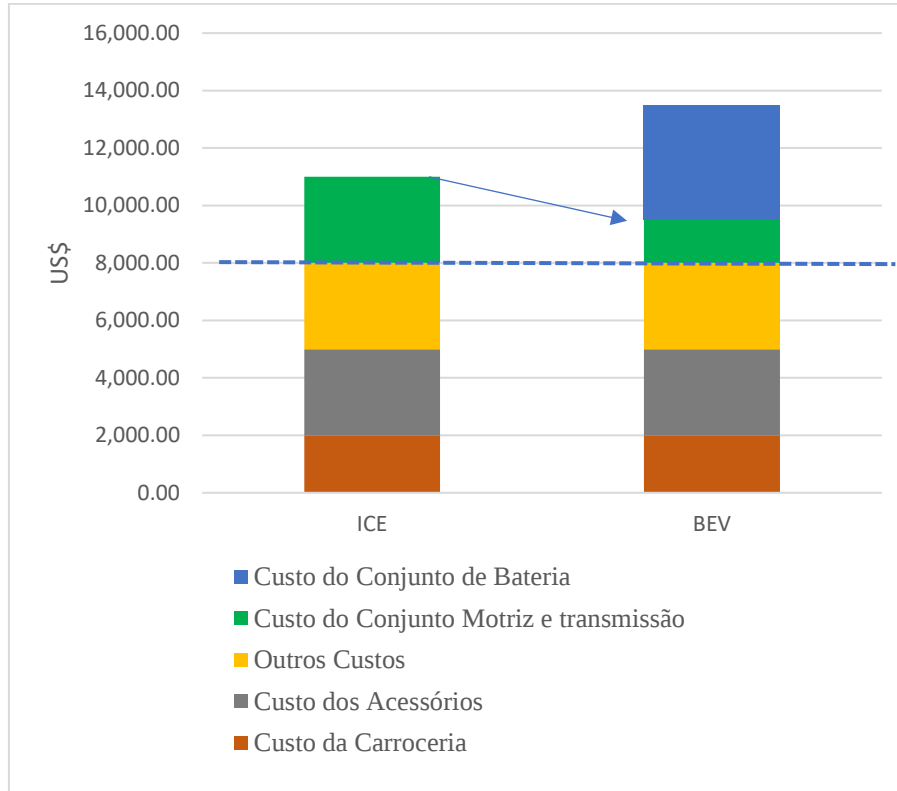


Figura 5: Ilustração da premissa de diferença de custos entre BEV e ICEV

Fonte: Elaboração própria.

Dessa forma, para análise do Custo Total de Manufatura (C_m) de um veículo, foi considerada a seguinte equação:

$$C_m = C_d + C_i + B + P \quad \text{Equação 2}$$

Na qual, consideram-se as seguintes variáveis:

- C_d = Custos diretos de manufatura
- C_i = Custos indiretos de manufatura
- B = Custo do Conjunto da Bateria
- P = Custo do conjunto motriz e transmissão

3.3.1 Custo do conjunto motriz e transmissão

Os motores de combustão interna constituem uma tecnologia existente há muitos anos, conforme já discutido no capítulo introdutório deste trabalho. Ao longo desse

tempo, os custos de sua manufatura foram aperfeiçoados, a ponto de ser considerada uma tecnologia madura, sem grandes perspectivas de reduções de custo significativas no processo de fabricação. Por outro lado, a crescente rigidez das normas ambientais tem demandado motores com menores níveis de emissões de poluentes. Essa exigência, associada à busca por maior eficiência térmica e redução de peso, tem sido o foco dos investimentos da indústria nos últimos anos, levando ao incremento do custo dos motores de combustão interna (LUTSEY, MESZLER, *et al.*, 2017).

Dessa forma, o Custo do Motor a Combustão Interna (C_{me}) – que inclui o sistema de escapamento, a central eletrônica, o sistema de captação de ar e sensores – optou-se por utilizar a equação linear adaptada de (HAMZA, Karim, LABERTEAUX, *et al.*, 2019, NREL, 2023).

$$C_{me} = (\alpha_{0me} + \alpha_{1me} * E_{me}) * \alpha_{2me} \quad \text{Equação 3}$$

Nessa equação, E representa o valor da potência do motor em kW, sendo possível utilizar o valor de preferência do modelador, e (α_{0me}) e (α_{1me}) correspondem a coeficientes obtidos por meio de regressões lineares, disponíveis na literatura, que relacionam os custos dos motores publicamente disponíveis em determinada faixa de potência. Além disso, “ α_{2me} ” indica o coeficiente de incremento do custo ao longo dos anos.

No caso dos motores elétricos, a lógica aplicada foi utilizada de forma semelhante, dado que se trata de uma tecnologia madura e com construção simplificada. O Custo do Conjunto do Motor Elétrico (C_{mee}), incluindo a central eletrônica, foi estimado pela equação a seguir:

$$C_{mee} = \alpha_{0mee} + \alpha_{1mee} * E_{mee} \quad \text{Equação 4}$$

Nessa equação, E_{mee} , α_{0mee} e α_{1mee} desempenham a mesma função correspondente à equação anterior, mas nesse caso, para motores elétricos. No entanto, optou-se por não utilizar o coeficiente de correção de custo ao longo dos anos.

Em relação ao custo da transmissão, seja no termo genérico "câmbio" ou no termo técnico "caixa redutora de velocidade", é relevante destacar que as transmissões de veículos elétricos, em geral, apresentam menor complexidade, consistindo usualmente em apenas uma redução (HAMZA, Karim, LABERTEAUX, *et al.*, 2019). Essa condição contrasta com as transmissões de veículos com motores a combustão interna, que tipicamente possuem mais de cinco reduções.

Dessa forma, o custo da transmissão de veículos ICEV e BEV foram encontrados, respectivamente, pelas equações 5 e 6:

$$CT_{me} = \frac{C_{me}}{\alpha_{tme}} \quad \text{Equação 5}$$

$$CT_{mee} = \frac{C_{mee}}{\alpha_{tmee}} \quad \text{Equação 6}$$

Em ambas as equações, os coeficientes α_{tme} e α_{tmee} são dados externos obtidos disponíveis na literatura. Ao abordar a análise de caso, se explicitará a origem dos dados para o mercado brasileiro.

Por fim, o Custo do Conjunto Motor e Transmissão (E) é dado pela soma do custo do motor C_{me} e C_{mee} somado ao Custo da Transmissão CT_{me} e CT_{mee} :

$$P = C_{me} + CT_{me} \quad \text{Equação 7}$$

$$P = C_{mee} + CT_{mee} \quad \text{Equação 8}$$

3.3.2 Custo do Conjunto da Bateria

O Custo do Conjunto da Bateria (B) de um veículo elétrico é considerado um dos componentes mais relevantes na determinação de seu preço final, influenciando diretamente a análise do TCO. Em estudos realizados em 2017, foi constatado que uma bateria de íon-lítio com capacidade de 60 kWh, ao custo de US\$145/kWh, representava aproximadamente 30% do custo total de aquisição do veículo (HUMMEL, ANALYST, *et al.*, 2017). Contudo, desde então, foi observada uma queda significativa no custo das

baterias, evidenciando os avanços tecnológicos, a maior eficiência da produção em larga escala e a expansão da cadeia de suprimentos (BNEF, 2023, IEA, 2023a).

Essa tendência de redução de custos é projetada para continuar nos próximos anos, sendo impulsionada pelo desenvolvimento de novas tecnologias, como as baterias de estado sólido, e pela otimização dos processos produtivos. Sendo assim, para representar esse declínio de custo, o modelo foi desenvolvido de forma a possibilitar a entrada de duas variáveis que representam o fator de declínio anual do custo do pacote de baterias, uma delas para representar o declínio anual entre 2023 e 2035 e outra entre 2036 e 2050. O motivo pela separação deu-se para representar duas fases de redução de custos.

As informações do custo do conjunto da bateria e de sua capacidade energética equivalente foram consideradas como dados de entrada o ano de 2023. Para os anos subsequentes, o custo da bateria foi calculado multiplicando-se os fatores de declínio anual mencionados.

No formato em que o modelo foi construído, o tamanho do pacote de bateria não é considerado um dado de entrada, mas o resultado calculado necessário para atingir uma autonomia elétrica desejada considerando a eficiência energética do veículo e o *battery swing* (percentual de energia utilizável da bateria em relação à capacidade nominal). O consumo de energia do grid, o *battery swing* e a eficiência do carregador são dados de entrada obtidos externamente na literatura. Ao longo do capítulo de estudo de caso, serão aprofundados os dados utilizados para o cenário brasileiro.

É importante destacar que o valor de consumo de energia (kWh/km) fornecido nas classificações de eficiência do veículo reflete o consumo "da rede"; ou seja, inclui as perdas no carregador. Para calcular o tamanho da bateria utilizável, multiplica-se o consumo de energia ajustado pelas perdas e a autonomia elétrica desejada. O dimensionamento final da bateria (usado para cálculo de custos) é obtido dividindo a capacidade de bateria utilizável pelo *battery swing*, tal qual exposto na equação a seguir.

$$B_s = \frac{R \times (V_e \times Ch_{eff})}{B_{swing}} \quad \text{Equação 9}$$

Nessa equação, consideram-se as seguintes variáveis:

- B_s = Capacidade da bateria
- R = Autonomia do veículo elétrico (km)
- V_e = Consumo energético do veículo (kWh/km)
- Ch_{eff} = Eficiência do carregador
- B_{swing} = Battery swing

Por fim, também se considerou que as baterias apresentam ganhos de escala de acordo com sua capacidade (POUPINHA, DORNOFF, 2024) e, por isso, o modelo permite a aplicação de um fator de ganho em escala para representar a redução do custo por kWh de acordo com o aumento da sua capacidade. Uma vez que considera essa condição, o modelo permite a escolha entre baterias de 30kWh a 135kWh de capacidade energética nominal.

3.3.3 Custos diretos e indiretos

Os Custos Diretos (C_d) referem-se ao custo de fabricação e montagem de todos os componentes do veículo, exceto o trem de força. Esses custos incluem a produção de partes como a carroceria, interior, sistemas eletrônicos, entre outros. Já os Custos Indiretos (C_i) englobam tudo que não está diretamente relacionado à produção física do veículo, como administração, depreciação de equipamentos, amortização, pesquisa e desenvolvimento, entre outros fatores. Os Custos Indiretos (C_i) preenchem a diferença entre a soma dos custos diretos e o Custo Total de Manufatura do veículo, sendo esse último o preço do veículo subtraído da margem de lucro do fabricante e do acréscimo feito pelos revendedores (HAMZA, Karim, LABERTEAUX, *et al.*, 2019).

Para o presente estudo, ambas as variáveis são utilizadas como dados de entrada, sendo o Custos Diretos dado em um valor em dólar e mantido constante ao longo dos anos e os custos indiretos como uma fração do custo de fabricação e por isso varia ao longo dos anos.

3.4 Custo Total de Aquisição, Margens e Impostos

O Custo Total de Aquisição (C_{aq}) de um veículo é determinado pela soma do custo total de manufatura (C_m) com as margens de lucro da montadora (M_m), do revendedor (M_r), e os impostos sobre a venda (I_{mp}). Esses elementos são proporcionais ao custo total de manufatura, ou seja, à medida que o custo de fabricação aumenta, também aumentam as margens e os impostos. A relação pode ser expressa pela equação:

$$C_{aq} = C_m + C_m * (M_m + M_r + I_{mp}) \quad \text{Equação 10}$$

Nessa equação, consideram-se:

- C_m = Custo total de manufatura;
- M_m = Margem de lucro da montadora;
- M_r = Margem de lucro do revendedor;
- I_{mp} = Impostos sobre a venda do veículo.

Dessa forma, o preço final de aquisição reflete não apenas o custo de produção do veículo, mas também as margens de lucro e tributos aplicados antes da formação do preço final do veículo, seguindo a equação⁵:

Equação 11

$$Preço\ Final = Preço\ Base * ((1 + IPI) * (1 + COFINS + PIS) * \left(\frac{1}{(1-ICMS)-1}\right))$$

Com isso, o modelo permite a alteração e ou inclusão dos seguintes tributos em base percentual:

- ICMS - Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
- IPI - Imposto sobre Produtos Industrializados
- PIS - Programa de Integração Social

⁵ Ressalta-se a existência de uma reforma tributária em discussão que altera a forma de cálculo dos tributos (Senado, 2025).

- COFINS - Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social

3.5 Custo Operacional e Valor de Revenda

Os custos operacionais incluídos nessa metodologia incluem as despesas com combustível (combustível fóssil e/ou eletricidade), bem como os custos de manutenção, impostos de circulação e seguro anuais.

Para se calcular o custo anual de combustível, utiliza-se um consumo médio esperado de combustível do veículo, nas unidades km/l e kWh/l, multiplicado pelo valor custo médio anual do mesmo, nas unidades US\$/l e US\$/kWh. Após isso, os valores são calculados de acordo com uma distância média de rodagem escolhida.

Nesse modelo, o consumo médio de combustível para os ICEVs pode ser ajustado por dois coeficientes de incremento de eficiência de conversão energética, um correspondente aos anos de 2023 a 2035 e outro para 2036 a 2050. Assim, para esse tipo de veículo, são dados de entrada: o consumo médio para o ano de 2023 e os dois coeficientes mencionados.

No caso dos BEVs, considera-se que o consumo médio permanece constante ao longo dos anos dado que a tecnologia de motores elétricos já possui uma característica de alta eficiência. Assim, os dados de consumo no ano de 2023 são dados de entrada do modelador e este permanece o mesmo até 2050.

Com relação ao preço da eletricidade e do combustível fóssil optou-se por considerar ambos os valores fixos ao longo do período de análise.

As taxas anuais de registro e seguro são calculadas a partir do valor residual do veículo a cada ano. Para se calcular o valor residual é aplicado uma taxa de desvalorização anual que pode ser editada para cada um dos 15 possíveis anos de propriedade do veículo. O modelo também permite diferenciar essa taxa entre os veículos elétricos e a combustão.

Por fim, o valor de revenda do veículo é calculado com base no valor residual de cada ano do veículo. Como já mencionado, todos os C_{op} são ajustados para o seu correspondente valor presente para o ano de aquisição do veículo.

3.6 Modelagem de variáveis indiretas

Após realizar a modelagem do TCO de BEVs e ICEVs em um cenário base, o modelo foi desenvolvido de forma a permitir a análise de cenários de paridade de custo perante diferentes variáveis indiretas. Ao se considerar variáveis como incentivos fiscais para aquisição, isenções de impostos sobre a circulação, recompensas tributárias pela redução do uso de combustíveis fósseis, além do custo da energia e do valor residual das baterias, é possível obter uma visão mais precisa e abrangente do impacto econômico perante cada cenário.

Essas variáveis, apresentam um comportamento dinâmico que pode variar conforme as políticas governamentais, o mercado de energia e a adoção de novas tecnologias. Como exposto no capítulo 2.4 desse trabalho, a redução do custo de aquisição e a venda de veículos elétricos têm relação direta com a existência de subsídios governamentais. Por outro lado, a perda de receita dos estados com a venda de combustíveis fósseis pode impactar negativamente na adoção de veículos elétricos.

Portanto, a modelagem de cenários diversos é fundamental para se compreender as condições sob as quais os BEVs podem atingir paridade de custo ou até superar economicamente os ICEVs. Tal análise permite que consumidores, empresas e formuladores de políticas públicas tomem decisões embasadas, garantindo que o avanço tecnológico dos BEVs seja acompanhado por estratégias econômicas sustentáveis e de interesse público.

Dessa forma, o modelo foi desenvolvido para permitir a análise das seguintes variáveis descritas nos próximos subcapítulos.

3.6.1 Incentivo fiscal para aquisição e operação de veículos elétricos

Com a intenção de acelerar a adoção de VEs, diversos países pelo mundo, com destaque especial para a China e o Noruega, adotaram incentivos fiscais para a redução do preço de aquisição de veículos elétricos (Wang et al., 2019). Além disso, diversos estudos evidenciam a relação entre esses incentivos com a maior demanda por VEs (Deuten et al., 2020; Liu et al., 2023). No Brasil, desde 2012, com a criação do Inovar Auto, o país já institui e alterou diversas políticas de incentivo à adoção de VEs

evidenciando a necessidade da melhor compreensão do impacto de cada decisão (MDIC, 2023b).

Para além dos incentivos fiscais para a aquisição, diversos estados brasileiros oferecem descontos ou isenção no Imposto sobre a propriedade de Veículos Automotores – IPVA, com o objetivo de incentivar a adoção dos mesmos, como é o caso do Distrito Federal que zerou o imposto em 2021 (BRASIL, 2019)

Dessa forma, foi adicionado ao modelo um painel onde se pode alterar os valores das seguintes variáveis em base percentual⁶: ICMS, IPI, COFINS, PIS e IPVA. Adicionalmente, mais dois cenários são criados para se permitir a análise da sensibilidade de cada valor assim como se permite a combinação com outras variáveis indiretas.

3.6.2 Recompensação tributária pela perda de arrecadação dos combustíveis fósseis

É amplamente reconhecido que a substituição de ICEVs por VEs proporciona impactos positivos diretos e de curto prazo à população, especialmente em virtude da redução de externalidades ambientais associadas à queima de combustíveis líquidos em ambientes urbanos (WHO, 2005, 2016), conforme texto apresentado no primeiro capítulo desse trabalho. Entre os benefícios identificam-se a diminuição da poluição sonora e a redução da poluição atmosférica local (WALLINGTON, ANDERSON, *et al.*, 2022). Embora tais benefícios não gerem receita fiscal direta para os estados, os efeitos indiretos resultantes podem acarretar impactos econômicos positivos e redução de gastos governamentais – como a diminuição das despesas hospitalares relacionadas a doenças respiratórias e cardiovasculares, além da valorização imobiliária decorrente da melhoria nas condições urbanas (Wang et al., 2022). Esses impactos, a longo prazo, podem traduzir-se em benefícios financeiros indiretos para os estados.

⁶ Como já mencionado, a existência de uma reforma tributária em discussão que altera a forma de cálculo dos tributos (Senado, 2025).

Por outro lado, dados do Conselho Nacional de Política Fazendária (Confaz) indicam que, em 2021, a receita proveniente do ICMS sobre o setor de Petróleo, Combustíveis e Lubrificantes representou, em média, 15% do total da receita estadual tributária, enquanto o setor de Energia Elétrica contribuiu com 9% (BRASIL, 2024a). Além disso, ao analisar-se o percentual médio de ICMS incidente sobre a energia elétrica vendida (18%) (ANEEL, 2024) em comparação com a alíquota aplicada à gasolina (22%)⁷, em conjunto com a maior eficiência energética dos motores elétricos, constata-se que um cenário de redução no consumo de combustíveis fósseis, decorrente da crescente penetração de veículos elétricos no mercado, possui potencial de gerar impacto negativo na arrecadação tributária e no equilíbrio fiscal dos estados (HALL, A. L., 2012, JENN, AZEVEDO, *et al.*, 2015).

Nesse contexto, torna-se razoável a hipótese de que mecanismos de recompensação tributária possam ser implementados de forma a mitigar os impactos fiscais decorrentes da redução de arrecadação direta dos tributos sobre combustíveis líquidos (JENN, AZEVEDO, *et al.*, 2015).

Para avaliar o impacto dessa possível ação governamental, foi incorporado ao modelo um painel que possibilita a alteração dos valores atribuídos a tributos incidentes sobre a energia elétrica, tais como ICMS, CIDE, COFINS e PIS. Adicionalmente, foi introduzido um novo cenário que permite avaliar os efeitos dessas alterações tributárias, fornecendo uma base analítica para a formulação de políticas públicas que assegurem o equilíbrio fiscal dos estados enquanto promovem a transição para uma matriz energética mais limpa e sustentável.

Apesar da legislação vigente no momento de a escrita desse trabalho delimitar uma alíquota fixa do ICMS (*ad rem*) de R\$1,20 sobre o litro da gasolina vendida (BRASIL, 2022), e para o PIS/PASEP, COFINS e CIDE, de R\$ 0,1411, R\$ 0,6514 e R\$ 0,10 por litro (EPE, 2023), respectivamente, o painel foi desenvolvido de modo que essas taxas sejam configuradas como percentuais sobre o valor da transação (*ad valorem*).

⁷ Valor se refere ao percentual calculado de R\$1,20 com relação ao preço médio da gasolina comum na última semana de dezembro de 2023: R\$5,56 (ANP, 2024). Conforme LCI nº1192, de 2022.

3.6.3 Cenário de uso de energia elétrica do mercado livre de energia

Outra possibilidade de variável indireta que pode impactar diretamente nos custos operacionais dos veículos elétricos é o custo da energia de recarga. Existem diversos cenários possíveis de precificação da energia elétrica para a recarga de veículos, podendo variar entre o proprietário que recarrega o veículo em sua casa com painel solar até o que depende de estações de recarga privadas, que, além de cobrar o preço da energia, podem incluir uma margem para custear o serviço oferecido.

Além disso, no Brasil, existem o mercado livre e o mercado regulado de energia, que apresentam diferenças significativas nos preços praticados. No mercado regulado, o preço da energia é fixado pelas distribuidoras, de acordo com tarifas determinadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Já no mercado livre, consumidores de maior porte podem negociar diretamente com geradoras e comercializadoras, obtendo condições mais vantajosas, como preços mais competitivos e contratos personalizados, dependendo de fatores como a demanda e a fonte de energia utilizada (eólica, solar, hídrica, entre outras).

Dessa forma, o custo de recarga de VEs pode variar amplamente, influenciado tanto pelo tipo de fonte de energia quanto pela escolha do mercado em que o consumidor está inserido. Assim, no modelo proposto, foi acrescentado um cenário adicional, permitindo a opção por diferentes preços de energia, com o objetivo de analisar o impacto dessa variação no TCO.

3.6.4 Cenário de substituição da bateria

Uma das incertezas mais relevantes na análise do TCO de VEs está relacionada à vida útil da bateria em comparação à vida útil do veículo. Isso se torna ainda mais significativo em países em desenvolvimento, como o Brasil, onde a vida útil média dos veículos é maior do que a verificada em países desenvolvidos (ACEA, 2023, ANFAVEA, 2022). Além disso, as condições operacionais, como temperaturas mais altas e veículos que percorrem longas distâncias, indicam a possibilidade de uma menor vida útil da bateria (De Gennaro et al., 2020a; Yang et al., 2019a).

Assim, foram acrescentadas ao modelo equações que contabilizam o valor presente da substituição da bateria do BEV em um determinado ano. Esse ano pode ser escolhido entre 1 e 10 anos no modelo. Apesar de a vida útil da bateria depender de diversos fatores relacionados às suas condições de uso, tais como ciclo de carga e descarga, temperatura, tempo, tipo químico, intensidade de carga e descarga (JÚNIOR, 2024, PISTOIA, LIAW, 2018), este trabalho considera apenas a escolha do tempo de vida útil em quantidade de anos.

O valor de referência para o novo conjunto de bateria (B) a ser substituído é definido pelo valor correspondente calculado para um veículo novo no ano de substituição escolhido. Por exemplo, para um veículo adquirido em 2023 cuja substituição ocorra em 10 anos, o valor referência da bateria é determinado pela curva de declínio calculada para um veículo novo, conforme as equações do capítulo 3.2.2. Para o cálculo do valor da troca da bateria após 2050, se manteve constante o valor encontrado pelo modelo para esse mesmo último ano.

Além disso, o modelo permite a inserção de um valor residual para a bateria, correspondente à venda para reciclagem ou outro uso em um segundo ciclo de vida. Onde nesse caso, seriam valores que reduzem seu custo final. Assim como, o modelo permite a inserção de custos adicionais que podem estar relacionados à fabricante praticar margens de lucro sobre a venda do kit de baterias no varejo, bem como à possibilidade de sobrecustos decorrentes da necessidade de oferta de baterias defasadas, caso o veículo não seja compatível com os modelos fabricados futuramente.

4. Estudo de caso

Este estudo de caso tem como objetivo validar a metodologia desenvolvida, utilizando o modelo construído. Dessa forma, realiza-se uma simulação para analisar cenários de paridade de custo entre veículos elétricos e a combustão no Brasil. O período de análise abrange os anos de 2023 a 2050, permitindo a avaliação da evolução dos custos ao longo do tempo e a identificação dos principais fatores que influenciam a competitividade dos diferentes tipos de tecnologia veicular e sua respectiva sensibilidade sobre o TCO. Além disso, a escolha das variáveis desse estudo de caso busca representar o comportamento de um motorista mediano brasileiro e não um caso específico.

4.1 Cenário base

A primeira etapa da modelagem do cenário base consiste na escolha e caracterização da categoria veicular que será analisada. Para este estudo de caso, optou-se por ajustar o modelo conforme características da categoria Compacto, conforme classificação do Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV) (INMETRO, 2024). A escolha se justifica por esta ser uma das categorias de maior representatividade entre os 20 modelos mais vendidos no Brasil em 2023 (ANFAVEA, 2023a).

A modelagem proposta não tem como objetivo representar um modelo ou fabricante específico, mas sim refletir características gerais e padrões da categoria analisada. Para o presente estudo, parte das estimativas relacionadas ao dimensionamento e aos custos dos veículos foi fundamentada no estudo conduzido pelo *Union Bank of Switzerland* (UBS) (HUMMEL, ANALYST, *et al.*, 2017), no qual dois modelos foram desmontados: o Chevrolet Bolt e o Volkswagen Golf.

Ademais, destaca-se que a construção do cenário base da modelagem busca comparar dois veículos que apresentem massa, desempenho e nível de equipamentos equivalentes, diferenciando-se apenas pelo tipo do conjunto motriz e pelo sistema de armazenamento de baterias. Para fins ilustrativos, veículos disponíveis no mercado brasileiro com características similares às especificações empregadas na modelagem — em termos de conjunto motriz, desempenho e dimensões — podem ser exemplificados na tabela 2 a seguir.

Tabela 2: Exemplos de veículos da categoria modelada no estudo de caso

	ICEV	BEV
Compacto	GM/Cruze Sport6, VW/Nivus, Honda/City	BYD/Dolphin Plus, GWM/Ora, GM/Bolt

Fonte: Elaboração própria.

Prosseguindo para a sequência lógica para se encontrar o Custo do Conjunto Motriz e transmissão, descrito em 3.3.1, assume-se como padrão de potência o valor de 60 kW, o qual é válido tanto para os ICEVs quanto para o BEVs. O consumo de combustível do ICEV calibrado para o ano de 2023, é assumido como 12,5 km/l, com base na tabela PBEV (INMETRO, 2024). Para representar o ganho de eficiência nos motores de combustão interna, assume-se um incremento anual de eficiência de 1,1% no período de 2023 a 2035, e de 0,56% entre 2035 e 2050, sendo esses valores baseados na tendência divulgada por (IEA, 2021). Adicionalmente, o coeficiente de incremento de custo do motor do ICEV (α_{2me}) é considerado como sendo de 0,6% ao ano.

Por outro lado, não são considerados ganhos de eficiência para os motores elétricos neste estudo. O consumo de eletricidade proveniente da rede elétrica (grid) dos BEVs é, por sua vez, calibrado como 0,17 kWh/km. Assim como descrito no capítulo 3.3.2, o consumo de energia do grid difere do consumo diretamente associado ao veículo, uma vez que dele são descontadas as perdas de eficiência no sistema de carregamento e no uso da bateria. Assim, neste estudo, a eficiência do sistema de carregamento (Ch_{eff}) é considerada como 85%, enquanto o fator *Battery Swing* (B_s) é assumido como 96%.

Com base nessas premissas, o consumo de energia do grid é calibrado para que o consumo efetivo do veículo corresponda aos valores equivalentes apresentados na tabela do PBEV (INMETRO, 2024). Quanto à autonomia desejada para o BEV, foi considerado 402 km.

A segunda etapa da modelagem consiste em definir o tipo de bateria do veículo elétrico a ser analisado. Para isso, existe uma ampla gama de combinações químicas disponíveis, cada uma apresentando um conjunto específico de vantagens e limitações

(JÚNIOR, 2024). Apesar da existência de baterias que não utilizam íons de lítio em sua composição, como as baterias de chumbo-ácido, amplamente conhecidas há décadas, e do potencial futuro das baterias de estado sólido, a disponibilidade tecnológica para uso em veículos comerciais é atualmente dominada pelas baterias que contêm íons de lítio. Em 2023, essas baterias foram consideradas como a única variante utilizada em veículos comerciais (IEA, 2024).

Ao explorar esse panorama, percebe-se que, no ano de 2023, as baterias de óxido de lítio-níquel-manganês-cobalto (NMC), óxido de alumínio-níquel-lítio-cobalto (NCA) e óxido de níquel-lítio-alumínio-manganês-cobalto (NMCA) corresponderam a 60% das vendas globais. As baterias de fosfato de ferro-lítio (LFP) representaram os 40% restantes, sendo esta última tecnologia considerada a de maior crescimento esperado nos próximos anos, devido à sua crescente adoção no mercado (IEA, 2024).

Dessa forma, com o objetivo de manter esse estudo de caso objetivo e conciso, optou-se por analisar o custo do conjunto de baterias de íon-lítio, sem distinção das variações químicas combinadas com íon-lítio. O valor médio do conjunto de bateria foi considerado de US\$128/kWh para o ano base de 2023 (BNEF, 2023) e US\$97/kWh em 2024 (BNEF, 2024b), referente à média de preço global conjunto de baterias de 45kWh de capacidade para veículos leves. Um fator de escala de redução do valor médio da bateria de acordo com seu tamanho foi assumido como 0,0227 (LUTSEY, NICHOLAS, 2019, SAFOUTIN, MCDONALD, *et al.*, 2018). A redução média anual do preço do conjunto da bateria foi ajustada para representar o decréscimo anual equivalente para se atingir o valor estimado de US\$80/kWh em 2030. Assim, o valor encontrado é uma redução anual de 3,1% que é aplicada entre os anos de 2023-2035. Entre 2036-2050 assume-se uma redução anual de 0,52%.

Para a terceira etapa da modelagem, tem-se como objetivo definir os coeficientes das equações de custo obtidas através de regressões lineares de estudos publicamente disponíveis e os custos diretos (Cd). Nesse caso, optou-se por usar os mesmos valores dos estudos (HAMZA, Karim, LABERTEAUX, *et al.*, 2019, LUTSEY, CUI, *et al.*, 2021, LUTSEY, NICHOLAS, 2019) trazidos ao valor presente do ano base de 2023, utilizando a inflação americana (U.S. BUREAU, 2024), para as variáveis apropriadas. Todos os valores estão explicitados na tabela do final do trabalho (Apêndice I).

A respeito dos custos indiretos (C_i), referentes às despesas de administração, amortização/depreciação e pesquisa e desenvolvimento assume-se o mesmo valor percentual de 10% do custo total de manufatura para ICEVs e BEVs. De forma a representar que os investimentos em novas tecnologias não serão compensados somente pelos BEVs, mas também pelos ICEVs, visto que esses ainda representam a maior parte das vendas das grandes montadoras.

Para a etapa seguinte, dedicada a encontrar o Custo de Aquisição (C_{aq}) descrito na sessão 3.4, estipula-se a margem de lucro da montadora (M_m), como sendo de 5% e a margem de lucro do revendedor (M_r) a 15% (HAMZA, Karim, LABERTEAUX, *et al.*, 2021b). Por fim, os custos tributários incidentes sobre a compra do veículo (I_{mp}) para o cenário de base são ajustados de acordo com a tabela 3:

Tabela 3: Valores dos tributos incidentes sobre o Custo de Aquisição (C_{aq})

Imposto	Valor
ICMS	12%
IPI	7%
COFINS	10%
PIS	2%

Fonte: (RECEITA FEDERAL, 2024b, a, SP, 2024)

Prosseguindo, para se determinar o Custo Operacional (C_{op}) descrito no capítulo 3.5 faz-se necessária a definição de parâmetros correspondentes. Sendo assim, assume-se que o proprietário do veículo percorra 10.500 km/ano ao longo do tempo de propriedade e que os custos de IPVA e seguro correspondem, respectivamente, a 3% e 5% do valor residual do veículo. Considera-se, também, que a depreciação anual segue curvas distintas para ICEV e BEV: para ICEV, presume-se uma depreciação que reduz o valor para 76% do preço de compra após cinco anos e para 62% após dez anos, com base em dados reais obtidos da tabela FIPE(FIPE, 2024). Já para os veículos BEV, adota-se uma curva de depreciação que apresenta um ponto percentual de redução anual inferior à do ICEV entre o segundo e o décimo ano, mantendo-se igual no primeiro ano e nos demais. Cabe ressaltar, que no ano de 2024 se observou uma depreciação mais acentuada dos BEV's no mercado brasileiro, porém a opção de manter uma depreciação ligeiramente inferior

tem o intuito de se conservar uma paridade de igualdade de depreciação e além disso, ser um cenário de referência para a análise de paridade de custos considerando a troca da bateria.

Quanto ao combustível líquido, o valor é assumido como o valor médio de revenda da gasolina tipo C em 2023 de R\$5,50 (ANP, 2024b) convertido para o dólar usando a conversão média do ano de 2023, correspondente a R\$4,99 para cada dólar americano (IBGE, 2024).

Já o valor da tarifa de energia elétrica final paga pelo consumidor pode variar conforme classe de consumo, região, distribuidora, bandeira tarifária, consumo médio, subsídios, e outras diferentes variáveis. Dessa forma, para modelar o cenário base desse estudo foi assumido o valor da tarifa de energia elétrica médio de 0,689 R\$/kWh referente a média nacional de consumidores residenciais do mercado cativo classe B1 em 2023 (ANEEL, 2024). Assim, para delimitar o valor final da tarifa considera-se a incidência dos tributos calculados a partir da média nacional de acordo com a tabela da ANEEL e explicitados na tabela 4 (ANEEL, 2024) utilizando a equação 12.

Tabela 4: Tributos incidentes sobre a tarifa de energia elétrica (%)

Imposto	Valor
PIS/PASEP	0,90
COFINS	4,16
ICMS	15,00

Fonte: (ANEEL, 2024).

$$Tarifa\ Final = \frac{Tarifa\ Base}{((1-ICMS)*(PIS\ PASEP+COFINS))} \quad \text{Equação 12}$$

Completando as variáveis, consideram-se, ainda no presente estudo de caso, os custos de manutenção seguem os mesmos padrões utilizados no estudo de (HAMZA, Karim, LABERTEAUX, *et al.*, 2021b), no qual o BEV possui um custo 23% menor que o ICEV.

Por fim, para se calcular o TCO do cenário base, é calculado o valor presente dos custos de operacionais utilizando-se a taxa de desconto equivalente ao custo de oportunidade do capital. Nesse estudo, assume-se a média anual da taxa Selic no período

de 2010 a 2023 como sendo a taxa de desconto, resultando em um valor médio de 9,5% ao ano (BACEN, 2024b).

4.2 Cenário alternativos – variáveis indiretas

Com o objetivo de modelar o TCO contemplando uma gama de diferentes variáveis indiretas, conforme a lógica apresentada no Capítulo 3.6, foram elaborados diferentes cenários, os quais se encontram descritos nesse subcapítulo.

Com o objetivo de emular cenários de incentivos fiscais para a aquisição de BEV, descritos no capítulo 3.6.1, este estudo se baseou nos possíveis desdobramentos do Programa Mover (MDIC, 2023c) e da (BRASIL, 2024b), que regulamentam a criação de incentivos tributários com base nas externalidades positivas e negativas associadas a cada modelo veicular. Assim, assume-se, para este cenário, uma redução na alíquota do IPI incidente sobre o valor de venda dos BEV, de 7% para 3,5%.

Além disso, baseado na medida adotada pelo estado de São Paulo visando incentivar a adoção de carros elétricos em 2021 (CANALENERGIA, 2021), o presente trabalho assume uma redução da alíquota de ICMS incidente sobre o valor de venda do BEV de 18% para 14,5%. Ainda se tratando de subsídios governamentais, mas dessa vez com o objetivo de emular cenários de incentivos tributários que incidem sobre o período de circulação do veículo e inspirado no desconto fornecido pelo estado do Rio de Janeiro (SEFAZRJ, 2024), assume-se uma redução do IPVA de 4% para 0,5% para BEV.

De forma a amplificar cenários alternativos nessa simulação e poder avaliar, também, o panorama onde o proprietário do veículo BEV tenha acesso a uma tarifa de energia reduzida em comparação ao mercado cativo, considera-se o uso de energia elétrica proveniente do mercado livre. Neste caso, considera-se um desconto de 30% na tarifa final de energia elétrica, incluindo os tributos (ABRACEEL, 2022).

Adaptado para construir um cenário alternativo de recompensação tributária devido à perda de arrecadação de tributos sobre combustíveis líquidos, conforme descrito no Capítulo 3.6.2, o presente modelo calcula, também, a perda percentual total dos tributos incidentes sobre o litro de gasolina tipo C. O valor resultante, descontado da arrecadação gerada pelos BEVs, é somado ao TCO final dos veículos elétricos.

Por fim, para emular o cenário de substituição da bateria, conforme descrito no Capítulo 3.6.4, foram analisados diversos estudos (De Gennaro et al., 2020b; Eddahech et al., 2015; Liu et al., 2020; Pistoia & Liaw, 2018; Redondo-Iglesias et al., 2018, 2020; Stroe et al., 2018; Yang et al., 2019b) que abordam o tempo médio de vida útil de baterias em BEVs. Neles, constatou-se que os resultados mudam significativamente em função de diversas variáveis e que, até o momento, não há estudos dedicados às condições de uso específicas do Brasil. Assim, neste estudo de caso, considera-se os resultados apresentados em (DE GENNARO, PAFFUMI, *et al.*, 2020b) para veículos que percorrem entre 500 e 1.000 km/mês, assumindo-se o fim da primeira vida útil da bateria aos 8 anos.

Adicionalmente, diversos estudos abordam a temática da aplicação do uso das baterias de veículos elétricos em outras aplicações no seu segundo ciclo de vida bem como o possível custo residual ao final da sua primeira vida útil (JÚNIOR, 2024). Embora exista a possibilidade de um valor residual associado à bateria, é importante considerar que uma nova bateria a ser instalada incluiria, além do custo de manufatura, as margens do fabricante e os impostos incidentes sobre a venda.

Para simplificar este estudo, assumiu-se que o valor residual seria compensado pelas margens e pelos impostos. Assim, considerou-se que o conjunto de bateria a ser substituído possui um custo equivalente apenas ao seu valor de manufatura no respectivo ano de troca.

5. Resultados

Este capítulo se dedica à exposição e análise dos resultados gerados pela execução do modelo desenvolvido e descrito na metodologia, aplicado ao estudo de caso apresentado. As informações coletadas e os dados processados ao longo da pesquisa são apresentados de forma sistemática, com o propósito de fornecer uma visão ampla e imparcial das conclusões obtidas. Assim, no primeiro subcapítulo 5.1 serão apresentados os resultados do cenário base e a seguir, no subcapítulo 5.2 serão apresentados os resultados de cenários alternativos de acordo com diferentes variáveis indiretas.

5.1 Cenário base

Com base nos dados de custo de referência e no declínio anual de custos inserido no modelo para as janelas de referência de 2024 a 2035 e 2036 a 2050, foi calculado o custo de conjuntos de baterias com capacidades entre 30 e 135 kWh. O resultado dessa análise é apresentado por completo no Apêndice I e ilustrado na figura a seguir para conjuntos de 60kwh.

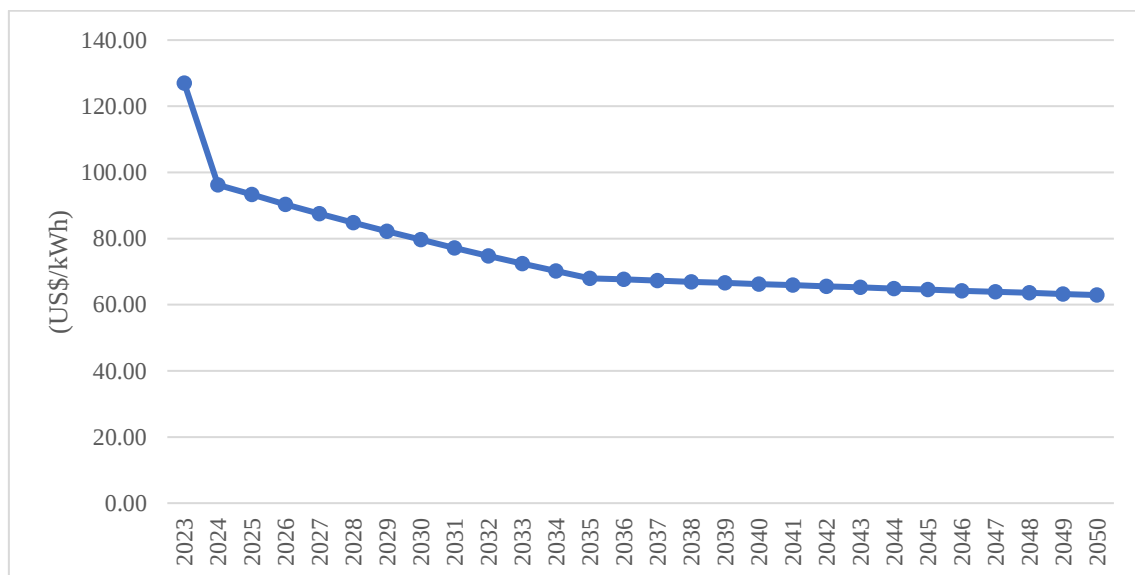


Figura 6: Curva de custo do conjunto de bateria de BEV de 60kWh de capacidade

Fonte: Elaboração própria.

Ao analisar os resultados do custo do conjunto de baterias de 60 kWh, apresentados na Figura 6, observa-se que, em 2023, o custo inicial é de US\$ 127/kWh, com uma redução de 46% até 2035, quando atinge o valor de US\$ 68/kWh. Após esse período, a redução no custo segue uma trajetória de menor inclinação, alcançando US\$ 63/kWh em 2050.

Os resultados obtidos demonstram um rápido declínio nos custos até 2035, seguido por uma estabilização dos preços de mercado, refletindo o equilíbrio entre oferta, demanda, custos de produção e os preços dos minerais necessários para a fabricação de baterias. Adicionalmente, é importante ressaltar que em 2023, a China possuía o menor custo global para conjuntos da bateria, equivalente a US\$71/kWh (BNEF, 2024a). De acordo com as projeções deste estudo, esse patamar de custo será alcançado no Brasil somente em 2034. Essa discrepância decorre de fatores específicos do mercado chinês, os quais não são observados em outras regiões do mundo, conforme indicado no *Global EV Outlook* (IEA, 2024).

Além disso, o rápido declínio de preços observado na literatura entre 2023 e 2024 é atribuído, principalmente, ao recente período de alta nos preços do carbonato de lítio observado em 2023, os quais retornaram aos níveis históricos em 2024. Esse movimento de declínio de preços foi intensificado, também, pela capacidade de produção ociosa na China e pelo volume de vendas de BEVs inferior às expectativas; fatores que, em conjunto, contribuíram para a acentuada redução de preços entre 2023 e 2024 (BNEF, 2024b).

Dando continuidade ao roteiro apresentado no capítulo 3.3.1 para a determinação do Custos do Conjunto Motriz e Transmissão (P) o resultado da modelagem para os anos de 2023 e 2050 é apresentado em conjunto com o Custo do Conjunto da Bateria (B) a seguir.

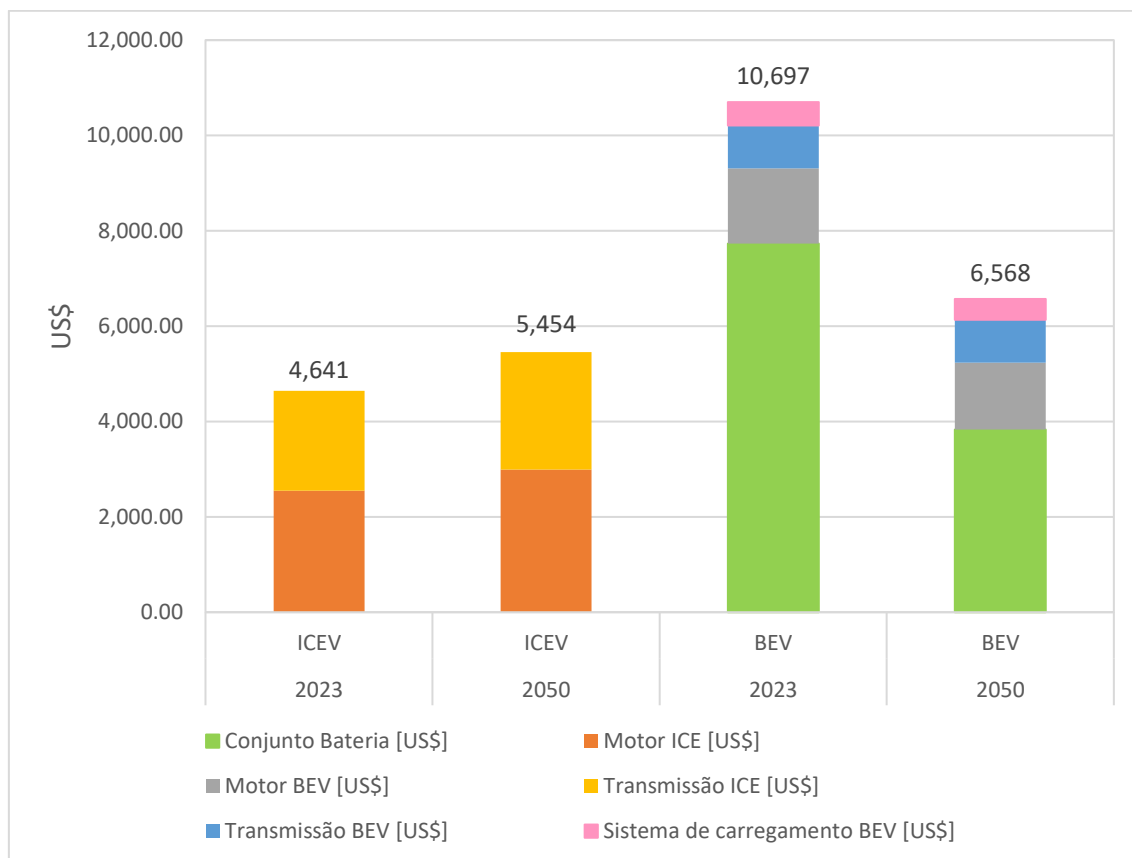


Figura 7: Custo do Conjunto Motriz e Transmissão e Custo da Bateria para ICEV e BEV em 2023 e 2050

Fonte: Elaboração própria.

Ao se analisar os resultados obtidos e expostos na figura 7, nota-se que de acordo com o modelo e metodologia utilizada, P do ICEV sofre um incremento de 18% entre o ano base 2023 e 2050. Esse incremento se deve à implementação de tecnologias para melhoria de eficiência energética e para a redução de emissões de gases poluentes. Tal incremento de custo é futuramente contrabalanceado no TCO devido ao menor consumo de combustível.

Por outro lado, a soma de P e B do veículo BEV sofre um declínio significativo de custo, estimado em 39%, devido principalmente à redução de 50% no B e, também, corroborado pela redução do custo de 10% no custo do motor elétrico. Ao realizar as análises, vale ressaltar que, nesse estudo de caso, o custo da transmissão do motor elétrico permanece constante ao longo dos anos.

Quanto à etapa seguinte, descrita no capítulo 3.4 e na qual o modelo calcula os impostos, as margens e o Custo Total de Aquisição (C_{aq}), o resultado da modelagem é apresentado a seguir. Na Figura 8, é exposto o exemplo de (C_{aq}) nos anos 2023 e 2050 e a seguir, na figura 9, é plotado a curva do (C_{aq}) ao longo de todo os anos analisados.

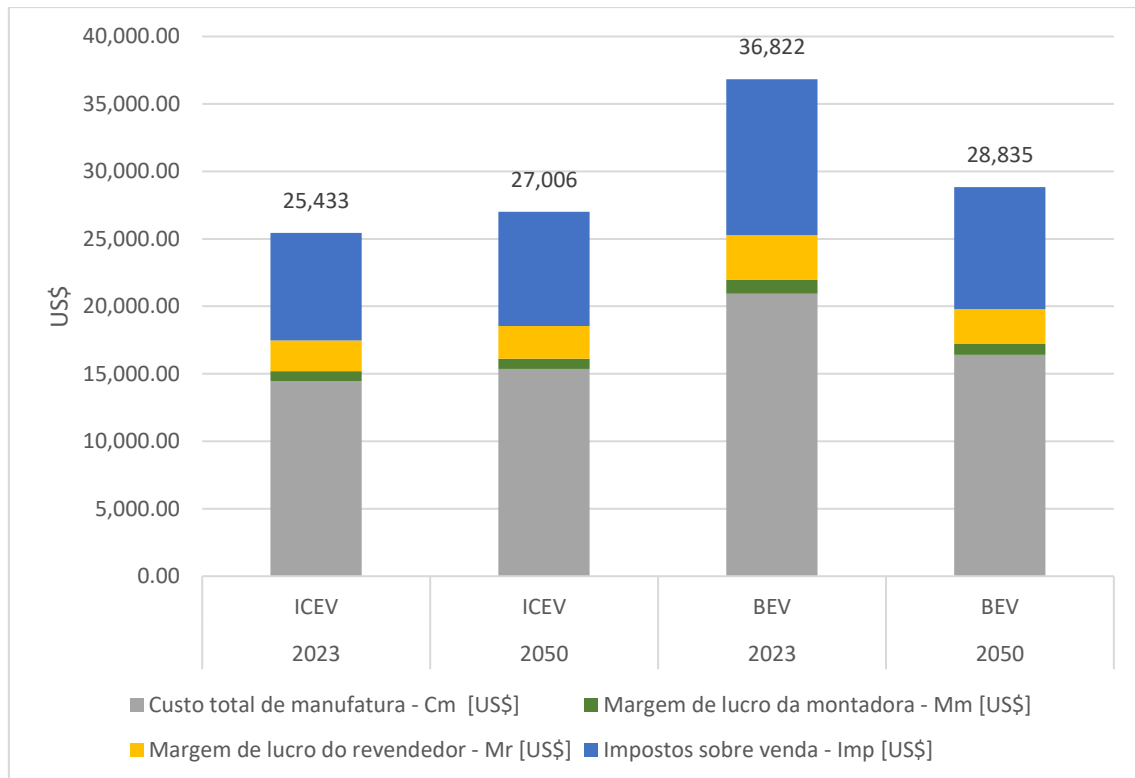


Figura 8: Custo de Aquisição (C_{aq}) e seu subgrupos de custos

Fonte: Elaboração própria

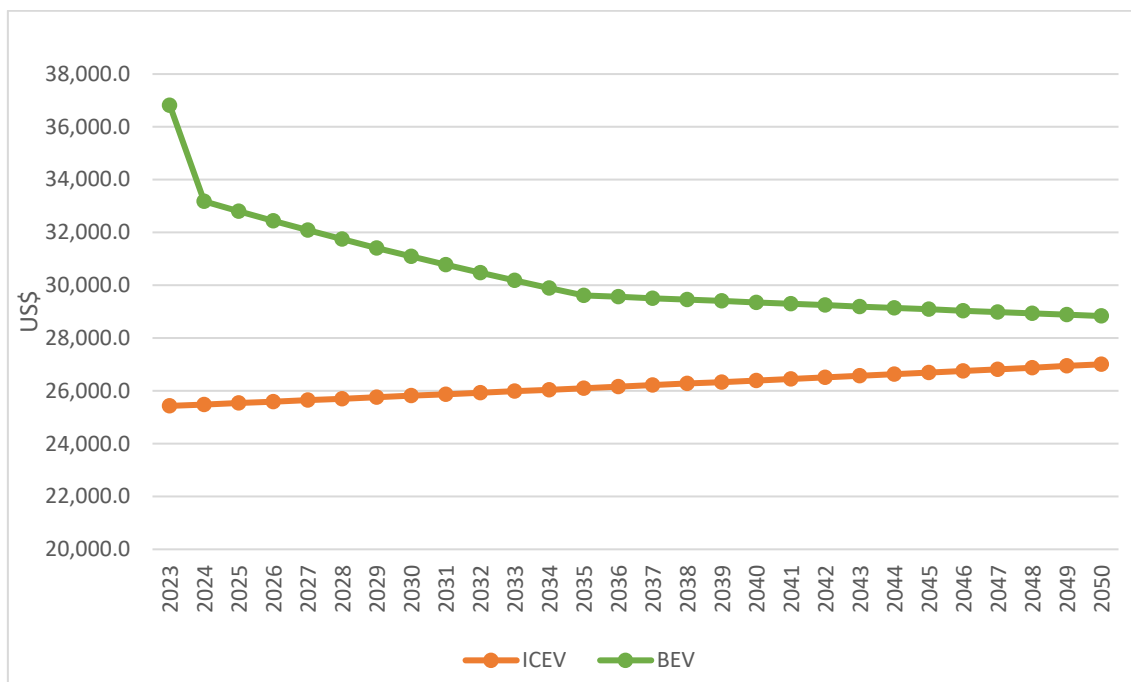


Figura 9: Custo de Aquisição (C_{aq}) dos ICEVs e BEVs entre 2023 e 2050

Fonte: Elaboração própria.

Ao examinar os resultados apresentados nas Figuras 8 e 9, observa-se que os ICEVs e os BEVs não alcançam a paridade no custo de aquisição (C_{aq}) dentro do período de análise considerado, mesmo com a significativa redução observada no preço das baterias. Esse resultado reforça a abordagem utilizada no estudo de caso, e demonstrada na figura 6, onde a diferenciação de custo entre ICEVs e BEVs reside no Custo do Conjunto Motriz e transmissão e Custo da Bateria.

Adicionalmente, destaca-se que, na elaboração do cenário base deste estudo de caso, os ICEVs e BEVs foram tratados de forma equivalente no que diz respeito à incidência das margens de lucro e dos impostos aplicáveis, garantindo condições homogêneas de análise entre as tecnologias avaliadas para a elaboração do cenário base. Após a aplicação dos tributos sobre a compra, conforme modelado e descrito no estudo de caso, o total de impostos incidentes sobre a venda do veículo (Imp) resulta em uma carga tributária de 45,6% sobre o custo final do veículo antes da tributação. Para explorar ainda mais essas condições, posteriormente, serão analisados, nesse mesmo estudo, cenários em que essas condições tributárias se diferenciam entre os veículos.

Na etapa seguinte, destinada ao cálculo do valor da revenda e destacada no capítulo 3.5, os resultados das equações para as variáveis escolhidas para a depreciação dos veículos ao longo do tempo indicam que o valor residual dos BEVs aos 5 anos de uso corresponde a 72% do valor inicial da compra, sendo esse 4% menor que os ICEVs. De forma correlata, o valor residual dos BEVs aos 10 anos corresponde a 56% do valor inicial e 6% menor que os ICEVs. Ainda assim, mesmo com a maior depreciação, observa-se na figura 10, abaixo, que o valor residual dos BEVs não se cruza com o do ICEVs, ou seja, o valor do BEV usado ainda se mantém acima do ICEV, quando comparados veículos do mesmo ano de fabricação.

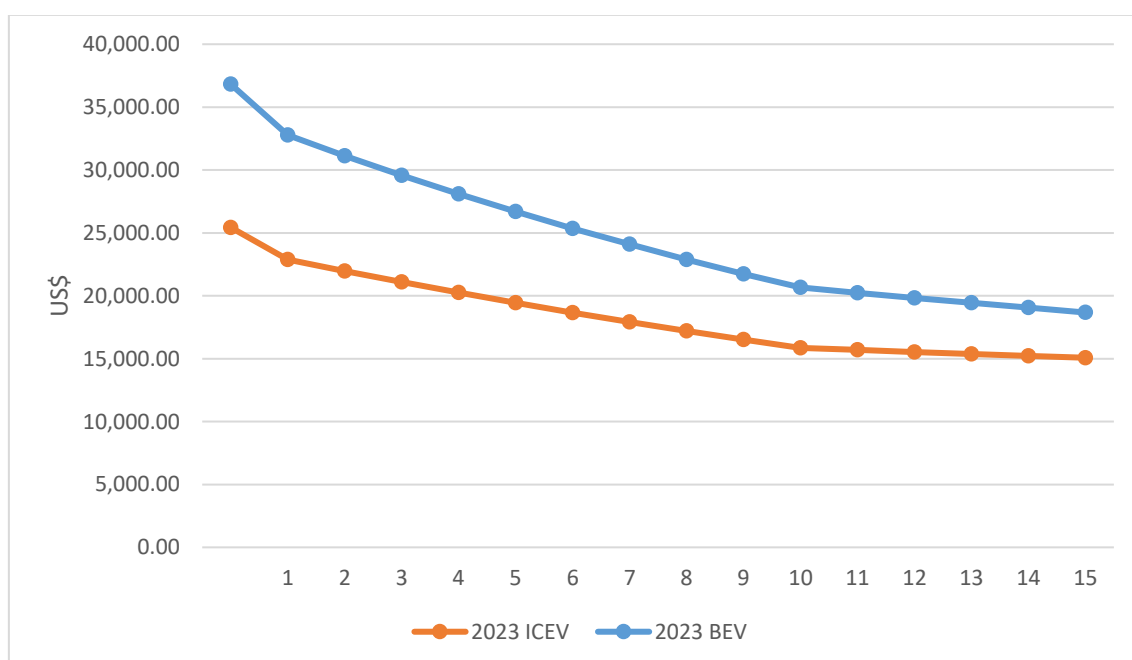


Figura 10: Curva de valor residual dos BEVs e ICEVs para 2023

Fonte: Elaboração própria.

É importante destacar que, nesse Cenário Base, não se é simulado o possível fim de vida da bateria e, tampouco, o possível fim de vida do próprio veículo, cujo valor residual seria correspondente ao seu valor de descarte – ou seja, considera-se que, nesse cenário, a bateria do BEV manteria sua vida útil durante todo os anos da análise. Além disso, considerou-se importante manter a calibragem do modelo dessa forma para que se

mantivesse uma base comparativa justa quando cenários de troca de bateria fossem analisados, tal qual explicitados posteriormente.

Dando continuidade à análise, a Figura 11 apresenta em detalhe o valor presente líquido encontrado para os Custos Operacionais (C_{op}) para cenários de 5, 10 e 15 anos para os anos 2023 e 2050.

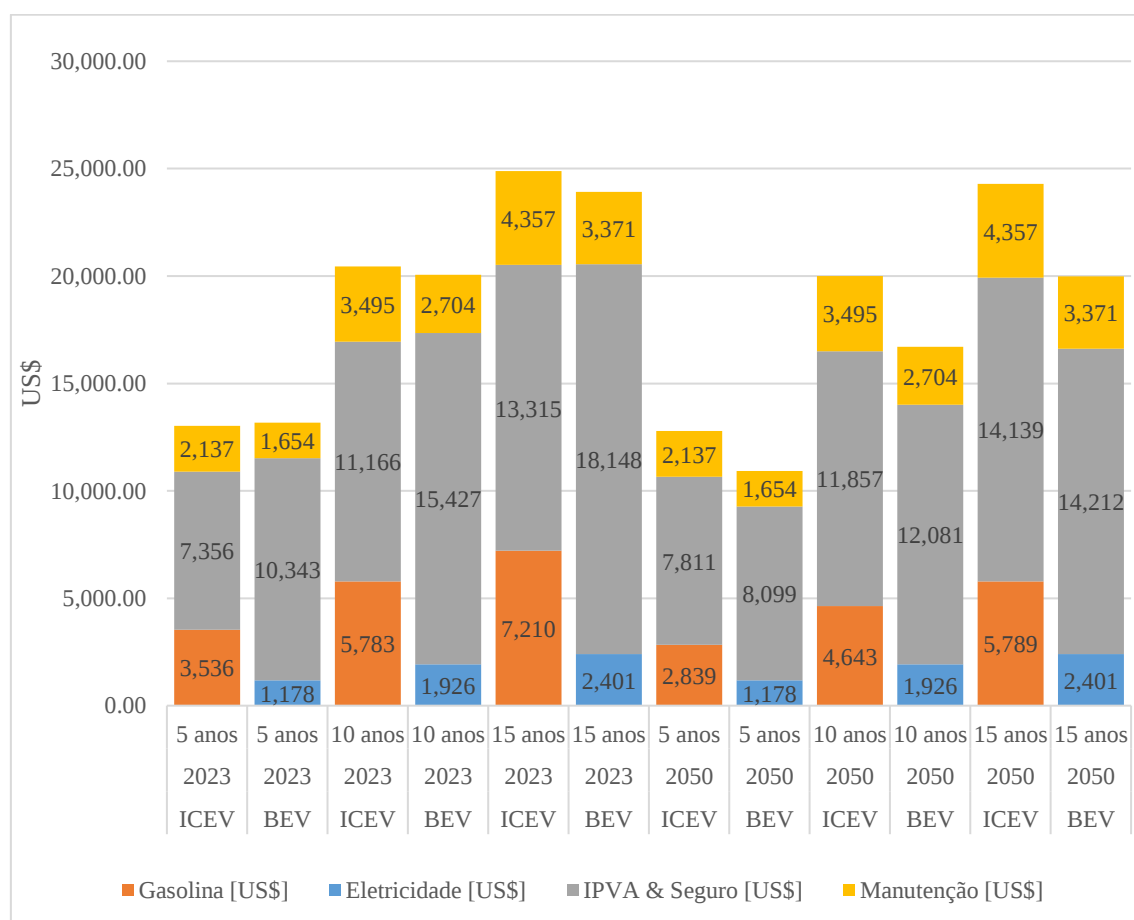


Figura 11: Custo Operacional de acordo com o tempo de propriedade em 2023 e 2050

Fonte: Elaboração própria.

Com base nessa análise, o primeiro resultado a ser destacado refere-se à significativa representatividade do grupo de custos associados ao IPVA e do seguro em relação ao C_{op} . Analisando o ano de 2023, esses custos corresponderam a 56% no caso dos ICEVs e 79% para os BEVs. Tal fato reforça a hipótese de que o TCO é sensível a incentivos tributários incidentes sobre tributos de circulação. Além disso, revela que as

despesas com IPVA e seguro funcionam como detratores do custo de rodagem dos BEV. Esse efeito pode ser explicado pelo fato de ambos os custos serem baseados nos Caq ou nos valores residuais de cada veículo. Conforme abordado anteriormente, a modelagem mostra, também, que o Caq dos BEVs permanece superiores aos dos ICEVs em todos os anos projetados no presente estudo de caso.

Apesar disso, constata-se que o C_{op} dos BEVs é inferior na maioria dos cenários expostos na figura 11, com exceção do período de 5 anos de propriedade em 2023. Essa vantagem pode ser atribuída ao menor custo associado ao consumo de eletricidade em comparação ao combustível fóssil. Observa-se que, em 2023, o custo relacionado à energia elétrica para carregamento dos BEVs é 67% inferior ao gasto com gasolina nos ICEVs, enquanto em 2050 essa diferença é de 58%. Adicionalmente, o montante financeiro despendido com gasolina diminui ao longo do tempo devido ao aumento da eficiência energética modelada para os ICEVs, enquanto o custo com eletricidade dos BEVs se mantém constante, os quais explicam, também, a menor vantagem observada nos resultados obtidos para 2050.

Assim, os resultados provêm uma redução progressiva no custo de rodagem dos BEVs ao longo dos anos, sendo este um fator relevante para a diminuição do TCO. Esse efeito é explicado não apenas pelo menor custo do energético, mas também pela redução gradual das despesas com IPVA e seguro, devido à maior desvalorização dos veículos BEVs ao longo dos anos.

Seguindo a metodologia proposta, a etapa seguinte contempla o cálculo do TCO para o Cenário Base, ou seja, no qual o C_{aq} , C_{op} e V_r são contabilizados para se chegar ao TCO total. Os valores foram plotados em curvas entre os anos 2023 e 2025, e o valor total do TCO estimado até 2050 pode ser observado na coluna vertical das figuras 12, 13 e 14 a seguir, representando aos valores para tempos de propriedade de 5, 10 e 15 anos, respectivamente.

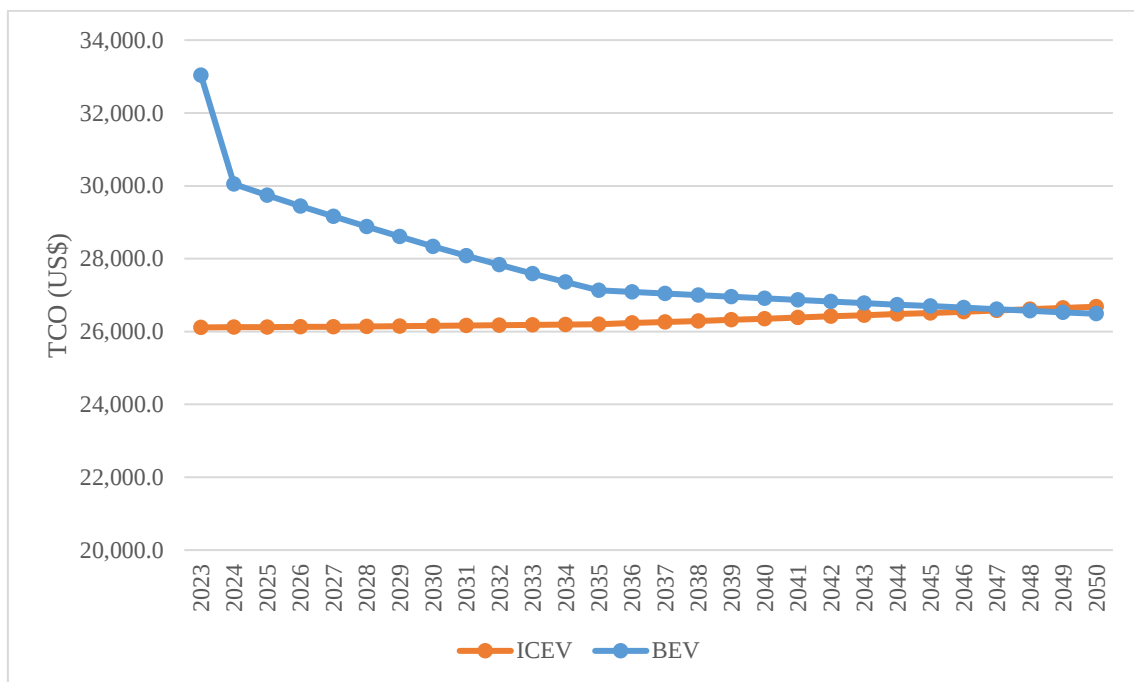


Figura 12: TCO para BEV e ICEV – Tempo de propriedade: 5 anos

Fonte: Elaboração própria.

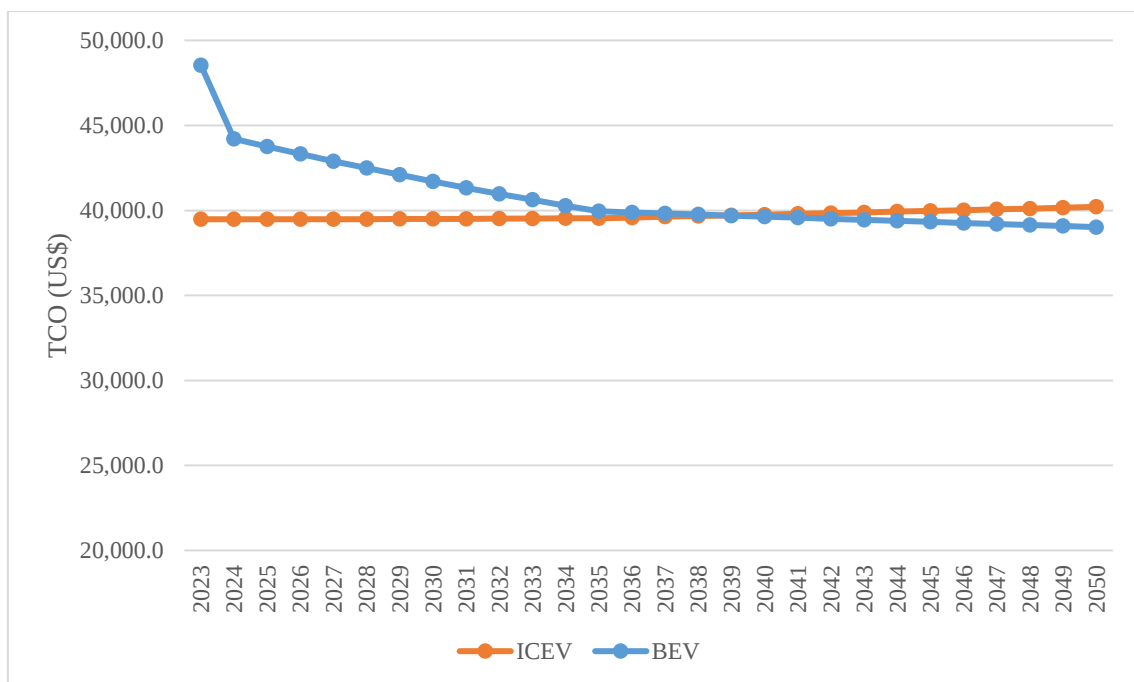


Figura 13: TCO para BEV e ICEV – Tempo de propriedade: 10 anos

Fonte: Elaboração própria,

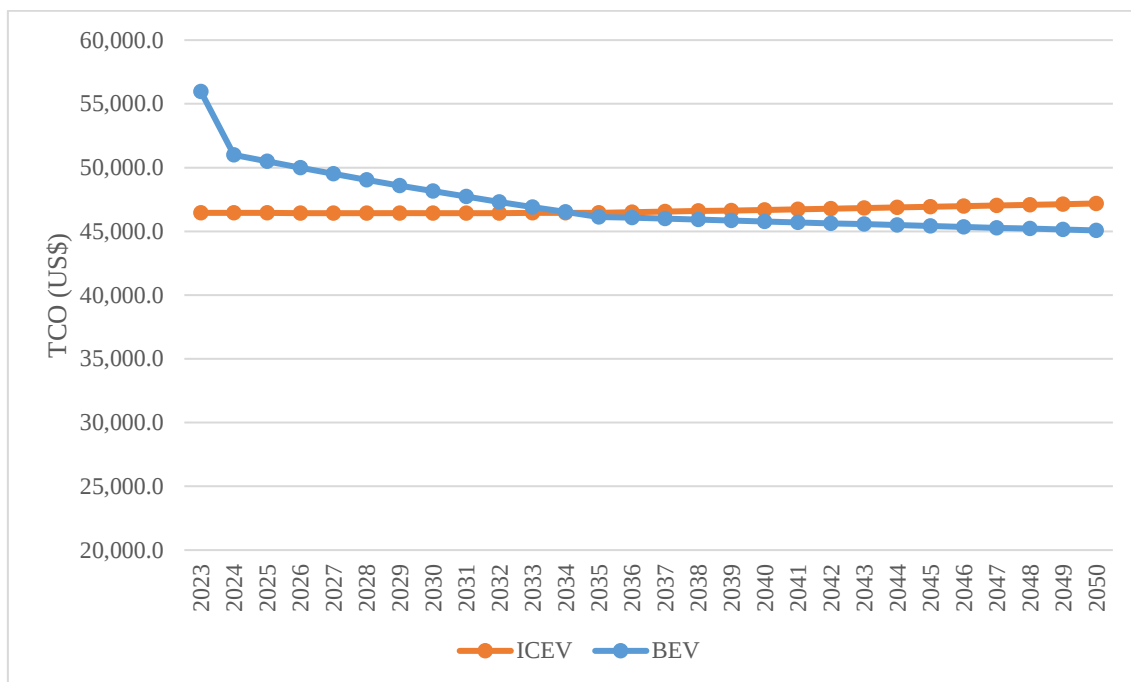


Figura 14: TCO para BEV e ICEV – Tempo de propriedade: 15 anos

Fonte: Elaboração própria.

Ao analisar os resultados e as figuras apresentadas, constata-se que a paridade do TCO entre BEVs e ICEVs para um período de 5 anos de propriedade é alcançada somente em 2048. Contudo, para períodos mais longos de propriedade, essa paridade ocorre em 2039 para 10 anos e em 2035 para 15 anos. Esses resultados indicam que somente nos anos de paridade mencionados, a compra de um veículo BEV se tornaria economicamente equivalente para o comprador que utiliza o veículo conforme os padrões de uso estipulados e, ainda assim, somente segundo à metodologia e às premissas adotadas no estudo de caso.

Como esperado, o fato de a vantagem econômica ocorrer anteriormente quando se modela tempos de propriedade de 10 e 15 anos se deve ao maior peso dos custos de rodagem no valor final do TCO. Estes, como já demonstrado nesse capítulo, apresentam uma queda ao longo do período de análise no caso dos BEVs. Enquanto, de forma contrária, o valor presente obtido com a revenda do veículo perde relevância

Com intuito de consolidar e facilitar a visualização, expõe-se o resultado do valor final de cada grupo de custos e sua contribuição para o valor final do TCO nas tabelas 5 e 6 a seguir.

Tabela 5: Valores finais de TCO para BEV e ICEV em 2023

	2023					
Tempo de propriedade:	5 anos		10 anos		15 anos	
	ICEV	BEV	ICEV	BEV	ICEV	BEV
Conjunto Bateria [US\$]	-	7.729	-	7.729	-	7.729
Motor ICE [US\$]	2.547	-	2.547	-	2.547	-
Motor BEV [US\$]	-	1.581	-	1.581	-	1.581
Transmissão ICE [US\$]	2.094	-	2.094	-	2.094	-
Transmissão BEV [US\$]	-	900	-	900	-	900
Sistema de carregamento BEV [US\$]	-	487	-	487	-	487
Custos diretos [US\$]	8.508	8.340	8.508	8.340	8.508	8.340
Custos indiretos [US\$]	1.315	1.904	1.315	1.904	1.315	1.904
Margem de lucro da montadora - Mm [US\$]	723	1.047	723	1.047	723	1.047
Margem de lucro do revendedor - Mr [US\$]	2.278	3.298	2.278	3.298	2.278	3.298
Impostos sobre venda - Imp [US\$]	7.968	11.536	7.968	11.536	7.968	11.536
Gasolina [US\$]	3.536	-	7.210	-	7.210	-
Eleticidade [US\$]	-	1.178	-	2.401	-	2.401
IPVA & Seguro [US\$]	7.356	10.343	13.315	18.148	13.315	18.148
Manutenção [US\$]	2.137	1.654	4.357	3.371	4.357	3.371
Revenda [US\$]	- 12.350	- 16.956	- 3.864	- 4.786	- 3.864	- 4.786
TCO [US\$]	26.113	33.040	46.451	55.957	46.451	55.957

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 6: Valores finais de TCO para BEV e ICEV em 2050

Tempo de propriedade:	2050					
	5 anos		10 anos		15 anos	
	ICEV	BEV	ICEV	BEV	ICEV	BEV
Conjunto Bateria [US\$]	-	3.829	-	3.829	-	3.829
Motor ICE [US\$]	2.993	-	2.993	-	2.993	-
Motor BEV [US\$]	-	1.408	-	1.408	-	1.408
Transmissão ICE [US\$]	2.461	-	2.461	-	2.461	-
Transmissão BEV [US\$]	-	900	-	900	-	900
Sistema de carregamento BEV [US\$]	-	432	-	432	-	432
Custos diretos [US\$]	8.508	8.340	8.508	8.340	8.508	8.340
Custos indiretos [US\$]	1.396	1.491	1.396	1.491	1.396	1.491
Margem de lucro da montadora - Mm [US\$]	768	820	768	820	768	820
Margem de lucro do revendedor - Mr [US\$]	2.419	2.583	2.419	2.583	2.419	2.583
Impostos sobre venda - Imp [US\$]	8.461	9.034	8.461	9.034	8.461	9.034
Gasolina [US\$]	2.839	-	5.789	-	5.789	-
Eletricidade [US\$]	-	1.178	-	2.401	-	2.401
IPVA & Seguro [US\$]	7.811	8.099	14.139	14.212	14.139	14.212
Manutenção [US\$]	2.137	1.654	4.357	3.371	4.357	3.371
Revenda [US\$]	- 13.114	- 13.278	- 4.103	- 3.748	- 4.103	- 3.748
TCO [US\$]	26.680	26.488	47.188	45.072	47.188	45.072

Fonte: Elaboração própria.

Ao examinar as tabelas 5 e 6, verifica-se que a paridade de TCO é atingida ao longo do período analisado devido a uma interação de fatores mencionados nessas tabelas, pois, ao estarem interrelacionados, convergiriam para o resultado observado. Entre os principais elementos, destaca-se a contínua redução nos custos das baterias, que influencia diretamente na diminuição progressiva nos custos de manufatura. Esse fenômeno acarreta de maneira direta, por sua vez, um menor preço de comercialização dos veículos elétricos e, com isso, uma redução no seu valor final, assim como os custos das margens comerciais e da carga tributária. Adicionalmente, a elevação gradativa nos custos de manufatura dos motores a combustão interna contribui significativamente para o aumento do C_{aq} desses veículos. Esse movimento amplifica a diferença econômica entre as duas tecnologias, favorecendo a convergência dos TCO's.

Além desses, outro resultado relevante do estudo de caso, que merece ser destacado e discutido, é a representatividade expressiva dos valores despendidos com impostos diretos ao longo do TCO. Considerando os valores despendidos com impostos sobre venda (I_{mp}), IPVA, eletricidade e gasolina, observa-se que, no cenário de 5 anos de tempo de propriedade, esses tributos podem compor até 48% do TCO, conforme ilustrado na tabela a seguir.

Tabela 7: Percentual de carga tributária incidente no TCO (%)

Tempo de propriedade	ICEV	BEV
5 anos	48	48
10 anos	36	34
15 anos	36	34

Fonte: Elaboração própria.

Contudo, é importante mencionar que o cenário base do TCO descrito nesse subcapítulo adota premissas específicas: entre elas, o tratamento tributário uniforme para veículos elétricos e a combustão, assim como a exclusão de fatores relacionados ao final de vida útil das baterias e aos custos de substituição. Tais escolhas metodológicas conferem ao cenário um caráter simplificado e idealizado, que não deve ser interpretado como o mais provável de ocorrer, mas sim como uma referência para análise comparativa.

Por fim, com o objetivo de ampliar a compreensão das dinâmicas envolvidas e explorar a capacidade do modelo desenvolvido e metodologia proposta, os capítulos subsequentes apresentam cenários alternativos que incorporam novas variáveis e permitem uma avaliação mais abrangente das possíveis trajetórias para a paridade de TCO entre as tecnologias analisadas.

5.2 Cenários alternativos – variáveis indiretas

Para analisar e ilustrar os impactos das diferentes variáveis indiretas no TCO dos BEV, os efeitos em custo resultantes de cada alteração descrita no capítulo 4.2 foram combinados em sete cenários distintos, conforme detalhado a seguir. Dado que essas variáveis indiretas podem ocorrer de forma simultânea, sua organização foi estruturada da seguinte maneira:

- Cenário Base + Incentivo IPI + ICMS
- Cenário Base + Incentivo IPI + ICMS + IPVA
- Cenário Base + Incentivo IPI + ICMS + IPVA + Energia do Mercado Livre
- Cenário Base + Incentivo IPI + ICMS + IPVA + Energia do Mercado Livre - Troca da Bateria
- Cenário Base - Troca da Bateria
- Cenário Base - Recompensação tributária
- Cenário Base - Troca da Bateria - Recompensação tributária

Essa combinação foi estruturada para representar diferentes cenários que consideram a atuação simultânea de variáveis capazes de impactar o TCO. A incidência de incentivos fiscais na compra (IPI e ICMS) em conjunto com estímulos tributários durante o período de propriedade do veículo, por exemplo, assim como a redução de IPVA. A tabela 8 a seguir resume as variáveis indiretas do cenário alternativo em comparação ao cenário base.

Tabela 8: Comparativo das variáveis do cenário alternativo e o cenário base

	Cenários	
	Base	Alternativo
IPI (aquisição)	7%	3,50%
ICMS (aquisição)	18%	14,50%
IPVA	4%	0,50%
Energia elétrica (US\$/kWh)	0,17	0,12
Vida útil da bateria (anos)	-	8
Recompensação de tributos	-	cálculo

Ressalta-se que os cenários de Incentivo fiscais e uso de energia do Mercado Livre de Energia são fatores que impulsionam a redução do TCO do BEV e estão representados com o sinal de soma (+) nos cenários combinados, enquanto a cenários de troca de bateria e recompensação tributária são detratores do valor final e são antecidos pelo sinal de subtração (-). Dessa forma, os resultados do modelo são expostos nas figuras 15, 16 e 17, para 5,10 e 15 anos de propriedade do veículo respectivamente.

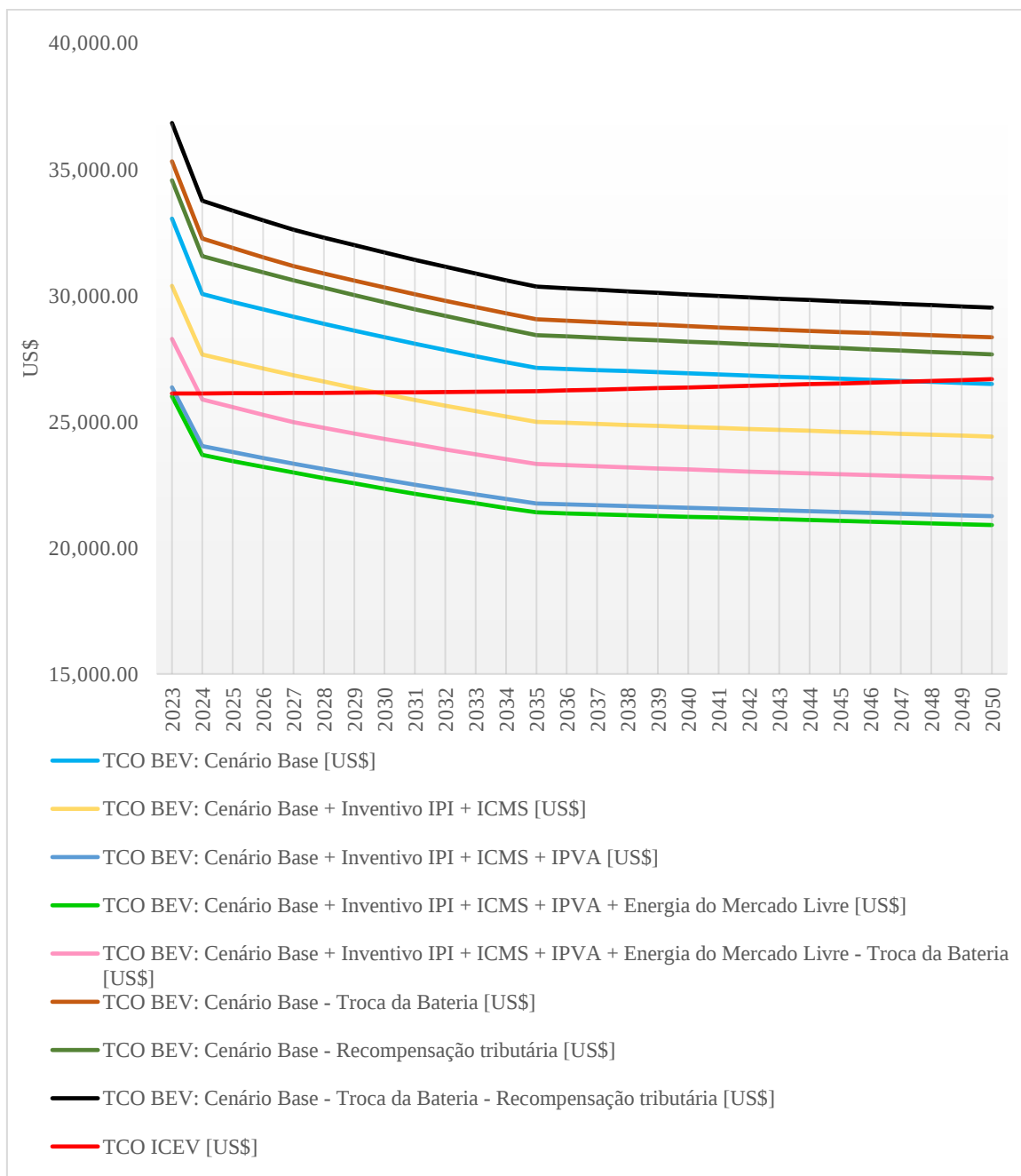


Figura 15: TCO BEV em cenários alternativos para 5 anos de propriedade do veículo

Fonte: Elaboração própria.

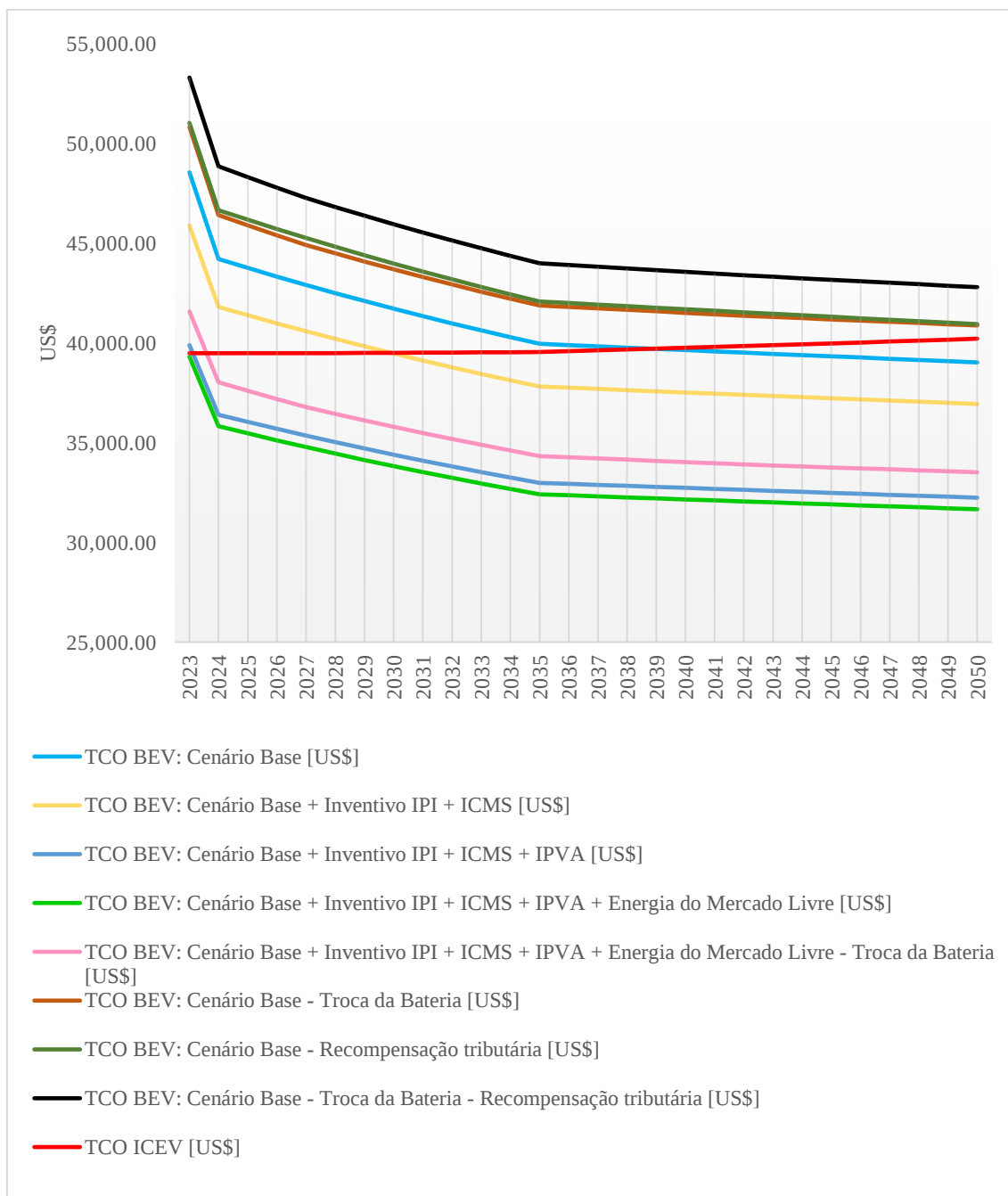


Figura 16: TCO BEV em cenários alternativos para 10 anos de propriedade do veículo
 Fonte: Elaboração própria.

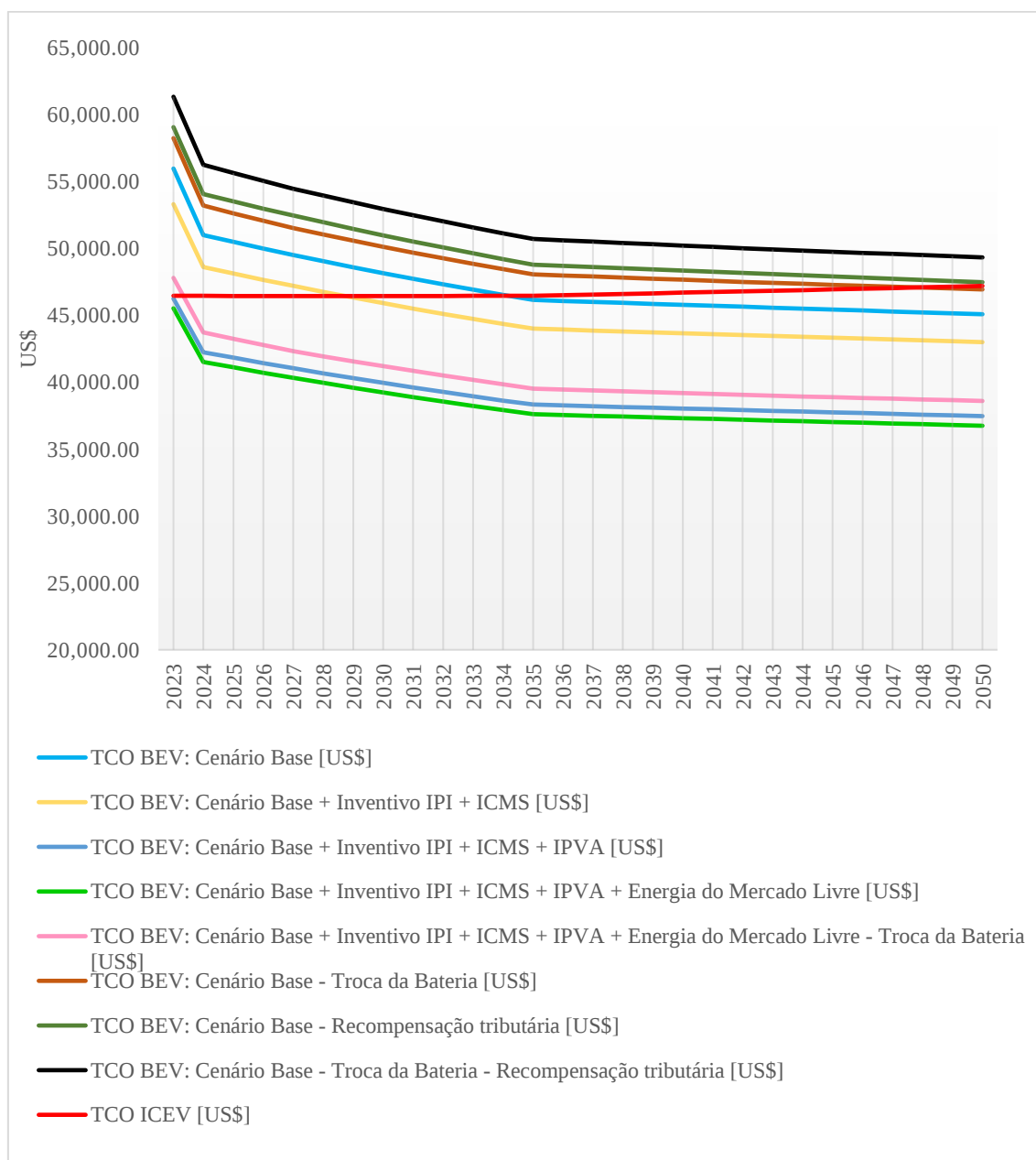


Figura 17: TCO BEV em cenários alternativos para 15 anos de propriedade do veículo

Fonte: Elaboração própria.

Ao analisar os resultados apresentados nas figuras 15,16 e 17 observa-se claramente a magnitude do impacto dos incentivos fiscais sobre o TCO de BEVs, bem como sua influência na antecipação da paridade de custo em comparação aos ICEVs. Nos cenários em que foram aplicados incentivos fiscais neste estudo de caso, seja para o ICMS incidente sobre o C_{aq} , seja para o IPI e IPVA, os resultados indicam que o TCO do BEV alcança a paridade de custo já em 2024 para todos os períodos de propriedade analisados.

Para explorar ainda mais tais cenários e facilitar sua comparação, organizou-se o impacto percentual de cada cenário com relação ao Cenário Base em formato de tabela. Assim, conforme tabela 8, a combinação dos três incentivos fiscais em conjunto contribui para redução de 17 a 20% em relação ao Cenário Base. Porém, se aplicado somente ao IPI e ICMS no momento da aquisição do veículo, o TCO final sofre uma redução de 7-10% e a paridade de custos entre BEV e ICEV ocorrem apenas a partir de 2030.

Tabela 9: TCO final dos veículos BEV em cenários combinados em comparação ao Cenário Base (%)

	Tempo de propriedade		
	5 anos	10 anos	15 anos
TCO BEV: Cenário Base	100	100	100
TCO BEV: Cenário Base + Incentivo IPI + ICMS	92	95	95
TCO BEV: Cenário Base + Incentivo IPI + ICMS + IPVA	80	83	83
TCO BEV: Cenário Base + Incentivo IPI + ICMS + IPVA + Energia do Mercado Livre	79	81	81
TCO BEV: Cenário Base + Incentivo IPI + ICMS + IPVA + Energia do Mercado Livre - Troca da Bateria	86	86	86
TCO BEV: Cenário Base - Troca da Bateria	107	105	104
TCO BEV: Cenário Base - Recompensação tributária	105	105	106
TCO BEV: Cenário Base - Troca da Bateria - Recompensação tributária	112	110	110

Fonte: Elaboração própria.

Os resultados encontrados nos cenários com subsídio citados acima estão alinhados a resultados encontrados na literatura para outras regiões. No *Global EV Outlook 2024* (IEA, 2024), foi indicado que a paridade de custo entre BEV com incentivos e ICEV deve ocorrer na maioria dos mercados globais até 2031, já sendo verificada na Alemanha, China e Noruega. Para o mercado estadunidense, diferentes estudos projetam paridade sem incentivo fiscal em momentos próximos, mas distintos: enquanto (LIU, Zhe, SONG, *et al.*, 2021b) indica a ocorrência de paridade a partir de 2027, para (LUTSEY, NICHOLAS, 2019) essa projeção se inicia ainda antes, em 2025. Por outro lado, em (HAMZA, Karim, LABERTEAUX, *et al.*, 2019) estima-se que a paridade não deve ocorrer sem incentivos fiscais nos Estados Unidos até 2030, último

ano de análise do estudo. Assim, é importante destacar que cada estudo possui suas próprias premissas, e que, ao se realizar um estudo de caso, não se deve assumir a velocidade de paridade de um país em outro, uma vez que a carga tributária (entre outros fatores) varia expressivamente entre países e estados; fator que torna as adaptações do modelo do presente estudo ainda mais inovadoras e relevantes para futuras discussões de cenários e projeções para o mercado brasileiro.

Nesse contexto, é importante destacar que, ao longo das pesquisas, foram encontradas diversas publicações que avaliam o TCO em âmbito global e em países específicos. Entretanto, verificou-se uma carência de artigos e estudos científicos que contemplassem o TCO no contexto brasileiro. Entre as publicações não científicas, identificou-se o estudo conduzido pela BCG em parceria com a ANFAVEA (ANFAVEA-BCG, 2021). Nele, foi projetada a paridade de custo entre BEVs e ICEVs a partir de 2030 para o segmento de veículos pequenos, e a partir de 2035 para veículos médios, considerando as condições fiscais de 2022 para o estado de São Paulo e os preços de mercado para substituição de baterias. Apesar de conter discussão de relevância no tema deste trabalho, as variáveis e a metodologia empregadas no estudo não foram explicitadas, o que inviabiliza uma comparação mais aprofundada dos resultados com os obtidos neste trabalho.

Ao explorar ainda mais os resultados encontrados no estudo de caso deste presente trabalho, exposto nas figuras 15, 16 e 17, constata-se que o uso de fontes de energia do mercado livre possui pequena relevância no TCO final. Nessa etapa, considerou-se uma redução de 30% com relação à tarifa padrão e, ainda assim, apresentou um impacto de redução do TCO dos BEV de apenas 1 a 2%. Apesar de parecer pequeno, é importante mencionar que esse estudo considera a quilometragem média de rodagem de veículos no Brasil de 10.500 km/ano. Logo, para padrões de rodagem de maior intensidade esse percentual tende a se tornar mais relevante.

Seguindo para a análise dos resultados para cenários onde se contabilizam fatores que aumentam o valor do TCO dos BEVs, constata-se que a substituição da bateria resulta em um aumento de 4% a 7% no TCO final, de acordo com o tempo de propriedade do veículo. Além disso, os resultados indicam que em cenários sem incentivos fiscais a paridade de custo entre BEVs e ICEVs não é alcançada até 2050 e apenas ocorre em 2048

para casos de 15 anos de propriedade. Apesar disso, em cenários que se contabilizam os incentivos fiscais e o uso de energia do mercado livre, a paridade ocorre já em 2024.

Outro cenário de relevância, contemplado nesse estudo e com resultados consolidados nas figuras 15 a 17, seria a contabilização do custo da troca da bateria combinada com uma recompensação tributária, no qual se projeta um aumento de 10-12% no valor final do TCO em relação ao cenário base e, como consequência disso, a paridade de custos não ocorre até 2050.

Os resultados mencionados indicam duas conclusões importantes a partir da metodologia adotada. A primeira é que ressalta novamente a relevância da combinação de incentivos fiscais além do uso de fontes de energia mais baratas na paridade dos custos entre BEVs e ICEVs. A segunda é o significativo impacto da troca de bateria nessa paridade de custos, uma vez que os resultados do presente estudo indicariam que não haveria paridade de custo até 2048 quando se contabiliza a troca da bateria, tampouco se realizada compensação tributária.

Para o caso das baterias, é importante ressaltar que, de acordo com a literatura revisada no Capítulo 4.2, com as tecnologias atualmente disponíveis é improvável que as baterias tenham uma capacidade de primeira vida maior que os 8 anos, ou ainda dos 15 anos modelados no estudo de caso. Nesse sentido, a troca da bateria se tornaria necessária para que a continuidade de utilização do veículo, caso contrário seu valor residual tenderia para um valor de descarte, menor que o valor de revenda modelado nesse estudo. Esse resultado se mostra ainda mais relevante para análise e discussão do mercado brasileiro, que possui uma frota mais antiga quando comparada a mercados desenvolvidos e uma política de redução de tributos para veículos antigos – onde, em 2022, cerca de 25% da frota brasileira possuía mais de 15 anos de vida (ANFAVEA, 2023a).

Além disso, é importante ressaltar que incentivos fiscais, geralmente, têm como objetivo inicial viabilizar a introdução de novas tecnologias no mercado. Após sua consolidação, espera-se que esses benefícios sejam gradualmente reduzidos. Ao considerar-se os resultados e metodologia utilizados nesse estudo, a viabilidade econômica ocorreria, porém, apenas após 2048 em alguns cenários. Essa projeção abre discussão para modelagem de outros fatores não cobertos nesse estudo e que poderiam amplificar os cenários de análise e viabilidade dos BEVs a longo prazo. Dentre eles pode-

se destacar: baterias de maior longevidade, menores custos de fabricação, implementação de limites de emissão para ICEVs, sobretaxa aos ICEVs, desenvolvimento de um mercado de carbono, ou algo mecanismo que contabilize as externalidades positivas dos BEVs. Assim, as adaptações ao mercado brasileiro realizadas ao modelo utilizado no presente estudo, são o primeiro passo para futuras e mais abrangentes discussões, e podem ser utilizadas para discussão de políticas fiscais, assim como para testar o impacto de variáveis de maneira simples e intuitiva.

6. Conclusão

Em um período marcado pela crescente urgência de mitigação do aquecimento global devido às mudanças climáticas e pelo fortalecimento da temática da transição energética, o setor de transportes ganha destaque por ser um dos maiores responsáveis pelas emissões de GEE. Nesse contexto, a eletrificação dos transportes tem sido considerada uma das principais soluções para a redução dessas emissões, tal como discutido ao longo da contextualização desse problema de trabalho por (CALVIN, DASGUPTA, *et al.*, 2022) e (IEA, 2020). Nessa pauta, assim como discutido por (ITF, 2018), diversas nações têm implementado políticas públicas de incentivo e estabelecido metas para a adoção de veículos elétricos (EVs), além de empresas e países enxergarem essa tendência como oportunidade para realinhar suas estratégias internas (CONSONI, *et al.*, 2018).

Assim como abordado na contextualização, o resultado desse momento tem sido um aumento expressivo nas vendas globais de EVs, com intensidade variável dependendo dos incentivos e das especificidades de cada local: países desenvolvidos apresentam maior avanço na adoção de EVs, devido à existência de políticas locais robustas e à maior capacidade da população de arcar com os custos dessa nova tecnologia. Entretanto, a adoção de EVs em países emergentes, como o Brasil, enfrenta desafios significativos devido ao limitado poder de compra da população. Além disso, o Brasil apresenta particularidades que impactam essa adoção, como os padrões de uso, a vasta extensão territorial, o clima, a disponibilidade do etanol como alternativa sustentável e a importância dos setores automotivo e petrolífero, que desempenham papel crucial na arrecadação tributária estadual e federal.

Para aprofundar a análise sobre o tema, foi explanado no capítulo de metodologia os passos tomados para o desenvolvimento de um modelo linear que permitisse o cálculo do TCO de BEVs e ICEVs no cenário brasileiro, avaliando a possível paridade de custos no horizonte de 2023 a 2050 para diferentes períodos de propriedade. Dentre os diferenciais deste modelo, destacam-se suas adaptações para representar a realidade brasileira. Assim, com objetivo de facilitar a análise, projeções e até mesmo discussão de políticas públicas, o modelo desenvolvido engloba tributos locais, características dos

veículos e o padrão de uso para a realidade local. Além disso, não só considera os custos diretos, como os de aquisição e operação dos veículos, mas o modelo também permite a criação de diferentes cenários e a realização de testes de sensibilidade, considerando variáveis indiretas, tais como: subsídios à aquisição de veículos, incentivos fiscais estaduais e federais, uso de energia elétrica proveniente do mercado livre, custos de substituição de baterias e cenários de recompensação tributária decorrentes da redução na arrecadação de combustíveis fósseis.

Além do ineditismo nas adaptações do modelo, o presente trabalho apresentou, também, um estudo de caso para veículos compactos no Brasil, de forma a testar e explorar as hipóteses metodológicas. Como coberto no estudo de caso e resultados, o modelo se mostrou eficiente para calcular como estas variáveis, diretas e indiretas, influenciam o TCO no mercado brasileiro, assim como o impacto que políticas públicas (de incentivo ou recompensação) poderiam ter a longo prazo. Assim como explorado no capítulo 5, os resultados indicaram que, com a aplicação simultânea de subsídios ao IPVA, ICMS e IPI, a paridade de custos ocorre já em 2024 para todos os períodos de propriedade analisados, sendo ampliada a vantagem dos BEVs quando utilizada energia elétrica do mercado livre. Em cenários sem subsídios, a paridade seria atingida apenas a partir de 2034. Adicionalmente, verificou-se que, no horizonte de 2050, a paridade de custos não é alcançada nos casos em que é necessária a substituição da bateria para períodos de propriedade de 5 e 10 anos. Além disso, o TCO dos BEVs aumenta significativamente quando se considera a recompensação tributária.

Com base nesses resultados, o presente estudo sugere conclusões importantes sobre o TCO de veículos elétricos no Brasil, as quais podem ser exploradas em futuros estudos. Dentre elas, indica que o sobrecusto decorrente da substituição de baterias inviabilizaria a aquisição de BEVs no país no horizonte de 2048 em cenários de isonomia fiscal, utilizando as premissas aplicadas. Além disso, reforçam a necessidade de desenvolvimento de baterias com maior durabilidade, ou da criação de um mercado secundário para sua reutilização em segunda vida. Adicionalmente, os resultados também questionam políticas públicas de incentivo a venda de BEVs, uma vez que a perda de arrecadação poderia ser significativa e, por isso, deve ser considerado, também, o cenário de recompensação tributária e seu impacto no TCO dos BEVs. Fatos, estes, que sugerem

que é necessário o surgimento de um novo sistema tecno-econômico viável para que BEVs se estabeleçam definitivamente.

Dessa forma, pode-se concluir que o objetivo principal deste trabalho foi alcançado, demonstrando-se a capacidade do modelo desenvolvido em gerar resultados coerentes e contribuindo para o avanço da pesquisa sobre paridade de custos entre BEVs e ICEVs no Brasil. Apresentando, assim, uma oportunidade para estudos futuros, que poderão aprimorá-lo ou aplicá-lo em cenários diferentes do estudo de caso aqui apresentado.

Por fim, reconhece-se que simplificações foram adotadas para a obtenção dos resultados apresentados, os quais demonstraram alta sensibilidade em relação às variáveis de entrada. Dessa forma, recomenda-se que estudos futuros incluam análises de sensibilidade mais detalhadas para as variáveis consideradas, como, por exemplo, a utilização de diferentes taxas de desconto, além da criação de cenários específicos. Um exemplo relevante seria a análise de categorias específicas de proprietários, como aqueles que utilizam veículos para transporte de passageiros por aplicativos, uma vez que tendem a percorrer distâncias médias superiores à média brasileira adotada neste estudo. Além disso, outra possibilidade seria a integrar o modelo a outros que analisem os impactos da taxação de emissões de GEE ou as externalidades positivas associadas aos BEVs.

Adicionalmente, sugere-se estudos mais profundos sobre as baterias disponíveis hoje no mercado e as tecnologias que estão emergindo como propostas à problemática do custo e da vida útil. Assim como a possível integração do modelo considerando ciclos de carregamento e condução do veículo, que segundo a literatura são variáveis representativas na degradação da bateria.

Referências bibliográficas

94TH CONGRESS (1975-1976). **S.1632 - A bill to authorize in the Energy Research and Development Administration a Federal program of research, development, and demonstration designed to promote electric vehicle technologies and to demonstrate the commercial feasibility of electric vehicles.** 1976. Disponível em: <https://www.congress.gov/bill/94th-congress/senate-bill/1632>. Acesso em: 14 nov. 2024.

ABRACEEL. **Análise: Abertura do Grupo A é alternativa para reduzir custo para o consumidor cativo.** [S.l: s.n.], 2022. Disponível em: <https://abraceel.com.br/blog/2022/09/analise-abertura-do-grupo-a-e-alternativa-para-reduzir-custo-para-o-consumidor-cativo/>. Acesso em: 4 jan. 2025.

ACEA. **Average age of the EU vehicle fleet, by country.** 2023. Disponível em: <https://www.acea.auto/figure/average-age-of-eu-vehicle-fleet-by-country/>. Acesso em: 12 out. 2024.

AL-KHALILI, J. "The birth of the electric machines: a commentary on Faraday (1832) 'Experimental researches in electricity'", Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, v. 373, n. 2039, p. 20140208, 2015.

ANDERSON, C. D., ANDERSON, J. **Electric and hybrid cars: A history.** [S.l.], McFarland, 2010.

ANEEL. **Tarifas e Informações Econômico-Financeiras.** 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/relatorios-e-indicadores/tarifas-e-informacoes-economico-financeiras>. Acesso em: 29 dez. 2024.

ANFAVEA. **Anuário da Indústria Automobilística brasileira.** [S.l: s.n.], 2022.

ANFAVEA. **Anuário da Indústria Automobilística brasileira.** [S.l: s.n.], 2023a.

ANFAVEA. **"Carta da ANFAVEA com Dados do Setor"**, 2023b. Disponível em: <https://anfavea.com.br/site/>. Acesso em: 15 nov. 2024.

ANFAVEA. **Linha do tempo. História da Indústria Automotiva brasileira**. 2023c. Disponível em: <https://anfavea.com.br/site/historia-da-industria-automotiva/>. Acesso em: 1 abr. 2023.

ANFAVEA. **Séries mensais, a partir de janeiro/1957, de autoveículos por segmento (automóveis, comerciais leves, caminhões, ônibus, total) de produção; licenciamento de nacionais, importados e total; exportações em unidades**. 2024. Disponível em: <https://anfavea.com.br/site/edicoes-em-excel/>. Acesso em: 15 nov. 2024.

ANFAVEA-BCG. **O caminho da descarbonização do setor automotivo no Brasil** . . [S.l: s.n.], 2021. Disponível em: www.anfavea.com.br. Acesso em: 24 jan. 2025.

ANP. **Painel Dinâmico de Preços de Combustíveis e Derivados do Petróleo**. 2024a. <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/paineis-dinamicos-da-anp/painel-dinamico-de-precos-de-combustiveis-e-derivados-do-petroleo>.

ANP. **Série histórica do levantamento de preços**. 2024b. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrencia/precos/precos-revenda-e-de-distribuicao-combustiveis/serie-historica-do-levantamento-de-precos>. Acesso em: 29 dez. 2024.

ARTHUR, W. B. **"Competing technologies, increasing returns, and lock-in by historical events"**, The economic journal, v. 99, n. 394, p. 116–131, 1989. .

BACEN. **"Dados históricos"**, 2024a. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/estatisticas/dadoshistoricos>. Acesso em: 13 nov. 2024.

BACEN. **Taxas de juros básicas – Histórico.** 2024b. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/historicotaxasjuros>. Acesso em: 29 dez. 2024.

BARAN, R. **A introdução de veículos elétricos no Brasil: avaliação do impacto no consumo de gasolina e eletricidade.** 2012. UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2012.

BBC. **The country built on trade barriers.** 2018. <https://www.bbc.com/news/business-44902104>.

BNDES. **"O novo ciclo de investimento no setor automotivo brasileiro."**, Informe setorial – área industrial, 2008.

BNEF. **Electric Vehicle Outlook 2023.** [S.l: s.n.], 2023. Disponível em: <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook>. Acesso em: 4 out. 2024.

BNEF. **Electric Vehicle Outlook 2024,** 2024a. Disponível em: <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/>. Acesso em: 15 nov. 2024.

BNEF. **Lithium-Ion Battery Pack Prices See Largest Drop Since 2017, Falling to \$115 per Kilowatt-Hour: BloombergNEF.** 10 dez. 2024b. Disponível em: [https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-see-largest-drop-since-2017-falling-to-115-per-kilowatt-hour-bloombergnef/#:~:text=New%20York%2C%20December%2010%2C%202024,research%20provider%20BloombergNEF%20\(BNEF\)](https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-see-largest-drop-since-2017-falling-to-115-per-kilowatt-hour-bloombergnef/#:~:text=New%20York%2C%20December%2010%2C%202024,research%20provider%20BloombergNEF%20(BNEF)). Acesso em: 25 dez. 2024.

BORBA, B. S. M. C. **Modelagem Integrada da Introdução de Veículos Leves Conectáveis à Rede Elétrica no Sistema Energético Brasileiro.** 2012. Tese de D.Sc – UFRJ/COPPE, 2012.

BRASIL. **Boletim de Arrecadação dos Tributos Estaduais.** 2024a. <https://dados.gov.br/dados/conjuntos-dados/boletim-de-arrecadacao-dos-tributos-estaduais>.

BRASIL. **Lei Complementar nº1192, 2022.** Disponível em: <https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=LCP&numero=192&ano=2022&ato=280kXQU1kMZpWT645#:~:text=Define%20os%20combust%C3%ADveis%20sobre%20os,exterior%3B%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid%C3%A2ncias>. Acesso em: 23 nov. 2024.

BRASIL. **"Lei Nº 6.466, de 27 de Dezembro de 2019."**, 2019.

BRASIL. **"Lei Ordinária 14902/2024"**, 2024 b.

BROECKER, W. S. **Climatic change: are we on the brink of a pronounced global warming?**, Science, v. 189, n. 4201, p. 460–463, 1975. .

BTS. **Hybrid-Electric, Plug-in Hybrid-Electric and Electric Vehicle Sales**", U.S. Department of Energy, Energy Vehicle Technologies Office, Oak Ridge National Laboratory, Transportation Energy Data Book, Edition 40, table 6.2, 21 jun. 2022. .

BURKE, M., DAVIS, W. M., DIFFENBAUGH, N. S. **"Large potential reduction in economic damages under UN mitigation targets"**, Nature, v. 557, n. 7706, p. 549–553, 23 maio 2018. DOI: 10.1038/s41586-018-0071-9.

CALEF, D., GOBLE, R. **"The allure of technology: How France and California promoted electric and hybrid vehicles to reduce urban air pollution"**, Policy sciences, v. 40, p. 1–34, 2007. .

CALVIN, K., DASGUPTA, D., KRINNER, G., *et al.* **IPCC, 2022: Climate Change 2022: Synthesis Report, Summary for Policymakers. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)].** IPCC, Geneva, Switzerland. . [S.l: s.n.], 25 jul. 2022.

CANADA. **Canada's 2030 Emissions Reduction Plan**. 2023. Disponível em: <https://www.canada.ca/en/services/environment/weather/climatechange/climate-plan/climate-plan-overview/emissions-reduction-2030/2023-progress-report.html>. Acesso em: 24 jan. 2024.

CANADA. **Government of Canada – Zero Emission Vehicles**. 2024.

CANALENERGIA. "**Governo de SP reduz ICMS de veículos elétricos para 13,5%**", <https://www.canalenergia.com.br/noticias/53188742/governo-de-sp-reduz-icms-de-veiculos-eletricos-para-135>, 2021. .

CAVINATO, J. L. "**A total cost/value model for supply chain competitiveness**", *Journal of business logistics*, v. 13, n. 2, p. 285, 1992. .

CHEN, D., ROJAS, M., SAMSET, B. H., *et al.* "**SPM 147 1 Framing, Context, and Methods Coordinating Lead Authors: Lead Authors: Contributing Authors**", 2021. DOI: 10.1017/9781009157896.003. .

CHING, H. Y. **Gestão de estoques na cadeia de logística integrada-supply chain** . [S.l.], Editora Atlas SA, 2000.

CONSONI, F. L., ET AL. **Estudo de Governança e Políticas Públicas para Veículos Elétricos. Projeto Sistemas de Propulsão Eficiente – PROMOB-e** (Projeto de Cooperação Técnica bilateral entre a Secretaria de Desenvolvimento e Competitividade Industrial – SDCI/MDIC e a Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável (GIZ)). . [S.l: s.n.], 2018.

COWAN, R., HULTÉN, S. **Escaping Lock-In: The Case of the Electric Vehicle. Technological Forecasting and Social Change**. [S.l: s.n.], 1996.

DARGAY, J., GATELY, D., SOMMER, M. "**Vehicle ownership and income growth, worldwide: 1960-2030**", *The energy journal*, v. 28, n. 4, p. 143–170, 2007. .

DAUDT, G. M., WILLCOX, L. D. **"Indústria automotiva"**, 2018. .

DAUDT, G., WILLCOX, L. D. **Indústria Automotiva. Visão 2035. Brasil, país desenvolvido. Agendas setoriais para o desenvolvimento.** [S.l: s.n.], 2018.

DE GENNARO, M., PAFFUMI, E., MARTINI, G., *et al.* **"A case study to predict the capacity fade of the battery of electrified vehicles in real-world use conditions"**, Case Studies on Transport Policy, v. 8, n. 2, p. 517–534, 1 jun. 2020a. DOI: 10.1016/j.cstp.2019.11.005.

DE GENNARO, M., PAFFUMI, E., MARTINI, G., *et al.* **"A case study to predict the capacity fade of the battery of electrified vehicles in real-world use conditions"**, Case Studies on Transport Policy, v. 8, n. 2, p. 517–534, 1 jun. 2020b. DOI: 10.1016/j.cstp.2019.11.005.

DEUTEN, S., GÓMEZ VILCHEZ, J. J., THIEL, C. **"Analysis and testing of electric car incentive scenarios in the Netherlands and Norway"**, Technological Forecasting and Social Change, v. 151, 1 fev. 2020. DOI: 10.1016/j.techfore.2019.119847. .

DEUTSCHLAND BUNDESREGIERUNG. **"Koalitionsvertrag 2021–2025"**, 2021. Disponível em: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/service/gesetzesvorhaben/koalitionsvertrag-2021-1990800>. Acesso em: 24 jan. 2024.

DI SERIO, L. C., SAMPAIO, M., PEREIRA, S. C. F. **"A evolução dos conceitos de logística: um estudo na cadeia automobilística no Brasil"**, RAI-Revista de Administração e Inovação, v. 4, n. 1, p. 125–141, 2007.

DIJK, M., ORSATO, R. J., KEMP, R. **"The emergence of an electric mobility trajectory"**, Energy policy, v. 52, p. 135–145, 2013.

ECKSTEIN, D., KÜNZEL, V., SCHÄFER, L. **"The global climate risk index 2021"**, Bonn: Germanwatch, 2021.

EDDAHECH, A., BRIAT, O., VINASSA, J. M. **"Performance comparison of four lithium-ion battery technologies under calendar aging"**, Energy, v. 84, p. 542–550, 1 maio 2015. DOI: 10.1016/j.energy.2015.03.019.

EDWARDS, P. N. **A vast machine: Computer models, climate data, and the politics of global warming**. [S.l.], Mit press, 2013.

EIA. **What drives petroleum product prices?** 2024. Disponível em: <https://www.eia.gov/finance/markets/products/prices.php>. Acesso em: 9 nov. 2024.

ELLRAM, L. M. **"A framework for total cost of ownership"**, The International Journal of Logistics Management, v. 4, n. 2, p. 49–60, 1993.

ELLRAM, L. M. **"Total cost of ownership: an analysis approach for purchasing"**, International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, v. 25, n. 8, p. 4–23, 1995.

ELLRAM, L. M., SIFERD, S. P. **"PURCHASING: THE CORNERSTONE OF THE TOTAL COST OF OWNERSHIP CONCEPT."**, Journal of business logistics, v. 14, n. 1, 1993.

EPE. **"Eletromobilidade e Biocombustíveis"**, 2018. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/>. Acesso em: 1 fev. 2025.

EPE. **Entendendo a formação dos preços finais de combustíveis no Brasil**. . [S.l: s.n.], jul. 2023.

EUROPEAN COMMISSION. **"EU imposes duties on unfairly subsidised electric vehicles from China while discussions on price undertakings continue"**, 2024.

Disponível em: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_24_5589. Acesso em: 1 fev. 2025.

EUROPEAN COMMISSION, D. V. – T. **"THE FUTURE DEVELOPMENT OF THE COMMON TRANSPORT POLICY - A global to the construction of a Community framework for sustainable mobility"**, 1992. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=COM%3A1992%3A0494%3AFIN>. Acesso em: 14 nov. 2024.

EV VOLUME. **EV Volumes Specialist electric vehicle volume and forecast data you can trust**. 2023. EV Volume. Disponível em: <https://ev-volumes.com/product/ev-volumes/>. Acesso em: 15 nov. 2024.

EYRING, V., *et al.* **"Human Influence on the Climate System"**. Climate Change 2021 – The Physical Science Basis, [S.l.], Cambridge University Press, 2023. p. 423–552. DOI: 10.1017/9781009157896.005.

FERREIRA FILHO, V. S. **"O Governo como indutor da indústria automotiva: proposições para uma política industrial automotiva brasileira baseada na substituição de frota"**, 2022.

FERRIN, B. G., PLANK, R. E. **"Total cost of ownership models: An exploratory study"**, Journal of Supply chain management, v. 38, n. 2, p. 18–29, 2002. .

FILHO, F. **O governo como indutor da indústria automotiva: proposições para uma política industrial automotiva brasileira baseada na substituição de frota**. 2022. Universidade Estadual Paulista, 2022.

FIPE. **Preço médio de veículos**. 2024. <https://veiculos.fipe.org.br/>. Disponível em: <https://veiculos.fipe.org.br/>. Acesso em: 30 nov. 2024.

FLEMING, J. R. "**Joseph Fourier, the ‘greenhouse effect’, and the quest for a universal theory of terrestrial temperatures**", *Endeavour*, v. 23, n. 2, p. 72–75, 1 jan. 1999. DOI: 10.1016/S0160-9327(99)01210-7. Acesso em: 16 out. 2022.

FLINK, J. J. "**The Automobile Age**", The MIT Press, v. 30, n. 4, 1990. Disponível em: <https://hdl.handle.net/2027/heb01136.0001.001>. Acesso em: 8 nov. 2024.

FLINK, J. J. **The Car Culture**. [S.l: s.n.], 1976.

FLUCKER, S., TOZER, R. "**Data centre energy efficiency analysis to minimize total cost of ownership**", *Building Services Engineering Research and Technology*, v. 34, n. 1, p. 103–117, 2013.

FOOTE, E. "**Circumstances Affecting the Heat of Sun’s Rays**", *American Journal of Art and Science*, v. XXII/no, p. 382–383, nov. 1856..

FRAINER, D. M. **A Estrutura e a Dinâmica da Indústria Automobilística no Brasil. 2010**. 2010. Universidade do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2010.

G1. **Ford encerra a produção de veículos no Brasil**. 2021. <https://g1.globo.com/economia/noticia/2021/01/11/ford-fecha-fabricas-e-encerra-producao-no-brasil-em-2021.ghtml>.

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*, v. 17, n. 4, p. 445–476, 1 dez. 2005. DOI: 10.1080/09537320500357319. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09537320500357319>.

GEISEL, E., SIMONSEN, M. H., VELLOSO, J. P. R. **DECRETO-LEI Nº 1.455, DE 7 DE ABRIL DE 1976**. . [S.l: s.n.], 1976.

GM. **"Journey to Zero"**, 2023. Disponível em: <https://www.gm.com/commitments/sustainability>. Acesso em: 25 maio 2024.

GOTA, S., HUIZENGA, C., PEET, K., *et al.* **"Decarbonising transport to achieve Paris Agreement targets"**, Energy Efficiency, v. 12, n. 2, p. 363–386, 8 fev. 2019. DOI: 10.1007/s12053-018-9671-3.

HALIM, R., KIRSTEIN, L., MERK, O., *et al.* **"Decarbonization Pathways for International Maritime Transport: A Model-Based Policy Impact Assessment"**, Sustainability, v. 10, n. 7, p. 2243, 29 jun. 2018. DOI: 10.3390/su10072243. .

HALL, A. L. **Estimating the Impact on Fuel Tax Revenues from a Changing Light Vehicle Fleet with Increased Advanced Internal Combustion Engine Vehicles and Electric Vehicles**. 2012. The University of Texas at Austin, Austin, 2012.

HALL, D., XIE, Y., MINJARES, R., *et al.* **"Decarbonizing road transport by 2050: Effective policies to accelerate the transition to zero-emission vehicles"**, 2021. .

HAMZA, K., LABERTEAUX, K. P., CHU, K. C. **vehicleCurrentAndFutureCosts_finalVersion_March2020**. 2020. <https://drive.google.com/drive/folders/15aRR8WrrVV6ttqxSJXfcM8lNf0WrTgxK>.

HAMZA, Karim, LABERTEAUX, K., CHU, C. **On Modeling the Total Cost of Ownership of Electric and Plug-in Hybrid Vehicles**. [S.l: s.n.], 2019.

HAMZA, Karim, LABERTEAUX, K. P., CHU, K. C. **"On modeling the cost of ownership of plug-in vehicles"**, World Electric Vehicle Journal, v. 12, n. 1, 2021a. DOI: 10.3390/wevj12010039.

HAMZA, Karim, LABERTEAUX, K. P., CHU, K.-C. **"On Modeling the Cost of Ownership of Plug-In Vehicles"**, World Electric Vehicle Journal, v. 12, n. 1, p. 39, 9 mar. 2021b. DOI: 10.3390/wevj12010039.

HILTON, G. W. "Transport technology and the urban pattern", **Journal of Contemporary History**, v. 4, n. 3, p. 123–135, 1969a.

HILTON, G. W. "Transport technology and the urban pattern", **Journal of Contemporary History**, v. 4, n. 3, p. 123–135, 1969b.

HOEGH-GULDBERG, O. , *et al.*, "**Impacts of 1.5°C Global Warming on Natural and Human Systems**". Global Warming of 1.5°C, [S.l.], Cambridge University Press, 2018. p. 175–312. DOI: 10.1017/9781009157940.005.

HONDA. "**Environment and Safety Themes 2050 Targets**", 2024. Disponível em: https://global.honda/en/environment/initiatives/carbon_neutrality/. Acesso em: 27 dez. 2024.

HOYER, K. G. "**The history of alternative fuels in transportation: The case of electric and hybrid cars**", *Utilities Policy*, v. 16, n. 2, p. 63–71, 2008. DOI: 10.1016/j.jup.2007.11.001.

HUMMEL, P., ANALYST, C., LESNE ANALYST, D., *et al.* **Q-Series UBS Evidence Lab Electric Car Teardown-Disruption Ahead? Equities Global Automobiles**. . [S.l: s.n.], 2017. Disponível em: www.ubs.com/investmentresearch.

IBGE. "**Anuário Estatístico do Brasil**". , 2021.

IBGE. **IPCA - Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo**. 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/precos-e-custos/9256-indice-nacional-de-precos-ao-consumidor-amplo.html?=&t=series-historicas>. Acesso em: 29 dez. 2024.

IEA. **Average fuel consumption of new light-duty vehicles, 2005-2019.** 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/average-fuel-consumption-of-new-light-duty-vehicles-2005-2019>. Acesso em: 23 dez. 2024.

IEA. **Global EV Outlook 2022.** Paris, [s.n.], 2022a. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022>. Acesso em: 15 nov. 2024.

IEA. **Global EV Outlook 2023.** Paris, [s.n.], 2023a. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>. Acesso em: 4 out. 2024.

IEA. **Global EV Outlook 2024.** Paris, [s.n.], 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>. Acesso em: 15 nov. 2024.

IEA. **World Energy Outlook 2016.** Paris, [s.n.], 2016. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2016>. Acesso em: 15 nov. 2024.

IEA. **World Energy Outlook 2020.** IEA. Paris, [s.n.], 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>. Acesso em: 14 nov. 2024.

IEA. **World Energy Outlook 2022..** [S.l.: s.n.], 2022b. Disponível em: www.iea.org/terms.

IEA. **World Energy Outlook 2023..** [S.l.: s.n.], 2023b. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>. Acesso em: 22 set. 2024.

INMETRO. **Veículos Automotivos - Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE).** 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/avaliacao-da-conformidade/programa-brasileiro-de-etiquetagem/tabelas-de-eficiencia-energetica/veiculos-automotivos-pbe-veicular>. Acesso em: 29 dez. 2024.

INSIDE EV. **Global Plug-In Car Sales**. 2023. Disponível em: <https://insideevs.com/news/725811/global-plugin-car-sales-may2024>. Acesso em: 15 nov. 2024.

INSIDEEV. **BYD cresce 327% no Brasil em 2024 e lidera mercado de carros elétricos**. 6 jan. 2025. Disponível em: <https://insideevs.uol.com.br/news/746289/byd-vendas-eletricos-brasi-2025/>. Acesso em: 1 fev. 2025.

IPCC, "Annex I: Glossary". **Global Warming of 1.5°C**, [S.l.], Cambridge University Press, 2022a. p. 541–562. DOI: 10.1017/9781009157940.008. Disponível em: https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9781009157940%23apx1/type/book_part.

IPCC. **Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Cambridge and New York, Cambridge University Press, 2022b.

IPCC. **Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability**. [S.l.], Cambridge University Press, 2023a. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9781009325844/type/book>.

IPCC, "Summary for Policymakers". **Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability**, [S.l.], Cambridge University Press, 2023b. p. 3–34. DOI: 10.1017/9781009325844.001.

IPHAN. "**Manual Técnico do Patrimônio Ferroviário**", 2010.

ITF. "**ITF Transport Outlook 2019**. Organisation for Economic Cooperation and Development 8 (OECD), International Transport Forum (ITF),", 2019.

ITF. "**Transport CO2 and the Paris Climate Agreement: Reviewing the Impact of Nationally Determined Contributions**", International Transport Forum, 2018. .

JACKSON, J. D. W., OSTROM, L. L. "**Life cycle costing in industrial purchasing**", Journal of Purchasing and Materials Management, v. 16, n. 4, p. 8–12, 1980. .

JARAMILLO, P., *et al.*, "**Transport**". Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change, [S.l.], Cambridge University Press, 2022. p. 1049–1160. DOI: 10.1017/9781009157926.012.

JENN, A., AZEVEDO, I. L., FISCHBECK, P. "**How will we fund our roads? A case of decreasing revenue from electric vehicles**", Transportation Research Part A: Policy and Practice, v. 74, p. 136–147, abr. 2015. DOI: 10.1016/j.tra.2015.02.004. .

JÚNIOR, J. **Modelagem da oferta de baterias automotivas em segunda vida para o setor elétrico**. 2024. Master – Programa de Planejamento Energético (PPE), 2024.

KAEN, F. R. "**Automobile Manufacturer Returns During World War II: From Cars to Armaments and Back**", International Journal of Business and Social Science, v. 3, n. 23, 2012.

KEMP, R., SCHOT, J., HOOGMA, R. "**Regime shifts to sustainability through processes of niche formation: the approach of strategic niche management**", Technology analysis & strategic management, v. 10, n. 2, p. 175–198, 1998. .

KIRSCH, D. A. "**The electric car and the burden of history: Studies in automotive systems rivalry in America, 1890-1996**", Business and Economic History, p. 304–310, 1997.

KURZWEIL, P. "**Gaston Planté and his invention of the lead–acid battery—The genesis of the first practical rechargeable battery**", Journal of Power Sources, v. 195, n. 14, p. 4424–4434, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.12.126>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775310000546>.

LACERDA, A. C. et al. "**Economia Brasileira** ", 2010.

LE TREUT, H. , R. S. U. C. Y. D. C. M. A. M. T. P. and M. P. "**Historical Overview of Climate Change**", Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Chang , 2007. .

LI, S. W. B. Y. M. Z. F. **The Global Diffusion of Electric Vehicles: Lessons from the First Decade.** . [S.l: s.n.], 2021.

LIU, K., ASHWIN, T. R., HU, X., *et al.* "**An evaluation study of different modelling techniques for calendar ageing prediction of lithium-ion batteries**", Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 131, 1 out. 2020. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110017. .

LIU, Y., ZHAO, X., LU, D., *et al.* "**Impact of policy incentives on the adoption of electric vehicle in China**", Transportation Research Part A: Policy and Practice, v. 176, 1 out. 2023. DOI: 10.1016/j.tra.2023.103801. .

LIU, Z., SONG, J., KUBAL, J., *et al.* "**Comparing total cost of ownership of battery electric vehicles and internal combustion engine vehicles**", Energy Policy, v. 158, p. 112564, 2021a.

LIU, Z., SONG, J., KUBAL, J., *et al.* "**Comparing total cost of ownership of battery electric vehicles and internal combustion engine vehicles**", Energy Policy, v. 158, p. 112564, nov. 2021b. DOI: 10.1016/j.enpol.2021.112564. .

LUEDEMAN. **Transformações na indústria automobilística mundial: o caso do complexo automotivo no Brasil - 1990-2002.** 2003. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

LUTSEY, N., CUI, H., YU, R. **EVALUATING ELECTRIC VEHICLE COSTS AND BENEFITS IN CHINA IN THE 2020-2035 TIME FRAME.** . [S.l: s.n.], 2021. Disponível em: www.theicct.orgcommunications@theicct.org.

LUTSEY, N., MESZLER, D., ISENSTADT, A., *et al.* **EFFICIENCY TECHNOLOGY AND COST ASSESSMENT FOR U.S. 2025-2030 LIGHT-DUTY VEHICLES** The authors are grateful for contributions from various automotive suppliers that provided input in the efficiency technology series published by the International Council on Clean Transportation. Francisco Posada provided advice and support on fleet technology modeling. [S.l: s.n.], 2017. Disponível em: www.theicct.org.

LUTSEY, N., NICHOLAS, M. **Update on electric vehicle costs in the United States through 2030..** [S.l: s.n.], 2019. Disponível em: <https://theicct.org/publication/update-on-electric-vehicle-costs-in-the-united-states-through-2030/>. Acesso em: 21 dez. 2024.

MARSHALL, G. **The Marshall Plan..** [S.l: s.n.], 1947

MÁXIMO, W. **Importação de automóveis cresce 48% após fim do Inovar Auto.** 2018. <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2018-04/importacao-de-automoveis-cresce-48-apos-fim-do-inovar-auto>.

MCSHANE, C., TARR, J. "The Decline of the Urban Horse in American Cities", *Journal of Transport History*, v. 24, p. 177–198, 1 set. 2003. DOI: 10.7227/TJTH.24.2.4.
.

MDIC. **"Avaliação do Impacto do Programa Inovar-Auto"**, 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/competitividade-industrial/setor-automotivo/inovar-auto>. Acesso em: 15 nov. 2024.

MDIC. **Imposto de importação para veículos eletrificados será retomado em janeiro de 2024.** 2023a. <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/noticias/2023/novembro/imposto-de-importacao-para-veiculos-eletrificados-sera-retomado-em-janeiro-de-2024>.

MDIC. **Inovar-Auto**. 2023b. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/competitividade-industrial/setor-automotivo/innovar-auto>. Acesso em: 12 out. 2024.

MDIC. **Mover: Programa de Mobilidade Verde é lançado**. 30 dez. 2023c. <https://www.gov.br/planalto/pt-br/acompanhe-o-planalto/noticias/2023/12/mover-novo-programa-amplia-acoes-para-mobilidade-verde-e-descarbonizacao>.

MDIC. **"Rota 2030 - Mobilidade e Logística"**, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/competitividade-industrial/setor-automotivo/rota-2030-mobilidade-e-logistica>. Acesso em: 15 nov. 2024.

MEADOWS, D. H., MEADOWS, D. L., RANDERS, J., *et al.* **"The limits to growth, Potomac Associates"**, New York, 1972. .

MESZAROS, F., SHATANAWI, M., OGUNKUNBI, G. A. **"Challenges of the electric vehicle markets in emerging economies"**, Periodica Polytechnica Transportation Engineering, v. 49, n. 1, p. 93–101, 2021. .

METI. **"Green Growth Strategy Through Achieving Carbon Neutrality in 2050"**, 2021. Disponível em: https://www.meti.go.jp/english/press/2020/1225_001.html. Acesso em: 24 jan. 2024.

MINENERGI. **Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica**. [S.l: s.n.], 2021. Disponível em: https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/estrategia_nacional_de_movilidad_electrica_-_minenergia_2021_0.pdf. Acesso em: 5 jun. 2024.

NICHOLON, A. **Le Véhicule Électrique. Mythe ou Réalité?** Paris, Éditions de la Maison des Sciences de l'Homme, 1984.

NREL. **Future Automotive Systems Technology Simulator (FASTSim)**. . [S.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.nrel.gov/transportation/fastsim.html>. Acesso em: 23 set. 2024. , 2023

ONU. **"Climate Change ‘Biggest Threat Modern Humans Have Ever Faced’, World-Renowned Naturalist Tells Security Council, Calls for Greater Global Cooperation"**, 2021. Disponível em: <https://press.un.org/en/2021/sc14445.doc.htm>. Acesso em: 14 nov. 2024.

PATT, A. , L. R. P. B. A. I. B. A. C. K. D. I. K. J. P. A. P. S. D. F. S. J. W., **"International Cooperation"**. Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change, [S.l.], Cambridge University Press, 2022. p. 1451–1546. DOI: 10.1017/9781009157926.016.

PERERA, F. **"Pollution from fossil-fuel combustion is the leading environmental threat to global pediatric health and equity: Solutions exist"**, International journal of environmental research and public health, v. 15, n. 1, p. 16, 2018. .

PISTOIA, G., LIAW, B. **Behaviour of lithium-ion batteries in electric vehicles: battery health, performance, safety, and cost**. [S.l.], Springer, 2018.

POLIVKA, B. J. **"The great London smog of 1952"**, AJN The American Journal of Nursing, v. 118, n. 4, p. 57–61, 2018. .

POUPINHA, C., DORNOFF, J. **The bigger the better? How battery size affects real-world energy consumption, cost of ownership, and life-cycle emissions of electric vehicles**. . [S.l: s.n.], 2024. Disponível em: www.theicct.org.

PREGO, A. S. D. S. **A Memória da Pavimentação no Brasil**. [S.l: s.n.], 2001.

RECEITA FEDERAL. **IPI - Imposto sobre produtos industrializados**. 2024a. Disponível em: <https://www.gov.br/receitafederal/pt-br/assuntos/orientacao-tributaria/tributos/ipi>. Acesso em: 25 jan. 2025.

RECEITA FEDERAL. **Tributos federais administrados pela Receita Federal**. 2024b. Disponível em: <https://www.gov.br/receitafederal/pt-br/assuntos/orientacao-tributaria/tributos>. Acesso em: 25 jan. 2025.

REDONDO-IGLESIAS, E., VENET, P., PELISSIER, S. "**Calendar and cycling ageing combination of batteries in electric vehicles**", *Microelectronics Reliability*, v. 88–90, p. 1212–1215, 1 set. 2018. DOI: 10.1016/j.microrel.2018.06.113. .

REDONDO-IGLESIAS, E., VENET, P., PELISSIER, S. "**Modelling lithium-ion battery ageing in electric vehicle applications—calendar and cycling ageing combination effects**", *Batteries*, v. 6, n. 1, 1 mar. 2020. DOI: 10.3390/batteries6010014.

REUTERS. **Toyota fecha fábrica em São Bernardo e transfere produção para o interior do estado**. 2022. <https://g1.globo.com/economia/noticia/2022/04/05/toyota-fecha-fabrica-em-sao-bernardo-e-transfere-producao-para-o-interior-do-estado.ghtml>.

RODRIGUE, J.-P. **The geography of transport systems**. [S.l.], Routledge, 2020.

ROGELJ, J., DEN ELZEN, M., HÖHNE, N., *et al.* "**Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 °C**", *Nature*, v. 534, n. 7609, p. 631–639, 30 jun. 2016. DOI: 10.1038/nature18307. .

SACCANI, N., PERONA, M., BACCHETTI, A. "**The total cost of ownership of durable consumer goods: A conceptual model and an empirical application**", *International Journal of Production Economics*, v. 183, p. 1–13, jan. 2017. DOI: 10.1016/j.ijpe.2016.09.021. .

SAFOUTIN, M., MCDONALD, J., ELLIES, B. "**Predicting the Future Manufacturing Cost of Batteries for Plug-In Vehicles for the U.S. Environmental Protection Agency (EPA) 2017–2025 Light-Duty Greenhouse Gas Standards**", *World Electric Vehicle Journal*, v. 9, n. 3, p. 42, 6 out. 2018. DOI: 10.3390/wevj9030042. .

SAKURAI, M. **Gerenciamento integrado de custos**. São Paulo, Atlas, 1997.

SALERNO, M. S., ARBIX, G., DE TOLEDO, D. G. C. "**Social Development and Income Distribution: The Conditions of the Brazilian Auto Industry Growth**", *Global Automobile Demand: Major Trends in Emerging Economies*; Volume 2, p. 69–89, 2015. .

Lisboa, Marcos. **Lições da saída da Ford do Brasil**. 2021. Disponível em: <https://braziljournal.com/marcos-lisboa-lico-es-da-saida-da-ford-do-brasil/>. Acesso em: 15 nov. 2024.

SCHOT, J., GEELS, F. W. "**Strategic niche management and sustainable innovation journeys: theory, findings, research agenda, and policy**", *Technology analysis & strategic management*, v. 20, n. 5, p. 537–554, 2008. .

SCHOT, J., HOOGMA, R., ELZEN, B. "**Strategies for shifting technological systems: The case of the automobile system**", *Futures*, v. 26, n. 10, p. 1060–1076, 1994. DOI: [https://doi.org/10.1016/0016-3287\(94\)90073-6](https://doi.org/10.1016/0016-3287(94)90073-6). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0016328794900736>.

SCHRENK, H. H., HEIMANN, H., CLAYTON, G. D., *et al.* "**Air pollution in Donora, Pennsylvania: Epidemiology of the unusual smog episode of October 1948**", 1949.

SEFAZ RJ. **Governo do Estado divulga calendário de pagamento do IPVA 2024**. 2024.. Disponível em: <https://portal.fazenda.rj.gov.br/noticias/governo-do-estado-divulga-calendario-de-pagamento-do-ipva-2024/>. Acesso em: 31 dez. 2024.

SENADO, A. **Reforma tributária: segunda parte da regulamentação será votada em 2025**. 2025. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2025/01/03/reforma-tributaria-segunda-parte-da-regulamentacao-sera-votada-em-2025>. Acesso em: 1 fev. 2025.

SHENG, Y., SHI, X., SU, B. **"Re-analyzing the economic impact of a global bunker emissions charge"**, *Energy Economics*, v. 74, p. 107–119, ago. 2018. DOI: 10.1016/j.eneco.2018.05.035. .

SIMPSON, A. **Cost-Benefit Analysis of Plug-In Hybrid Electric Vehicle Technology**. . [S.l: s.n.], 2006. Disponível em: <http://www.osti.gov/bridge>.

SLOCAT. **"Transport and Climate Change: Global Status Report 2018"**, 2018. Disponível em: *Transport and Climate Change: Global Status Report 2018*. Acesso em: 14 nov. 2024.

SMIL, V. **Energy transitions: history, requirements, prospects**. . [S.l: s.n.], 2010.

SMIL, V. **Transforming the Twentieth Century: Technical Innovations and Their Consequences**. . [S.l: s.n.], 2006.

SOVACOOOL, B. K. **"Experts, theories, and electric mobility transitions: Toward an integrated conceptual framework for the adoption of electric vehicles"**, *Energy Research & Social Science*, v. 27, p. 78–95, 2017. .

SOVACOOOL, B. K., HIRSH, R. F. **"Beyond batteries: An examination of the benefits and barriers to plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs) and a vehicle-to-grid (V2G) transition"**, *Energy Policy*, v. 37, n. 3, p. 1095–1103, 2009. .

SP. **"Legislação Tributária"**, 2024. Disponível em: <https://legislacao.fazenda.sp.gov.br/Paginas/Home.aspx>. Acesso em: 25 jan. 2025.

SPNT. **"Projeto de Reavaliação de Estimativas e Metas do PNLT"**, 2012. .

STROE, D. I., SWIERCZYNSKI, M., KÆR, S. K., *et al.* **"Degradation Behavior of Lithium-Ion Batteries During Calendar Ageing - The Case of the Internal**

Resistance Increase". 54, 1 jan. 2018. Anais [...] [S.l.], Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 1 jan. 2018. p. 517–525. DOI: 10.1109/TIA.2017.2756026.

STRUBEN, J., STERMAN, J. "**Transition Challenges for Alternative Fuel Vehicle and Transportation Systems**". Environment and Planning B: Planning and Design, 35(6), 1070–1097, 28 dez. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1068/b33022t>. .

TAILÂNDIA. "**National EV Policy Committee da Tailândia (2021)**", 2021. .

THE STATE COUNCIL. "**New Energy Vehicle Industry Development Plan (2021–2035)**", 2020. Disponível em: http://www.gov.cn/zhengce/content/2020-11/02/content_5556716.htm. Acesso em: 24 jan. 2024.

THE WHITE HOUSE. "**Executive Order 14037**", 2021. Disponível em: <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/presidential-actions/2021/08/05/executive-order-on-strengthening-american-leadership-in-clean-cars-and-trucks/>. Acesso em: 24 jan. 2024.

THE WORLD BANK. **Land area (sq.km)**. . Washington, D.C., United States. , [s.n.], 2020.

TOYOTA. "**Sustainability**", 2024. Disponível em: <https://www.toyota-europe.com/sustainability>. Acesso em: 27 dez. 2024.

UK GOV. "**Environment Agency: reaching net zero**", 2024. Disponível em: <https://www.gov.uk/government/publications/environment-agency-reaching-net-zero>. Acesso em: 24 maio 2024.

UK GOV. "**Net Zero Government Initiative**", 2023. Disponível em: <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/6569cb331104cf000dfa7352/net-zero-government-emissions-roadmap.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2024.

UNFCCC. **"Agenda 21"**, 1992a. Disponível em: <https://www.un.org/en/conferences/environment/rio1992>. Acesso em: 14 nov. 2024.

UNFCCC. **"Paris Agreement"**, 2015. .

UNFCCC. **"The Glasgow Climate Pact – Key Outcomes from COP26"**, 2021. Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-glasgow-climate-pact-key-outcomes-from-cop26>. Acesso em: 15 nov. 2024.

UNFCCC. **United Nations Conference on Environment and Development**. . Rio de Janeiro , [s.n.], 1992b.

UNRUH, G. C. **"Understanding carbon lock-in"**, Energy Policy, v. 28, n. 12, p. 817–830, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(00\)00070-7](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00070-7). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421500000707>.

US. **Presidential Actions**. 20 jan. 2025. Disponível em: <http://whitehouse.gov/presidential-actions>. Acesso em: 1 fev. 2025.

U.S. BUREAU. **Consumer Price Index for All Urban Consumers (CPI-U)**. 2024. Databases, Tables & Calculators by Subject. Disponível em: <https://data.bls.gov/pdq/SurveyOutputServlet>. Acesso em: 20 dez. 2024.

U.S. BUREAU. **"Historical Statistics of the United States, Colonial Times to 1970, Bicentennial Edition, Part 2"**, Washington, D.C., 1975. .

VARGAS, P. G. **"Indústria automobilística brasileira: uma análise das principais transformações tecnológicas no sistema produtivo e seu impacto sobre o emprego"**, 2019. .

VISANI, F., BARBIERI, P., DI LASCIO, F. M. L., *et al.* **"Supplier's total cost of ownership evaluation: a data envelopment analysis approach"**, Omega, v. 61, p. 141–154, 2016. .

VOLVO. **Volvo Cars adjusts electrification ambitions, remains committed to fully electric future**. 4 set. 2024. Disponível em: <https://www.media.volvocars.com/global/en-gb/media/pressreleases/333213/volvo-cars-adjusts-electrification-ambitions-remains-committed-to-fully-electric-future>. Acesso em: 27 dez. 2024.

WALLINGTON, T. J., ANDERSON, J. E., DOLAN, R. H., *et al.* **"Vehicle emissions and urban air quality: 60 years of progress"**, Atmosphere, v. 13, n. 5, p. 650, 2022. .

WANG, J., WU, K., DU, Y. **"Does air pollution affect urban housing prices? Evidence from 285 Chinese prefecture-level cities"**, Journal of Cleaner Production, v. 370, p. 133480, out. 2022. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.133480. .

WANG, N., TANG, L., PAN, H. **"A global comparison and assessment of incentive policy on electric vehicle promotion"**, Sustainable Cities and Society, v. 44, p. 597–603, 1 jan. 2019. DOI: 10.1016/j.scs.2018.10.024. .

WARSAWSKI, L., FRIEND, A., OSTBERG, S., *et al.* **"A multi-model analysis of risk of ecosystem shifts under climate change"**, Environmental Research Letters, v. 8, n. 4, p. 044018, 1 dez. 2013. DOI: 10.1088/1748-9326/8/4/044018. .

WHO. **"A Global Assessment of Exposure and Burden of Disease; WHO: Geneva, Switzerland"**, ISBN 9789241511353, p. 1–131, 2016. .

WHO. **"WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide: global update"**, 2005. Disponível em: <https://iris.who.int/handle/10665/69477>. Acesso em: 14 nov. 2024.

YANG, F., XIE, Y., DENG, Y., *et al.* "**Impacts of battery degradation on state-level energy consumption and GHG emissions from electric vehicle operation in the United States**". 80, 2019a. Anais [...] [S.l.], Elsevier B.V., 2019. p. 530–535. DOI: 10.1016/j.procir.2018.12.010.

YANG, F., XIE, Y., DENG, Y., *et al.* "**Impacts of battery degradation on state-level energy consumption and GHG emissions from electric vehicle operation in the United States**". 80, 2019b. Anais [...] [S.l.], Elsevier B.V., 2019. p. 530–535. DOI: 10.1016/j.procir.2018.12.010.

YANG, Z. "**How did China come to dominate the world of electric cars?**", <https://www.technologyreview.com/2023/02/21/1068880/how-did-china-dominate-electric-cars-policy/>, 2023. .

YERGIN, D. **The prize: the epic quest for oil, money, and power**. [S.l.], New York : Simon & Schuster, [1991] ©1991, 1991. Disponível em: <https://search.library.wisc.edu/catalog/999635424902121>.

Apêndice I

	Custo de referência - 45 kWh	Capacidade da Bateria dos BEV [kWh]										
Ano	[US\$/kWh]	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
2023	128,00	128,97	128,65	128,32	128,00	127,68	127,35	127,03	126,71	126,38	126,06	125,74
2024	97,00	97,73	97,49	97,24	97,00	96,76	96,51	96,27	96,02	95,78	95,53	95,29
2025	93,98	94,69	94,45	94,22	93,98	93,74	93,51	93,27	93,03	92,79	92,56	92,32
2026	91,05	91,74	91,51	91,28	91,05	90,82	90,59	90,36	90,13	89,90	89,67	89,44
2027	88,22	88,89	88,66	88,44	88,22	88,00	87,77	87,55	87,33	87,10	86,88	86,66
2028	85,47	86,12	85,90	85,69	85,47	85,26	85,04	84,82	84,61	84,39	84,18	83,96
2029	82,81	83,44	83,23	83,02	82,81	82,60	82,39	82,18	81,97	81,77	81,56	81,35
2030	80,23	80,84	80,64	80,44	80,23	80,03	79,83	79,62	79,42	79,22	79,02	78,81
2031	77,73	78,32	78,13	77,93	77,73	77,54	77,34	77,15	76,95	76,75	76,56	76,36
2032	75,31	75,88	75,69	75,50	75,31	75,12	74,93	74,74	74,55	74,36	74,17	73,98
2033	72,97	73,52	73,34	73,15	72,97	72,78	72,60	72,42	72,23	72,05	71,86	71,68
2034	70,70	71,23	71,05	70,88	70,70	70,52	70,34	70,16	69,98	69,80	69,63	69,45
2035	68,50	69,01	68,84	68,67	68,50	68,32	68,15	67,98	67,80	67,63	67,46	67,29
2036	68,14	68,66	68,49	68,32	68,14	67,97	67,80	67,63	67,46	67,28	67,11	66,94
2037	67,79	68,31	68,14	67,97	67,79	67,62	67,45	67,28	67,11	66,94	66,77	66,60
2038	67,45	67,96	67,79	67,62	67,45	67,28	67,11	66,94	66,76	66,59	66,42	66,25
2039	67,10	67,61	67,44	67,27	67,10	66,93	66,76	66,59	66,42	66,25	66,08	65,91
2040	66,76	67,26	67,09	66,92	66,76	66,59	66,42	66,25	66,08	65,91	65,74	65,58
2041	66,41	66,92	66,75	66,58	66,41	66,24	66,08	65,91	65,74	65,57	65,41	65,24
2042	66,07	66,57	66,40	66,24	66,07	65,90	65,74	65,57	65,40	65,24	65,07	64,90
2043	65,73	66,23	66,06	65,90	65,73	65,57	65,40	65,23	65,07	64,90	64,74	64,57
2044	65,39	65,89	65,72	65,56	65,39	65,23	65,06	64,90	64,73	64,57	64,40	64,24
2045	65,06	65,55	65,39	65,22	65,06	64,89	64,73	64,57	64,40	64,24	64,07	63,91
2046	64,72	65,21	65,05	64,89	64,72	64,56	64,40	64,23	64,07	63,91	63,74	63,58
2047	64,39	64,88	64,72	64,55	64,39	64,23	64,07	63,90	63,74	63,58	63,42	63,25
2048	64,06	64,55	64,38	64,22	64,06	63,90	63,74	63,58	63,41	63,25	63,09	62,93
2049	63,73	64,22	64,05	63,89	63,73	63,57	63,41	63,25	63,09	62,93	62,77	62,61
2050	63,41	63,89	63,73	63,57	63,41	63,24	63,08	62,92	62,76	62,60	62,44	62,28

	Custo de referência -45 kWh	Capacidade da Bateria dos BEV [kWh]										
Ano	[US\$/kWh]	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135
2023	128,00	125,41	125,09	124,77	124,44	124,12	123,80	123,47	123,15	122,83	122,51	122,18
2024	97,00	95,04	94,80	94,55	94,31	94,06	93,82	93,57	93,33	93,08	92,84	92,59
2025	93,98	92,08	91,84	91,61	91,37	91,13	90,89	90,66	90,42	90,18	89,95	89,71
2026	91,05	89,21	88,98	88,75	88,52	88,29	88,06	87,83	87,60	87,37	87,14	86,91
2027	88,22	86,44	86,21	85,99	85,77	85,55	85,32	85,10	84,88	84,65	84,43	84,21
2028	85,47	83,75	83,53	83,31	83,10	82,88	82,67	82,45	82,23	82,02	81,80	81,59
2029	82,81	81,14	80,93	80,72	80,51	80,30	80,09	79,88	79,67	79,46	79,26	79,05
2030	80,23	78,61	78,41	78,21	78,00	77,80	77,60	77,40	77,19	76,99	76,79	76,59
2031	77,73	76,16	75,97	75,77	75,58	75,38	75,18	74,99	74,79	74,59	74,40	74,20
2032	75,31	73,79	73,60	73,41	73,22	73,03	72,84	72,65	72,46	72,27	72,08	71,89
2033	72,97	71,49	71,31	71,13	70,94	70,76	70,57	70,39	70,21	70,02	69,84	69,65
2034	70,70	69,27	69,09	68,91	68,73	68,55	68,38	68,20	68,02	67,84	67,66	67,48
2035	68,50	67,11	66,94	66,77	66,59	66,42	66,25	66,07	65,90	65,73	65,56	65,38
2036	68,14	66,77	66,60	66,42	66,25	66,08	65,91	65,74	65,56	65,39	65,22	65,05
2037	67,79	66,42	66,25	66,08	65,91	65,74	65,57	65,40	65,23	65,06	64,88	64,71
2038	67,45	66,08	65,91	65,74	65,57	65,40	65,23	65,06	64,89	64,72	64,55	64,38
2039	67,10	65,74	65,57	65,41	65,24	65,07	64,90	64,73	64,56	64,39	64,22	64,05
2040	66,76	65,41	65,24	65,07	64,90	64,73	64,56	64,40	64,23	64,06	63,89	63,72
2041	66,41	65,07	64,90	64,74	64,57	64,40	64,23	64,06	63,90	63,73	63,56	63,39
2042	66,07	64,74	64,57	64,40	64,24	64,07	63,90	63,74	63,57	63,40	63,23	63,07
2043	65,73	64,40	64,24	64,07	63,91	63,74	63,57	63,41	63,24	63,08	62,91	62,74
2044	65,39	64,07	63,91	63,74	63,58	63,41	63,25	63,08	62,92	62,75	62,59	62,42
2045	65,06	63,74	63,58	63,42	63,25	63,09	62,92	62,76	62,59	62,43	62,27	62,10
2046	64,72	63,42	63,25	63,09	62,93	62,76	62,60	62,44	62,27	62,11	61,95	61,78
2047	64,39	63,09	62,93	62,77	62,60	62,44	62,28	62,12	61,95	61,79	61,63	61,47
2048	64,06	62,77	62,61	62,44	62,28	62,12	61,96	61,80	61,63	61,47	61,31	61,15
2049	63,73	62,44	62,28	62,12	61,96	61,80	61,64	61,48	61,32	61,16	61,00	60,84
2050	63,41	62,12	61,96	61,80	61,64	61,48	61,32	61,16	61,00	60,84	60,68	60,52

Tempo de propriedade: 5 anos									
	TCO BEV: Cenário Base	TCO BEV: Cenário Base + Inventivo IPI + ICMS	TCO BEV: Cenário Base + Inventivo IPI + ICMS + IPVA	TCO BEV: Cenário Base + Inventivo IPI + ICMS + IPVA + Energia do Mercado Livre	TCO BEV: Cenário Base + Inventivo IPI + ICMS + IPVA + Energia do Mercado Livre - Troca da Bateria	TCO BEV: Cenário Base - Troca da Bateria	TCO BEV: Cenário Base - Recompensação tributária	TCO BEV: Cenário Base - Troca da Bateria - Recompensação tributária	TCO ICE
Ano	[US\$]	[US\$]	[US\$]	[US\$]	[US\$]	[US\$]	[US\$]	[US\$]	[US\$]
2023	33040	30378	26355	26002	28273	35311	34558	36829	26113
2024	30052	27653	24028	23675	25875	32252	31550	33750	26117
2025	29745	27373	23789	23436	25568	31876	31223	33355	26121
2026	29446	27101	23557	23204	25269	31512	30906	32972	26126
2027	29157	26837	23332	22978	24979	31158	30598	32599	26132
2028	28876	26581	23113	22760	24751	30867	30299	32289	26138
2029	28604	26332	22901	22547	24528	30584	30008	31988	26146
2030	28339	26091	22695	22341	24312	30310	29725	31695	26154
2031	28082	25857	22495	22142	24102	30043	29450	31410	26162
2032	27833	25630	22301	21947	23898	29783	29183	31133	26171
2033	27591	25409	22112	21759	23699	29532	28923	30864	26181
2034	27356	25195	21929	21576	23506	29287	28671	30601	26192
2035	27128	24987	21752	21399	23319	29049	28426	30346	26203
2036	27084	24947	21718	21364	23275	28995	28373	30284	26232
2037	27041	24907	21684	21330	23231	28941	28321	30222	26262
2038	26997	24867	21650	21296	23187	28888	28269	30160	26292
2039	26954	24828	21616	21263	23144	28835	28217	30098	26322
2040	26911	24788	21582	21229	23101	28782	28166	30037	26353
2041	26868	24749	21549	21195	23057	28730	28114	29976	26384
2042	26825	24710	21515	21162	23014	28677	28063	29916	26415
2043	26782	24671	21482	21129	22981	28634	28012	29865	26447
2044	26739	24632	21449	21096	22948	28592	27961	29814	26479
2045	26697	24594	21416	21063	22915	28550	27911	29763	26512
2046	26655	24555	21383	21030	22882	28507	27861	29713	26545
2047	26613	24517	21350	20997	22850	28465	27811	29663	26578
2048	26571	24479	21318	20965	22817	28423	27761	29613	26612
2049	26529	24441	21285	20932	22784	28382	27711	29563	26646
2050	26488	24403	21253	20900	22752	28340	27661	29514	26680

Tempo de propriedade: 10 anos									
	TCO BEV: Cenário Base	TCO BEV: Cenário Base + Inventivo IPI + ICMS	TCO BEV: Cenário Base + Inventivo IPI + ICMS + IPVA	TCO BEV: Cenário Base + Inventivo IPI + ICMS + Energia do Mercado Livre	TCO BEV: Cenário Base + Inventivo IPI + ICMS + IPVA + Energia do Mercado Livre - Troca da Bateria	TCO BEV: Cenário Base - Troca da Bateria	TCO BEV: Cenário Base - Recompensação tributária	TCO BEV: Cenário Base - Troca da Bateria - Recompensação tributária	TCO ICE
Ano	[US\$]	[US\$]	[US\$]	[US\$]	[US\$]	[US\$]	[US\$]	[US\$]	[US\$]
2023	48544	45882	39882	39305	41576	50815	51026	53297	39480
2024	44200	41801	36395	35817	38018	46400	46650	48850	39479
2025	43753	41381	36036	35459	37591	45885	46172	48303	39480
2026	43320	40974	35689	35111	37176	45385	45707	47772	39481
2027	42899	40579	35351	34773	36774	44900	45256	47257	39484
2028	42491	40196	35023	34446	36436	44482	44817	46808	39487
2029	42095	39823	34705	34127	36108	44075	44390	46371	39492
2030	41710	39462	34396	33819	35789	43681	43976	45947	39498
2031	41337	39112	34097	33519	35479	43297	43573	45534	39505
2032	40975	38771	33806	33228	35179	42925	43182	45132	39513
2033	40623	38441	33524	32946	34886	42563	42801	44742	39522
2034	40282	38120	33250	32672	34602	42212	42431	44362	39532
2035	39950	37809	32983	32406	34326	41871	42072	43992	39543
2036	39886	37749	32932	32355	34265	41797	41994	43904	39584
2037	39823	37689	32881	32304	34204	41723	41916	43817	39624
2038	39759	37630	32830	32253	34144	41650	41839	43730	39666
2039	39696	37570	32780	32202	34083	41578	41762	43644	39708
2040	39634	37511	32729	32152	34023	41505	41686	43557	39751
2041	39571	37453	32679	32101	33963	41433	41610	43472	39794
2042	39509	37394	32629	32051	33904	41361	41534	43386	39837
2043	39447	37336	32579	32002	33854	41299	41458	43311	39882
2044	39385	37278	32530	31952	33804	41237	41383	43235	39927
2045	39323	37220	32480	31903	33755	41176	41308	43160	39972
2046	39262	37162	32431	31853	33706	41114	41233	43086	40018
2047	39201	37105	32382	31804	33657	41053	41159	43012	40065
2048	39140	37048	32333	31755	33608	40992	41085	42938	40112
2049	39079	36991	32284	31707	33559	40932	41012	42864	40160
2050	39019	36934	32236	31658	33511	40871	40938	42791	40209

Tempo de propriedade: 15 anos									
	TCO BEV: Cenário Base	TCO BEV: Cenário Base + Inventivo IPI + ICMS	TCO BEV: Cenário Base + Inventivo IPI + ICMS + IPVA	TCO BEV: Cenário Base + Inventivo IPI + ICMS + IPVA + Energia do Mercado Livre	TCO BEV: Cenário Base + Inventivo IPI + ICMS + IPVA + Energia do Mercado Livre - Troca da Bateria	TCO BEV: Cenário Base - Troca da Bateria	TCO BEV: Cenário Base - Recompensação tributária	TCO BEV: Cenário Base - Troca da Bateria - Recompensação tributária	TCO ICE
Ano	[US\$]	[US\$]	[US\$]	[US\$]	[US\$]	[US\$]	[US\$]	[US\$]	[US\$]
2023	55957	53295	46237	45517	47788	58228	59051	61322	46451
2024	50993	48593	42234	41514	43714	53193	54047	56247	46444
2025	50482	48110	41822	41102	43234	52614	53497	55629	46438
2026	49987	47641	41423	40703	42768	52052	52963	55029	46434
2027	49506	47186	41035	40315	42316	51507	52444	54445	46432
2028	49040	46744	40659	39939	41930	51031	51939	53930	46430
2029	48587	46315	40294	39574	41555	50568	51449	53430	46430
2030	48147	45899	39940	39220	41190	50118	50972	52943	46431
2031	47721	45495	39596	38876	40836	49681	50509	52469	46434
2032	47307	45103	39262	38542	40492	49257	50059	52009	46438
2033	46905	44723	38938	38218	40158	48845	49621	51561	46443
2034	46515	44353	38623	37903	39833	48445	49195	51125	46449
2035	46136	43995	38318	37598	39518	48056	48781	50701	46457
2036	46063	43925	38259	37539	39449	47974	48691	50601	46501
2037	45990	43857	38201	37480	39381	47891	48601	50501	46545
2038	45918	43788	38142	37422	39313	47809	48511	50402	46591
2039	45846	43720	38084	37364	39245	47727	48422	50303	46637
2040	45774	43652	38026	37306	39178	47646	48333	50204	46683
2041	45703	43584	37969	37248	39110	47565	48244	50106	46731
2042	45632	43517	37911	37191	39043	47484	48156	50009	46779
2043	45561	43450	37854	37134	38986	47413	48069	49921	46827
2044	45490	43383	37797	37077	38929	47342	47981	49834	46877
2045	45420	43316	37740	37020	38872	47272	47894	49747	46927
2046	45349	43250	37684	36964	38816	47202	47808	49660	46978
2047	45280	43184	37627	36907	38760	47132	47721	49574	47029
2048	45210	43118	37571	36851	38704	47062	47635	49488	47081
2049	45141	43052	37516	36795	38648	46993	47550	49402	47134
2050	45072	42987	37460	36740	38592	46924	47465	49317	47188

Variáveis de entrada do modelo não explicitas no texto (valores sem unidade, são adimensionais)

Variável	Valor
α_{0me}	1023
α_{1me}	25,4
E_{me}	60kW
α_{2me}	1,006
α_{0mee}	300
α_{1mee}	22,3
E_{mee}	60kW
R	402 km
Ch_{eff}	85%
B_{swing}	96%
M_m	5%
M_r	15%
C_i	10%
$C_d(ICE)$	US\$ 8508,00
$C_d(BEV)$	US\$ 8304,00