

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Análise do Custo Total de Propriedade e Depreciação: Um Estudo Comparativo entre Veículos Elétricos e a Combustão no Cenário Brasileiro.

Autor: Gabriel Ferreira do Sacramento;

Orientador: Prof. Fernando Antônio Rodrigues Filho, Dr;

**Belo Horizonte
2026**

GABRIEL FERREIRA DO SACRAMENTO

Análise do Custo Total de Propriedade e Depreciação: Um Estudo Comparativo entre Veículos Elétricos e a Combustão no Cenário Brasileiro.

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado no
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas
Gerais, como requisito parcial para a obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Antônio
Rodrigues Filho.

**Belo Horizonte
2026**

S123a Sacramento, Gabriel Ferreira do
Análise do custo total de propriedade e depreciação: um estudo comparativo entre veículos elétricos e a combustão no cenário brasileiro / Gabriel Ferreira do Sacramento – 2026.
76 f. : il., gráfs., tabs.

Trabalho de conclusão de curso apresentado no curso de graduação do Programa de Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

Orientador: Fernando Antônio Rodrigues Filho.

Banca examinadora: Fernando Antônio Rodrigues Filho, Thiago Augusto Araújo Moreira e Márcio Expedito Guzzo.

Bibliografia: f. 72-76.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Veículos elétricos – Teses. 2. Gestão de operações – Custos – Teses. 3. Depreciação (Economia) – Teses. 4. Baterias de íon-lítio – Teses. 5. Automóveis – Projetos e construção – Teses. I. Rodrigues Filho, Fernando Antônio. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título.

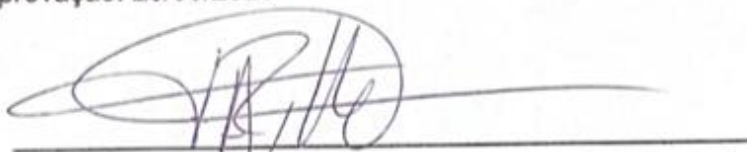
CDD 629.2542081

GABRIEL FERREIRA DO SACRAMENTO

**ANÁLISE DO CUSTO TOTAL DE PROPRIEDADE E DEPRECIAÇÃO: UM
ESTUDO COMPARATIVO ENTRE VEÍCULOS ELÉTRICOS E A
COMBUSTÃO NO CENÁRIO BRASILEIRO.**

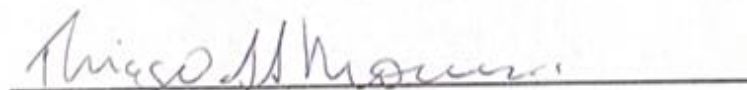
Trabalho de Conclusão de Curso, apresentada no Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Data de aprovação: 25/06/2026



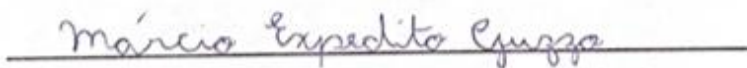
Prof. Fernando Antônio Rodrigues Filho, Dr, Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Nova Gameleira
CEFET-MG - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Prof. Thiago Augusto Araújo Moreira, Dr, Avaliador

Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Nova Gameleira
CEFET-MG - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Prof. Márcio Expedito Guzzo, Dr, Avaliador

Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Nova Gameleira
CEFET-MG - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

“Dedico este trabalho à minha família, especialmente à minha mãe, que, desde o início, acreditou em mim, me apoiando incondicionalmente em todos os momentos dessa jornada. Sua força, carinho e fé foram fundamentais para que eu pudesse chegar até aqui.

Aos meus professores, que compartilharam seus conhecimentos e orientaram meus passos ao longo dessa caminhada, sou profundamente grato por sua dedicação e inspiração, que me guiaram até este momento de conclusão do curso de Engenharia Mecânica.

*A todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste sonho,
deixo aqui minha eterna gratidão.”*

AGRADECIMENTOS

Antes de iniciar este trabalho, sinto que é fundamental expressar minha profunda gratidão ao meu professor e orientador. Sua postura sempre paciente, aliada a uma generosidade incomparável e à disposição constante para compartilhar conhecimento, foi determinante para que eu pudesse superar cada desafio deste curso. Ele não apenas transmitiu conteúdos técnicos com maestria, mas pôde enxergar e valorizar as dificuldades e inseguranças dos alunos, oferecendo apoio nos momentos mais críticos. Seu incentivo foi um verdadeiro farol, guiando-me com sabedoria e empatia em situações de dúvida e incerteza.

Toda essa dedicação teve um impacto significativo, não só na conclusão deste trabalho, mas na minha formação como um todo. A participação do professor Fernando foi essencial em todas as etapas do projeto. Ele acompanhou cada fase com entusiasmo genuíno e um compromisso admirável com a excelência. A sua proximidade constante, a disponibilidade para sanar dúvidas e, sobretudo, a sua capacidade de motivar os alunos fizeram toda a diferença. Sua orientação criteriosa e seu olhar atento aos detalhes garantiram que o projeto alcançasse um nível de qualidade que, por mim mesmo, talvez não conseguisse atingir. O professor Fernando não foi apenas um orientador acadêmico, mas também um verdadeiro exemplo de profissionalismo e dedicação, inspirando-me a buscar continuamente o melhor em cada tarefa.

Não posso deixar de ressaltar a importância do CEFET-MG em minha trajetória. Durante todo o período em que estive na instituição, pude perceber o compromisso sincero com uma formação sólida e de qualidade. Ter à disposição laboratórios modernos, bem fornecidos e atualizados foi uma oportunidade que tornou possível a realização deste trabalho, além de proporcionar experiências práticas enriquecedoras. Essas vivências foram fundamentais para consolidar os conhecimentos teóricos adquiridos em sala de aula, permitindo que eu desenvolvesse habilidades técnicas e criativas. Os técnicos e demais profissionais que atuam nos bastidores merecem um agradecimento especial, pois sua dedicação e zelo garantem o funcionamento exemplar da estrutura. Eles são, muitas vezes, os responsáveis por criar um ambiente propício para o aprendizado, sempre prontos para ajudar, resolver problemas e compartilhar experiências.

Ao longo da minha caminhada, encontrei professores e colegas que contribuíram de forma decisiva para o meu crescimento. As discussões em grupo, as orientações recebidas, os incentivos nos momentos de desânimo e as trocas de vivências foram essenciais não apenas

para minha evolução acadêmica, mas também para meu amadurecimento pessoal. Cada conversa, cada feedback construtivo e cada desafio superado em conjunto fortaleceram laços e me ensinaram lições valiosas sobre colaboração, respeito e resiliência. Sinto que aprendi tanto fora quanto dentro da sala de aula, e muito disso devo às pessoas que estiveram ao meu lado, sempre dispostas a ajudar.

Por fim, estendo meus agradecimentos a todos que, direta ou indiretamente, participaram da minha formação. Familiares, amigos, colegas, professores e funcionários, independentemente da distância ou da intensidade do contato, tiveram um papel importante em minha trajetória. Seja por meio de palavras de apoio, gestos de confiança ou simples demonstrações de carinho, cada contribuição foi essencial para que eu tivesse forças para seguir em frente, inclusive nos momentos de maior dificuldade. Este trabalho, assim, é fruto não apenas do meu esforço, mas também da confiança, incentivo e apoio de todos que, de alguma forma, acreditaram em mim. Sou imensamente grato a cada um, e levo comigo a certeza de que não teria chegado até aqui sem essa rede de apoio tão especial.

À minha família, dedico um agradecimento imensurável pelo apoio incondicional desde o primeiro dia desta jornada. Eles foram minha base sólida e o combustível para que eu não desistisse. Ao longo de toda a graduação, a rotina não foi simples: precisei dividir as minhas noites com trabalhos de freelancer em bares e eventos para complementar a renda pessoal e viabilizar a permanência no curso. Mesmo diante do cansaço físico e mental dessas longas jornadas duplas, saber que eu tinha o amor, a compreensão e o suporte dos meus familiares em casa fazia com que cada noite de sono perdida valesse a pena. Esta conquista é, acima de tudo, nossa.

RESUMO

Este trabalho analisa a viabilidade econômica da eletrificação da frota de veículos leves no mercado brasileiro sob a ótica da metodologia de Custo Total de Propriedade (TCO), preenchendo uma lacuna crítica na literatura sobre transição energética e descarbonização setorial. Impulsionada pela superioridade dos propulsores elétricos, cuja eficiência energética supera 90% frente aos 40% dos motores de combustão interna, a pesquisa desenvolve uma modelagem matemática robusta aplicada à projeção de custos acumulados ao longo de um horizonte operacional de oito anos e 120.000 quilômetros. A metodologia fundamentou-se no exame comparativo rigoroso de pares equivalentes em múltiplos segmentos automotivos, integrando dados públicos do Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV/Inmetro), séries temporais de desvalorização da Tabela Fipe e modelagem de custos operacionais com energia, combustíveis, manutenção e seguros. Os resultados empíricos revelam que o principal gargalo à viabilidade econômica dos veículos elétricos reside na severidade de sua depreciação patrimonial, que registrou uma perda média acumulada de 37,20% ao final do ciclo, em contraste com a maior previsibilidade e estabilidade dos modelos térmicos, que apresentaram desvalorização de 19,18%. Embora a vantagem operacional em despesas energéticas e revisões mecânicas seja estatisticamente robusta para todos os cenários, o elevado dispêndio inicial de capital (CAPEX) e custos acessórios, como apólices de seguro elevadas e pneus de alta carga, atenuam o retorno financeiro líquido. Na análise segmentada, os modelos de entrada demonstraram maior propensão à paridade financeira em regimes de alta utilização, enquanto os segmentos premium sofrem forte erosão de valor pelo impacto da depreciação. Adicionalmente, testes de estresse tecnológico comprovam a fragilidade desse equilíbrio: a simulação de degradação severa nas baterias de íons de lítio demandando substituição integral das baterias inviabilizou o TCO em 100% dos casos. Conclui-se que a competitividade da mobilidade elétrica no Brasil não é homogênea, estando intrinsecamente vinculada ao amadurecimento do mercado de usados, à redução dos custos de reposição de baterias e ao aproveitamento estratégico da matriz elétrica renovável do país, coexistindo de forma complementar com a infraestrutura consolidada e os benefícios ambientais dos biocombustíveis nacionais.

Palavras-chave: mobilidade elétrica; TCO; desvalorização veicular; baterias de íons de lítio; engenharia automotiva.

ABSTRACT

This study analyzes the economic viability of electrifying the light-weight vehicle fleet in the Brazilian market through the Total Cost of Ownership (TCO) methodology, addressing a critical gap in the literature regarding energy transition and sector decarbonization. Driven by the technical superiority of electric powertrains, whose energy efficiency exceeds 90% compared to 40% in internal combustion engines, the research develops a robust mathematical modeling applied to the projection of accumulated costs over an operational horizon of eight years and 120,000 kilometers. The methodology was based on a rigorous comparative analysis of equivalent pairs across multiple automotive segments, integrating public data from the Brazilian Vehicle Labeling Program (PBEV/Inmetro), historical depreciation series from the Fipe Table, and operational cost modeling including energy, fuels, maintenance, and insurance. The empirical results reveal that the main bottleneck to the economic viability of electric vehicles lies in the severity of their capital depreciation, which registered an average accumulated loss of 37.20% at the end of the cycle, in contrast to the greater predictability and stability of internal combustion models, which presented a depreciation of 19.18%. Although the operational advantage in energy expenses and mechanical overhauls is statistically robust for all scenarios, the high initial capital expenditure (CAPEX) and ancillary costs, such as high insurance premiums and payload-specific tires, mitigate the net financial return. In the segmented analysis, entry-level models demonstrated a higher propensity for financial parity under high-utilization regimes, whereas premium segments suffer a sharp value erosion due to the impact of severe depreciation. Additionally, technological stress tests prove the fragility of this economic balance: simulating a severe degradation in lithium-ion batteries that requires full component replacement rendered the TCO unviable in 100% of the evaluated cases. The study concludes that the competitiveness of electric mobility in Brazil is not homogeneous, being intrinsically linked to the maturity of the used car market, the reduction of battery replacement costs, and the strategic leverage of the country's renewable electricity matrix, which coexists complementarily with the consolidated infrastructure and environmental benefits of national biofuels.

Keywords: electric mobility; total cost of ownership; vehicle depreciation; lithium-ion batteries; automotive engineering.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Emissão Global por Setor	17
Figura 3.1 - Fluxograma	34
Figura 3.2 - Modelos dos Veículos Elétricos	36
Figura 3.3 - Pares Comparativos dos Veículos	37
Figura 3.4 - Dados de Consumo e Custo dos Modelos Elétricos	40
Figura 3.5 - Dados de Consumo e Custo dos Modelos à Combustão	40
Figura 4.1 – Depreciação Percentual.....	44
Figura 4.2 – Depreciação em Valores Absolutos	45
Figura 4.3 – Evolução da depreciação acumulada de veículos a combustão (2023–2026)	48
Figura 4.4 - Evolução do valor de mercado de veículos a combustão (2023–2026)	49
Figura 4.5 - Curva de desvalorização percentual dos veículos elétricos e convencionais	50

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Principais Veículos Elétricos Introduzidos no Brasil.....	25
Quadro 2.2 - Carros Elétricos mais vendidos no Brasil	25
Quadro 2.3 – Percentual de Veículos Elétricos no Brasil	26
Quadro 3.1 – Custos de Substituição do Pack de Baterias (Alta Tensão).....	41
Quadro 4.1 – Desvalorização dos Carros à Combustão	52
Quadro 4.2 - Desvalorização dos Carros Elétricos.....	53
Quadro 4.3 - Depreciação e Valor Residual dos Pares Analisados	55
Quadro 4.4 - Custos Operacionais Acumulados, Economia e Payback dos Pares Analisados.....	56
Quadro 4.5 - Fontes Recomendadas para Validação dos Custos de Manutenção	58
Quadro 4.6 - Detalhamento de Payback Operacional dos Pares Analisados.....	60
Quadro 4.7 - Resultado Consolidado com Cenário de Estresse da Bateria.....	63

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1. OBJETIVOS	15
1.1.1. OBJETIVOS GERAIS	15
1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1. TRANSIÇÃO ENERGÉTICA E MOBILIDADE SUSTENTÁVEL	16
2.2. DIFERENÇAS REGIONAIS NAS SOLUÇÕES DE MOBILIDADE SUSTENTÁVEL.....	19
2.3. EVOLUÇÃO HISTÓRICA DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS	21
2.4. MATRIZ ENERGÉTICA MUNDIAL	22
2.5. EVOLUÇÃO DA FROTA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS	23
2.6. TECNOLOGIAS DE BATERIAS UTILIZADAS EM VEÍCULOS ELÉTRICOS	26
2.6.1. EVOLUÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE BATERIAS	26
2.6.2. TIPOS DE BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO	27
2.6.3. DEGRADAÇÃO E VIDA ÚTIL DAS BATERIAS	28
2.6.4. REDUÇÃO DO CUSTO DAS BATERIAS	29
2.7. VIABILIDADE ECONÔMICA DA ELETRIFICAÇÃO DA FROTA.....	29
2.8. TCO.....	30
2.9. INDICADOR DE PAYBACK.....	32
3. METODOLOGIA.....	34
3.1. CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA.....	34
3.2. DEFINIÇÃO DA AMOSTRA E CRITÉRIOS DE EQUIVALÊNCIA TÉCNICA	35
3.2.1. SELEÇÃO DOS MODELOS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS E DEFINIÇÃO DOS PARES COMPARATIVOS.....	36
3.3. PROCEDIMENTO DE COLETA E TRATAMENTO DOS DADOS.....	37

3.4.	CÁLCULO DA TAXA DE DESVALORIZAÇÃO.....	38
3.5.	LEVANTAMENTO DOS CUSTOS OPERACIONAIS	39
3.5.1.	O CONSUMO, EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E O CUSTO DOS MODELOS AVALIADOS	39
3.5.2.	ANÁLISE DA DEPRECIAÇÃO E LONGEVIDADE DO SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	40
3.5.3.	MANUTENÇÃO E COMPLEXIDADE MECÂNICA	42
3.5.4.	COMPONENTES CRÍTICOS E DURABILIDADE.....	43
3.6.	ESTRATÉGIA DE ANÁLISE COMPARATIVA	43
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	44
4.1.	DEPRECIAÇÃO DOS MODELOS ELÉTRICOS VERSUS MODELOS A COMBUSTÃO.....	44
4.1.1.	COMPARAÇÃO INDIVIDUAL DAS CURVAS DE DEPRECIAÇÃO	44
4.1.2.	COMPARAÇÃO DAS MÉDIAS DE DEPRECIAÇÃO	49
4.2.	ANÁLISE DA VIABILIDADE ENTRE OS PARES DE COMPARAÇÃO.	54
4.2.1.	ANÁLISE CUSTOS OPERACIONAIS ACUMULADOS, ECONOMIA E PAYBACK DOS PARES ANALISADOS.....	56
4.2.2.	SÍNTESE ANALÍTICA DOS RESULTADOS.....	64
5.	CONCLUSÕES	67
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	70
7.	REFERÊNCIAS	72

1. INTRODUÇÃO

A indústria automotiva mundial atravessa atualmente um processo de transformação estrutural impulsionado pela necessidade de redução das emissões de gases de efeito estufa, pela evolução tecnológica dos sistemas de propulsão e pelas políticas globais de transição energética. Nesse cenário, os veículos elétricos assumem posição estratégica dentro das metas internacionais de descarbonização do setor de transportes, segmento historicamente dependente de combustíveis fósseis e responsável por aproximadamente 24% das emissões globais de CO₂ relacionadas à energia (IEA, 2024).

Ao longo do século XX, os motores de combustão interna consolidaram-se como principal solução de mobilidade em razão da elevada maturidade tecnológica, ampla disponibilidade de combustíveis e consolidação da infraestrutura global de abastecimento. Entretanto, apesar da robustez operacional dos motores térmicos modernos, observa-se uma limitação intrínseca relacionada à eficiência energética dos ciclos de potência. Em aplicações automotivas convencionais, motores a combustão apresentam eficiência máxima próxima de 40%, em decorrência das perdas térmicas associadas à rejeição de calor para o sistema de arrefecimento, atrito mecânico e rejeição de calor através dos gases de escape e do sistema de refrigeração (HEYWOOD, 2018).

Em contrapartida, os motores elétricos apresentam eficiência superior a 90%, convertendo grande parte da energia elétrica fornecida em trabalho mecânico efetivo (LARMINIE; LOWRY, 2012). Essa diferença de eficiência representa uma das principais vantagens técnicas da eletrificação automotiva, contribuindo diretamente para a redução do consumo energético e diminuição dos custos operacionais.

Além da elevada eficiência energética, os veículos elétricos apresentam benefícios adicionais relacionados à redução das emissões locais de poluentes atmosféricos, menor nível de ruído, disponibilidade instantânea do torque máximo e redução da quantidade de componentes mecânicos sujeitos ao desgaste. Tais características vêm impulsionando o crescimento da participação dos veículos eletrificados nos mercados automotivos globais (EAFO, 2024).

Entretanto, apesar dos avanços tecnológicos observados nos últimos anos, a eletrificação automotiva ainda enfrenta importantes limitações econômicas, técnicas, ambientais e de infraestrutura. O principal desafio relacionado à expansão dos veículos elétricos está associado

ao elevado custo inicial de aquisição (*Capital Expenditure* – CAPEX), fortemente influenciado pelo custo das baterias. As baterias de íons de lítio representam atualmente o componente de maior valor agregado dos veículos elétricos, impactando diretamente o preço final do produto (BloombergNEF, 2023). Além disso, os benefícios ambientais da eletrificação dependem diretamente da matriz elétrica utilizada para o carregamento dos veículos. Embora a geração global de eletricidade ainda apresente predominância de fontes fósseis, responsáveis por cerca de 55% da produção mundial em 2025, observa-se uma rápida expansão das fontes de baixa emissão de carbono. Na União Europeia, por exemplo, as fontes fósseis já representavam apenas 29% da geração elétrica em 2024, evidenciando o avanço da transição energética em economias desenvolvidas (IEA, 2026; Conselho da União Europeia, 2025).

Nesse contexto, destaca-se que o custo de capital (CAPEX) dos veículos elétricos é substancialmente superior ao dos veículos tradicionais equipados com motores de combustão interna, sendo essa diferença majoritariamente associada ao custo do sistema de baterias. Além disso, permanece amplamente difundido no mercado o questionamento relacionado à durabilidade dessa tecnologia, especialmente no que se refere ao impacto da degradação das baterias sobre a desvalorização dos veículos elétricos no mercado brasileiro. Segundo ONOHARA (2022), é um dos principais desafios para a aceitação em larga escala da mobilidade elétrica no Brasil, uma vez que o desgaste progressivo das baterias gera incertezas relacionadas à vida útil, confiabilidade operacional e custos futuros de manutenção e substituição das mesmas.

Além do custo inicial elevado, existe significativa preocupação relacionada à degradação química das baterias ao longo do ciclo de utilização do veículo. A perda gradual da capacidade de armazenamento energético reduz a autonomia operacional e pode impactar diretamente o valor residual do veículo no mercado de seminovos. Segundo *Neubauer e Pesaran* (2011), a degradação eletroquímica das baterias está diretamente associada aos ciclos de carga, temperatura de operação e envelhecimento químico das células.

No contexto brasileiro, a análise da viabilidade da eletrificação apresenta características particulares. Diferentemente de países cuja matriz energética permanece fortemente dependente de combustíveis fósseis, o Brasil possui uma das matrizes elétricas mais renováveis do mundo. Segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2024), aproximadamente 45% da matriz energética nacional é composta por fontes renováveis, com forte participação das usinas hidrelétricas, biomassa, energia solar e energia eólica. Essa característica amplia parcialmente

os benefícios ambientais da eletrificação automotiva no cenário nacional. Nesse contexto, o mercado secundário possui elevada relevância econômica para definição do valor patrimonial dos automóveis, a incerteza relacionada à durabilidade das baterias ainda representa um dos principais fatores de resistência à adoção da eletrificação automotiva. Além disso, a rápida evolução tecnológica dos veículos elétricos tende a acelerar a obsolescência tecnológica das gerações anteriores, influenciando diretamente as curvas de desvalorização dos modelos eletrificados (LUTSEY; NICHOLAS, 2019).

Dessa forma, a simples análise do custo inicial de aquisição torna-se insuficiente para avaliar a viabilidade econômica da eletrificação automotiva. Nesse contexto, o conceito de TCO torna-se fundamental para a realização de análises econômicas mais completas e tecnicamente fundamentadas. O TCO permite avaliar de forma integrada todos os custos associados ao ciclo de vida do veículo, incluindo depreciação patrimonial, consumo energético, manutenção, pneus, seguro, tributação e possíveis custos de substituição tecnológica. Segundo Palmer et al. (2018), análises fundamentadas exclusivamente no preço inicial de aquisição tendem a subestimar os benefícios operacionais dos veículos elétricos ao longo do tempo.

Sob essa perspectiva, a economia operacional proporcionada pelos veículos elétricos, principalmente em relação ao consumo energético e à redução da manutenção mecânica, deve ser capaz de compensar o investimento inicial adicional associado à aquisição do veículo eletrificado. Além disso, observa-se crescimento acelerado da oferta de veículos elétricos no mercado brasileiro, impulsionado principalmente pela entrada de fabricantes chinesas e pela ampliação gradual da infraestrutura nacional de recarga. Consequentemente, torna-se necessário compreender se a eletrificação automotiva já apresenta viabilidade econômica concreta dentro da realidade operacional brasileira.

Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo geral analisar a viabilidade econômica da eletrificação da frota de veículos leves por meio do método do TCO, realizando comparações entre veículos elétricos e veículos a combustão interna equivalentes ao longo de um ciclo operacional de oito anos. A pesquisa também contempla a construção das curvas de desvalorização patrimonial dos modelos analisados, permitindo avaliar quantitativamente o impacto da depreciação sobre o TCO dos veículos elétricos e térmicos.

Para ampliar a robustez da análise comparativa, o estudo foi desenvolvido a partir de diferentes pares de veículos pertencentes a múltiplos segmentos automotivos, incluindo hatchbacks compactos, SUVs médios, sedãs premium e veículos urbanos de entrada. Entre os

pares comparativos analisados destacam-se modelos como BMW i3 e Mini Cooper, Nissan *Leaf* e Volkswagen Polo *Highline*, BYD *Dolphin* Mini e Fiat Argo *Trekking*, Volvo XC40 *Recharge* e Toyota Corolla Cross, além de outros modelos equivalentes posicionados em categorias semelhantes de mercado.

Metodologicamente, o trabalho utiliza modelagem matemática aplicada à análise de *payback* econômico e projeção de custos acumulados ao longo do ciclo operacional dos veículos. Foram utilizados dados de consumo energético e eficiência obtidos por meio do Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV), desenvolvido pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), além de dados de desvalorização obtidos a partir da Tabela FIPE e informações complementares de mercado.

A metodologia também incorpora cenários de degradação severa do sistema de baterias, considerando o custo de reposição da bateria ao final. Essa abordagem busca aumentar o rigor técnico da pesquisa, permitindo avaliar de forma mais realista os impactos econômicos associados ao envelhecimento tecnológico dos VE (veículos elétricos). Portanto, o presente estudo busca realizar uma análise da viabilidade econômica atual dos VE no Brasil.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. OBJETIVO GERAL

Analisar a viabilidade econômica da eletrificação da frota de veículos leves no mercado brasileiro por meio da metodologia de TCO, considerando a construção das curvas de desvalorização patrimonial dos modelos analisados e a comparação técnica e econômica entre veículos elétricos e veículos equipados com motores de combustão interna pertencentes a segmentos equivalentes.

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A consecução do objetivo geral é realizada através dos seguintes objetivos específicos:

1. Construir curvas de desvalorização dos veículos elétricos e veículos a combustão analisados, utilizando dados históricos da Tabela FIPE e informações complementares de mercado;
2. Avaliar o comportamento da depreciação patrimonial dos veículos elétricos em comparação aos modelos térmicos equivalentes, analisando o impacto da evolução tecnológica sobre o valor residual dos ativos automotivos;
3. Comparar pares de veículos pertencentes a categorias semelhantes de mercado, considerando aspectos relacionados à eficiência energética, custos operacionais, manutenção, seguro, pneus, tributação e preservação patrimonial;
4. Determinar o TCO dos modelos analisados ao longo de um ciclo operacional de oito anos e quilometragem acumulada de 120.000 km;
5. Analisar a influência do elevado custo inicial de aquisição (CAPEX) sobre a viabilidade econômica dos veículos elétricos no contexto brasileiro;
6. Avaliar se a economia operacional proporcionada pelos veículos elétricos é suficiente para compensar os maiores custos relacionados ao investimento inicial, depreciação patrimonial e risco tecnológico;
7. Analisar a competitividade econômica da eletrificação em diferentes segmentos automotivos, incluindo hatchbacks compactos, SUVs médios, sedãs premium e veículos urbanos de entrada;
8. Correlacionar os resultados obtidos com o contexto da transição energética automotiva brasileira, considerando a expansão da infraestrutura de recarga, o avanço tecnológico das baterias e o crescimento da participação dos veículos elétricos no mercado nacional.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica deste trabalho tem como objetivo apresentar os principais fundamentos teóricos e técnicos relacionados à análise da viabilidade econômica da eletrificação de frotas, com foco na comparação entre veículos elétricos e veículos equipados com motores a combustão interna sob a perspectiva do Total Cost of Ownership (TCO) e do indicador de *payback*. Para isso, são abordados temas essenciais como a transição energética e a mobilidade sustentável, as diferenças regionais nas estratégias de descarbonização do transporte, a evolução histórica dos veículos elétricos, a caracterização das matrizes energéticas mundial e brasileira, a expansão da frota de veículos elétricos no Brasil e no mundo, além da relevância dos biocombustíveis, especialmente o etanol, no contexto nacional. Também são discutidos aspectos relacionados às tecnologias de baterias, aos custos operacionais e de manutenção, bem como aos critérios econômicos utilizados para avaliar a viabilidade da substituição de frotas convencionais por frotas eletrificadas. Dessa forma, busca-se construir o embasamento necessário para a análise comparativa proposta neste estudo, considerando as particularidades técnicas, econômicas e energéticas que influenciam a tomada de decisão sobre a adoção da mobilidade elétrica no Brasil.

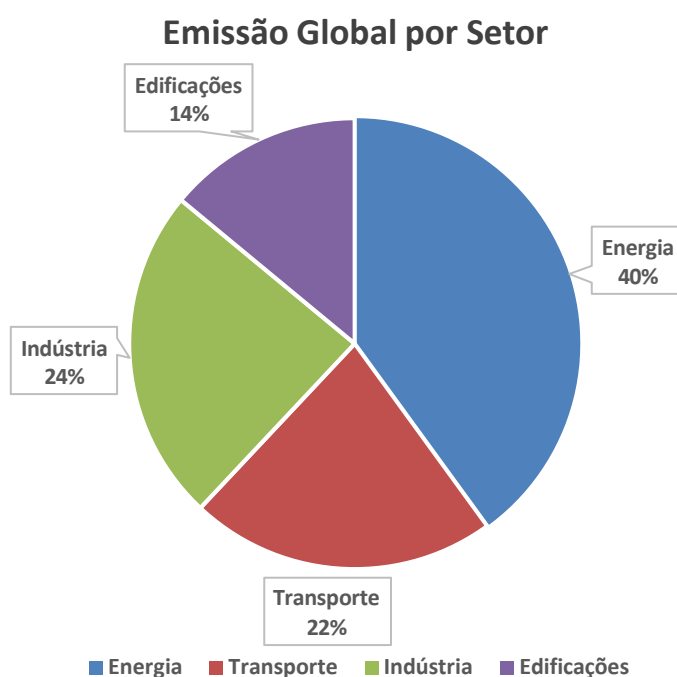
2.1. TRANSIÇÃO ENERGÉTICA E MOBILIDADE SUSTENTÁVEL

Nas últimas décadas, a crescente preocupação com as mudanças climáticas e com a segurança energética tem impulsionado discussões acerca da necessidade de transformação dos sistemas energéticos globais. Esse processo, frequentemente denominado transição energética, envolve a substituição gradual de fontes energéticas baseadas em combustíveis fósseis por alternativas de menor impacto ambiental, como fontes renováveis e tecnologias mais eficientes (IEA, 2023).

Dentro desse contexto, o setor de transportes ocupa posição de destaque nas discussões sobre descarbonização. De acordo com a *International Energy Agency*, as emissões globais de CO₂ relacionadas à energia atingiram 37,4 Gt em 2023, representando novo recorde histórico (IEA, 2024). Nesse cenário, o setor de transportes responde por parcela relevante das emissões globais, tendo emitido aproximadamente 8 Gt de CO₂ em 2022, valor equivalente a cerca de 21% a 24% das emissões globais associadas à energia, a depender do recorte metodológico adotado (IEA, 2023; IEA, 2024). Além disso, a IEA destaca que o transporte rodoviário representa a maior parcela das emissões do setor de transportes, em razão da predominância de veículos movidos a derivados de petróleo, especialmente gasolina e diesel (IEA, 2023). Dessa

forma, a eletrificação da mobilidade surge como uma das alternativas tecnológicas para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e mitigar as emissões associadas ao transporte rodoviário. A Figura 2.1 ilustra a participação dos principais setores nas emissões globais de CO₂ relacionadas à energia, evidenciando a representatividade do transporte no total emitido e reforçando sua relevância nas estratégias globais de descarbonização.

Figura 2.1 - Emissão Global por Setor



Fonte: Autor, 2026.

Diante desse cenário, diferentes estratégias vêm sendo propostas para reduzir o impacto ambiental do setor de transportes. Entre essas estratégias destacam-se o aumento da eficiência energética dos veículos, a adoção de combustíveis alternativos e a eletrificação da mobilidade. A eletrificação da frota automotiva tem recebido atenção especial, uma vez que os veículos elétricos apresentam elevada eficiência energética quando comparados aos veículos equipados com motores de combustão interna. Estudos do *National Renewable Energy Laboratory* indicam que motores elétricos podem converter mais de 90% da energia armazenada em movimento mecânico, enquanto motores de combustão interna apresentam eficiência significativamente inferior, frequentemente limitada a valores inferiores a 40% (NREL, 2022).

Além da maior eficiência energética, os veículos elétricos apresentam vantagens adicionais relacionadas à redução das emissões locais de poluentes atmosféricos, contribuindo

para a melhoria da qualidade do ar em centros urbanos. Dessa forma, a eletrificação da mobilidade tem sido considerada um dos principais instrumentos para a construção de sistemas de transporte mais sustentáveis, especialmente quando combinada a matrizes elétricas baseadas em fontes renováveis de energia (IEA, 2023; TRANSPORT & ENVIRONMENT, 2022).

Entretanto, apesar das vantagens operacionais, a literatura aponta que a eletrificação da mobilidade também apresenta desafios relevantes, especialmente quando analisada sob a perspectiva do ciclo de vida dos veículos. Estudos conduzidos por montadoras como Volkswagen e Volvo indicam que a fabricação de veículos elétricos gera emissões de CO₂ superiores às de veículos a combustão interna, principalmente em função da produção das baterias. Em alguns casos, estima-se que a fabricação de um veículo elétrico possa emitir até 8 toneladas adicionais de CO₂ equivalente quando comparado a um veículo convencional, o que representa aproximadamente o dobro das emissões na fase de produção (VOLVO, 2021; VOLKSWAGEN, 2020).

Nesse contexto, a análise da viabilidade ambiental da mobilidade elétrica depende diretamente da matriz energética utilizada para geração de eletricidade. De acordo com a *International Energy Agency*, cerca de 65% da eletricidade mundial ainda é gerada a partir de fontes fósseis, enquanto na Europa esse valor pode atingir aproximadamente 72%, a depender da composição energética de cada país (IEA, 2023). Esses dados indicam que, em sistemas energéticos fortemente baseados em combustíveis fósseis, os benefícios ambientais dos veículos elétricos podem ser reduzidos.

Essa relação entre eletrificação e matriz energética torna-se ainda mais relevante quando se compara o cenário mundial com o contexto brasileiro. Enquanto a matriz elétrica global ainda apresenta elevada participação de fontes fósseis, o Brasil possui uma matriz elétrica majoritariamente renovável, com predominância da geração hidrelétrica e participação crescente de fontes como eólica, biomassa e solar. Essa característica reduz a intensidade de carbono da eletricidade consumida no país e potencializa os benefícios ambientais associados ao uso de veículos elétricos, uma vez que as emissões indiretas provenientes da recarga tendem a ser menores quando comparadas a países cuja geração elétrica depende fortemente de carvão, petróleo e gás natural (IEA, 2023; MALAQUIAS et al., 2019).

Além disso, a matriz energética brasileira também se diferencia pela presença consolidada dos biocombustíveis no setor de transportes. O etanol, produzido majoritariamente a partir da cana-de-açúcar, integra uma cadeia produtiva já desenvolvida no país e representa uma

alternativa nacional de menor intensidade de carbono em comparação aos combustíveis fósseis. Dessa forma, a discussão sobre mobilidade sustentável no Brasil deve considerar simultaneamente a eletrificação da frota e o uso de biocombustíveis, pois ambas as rotas tecnológicas se relacionam diretamente com as particularidades da matriz energética nacional (DAMASCENO, 2022; MALAQUIAS et al., 2019).

Por outro lado, em países como o Brasil, cuja matriz elétrica apresenta elevada participação de fontes renováveis, a eletrificação da mobilidade tende a resultar em reduções mais expressivas nas emissões de gases de efeito estufa ao longo do ciclo de vida dos veículos. Contudo, a análise da mobilidade sustentável no contexto nacional não deve se restringir à eletrificação, uma vez que o Brasil já possui uma alternativa tecnológica consolidada por meio do etanol.

O etanol, produzido majoritariamente a partir da cana-de-açúcar, apresenta um balanço de carbono altamente favorável, podendo ser considerado, em determinados contextos, como uma solução de baixa emissão ou até mesmo próxima à neutralidade de CO₂, uma vez que o dióxido de carbono liberado durante sua combustão é parcialmente compensado pela absorção de CO₂ no processo de crescimento da biomassa. Ademais, trata-se de uma tecnologia amplamente desenvolvida no Brasil, com elevada produtividade agrícola por hectare e uma cadeia consolidada de produção e distribuição em todo o território nacional, o que reforça sua relevância como alternativa energética no processo de descarbonização do setor de transportes (DAMASCENO, 2022; MALAQUIAS et al., 2019).

Dessa forma, a análise da mobilidade sustentável no Brasil deve considerar a coexistência de diferentes rotas tecnológicas, incluindo a eletrificação da frota e o uso de biocombustíveis, sendo fundamental avaliar essas alternativas de forma integrada, considerando suas particularidades técnicas, econômicas e ambientais ao longo de todo o ciclo de vida (DAMASCENO, 2022; IEA, 2023; MALAQUIAS et al., 2019).

2.2. DIFERENÇAS REGIONAIS NAS SOLUÇÕES DE MOBILIDADE SUSTENTÁVEL

Apesar da crescente relevância da eletrificação da mobilidade no cenário global, é importante reconhecer que as estratégias adotadas para a descarbonização do transporte variam significativamente entre diferentes regiões do mundo. Essas diferenças estão relacionadas a

fatores como disponibilidade de recursos naturais, características climáticas, estrutura da matriz energética e políticas públicas adotadas por cada país.

No caso do Brasil, a matriz energética apresenta características bastante distintas daquelas observadas em países da Europa e da América do Norte. O país possui condições climáticas favoráveis à produção de biomassa e biocombustíveis, especialmente o etanol produzido a partir da cana-de-açúcar. Essa vantagem decorre da combinação entre clima tropical, elevada incidência solar ao longo do ano e ampla disponibilidade de terras cultiváveis, fatores que conferem ao país elevada capacidade de produção agrícola e energética. Além disso, o Brasil possui aproximadamente 3.491.560 km² de terras cultiváveis, condição que, associada ao elevado nível de insolação, amplia significativamente o potencial nacional de produção de biomassa (DAMASCENO, 2022).

Dessa forma, a produção de etanol no Brasil não deve ser analisada apenas como uma alternativa complementar aos combustíveis fósseis, mas como uma rota tecnológica já consolidada para a mobilidade sustentável nacional. Além da disponibilidade territorial e climática, o país possui domínio técnico da produção e utilização do etanol em motores de combustão interna, bem como uma rede de distribuição estabelecida em todo o território nacional, o que torna esse biocombustível uma alternativa energética relevante e operacionalmente viável para o setor de transportes (DAMASCENO, 2022).

Essa condição contrasta com a realidade de países europeus, especialmente aqueles localizados no centro e norte da Europa, nos quais o clima temperado ou frio e a menor disponibilidade de terras cultiváveis limitam a produção de biomassa em escala compatível com a demanda energética do transporte. Assim, enquanto a eletrificação se apresenta como uma rota estratégica para regiões com menor aptidão agrícola, o Brasil dispõe de condições naturais, tecnológicas e logísticas que justificam a análise do etanol como uma alternativa própria e adequada à realidade nacional (DAMASCENO, 2022).

Estudos sobre a mobilidade sustentável no Brasil indicam que a produção de etanol possui vantagens significativas no contexto nacional, tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico. A produção de etanol a partir da cana-de-açúcar apresenta balanço energético positivo e contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa ao longo de seu ciclo de vida (MALAQUIAS et al., 2019). Além disso, o país possui uma infraestrutura consolidada de produção, distribuição e consumo desse biocombustível.

Em contraste, países europeus apresentam condições menos favoráveis à produção de biomassa em larga escala. O clima predominantemente temperado ou frio, aliado à menor disponibilidade de terras agrícolas, limita a expansão da produção de biocombustíveis nesses países. Dessa forma, a eletrificação da mobilidade surge como alternativa estratégica para a redução das emissões no setor de transportes nesses contextos (DAMASCENO, 2022).

Essa diferença estrutural evidencia a importância de considerar as particularidades de cada país ao analisar a viabilidade das diferentes estratégias de descarbonização do transporte. Enquanto a eletrificação da frota pode representar uma solução adequada para determinadas regiões, em outros contextos a combinação entre biocombustíveis e tecnologias híbridas pode apresentar resultados igualmente relevantes do ponto de vista ambiental e econômico.

2.3. EVOLUÇÃO HISTÓRICA DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS

A história dos veículos elétricos remonta ao final do século XIX, período em que diversas tecnologias de propulsão automotiva foram desenvolvidas simultaneamente. Nesse período inicial da indústria automobilística, veículos elétricos, veículos movidos a vapor e veículos equipados com motores de combustão interna competiam pela consolidação no mercado (LARMINIE; LOWRY, 2012). Durante as primeiras décadas do desenvolvimento automotivo, os veículos elétricos apresentavam algumas vantagens em relação aos motores a combustão, como operação silenciosa, ausência de vibração e maior simplicidade mecânica. Entretanto, fatores como a limitação da autonomia das baterias, o elevado custo de produção e o desenvolvimento da produção em massa de veículos a combustão contribuíram para o declínio da popularidade dos veículos elétricos ao longo do século XX (CHAN, 2007).

A consolidação dos motores de combustão interna foi impulsionada principalmente pela expansão da indústria petrolífera e pelo desenvolvimento de processos de produção em massa, como o sistema de linha de montagem introduzido por Henry Ford. A maior autonomia e o menor custo dos veículos a combustão tornaram essa tecnologia dominante no setor de transportes durante grande parte do século XX.

Entretanto, nas últimas décadas, uma combinação de fatores ambientais, tecnológicos e econômicos tem impulsionado o ressurgimento dos veículos elétricos no mercado automotivo. A crescente preocupação com as mudanças climáticas, aliada ao avanço das tecnologias de armazenamento de energia, tem favorecido o desenvolvimento de veículos elétricos mais eficientes e com maior autonomia. O avanço das baterias de íons de lítio, em particular, tem

desempenhado papel fundamental nesse processo, permitindo maior densidade energética e redução progressiva dos custos de produção. Como resultado, os veículos elétricos passaram a apresentar maior viabilidade comercial, impulsionando investimentos de montadoras e governos em todo o mundo (IEA, 2023).

No Brasil, a introdução de veículos elétricos ocorreu de forma gradual, principalmente a partir da década de 2010. Modelos como o BMW i3, lançado em 2014, representaram marcos importantes na introdução dessa tecnologia no mercado nacional, sendo posteriormente seguidos por veículos como o Renault Zoe e o Nissan *Leaf*, que contribuíram para ampliar a oferta de veículos elétricos disponíveis para os consumidores brasileiros (ANFAVEA, 2025).

2.4. MATRIZ ENERGÉTICA MUNDIAL

A matriz energética mundial ainda apresenta elevada dependência de combustíveis fósseis, refletindo o modelo de desenvolvimento industrial estruturado ao longo do século XX. De acordo com a *International Energy Agency*, carvão mineral, petróleo e gás natural permaneceram, por décadas, responsáveis por aproximadamente 80% da oferta global de energia, demonstrando que a transição energética ainda ocorre de forma gradual e desigual entre os diferentes países (IEA, 2023).

No setor de transportes, a dependência de combustíveis fósseis permanece elevada. Em escala global, aproximadamente 91% da energia consumida pelos transportes ainda é proveniente de derivados de petróleo e outras fontes fósseis, refletindo a predominância histórica dos motores de combustão interna e da infraestrutura consolidada de abastecimento. No Brasil, embora a participação de biocombustíveis seja superior à média mundial, cerca de 77,5% da energia utilizada no setor de transportes ainda possui origem fóssil. Esses indicadores evidenciam que o transporte rodoviário permanece entre os principais desafios para a descarbonização das economias modernas (IEA, 2025; EPE/MME, 2024).

Embora as fontes renováveis estejam em expansão, sua participação na matriz energética global ainda não é suficiente para alterar de forma imediata a predominância dos combustíveis fósseis. Segundo a IEA, as adições de capacidade renovável atingiram aproximadamente 507 GW em 2023, valor quase 50% superior ao registrado em 2022, impulsionado principalmente pelo crescimento da energia solar fotovoltaica e da energia eólica. Apesar do crescimento das fontes renováveis, os combustíveis fósseis ainda representam cerca de 80% da matriz energética

mundial, evidenciando os desafios associados à descarbonização dos sistemas energéticos globais (IEA, 2025).

No caso específico da geração de eletricidade, a matriz elétrica mundial também permanece fortemente associada a fontes fósseis. Dados da *International Energy Agency* indicam que, em 2023, o carvão mineral representou aproximadamente 35,5% da geração elétrica global, enquanto o gás natural respondeu por cerca de 22,1% e o petróleo por 2,6%. Assim, apenas essas três fontes fósseis representaram aproximadamente 60% da geração de eletricidade no mundo, evidenciando que a eletrificação da mobilidade não pode ser analisada de forma isolada da origem da energia utilizada para recarga dos veículos elétricos (IEA, 2023).

Essa condição é fundamental para a análise da mobilidade elétrica, pois os veículos elétricos não emitem gases poluentes durante sua operação local, mas as emissões associadas ao seu uso dependem diretamente da forma como a eletricidade é produzida. Em países cuja matriz elétrica é baseada majoritariamente em carvão ou gás natural, parte dos benefícios ambientais da eletrificação pode ser reduzida, uma vez que as emissões são deslocadas do escapamento do veículo para o sistema de geração de energia elétrica (IEA, 2023; SOVACOOOL; GRIFFITHS, 2020).

Por outro lado, em regiões com elevada participação de fontes renováveis, como hidrelétrica, eólica, solar e biomassa, a eletrificação da frota tende a apresentar resultados ambientais mais favoráveis ao longo do ciclo de vida. Dessa forma, a matriz energética mundial evidencia que a mobilidade elétrica deve ser avaliada de forma sistêmica, considerando não apenas a eficiência do veículo, mas também a origem da energia, a infraestrutura de geração e a composição energética de cada país ou região (IEA, 2023; SOVACOOOL; GRIFFITHS, 2020).

2.5. EVOLUÇÃO DA FROTA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

O mercado global de veículos elétricos tem apresentado crescimento significativo nas últimas duas décadas, impulsionado por avanços tecnológicos, políticas públicas de incentivo e aumento da preocupação com as mudanças climáticas.

De acordo com o relatório *Global EV Outlook*, publicado pela *International Energy Agency* (IEA), a frota global de veículos elétricos passou de aproximadamente 120 mil unidades em circulação em 2012 para cerca de 26 milhões de unidades em 2022. Esse aumento representa um crescimento superior a 21.500% em uma década. Apenas entre 2021 e 2022, a frota mundial

cresceu de aproximadamente 16,5 milhões para 26 milhões de veículos, correspondendo a um aumento de cerca de 57,6% em um único ano (IEA, 2023).

Esse crescimento concentrou-se principalmente na China, Europa e Estados Unidos. Em 2022, a China possuía aproximadamente 13,8 milhões de veículos elétricos em circulação, representando cerca de 53% da frota mundial. No mesmo período, a Europa registrou aproximadamente 7,8 milhões de veículos, enquanto os Estados Unidos alcançaram cerca de 3 milhões de unidades. Em conjunto, essas três regiões concentravam aproximadamente 95% da frota global de veículos elétricos, evidenciando sua relevância para a expansão da mobilidade elétrica em escala mundial (IEA, 2023).

Outro fator determinante para a expansão da mobilidade elétrica tem sido a redução do custo das baterias de íons de lítio. Estudos conduzidos pelo *National Renewable Energy Laboratory* indicam que o custo médio das baterias utilizadas em veículos elétricos apresentou redução expressiva ao longo da última década, passando de aproximadamente US\$ 1.200/kWh em 2010 para cerca de US\$ 150/kWh em 2022, o que representa uma queda superior a 87% no período (NREL, 2022; IEA, 2023). No Brasil, embora a participação dos veículos elétricos na frota total ainda seja limitada, observa-se crescimento consistente nas vendas e no número de modelos disponíveis no mercado. Dados recentes indicam que a frota de veículos eletrificados no país ultrapassou 300 mil unidades em 2023, representando menos de 1% da frota total de veículos leves, o que evidencia que a adoção dessa tecnologia ainda se encontra em estágio inicial no contexto nacional (ABVE, 2024).

A introdução de veículos elétricos no país ocorreu principalmente a partir da década de 2010, com a comercialização de modelos pioneiros que contribuíram para a inserção dessa tecnologia no mercado nacional. O quadro 2.1 apresenta os principais veículos elétricos introduzidos no Brasil e seus respectivos anos de lançamento, evidenciando a evolução da oferta de modelos ao longo do tempo.

Quadro 2.1 - Principais Veículos Elétricos Introduzidos no Brasil

Modelo	Montadora	Ano de lançamento
Nissan Leaf	Nissan	2010
Renault Zoe	Renault	2013
BMW i3	BMW	2014
BMW i8	BMW	2014
Chevrolet Bolt EV	Chevrolet	2017
Jaguar I-PACE	Jaguar	2018
Audi e-tron	Audi	2019
Porsche Taycan	Porsche	2019
Mini Cooper SE	Mini	2020
Volvo XC40 Recharge	Volvo	2021

Fonte: Adaptado de ANFAVEA (2025); ABVE (2024).

Além da expansão da oferta, o mercado nacional também apresenta crescimento nas vendas de veículos elétricos. O quadro 2.2 apresenta os modelos mais vendidos no Brasil em período recente, evidenciando a consolidação de determinadas montadoras e tecnologias no mercado nacional.

Quadro 2.2 - Carros Elétricos mais vendidos no Brasil

Modelo	Montadora	Vendas em 2023	Vendas em 2024	Vendas em 2025
BYD Dolphin	BYD	6.812	15.512	15.237
Volvo XC40 Recharge	Volvo	1.802	804	NR
GWM Ora 03	GWM	772	6.326	3.238
Renault Kwid E-Tech	Renault	312	1.051	1.093
Nissan Leaf	Nissan	370	NR	NR
BMW iX1	BMW	NR	NR	NR
Chevrolet Bolt EV	Chevrolet	NR	NR	NR
Peugeot e-208	Peugeot	NR	NR	NR
JAC E-JS1	JAC	508	1.119	NR
Audi e-tron	Audi	NR	NR	NR

Nota: NR indica que o modelo não figurou entre os dez veículos 100% elétricos mais vendidos no respectivo ano.

Fonte: Adaptado de ABVE (2024)

Adicionalmente, a evolução da frota de veículos elétricos no Brasil pode ser observada de forma quantitativa ao longo dos últimos anos. O Quadro 2.3 apresenta a evolução do número de

veículos eletrificados em circulação no país, bem como a taxa de crescimento anual, permitindo uma análise objetiva da expansão dessa tecnologia.

Quadro 2.3 – Percentual de Veículos Elétricos no Brasil

Ano	Frota (unidades)	Crescimento (%)
2015	1.000	-
2016	1.800	80%
2017	3.000	66%
2018	6.000	100%
2019	12.000	100%
2020	20.000	67%
2021	40.000	100%
2022	150.000	275%
2023	300.000	100%

Fonte: Adaptado de ABVE (2024).

2.6. TECNOLOGIAS DE BATERIAS UTILIZADAS EM VEÍCULOS ELÉTRICOS

O desenvolvimento e a evolução das tecnologias de armazenamento de energia representam um dos fatores mais relevantes para a viabilidade técnica e econômica dos veículos elétricos. As baterias são responsáveis por armazenar a energia elétrica necessária para a propulsão do veículo e, atualmente, representam o componente mais crítico do ponto de vista tecnológico e econômico. Estima-se que os sistemas de baterias possam representar entre 30% e 50% do custo total de um veículo elétrico, dependendo da tecnologia empregada e da capacidade energética do sistema (IEA, 2023; NREL, 2022).

Além do impacto econômico, as características das baterias influenciam diretamente aspectos fundamentais do desempenho dos veículos elétricos, como autonomia, tempo de recarga, vida útil e segurança operacional. Dessa forma, a evolução das tecnologias de baterias tem desempenhado papel central na expansão da mobilidade elétrica em escala global.

2.6.1. EVOLUÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE BATERIAS

Historicamente, diferentes tecnologias de baterias foram utilizadas no desenvolvimento de veículos elétricos. Entre as primeiras tecnologias empregadas destacam-se as baterias de chumbo-ácido, que foram amplamente utilizadas nos primeiros veículos elétricos desenvolvidos no final do século XIX e início do século XX. Essas baterias apresentam baixo

custo e tecnologia relativamente simples, porém possuem baixa densidade energética e elevado peso, o que limita sua aplicação em veículos modernos (NREL, 2022).

Posteriormente, surgiram as baterias de níquel-metal hidreto (NiMH), que passaram a ser utilizadas em veículos híbridos no final do século XX, como no caso do Toyota Prius. Essas baterias apresentam maior densidade energética quando comparadas às baterias de chumbo-ácido e melhor desempenho em ciclos de carga e descarga. Entretanto, ainda apresentam limitações relacionadas ao peso, ao custo e à eficiência energética quando comparadas às tecnologias mais recentes (IEA, 2023).

Atualmente, a tecnologia predominante nos veículos elétricos é baseada em baterias de íons de lítio, que apresentam elevada densidade energética, menor peso e maior eficiência quando comparadas às tecnologias anteriores. O avanço das baterias de íons de lítio permitiu ampliar significativamente a autonomia dos veículos elétricos e reduzir o peso dos sistemas de armazenamento de energia, fatores fundamentais para a viabilidade comercial dessa tecnologia (LI et al., 2020).

Além disso, as baterias de íons de lítio apresentam elevada eficiência energética, podendo alcançar níveis superiores a 90% de eficiência no processo de armazenamento e liberação de energia. Essa característica contribui para melhorar o desempenho energético global dos veículos elétricos e reduzir perdas durante os ciclos de carga e descarga (NREL, 2022).

2.6.2. TIPOS DE BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO

Embora as baterias de íons de lítio constituam atualmente a principal tecnologia utilizada em veículos elétricos, existem diferentes variações químicas dessa tecnologia, cada uma apresentando características específicas em termos de densidade energética, segurança, custo e durabilidade.

Entre as principais químicas utilizadas destacam-se as baterias NMC (Níquel-Manganês-Cobalto), NCA (Níquel-Cobalto-Alumínio) e LFP (Lítio-Ferro-Fosfato).

As baterias NMC são amplamente utilizadas em veículos elétricos devido à sua elevada densidade energética e bom equilíbrio entre desempenho e durabilidade. Essa tecnologia permite armazenar grande quantidade de energia em um volume relativamente reduzido, contribuindo para aumentar a autonomia dos veículos elétricos (IEA, 2023).

Já as baterias NCA, utilizadas principalmente por algumas montadoras como a Tesla, apresentam alta densidade energética e bom desempenho em aplicações de alta potência. Entretanto, essas baterias tendem a apresentar custo mais elevado e maior sensibilidade térmica quando comparadas a outras tecnologias (NREL, 2022).

Por outro lado, as baterias LFP têm se destacado nos últimos anos devido ao seu menor custo e maior estabilidade térmica. Embora apresentem densidade energética inferior às baterias NMC e NCA, as baterias LFP apresentam maior durabilidade e menor risco de superaquecimento, tornando-se uma alternativa atrativa para aplicações em veículos elétricos de menor custo e em sistemas de armazenamento estacionário de energia (IEA, 2023).

A escolha da tecnologia de bateria depende de diversos fatores, incluindo custo, desempenho desejado, requisitos de segurança e estratégia tecnológica adotada pelos fabricantes de veículos.

2.6.3. DEGRADAÇÃO E VIDA ÚTIL DAS BATERIAS

Outro aspecto relevante relacionado às baterias de veículos elétricos refere-se à sua degradação ao longo do tempo. A degradação das baterias está associada à perda gradual da capacidade de armazenamento de energia, fenômeno que ocorre devido aos processos químicos internos das células durante os ciclos de carga e descarga.

Diversos fatores podem influenciar a taxa de degradação das baterias, incluindo temperatura de operação, profundidade de descarga, taxa de carregamento e número de ciclos de carga. Estudos indicam que temperaturas elevadas e ciclos de carga muito rápidos podem acelerar o processo de degradação das baterias, reduzindo sua vida útil (NREL, 2022).

De modo geral, a vida útil das baterias utilizadas em veículos elétricos costuma variar entre 8 e 15 anos, dependendo da tecnologia empregada, das condições de uso e da gestão térmica do sistema de baterias. Muitos fabricantes oferecem garantias para as baterias com duração aproximada de oito anos ou determinada quilometragem, justamente em função da degradação gradual desse componente (IEA, 2023). Apesar da degradação inevitável ao longo do tempo, avanços tecnológicos recentes têm contribuído para melhorar significativamente a durabilidade das baterias, reduzindo a taxa de perda de capacidade e ampliando sua vida útil operacional.

2.6.4. REDUÇÃO DO CUSTO DAS BATERIAS

A redução do custo das baterias representa um dos fatores mais importantes para a expansão da mobilidade elétrica em escala global. Ao longo da última década, o custo das baterias de íons de lítio apresentou queda significativa, resultado do avanço tecnológico, da expansão da produção em larga escala e do desenvolvimento de cadeias globais de suprimento.

De acordo com dados da *International Energy Agency*, o custo médio das baterias utilizadas em veículos elétricos caiu de aproximadamente US\$ 1.200 por kWh em 2010 para valores próximos de US\$ 150 por kWh em 2022, representando uma redução superior a 85% nesse período (IEA, 2023).

Essa redução de custos tem sido determinante para aumentar a competitividade dos veículos elétricos em relação aos veículos equipados com motores de combustão interna. Estudos indicam que, à medida que os custos das baterias continuam diminuindo, espera-se que os veículos elétricos se tornem cada vez mais competitivos em termos econômicos, contribuindo para a expansão da eletrificação da frota automotiva (LI et al., 2020).

Além disso, pesquisas em desenvolvimento de novas tecnologias de baterias, como baterias de estado sólido, prometem ampliar ainda mais a densidade energética e reduzir os custos de produção no futuro. Essas inovações tecnológicas podem desempenhar papel fundamental na consolidação da mobilidade elétrica como alternativa dominante no setor de transportes nas próximas décadas (IEA, 2023).

2.7. VIABILIDADE ECONÔMICA DA ELETRIFICAÇÃO DA FROTA

A análise da viabilidade econômica constitui um dos aspectos mais relevantes na avaliação da adoção de novas tecnologias no setor de transportes. No caso dos veículos elétricos, embora existam vantagens ambientais e tecnológicas significativas, o custo inicial de aquisição ainda representa uma barreira importante para sua adoção em larga escala.

Diversos estudos têm analisado os fatores econômicos associados à eletrificação da frota automotiva, destacando a importância de considerar não apenas o preço de aquisição dos veículos, mas também os custos operacionais ao longo de sua vida útil. Entre os principais fatores analisados estão o consumo energético, os custos de manutenção, a durabilidade das baterias e a depreciação dos veículos (LI et al., 2020).

Artigos publicados em periódicos científicos como *Applied Energy* indicam que, embora os veículos elétricos apresentem custo inicial mais elevado, seus custos operacionais tendem a

ser menores devido à maior eficiência energética e à menor necessidade de manutenção mecânica. Motores elétricos possuem menor número de componentes móveis quando comparados aos motores de combustão interna, reduzindo a necessidade de manutenção e aumentando a eficiência do sistema de propulsão (LI et al., 2020).

Além disso, a diferença entre o preço da eletricidade e o custo dos combustíveis fósseis pode influenciar significativamente o custo por quilômetro rodado dos veículos elétricos. Em muitos cenários analisados, especialmente em países com matriz elétrica relativamente limpa e custos moderados de eletricidade, os veículos elétricos apresentam potencial de redução dos custos operacionais ao longo do tempo (SOVACOOOL; GRIFFITHS, 2020).

Entretanto, a viabilidade econômica da eletrificação da frota depende de diversos fatores contextuais, incluindo políticas públicas de incentivo, preços da energia, custos das baterias e perfil de utilização dos veículos. Dessa forma, análises econômicas detalhadas tornam-se essenciais para avaliar o potencial de adoção dessa tecnologia em diferentes cenários.

2.8. TCO

A avaliação da viabilidade econômica de diferentes tecnologias de transporte requer metodologias que considerem não apenas o custo inicial de aquisição dos veículos, mas também os custos associados à sua operação ao longo de toda a vida útil. Nesse contexto, o conceito de TCO tem sido amplamente utilizado em estudos relacionados à análise econômica de veículos elétricos e à gestão de frotas.

O TCO consiste em uma abordagem analítica que considera todos os custos associados ao ciclo de vida de um ativo, desde sua aquisição até o final de sua vida útil operacional. Diferentemente de análises baseadas apenas no preço de compra, o TCO permite avaliar de forma mais abrangente o impacto econômico das decisões de investimento, incorporando custos operacionais, custos de manutenção, depreciação e substituição de componentes (LETMATHE; SUESSENBAACH, 2017).

De acordo com estudos publicados na literatura científica, a análise de TCO tem sido amplamente aplicada na comparação entre veículos elétricos e veículos equipados com motores de combustão interna. Essa metodologia permite avaliar se o maior custo inicial de aquisição dos veículos elétricos pode ser compensado pelas economias operacionais ao longo do tempo, especialmente no que se refere ao consumo energético e à manutenção do sistema de propulsão (AL-ALAWI; BRADLEY, 2013).

De forma geral, o cálculo do TCO pode ser representado pela expressão 2.1:

$$TCO = C_{\text{aquisição}} + C_{\text{energia}} + C_{\text{manutenção}} + C_{\text{infraestrutura}} + C_{\text{substituição}} - V_{\text{residual}} \quad (2.1)$$

onde:

- $C_{\text{aquisição}}$ representa o custo inicial do veículo;
- C_{energia} corresponde ao custo total de energia consumida durante o período de uso;
- $C_{\text{manutenção}}$ representa os custos de manutenção ao longo da vida útil;
- $C_{\text{infraestrutura}}$ refere-se aos custos associados à infraestrutura de recarga;
- $C_{\text{substituição}}$ corresponde à eventual substituição de componentes críticos, como baterias;
- V_{residual} representa o valor de revenda do veículo ao final do período analisado.

No caso específico dos veículos elétricos, alguns componentes do TCO apresentam características distintas quando comparados aos veículos a combustão interna. O custo inicial de aquisição tende a ser significativamente maior, principalmente devido ao custo das baterias. Por outro lado, os custos operacionais tendem a ser menores, uma vez que a eletricidade costuma apresentar menor custo por unidade de energia quando comparada aos combustíveis fósseis (IEA, 2023). Além disso, os veículos elétricos apresentam menor número de componentes mecânicos móveis em seus sistemas de propulsão, o que contribui para reduzir a necessidade de manutenção quando comparados aos motores de combustão interna. Essa característica pode resultar em economias significativas ao longo do ciclo de vida do veículo (LI et al., 2020). Outro fator importante na análise de TCO refere-se ao custo das baterias. Como discutido anteriormente, as baterias representam um dos componentes mais caros dos veículos elétricos, podendo representar parcela significativa do custo total do veículo. Dessa forma, a durabilidade das baterias e o custo de sua eventual substituição exercem grande influência sobre o TCO dos veículos elétricos (NREL, 2022).

A análise de TCO também pode variar significativamente dependendo do perfil de utilização do veículo. Em aplicações com maior intensidade de uso, como frotas comerciais e veículos utilizados em logística urbana, a economia operacional proporcionada pelos veículos elétricos tende a se acumular mais rapidamente, tornando o TCO mais favorável quando comparado aos veículos a combustão (SOVACOL; GRIFFITHS, 2020).

Por essa razão, a metodologia de TCO tem sido amplamente utilizada em estudos sobre eletrificação de frotas, permitindo avaliar de forma mais precisa os impactos econômicos associados à adoção de veículos elétricos em diferentes cenários operacionais.

2.9. INDICADOR DE PAYBACK

Embora o TCO permita avaliar os custos associados ao ciclo de vida completo de um ativo, a análise de investimentos frequentemente requer indicadores que permitam identificar o tempo necessário para recuperar o capital inicialmente aplicado. Nesse contexto, o indicador de *Payback* constitui uma ferramenta amplamente utilizada na avaliação de projetos de investimento.

O *Payback* representa o período necessário para que os fluxos de caixa gerados por um investimento sejam suficientes para recuperar o capital inicialmente aplicado. Em outras palavras, trata-se do tempo necessário para que o investimento inicial seja compensado pelas economias ou receitas acumuladas ao longo do tempo (AL-ALAWI; BRADLEY, 2013).

Matematicamente, o *Payback* pode ser determinado a partir da relação 2.2:

$$\text{Payback} = \frac{\text{Investimento Inicial}}{\text{Fluxo de Caixa Anual}} \quad (2.2)$$

No contexto da eletrificação de frotas, o investimento inicial corresponde à diferença de custo entre o veículo elétrico e o veículo a combustão equivalente. Já o fluxo de caixa anual corresponde à economia operacional proporcionada pelo veículo elétrico, considerando fatores como custo de energia, manutenção e outras despesas operacionais (LETMATHE; SUESSENBAACH, 2017).

Assim, o *Payback* permite identificar o ponto em que as economias acumuladas proporcionadas pela operação do veículo elétrico superam o investimento adicional realizado na sua aquisição.

Assim como no caso do TCO, o *Payback* pode variar significativamente em função de diversos fatores, entre os quais destacam-se:

- quilometragem anual do veículo;
- preço da eletricidade;

- preço dos combustíveis fósseis;

- custo de aquisição do veículo;
- durabilidade e custo de troca das baterias;
- incentivos fiscais ou subsídios governamentais.

Estudos conduzidos pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) indicam que aplicações com alta intensidade de uso, como frotas comerciais e transporte urbano, tendem a apresentar períodos de *Payback* mais curtos, uma vez que a economia por quilômetro rodado se acumula de forma mais rápida (JOHNSON et al., 2020).

Entretanto, apesar de sua utilidade, o indicador de *Payback* apresenta algumas limitações analíticas. Uma das principais limitações consiste no fato de que esse indicador considera apenas o período necessário para recuperar o investimento inicial, desconsiderando os benefícios econômicos gerados após esse período. Dessa forma, o *Payback* não fornece uma medida completa da rentabilidade do investimento (SOVACOOOL; GRIFFITHS, 2020).

Por essa razão, o *Payback* é frequentemente utilizado em conjunto com outras metodologias de análise econômica, como o TCO, o Valor Presente Líquido (VPL) e a Taxa Interna de Retorno (TIR), permitindo realizar avaliações mais abrangentes da viabilidade econômica de projetos de investimento.

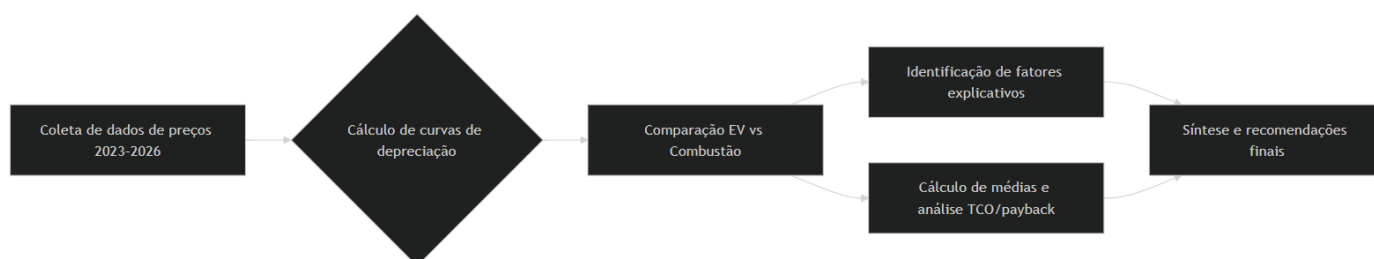
No presente estudo, o indicador de *Payback* é utilizado como ferramenta complementar à análise de TCO, permitindo estimar o tempo necessário para que a economia operacional associada à eletrificação da frota compense o diferencial de investimento inicial entre veículos elétricos e veículos equipados com motores de combustão interna.

3. METODOLOGIA

3.1. CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

A presente pesquisa é classificada como aplicada, pois busca gerar conhecimento com finalidade prática, voltado à análise econômica e operacional de veículos elétricos em comparação com veículos equipados com motores de combustão interna. Essa abordagem se justifica pelo crescimento da inserção dos veículos eletrificados no mercado brasileiro e pela necessidade de compreender, de forma mais aprofundada, os impactos econômicos dessa tecnologia ao longo do tempo, especialmente sob a perspectiva do consumidor final e da dinâmica do setor automotivo. O desenvolvimento metodológico seguido ao longo do trabalho está ilustrado no fluxograma apresentado na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia utilizada.



Fonte: Autor, 2026.

Quanto à abordagem metodológica, o estudo possui natureza quantitativa, uma vez que se baseia na coleta, organização e análise de dados numéricos relacionados à desvalorização veicular e aos custos operacionais. A utilização de indicadores quantitativos permite reduzir a subjetividade presente em análises exclusivamente qualitativas, proporcionando maior rigor científico e maior confiabilidade aos resultados obtidos. Além disso, a quantificação dos dados analisados possibilita comparações diretas entre diferentes tecnologias de propulsão, utilizando métricas padronizadas e critérios objetivos.

Em relação aos objetivos, a pesquisa apresenta caráter descritivo e comparativo. O aspecto descritivo está relacionado à identificação e à análise do comportamento econômico dos veículos ao longo do tempo, especialmente no que se refere à depreciação e aos custos de utilização. Já o caráter comparativo se estabelece pela avaliação das diferenças entre veículos elétricos e veículos a combustão, permitindo compreender as particularidades técnicas, operacionais e financeiras de cada tecnologia.

No que se refere aos procedimentos técnicos, trata-se de uma pesquisa documental, desenvolvida a partir da utilização de dados secundários obtidos em bases reconhecidas no setor

automotivo. Esse tipo de abordagem é amplamente empregado em estudos relacionados à mobilidade e à energia, principalmente quando o objetivo é analisar tendências de mercado, comportamento de ativos e evolução tecnológica ao longo do tempo (IEA, 2023). Dessa forma, a confiabilidade das fontes consultadas e o tratamento criterioso das informações tornam-se fatores essenciais para garantir a consistência e a validade dos resultados apresentados.

3.2. DEFINIÇÃO DA AMOSTRA E CRITÉRIOS DE EQUIVALÊNCIA TÉCNICA

A definição da amostra de veículos analisados foi conduzida de forma criteriosa, com base no princípio da equivalência técnica e funcional, o qual constitui um dos pilares metodológicos deste estudo. Esse princípio estabelece que a comparação entre veículos deve ser realizada entre modelos que desempenhem funções similares dentro do sistema de mobilidade, evitando distorções decorrentes da análise entre categorias distintas.

Nesse sentido, foram selecionados 9 modelos de veículos elétricos disponíveis no mercado brasileiro, ambos faturados em 2023, para que a comparação seja justa e que o cálculo da desvalorização fosse equivalente para todos os modelos e seus respectivos equivalentes a combustão interna, organizados em pares comparativos. A construção desses pares levou em consideração múltiplos critérios de engenharia automotiva, de forma a assegurar a comparabilidade entre os modelos analisados.

Entre os principais critérios adotados, destacam-se:

- arquitetura veicular e segmento;
- parâmetros dimensionais (comprimento, entre-eixos e largura);
- massa veicular e comportamento dinâmico;
- proposta de uso (urbano, familiar ou desempenho);
- faixa de potência e características dinâmicas;
- posicionamento de mercado e nível de tecnologia embarcada.

A utilização desses critérios permite reduzir a interferência de variáveis externas e assegurar que as diferenças observadas ao longo da análise estejam associadas, predominantemente, à tecnologia de propulsão. Conforme destacado por *Ehsani, Gao e Emadi* (2018), a comparação entre veículos com diferentes sistemas de propulsão deve considerar parâmetros estruturais e operacionais equivalentes, de modo a garantir a validade dos resultados.

3.2.1. SELEÇÃO DOS MODELOS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS E DEFINIÇÃO DOS PARES COMPARATIVOS

A seleção dos modelos de veículos elétricos considerados neste estudo foi realizada com base em dois critérios complementares: representatividade de mercado e maturidade de comercialização no cenário nacional.

O critério de representatividade de mercado está associado ao volume de comercialização dos modelos, priorizando veículos com maior presença no mercado brasileiro. Essa escolha permite que a análise reflita de maneira mais fiel o comportamento econômico observado na prática, uma vez que modelos com maior número de unidades vendidas tendem a apresentar maior liquidez no mercado de usados e maior disponibilidade de dados históricos.

Paralelamente, adotou-se o critério de maturidade de mercado, por meio da inclusão de veículos que estão há mais tempo disponíveis no país. Essa abordagem é fundamental para a análise da desvalorização, pois possibilita a construção de séries históricas mais consistentes, reduzindo incertezas associadas a modelos recém-lançados. A combinação desses dois critérios permite equilibrar a análise entre veículos consolidados e modelos mais recentes, capturando diferentes estágios de evolução tecnológica e aceitação de mercado. Com base nesses critérios, a figura 3.2 apresenta quais foram os modelos de veículos elétricos selecionados (2023):

Figura 3.2 - Modelos dos Veículos Elétricos

Modelo	Versão Específica	Código FIPE
BMW i3	i3 120Ah (Full) 170cv Elétrico (Ano Ref: 2022)	009249-5
Nissan Leaf	LEAF 40kWh Elétrico	024225-0
BYD Dolphin Mini	Dolphin Mini EV (Ano Ref: 2024)	011116-3
BYD Dolphin Diamond	Dolphin Diamond EV 95cv	011107-4
BYD Yuan Plus EV	Yuan Plus 310 EV 204cv	011099-0
Volvo XC40 Recharge	XC40 Recharge Ultimate (P8) AWD Elétrico	029143-9
GWM Ora 03	Ora 03 Skin 48kWh (Ano Ref: 2024)	095001-7
BYD Seal	Seal 390 EV 531cv (Ano Ref: 2024)	011108-2
Renault Kwid E-Tech	Kwid E-Tech 100% Elétrico	025301-4

Fonte: Adaptado, 2026.

Esses modelos abrangem diferentes segmentos do mercado automotivo, incluindo veículos urbanos de entrada, *hatch's* compactos, utilitários esportivos (SUVs) e sedans de médio porte. Essa diversidade permite ampliar o escopo da análise e avaliar o comportamento econômico da tecnologia elétrica em diferentes aplicações.

A partir da definição dos veículos elétricos, procedeu-se à seleção de modelos equivalentes equipados com motores de combustão interna, faturados no ano de 2023, estabelecendo pares comparativos com base nos critérios de equivalência técnica previamente definidos. Essa etapa é essencial para garantir a consistência metodológica da análise, assegurando que a comparação seja realizada entre veículos com características semelhantes de uso, porte e posicionamento de mercado. Os pares comparativos definidos são apresentados pela figura 3.3.

Figura 3.3 - Pares Comparativos dos Veículos

Modelo Elétrico	Modelo Combustão	Versão FIPE Específica	Código FIPE
BMW i3	Mini Cooper S Top 2.0	Cooper S Top 2.0 Turbo 16V 3p Aut.	038030-0
Nissan Leaf	Polo Highline	Highline 200 TSI 1.0 Flex 12V Aut.	005481-0
BYD Dolphin Mini	Argo Trekking 1.3	Trekking 1.3 8V Flex	001540-7
BYD Dolphin Diamond	City Hatch Touring 1.5	City Hatchback Touring 1.5 Flex 16V Aut.	002213-6
BYD Yuan Plus EV	Jeep Compass T270	Compass Longitude 1.3 T270 Turbo Flex Aut.	017103-4
Volvo XC40 Recharge	Toyota Corolla Cross	Corolla Cross XRE 2.0 Flex 16V Aut.	002196-2
GWM Ora 03	Cruze Hatch LTZ	Cruze Sport6 LTZ 1.4 Turbo 16V Flex Aut.	004455-5
BYD Seal	BMW 320i M Sport	320i M Sport 2.0 Turbo Flex 16V Aut.	009280-0
Renault Kwid E-Tech	Renault Kwid 1.0	Kwid Outsider 1.0 Flex 12V 5p	025281-6

Fonte: Adaptado, 2026.

A definição desses pares possibilita a realização de comparações diretas entre veículos que desempenham funções equivalentes dentro do sistema de mobilidade, minimizando a influência de variáveis externas, como porte ou categoria. Dessa forma, torna-se possível analisar de forma mais precisa as diferenças associadas às tecnologias de propulsão, especialmente no que se refere à desvalorização e aos custos operacionais.

Adicionalmente, a inclusão de modelos com diferentes níveis de maturidade tecnológica, desde veículos pioneiros no mercado elétrico até lançamentos mais recentes, permite observar tendências distintas de comportamento econômico, contribuindo para uma análise mais abrangente e representativa do cenário atual.

3.3. PROCEDIMENTO DE COLETA E TRATAMENTO DOS DADOS

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos a partir de fontes secundárias consolidadas, com destaque para a Tabela FIPE, amplamente reconhecida como referência nacional para valores médios de veículos no mercado brasileiro, e para relatórios da ANFAVEA, que fornecem informações relevantes sobre o contexto do setor automotivo.

A coleta de dados foi realizada de forma sistemática, considerando séries temporais de preços para cada veículo analisado. Essa abordagem permite capturar a evolução do valor de mercado ao longo do tempo, possibilitando a análise da desvalorização de maneira mais precisa e consistente.

Após a coleta, os dados foram submetidos a um processo de tratamento que envolveu múltiplas etapas. Inicialmente, foi realizada a padronização temporal, garantindo que os períodos analisados fossem comparáveis entre diferentes modelos, mesmo em casos de lançamentos em anos distintos. Em seguida, procedeu-se à suavização das séries, por meio da utilização de médias, com o objetivo de reduzir a influência de variações pontuais de curto prazo.

Adicionalmente, foi realizada a verificação de consistência dos dados, incluindo a identificação e eventual exclusão de valores discrepantes que não representassem o comportamento típico do mercado. Por fim, os dados foram organizados em séries históricas estruturadas, permitindo a aplicação de métodos de análise temporal. Esse conjunto de procedimentos visa assegurar a qualidade dos dados utilizados, aspecto fundamental para a robustez da análise. O tratamento adequado de dados secundários é essencial para garantir a validade de estudos quantitativos.

3.4. CÁLCULO DA TAXA DE DESVALORIZAÇÃO

A desvalorização dos veículos foi adotada como um dos principais indicadores econômicos deste estudo, uma vez que representa diretamente a perda de valor do ativo ao longo do tempo, sendo um fator relevante na análise de custo e na tomada de decisão do consumidor.

Inicialmente, foi calculada a variação percentual entre períodos consecutivos. Entretanto, considerando que a desvalorização não ocorre de forma linear ao longo do tempo, optou-se pela utilização da taxa média anual composta. Essa abordagem permite capturar o comportamento acumulado da desvalorização, fornecendo uma visão mais representativa da tendência de longo prazo.

Estudos recentes indicam que veículos elétricos podem apresentar padrões de desvalorização distintos, influenciados por fatores como evolução tecnológica acelerada e incertezas relacionadas à durabilidade das baterias (LUTSEY; NICHOLAS, 2019). Dessa forma, a análise desse indicador torna-se particularmente relevante no contexto comparativo proposto.

3.5. LEVANTAMENTO DOS CUSTOS OPERACIONAIS

3.5.1. O CONSUMO, EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E O CUSTO DOS MODELOS AVALIADOS

Para fundamentar a análise comparativa entre veículos elétricos e modelos a combustão, seguem duas tabelas elaboradas com base nos dados oficiais disponibilizados pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV), documento em anexo. Esses valores constituem a base técnica necessária para estimar o consumo energético, o custo por quilômetro rodado e o gasto anual, considerando uma média de 15.000 km por ano.

Na Figura 3.4, são apresentados os índices de consumo dos veículos elétricos, expressos em MJ/km e kWh/100 km, além do custo por quilômetro e do gasto anual correspondente. Na Figura 3.5, constam os modelos a combustão utilizados como referência, incluindo seus consumos urbanos (km/l), o volume de combustível necessário para o mesmo percurso anual e o custo total associado.

É importante destacar que todos os cálculos de custo foram realizados utilizando o valor médio do kWh informado pela CEMIG e o preço médio da gasolina divulgado pela Petrobras, ambos correspondentes ao estado de Minas Gerais. Complementarmente, a análise tributária considerou a alíquota de 4% para o cálculo do imposto (IPVA). Ressalta-se, no entanto, que o desconto ou isenção deste imposto no estado aplica-se exclusivamente a modelos elétricos que tenham sido fabricados em território mineiro, conforme a legislação vigente. Dessa forma, os resultados refletem de maneira fiel o cenário energético e econômico regional, entretanto não é aplicado para nenhum modelo neste estudo.

Figura 3.4 - Dados de Consumo e Custo dos Modelos Elétricos

Modelo	Consumo Segundo A PBEV (MJ/km)	Consumo (kWh/100km)	Consumo (kWh/km)	Preço/KM	Valor Gasto em 1 Ano/15.000 KM
BMW I3	0,47	13,05	0,1305	R\$ 0,1120	R\$ 1.680,67
Nissan Leaf	0,55	15,27	0,1527	R\$ 0,1311	R\$ 1.966,58
BYD Dolphin Mini	0,41	11,38	0,1138	R\$ 0,0977	R\$ 1.465,60
BYD Dolphin Diamond	0,42	11,66	0,1166	R\$ 0,1001	R\$ 1.501,66
BYD Yuan Plus Ev	0,47	13,05	0,1305	R\$ 0,1120	R\$ 1.680,67
Volvo Xc40 recharge	0,58	16,11	0,1611	R\$ 0,1383	R\$ 2.074,76
GWM Ora 03	0,51	14,16	0,1416	R\$ 0,1216	R\$ 1.823,62
BYD Seal	0,56	15,55	0,1555	R\$ 0,1335	R\$ 2.002,64
Renault Kwid E-Tech	0,44	12,22	0,1222	R\$ 0,1049	R\$ 1.573,78

Fonte: Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV); Imetro.

Figura 3.5 - Dados de Consumo e Custo dos Modelos à Combustão

Veículo Combustão	Km/l (Cidade) IMETRO	Litros em 1 Ano / 15.000 KM	Valor Gasto em 1 Ano/15.000 KM
Mini Cooper S Top 2.0	11,2	1339,2857	R\$ 8.169,64
Polo Highline	12,3	1219,5122	R\$ 7.439,02
Argo Trekking 1.3	13	1153,8462	R\$ 7.038,46
City Hatch Touring 1.5	13,3	1127,8195	R\$ 6.879,70
Jeep Compass T270	10,1	1485,1485	R\$ 9.059,41
Toyota Corolla Cross	11,6	1293,1034	R\$ 7.887,93
Cruze Hatch LTZ 1.0 Turbo	11,1	1351,3514	R\$ 8.243,24
BMW 320i (M Sport)	10,6	1415,0943	R\$ 8.632,08
Renault Kwid 1.0	15,2	986,8421	R\$ 6.019,74

Fonte: Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV); Imetro.

3.5.2. ANÁLISE DA DEPRECIAÇÃO E LONGEVIDADE DO SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

A acentuada desvalorização observada em veículos elétricos (VE's) fundamenta-se, predominantemente, no custo e na percepção de durabilidade do *Pack* de Baterias de Alta Tensão. Este componente, que historicamente representa entre 30% e 50% do custo total de fabricação do veículo, configura-se como o principal determinante da vida útil econômica do ativo.

O mercado de veículos seminovos reflete a incerteza quanto ao comportamento do componente após o encerramento do período de garantia. Quando a cobertura do fabricante,

comumente estipulada em oito anos, se aproxima do término, o risco financeiro associado a uma eventual falha técnica é transferido integralmente ao proprietário. Sob essa ótica, a manutenção do veículo torna-se dependente da viabilidade econômica da substituição do sistema de baterias.

Entretanto, é imperativo distinguir o conceito de falha crítica do processo de degradação natural das células. No âmbito deste estudo, considera-se o fator de degradação anual, inerente à química das baterias de Lítio-Ferro-Fosfato (LFP). Para a quantificação da depreciação técnica, adotou-se como parâmetro o valor médio do pack de baterias da fabricante BYD, aferido em R\$ 89.000,00, conforme levantamento de mercado apresentado no Quadro 3.1.

Ressalta-se que a expiração do prazo de garantia não acarreta a necessidade compulsória de substituição do componente. Diferente de propulsores a combustão interna, que estão sujeitos a falhas mecânicas terminais, as baterias de tração sofrem uma redução progressiva na densidade energética, o que impacta exclusivamente a autonomia nominal. Projeções indicam que, após o ciclo de oito anos, o componente preserva entre 70% e 80% do seu State of Health (SoH), mantendo funcionalidade plena para demandas de mobilidade urbana e mitigando o risco de obsolescência imediata.

Os dados apresentados no Quadro 3.1 foram coletados em rede concessionária autorizada em Belo Horizonte, contemplando o custo do item e a respectiva mão de obra especializada para sistemas de alta voltagem.

Quadro 3.1 – Custos de Substituição do Pack de Baterias (Alta Tensão)

BYD Dolphin Mini	R\$	67.519,04
BYD Dolphin	R\$	94.018,68
BYD Yuan Plus	R\$	61.423,53
BYD Seal	R\$	133.382,72
Valor Médio	R\$	89.085,99

Fonte: Elaborada pelo autor, com dados da BYD Catalão CARBEL (2026).

No segmento de entrada, observa-se que o custo de reposição para o modelo Dolphin Mini corresponde a aproximadamente 60% do valor de mercado do veículo novo. Em um cenário prospectivo de oito anos, caso o valor venal do automóvel se estabilize em patamares próximos ao custo do componente (ex: R\$ 60.000,00), uma falha no sistema de armazenamento

caracterizaria a inviabilidade econômica de reparo, dada a equivalência entre o custo de manutenção e o valor residual do bem.

No extremo superior da linha, o modelo BYD Seal apresenta um custo de substituição superior a R\$ 133.000,00. Tal montante permite a aquisição de veículos seminovos de categorias consolidadas com motorização térmica, o que evidencia o elevado passivo financeiro imobilizado no componente. Por fim, a variação de custos entre os modelos *Yuan Plus* (R\$ 61.000,00) e *Dolphin Plus* (R\$ 94.000,00), apesar da disparidade de porte, justifica-se pelas especificidades de densidade energética e arquitetura de montagem de cada projeto, reiterando que o custo de capital da bateria é a variável de maior peso no Cálculo do TCO.

3.5.3. MANUTENÇÃO E COMPLEXIDADE MECÂNICA

A análise dos custos de manutenção foi conduzida considerando as diferenças de complexidade mecânica entre as tecnologias avaliadas. Veículos equipados com motores de combustão interna possuem maior quantidade de componentes móveis e sistemas auxiliares, tais como sistema de lubrificação, arrefecimento, escapamento, transmissão e injeção eletrônica, o que tende a resultar em maiores necessidades de manutenção ao longo da vida útil do veículo.

Os custos de manutenção preventiva foram estimados a partir dos planos de revisão disponibilizados pelos fabricantes para o horizonte de 120.000 km. Adicionalmente, visando contemplar despesas corretivas não previstas nos cronogramas de manutenção periódica, foi adotado um fator adicional correspondente a 20% do custo acumulado das revisões programadas. Este percentual constitui uma premissa metodológica do presente estudo e tem como objetivo representar possíveis substituições de componentes sujeitos a desgaste natural durante o período analisado.

Em contrapartida, os veículos elétricos apresentam uma arquitetura mecânica simplificada e menor quantidade de partes móveis, reduzindo os potenciais pontos de falha e as necessidades de manutenção periódica (HAGMAN et al., 2016). Os custos de manutenção dessa categoria foram estimados com base nos valores praticados pelas concessionárias BYD para uma quilometragem acumulada de até 120.000 km. A partir desse levantamento, foi calculada uma média aritmética, posteriormente aplicada aos demais modelos elétricos analisados, garantindo uniformidade metodológica na comparação.

Adicionalmente, o cálculo do TCO (TCO) considerou a substituição de um conjunto completo de pneus a cada 30.000 km. Para os veículos elétricos foi adotado o valor de R\$

5.000,00 por conjunto, em razão da necessidade de pneus com maior índice de carga e resistência ao elevado torque instantâneo. Para os veículos equipados com motores de combustão interna foi adotado o valor de R\$ 3.000,00 por conjunto.

3.5.4. COMPONENTES CRÍTICOS E DURABILIDADE

A análise incluiu a avaliação de componentes críticos com impacto significativo nos custos operacionais, especialmente no longo prazo. Entre esses componentes, destacam-se as baterias, cuja degradação está associada a fatores como ciclos de carga, temperatura e condições de uso.

A literatura técnica aponta que a durabilidade das baterias é um dos principais fatores de incerteza econômica em veículos elétricos (BLOOM et al., 2001). Além disso, características como o torque instantâneo podem influenciar o desgaste de pneus, especialmente em condições de uso urbano (TROMMER et al., 2018).

3.6. ESTRATÉGIA DE ANÁLISE COMPARATIVA

A análise dos dados foi conduzida por meio de comparação direta entre pares de veículos tecnicamente equivalentes, conforme os critérios estabelecidos anteriormente. Os indicadores foram analisados de forma independente, incluindo desvalorização, consumo energético e custos operacionais. A opção por não consolidar os resultados em um único indicador visa preservar a transparência da análise e permitir uma interpretação mais detalhada dos fatores envolvidos. Essa abordagem possibilita identificar, de forma clara, os principais elementos que influenciam o desempenho econômico de cada tecnologia.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

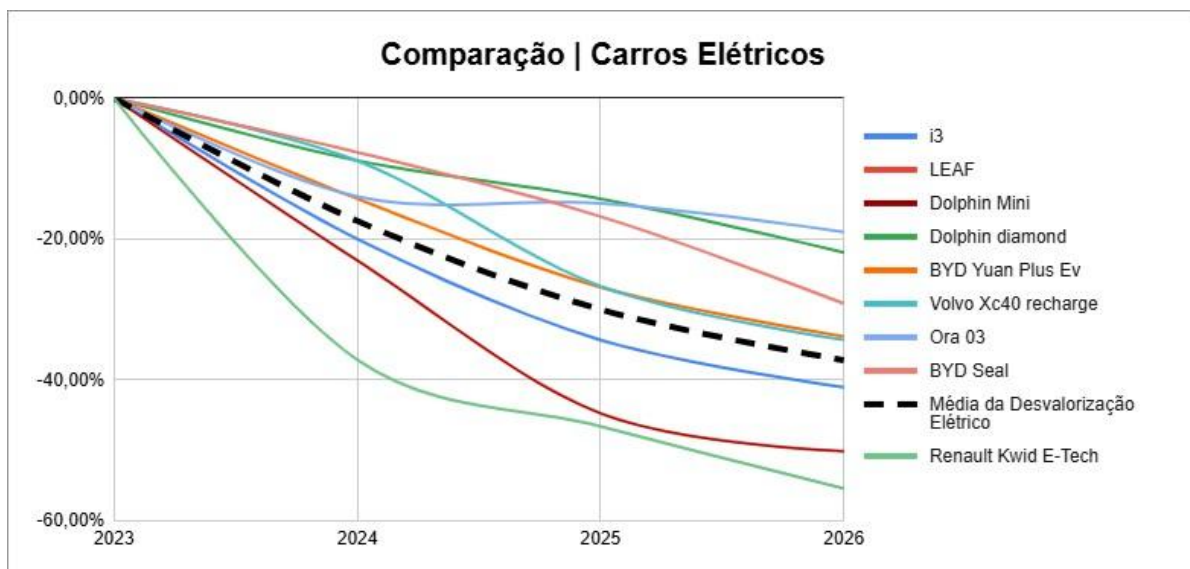
4.1. DEPRECIAÇÃO DOS MODELOS ELÉTRICOS VERSUS MODELOS A COMBUSTÃO

4.1.1. COMPARAÇÃO INDIVIDUAL DAS CURVAS DE DEPRECIAÇÃO

A análise das curvas de depreciação dos modelos avaliados evidenciou diferenças expressivas entre veículos elétricos e veículos equipados com motores de combustão interna, tanto em magnitude quanto em comportamento temporal. A partir das séries históricas obtidas por meio da Tabela FIPE, foi possível identificar que os veículos elétricos apresentam maior sensibilidade à perda de valor residual, especialmente nos primeiros anos de utilização.

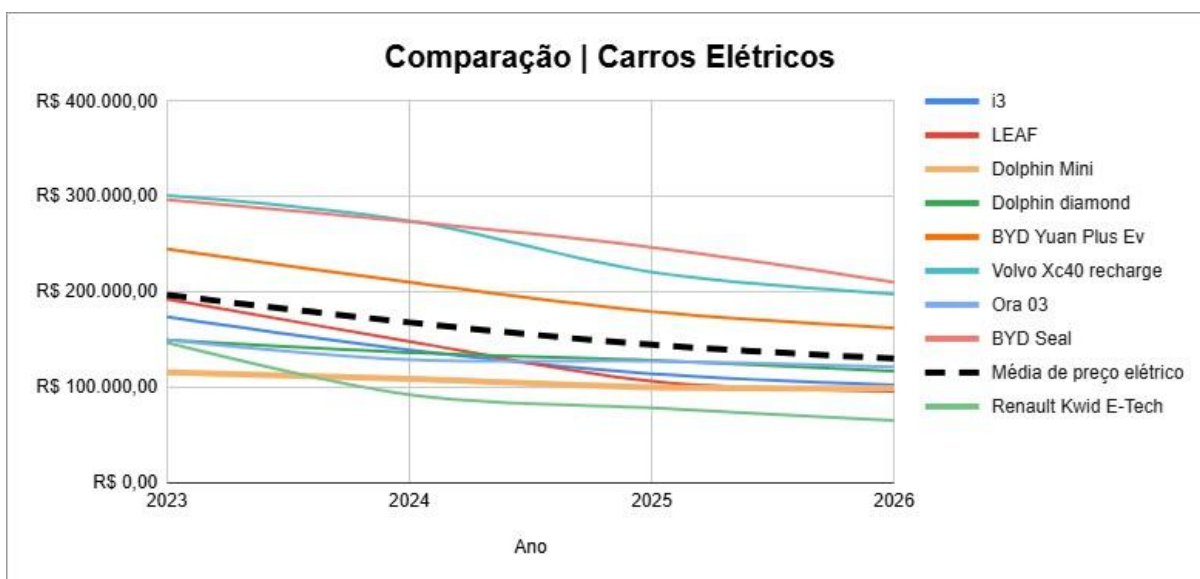
A Figura 4.1 apresenta as curvas de depreciação dos veículos elétricos analisados entre 2023 e 2026, enquanto a Figura 4.2 apresenta o comportamento dos veículos equipados com motores de combustão interna. Observa-se que os modelos elétricos apresentaram taxas de desvalorização significativamente superiores às verificadas nos veículos convencionais, evidenciando maior volatilidade do valor residual ao longo do período analisado.

Figura 4.1 – Depreciação Percentual



Fonte: Autor, 2026.

Figura 4.2 – Depreciação em Valores Absolutos



Fonte: Autor, 2026.

Os resultados demonstram que a desvalorização média anual dos modelos elétricos analisados foi de aproximadamente 12,79%, enquanto os modelos equivalentes a combustão apresentou média de 6,57% ao ano. Esse comportamento indica que, no cenário brasileiro atual, os veículos elétricos sofrem uma taxa de depreciação aproximadamente duas vezes superior à observada nos veículos convencionais.

A diferença observada está associada a múltiplos fatores técnicos, econômicos e mercadológicos. Entre os principais elementos responsáveis pela maior depreciação dos veículos elétricos destacam-se:

- rápida evolução tecnológica dos sistemas de baterias;
- incerteza do mercado em relação à durabilidade do sistema de armazenamento de energia;
- baixa maturidade do mercado secundário brasileiro;
- reduzida previsibilidade do custo de manutenção de longo prazo;
- receio associado à obsolescência tecnológica;
- oscilações de preço provocadas pela entrada de novos fabricantes no mercado nacional.

Diferentemente dos veículos a combustão interna, cuja tecnologia apresenta elevado grau de consolidação industrial e estabilidade técnica, os veículos elétricos encontram-se em um estágio de rápida evolução tecnológica. Isso faz com que modelos lançados há poucos anos já apresentem diferenças significativas de autonomia, capacidade energética e eficiência

quando comparados aos modelos mais recentes, reduzindo a atratividade comercial dos veículos usados.

Conforme apresentado na Figura 4.1, esse comportamento torna-se particularmente evidente nos modelos pioneiros da eletrificação nacional. O Nissan *Leaf* apresentou a maior taxa média anual de desvalorização entre os modelos analisados, atingindo aproximadamente 25,11% ao ano. Entre 2023 e 2026, o valor médio do modelo reduziu-se de R\$ 192.589,00 para R\$ 96.086,00, correspondendo a uma perda acumulada de R\$ 96.503,00, equivalente a mais de 50% do valor inicial do veículo em apenas três anos.

No mesmo período, seu veículo equivalente equipado com motor de combustão interna apresentou desvalorização significativamente inferior, evidenciando a maior estabilidade patrimonial dos modelos convencionais. Essa diferença de comportamento impacta diretamente o TCO, uma vez que a depreciação representa um dos principais componentes do custo de utilização de um veículo ao longo de sua vida útil.

Considerando uma economia média de combustível de aproximadamente R\$ 5.000,00 por ano em favor do Nissan *Leaf*, o benefício operacional acumulado ao longo dos três anos analisados seria da ordem de R\$ 15.000,00. Embora esse valor represente uma redução relevante dos custos de operação, ele corresponde a apenas 15,5% da perda patrimonial observada no período. Em outras palavras, a economia proporcionada pela menor despesa energética seria capaz de amortizar apenas uma pequena parcela dos R\$ 96.503,00 perdidos em depreciação.

Dessa forma, os resultados indicam que, para o cenário analisado, a economia operacional proporcionada pelo veículo elétrico não é suficiente para compensar integralmente sua maior desvalorização. Tal resultado reforça a importância de incorporar o valor residual nas análises de viabilidade econômica, uma vez que a depreciação pode exercer influência mais significativa sobre o TCO do que a própria economia de combustível.

O comportamento observado no Nissan *Leaf* evidencia um fenômeno recorrente em tecnologias emergentes: a aceleração da obsolescência percebida. Embora o veículo mantenha plena funcionalidade operacional, sua autonomia, arquitetura elétrica e densidade energética tornam-se relativamente menos competitivas frente aos modelos mais recentes disponíveis no mercado. Como consequência, ocorre redução da demanda no mercado de seminovos, impactando diretamente o valor residual.

Situação semelhante foi observada no Renault Kwid E-Tech, que apresentou desvalorização média anual de aproximadamente 31,09%, a maior entre todos os modelos

elétricos analisados. O modelo reduziu seu valor médio de R\$ 146.990,00 em 2023 para aproximadamente R\$ 65.520,00 em 2026.

Nesse caso específico, a elevada depreciação pode ser associada à combinação entre limitações técnicas do veículo e forte concorrência de modelos chineses mais modernos. A introdução de veículos elétricos compactos com maior autonomia, melhor acabamento interno e maior nível tecnológico reduziu significativamente a competitividade do Kwid E-Tech no mercado brasileiro.

Além disso, veículos elétricos de entrada apresentam elevada elasticidade-preço da demanda. Pequenas diferenças de valor tornam-se determinantes para o consumidor final, especialmente em um cenário no qual o custo de aquisição ainda constitui a principal barreira de entrada para a eletrificação da frota.

Por outro lado, modelos pertencentes a segmentos premium apresentaram comportamento relativamente mais estável. O Volvo XC40 *Recharge* apresentou taxa média anual de desvalorização de aproximadamente 13,05%, enquanto o BMW iX1 apresentou comportamento ainda mais estável, mantendo inclusive valorização relativa em determinados períodos.

Esse comportamento pode ser explicado pela maior estabilidade do segmento premium no mercado automotivo. Veículos de categorias superiores possuem público consumidor menos sensível à variação de preço, além de apresentarem maior percepção de valor agregado associada à marca, acabamento, desempenho e tecnologia embarcada.

Adicionalmente, modelos premium tendem a incorporar tecnologias mais avançadas de gerenciamento térmico e sistemas de baterias mais sofisticados, reduzindo parcialmente as incertezas relacionadas à degradação do sistema de armazenamento energético. A forte competitividade de preço, associada à elevada percepção tecnológica dos veículos chineses, contribuiu para sustentar os valores residuais desses modelos no curto prazo. Entretanto, por se tratar de um modelo ainda recente no mercado brasileiro, não existem séries históricas suficientemente longas para afirmar se esse comportamento permanecerá estável ao longo dos próximos anos.

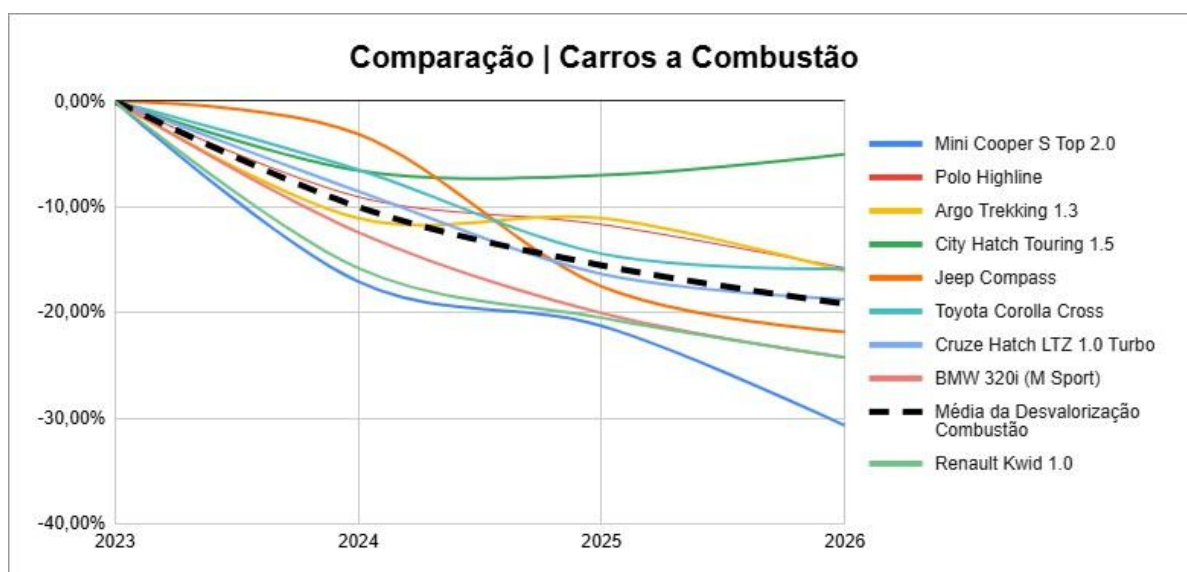
Do ponto de vista econômico, a elevada depreciação observada nos veículos elétricos possui impacto direto sobre o TCO. Embora os veículos elétricos apresentem menor custo operacional por quilômetro rodado, a perda acelerada de valor residual reduz significativamente a vantagem econômica proporcionada pela economia energética.

Essa condição torna-se particularmente relevante em aplicações com baixa quilometragem anual. Em cenários nos quais o veículo percorre poucos quilômetros por ano, a economia operacional acumulada tende a ser insuficiente para compensar simultaneamente o maior custo inicial de aquisição e a maior desvalorização do ativo.

Em contrapartida, os modelos a combustão apresentaram comportamento significativamente mais estável ao longo do período analisado. O Polo *Highline* apresentou desvalorização média anual de aproximadamente 4,69%, enquanto o Argo Trekking apresentou aproximadamente 4,79%.

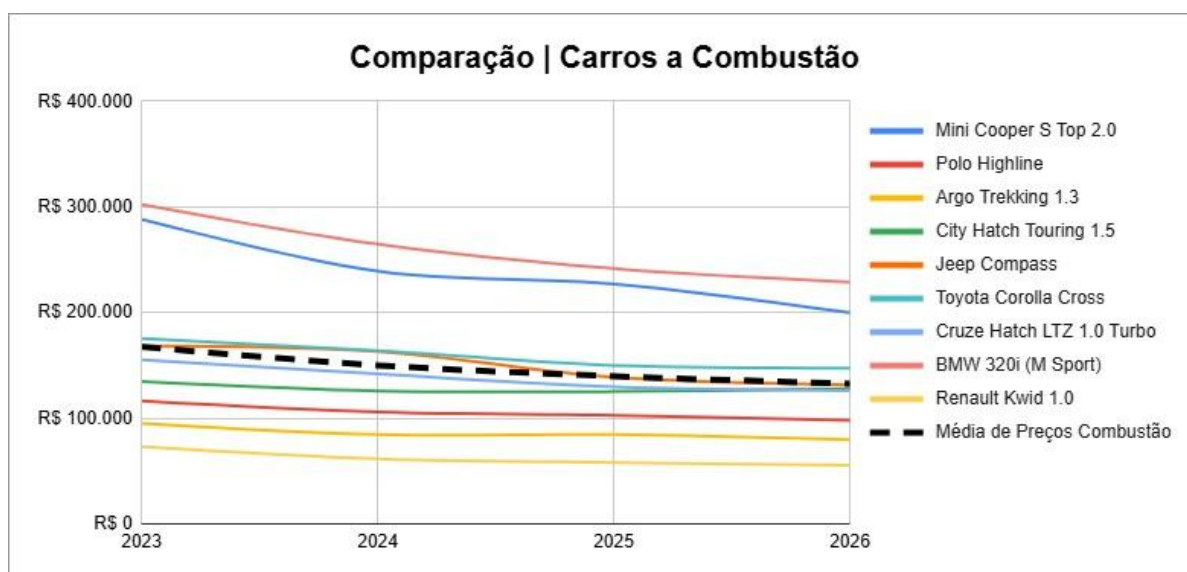
Mesmo modelos de categorias superiores, como o BMW 320i, mantiveram taxas inferiores às observadas nos equivalentes elétricos. Isso demonstra que o mercado automotivo brasileiro ainda atribui maior previsibilidade econômica aos veículos equipados com motores térmicos, como foi observado nas figuras 4.3 e 4.4:

Figura 4.3 – Evolução da depreciação acumulada de veículos a combustão (2023–2026).



Fonte: Autor, 2026.

Figura 4.4 - Evolução do valor de mercado de veículos a combustão (2023–2026).



Fonte: Autor, 2026.

Em contraste, os veículos equipados com motores a combustão interna apresentaram curvas de desvalorização significativamente mais homogêneas e previsíveis. A menor dispersão observada entre os modelos evidencia um mercado mais consolidado e tecnologicamente estável, no qual a perda de valor ocorre de maneira mais gradual e menos influenciada por fatores de obsolescência tecnológica.

Modelos como Jeep Compass, Toyota Corolla Cross e Volkswagen Polo apresentaram comportamento residual relativamente estável ao longo do período analisado, demonstrando elevada liquidez no mercado de seminovos e maior previsibilidade econômica para o consumidor.

De forma geral, os resultados indicam que veículos a combustão ainda apresentam maior estabilidade patrimonial no cenário brasileiro, enquanto os veículos elétricos demonstram maior volatilidade de mercado e maior sensibilidade às mudanças tecnológicas e comerciais do setor automotivo.

4.1.2. COMPARAÇÃO DAS MÉDIAS DE DEPRECIAÇÃO

Com o objetivo de reduzir a influência de particularidades individuais de cada modelo e permitir uma análise comparativa mais representativa entre as tecnologias de propulsão, foi realizada a construção das curvas médias de desvalorização para os veículos elétricos e para os veículos equipados com motores de combustão interna.

Para representar matematicamente o comportamento das curvas médias, foi adotado ajuste por regressão polinomial de segunda ordem, considerando-se x como o número de anos

transcorridos a partir de 2023, sendo $x = 0$ para 2023, $x = 1$ para 2024, $x = 2$ para 2025 e $x = 3$ para 2026. A variável y representa a desvalorização média acumulada, em percentual.

Para os veículos elétricos, a curva média de desvalorização pode ser representada pela Equação (4.1):

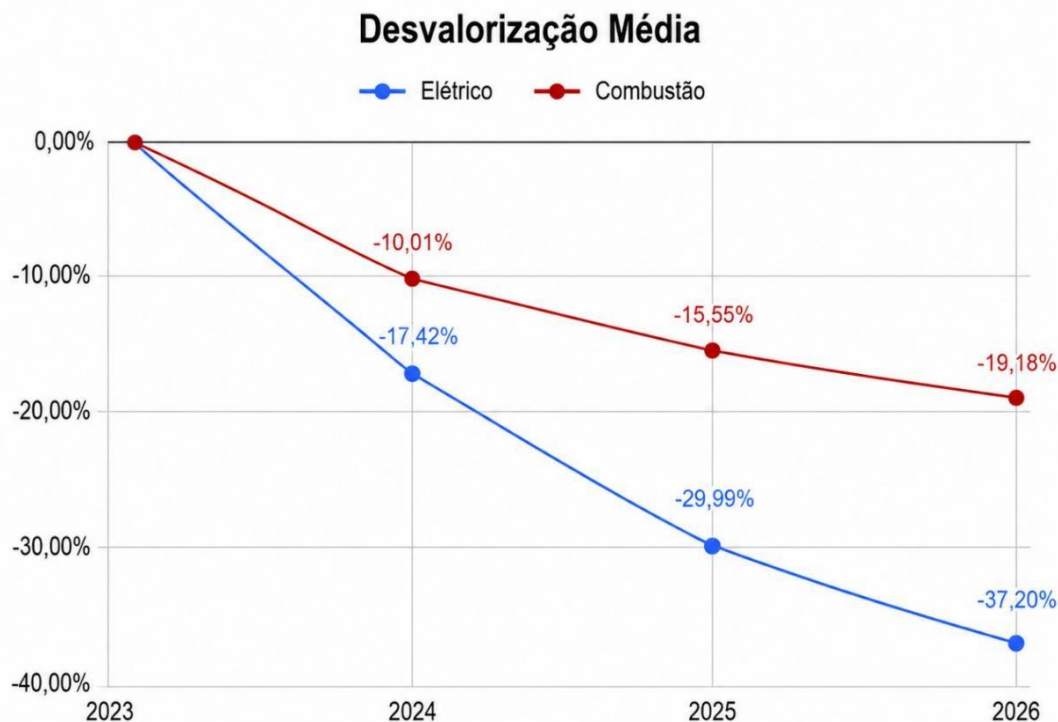
$$y = 2,5525 x^2 - 20,075 x + 0,0255 \quad R^2 = 1,000 \quad (4.1)$$

Para os veículos equipados com motores a combustão interna, a curva média de desvalorização pode ser representada pela Equação (4.2):

$$y = 1,5950 x^2 - 11,0930 x - 0,1280 \quad R^2 = 0,998 \quad (4.2)$$

Conforme apresentado na Figura 4.5, as curvas indicam tendência de desvalorização acumulada em ambos os grupos ao longo do período analisado. Entretanto, os veículos elétricos apresentaram perda média de valor residual mais acentuada, especialmente nos primeiros anos de análise. Ao final do período, em 2026, a desvalorização média acumulada dos veículos elétricos atingiu 37,20%, enquanto os veículos a combustão interna apresentaram desvalorização média acumulada de 19,18%.

Figura 4.5 - Curva de desvalorização percentual dos veículos elétricos e convencionais



Fonte: Autor, 2026.

Os resultados demonstram uma diferença substancial entre os padrões médios de depreciação observados para cada tecnologia. Enquanto os veículos a combustão apresentaram desvalorização média acumulada próxima de 19,18% ao final do período analisado, os veículos elétricos atingiram desvalorização média aproximada de 37,20%, representando uma perda de valor residual significativamente superior.

A curva média dos veículos elétricos evidencia comportamento não linear, caracterizado por forte perda de valor nos primeiros anos de utilização, seguida por uma tendência de desaceleração parcial da depreciação. Esse comportamento sugere que o mercado atribui maior risco econômico aos VE durante os estágios iniciais de envelhecimento do produto, especialmente devido às incertezas relacionadas à durabilidade das baterias e à rápida evolução tecnológica do setor.

Adicionalmente, a elevada inclinação da curva média dos VE evidencia maior volatilidade de mercado quando comparada aos modelos a combustão interna. Esse comportamento pode ser associado à constante introdução de novos modelos com maior autonomia, maior eficiência energética e menores custos de aquisição, tornando versões anteriores tecnologicamente menos competitivas em intervalos relativamente curtos de tempo.

Em contrapartida, os veículos a combustão apresentaram comportamento médio significativamente mais estável, indicando maior previsibilidade econômica e menor influência de fatores relacionados à obsolescência tecnológica. Tal estabilidade pode ser explicada pela elevada maturidade da tecnologia de combustão interna, cuja evolução ocorre de maneira mais incremental e menos disruptiva quando comparada aos veículos elétricos.

Sob a ótica econômica, os resultados obtidos indicam que a depreciação representa uma das variáveis de maior impacto no TCO dos veículos elétricos. Apesar das vantagens operacionais associadas à maior eficiência energética e ao menor custo de manutenção, a perda acelerada de valor residual pode reduzir significativamente a atratividade econômica da eletrificação automotiva em determinados cenários de utilização. No Quadro 4.1, detalha-se os valores exatos que compõem este cenário, iniciando pela estabilidade dos modelos a combustão e seguindo para a análise dos elétricos.

Quadro 4.1 – Desvalorização dos Carros à Combustão

MODELOS	2023	2024	2025	2026	DESVALORIZAÇÃO MÉDIA ANUAL
Mini Cooper S Top 2.0	R\$ 288.250,00	R\$ 239.013,00	R\$ 226.961,00	R\$ 199.751,00	11,08%
		-17,08%	-5,04%	-11,99%	
		-R\$ 49.237,00	-R\$ 12.052,00	-R\$ 27.210,00	
Polo Highline	R\$ 116.290,00	R\$ 105.766,00	R\$ 102.718,00	R\$ 97.919,00	4,69%
		-9,05%	-2,88%	-4,67%	
		-R\$ 10.524,00	-R\$ 3.048,00	-R\$ 4.799,00	
Argo Trekking 1.3	R\$ 94.980,00	R\$ 84.456,00	R\$ 84.456,00	R\$ 79.695,00	4,79%
		-11,08%	0,00%	-5,64%	
		-R\$ 10.524,00	R\$ 0,00	-R\$ 4.761,00	
City Hatch Touring 1.5	R\$ 134.600,00	R\$ 125.751,00	R\$ 125.152,00	R\$ 127.844,00	1,32%
		-6,57%	-0,48%	2,15%	
		-R\$ 8.849,00	-R\$ 599,00	R\$ 2.692,00	
Jeep Compass T270	R\$ 168.297,00	R\$ 163.069,00	R\$ 138.772,00	R\$ 131.534,00	6,99%
		-3,11%	-14,90%	-5,22%	
		-R\$ 5.228,00	-R\$ 24.297,00	-R\$ 7.238,00	
Toyota Corolla Cross	R\$ 175.276,00	R\$ 163.903,00	R\$ 149.966,00	R\$ 147.454,00	4,72%
		-6,49%	-8,50%	-1,68%	
		-R\$ 11.373,00	-R\$ 13.937,00	-R\$ 2.512,00	
Cruze Hatch LTZ 1.0 Turbo	R\$ 155.050,00	R\$ 141.826,00	R\$ 129.690,00	R\$ 125.960,00	5,77%
		-8,53%	-8,56%	-2,88%	
		-R\$ 13.224,00	-R\$ 12.136,00	-R\$ 3.730,00	
BMW 320i (M Sport)	R\$ 302.188,00	R\$ 264.647,00	R\$ 241.566,00	R\$ 228.829,00	8,01%
		-12,42%	-8,72%	-5,27%	
		-R\$ 37.541,00	-R\$ 23.081,00	-R\$ 12.737,00	
Renault Kwid 1.0	R\$ 72.990,00	R\$ 61.457,00	R\$ 58.029,00	R\$ 55.283,00	8,01%
		-15,80%	-5,58%	-4,73%	
		-R\$ 11.533,00	-R\$ 3.428,00	-R\$ 2.746,00	
Média de Preço Modelos Combustão	R\$ 167.546,78	R\$ 149.987,56	R\$ 139.701,11	R\$ 132.696,56	6,57%
		-10,48%	-6,86%	-5,01%	
		-R\$ 17.559,22	-R\$ 10.288,45	-R\$ 7.004,55	

Fonte: Autor, 2026.

A restrição da análise a apenas dez modelos a combustão justifica-se pela metodologia de "Pares de Comparação". Cada veículo a combustão aqui apresentado foi selecionado especificamente para servir de benchmark (referência) para um correspondente elétrico da mesma categoria, conforme os critérios descritos na metodologia. A definição da escolha de veículos elétricos estudados obedeceu a dois critérios de relevância mercadológica: **Volume de Vendas (ANFAVEA, 2026) e Representatividade por Segmento.**

Diferente da amostra a combustão (que serviu de par comparativo), a lista de elétricos foi composta pelos protagonistas do setor. Foram selecionados os modelos com maiores volumes de emplacamentos acumulados (ABVE, 2025) e aqueles que se consolidaram como as primeiras referências (benchmarks) em suas respectivas categorias (Hatch Compacto, SUV e Sedã).

Essa escolha garantiu que os dados de depreciação apresentados não refletissem comparações isoladas, mas sim o comportamento massificado do consumidor frente à eletromobilidade e a desvalorização real destes ativos na Tabela Fipe, conforme demonstrado no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 - Desvalorização dos Carros Elétricos

MODELOS	2023	2024	2025	2026	DESVALORIZAÇÃO MÉDIA ANUAL
BMW i3	R\$ 174.125,00	R\$ 139.340,00	R\$ 114.359,00	R\$ 102.702,00	17,39%
		-19,98%	-17,93%	-10,19%	
		-R\$ 34.785,00	-R\$ 24.981,00	-R\$ 11.657,00	
Nissan Leaf	R\$ 192.589,00	R\$ 148.245,00	R\$ 106.423,00	R\$ 96.086,00	25,11%
		-23,03%	-28,21%	-9,71%	
		-R\$ 44.344,00	-R\$ 41.822,00	-R\$ 10.337,00	
BYD Dolphin Mini	R\$ 115.800,00	R\$ 109.083,00	R\$ 100.251,00	R\$ 99.160,00	4,20%
		-5,80%	-8,10%	-1,09%	
		-R\$ 6.717,00	-R\$ 8.832,00	-R\$ 1.091,00	
BYD Dolphin EV	R\$ 149.800,00	R\$ 136.538,00	R\$ 128.421,00	R\$ 117.000,00	7,01%
		-8,85%	-5,94%	-8,89%	
		-R\$ 13.262,00	-R\$ 8.117,00	-R\$ 11.421,00	
BYD Yuan Plus	R\$ 245.289,00	R\$ 210.289,00	R\$ 179.498,00	R\$ 162.314,00	12,78%
		-14,27%	-14,64%	-9,57%	
		-R\$ 35.000,00	-R\$ 30.791,00	-R\$ 17.184,00	
Volvo XC40 Recharge	R\$ 301.441,00	R\$ 274.652,00	R\$ 220.940,00	R\$ 198.062,00	13,05%
		-8,89%	-19,56%	-10,35%	
		-R\$ 26.789,00	-R\$ 53.712,00	-R\$ 22.878,00	
GWM Ora 03 Skin	R\$ 150.000,00	R\$ 129.052,00	R\$ 127.617,00	R\$ 121.545,00	5,85%
		-13,97%	-1,11%	-4,76%	
		-R\$ 20.948,00	-R\$ 1.435,00	-R\$ 6.072,00	
BYD Seal	R\$ 296.800,00	R\$ 274.015,00	R\$ 246.938,00	R\$ 210.299,00	10,28%
		-7,68%	-9,88%	-14,84%	
		-R\$ 22.785,00	-R\$ 27.077,00	-R\$ 36.639,00	
Renault Kwid E-Tech	R\$ 146.990,00	R\$ 92.400,00	R\$ 78.500,00	R\$ 65.520,00	31,09%
		-37,14%	-15,04%	-16,54%	
		-R\$ 54.590,00	-R\$ 13.900,00	-R\$ 12.980,00	
Média de Preço Modelos Elétricos	R\$ 196.981,56	R\$ 168.179,33	R\$ 144.771,89	R\$ 130.298,67	12,79%
		-14,62%	-13,92%	-10,00%	
		-R\$ 28.802,23	-R\$ 23.407,44	-R\$ 14.473,22	

Fonte: Autor, 2026.

Os resultados obtidos demonstram que os modelos mais antigos apresentaram comportamento residual significativamente mais agressivo, especialmente aqueles pertencentes às primeiras gerações da eletrificação automotiva. O BMW i3, por exemplo, apresentou desvalorização média anual de aproximadamente 17,38%, reduzindo seu valor médio de R\$ 174.125,00 em 2023 para aproximadamente R\$ 102.702,00 em 2026. Embora o modelo

apresente elevada eficiência energética e proposta tecnológica avançada para sua geração, observa-se que a percepção de risco associada ao envelhecimento das baterias contribui diretamente para a redução de seu valor residual.

4.2. ANÁLISE DA VIABILIDADE ENTRE OS PARES DE COMPARAÇÃO.

A partir da consolidação dos dados obtidos nas curvas de depreciação e nas análises de TCO, os resultados foram reorganizados em quadros comparativos por pares de veículos. Essa forma de apresentação permite visualizar, de maneira objetiva, a diferença entre os modelos elétricos e seus respectivos equivalentes a combustão, evitando a repetição das análises individuais e concentrando a interpretação nos dados efetivamente obtidos ao longo da pesquisa.

Para padronização dos resultados, adotaram-se os valores de depreciação constantes nas tabelas consolidadas de veículos elétricos e de veículos a combustão. O cálculo do *payback* foi mantido como indicador complementar, considerando o sobrepreço inicial do veículo elétrico em relação ao respectivo par a combustão e a economia operacional média anual obtida a partir do OPEX acumulado no horizonte de oito anos e 120.000 km. Esse procedimento permite verificar não apenas se o veículo elétrico gasta menos para operar, mas também se essa economia é suficiente para recuperar eventual diferença inicial de aquisição, conforme demonstrado nos Quadros 4.3, 4.4 e 4.5.

Quadro 4.3 - Depreciação e Valor Residual dos Pares Analisados

Par	Segmento	Veículo elétrico	Valor elétrico em 2023 e 2026	Depreciação média anual elétrico	Veículo a combustão	Valor combustão em 2023 e 2026	Depreciação média anual combustão	Leitura objetiva do dado
1	Premium compacto	BMW i3	2023: R\$ 174.125,00; 2026: R\$ 102.702,00. Perda: R\$ 71.423,00 (41,02%)	17,39%	Mini Cooper S Top 2.0	2023: R\$ 288.250,00; 2026: R\$ 199.751,00. Perda: R\$ 88.499,00 (30,70%)	11,08%	Combustão com maior estabilidade patrimonial.
2	Hatch compacto urbano	Nissan Leaf	2023: R\$ 192.589,00; 2026: R\$ 96.086,00. Perda: R\$ 96.503,00 (50,11%)	25,11%	Polo Highline	2023: R\$ 116.290,00; 2026: R\$ 97.919,00. Perda: R\$ 18.371,00 (15,80%)	4,69%	Combustão com maior estabilidade patrimonial.
3	Compacto de entrada	BYD Dolphin Mini	2023: R\$ 115.800,00; 2026: R\$ 99.160,00. Perda: R\$ 16.640,00 (14,37%)	4,2%	Argo Trekking 1.3	2023: R\$ 94.980,00; 2026: R\$ 79.695,00. Perda: R\$ 15.285,00 (16,09%)	4,79%	Elétrico com melhor retenção patrimonial.
4	Hatch compacto premium	BYD Dolphin Diamond	2023: R\$ 149.800,00; 2026: R\$ 117.000,00. Perda: R\$ 32.800,00 (21,90%)	7,01%	City Hatch Touring 1.5	2023: R\$ 134.600,00; 2026: R\$ 127.844,00. Perda: R\$ 6.756,00 (5,02%)	1,32%	Combustão com maior estabilidade patrimonial.
5	SUV médio	BYD Yuan Plus	2023: R\$ 245.289,00; 2026: R\$ 162.314,00. Perda: R\$ 82.975,00 (33,83%)	12,78%	Jeep Compass T270	2023: R\$ 168.297,00; 2026: R\$ 131.534,00. Perda: R\$ 36.763,00 (21,84%)	6,99%	Combustão com maior estabilidade patrimonial.
6	SUV premium	Volvo XC40 Recharge	2023: R\$ 301.441,00; 2026: R\$ 198.062,00. Perda: R\$ 103.379,00 (34,29%)	13,05%	Toyota Corolla Cross	2023: R\$ 175.276,00; 2026: R\$ 147.454,00. Perda: R\$ 27.822,00 (15,87%)	4,72%	Combustão com maior estabilidade patrimonial.
7	Hatch médio	GWM Ora 03 Skin	2023: R\$ 150.000,00; 2026: R\$ 121.545,00. Perda: R\$ 28.455,00 (18,97%)	5,85%	Cruze Hatch LTZ 1.0 Turbo	2023: R\$ 155.050,00; 2026: R\$ 125.960,00. Perda: R\$ 29.090,00 (18,76%)	5,77%	Diferença reduzida entre as tecnologias.
8	Sedã médio premium	BYD Seal	2023: R\$ 296.800,00; 2026: R\$ 210.299,00. Perda: R\$ 86.501,00 (29,14%)	10,28%	BMW 320i M Sport	2023: R\$ 302.188,00; 2026: R\$ 228.829,00. Perda: R\$ 73.359,00 (24,28%)	8,01%	Combustão com maior estabilidade patrimonial.
9	Compacto urbano de entrada	Renault Kwid E-Tech	2023: R\$ 146.990,00; 2026: R\$ 65.520,00. Perda: R\$ 81.470,00 (55,43%)	31,09%	Renault Kwid 1.0	2023: R\$ 72.990,00; 2026: R\$ 55.283,00. Perda: R\$ 17.707,00 (24,26%)	8,01%	Combustão com maior estabilidade patrimonial.

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos dados consolidados de depreciação e valor residual apresentados no estudo.

4.2.1. ANÁLISE CUSTOS OPERACIONAIS ACUMULADOS, ECONOMIA E PAYBACK DOS PARES ANALISADOS.

Quadro 4.4 - Custos Operacionais Acumulados, Economia e Payback dos Pares Analisados

Par	Consumo elétrico	Consumo combustão	Energia elétrica acumulada	Combustível acumulado	Economia energética do elétrico	Manutenção elétrica e combustão	Pneus elétrico e combustão	IPVA elétrico e combustão	Seguro elétrico e combustão	OPEX elétrico sem bateria	OPEX combustão	Diferença sem troca de bateria	Payback operacional sem bateria
1	13,1 kWh a cada 100 km	11,5 km por litro	R\$ 15.120,00	R\$ 63.652,00	R\$ 48.532,00	R\$ 8.500,00 e R\$ 24.000,00	R\$ 18.000,00 e R\$ 14.000,00	R\$ 39.000,00 e R\$ 44.000,00	R\$ 72.000,00 e R\$ 60.000,00	R\$ 152.620,00	R\$ 205.652,00	Elétrico menor em R\$ 53.032,00	Imediato. Elétrico inicia mais barato e economiza R\$ 6.629,00 por ano.
2	17,7 kWh a cada 100 km	13,5 km por litro	R\$ 20.390,00	R\$ 54.220,00	R\$ 33.830,00	R\$ 7.500,00 e R\$ 18.000,00	R\$ 15.000,00 e R\$ 11.000,00	R\$ 42.000,00 e R\$ 31.000,00	R\$ 68.000,00 e R\$ 36.000,00	R\$ 152.890,00	R\$ 150.220,00	Elétrico maior em R\$ 2.670,00	Não ocorre. Não há economia operacional acumulada no ciclo.
3	11,5 kWh a cada 100 km	12,5 km por litro	R\$ 13.250,00	R\$ 58.560,00	R\$ 45.310,00	R\$ 6.500,00 e R\$ 16.000,00	R\$ 12.000,00 e R\$ 9.500,00	R\$ 26.000,00 e R\$ 22.000,00	R\$ 44.000,00 e R\$ 30.400,00	R\$ 101.750,00	R\$ 136.460,00	Elétrico menor em R\$ 34.710,00	4,8 anos. Sobrepreço: R\$ 20.820,00; economia anual: R\$ 4.338,75.
4	11,8 kWh a cada 100 km	13,1 km por litro	R\$ 13.600,00	R\$ 55.880,00	R\$ 42.280,00	R\$ 6.800,00 e R\$ 17.500,00	R\$ 13.000,00 e R\$ 10.000,00	R\$ 30.000,00 e R\$ 26.000,00	R\$ 48.000,00 e R\$ 38.400,00	R\$ 111.400,00	R\$ 147.780,00	Elétrico menor em R\$ 36.380,00	3,3 anos. Sobrepreço: R\$ 15.200,00; economia anual: R\$ 4.547,50.
5	15,9 kWh a cada 100 km	10,2 km por litro	R\$ 18.300,00	R\$ 71.760,00	R\$ 53.460,00	R\$ 8.500,00 e R\$ 28.000,00	R\$ 18.000,00 e R\$ 15.000,00	R\$ 42.000,00 e R\$ 39.000,00	R\$ 64.000,00 e R\$ 52.000,00	R\$ 150.800,00	R\$ 205.760,00	Elétrico menor em R\$ 54.960,00	11,2 anos. Sobrepreço: R\$ 76.992,00; economia anual: R\$ 6.870,00.
6	18,7 kWh a cada 100 km	11,8 km por litro	R\$ 21.500,00	R\$ 62.000,00	R\$ 40.500,00	R\$ 10.500,00 e R\$ 24.000,00	R\$ 22.000,00 e R\$ 16.000,00	R\$ 68.000,00 e R\$ 38.000,00	R\$ 96.000,00 e R\$ 48.000,00	R\$ 218.000,00	R\$ 188.000,00	Elétrico maior em R\$ 30.000,00	Não ocorre. Não há economia operacional acumulada no ciclo.
7	14,2 kWh a cada 100 km	11,2 km por litro	R\$ 16.300,00	R\$ 65.300,00	R\$ 49.000,00	R\$ 7.500,00 e R\$ 21.000,00	R\$ 14.000,00 e R\$ 11.000,00	R\$ 34.000,00 e R\$ 28.000,00	R\$ 52.000,00 e R\$ 41.600,00	R\$ 123.800,00	R\$ 166.900,00	Elétrico menor em R\$ 43.100,00	Imediato. Elétrico inicia mais barato e economiza R\$ 5.387,50 por ano.

Par	Consumo elétrico	Consumo combustão	Energia elétrica acumulada	Combustível acumulado	Economia energética do elétrico	Manutenção elétrica e combustão	Pneus elétrico e combustão	IPVA elétrico e combustão	Seguro elétrico e combustão	OPEX elétrico sem bateria	OPEX combustão	Diferença sem troca de bateria	Payback operacional sem bateria
8	16,5 kWh a cada 100 km	11,5 km por litro	R\$ 19.000,00	R\$ 63.650,00	R\$ 44.650,00	R\$ 9.500,00 e R\$ 32.000,00	R\$ 24.000,00 e R\$ 20.000,00	R\$ 72.000,00 e R\$ 65.000,00	R\$ 104.000,00 e R\$ 88.000,00	R\$ 228.500,00	R\$ 268.650,00	Elétrico menor em R\$ 40.150,00	Imediato. Elétrico inicia mais barato e economiza R\$ 5.018,75 por ano.
9	10,8 kWh a cada 100 km	15,3 km por litro	R\$ 12.400,00	R\$ 47.850,00	R\$ 35.450,00	R\$ 5.000,00 e R\$ 13.500,00	R\$ 9.000,00 e R\$ 7.000,00	R\$ 18.000,00 e R\$ 11.000,00	R\$ 36.000,00 e R\$ 24.000,00	R\$ 80.400,00	R\$ 103.350,00	Elétrico menor em R\$ 22.950,00	25,8 anos. Sobrepreço: R\$ 74.000,00; economia anual: R\$ 2.868,75.

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos custos acumulados de energia, combustível, manutenção, pneus, IPVA e seguro apresentados no estudo.

O *payback* foi calculado pelo sobrepreço inicial do elétrico dividido pela economia operacional média anual, sem considerar substituição da bateria.

Quadro 4.5 - Fontes Recomendadas para Validação dos Custos de Manutenção

Veículo ou grupo de veículos	Fonte recomendada	Aplicação na pesquisa	Observação de uso
BYD Dolphin Mini, BYD Dolphin Diamond, BYD Yuan Plus e BYD Seal	BYD Brasil - Plano de Manutenção e Perguntas Frequentes	Substituir ou validar os custos estimados de revisão dos modelos BYD.	A página oficial permite selecionar o modelo e baixar tabela do plano de manutenção; campanhas comerciais podem alterar custo efetivo em determinado período.
Nissan Leaf	Nissan Brasil - Revisão Periódica; Nissan News Brasil - manutenção do Nissan Leaf	Validar os custos do Leaf e justificar a diferença de manutenção frente aos modelos a combustão.	A página oficial de revisão periódica permite consulta por modelo; para projeção de 120.000 km, recomenda-se complementar com cotação da rede autorizada.
GWM Ora 03 Skin	GWM Brasil - Revisões com Preço Fixo	Validar os intervalos e custos de revisão do ORA 03.	A GWM informa periodicidade específica para a linha ORA 03; campanhas de revisão gratuita devem ser tratadas como condição comercial, não como regra permanente.
Volvo XC40 Recharge	Volvo Cars Brasil - Revisão Preço Fixo	Validar custos de manutenção até a quilometragem analisada.	A Volvo informa preço fixo para revisões até 150.000 km, o que é compatível com o horizonte de 120.000 km adotado no estudo.
Renault Kwid E-Tech e Renault Kwid 1.0	Renault Brasil - Revisão Preço Fechado e Universo E-Tech	Validar custos de revisão dos modelos Renault elétrico e a combustão.	Usar a consulta por modelo, ano e versão; quando o site não disponibilizar valor consolidado até 120.000 km, anexar orçamento da concessionária.
Mini Cooper S Top 2.0	MINI Brasil - MINI Service e MINI Service Inclusive	Validar custos de manutenção do par premium compacto a combustão.	A MINI informa pacotes de 3 a 6 anos e quilometragens de 40.000 a 120.000 km, adequados para documentação metodológica.
Volkswagen Polo Highline	Volkswagen do Brasil - Revisões Volkswagen	Validar custos de revisão do Polo Highline.	A Volkswagen informa valores e itens da 1ª à 10ª revisão, sendo fonte direta para cálculo acumulado.
Fiat Argo Trekking 1.3	Fiat - Revisão Programada	Validar custos de revisão do Argo.	A página oficial deve ser consultada por modelo, ano e versão, preservando captura de tela ou orçamento para rastreabilidade.
Honda City Hatch Touring 1.5	Honda Customer Service - Revisões e Programa de Transparência Honda	Validar custos de revisão do City Hatch.	A Honda informa programa de transparência com valores por modelo na rede autorizada.
Jeep Compass T270	Jeep Brasil - Revisão Programada e Pacotes de Manutenção	Validar custos de revisão do Jeep Compass.	A Jeep disponibiliza cronograma de revisão e pacotes de manutenção com preço fixo para revisões selecionadas.
Toyota Corolla Cross	Toyota Brasil - Revisões Periódicas, Preço Fechado e Revisão na Medida	Validar custos de revisão do Corolla Cross.	A Toyota informa serviços de revisão e preço fechado; quando a tabela estiver em manutenção, usar contato formal da concessionária.
Chevrolet Cruze Hatch LTZ 1.0 Turbo	Chevrolet Brasil - Serviços de Revisão e concessionária autorizada	Validar custos de revisão do Cruze.	Como o Cruze não está mais em linha, a forma mais segura é anexar cotação da rede autorizada para a versão analisada.
BMW i3 e BMW 320i M Sport	BMW Brasil - BMW Service e BMW Service Inclusive	Validar custos dos modelos BMW elétrico e a combustão.	A BMW informa pacotes de manutenção para veículos novos, usados e elétricos; para modelos fora de linha, recomenda-se cotação da concessionária autorizada.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com base nos planos de manutenção e dados dos fabricantes (2026).

O indicador utilizado corresponde ao *payback* simples operacional. O cálculo não considera taxa de desconto, inflação, valor presente líquido, custo de oportunidade do capital ou variação futura dos preços de energia e combustível. O objetivo é demonstrar, de forma direta, em quanto tempo a economia operacional do veículo elétrico compensaria eventual sobrepreço inicial de aquisição. Quando o veículo elétrico apresentou preço inicial inferior ao par a combustão e também menor OPEX acumulado, o retorno foi classificado como imediato. Quando o OPEX do elétrico foi superior ao do veículo a combustão, o retorno foi classificado como não ocorrente. Quando o prazo calculado superou oito anos, indicou-se que a recuperação não ocorre dentro do horizonte adotado no estudo, como evidenciado no Quadro 4.6.

Quadro 4.6 - Detalhamento de Payback Operacional dos Pares Analisados

Par	Par comparativo	Sobrepço inicial do elétrico	Economia operacional total em 8 anos	Economia operacional média anual	Payback simples	Classificação	Leitura técnica
1	BMW i3 e Mini Cooper S Top 2.0	Elétrico mais barato em R\$ 114.125,00	Economia de R\$ 53.032,00	Economia de R\$ 6.629,00	Imediato	Favorável desde a aquisição	O elétrico inicia R\$ 114.125,00 mais barato e ainda gera economia operacional média de R\$ 6.629,00 por ano. Não há sobrepreço a recuperar.
2	Nissan Leaf e Polo Highline	R\$ 76.299,00	Custo maior de R\$ 2.670,00	Custo maior de R\$ 333,75	Não ocorre	Sem recuperação operacional	O elétrico inicia com sobrepreço de R\$ 76.299,00 e, além disso, apresenta OPEX R\$ 2.670,00 maior no ciclo de oito anos. Como não há economia operacional acumulada, não há retorno simples no horizonte analisado.
3	BYD Dolphin Mini e Argo Trekking 1.3	R\$ 20.820,00	Economia de R\$ 34.710,00	Economia de R\$ 4.338,75	4,8 anos	Recupera dentro do horizonte de 8 anos	O sobrepreço inicial de R\$ 20.820,00 é compensado pela economia operacional média de R\$ 4.338,75 por ano, com retorno antes do final do ciclo analisado.
4	BYD Dolphin Diamond e City Hatch Touring 1.5	R\$ 15.200,00	Economia de R\$ 36.380,00	Economia de R\$ 4.547,50	3,3 anos	Recupera dentro do horizonte de 8 anos	O sobrepreço inicial de R\$ 15.200,00 é compensado pela economia operacional média de R\$ 4.547,50 por ano, com retorno antes do final do ciclo analisado.
5	BYD Yuan Plus e Jeep Compass T270	R\$ 76.992,00	Economia de R\$ 54.960,00	Economia de R\$ 6.870,00	11,2 anos	Fora do horizonte de 8 anos	A economia operacional média de R\$ 6.870,00 por ano reduz o impacto do sobrepreço de R\$ 76.992,00, mas o prazo de retorno ultrapassa o horizonte adotado no estudo.
6	Volvo XC40 Recharge e Toyota Corolla Cross	R\$ 126.165,00	Custo maior de R\$ 30.000,00	Custo maior de R\$ 3.750,00	Não ocorre	Sem recuperação operacional	O elétrico inicia com sobrepreço de R\$ 126.165,00 e, além disso, apresenta OPEX R\$ 30.000,00 maior no ciclo de oito anos. Como não há economia operacional acumulada, não há retorno simples no horizonte analisado.
7	GWM Ora 03 Skin e Cruze Hatch LTZ 1.0 Turbo	Elétrico mais barato em R\$ 5.050,00	Economia de R\$ 43.100,00	Economia de R\$ 5.387,50	Imediato	Favorável desde a aquisição	O elétrico inicia R\$ 5.050,00 mais barato e ainda gera economia operacional média de R\$ 5.387,50 por ano. Não há sobrepreço a recuperar.
8	BYD Seal e BMW 320i M Sport	Elétrico mais barato em R\$ 5.388,00	Economia de R\$ 40.150,00	Economia de R\$ 5.018,75	Imediato	Favorável desde a aquisição	O elétrico inicia R\$ 5.388,00 mais barato e ainda gera economia operacional média de R\$ 5.018,75 por ano. Não há sobrepreço a recuperar.
9	Renault Kwid E-Tech e Renault Kwid 1.0	R\$ 74.000,00	Economia de R\$ 22.950,00	Economia de R\$ 2.868,75	25,8 anos	Fora do horizonte de 8 anos	A economia operacional média de R\$ 2.868,75 por ano reduz o impacto do sobrepreço de R\$ 74.000,00, mas o prazo de retorno ultrapassa o horizonte adotado no estudo.

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos preços iniciais de 2023 e nos custos operacionais acumulados no horizonte de oito anos.

A leitura do *payback* mostra que a vantagem do veículo elétrico não depende apenas do menor custo por quilômetro rodado. O resultado econômico é definido pela combinação entre três variáveis: preço inicial de aquisição, economia operacional anual e comportamento dos demais custos de posse, como seguro, pneus, manutenção e IPVA. Por isso, pares com grande economia energética podem não apresentar retorno dentro do horizonte de oito anos quando o sobrepreço inicial do elétrico é muito elevado ou quando custos acessórios reduzem a economia operacional líquida.

Nos pares BMW i3 e Mini Cooper S, GWM Ora 03 Skin e Cruze Hatch, e BYD Seal e BMW 320i, o *payback* foi classificado como imediato, pois os modelos elétricos partiram de preço inicial inferior ao veículo a combustão comparado e ainda apresentaram menor OPEX no ciclo de oito anos. Nesses casos, a análise não exige recuperação de investimento adicional, porque não há sobrepreço inicial a ser compensado. A decisão econômica passa a ser favorável ao elétrico desde o início da posse, desconsiderado o cenário extremo de substituição da bateria.

Nos pares BYD Dolphin Mini e Argo Trekking, e BYD Dolphin Diamond e City Hatch Touring, o elétrico apresentou preço inicial superior, mas a economia operacional acumulada foi suficiente para compensar a diferença dentro do período analisado. O Dolphin Mini apresentou *payback* de aproximadamente 4,8 anos, enquanto o Dolphin Diamond apresentou retorno em aproximadamente 3,3 anos. Esses resultados indicam que, quando o sobrepreço inicial é moderado e a economia operacional anual é consistente, a eletrificação pode se tornar economicamente competitiva antes do encerramento do ciclo de oito anos.

Nos pares BYD Yuan Plus e Jeep Compass, e Renault Kwid E-Tech e Renault Kwid 1.0, o *payback* ficou fora do horizonte de oito anos. No caso do BYD Yuan Plus, embora a economia operacional total estimada seja relevante, o sobrepreço inicial frente ao Jeep Compass é elevado, levando o prazo de retorno para aproximadamente 11,2 anos. No caso do Renault Kwid E-Tech, a diferença inicial de aquisição é proporcionalmente muito alta em relação ao Kwid 1.0, de modo que o *payback* alcança aproximadamente 25,8 anos, prazo incompatível com o horizonte de uso considerado na pesquisa.

Por fim, nos pares Nissan *Leaf* e Polo *Highline*, e Volvo XC40 *Recharge* e Toyota Corolla Cross, o *payback* não ocorre no cenário ordinário, pois o OPEX do elétrico foi superior ao do modelo a combustão ao final do ciclo analisado. Nesses casos, mesmo havendo economia de energia, os custos adicionais de seguro, IPVA, pneus ou outros componentes de posse neutralizam a vantagem energética. Esse resultado reforça que o custo de energia deve ser

analisado em conjunto com o TCO, e não de forma isolada, conforme demonstrado no Quadro 4.7.

Quadro 4.7 - Resultado Consolidado com Cenário de Estresse da Bateria

Par	Par comparativo	OPEX elétrico sem bateria	OPEX combustão	Custo de substituição da bateria	Resultado com bateria	Síntese da viabilidade
1	BMW i3 e Mini Cooper S Top 2.0	R\$ 152.620,00	R\$ 205.652,00	R\$ 89.000,00	Elétrico maior em R\$ 35.968,00	OPEX ordinário favorável ao elétrico, mas a bateria reverte a vantagem.
2	Nissan Leaf e Polo Highline	R\$ 152.890,00	R\$ 150.220,00	R\$ 89.000,00	Elétrico maior em R\$ 91.670,00	OPEX ordinário já desfavorável ao elétrico, com piora no cenário de bateria.
3	BYD Dolphin Mini e Argo Trekking 1.3	R\$ 101.750,00	R\$ 136.460,00	R\$ 89.000,00	Elétrico maior em R\$ 54.290,00	OPEX ordinário favorável ao elétrico, mas a bateria reverte a vantagem.
4	BYD Dolphin Diamond e City Hatch Touring 1.5	R\$ 111.400,00	R\$ 147.780,00	R\$ 89.000,00	Elétrico maior em R\$ 52.620,00	OPEX ordinário favorável ao elétrico, mas a bateria reverte a vantagem.
5	BYD Yuan Plus e Jeep Compass T270	R\$ 150.800,00	R\$ 205.760,00	R\$ 89.000,00	Elétrico maior em R\$ 34.040,00	OPEX ordinário favorável ao elétrico, mas a bateria reverte a vantagem.
6	Volvo XC40 Recharge e Toyota Corolla Cross	R\$ 218.000,00	R\$ 188.000,00	R\$ 89.000,00	Elétrico maior em R\$ 119.000,00	OPEX ordinário já desfavorável ao elétrico, com piora no cenário de bateria.
7	GWM Ora 03 Skin e Cruze Hatch LTZ 1.0 Turbo	R\$ 123.800,00	R\$ 166.900,00	R\$ 89.000,00	Elétrico maior em R\$ 45.900,00	OPEX ordinário favorável ao elétrico, mas a bateria reverte a vantagem.
8	BYD Seal e BMW 320i M Sport	R\$ 228.500,00	R\$ 268.650,00	R\$ 89.000,00	Elétrico maior em R\$ 48.850,00	OPEX ordinário favorável ao elétrico, mas a bateria reverte a vantagem.
9	Renault Kwid E-Tech e Renault Kwid 1.0	R\$ 80.400,00	R\$ 103.350,00	R\$ 89.000,00	Elétrico maior em R\$ 66.050,00	OPEX ordinário favorável ao elétrico, mas a bateria reverte a vantagem.

Fonte: Elaborado pelo autor com base no cenário de degradação severa de 50% e substituição integral do pack de baterias considerado no estudo.

4.2.2. SÍNTESE ANALÍTICA DOS RESULTADOS

Os resultados consolidados demonstram que os veículos elétricos apresentam vantagem energética consistente em todos os pares comparativos analisados. Em todos os casos, o gasto acumulado com energia elétrica foi inferior ao gasto com combustível do veículo a combustão equivalente, confirmando a maior eficiência operacional da propulsão elétrica. Essa diferença decorre do menor custo unitário da energia elétrica por quilômetro rodado e da maior eficiência energética dos motores elétricos, que convertem parcela mais elevada da energia disponível em movimento efetivo do veículo.

Entretanto, a análise também evidencia que a economia energética, isoladamente, não é suficiente para concluir pela superioridade econômica dos veículos elétricos. Quando são incorporados à manutenção, pneus, IPVA e seguro, o resultado passa a variar conforme o par analisado. Em sete dos nove pares, o veículo elétrico apresentou OPEX acumulado inferior ao do modelo a combustão quando desconsiderada a substituição da bateria. Nos pares Nissan *Leaf* e Polo *Highline*, e Volvo *XC40 Recharge* e Toyota Corolla Cross, o custo operacional consolidado do elétrico foi superior, demonstrando que custos acessórios podem neutralizar a vantagem obtida na energia.

A inclusão do *payback* aprofunda essa análise, pois permite verificar se a economia operacional é suficiente para compensar eventual sobrepreço inicial do veículo elétrico. O indicador mostrou três situações distintas. Na primeira, o retorno é imediato, quando o elétrico já inicia mais barato e ainda apresenta menor OPEX, como ocorreu nos pares BMW *i3* e Mini Cooper S, GWM Ora 03 Skin e Cruze Hatch, e BYD Seal e BMW 320i. Na segunda, o retorno ocorre dentro do ciclo de oito anos, como nos pares BYD Dolphin Mini e Argo Trekking, e BYD Dolphin Diamond e City Hatch Touring. Na terceira, o retorno não ocorre dentro do horizonte analisado ou simplesmente não ocorre, como observado no BYD Yuan Plus, no Renault Kwid E-Tech, no Nissan *Leaf* e no Volvo *XC40 Recharge*.

O resultado do *payback* indica que a viabilidade econômica da eletrificação é mais favorável quando o veículo elétrico possui preço de aquisição próximo ou inferior ao do veículo a combustão comparado. Também é favorecida quando a diferença anual de OPEX é suficiente para compensar o investimento adicional em prazo inferior ao período de utilização previsto. Assim, veículos elétricos com menor sobrepreço inicial e boa eficiência operacional tende a apresentar retorno econômico mais competitivo. Por outro lado, modelos com preço inicial muito superior ou com custos elevados de seguro, pneus e IPVA demandam prazo de retorno maior, mesmo quando apresentam economia relevante de energia.

Em relação à depreciação, os dados demonstram que os veículos elétricos ainda apresentam maior sensibilidade à perda de valor residual no mercado brasileiro. A média anual de desvalorização dos modelos elétricos foi de 12,79%, enquanto os modelos a combustão apresentaram média de 6,57%. A diferença é relevante porque a depreciação representa um dos componentes mais expressivos do TCO, especialmente em veículos com maior valor de aquisição. Os casos mais críticos foram Renault Kwid E-Tech, com 31,09% ao ano, Nissan Leaf, com 25,11% ao ano, e BMW i3, com 17,39% ao ano.

A comparação acumulada entre 2023 e 2026 reforça essa conclusão. A média dos veículos elétricos passou de R\$ 196.981,56 para R\$ 130.298,67, com perda média acumulada de 37,20%. No mesmo período, a média dos veículos a combustão passou de R\$ 167.546,78 para R\$ 132.696,56, com perda média acumulada de 19,18%. Portanto, embora o preço médio final das duas categorias tenha se aproximado em 2026, os elétricos sofreram perda patrimonial proporcionalmente mais intensa ao longo do período analisado.

A análise por pares mostra que a desvalorização dos elétricos não ocorre de forma uniforme. O BYD Dolphin Mini, por exemplo, apresentou perda acumulada de 14,37% e desvalorização média anual de 4,20%, desempenho inferior ao da média dos elétricos e próximo ao comportamento de veículos a combustão. Já o Renault Kwid E-Tech apresentou perda acumulada de 55,43%, indicando forte redução do valor residual no período. Essa diferença entre modelos demonstra que a tecnologia elétrica, por si só, não explica integralmente o comportamento patrimonial; o resultado também depende do posicionamento de mercado, do preço inicial, da aceitação do modelo e da competitividade frente a veículos mais recentes.

O cenário de estresse tecnológico, com degradação severa de 50% da bateria e substituição integral do pack ao custo estimado de R\$ 89.000,00, altera substancialmente a conclusão econômica. Nesse cenário, todos os pares passam a apresentar resultado desfavorável ao veículo elétrico quando comparados aos respectivos modelos a combustão. Isso não significa que a substituição da bateria ocorrerá necessariamente em todos os casos, mas demonstra a sensibilidade da análise econômica a esse componente, que possui custo elevado e impacto direto sobre a percepção de risco do mercado de seminovos.

A partir desses resultados, conclui-se que a eletrificação apresenta competitividade operacional relevante, mas sua viabilidade econômica plena depende de condições específicas. O veículo elétrico tende a ser mais competitivo quando combina menor preço inicial, baixa depreciação, seguro moderado, manutenção documentada por fonte oficial e ausência de substituição relevante de bateria no horizonte de uso. Quando uma dessas variáveis se torna

desfavorável, especialmente depreciação elevada ou custo extraordinário de bateria, a vantagem energética pode ser reduzida ou eliminada.

Dessa forma, a principal contribuição dos resultados é demonstrar que a decisão econômica entre veículos elétricos e veículos a combustão não deve ser baseada apenas no gasto com energia ou combustível. A análise deve considerar o TCO, o valor residual, o *payback* operacional e os riscos tecnológicos associados ao ciclo de vida do veículo. O conjunto dos dados obtidos permite afirmar que os elétricos já são competitivos em determinados pares e perfis de uso, mas ainda não apresentam superioridade econômica generalizada em todos os segmentos analisados.

5. CONCLUSÕES

A transição da mobilidade baseada em motores de combustão interna para sistemas de propulsão elétrica representa uma das maiores transformações tecnológicas já observadas na indústria automotiva contemporânea. Impulsionada pela necessidade de redução das emissões de gases de efeito estufa, pela evolução dos sistemas de armazenamento energético e pelo avanço das políticas globais de descarbonização, a eletrificação automotiva vem modificando progressivamente os paradigmas técnicos, econômicos e operacionais do setor de transportes.

Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo analisar a viabilidade econômica da eletrificação da frota de veículos leves no mercado brasileiro por meio da metodologia do TCO, considerando a construção das curvas de desvalorização patrimonial dos modelos analisados e a comparação técnica e econômica entre veículos elétricos e veículos equipados com motores de combustão interna pertencentes a segmentos equivalentes.

Para atingir esse objetivo, foram analisados diferentes pares comparativos distribuídos entre múltiplos segmentos automotivos, incluindo veículos compactos urbanos, *hatchbacks* médios, SUVs premium e sedãs de alta performance. A metodologia aplicada incorporou variáveis relacionadas à depreciação patrimonial, consumo energético, manutenção, pneus, seguro, IPVA e risco tecnológico associado ao sistema de baterias de alta tensão.

Os resultados obtidos demonstraram que os veículos elétricos apresentam superioridade operacional significativa quando analisados sob a ótica da eficiência energética. Em todos os pares comparativos estudados, os modelos elétricos apresentaram custos energéticos substancialmente inferiores aos veículos equipados com motores de combustão interna, resultado diretamente associado à elevada eficiência dos motores elétricos, cuja capacidade de conversão energética ultrapassa 90%, enquanto motores térmicos convencionais permanecem limitados por perdas termodinâmicas inerentes ao processo de combustão.

Além da redução do consumo energético, os veículos elétricos também demonstraram vantagens importantes relacionadas à manutenção mecânica. A menor quantidade de componentes móveis, a ausência de sistemas complexos de combustão e a utilização de frenagem regenerativa contribuíram diretamente para a redução dos custos operacionais acumulados ao longo do horizonte de oito anos analisado.

Entretanto, os resultados também evidenciaram que a viabilidade econômica da eletrificação não depende exclusivamente da economia operacional proporcionada pela redução

do consumo energético e da manutenção. A análise das curvas de desvalorização patrimonial demonstrou que os veículos elétricos ainda apresentam maior sensibilidade à volatilidade tecnológica e ao comportamento do mercado de seminovos, principalmente nos segmentos de entrada e em modelos pertencentes às primeiras gerações da eletrificação automotiva nacional.

A construção das curvas de depreciação revelou que fatores como rápida evolução tecnológica, expansão contínua da autonomia das baterias e crescimento da concorrência entre fabricantes exercem influência direta sobre o valor residual dos veículos elétricos. Em determinados casos analisados, observou-se que a perda patrimonial acumulada pode reduzir parcialmente a vantagem econômica obtida por meio da eficiência operacional.

Outro aspecto de elevada relevância identificado durante o desenvolvimento da pesquisa refere-se ao impacto do risco tecnológico associado ao sistema de armazenamento energético. A simulação de cenários de degradação severa das baterias demonstrou que o custo potencial de substituição do pack energético ainda representa uma variável crítica para a consolidação da eletrificação automotiva no Brasil.

Apesar disso, os resultados também indicaram que os veículos elétricos pertencentes a segmentos premium e dotados de arquiteturas tecnológicas mais modernas apresentaram comportamento econômico significativamente mais competitivo. Modelos equipados com baterias de química mais avançada e maior maturidade tecnológica demonstraram maior estabilidade patrimonial e menor vulnerabilidade ao risco de obsolescência acelerada.

Outro fator relevante observado ao longo da pesquisa refere-se à influência do perfil de utilização sobre a viabilidade econômica da eletrificação. Veículos submetidos a elevadas quilometragens anuais apresentaram maior capacidade de amortização do investimento inicial adicional associado ao CAPEX dos modelos elétricos, em razão da economia operacional acumulada ao longo do tempo.

No contexto brasileiro, verificou-se que a matriz elétrica nacional predominantemente renovável amplia parcialmente os benefícios ambientais associados à eletrificação automotiva, sobretudo quando comparada a países cuja geração elétrica permanece fortemente dependente de combustíveis fósseis. Além disso, a crescente presença de fabricantes chinesas no mercado nacional vem contribuindo para ampliar a competitividade tecnológica e reduzir gradualmente as barreiras econômicas associadas aos veículos elétricos.

Sob a perspectiva da engenharia econômica, conclui-se que a análise da viabilidade da eletrificação automotiva não deve ser limitada exclusivamente ao preço inicial de aquisição do veículo. A utilização da metodologia de TCO mostrou-se fundamental para a realização de avaliações mais precisas e tecnicamente fundamentadas, permitindo integrar variáveis patrimoniais, operacionais e tecnológicas dentro de uma única estrutura analítica.

Dessa forma, conclui-se que os veículos elétricos já apresentam viabilidade econômica concreta em diversos segmentos do mercado automotivo brasileiro, principalmente em aplicações de elevada quilometragem e em modelos tecnologicamente mais avançados. Entretanto, fatores relacionados à depreciação patrimonial, maturidade do mercado secundário e incertezas sobre o comportamento de longo prazo das baterias ainda representam limitações relevantes para a consolidação definitiva da eletrificação em larga escala no país.

Por fim, este trabalho contribui para ampliar a compreensão técnica e econômica da mobilidade elétrica no Brasil, fornecendo subsídios para futuras pesquisas relacionadas à evolução das tecnologias de baterias, comportamento residual dos veículos eletrificados, impacto da infraestrutura de recarga e desenvolvimento de políticas públicas voltadas à transição energética do setor automotivo nacional.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando a constante evolução tecnológica da mobilidade elétrica, observa-se a existência de diversas possibilidades para aprofundamento futuro do tema.

Uma das principais sugestões consiste na realização de estudos experimentais sobre a degradação real de baterias de veículos elétricos em condições climáticas brasileiras. Pesquisas futuras poderão analisar a influência de temperatura, ciclos de recarga e perfil de utilização sobre a perda de capacidade energética das baterias. Segundo *Neubauer e Pesaran* (2011), fatores térmicos e padrões de carregamento possuem influência direta sobre o envelhecimento eletroquímico das células.

Outra possibilidade relevante refere-se à investigação da relação entre infraestrutura de recarga e valorização dos veículos elétricos no mercado de seminovos. De acordo com a *International Energy Agency* (IEA, 2024), a expansão da infraestrutura de carregamento representa um dos principais fatores para o crescimento da mobilidade elétrica em mercados emergentes. Também se recomenda a ampliação das análises comparativas entre diferentes arquiteturas de propulsão, incluindo veículos híbridos convencionais (HEV), híbridos plug-in (PHEV) e veículos movidos a hidrogênio. Segundo *Palmer et al.* (2018), diferentes sistemas de propulsão apresentam comportamentos econômicos distintos conforme o perfil de utilização e os custos energéticos regionais.

Outra vertente promissora consiste na aplicação de inteligência artificial para projeção de curvas de desvalorização de veículos elétricos. Técnicas de aprendizado de máquina e modelagem preditiva poderão contribuir para análises mais precisas sobre comportamento residual e risco tecnológico no mercado automotivo.

Além disso, futuros estudos poderão incorporar metodologias de Análise do Ciclo de Vida (Life Cycle Assessment – LCA), permitindo avaliar simultaneamente os impactos ambientais, energéticos e econômicos dos veículos elétricos e de seus sistemas de baterias. Segundo *Hawkins et al.* (2013), a produção das baterias representa parcela significativa dos impactos ambientais associados à eletrificação. Também se destaca a importância de pesquisas voltadas à redução do custo das baterias e seus impactos sobre a competitividade dos veículos elétricos. Estudos da *BloombergNEF* (2023) indicam que a queda contínua do custo das baterias constitui um dos principais fatores responsáveis pela expansão global da mobilidade elétrica.

Outra possibilidade relevante refere-se à análise da viabilidade econômica da eletrificação em frotas comerciais urbanas, como veículos de entrega e transporte por aplicativo. Segundo a IEA (2024), veículos submetidos a elevada quilometragem anual apresentam maior potencial de amortização do CAPEX inicial devido à economia operacional acumulada.

Por fim, recomenda-se a realização de estudos relacionados à percepção do consumidor brasileiro sobre a degradação das baterias e a confiabilidade dos veículos elétricos. Segundo Onohara (2022), a insegurança relacionada à durabilidade das baterias ainda representa uma das principais barreiras para a popularização da mobilidade elétrica no Brasil.

7. REFERÊNCIAS

AFONSO, Vanderlei Moraes; FERRAZ, Rodrigo de Sousa Campista. Base geral dos carros elétricos em relação ao consumo, impacto ambiental e custo-benefício. *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, v. 8, n. 11, p. 545-558, 2022.

AL-ALAWI, B. M.; BRADLEY, T. H. Total cost of ownership, payback, and consumer preference modeling of plug-in hybrid electric vehicles. *Applied Energy*, v. 103, p. 488-506, 2013.

ANFAVEA. Anuário da indústria automobilística brasileira. São Paulo: ANFAVEA, 2024.

AZEVEDO, Marcelo Henrique de. Carros elétricos: viabilidade econômica e ambiental de inserção competitiva no mercado brasileiro. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação).

BLOOMBERGNEF. Battery Pack Prices Fall to an Average of \$139/kWh. New York: BloombergNEF, 2023.

BORBA, Bruno. Big Push para a mobilidade sustentável: cenários para acelerar a penetração de veículos elétricos leves no Brasil. Santiago: Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe (CEPAL), 2020.

BMW BRASIL. BMW Service. Disponível em: <https://www.bmw.com.br/pt/bmw-service.html>. Acesso em: 5 nov. 2025.

BYD BRASIL. Manual manutenção e garantia. Disponível em: <https://www.byd.com/br/manual-manutencao-garantia>. Acesso em: 12 nov. 2025.

BYD BRASIL. Plano de manutenção. Disponível em: <https://www.byd.com/br/plano-de-manutencao>. Acesso em: 19 nov. 2025.

CASTRO, Bernardo Hauch Ribeiro de; BARROS, Daniel Chiari; VEIGA, Suzana Gonzaga da. Baterias automotivas: panorama da indústria no Brasil, as novas tecnologias e como os veículos elétricos podem transformar o mercado global. *BNDES Setorial*, n. 37, p. 443-496, mar. 2013.

DAMASCENO, Breno Veloso Leite. O futuro da mobilidade no Brasil e no mundo: uma análise econômica entre as alternativas de eletrificação da frota e utilização do bioetanol. Belo Horizonte: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2022.

EAF0 – EUROPEAN ALTERNATIVE FUELS OBSERVATORY. Electric Vehicle Market Statistics. Bruxelas: European Commission, 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional 2024. Brasília: EPE, 2024.

FIAT. Revisão programada. Disponível em: <https://servicos.fiat.com.br/revisao.html>. Acesso em: 12 nov. 2025.

FRANTZ, Alberto Rachewsky. Desafios atuais do mercado de carros elétricos. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação).

GILLEON, Sean et al. Powertrain performance and total cost of ownership analysis for heavy-duty vehicles. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2022.

GWM BRASIL. Revisões com preço fixo. Disponível em: <https://www.gwmmotors.com.br/pt/servicos/revisoes>. Acesso em: 15 nov. 2025.

HEYWOOD, John B. Internal Combustion Engine Fundamentals. 2. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2018.

HONDA. Revisões. Disponível em: <https://www.honda.com.br/pos-venda/automoveis/topico/revisoes>. Acesso em: 22 nov. 2025.

HUNTER, Chad et al. Spatial and temporal analysis of the total cost of ownership for class 8 tractors and class 4 parcel delivery trucks. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2021.

IÑIGUEZ, Johanna Patricia Orellana. Estimativa do estado de carga de baterias de íons de lítio em veículos elétricos usando algoritmos de aprendizado de máquina. 2025. Tese (Doutorado).

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Global EV Outlook 2023. Paris: IEA, 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Global EV Outlook 2024: trends in electric cars and charging infrastructure. Paris: IEA, 2024.

JEEP BRASIL. Revisão programada. Disponível em:

<https://www.jeep.com.br/proprietarios/revisao-programada.html>. Acesso em: 12 nov. 2025.

JOHNSON, Caley et al. Financial analysis of battery electric transit buses. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2020.

LARMINIE, James; LOWRY, John. Electric Vehicle Technology Explained. 2. ed. West Sussex: John Wiley & Sons, 2012.

LETMATHE, Peter; SUESSENBACH, Felix. A consumer-oriented total cost of ownership model for different vehicle types in Germany. Transportation Research Part D: Transport and Environment, v. 57, p. 314-335, 2017.

LI, Y. et al. Total cost of ownership of electric vehicles: a review and analysis. Applied Energy, v. 268, 2020.

MALAQUIAS, J. V. et al. Renewable energy and mobility in Brazil: analysis of energy alternatives for transport sector. 2019.

MARIANO, Tiago; AHRENS, Rudy de Barros. A revolução diante do cenário de transformação tecnológica e inovadora de carros elétricos: estudo de caso em uma indústria automotiva no município de Ponta Grossa – Paraná. ARACÊ, v. 7, n. 10, p. e8802, 2025.

MINI BRASIL. MINI Service Inclusive. Disponível em:

https://www.mini.com.br/pt_BR/home/services/mini-service-inclusive.html. Acesso em: 12 nov. 2025.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. Battery technology and cost analysis for electric vehicles. Golden: NREL, 2022.

NEUBAUER, Jeremy; PESARAN, Ahmad. The Ability of Battery Second Use Strategies to Impact Plug-In Electric Vehicle Prices and Serve Utility Energy Storage Applications. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2011.

NISSAN BRASIL. Revisão periódica Nissan. Disponível em:
<https://www.nissan.com.br/servicos/revisao-periodica.html>. Acesso em: 12 nov. 2025.

OLIVEIRA, Bernardo Dias Soares de. A desvalorização acelerada de veículos elétricos no Brasil: um obstáculo à adesão em larga escala. Brasília: Instituto Brasileiro de Ensino, Desenvolvimento e Pesquisa, 2024.

ONOHARA, Meiry Mayumi. Comparações entre a eficiência energética de carro elétrico e de carro à combustão: uma análise dos impactos socioambientais e financeiros. Revista de Empreendedorismo e Gestão de Micro e Pequenas Empresas, v. 7, n. 1, p. 73-92, 2022.

PALMER, K.; TATE, J.; WADUD, Z.; NELLTHORP, J. Total Cost of Ownership and Market Share for Hybrid and Electric Vehicles in the UK, US and Japan. Applied Energy, v. 209, p. 108-119, 2018.

PEREIRA, Elisa Almeida et al. Análise comparativa dos custos dos veículos de combustão interna e veículos elétricos: estudo de caso dos Correios. In: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA EM TRANSPORTE DA ANPET, 29., 2015. Anais [...]. p. 2225-2235.

RENAULT BRASIL. Revisão preço fechado. Disponível em:
<https://www.renault.com.br/todos-os-servicos/revisao.html>. Acesso em: 12 nov. 2025.

SANTOS, A. C. F. R. Análise da viabilidade técnica e econômica de um veículo elétrico versus veículo a combustão. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Eficiência Energética) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017. Disponível em:
https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/12590/TCCE_EEAPP_EaD_2017_SANTOS_A NA.pdf?sequence=1. Acesso em: 16 nov. 2025.

SOARES, João Francisco Peixoto de Carvalho. Análise econômica e ambiental do uso de carros elétricos e híbridos sob a perspectiva do consumidor. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação).

SOVACOO, Benjamin K.; GRIFFITHS, Steve. The energy trilemma and electric mobility. Energy Policy, v. 144, 2020.

TABELA FIPE. Tabela FIPE. Disponível em: <https://veiculos.fipe.org.br>. Acesso em: 12 nov. 2025.

TOYOTA BRASIL. Preço fechado. Disponível em: <https://www.toyota.com.br/meu-toyota/servicos/preco-fechado>. Acesso em: 12 nov. 2025.

TOYOTA BRASIL. Revisões periódicas. Disponível em: <https://www.toyota.com.br/meu-toyota/servicos/revisoes-periodicas>. Acesso em: 12 nov. 2025.

VOLKSWAGEN DO BRASIL. Revisões Volkswagen. Disponível em: <https://www.vw.com.br/pt/servicos-e-acessorios/servicos-e-produtos/Revisoes.html>. Acesso em: 12 nov. 2025.

VOLVO CARS BRASIL. Revisão preço fixo. Disponível em: <https://www.volvocars.com/br/l/servico-manutencao/plano-revisao/>. Acesso em: 12 nov. 2025.