



MODELO PARA ESTIMATIVA DO CRESCIMENTO DA FROTA DE VEÍCULOS LEVES E IMPACTOS DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS NAS EMISSÕES DE CO₂

WESLEY CÂNDIDO DE MELO

TESE DE DOUTORADO EM TRANSPORTES

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**MODELO PARA ESTIMATIVA DO CRESCIMENTO DA
FROTA DE VEÍCULOS LEVES E IMPACTOS DOS
VEÍCULOS ELÉTRICOS NAS EMISSÕES DE CO₂**

WESLEY CÂNDIDO DE MELO

ORIENTADOR: Dr. AUGUSTO CESAR DE MENDONÇA BRASIL

TESE DE DOUTORADO EM TRANSPORTES

**PUBLICAÇÃO: T.TD-001/2025
BRASÍLIA/DF: AGOSTO/2025**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**MODELO PARA ESTIMATIVA DO CRESCIMENTO DA FROTA DE
VEÍCULOS LEVES E IMPACTOS DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS NAS
EMISSÕES DE CO₂**

WESLEY CÂNDIDO DE MELO

**TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
TRANSPORTES DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO
PARTE DOS REQUISÍTOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
DOUTOR EM TRANSPORTES.**

APROVADA POR:

**PROF.: AUGUSTO CESAR DE MENDONÇA BRASIL, Dr., (PPGT-UnB)
(ORIENTADOR)**

**PROFa.: FABIANA SERRA DE ARRUDA, Dr^a, (PPGT-UnB)
(EXAMINADORA INTERNA)**

**PROFa.: ÉRIKA CRISTINE KNEIB, Dr^a, (FAV-UFG)
(EXAMINADORA EXTERNA)**

**TIAGO ALEXANDRE ABRANCHES TEIXEIRA LOPES FARIAS, Dr., (IST-
PORTUGAL)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

BRASÍLIA/DF, 25 de AGOSTO de 2025.

FICHA CATALOGRÁFICA

MELO, WESLEY CÂNDIDO

Modelo para Estimativa do Crescimento da Frota de Veículos Leves e Impactos dos Veículos Elétricos nas Emissões de CO₂. Brasília, 2025.

xvii, 129p., 210x297mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Transportes, 2025).

Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- 1 – Veículo Elétrico
- 3 – Matriz Energética Brasileira
- 5 – Emissões de CO₂
- I – ENC/FT/UnB

2 – Frota de Veículos Brasileira 4 – Consumo de Energético

II – Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MELO, W. C. (2025). Modelo para Estimativa do Crescimento da Frota de Veículos Leves e Impactos dos Veículos Elétricos nas Emissões de CO₂. Publicação T.TD-001/2025. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 129 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: WESLEY CÂNDIDO DE MELO

TÍTULO DA TESE: Modelo para Estimativa do Crescimento da Frota de Veículos Leves e Impactos dos Veículos Elétricos nas Emissões de CO₂.

GRAU: Doutor ANO: 2025

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Wesley Cândido de Melo

E-mail: wesleycandido@gmail.com

Endereço: Anexo SG-12, 1º andar. Campus Universitário Darcy Ribeiro - Asa Norte: Brasília: Distrito Federal: 70910-900

DEDICATÓRIA

*Dedico esta tese, com todo amor e gratidão,
à minha esposa Pollyanne e aos meus
filhos, Bernardo e Alice.*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, elevo minha gratidão a Deus, pela força e luz que me guiou nos momentos de incerteza e me sustentou nos dias mais desafiadores.

À minha companheira de vida, Pollyanne, por sua presença constante, incentivo incondicional e compreensão nos momentos de ausência. Aos meus filhos, Bernardo e Alice, cuja alegria renovou minha força e inspiração, mesmo quando o tempo parecia insuficiente.

A meus pais, Najimar e Abadia, agradeço por terem sido os pilares que me sustentaram desde o início, sempre acreditando em meu potencial e me incentivando.

Aos meus familiares, especialmente aos meus sobrinhos — Oliva, Gabriel, Gustavo e Ana —, agradeço pelo afeto genuíno e pela alegria contagiante, que me revigoraram nos momentos de exaustão ao longo desta jornada.

De forma especial, sou grato ao Professor Augusto Brasil, cuja orientação precisa, apoio incansável, paciência generosa e compromisso com o ensino foram fundamentais para minha formação acadêmica e para o desenvolvimento deste estudo.

Expresso minha profunda gratidão ao grande amigo Edwin Silva, cuja presença constante, apoio e parceria incansável na correria do dia a dia e nos intensos estudos de finais de semana e madrugadas, foram fundamentais para enfrentar os desafios desta trajetória acadêmica.

Aos docentes e à coordenação do Programa de Pós-Graduação em Transportes da Universidade de Brasília (PPGT/UnB), registro minha sincera gratidão pelo conhecimento compartilhado, pelas discussões enriquecedoras e pelo apoio institucional contínuo. À Camila, minha eterna gratidão pela atenção e agilidade nos trâmites administrativos, sempre com simpatia e disponibilidade. Agradeço também a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Aos amigos Anderson França, Cleber Alves, Mauro Rogério e Ronaldo Fernandes, agradeço pelas conversas encorajadoras, pelo suporte fraternal e pela parceria em momentos decisivos deste processo.

Aos colegas das turmas do PPGT/UnB, cujos debates e colaborações acadêmicas ampliaram significativamente minha visão crítica e colaboraram diretamente para a consolidação deste estudo.

Por fim, expresso minha gratidão a todos que, de maneira direta ou indireta, contribuíram para a construção e desenvolvimento desta tese. Cada gesto, cada palavra, cada contribuição foi essencial.

Muito obrigado!

RESUMO

O presente estudo explora a transição para a mobilidade elétrica no Brasil, com foco no impacto da expansão da frota de veículos elétricos sobre as emissões de CO₂ e nas perspectivas para o setor de transportes sustentáveis. A pesquisa foi fundamentada inicialmente por meio de uma revisão abrangente da literatura e posteriormente na aplicação de uma metodologia rigorosa, que incluiu estudo experimental, modelagem matemática, análise de cenários e validação dos resultados. Como parte do estudo experimental, foi conduzido um levantamento de dados em condições reais de trânsito na capital federal brasileira, Brasília, com um veículo de motor a combustão interna abastecido com gasolina e etanol, um veículo híbrido a gasolina e um veículo elétrico a bateria. O intuído do estudo experimental foi caracterizar e avaliar os ciclos de conduções reais, com medições de velocidades, consumos de combustível e emissões de CO₂. Os resultados numéricos do modelo adotado, suportado pelos dados experimentais, revelam que a adoção de veículos híbridos movidos a etanol ou veículos elétricos tem o potencial de reduzir significativamente as emissões de CO₂, especialmente quando associada a uma matriz energética cada vez mais dependente de fontes renováveis. Para um cenário menos otimista da frota, composta apenas com veículos a gasolina, obteve-se um total de emissões de 9 milhões de toneladas de CO₂ para o ano de 2050, enquanto que para um cenário excessivamente otimista, composto por uma frota apenas de veículos elétricos a bateria, as emissões alcançam 720 mil toneladas de CO₂, podendo ainda ser reduzida para 366 mil toneladas de CO₂ com a utilização de uma frota veicular composta de 50% de veículos híbridos movidos a etanol e de 50 % de veículos elétricos. Assim, o aumento da frota de veículos elétricos deve ter um planejamento energético estratégico, que assegure a predominância de fontes limpas e renováveis. Além disso, o estudo aponta que a adoção de veículos híbridos flex movidos a etanol, pode representar uma estratégia eficaz para reduzir as emissões de CO₂, considerando as particularidades do mercado brasileiro. O estudo conclui que, para maximizar os benefícios da mobilidade elétrica, é crucial um planejamento energético integrado e políticas públicas consistentes que incentivem a adoção de tecnologias limpas. Em suma, oferece uma contribuição significativa para o entendimento da mobilidade elétrica no Brasil e pode influenciar tanto a formulação de políticas públicas quanto as estratégias do setor industrial.

Palavras Chaves: Veículos Elétricos; Frota de Veículos Brasileira; Matriz Energética Brasileira; Consumo Energético; Emissões de CO₂;

ABSTRACT

This study explores the transition to electric mobility in Brazil, focusing on the impact of the expansion of the electric vehicle fleet on CO₂ emissions and the outlook for the sustainable transportation sector. The research was initially based on a comprehensive literature review and subsequently applied a rigorous methodology, which included an experimental study, mathematical modeling, scenario analysis, and validation of the results. As part of the experimental study, a data collection was conducted under real-world traffic conditions in the Brazilian capital, Brasília, using a gasoline-ethanol internal combustion engine vehicle, a gasoline-fueled hybrid vehicle, and a battery-electric vehicle. The purpose of the experimental study was to characterize and evaluate real-world driving cycles, measuring speeds, fuel consumption, and CO₂ emissions. The numerical results of the adopted model, supported by experimental data, reveal that the adoption of ethanol-fueled hybrid vehicles or electric vehicles has the potential to significantly reduce CO₂ emissions, especially when combined with an energy matrix increasingly dependent on renewable sources. For a less optimistic fleet scenario, consisting solely of gasoline-powered vehicles, total emissions of 9 million tons of CO₂ were obtained for the year 2050. While for an overly optimistic scenario, consisting solely of battery-electric vehicles, emissions reach 720,000 tons of CO₂. This could be further reduced to 366,000 tons of CO₂ by using a vehicle fleet composed of 50% ethanol-powered hybrid vehicles and 50% electric vehicles. Therefore, the expansion of the electric vehicle fleet must be guided by strategic energy planning that ensures the predominance of clean and renewable sources. Furthermore, the study indicates that the adoption of ethanol-powered flex-fuel hybrid vehicles can represent an effective strategy for reducing CO₂ emissions, considering the particularities of the Brazilian market. The study concludes that, to maximize the benefits of electric mobility, integrated energy planning and consistent public policies that encourage the adoption of clean technologies are crucial. In short, it offers a significant contribution to the understanding of electric mobility in Brazil and can influence both the formulation of public policies and the strategies of the industrial sector.

Keywords: Electric Vehicles; Brazilian Vehicle Fleet; Brazilian Energy Matrix; Energy Consumption; CO₂ Emissions;

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	16
1.2	DELIMITAÇÃO DO PROBLEMA.....	20
1.3	OBJETIVOS	21
1.3.1	Objetivo Geral.....	21
1.3.2	Objetivos Específicos	21
1.4	JUSTIFICATIVA	22
1.5	METODOLOGIA DE ELABORAÇÃO DA TESE	26
1.6	ESTRUTURA DO TEXTO DA TESE.....	28
2	REVISÃO DA LITERATURA E ESTADO DA ARTE	29
2.1	ATRIBUTOS DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS	29
2.2	MODELOS DE CRESCIMENTO DA FROTA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS LEVES.....	35
2.3	METODOLOGIAS PARA INVENTÁRIO DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS POR VEÍCULOS AUTOMOTORES RODOVIÁRIOS.....	38
2.4	CICLO DE CONDUÇÃO VEICULAR.....	41
2.5	OFERTA INTERNA DE ENERGIA	44
2.5.1	Matriz Elétrica Brasileira	47
2.5.2	Emissões de CO ₂ na Matriz Energética Brasileira	49
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	51
3.1	CARACTERIZAÇÃO DAS ROTAS.....	52
3.1.1	Caracterização da Área de Estudo.....	53
3.1.2	Rotas Estudadas.....	53
3.1.3	Frota de Veículos.....	55
3.1.4	Veículos Utilizados.....	58
3.1.5	Calibração do Consumo de Combustível.....	62
3.1.6	Caracterização dos Ciclos de Condução.....	66
3.2	MODELAGEM DO CONSUMO ENERGÉTICO E EMISSÃO DE CO ₂ DA FROTA CIRCULANTE	68
3.3	MODELAGEM DOS CENÁRIOS	68
3.4	QUANTIFICAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO ₂ NO CICLO E VIDA DOS COMBUSTÍVEIS E DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	70
3.5	PROJEÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E EMISSÕES DE CO ₂	72
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	75
4.1	CONSUMO ENERGÉTICO E EMISSÕES DE CO ₂ NAS ROTAS	75

4.2	MODELAGEM DO CONSUMO ENERGÉTICO E EMISSÃO DE CO₂.....	78
4.3	PROJEÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E EMISSÕES DE CO₂.....	82
4.4	MODELAGEM DOS CENÁRIOS	85
4.5	ESTIMATIVAS DE EMISSÕES DE CO₂ DA FROTA VEÍCULAR PARA AS PRÓXIMAS DÉCADAS.....	90
5	CONCLUSÕES	99
5.1	CONCLUSÕES GERAIS	99
5.2	LIMITAÇÕES DO TRABALHO	100
5.3	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	101
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102
	APÊNDICE A – REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	115
	APÊNDICE B – CONTROLADORES DE VELOCIDADES ROTAS ESTUDADAS..	124
	APÊNDICE C – CICLOS DE CONDUÇÃO.....	126

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Algumas Características das Rotas Estudadas	55
Tabela 3.2 Principais Características FOX/PRIUS/LEAF	59
Tabela 3.3 Características Técnicas dos Equipamentos e dos Softwares Utilizados	61
Tabela 3.4 Dados Obtidos nas Rotas com a Utilização do OBD	62
Tabela 3.5 Média dos Resultados dos Testes com o Tanque Externo	65
Tabela 3.6 Resultados Parciais dos Ciclos de Condução para as Diferentes Tecnologias.....	67
Tabela 4.1 Características das rotas	76
Tabela 4.2 Diferenças identificadas entre o Consumo e CO ₂ para as rotas e o ciclo FTP-75 .	77
Tabela 4.3 Emissões Totais de CO ₂ determinadas nos Cenários.....	98
Tabela A.1 Número de Publicações por Palavra-Chave e Base de Dados.....	115
Tabela C.1 Características dos Ciclos de Condução nas Rotas/Brasília-DF.....	129

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Etapas e Componentes da Metodologia do Estudo/Estrutura da Tese.....	27
Figura 2.1 Projeção de Crescimento da Frota de Veículos 2020-2030	36
Figura 2.2 Ciclo de Condução Urbano.....	42
Figura 2.3 Ciclo de Condução Rodoviário.....	43
Figura 2.4 Comparaçao Internacional da Participação das Fontes Renováveis	44
Figura 2.5 Consumo Final de Energia por Fonte 2021 – 2031	46
Figura 2.6 Elasticidade-Renda da Demanda de Eletricidade (Histórico x Projeção).....	47
Figura 2.7 Comparaçao Internacional Fontes Renováveis na Matriz Elétrica	48
Figura 2.8 Emissões de CO ₂ Totais da Matriz Energética Brasileira.....	49
Figura 3.1 Procedimentos Metodológicos para Concepção do Modelo.....	52
Figura 3.2 Rotas Estudadas	54
Figura 3.3 Histograma da Idade da Frota com os Níveis Correspondente e a Linha Contínua que Representação a Função de Distribuição de Probabilidade da Idade dos Veículos	56
Figura 3.4 Consumo de Combustível/Fator de Emissão de CO ₂ por ano de Fabricação e Fases PROCONVE	57
Figura 3.5 Medidor Externo de Consumo Acoplado ao Veículo	62
Figura 3.6 Teste de Qualidade do Combustível	63
Figura 3.7 Calibração do Consumo de Combustível.....	63
Figura 3.8 Teste do Dinamômetro - Consumo de Combustível.....	64
Figura 3.9 Sub-Modelo para Cálculo da Emissão CO ₂ no Ciclo de Vida dos Combustíveis ..	71
Figura 3.10 Modelo Proposto para Determinar Consumo de Combustível e Emissão CO ₂	73
Figura 4.1 Ciclos de Condução em Condições Reais nas Cinco Rotas e FTP-75 em horário de pico e fora de pico, em comparação com o FTP-75	76
Figura 4.2 Intensidade de Uso - Curva da Quilometragem dos Veículos em Função da Idade Frota de Veículos de Brasília-DF.....	79
Figura 4.3 Quilometragem Percorrida em Função dos Anos Frota Veículos de Brasília-DF..	80
Figura 4.4 Fatores Históricos de Emissão CO ₂	81
Figura 4.5 Projeção do Consumo Elétrico Brasileiro.....	82
Figura 4.6 Projeção da Participação da Matriz Elétrica Brasiléira.....	83
Figura 4.7 Consumo de Eletricidade e Emissões de CO ₂ na Matriz Elétrica Brasileira	84
Figura 4.8 Fator de Emissão CO ₂ em Função da Geração de Energia por Temoelétrica a Combustível Fóssil	84
Figura 4.9 Projeções para o Crescimento Populacional e PIB	85
Figura 4.10 Visão da Planilha em Excel Utilizada para Tabular os Dados.....	86
Figura 4.11 Sub-modelo Utilizado para Calcular o Impacto da Frota de Veículos Elétricos ..	87
Figura 4.12 Função Gompertz do Crescimento da Frota de Veículos até 2050.....	88
Figura 4.13 Função Gompertz do Crescimento - Frota de Veículos até 2050	89
Figura 4.14 Cenário Menos Otimista - Frota de Veículos até 2050.....	91
Figura 4.15 Projeções com Diversas Tecnologias - Frota de Veículos até 2050	92
Figura 4.16 Cenário Pré-Otimista - Frota de Veículos até 2050	93
Figura 4.17 Cenário Otimista - Frota de Veículos até 2050.....	94
Figura 4.18 Cenário Excessivamente Otimista - Frota de Veículos até 2050	95
Figura 4.19 Cenário Referência - Frota de Veículos até 2050	96
Figura 4.20 Cenário Alternativo - Frota de Veículos até 2050	97
Figura C.1 Ciclos de Condução do Mundo Real/Brasília-DF.....	128

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 Tipologias de Veículos Elétricos.....	26
Quadro 2.2 Características dos HEV, VEHP e BEV	33
Quadro A.1 Pré-requisitos para a Revisão Sistemática.....	116
Quadro A.2 Resultado do Levantamento das Principais Bases de Dados.....	117
Quadro A.3 Estudos Relevantes para a Temática do Grupo B	119
Quadro A.4 Estudos Relevantes para a Temática do Grupo C	121
Quadro B.1 Localização dos Controladores do DER.....	124
Quadro B.2 Fluxo Veicular nas Rotas de Estudo.....	125

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIAÇÕES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanço Energético Nacional
BEV	<i>Battery Electric Vehicle</i>
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CO ₂	Dióxido de Carbono
CODEPLAN	Companhia de Planejamento do Distrito Federal
COP21	Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas
DER/DF	Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal
DETTRAN/DF	Departamento de Trânsito do Distrito Federal
EEA	<i>European Environment Agency</i>
EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EUA	<i>United States of America</i>
EV	<i>Electric Vehicles</i>
FTP-75	<i>Federal Test Procedure</i>
GDP	<i>Gross Domestic Product</i>
GEE	Gases de Efeito Estufa
GPS	Sistema de Posicionamento Global
HEV	<i>Hybrid Electric Vehicle</i>
HWFET	<i>Highway Fuel Economy Test</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
IEA	<i>International Energy Agency</i>
MCI	Motor a Combustão Interna
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia
MOBILE	<i>Road Vehicle Emission Factor Model</i>
MOVES	<i>Motor Vehicle Emission Simulator</i>
NBR	Normas Técnicas Brasileiras
NDC	<i>Nationally Determined Contribution</i>
NEDC	Novos Ciclos de condução Europeu
NE-SR	Nova Equação por Regressão Simbólica
NiMH	Níquel Hidreto Metálico
NOS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
OBD	<i>On-Board Diagnostic</i>
OIE	Oferta Interna de Energia
ONU	Organização das Nações Unidas
PDTU	Plano Diretor de Transporte do Distrito Federal
PHEV	<i>Plug-in Hybrid Electric Vehicles</i>
PIB	Produto Interno Bruto
PNE 2050	Plano Nacional de Energia 2050
PROCONVE	Programa de Controle de Emissões Veiculares
RA's	Regiões Administrativas
RPM	Rotações do Motor por Minuto
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SENATRAN	Secretaria Nacional de Trânsito
SGDP	Processo de Difusão Gompertz

VBA	<i>Visual Basic for Applications</i>
VE's	Veículos Elétricos
VEB	Veículo Elétrico a Bateria
VEH	Veículo Elétrico Híbrido
VEHP	Veículo Elétrico Híbrido <i>Plug-in</i>

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O setor de transportes representa um dos vetores mais significativos das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) em escala global, constituindo um desafio crítico para as políticas de mitigação das mudanças climáticas. Dados recentes demonstram a magnitude desta contribuição: nos Estados Unidos, o setor foi responsável por 28% das emissões totais de GEE em 2022, enquanto na União Europeia essa participação atingiu aproximadamente 23%. (CLIMATE ACTION TRACKER, 2024; EUROPEAN COMMISSION - CLIMATE ACTION, 2024). No Brasil, o setor de transportes também é uma das principais fontes de emissões, respondendo por cerca de 11% das emissões GEE, com destaque para o uso intensivo de combustíveis fósseis no transporte rodoviário. Estimativas recentes apontam que, somente em 2023, os veículos automotores foram responsáveis por 223,8 milhões de toneladas de CO₂, o que equivale a 44% das emissões do setor de energia. (SEEG, 2023; IEMA, 2023; MMA, 2023).

Esta realidade evidencia não apenas a urgência de estratégias efetivas para a redução das emissões provenientes do transporte, particularmente em centros urbanos, mas também a necessidade de uma transformação estrutural no paradigma da mobilidade. Neste contexto, a eletromobilidade emerge como uma solução promissora, oferecendo potencial para mitigação das emissões de GEE e, simultaneamente, para a redução de impactos deletérios à saúde pública e ao meio ambiente, como a poluição atmosférica e suas múltiplas consequências (PASCOAL *et al.*, 2018).

O cenário global contemporâneo é caracterizado pela intensificação dos esforços de diversos países na integração de Veículos Elétricos (VE's) em suas frotas, compreendendo três categorias principais: Veículos Elétricos Híbridos (HEV), que combinam motores elétricos e combustão interna; Veículos Elétricos Híbridos *Plug-in* (VEHP), que permitem recarga na rede elétrica; e Veículos Elétricos a Bateria (BEV), que operam exclusivamente com energia elétrica (VONBUN, 2015; VASCONCELOS, 2017). Esta transição tecnológica representa um avanço substancial em termos de eficiência energética: enquanto veículos convencionais com motores de combustão interna apresentam eficiência entre 30% e 40%, os veículos elétricos alcançam

notáveis 90% de eficiência na conversão de energia em movimento (PASCOAL *et al.*, 2018; U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2022).

A utilização da propulsão elétrica nas próximas décadas proporcionará um aumento significativo da eficiência energética na mobilidade urbana. Adicionalmente, será a principal opção da maioria dos países para cumprir as metas de reduções das emissões dos GEE's (ALAM *et al.*, 2017; ALVES *et al.*, 2019; DI LORENZO, 2023). Contudo, o ganho de eficiência energética e a diminuição das emissões dos GEE's de cada país dependerão de diversos fatores: características da matriz elétrica adotada (com ênfase na descarbonização da produção de eletricidade), quantidade de VE's em circulação, avanços na tecnologia das baterias e particularidades da frota veicular, tanto para uso individual quanto público coletivo (HILL *et al.*, 2019). Ressalta-se que a eletrificação pode ser usada como um meio para modernização das frotas de transporte público, posto que a adoção da tecnologia pelo transporte público possa ser mais dinâmica que para os veículos individuais (BARASSA *et al.*, 2020).

Neste contexto, destaca-se a China como primeiro país a eletrificar toda a frota do transporte público de uma cidade, alcançando este marco em 2018 em Shenzhen. Na América Latina, o Chile tornou-se pioneiro a partir de 2019, com a implementação de políticas públicas robustas para a eletrificação da frota de ônibus públicos da cidade de Santiago, estabelecendo-se como referência em eletromobilidade (FGV ENERGIA, 2022).

Segundo a *International Energy Agency* (IEA), diversos países já estabeleceram compromissos para a eletrificação total de suas frotas: Noruega (2025); Dinamarca, Islândia, Irlanda, Israel, Holanda, Escócia, Cingapura, Eslovênia e Suécia (2030); Reino Unido e Cabo Verde (2035); França, Canadá, Portugal e Espanha (2040); e Alemanha e Costa Rica (2050). O fim das vendas dos veículos com Motor de Combustão Interna (MCI) é visto como solução fundamental para descarbonizar o setor de transporte mundial (DELGADO *et al.*, 2017; PASCOAL *et al.*, 2018; IEA, 2021).

Esta tendência tem se fortalecido, uma vez que todos os programas de redução das emissões de GEE's necessariamente incluem restrições à indústria automotiva tradicional. O setor automotivo apresenta o maior potencial de redução de emissões, tornando cada vez mais evidente a necessidade de adoção da eletromobilidade e universalização dos VE's (IEA, 2021).

O Brasil, alinhado com outros países emergentes, busca aprimorar seus sistemas de mobilidade urbana e sustentabilidade, apresentando características particulares que merecem análise detalhada. Como um dos principais mercados automotivos globais, o país mantém em circulação uma frota aproximada de 119 milhões de veículos, concentrados principalmente em centros urbanos, resultando em emissões anuais de 330 milhões de toneladas de CO₂ (FERREIRA, 2021; FGV ENERGIA, 2022; SILVA, 2023). Ao mesmo tempo, o país possui características peculiares de recursos energéticos que podem resultar em baixas emissões de CO₂ para o setor de transportes. O governo tem buscado emplacar os programas *Combustível do Futuro e o Rota 2030*, de modo a direcionar o país para um futuro de mobilidade sustentável e inovação tecnológica.

As perspectivas para redução das emissões de GEE a partir de 2025 são particularmente promissoras, coincidindo com o início da implementação das metas estabelecidas através do *Nationally Determined Contribution* (NDC), compromisso firmado entre o Brasil e o Acordo de Paris/COP-21. No âmbito dos transportes, o documento estabelece diretrizes específicas para a descarbonização do setor, alinhadas com as particularidades da matriz energética nacional (EHSANI *et al.*, 2018; BARASSA *et al.*, 2020).

A potencial difusão da eletromobilidade no Brasil, associada à eletrificação do transporte público e à gradual substituição da frota convencional por veículos híbridos e elétricos, apresenta perspectivas significativas de ganhos energéticos e redução das emissões de CO₂. Um diferencial estratégico do país reside na composição de sua matriz elétrica, predominantemente baseada em fontes renováveis e sustentáveis, com destaque para a geração hidrelétrica e crescentes investimentos em energia eólica e solar fotovoltaica (EPE/BEN, 2021; EPE/BEN, 2025).

No entanto, a trajetória de crescimento da frota de veículos elétricos e híbridos no Brasil nas próximas décadas será determinada por quatro fatores críticos: (i) a formulação e implementação de políticas públicas setoriais, incluindo o desenvolvimento da infraestrutura de recarga; (ii) a evolução do crescimento econômico e do poder aquisitivo da população; (iii) a dinâmica de transformação da matriz energética nacional; e (iv) os avanços tecnológicos em veículos convencionais e híbridos, considerando especialmente o papel estratégico do etanol na matriz energética brasileira (BURANELLI DE OLIVEIRA *et al.*, 2022; SCHVARTZ *et al.*, 2024).

Diante do exposto, a Política Energética Brasileira já projeta para os próximos anos no tocante ao consumo energético, tendência de eletrificação crescente, de modo que o consumo total de eletricidade até o ano de 2050 seja até três vezes maior do que a atualidade, principalmente com a projeção da melhoria da economia, expansão no consumo de eletricidade no parque industrial brasileiro e especialmente devido ao setor de transportes (EPE/BEM, 2021; EPE/BEN, 2025).

Ademais, o crescimento econômico e o poder de compra para aquisição de VE's é influenciado pelo Produto Interno Bruto (PIB) per capita. No contexto brasileiro, cidades com PIB per capita superior a R\$ 55.000,00 (cinquenta e cinco mil reais) apresentam maior capacidade potencial de inserção de VE's em suas frotas particulares e institucionais (DARGAY *et al.*, 2007; HUAPU LU *et al.*, 2017; LIAN *et al.*, 2018). Embora essa realidade ainda esteja em processo de consolidação, municípios como Brasília-DF, Vitória-ES, São Paulo-SP, Rio de Janeiro-RJ, Porto Alegre-RS, Curitiba-PR e Belo Horizonte-MG já atingiram tal patamar econômico, evidenciando-se como regiões estratégicas para políticas de incentivo à eletromobilidade.

Para uma avaliação rigorosa dos impactos potenciais na redução líquida dos consumos energéticos e emissões de CO₂, faz-se necessária uma análise abrangente do ciclo de vida tanto da energia elétrica quanto dos combustíveis veiculares. Somente através da quantificação sistemática das emissões de CO₂ em todas as etapas do ciclo de vida será possível estabelecer comparações metodologicamente robustas entre as diferentes opções de motorização.

Portanto, evidencia-se a necessidade premente do desenvolvimento de modelos matemáticos e computacionais capazes de simular cenários prospectivos do aumento da frota com propulsão elétrica, em comparação com as alternativas de utilização do etanol brasileiro em veículos híbridos. Tais modelos devem incorporar metodologias rigorosas para determinar a redução líquida dos consumos energéticos e das emissões de CO₂ no contexto de uma matriz elétrica com elevada participação de recursos renováveis. Esta abordagem fornecerá subsídios técnico-científicos fundamentais para a formulação de políticas públicas e planejamento energético, visando minimizar impactos potenciais na matriz energética, otimizar a mobilidade urbana, e promover benefícios mensuráveis para a saúde pública e o meio ambiente.

1.2 DELIMITAÇÃO DO PROBLEMA

Atualmente, a mobilidade urbana está fortemente dependente dos veículos automotores para realizar os deslocamentos e, portanto, é possível afirmar que este fato penaliza o meio ambiente em virtude dos consumos de recursos energéticos e das emissões de CO₂; diante disso, vale ressaltar que o desenvolvimento tecnológico dos veículos tem correspondido para minimizar esses consumos e emissões. Uma conjuntura mundial tem resultado na ampliação da eletrificação do setor de transporte, principalmente ao promover a eletromobilidade, que traz como uma das alternativas para o transporte individual a utilização dos veículos elétricos nas cidades.

Contudo, as vantagens do uso de veículo elétricos dependem das particularidades e características energéticas da matriz elétrica de cada país. Para o caso do Brasil, a matriz elétrica atual possui uma grande parcela fontes energéticas renováveis na geração da energia elétrica. Porém, historicamente no Brasil, quando há necessidade de ampliação do consumo de energia elétrica, a matriz brasileira aumenta a geração por Termelétricas e, assim, ocorre um aumento da emissão de CO₂ por MWh gerado.

Adicionalmente, como mencionado anteriormente, as cidades com Produto Interno Bruto (PIB) per capita superior a R\$ 55.000,00 (cinquenta e cinco mil reais) experimentarão um crescimento significativo na frota de veículos elétricos (VE's) nas próximas décadas. Assim, nos anos seguintes, estas cidades deverão passar por uma transformação substancial em suas frotas veiculares, adotando uma proporção elevada de veículos elétricos.

Desta maneira, o aumento da frota de veículos elétricos afetaria também a demanda por energia elétrica, podendo alterar as participações das fontes energéticas utilizadas na matriz elétrica brasileira, provocando assim, uma maior participação de fontes energéticas não renováveis em sua matriz. Dado esse cenário, a questão que se coloca é: de que forma a expansão da frota de veículos elétricos de transporte individual no Brasil impactará o consumo energético nacional e as emissões de CO₂ ao longo dos próximos 25 anos?

Diante do que foi exposto, este estudo apresenta a necessidade de compreender melhor como a utilização de veículos elétricos poderão impactar até o ano de 2050¹ nos consumos de energia e emissões de CO₂ em uma matriz elétrica sustentável. Para além disso, mostra-se relevante o desenvolvimento de um modelo que consiga simular cenários capazes caracterizar e quantificar esse possível impacto do aumento desta nova frota ao decorrer dos anos. Consequentemente, contribui com informações que expressem as novas condições que podem penalizar o setor energético e a matriz elétrica brasileira, subsidiando assim, ações e políticas públicas de modo que esse setor continue caminhando cada vez mais no rumo da sustentabilidade.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste estudo é desenvolver um modelo de simulação numérica do crescimento da frota de veículos leves de transporte individual, considerando diferentes tecnologias veiculares, bem como os consumos energéticos e emissões líquidas de CO₂ para as próximas três décadas.

1.3.2 Objetivos Específicos

A partir do objetivo geral, delimitam-se os objetivos específicos que permeiam este tema, sendo estes:

- Mapear os principais parâmetros que influenciam o consumo energético e emissão de CO₂ da frota veicular, tais como: ciclos de condução, intensidade de uso, idade da frota, tipo de combustível e tecnologia veicular, visando comparar as emissões totais e o impacto dos veículos híbridos utilizando como combustível o etanol.
- Desenvolver um modelo de correlação entre as emissões de CO₂ da matriz elétrica brasileira e a série histórica de geração de energia e emissão de CO₂, a ser utilizada como entrada de informações para determinar as emissões referente a frota de veículos elétricos;

¹ O Ministério de Minas e Energia em 2020 apresentou o “*Plano Nacional de Energia - PNE 2050*”, que traz um conjunto de estudos e diretrizes para o desenho de uma estratégia de longo prazo, de modo a pensar no setor energético brasileiro para o horizonte até 2050.

- Modelar o crescimento da frota de veículos elétricos em função do Produto Interno Bruto (PIB) per capita, para as próximas décadas em um horizonte até o ano de 2050.

1.4 JUSTIFICATIVA

O Brasil possui uma população estimada de 212 milhões de habitantes e um PIB de R\$ 11,7 trilhões em 2024, com um PIB per capita de R\$ 55.247,45 (IBGE, 2024). O país está entre os maiores produtores de veículos automotores e figura como um dos dez maiores mercados consumidores do mundo. No entanto, sua "Taxa de Motorização" é relativamente baixa em comparação a outros países com características socioeconômicas semelhantes, o que indica potencial para a expansão do mercado interno, considerando as médias de consumo de veículos em outros países (BARASSA *et al.*, 2020). Em 2023, o Brasil registrou aproximadamente 587 veículos para cada mil habitantes, uma taxa inferior à observada em países como México (625), Argentina (610) e África do Sul (640), sugerindo uma margem expressiva para crescimento da frota nacional (FENABRAVE, 2024; IBPT, 2024; IPEA, 2024).

Essa perspectiva de crescimento da frota automotiva, entretanto, traz consigo desafios significativos no contexto da mobilidade urbana brasileira. O aumento da urbanização, aliado ao crescimento dos deslocamentos e à preferência por transportes individuais, intensifica a sobrecarga nos centros urbanos, tornando-os cada vez mais caóticos (JAMES, 2018; UN-HABITAT, 2024). Esse fenômeno é particularmente evidente em países em desenvolvimento, como o Brasil, onde a rápida urbanização, muitas vezes não planejada, resulta em desafios significativos para a mobilidade urbana e a sustentabilidade das cidades. Para enfrentar essas dificuldades e promover uma mobilidade mais sustentável, políticas públicas e ações conjuntas de diversos setores têm buscado transformar as cidades em ambientes inteligentes, com foco na eletromobilidade como novo vetor econômico. Essa abordagem visa integrar flexibilidade e robustez ao setor de transporte, oferecendo soluções mais sustentáveis (PASCOAL *et al.*, 2018; IBPT, 2024).

Seguindo tendências globais, a indústria automobilística brasileira começou a transição, ainda em estágio inicial, da produção de veículos a combustão interna (MCI) para veículos elétricos (VE). O mercado de VE no Brasil tem sido impulsionado pelas marcas chinesas, inclusive com instalações de fábricas de veículos chineses no Brasil. Para os próximos anos, prevê-se uma

expansão do setor de transportes, acompanhada por um aumento significativo na demanda por energia elétrica (FGV ENERGIA, 2024).

O consumo de energia elétrica está diretamente relacionado à expansão da atividade econômica em países em desenvolvimento e emergentes, acompanhando o ritmo do processo produtivo. Há uma forte correlação entre o consumo médio de energia por consumidor e variáveis econômicas como renda, PIB e PIB per capita (AL-MULALI *et al.*, 2019; ALI *et al.*, 2020; FEIX VAZ *et al.*, 2020; MME, 2024). Esse vínculo é especialmente evidente em economias com setores industriais robustos, onde o consumo energético acompanha o crescimento do PIB e impulsiona padrões de consumo em áreas como a adoção de veículos elétricos (VE) (ANEEL, 2017; THAKER *et al.*, 2019; BARBOSA, 2023; IBGE, 2024).

No que diz respeito à aquisição de VE, o cenário fortemente crescente no Brasil confirma o modelo proposto por Dargay *et al.* (2007), posteriormente aprimorado por Huapu Lu *et al.* (2017) e Lian *et al.* (2018), o qual indica que as cidades brasileiras com PIB per capita superior a R\$ 55.000,00 tendem a concentrar as maiores frotas de VE. O atual cenário juntamente com os modelos de correlação entre PIB e posse de veículos comprovam que o aumento da frota de veículos está diretamente relacionado ao nível de desenvolvimento econômico (LIAN *et al.*, 2018). Entre os grandes centros urbanos, São Paulo, Rio de Janeiro, Brasília e Belo Horizonte destacam-se como as cidades com maiores PIB per capita, sugerindo que provavelmente essas cidades irão liderar a transformação das frotas nas próximas décadas.

Embora algumas pequenas cidades brasileiras também possuam PIB per capita acima de R\$ 55.000,00, essas localidades não enfrentam grandes desafios de mobilidade urbana associados à frota de veículos. Por outro lado, os grandes centros urbanos são responsáveis pelo maior consumo energético e pelas emissões relacionadas ao transporte, devido à elevada demanda por deslocamentos e aos frequentes congestionamentos.

Nesse contexto, o crescimento econômico gera, simultaneamente, demanda e necessidade de transporte, tanto individual quanto coletivo, seja para fins produtivos ou de lazer. O aumento da frota automotiva projetado para os próximos anos resultará em uma demanda crescente por energia elétrica, tornando a eletrificação do setor de transportes uma alternativa estratégica e ambientalmente vantajosa em relação aos combustíveis fósseis atualmente predominantes (DELGADO *et al.*, 2017; RECHIN, 2018; MME, 2024; EPE, 2025).

A eletrificação do transporte no Brasil apresenta vantagens estratégicas e ambientais significativas, ao promover maior diversificação das fontes energéticas utilizadas no setor e ampliar a participação de fontes renováveis. A matriz elétrica brasileira é majoritariamente composta por energia renovável, com destaque para a geração hidráulica, que representa 58,9% da oferta interna, enquanto as fontes renováveis somam 88,2% do total, incluindo produção nacional e importações essencialmente renováveis (EPE/BEN, 2025). Do ponto de vista ambiental, a eletrificação contribui para o cumprimento das metas do Acordo de Paris (COP-29, 2024), que incentiva a transição para fontes renováveis e o desenvolvimento de tecnologias voltadas para uma geração e consumo de energia cada vez mais sustentáveis.

Neste sentido, descarbonizar o setor de transportes se torna uma peça fundamental para se atingir o objetivo proposto no acordo (ONU, 2015). Mundialmente, a partir desta expectativa, vários Países estão formulando políticas públicas com metas e datas para o fim da produção de veículos MCI e a adoção total de VE's. Por exemplo na União Europeia, onde o transporte é responsável por 27% das emissões totais de CO₂, a meta é de reduzir em 90% as emissões até 2050 (KRAUSE *et al.*, 2020).

Esta ação afirmativa é um modo de mostrar que há necessidade de alterações conjuntas nos setores de transporte e energético dos Países, e tem o intuito de auxiliar a implantação e disseminação da eletromobilidade. Sobre este ponto, não há dúvidas, no que tange à questão da sustentabilidade, essas mudanças são viáveis e necessárias, e cada País de acordo com a estratégia a ser adotada deve discutir e elaborar cuidadosamente a política a ser seguida, de modo que todos os atores envolvidos possam se preparar, pois a difusão de VE's proporcionará melhorias na segurança energética, saúde pública, redução das emissões de GEE's, desenvolvimento técnico e econômico ao setor automobilístico e oportunidade de desenvolvimento dos setores industriais inovadores (FGV ENERGIA, 2024).

No caso brasileiro, o compromisso inicial é reduzir 43% emissões de GEE's até o ano de 2030, sendo também o setor de transportes o maior responsável pelas emissões, a grande proporção de viagens por modalidades intensifica as emissões de CO₂, que é responsável por 60% das emissões de GEE's, com a queima de combustíveis fósseis pelos veículos MCI. Assim, a eletrificação dos transportes surge como uma opção relevante para o alcance da meta inicial.

Consequentemente, para que os benefícios da eletrificação dos transportes sejam reais, a energia elétrica utilizada deve ser proveniente de uma fonte energética renovável, ou seja, deve ser levando em consideração o ciclo de vida da energia elétrica em sua geração. No entanto, com respeito ao consumo de energia, independente da fonte energética utilizada na matriz elétrica para geração da energia elétrica, como o VE's tem um rendimento energético de 3 a 5 vezes maior do que os MCI, só a eletrificação do veículo já proporciona um ganho energético (NREL, 2023).

Ademais, o que pode ocorrer no Brasil com a eletrificação do transporte é a tendência histórica de alterar a participação das fontes energéticas da matriz elétrica em momentos que demandam maior consumo de energia elétrica ou quando principalmente diminui o potencial hídrico, aumentando a participação das Termoelétricas com utilização de fonte energética não renovável na geração, como derivados do petróleo, carvão mineral, gás natural e outros fósseis. Esse contexto, deve ser estudado e compreendido, pois altera significativamente as vantagens dos VE's em relação a redução das emissões de CO₂.

Com o propósito de iniciar a compreensão de quais impactos a eletrificação dos veículos traz à matriz elétrica brasileira e ao meio ambiente, é necessário modelar metodologias que possibilitem inventariar o consumo de combustível e os fatores de emissão dos veículos em um ciclo de condução bem definido e aprovado (CASSIANO *et al.*, 2016; POLICARPO *et al.*, 2018).

Quanto à eletrificação das frotas de transporte público a sua implantação é mais direcionada por adoção de políticas públicas governamentais que a dos veículos individuais. No Brasil, algumas cidades têm adquirido veículos de transporte público como resultado de políticas de financiamento público, assim como tem ocorrido no Chile e na Bolívia. Em 2024, o Ministério das Cidades, lançou o programa “Renovação da Frota” que dentre outros tipos de veículos contempla a aquisição de 2.296 ônibus elétricos por 61 municípios em sete estados brasileiros (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2024).

Diante destas colocações, a relevância desta tese está no desenvolvimento de um modelo que quantifique impactos da ampliação da frota de VE's nas emissões de CO₂ e no consumo de energia proveniente de uma matriz elétrica composta principalmente por fontes energéticas renováveis.

Este estudo diferencia-se por apresentar uma análise comparativa entre o consumo de energia e emissão de CO₂, devido à utilização dos veículos elétricos a bateria, veículos híbridos e os convencionais, podendo contribuir para a promoção da utilização dos VE's como um vetor da redução das emissões de CO₂. Almeja-se, com isso, preencher lacunas do conhecimento científico para a devida análise da adoção de tecnologias veiculares para as próximas décadas que, principalmente, deem ênfase à sustentabilidade.

Ao final, espera-se que este estudo possa ser replicado em qualquer cidade ou país, assim como, para frotas de veículos elétricos de carga ou de passageiros e que auxiliem planejadores e gestores de políticas públicas e de planejamento energético, de modo a minimizar os eventuais impactos sobre a matriz energética, mobilidade das cidades, saúde pública e sustentabilidade.

1.5 METODOLOGIA DE ELABORAÇÃO DA TESE

A metodologia do estudo foi construída a partir de um conjunto de 4 etapas ordenadas por meio de três fases distintas: elaboração do referencial teórico e da revisão da literatura, desenvolvimento e aplicação dos métodos e elaboração de análises complementares, de modo a contemplar os objetivos propostos na Tese.

A 1^a Etapa consistiu na fase da elaboração do referencial teórico e revisão da literatura para subsidiar a construção de um método e modelo a ser implementado na tese. Nessa etapa, foi levantado o estado da arte com respeito aos veículos elétricos, crescimento da frota de veículos elétricos, quantificação dos consumos energéticos e emissões CO₂ dos veículos elétricos, ciclos de condução e matriz elétrica brasileira, além de metodologias e modelos nacionais e internacionais relacionados aos objetivos do estudo. As buscas sobre estudos e trabalhos sobre o tema, foram realizadas nas principais plataformas: *Science Direct*, *Google Scholar*, *Crossref* e *Capes*. A etapa de referencial teórico foi de suma importância para formar a base conceitual da tese, bem como, identificou as lacunas no tema definindo assim os elementos para o desenvolvimento do processo metodológico. Como consequência, por meio desta etapa foi possível delimitar o tema, o problema de pesquisa, os objetivos e a justificativa do estudo.

Na 2^a Etapa, foi desenvolvido o método e modelo da tese de forma a contemplar os objetivos do estudo por meio das teorias guiadas pela etapa anterior do referencial teórico. Já na 3^a Etapa, foi realizada uma análise complementar, buscando a consistência do método e retroalimentar o

modelo, com base na análise e dos resultados. Por fim, a 4^a Etapa apresenta os resultados da aplicação do modelo para o cenário futuro, possibilitando a realização de análises complementares e possíveis conclusões sobre como será o impacto do aumento da propulsão elétrica na frota ao longo das próximas três décadas. A Figura 1.1 exibe as principais etapas e componentes da metodologia do estudo, elaborados a partir dos objetivos da Tese.

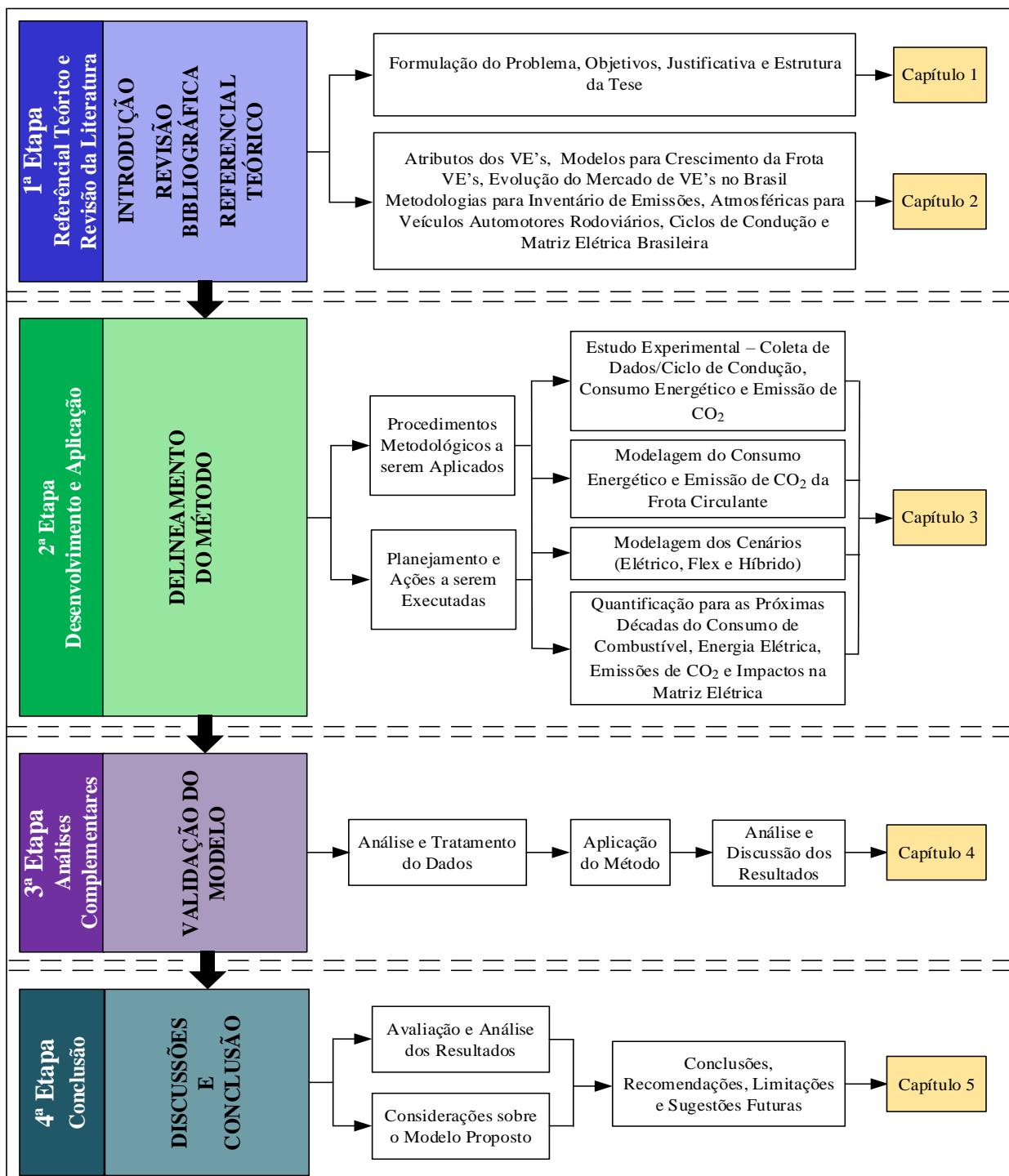


Figura 1.1: Etapas e Componentes da Metodologia do Estudo/Estrutura da Tese

1.6 ESTRUTURA DO TEXTO DA TESE

A presente Tese está estruturada em cinco capítulos, além das referências bibliográficas e apêndices, de forma a proporcionar uma visão clara e organizada sobre o tema abordado. O Capítulo 1 apresenta o contexto e a relevância do estudo, descrevendo o problema de pesquisa, os objetivos gerais e específicos, a justificativa da investigação e a estrutura do documento, permitindo uma compreensão a fundamentação e o escopo do estudo.

O Capítulo 2 traz uma revisão abrangente da literatura e do estado da arte, explorando conceitos essenciais relacionados aos veículos elétricos, crescimento da frota veicular, ciclos de condução, oferta interna de energia, matriz elétrica brasileira, emissões de CO₂ e as pesquisas já realizadas sobre esses tópicos, estabelecendo as bases teóricas e empíricas que sustentam o estudo.

No Capítulo 3, é apresentado o método de pesquisa, incluindo o delineamento metodológico, os procedimentos adotados e a aplicação do método, detalhando os passos seguidos para a coleta e análise dos dados. O Capítulo 4 é dedicado à exposição, análise e discussão dos resultados obtidos, interpretando os achados à luz da literatura revisada e destacando as implicações dos resultados para o campo de estudo. Essa etapa é fundamental para validar o modelo e oferecer percepções baseadas nos dados tratados, permitindo que as discussões sejam fundamentadas e conectadas às premissas da pesquisa.

Por fim, o Capítulo 5 apresenta as considerações finais, sintetizando as principais contribuições da pesquisa, destacando as limitações enfrentadas durante sua execução e oferecendo sugestões para estudos futuros que possam ampliar e aprofundar o conhecimento sobre a temática investigada.

2 REVISÃO DA LITERATURA E ESTADO DA ARTE

Neste capítulo, apresentam-se os resultados obtidos a partir da revisão da literatura, fundamentada em uma revisão sistemática detalhada no "Apêndice A". Esta análise abrange os estudos mais significativos e revisões essenciais para o embasamento desta Tese, englobando temas como: veículos elétricos, ciclos de condução, gestão da oferta interna de energia, a configuração da matriz elétrica brasileira, a emissão de CO₂ e as pesquisas desenvolvidas dentro da temática abordada.

2.1 ATRIBUTOS DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS

Os Veículos Elétricos (VE's), possuem um ou mais motores elétricos, dedicados totalmente ou em parte, para a propulsão veicular. Desta forma, a eletricidade é o recurso energético fundamental aos veículos elétricos; e tal recurso é disponibilizado de diferentes modos: conectando o VE diretamente a uma fonte externa de eletricidade, ou há a transformação de algum recurso energético em eletricidade no próprio veículo. A conexão dos VE's à fonte externa de eletricidade, pode ser diretamente por tomadas ou contato direto com cabos elevados ou trilhos eletrificados.

Há ainda o carregamento sem contato direto, recorrendo a sistemas de indução eletromagnética. Em veículos com a transformação de recursos energéticos em eletricidade no próprio veículo, há a tecnologia dos veículos híbridos, que será detalhada no próximo item, e há a geração de eletricidade no próprio veículo a partir da reação do hidrogênio e oxigênio com água em uma célula de combustíveis, ou por meio da energia mecânica de frenagem, frenagem regenerativa (DELGADO *et al.*, 2017; BARASSA *et al.*, 2020; MME, 2024; EPE, 2025).

Delgado (2017) relata que os VE's fazem parte do conjunto de veículos, os quais são chamados "*Emissões Zero*", uma vez que praticamente não liberam poluentes durante sua fase de uso. Para efeito deste estudo ressalta-se que "*Emissão Zero*" é uma definição válida apenas para a etapa de operação do veículo, sendo necessário contabilizar as emissões totais dos VE's há a necessidade do cálculo das emissões das diversas fases do ciclo de vida do recurso energético (Delgado *et al.*, 2017; Breetz *et al.*, 2018).

Além do mais, a eficiência dos motores elétricos pode alcançar mais de 90%, em comparação com Motores à Combustão Interna (MCI), cuja eficiência energética gira em torno de 30% a 40% (DELGADO *et al.*, 2017; EHSANI *et al.*, 2018). Portanto, neste sentido fica óbvio que o aumento da propulsão elétrica na frota veicular proporcionará a diminuição do impacto energético e ambiental, mas particularmente para o cenário brasileiro que se caracteriza pela existência do combustível veicular etanol, e uma matriz elétrica com grande percentual de recursos renováveis, existem outras peculiaridades que devem ser analisadas (ICCT, 2025).

Assim, essas características brasileiras aliadas às novas tecnologias de propulsão elétrica, serão determinantes nas próximas décadas para uma redução do consumo energético e emissões de GEE do setor de transportes (LAVRADOR e TELES, 2022; RUOSO e RIBEIRO, 2022; HAYTZMANN e CIEPLINSKI, 2025). A dimensão de tal redução só será de fato avaliada com desenvolvimento de modelos específicos que leve em conta as particularidades dos VE's.

Os VE's, de acordo com Brajterman (2016), Gomez (2016) e Barassa *et al.* (2020), podem ser categorizados em consonância com a tecnologia que utiliza. Neste estudo, será levado em conta apenas as principais tecnologias adotadas nos VE's, sendo apresentadas no Quadro 2.1:

Quadro 2.1: Tipologias de Veículos Elétricos

TECNOLOGIA	CARACTERÍSTICAS
Veículo Elétrico Híbrido (HEV)	Veículo com dois motores, sendo um motor elétrico, alimentado por uma bateria elétrica, e um motor a combustão interna. A bateria do HEV é recarregável exclusivamente por meio do sistema de frenagem regenerativa. Sua função é reduzir o gasto de energia associado à ineficiência dos processos mecânicos, se comparados aos sistemas eletrônicos.
Veículo Elétrico Híbrido <i>Plug-in</i> (VEHP)	Veículo híbrido, que também conta com um motor a combustão e um motor elétrico. A sua bateria, no entanto, é recarregável tanto via frenagem regenerativa ou se o veículo tiver, via conexão a um sistema elétrico.
Veículo Elétrico a Bateria (BEV)	Veículo que possui apenas motor elétrico, é alimentado por uma bateria, que pode ser recarregada na rede elétrica local e também por meio de um sistema de frenagem regenerativa, devido às frenagens.

Fonte: Brajterman (2016); Gomez (2016); Barassa *et al.* (2020).

Neste contexto, é importante ressaltar que cada tecnologia tem seu mercado a ser explorado no cenário brasileiro, com possibilidades de novos modelos de negócios, desenvolvimento de nichos de mercado e proposição de novas soluções de mobilidade urbana (BARASSA *et al.*, 2020; MOLINARI, 2025).

O Veículo Elétrico Híbrido², em inglês *Hybrid Electric Vehicle* (HEV), também possui de acordo com Wu *et al.* (2015), duas ou mais fontes de energia que compõe um conjunto que, em parte, possui características de um veículo convencional, e outra parte com características de um veículo elétrico. Desta forma, vale destacar que um HEV possui basicamente um conjunto de equipamentos no qual inclui baterias ou outro acumulador de energia elétrica, motores elétricos, e motores à combustão interna.

Assim, vale frisar que o Motor de Combustão Interna (MCI) é encarregado tanto pela propulsão do veículo, quanto pelo carregamento das baterias. As baterias também são carregadas por regeneração de energia proveniente dos motores elétricos durante frenagens e descidas. Com os diversos modos de operação, um veículo híbrido pode ser considerado mais flexível do que um veículo convencional pela sua capacidade de aproveitamento energético e otimização das emissões.

Para tanto, é relevante destacar a importância do *software* embarcado para realizar a gestão do fluxo de energia do HEV, o qual garante a configuração e controle adequados, aplicados de forma exclusiva para cada condição de operação; consequentemente, com a tecnologia dos HEV é possível aprimorar a performance total, a eficiência e os níveis de emissões poluentes (VAZ *et al.*, 2015; MUNSI e CHAOUI, 2024).

Existem três tipos de sistemas nos automóveis híbridos comercializados: o sistema híbrido em série, em que um MCI ativa um gerador que alimenta o motor elétrico; o sistema híbrido paralelamente, em que o motor de combustão interior é amparado pelo motor elétrico nas circunstâncias que exigem muito mais potência; além disso, há também o sistema misto, em que dois motores elétricos trabalham um paralelo ao MCI e o outro em série (ICCT, 2025).

Na busca por uma tecnologia mais permissível, os HEV evoluíram e possibilitaram com que a recarga da bateria fosse realizada a partir de uma fonte externa, esses veículos passaram a ser nomeados Veículo Elétrico Híbrido *Plug-in* (VEHP) ou *Plug-in Hybrid Electric Vehicles* (PHEV), sendo um veículo híbrido que se caracteriza por se conectar a uma fonte externa de carregamento de energia elétrica; esse tipo de veículo também é chamado veículo elétrico com autonomia ampliada. Essa tecnologia poderá se consolidar ao longo das próximas décadas com a expansão de pontos de carregamentos pelo País e por ter a vantagem de maior economia de combustível pelo

² Especificamente no Brasil, em alguns modelos com esta tecnologia, é adicionada a capacidade do motor a combustão de utilizar como combustível tanto o etanol quanto a gasolina.

MCI, já que consegue operar em modo 100% elétrico (LUCZKIEWICZ, 2017; MUNSI e CHAOUI, 2024).

Com efeito, é importante dizer que os VEHP são evoluções conceituais dos veículos híbridos, assim permite o carregamento das baterias com energia oriunda de combustíveis fósseis ou renováveis, com uma multiplicidade de fontes de energia elétrica. Esta característica é importante e terá impacto no consumo de petróleo e emissões de GEE's, pois efetivamente resulta na influência da composição da matriz elétrica do País como parte dos recursos energéticos e emissões do setor de transportes (LUCZKIEWICZ, 2017; THEOTONIO, 2018; AGUIAR *et al.*, 2019; DENG *et al.*, 2024).

A filosofia dos VEHP em ter um conjunto elétrico, com baterias e motores elétricos, alimentado por um MCI com menor potência em relação ao veículo convencional, é outra propriedade essencial desta espécie de veículo que serve para ampliar a sua autonomia (distância percorrida). Nesta conformação, o MCI pode ser mais otimizado para menores consumos energéticos e menores emissões (BRAJTERMAN, 2016; MME, 2024).

Ademais, o Veículo Elétrico a Bateria ou *Battery Electric Vehicle* (BEV) é marcado por ter tão somente motorização elétrica, e por esse fato não conter MCI, nem tanque de combustível e muito menos escapamento; particularizam-se por emitirem baixos níveis ruído e zero emissões de poluentes no que se refere à fase de uso.

Estes tipos de veículos necessitam de carregamento de suas baterias com conexão à rede de distribuição de energia elétrica, e se valem da energia regenerativa das frenagens e descidas, que maximizam sua autonomia (LOMBARD *et al.*, 2018). No que diz respeito aos automóveis elétricos, a autonomia está em consonância diretamente à capacidade de armazenamento das baterias e sistema regenerativo (LUCZKIEWICZ, 2017; DENG *et al.*, 2024).

Dentre as tecnologias disponíveis para fabricação de baterias, atualmente as mais utilizadas para esse segmento são compostas por Níquel Hidreto Metálico (NiMH) e Íon de Lítio (MINUCCI, 2020). Principalmente, devido a sua maior vida útil e ser menos eficaz na recarga com fonte externa as baterias fabricadas com Níquel Hidreto Metálico tem tido maior recorrência na sua utilização por HEV. Já as baterias fabricadas com Íon de Lítio têm sido mais utilizadas por VEHP e BEV,

especialmente devido a sua relação peso/potência, eficiência energética, possuir bom desempenho em altas temperaturas e ter maior eficiência nos processos de recarga.

Sob o mesmo ponto de vista, o desenvolvimento tecnológico das baterias ainda não é suficiente para garantir uma autonomia semelhante aos veículos com MCI. Contudo, grandes evoluções vêm ocorrendo rapidamente, e já é possível deslumbrar um futuro próximo com veículos puramente elétricos realizando grandes deslocamentos e utilizando fontes de geração de energia renováveis (LIMA e PORTUGAL, 2018). No Quadro 2.2 é demonstrado as características dos HEV, VEHP e BEV:

Quadro 2.2: Características dos HEV, VEHP e BEV

TECNOLOGIA	HEV	VEHP	BEV
Propulsão	- Elétrica - Motor Combustão Interna	- Elétrica - Motor Combustão Interna	- Elétrica
Sistema de Energia	- Baterias - Ultracapacitores - Motor Combustão	- Baterias - Ultracapacitores	- Baterias - Ultracapacitores
Fontes de Energia Estruturais	- Postos de Combustível	- Rede Elétrica - Unidades de Carregamento	- Rede Elétrica - Unidades de Carregamento
Características	- Emissões Muito Baixas - Diminuição do gasto com combustível. - Longas Distâncias - Dependência do combustível - Custo mais elevado quando comparado ao Veículo Convencional.	- Emissões Muito Baixas - Diminuição do gasto com combustível. - Emissões muito baixas - Elevada Eficiência Energética - Independência de Combustível - Custo mais elevado - Tecnologia Comercial	- Zero emissões - Elevada Eficiência Energética - Independência de Combustível - Curtas Distâncias - Custo Inicial Elevado - Tecnologia Comercial
Questões Importantes	- Baterias	- Controle, Otimização e Gestão de Diversas Fontes de Energia. - Dimensionamento e Gestão das Baterias	- Baterias - Gestão de Baterias - Unidade de Carregamento - Custo

Fonte: Brajterman (2016); Gomez (2016); Barassa *et al.* (2020).

No que tange ao tema e objetivos da presente Tese, a ampliação da frota dos VE's no Brasil ainda se encontra limitado pelo valor de mercado e manutenção dos VE's, valor da energia elétrica em relação aos combustíveis, autonomia, tempo de recarga das baterias e infraestrutura para recarga.

De outra maneira, o HEV, embora tenha também valor alto de mercado e manutenção, não tem a limitação da baixa autonomia e tempo de recarga como as demais, tendo essa tecnologia grande potencial a ser adotada no Brasil, principalmente devido a possibilidade de utilizar como combustível o Etanol, alguns estudos têm sido desenvolvidos neste caminho (GONÇALVES *et al.*, 2021; ECKERTL *et al.*, 2022; LAVRADOR e TELES, 2022).

A partir desta realidade, Theotonio (2018) afirma que enquanto não existir um desenvolvimento na tecnologia de armazenamento de energia elétrica e no seu custo associado que admita ao VE's ser mais competitivo, o HEV continuará a ser a melhor opção aos veículos convencionais em nosso País.

Deve-se observar, fato em destaque, que não há veículos 100% limpos; até os VE's, tidos como de Zero Emissão, emitem GEE's quando se leva em consideração todo o ciclo de vida, incluindo na produção da energia elétrica a ser consumida durante o uso. Diante disso, com exceção dos veículos do tipo HEV, a vantagem ambiental da substituição dos veículos a MCI por VE's vai depender essencialmente da natureza das fontes geradoras de energia que os alimenta (DENG *et al.*, 2024).

Nesta conjuntura, Luczkiewicz (2017) apresenta que a alta dimensão de energias limpas e renováveis que compõem a matriz elétrica brasileira, possibilita a troca dos veículos a MCI por VE's e VEHP's como uma opção para diminuição das emissões de GEE's e alcance das metas determinadas pelos acordos climáticos. No entanto, em um primeiro momento entende-se que a eletrificação da frota ocorrerá por meio dos HEV com motorização Flexfuel (MME/EPE, 2020; MME, 2024; EPE, 2025).

Assim, o consumo de energia e emissão de CO₂ da adição deste tipo de tecnologia veicular na frota do País, principalmente no contexto urbano, desde que a bateria ao ser utilizada no motor elétrico esteja com carga completa e biocombustível Etanol seja utilizado no MCI, acarretará uma possível redução do consumo de combustíveis associada a diminuição das emissões de GEE's (BARASSA *et al.*, 2020; MOLINARI, 2025). Em síntese, é importante determinar como ocorrerá a inserção desta tecnologia na frota para os próximos anos e se realmente proporcionará esse tal ganho ambiental.

Porém, deve-se ter atenção com a adoção desta tecnologia, já que principalmente a União Europeia e China tem acompanhado com desconfiança há algum tempo os números declarados pelos

fabricantes dos HEV com respeito ao consumo de combustíveis e emissão de GEE's, afirmando que eles são impraticáveis em algumas condições, principalmente devido o ciclo de condução nos quais os veículos são submetidos e a necessidade de que as baterias estejam sempre carregadas, para que assim, realmente seja minimizado o consumo de combustíveis e a emissão de GEE's (PRATI *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2022; DENG *et al.*, 2024).

2.2 MODELOS DE CRESCIMENTO DA FROTA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS LEVES

A modelagem do crescimento da frota de VE's, tem sido proposta por vários autores, os quais, sugerem que a frota de veículos pode ser considerada uma função do PIB per capita, ou renda per capita, influenciados por alguns fatores, como: características econômicas dos países e das cidades. Em 2007, Dargay, Gately e Sommer publicaram um estudo intitulado “*Vehicle Ownership and Income Growth, Worldwide: 1960-2030*”, relatando a construção de um modelo a partir da Função de *Gompertz* que explica a saturação de veículos em função das características que podem ser observadas em um país, como urbanização, renda e densidade populacional (DARGAY *et al.*, 2007).

Esse modelo é representado pela Equação 01.

$$\eta_{it}^{SR} = \theta \alpha \beta_i GDP_{it} e^{\beta_i GDP_{it}} \quad (01)$$

onde, “ η_{it}^{SR} ” é a elasticidade-renda a longo prazo, “GDP” é a Renda per Capita (PIB), “ α e β ” são parâmetros que definem a forma e curvatura da função, “ $\theta = \theta_R$ ” para aumentos de renda e “ $\theta = \theta_F$ ” para diminuições de renda, subscrito “i” representa o país e o subscrito “t” representa o tempo (anos).

Como resultado, a aplicação da Equação 01 para projeção de 2002 à 2030, apresenta seis países com maior número de veículos, sendo China, EUA, Índia, Japão, Brasil e México. Na China a projeção determinou quase 20 vezes mais veículos em 2030 do que em relação ao ano de 2002. Esse crescimento se deve tanto à sua alta taxa de crescimento da renda no país quanto ao fato de que sua renda per capita passar a ser associada à propriedade de veículos.

Na Figura 2.1 é apresentada a projeção do crescimento da frota de veículos entre os anos de 2020-2030 dos países descritos a partir da aplicação da Equação 1.

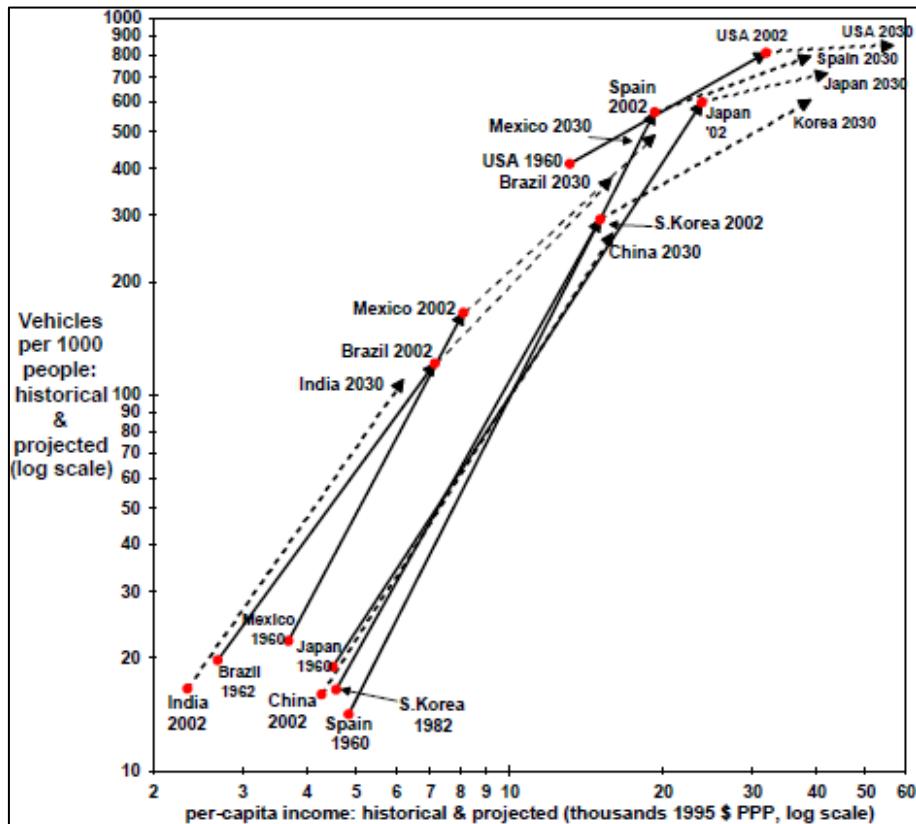


Figura 2.1: Projeção de Crescimento da Frota de Veículos 2020-2030
Fonte: (DARGAY *et al.*, 2007).

Já em 2017, Huapu, He, Zhiyuan e Jing apresentaram um trabalho intitulado “*Analysis and Prediction on Vehicle Ownership Based on an Improved Stochastic Gompertz Diffusion Process*”, propondo a introdução de uma nova equação diferencial estocástica, aprimorada à Curva de *Gompertz*, de modo a obter uma projeção mais adequada, passando a ser chamado “*Processo de Difusão Gompertz (SGDP)*”. Essa nova proposta vislumbra a projeção da curva de crescimento da frota veicular, de modo a explicar a relação entre aquisição de veículo e PIB per capita (HUAPU *et al.*, 2017), representado pela Equação 02.

$$X_{g_t} = a \cdot \exp(-b \cdot \exp(-c \cdot g_t)) + \beta_1 \frac{X_{g_t}}{X_{g_t} + \beta_2} \quad (02)$$

onde “ X_{g_t} ” representa a quantidade de veículo por 1000 habitantes, “ g_t ” é a Renda per Capita no ano e “ a , b e c ” são condições especiais da função a ser calculada na regressão. Para o modelo, “ β_1 e β_2 ” são parâmetros a serem estimados de acordo com cada país. A aplicação e comparação da

Equação 02 nos países EUA, Reino Unido, Japão e Coréia do Sul, apresentou melhores resultados nos ajustes com base em dados limitados de propriedade de veículos e PIB per capita. Também, superou duas deficiências principais da *Curva de Gompertz* apresentada na Equação 01, com a introdução de uma modificação, como o estocástico processo de difusão. Ao final, o estudo realizou uma previsão da propriedade de veículos até o ano de 2025 para a China. A utilização desta curva de ajuste de *Gompertz* melhorada, obteve um erro padrão mais baixo e, portanto, maior eficiência em seus resultados.

Posteriormente, em 2018 Lian, Wen, Hongfeng e Menglan por meio do trabalho intitulado “*Modeling and Forecasting Passenger Car Ownership Based on Symbolic Regression*”, descreve a utilização da regressão simbólica baseada em dados para encontrar uma função generalizada, nomeada como “*Nova Equação por Regressão Simbólica (NE-SR)*”. No processo de modelagem, o NE-SR utilizou como amostra os dados de crescimento da frota de seis Países; Japão, Reino Unido, EUA, Finlândia, Polônia e Austrália (LIAN *et al.*, 2018).

Neste contexto, a NE-SR foi aplicada para predizer a frota veicular na China até o ano de 2060, sendo válido expor que os resultados experimentais indicaram que o NE-SR, como uma extensão da *Função de Gompertz*, que se encaixa melhor na descrição de uma frota de veículos a longo prazo, assim é apresentado a Equação 03.

$$y' = \alpha' \cdot \exp (\theta' \cdot x - \beta' \cdot \exp (-\gamma' \cdot x)) \quad (03)$$

Para o modelo y' , β' e γ' são valores positivos, onde “ y' ” representa propriedade de veículos em função do PIB per capita. Já “ θ' e β' ” estão relacionados a tendência de propriedade da frota futura e ao cenário de aplicação. A aplicação da Equação 03, descreve o desenvolvimento futuro da propriedade de veículos, tem como vantagem estabelecer automaticamente modelos adequados com conjuntos numéricos sem assumir formas de função. Assim, uma função generalizada foi encontrada e obteve valores que se encaixam melhor na tendência de propriedade de veículos nos países representativos do estudo, que são: Japão, EUA, Austrália, Finlândia, Inglaterra e Polônia.

Através da revisão da literatura para esta Tese, percebeu-se que a *Função de Gompertz* pode ser aplicada em contextos de diversos países como: EUA, Reino Unido, Alemanha, Japão, China, Índia, Marrocos, dentre outros, com o intuído de predizer o crescimento da frota de veículos em função do PIB per capita, principalmente de modo a compreender como será a inserção dos veículos

híbridos e elétricos a frota para os próximos anos. No Brasil, poucos estudos apresentam a aplicação desta função para prever a inserção de novas tecnologias na frota de veículos.

Portanto, na presente Tese, foi aplicada *Função de Gompertz*, com ajuste dos indicadores na curva de *Gompertz* para a frota de veículos em função do PIB per capita para a cidade de Brasília-DF, de modo a predizer o crescimento da frota de veículos a combustão interna, veículos híbridos e veículos elétricos por habitantes por meio da Equação 04:

$$y = a \cdot \exp(b \cdot \exp(c \cdot x)) \quad (04)$$

Na equação aplicada, os parâmetros “a, b e c” são constantes, sendo: a = 710, b = -5,5 e c = $4,9 \times 10^{-5}$. A variável dependente “y” representa o número de veículos por mil habitantes, enquanto a variável independente “x” corresponde ao Produto Interno Bruto (PIB) per capita.

Espera-se que os resultados auxiliem na compreensão das demandas de energia a longo prazo, e também as Emissões de CO₂, e assim, na formulação de estratégias futuras para um transporte sustentável.

2.3 METODOLOGIAS PARA INVENTÁRIO DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS POR VEÍCULOS AUTOMOTORES RODOVIÁRIOS

É importante destacar que, atualmente no Brasil, o inventário de emissões atmosféricas é a metodologia usada para avaliação das emissões veiculares. Os inventários têm evoluído historicamente a partir de metodologias internacionais bem difundidas. Desenvolvido nos Estados Unidos no final dos anos de 1970, até 2004, o *Road Vehicle Emission Factor Model* (MOBILE) era a metodologia ou modelo aprovado pela *Environmental Protection Agency* (EPA), para estimar as emissões de poluentes atmosféricos de veículos rodoviários. Em seguida, o MOBILE foi substituído pelo *Motor Vehicle Emission Simulator* (MOVES). O MOBILE e o MOVES calculam as emissões de automóveis de passageiros, motocicletas e caminhões, usados para determinar os inventários atuais e futuros dessas emissões (LIU *et al.*, 2019; EPA, 2025).

Eggleson *et al.* (1991), descreveram a Metodologia CORINAIR Europeia para o inventário de emissões veiculares. Essa metodologia desenvolvida desde 1985 é composta por três partes: emissões a quente, emissões a frio e emissões evaporativas. Tais perspectivas resultaram em um software computacional denominado COPERT 90 que estima as emissões de poluentes

atmosféricos do tráfego rodoviário em condições urbanas, rurais e rodoviárias. A versão do COPERT 4 foi utilizada para avaliar as emissões rodoviárias anuais da cidade de Atenas (FAMELI & ASSIMAKOPOULOS, 2015; EEA, 2024). Para tanto, vale dizer também que o COPERT foi aplicado para o cálculo de inventários de consumo de combustível e emissões rodoviárias, adaptado para outras cidades e Países que não estão na Europa.

Logo, é importante frisar que as metodologias para inventários de emissões e consumo de energia dependem fortemente do cálculo de consumo de combustível e dos fatores de emissão dos veículos, com base em um ciclo de condução bem definido e aprovado. Assim, a importância dos ciclos de condução nos resultados dos inventários tem sido abordada por diversos autores (BARLOW *et al.*, 2009; FAMELI & ASSIMAKOPOULOS, 2015; DA SILVA, 2020; EEA, 2024). Em 2009, Barlow, Latham, McCrae e Boulter compilaram e detalharam mais de 200 ciclos, com o objetivo de padronizar em um formato todos os ciclos de condução conhecidos, permitindo novos estudos para comparar ciclos de condução e adaptar o melhor para as características locais, bem como para testar veículos para os inventários de consumo de combustível e emissões de poluentes atmosféricos (BARLOW *et al.*, 2009).

A presente tese se propôs caracterizar os ciclos de velocidade no contexto da cidade de Brasília-DF, configurando-se como um estudo inédito no Brasil e contribuindo para o aprimoramento do cálculo de consumo de combustíveis e das emissões de CO₂ a serem incorporados aos Inventários Nacionais. Considerando que os resultados de consumo e emissões veiculares podem variar significativamente quando se utilizam ciclos de condução padronizados e legislados, em comparação com ciclos obtidos em condições reais de tráfego, o tema tem recebido crescente atenção na literatura científica ao longo da última década (YAN e SUN, 2024).

Fontaras *et al.* (2008) analisaram dois veículos híbridos em uma comparação de ciclos de condução em condições reais com os *Novos Ciclos de condução Europeus* (NEDC), indicando uma diferença observável para os ciclos urbanos e, da mesma forma no Brasil, em condições reais as medições dos ciclos de condução de consumo de combustível e emissões diferiram do NEDC e FTP-75 (CASSIANO *et al.*, 2016), indicando um impacto no resultado final dos inventários ao considerar, ou não, os ciclos de condução em condições reais de trânsito, os estudos experimentais da presente tese visaram preencher essa lacuna da diferença em usar ciclos homologados e ciclos reais.

No Brasil, a primeira edição do Relatório Final do *Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários* foi mostrada pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) no ano de 2012, com a finalidade de auxiliar no futuro, deliberações com respeito à programação e instituição de políticas direcionadas à melhoria da qualidade ambiental e à minoração das modificações climáticas (MMA, 2013). Neste relatório foi utilizado metodologia similar às executadas pelo COPERT e MOVES, as quais são utilizadas para inventariar consumo de combustível e emissão de poluentes, sendo fortemente dependente de algumas variáveis, tais como idade da frota, quilômetros percorridos anuais e os fatores de emissão veiculares para cada ano, com base no ciclo de condução FTP-75 (POLICARPO *et al.*, 2018).

Dessa forma, é importante pôr em destaque que o Inventário é uma ferramenta que determina uma metodologia de referência nacional no que se referem às emissões atmosféricas dos veículos. Neste sentido, no Brasil, o Estado de São Paulo desde o ano de 2012 por meio da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) produz um estudo intitulado *Emissões Veiculares no Estado de São Paulo* que apresenta uma referência metodológica que possibilita modelar as emissões e consumos de energia oriundas da frota circulante por todo o Estado, levando em conta todas as categorias veiculares (DA SILVA, 2020; CETESB, 2024).

A metodologia consolidada pela CETESB é baseada nos fatores de emissão dos veículos validados no ciclo americano FTP-75 e semelhante às aplicadas pelos simuladores “MOVES”, desenvolvido pela *United States Environmental Protection Agency* (EPA) e o “COPERT”, desenvolvido pela *European Environment Agency* (EEA). Ambas realizam o cálculo dos inventários de consumo de combustível e emissões rodoviárias adaptadas para o ciclo de condução em qualquer cidade ou País (BARLOW *et al.*, 2009; LI *et al.*, 2024).

Para exemplificar, no ano de 2024 a CETESB divulgou a atualização dos resultados do estudo para as informações do ano de 2023, como resultado estimou que a frota circulante do Estado possui a idade média de 11 anos e um total de 14,8 milhões de veículos, sendo 67% de automóveis, em torno de 11% de comerciais leves, 4% ônibus e caminhões e 18% motocicletas. Também, descreve diversas outras informações/resultados, inclusive que a partir de 2019 tem apresentado uma tendência de queda, ainda que não muito acentuada na frota veicular. Com o modelo foi possível quantificar e assim, determinar a crescente emissão de CO₂ a partir de 2021 no estado de São Paulo, que emitiu um total de 14,5 milhões de tonelada de CO₂ no ano de 2023 (CETESB, 2024).

Essa metodologia, tem sido aplicada com sucesso na cidade de São Paulo-SP e Fortaleza-CE, e pode ser modelada para cenários diferentes dos já realizados, sendo necessário inicialmente calibrar e validar as informações características da região a ser estudada de forma a obter resultados precisos. Inclusive, estudos com essa robustez já são aplicados em diversas cidades no mundo, que sofrem com contaminação devido as emissões de CO₂ provenientes do transporte veicular.

Assim, a aplicação de metodologias de inventários, em cenários diferentes da cidade de São Paulo, cidades Europeias ou nos Estados Unidos, requer modelagem adicional, adaptação e calibração no que diz respeito à idade da frota, quilômetros percorridos anuais, fatores de emissão veiculares que levem em conta tanto o impacto tecnológico, quanto a idade dos veículos, e finalmente a caracterização dos ciclos de condução típicos para o local de aplicação da metodologia. Portanto, tal aplicação traz desafios sobre como calibrar essas variáveis para resultados mais precisos (POLICARPO *et al.*, 2018; EMEP/EEA, 2024).

Contudo, a metodologia de inventário, associada a um modelo de projeção futura das emissões de CO₂ ainda não tem sido utilizada. A presente tese propõe e desenvolve um modelo integrado que articula a metodologia utilizada no Inventário às projeções de emissões de CO₂ futuras, oferecendo uma abordagem mais abrangente e prospectiva.

2.4 CICLO DE CONDUÇÃO VEICULAR

Por causa da relevância no resultado dos inventários de consumos e emissões veiculares, é importante abordar aqui a padronização, detalhes e conceitos sobre os ciclos de condução. Ciclo de condução é caracterizado, de acordo com Araújo (2015), como uma representação de valores de velocidade do veículo em função do tempo, formando um perfil de velocidades. Na mesma linha de pensamento, Giongo (2019) determina ciclo de condução como uma função da rota, uma sequência de valores de velocidades instantâneas realizadas pelo condutor, que irão descrever as variações de velocidades ao longo do tempo.

Esta sequência de valores de velocidades também é resultado de um levantamento realizado em um ciclo de condução real, registrando os valores de velocidade de um trajeto realizado em condições normais de tráfego, em vias públicas urbanas ou rodoviárias e que dependem de fatores além da rota, como características do veículo, fonte de energia, características de condução do condutor e fatores externos (CZÉGÉ *et al.*, 2020).

Atualmente existem diversos ciclos de condução veiculares no Mundo, sendo os principais de origem Americana, Europeia e Japonesa. Para efeito deste estudo, iremos abordar os que são utilizados como referências para as regulamentações brasileiras.

Assim, as regulamentações brasileiras utilizam ciclos de conduções padrões, a norma ABNT NBR 6601 tem como base o ciclo de condução *Federal Test Procedure* (FTP-75) sendo utilizado em ciclo de condução urbano e a norma ABNT NBR 7024, que tem como referência o *ciclo Highway Fuel Economy Test* (HWFET) sendo utilizado em ciclo de condução rodoviário. Esses ciclos foram criados pela *United States Environmental Protection Agency* (EPA).

O ciclo HWFET é usado para determinar a classificação de economia de combustível em rodovias, enquanto a classificação determina uma etapa de condução urbana, incluindo paragens frequentes e uma fase de condução em autoestrada que é baseada no teste do ciclo FTP-75; são reconhecidos e utilizados mundialmente (ROSO, 2016; DIAS, 2017; CHENG *et al.*, 2025). Na Figura 2.2 é apresentado o Ciclo de Condução Urbano, utilizado pela ABNT NBR 6601.

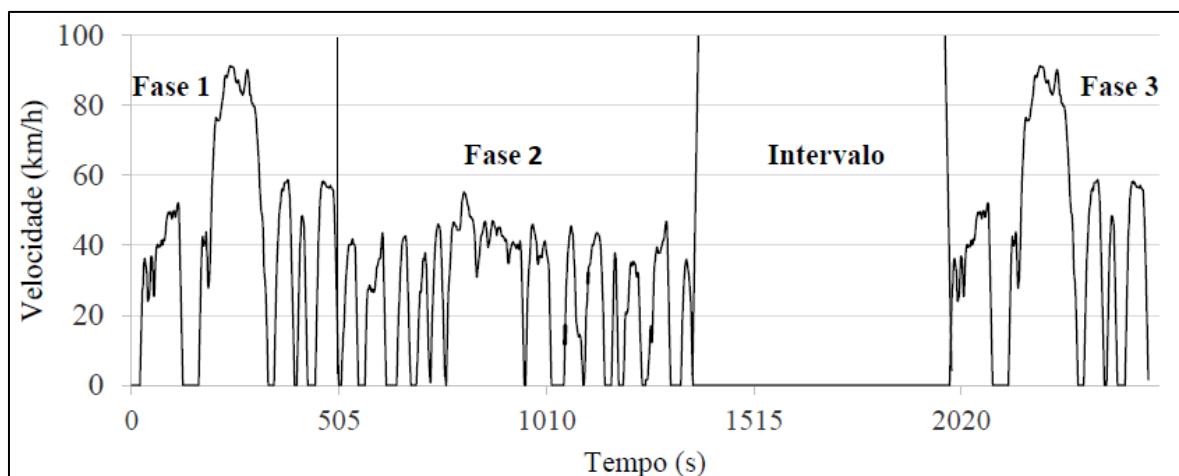


Figura 2.2: Ciclo de Condução Urbano
Fonte: ABNT NBR 6601 (2012), com adaptações.

Este ciclo caracteriza a condução urbana e é subdividido em três fases. Na primeira fase, que dura 505 segundos, ocorre a partida a frio. A segunda fase é a “estabilizada”; está dura 867 segundos: é realizada com o catalisador do veículo já aquecido. Após a fase estabilizada, é feito um intervalo de 10 minutos.

Posteriormente, se inicia a terceira fase, que é caracterizada pela partida a quente. O ciclo de condução da terceira fase é idêntico ao da Fase 1. Existe também a quarta fase do ciclo, que é a

estabilizada após a partida a quente. Essa Fase não é realizada devido ao fato de que foram obtidos estudos, as condições e resultados alcançados que são idênticos aos da segunda Fase. Desta maneira, é importante destacar também que a segunda Fase é contabilizada duas vezes no cálculo do resultado final de emissões e consumo conforme ABNT NBR 6601/2012.

O resultado final de emissões é a média ponderada das Fases e este resultado, de cada uma das emissões, é dado em g/km. A distância total do ensaio é 17,77 km, com velocidade média de 34,12 km/h. A velocidade máxima é 91,25 km/h (ABNT NBR 6601, 2012). Na Figura 2.3, é apresentado o Ciclo de Condução para rodovia, utilizado pela ABNT NBR 7024.

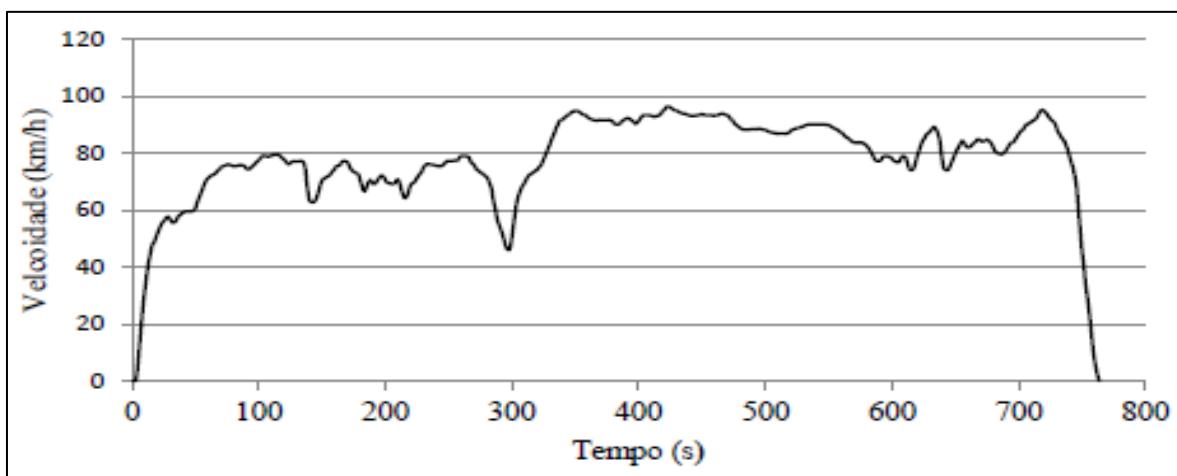


Figura 2.3: Ciclo de Condução Rodoviário
Fonte: ABNT NBR 7024 (2017), com adaptações.

Esse também faz parte dos procedimentos de teste da EPA e simula condições de condução em estrada. Inicialmente todo o ciclo estrada é conduzido como pré-condicionamento e repetido logo em seguida (iniciando no máximo 15 segundos depois), com coleta e análise de gases. A duração do ciclo é 765 segundos e a velocidade média é 77,7 km/h. A distância total percorrida é de 16,45 km (ABNT NBR 7024, 2017).

Desta forma, para a maior precisão dos resultados obtidos em inventários de emissões veiculares e consumo de combustíveis, é de suma importância determinar a influência dos ciclos de condução. Os ciclos de condução têm como finalidade representar fielmente o perfil das velocidades desenvolvidas em percursos diários dos veículos. Tais ciclos são caracterizados por um conjunto de diferentes parâmetros: velocidade, distância, aceleração, tempo de condução, duração e frequência de partidas e paradas, com objetivo de simular um padrão de condução próximo da realidade (MMA, 2013; CZÉGÉ *et al.*, 2020; EPA, 2024).

2.5 OFERTA INTERNA DE ENERGIA

A emissão de gases de efeito estufa e o consumo energético veicular dependem fortemente da matriz energética do país. Historicamente, o Brasil se destaca por ser um país com um alto percentual de fontes renováveis de energia em sua Oferta Interna de Energia (OIE), principalmente quando comparado ao resto do mundo (SCHIAVI, 2020; DEMIRKOL, 2024). Nos últimos 20 anos, a participação das fontes renováveis, manteve-se com valores superiores a 40%, o que já é um grande avanço ambiental. Vale destacar, que entre os anos de 2011 e 2014, devido a menor quantidade de chuvas, houve uma redução da participação das fontes renováveis na matriz energética com à queda da oferta hidráulica.

A partir do ano de 2015, a participação das fontes renováveis na OIE retoma uma trajetória de crescimento, atingindo o marco de 48,5% no ano de 2020. Infelizmente, no ano de 2021 novamente, a participação de fonte renováveis foi marcada pela escassez hídrica, e como consequência, ao acionamento das usinas termelétricas. No entanto, para 2024 o acréscimo das fontes eólica e solar na geração de energia elétrica e o biodiesel, contribuíram para que a participação das fontes renováveis no OIE, se mantendo em um patamar renovável de 50,0 %, muito superior ao observado no resto do mundo, Na Figura 2.4 é comparada a participação internacional das fontes renováveis na OIE.

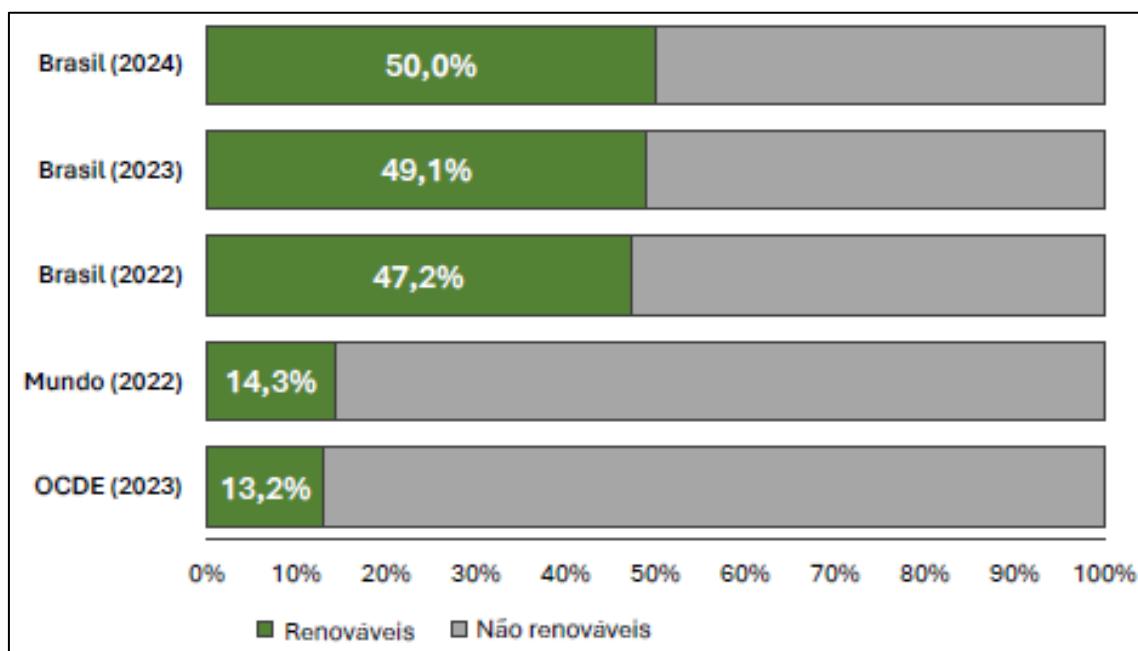


Figura 2.4: Comparação Internacional da Participação das Fontes Renováveis

na Oferta Interna de Energia

Fonte: EPE/BEN (2025)

Ao observar a evolução da matriz energética brasileira ao longo da última década, constata-se que, a partir de 2014, a participação de fontes renováveis na Oferta Interna de Energia (OIE) passou a apresentar um crescimento contínuo. Nos seis anos seguintes, essa participação acumulou um aumento de 8,9%, refletindo uma progressiva redução da dependência de fontes não renováveis. Tal avanço foi impulsionado, sobretudo, pela ampliação da oferta de biocombustíveis derivados da cana-de-açúcar, energia eólica e biodiesel, além da retração gradual no uso de combustíveis fósseis.

Entretanto, no ano de 2021, em decorrência da escassez hídrica e do consequente aumento na utilização de usinas termelétricas, a participação das fontes renováveis na OIE reduziu-se para 44,7%, enquanto as fontes não renováveis atingiram 55,3%. Já em 2022, observou-se uma leve recuperação: as fontes renováveis representaram 47,2% da OIE, frente a 52,8% de fontes não renováveis, indicando uma retomada na transição energética, ainda que de forma moderada.

Ressalta-se, que o Brasil ainda é uma referência mundial na sustentabilidade da sua OIE (SCHIAVI, 2020; DEMIRKOL, 2024). Neste contexto, possui 50,0 % de fontes renováveis distribuídas em 16,7% de biomassa de cana, 11,6% hidráulica, 8,5 % lenha e carvão vegetal e 13,2% outras renováveis. Já não renováveis representam os outros 50,0%, sendo composta em 34,0% petróleo e derivados, 9,6% gás natural, 4,5% carvão mineral, 1,3% urânio e 0,6% de outras não renováveis.

Sob outra perspectiva, a do consumo de energia, o país no ano de 2024 consumiu um total de 288,3 Mtep, acarretando um aumento de 1,87% do uso de energia em relação ao ano de 2023, que obteve um consumo de 282,9 Mtep. O consumo de energia em 2024 foi fragmentado em 33,2% transportes, 31,7% indústrias, 10,8% residências, 8,5% setor energético, 5% agropecuária, 5,3 serviços e 5,5% uso não energético. Nesta conjuntura, o setor de transportes apresentou o maior consumo entre os setores e se tornou, novamente, o líder no país em termos de consumo energético, com 33,2%. Os setores de transporte e industrial correspondem a 64,9% do consumo de energia total (EPE/BEN, 2025).

Com expectativas de evolução do consumo de energia por fonte entre 2021 e 2031, o Plano Decenal de Expansão de Energia (MME/EPE, 2022), já prevê para os próximos 10 anos a tendência de crescimento e importância da produção de eletricidade do País, com um incremento médio anual de 3,5% ao ano, principalmente por fontes renováveis, de modo a

contribuir com a redução de emissões de GEE. O gás natural também ganha importância ao longo do período, crescendo 4,9% ao ano, aumentando sua participação principalmente na indústria e setor energético.

Os derivados de petróleo se mantêm como a principal fonte de energia final, com um crescimento médio de 1,6% anuais para o período. Parte de seu mercado potencial é abatida por etanol hidratado e biodiesel, especialmente no setor de transportes. Também perdem participação a lenha e o carvão vegetal, em benefício de outras fontes mais nobres, com melhores rendimentos (MME/EPE, 2022). Na Figura 2.5 é exibido o consumo final de energia por fonte ocorrido em 2021 e a previsão para o ano de 2031.

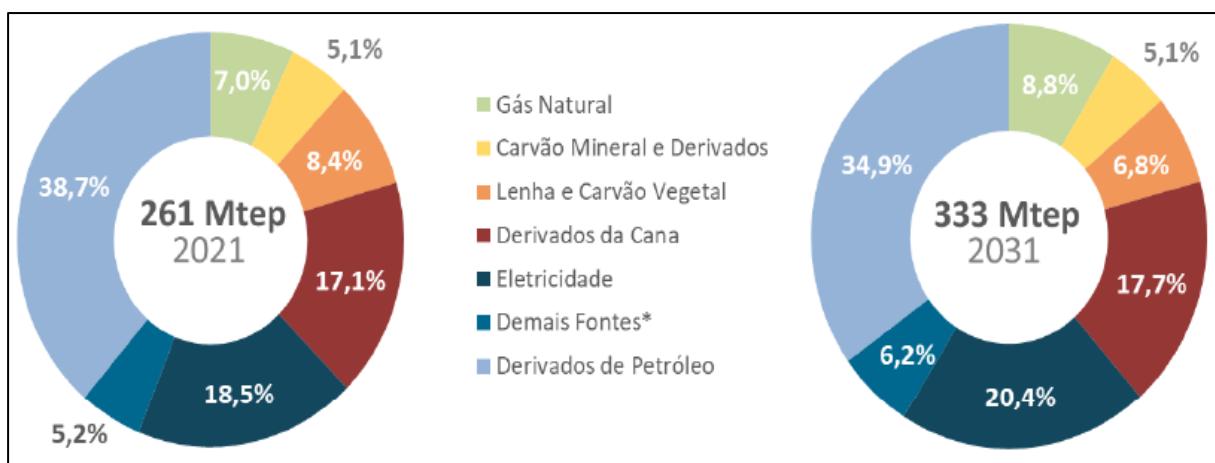


Figura 2.5: Consumo Final de Energia por Fonte 2021 – 2031
Fonte: MME/EPE (2022)

Em vista da projeção apresentada, percebe-se um aumento acumulado entre 2021 e 2031 de 28% no consumo de energia nacional. É previsto a diminuição da participação das fontes derivadas de petróleo, mas continuam sendo a fonte mais representativa, não ocorrendo mudanças significativas na estrutura setorial e os transportes e as indústrias se mantêm como os principais vetores de consumo.

Nesta conjuntura, o Plano Decenal de Expansão de Energia 2031, apresentado em abril de 2022, estima que o uso de energia irá continuar com a tendência de eletrificação ao longo do horizonte decenal (2021-2031), conforme é exibido na Figura 2.6.

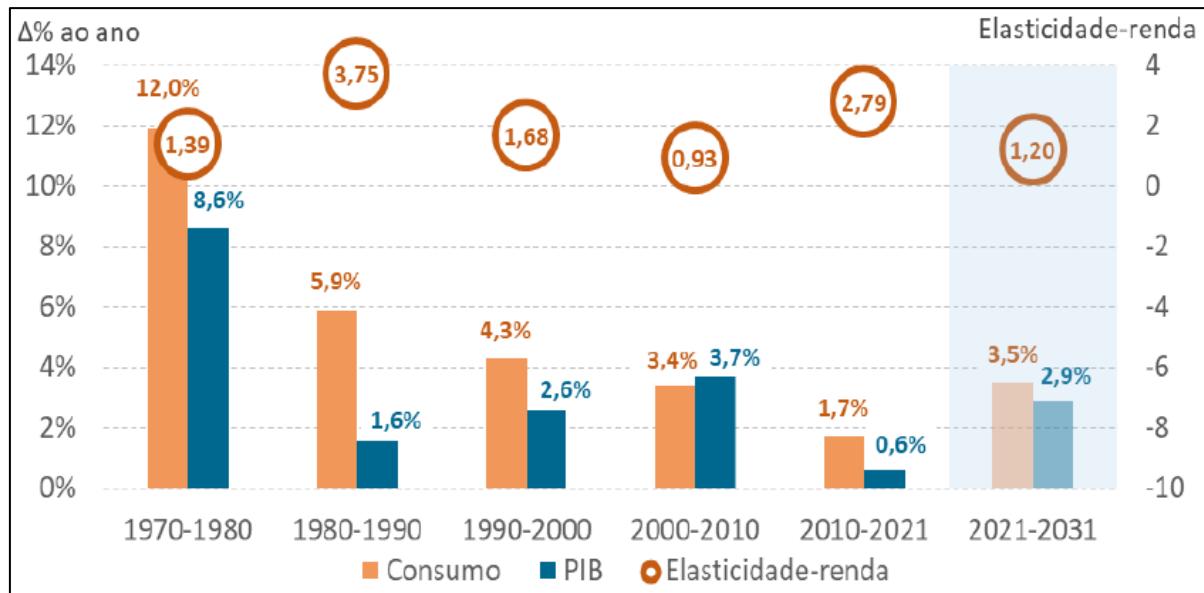


Figura 2.6: Elasticidade-Renda da Demanda de Eletricidade (Histórico x Projeção)

Fonte: MME/EPE (2022)

Deve-se observar, fato em destaque, que o consumo total de eletricidade cresce acima do ritmo de expansão econômica, resultando em uma elasticidade-renda de 1,20 e o consumo total de eletricidade cresce 0,6% ao ano a mais que a economia brasileira entre 2021 e 2031. Este indicador é afetado tanto pelo consumo na rede quanto pela autoprodução não injetada esperados para o período, que crescem às respectivas taxas anuais de 3,5% e 3,3%, o que proporciona um aumento de 3,5% ao ano do consumo total. Seguindo a previsão, o PIB cresce à taxa anual média de 3,2% nos cinco primeiros anos e o consumo de eletricidade se expande a ritmo mais acelerado, dada a premissa de gradual retomada de utilização da capacidade instalada industrial.

Nesse sentido, o consumo total de eletricidade cresce à taxa de 3,5% anuais nos primeiros anos do horizonte analisado, com a elasticidade-renda de 1,26. Já no segundo quinquênio, nota-se uma redução da elasticidade-renda para 1,14 como resultado de um maior peso das demais classes de consumo, naturalmente menos eletrointensivas, na expansão do consumo nacional de eletricidade. Como resultado, o consumo total cresce à taxa de 3,5% no horizonte.

2.5.1 Matriz Elétrica Brasileira

Sem dúvida, a matriz elétrica brasileira é uma das mais limpas do mundo, com a maior parte da geração oriunda de fontes de energia renováveis. A principal fonte de energia da matriz elétrica do Brasil ainda é a hidráulica, isto é, há usinas hidrelétricas espalhadas pelo País, sendo

responsáveis por gerar 433,4 TWh, que corresponde a 58,9% de toda a geração de energia elétrica no ano de 2024, que foi de 762,9 TWh (MME/EPE, 2025).

Infelizmente, uma combinação de fatores no ano de 2024, reduziu a participação de fontes renováveis na matriz elétrica brasileira, principalmente com o aumento de 11,4% no uso de fontes fósseis na geração termelétrica, com destaque para avanços significativos na participação de gás natural, derivados do petróleo e carvão vapor. Essa alteração ocorreu devido à redução da utilização de recurso hídrico, que diminuiu a geração hidráulica, acarretando a necessidade de compensar através da geração termelétrica, principalmente a gás natural. Na Figura 2.7 é exposto a comparação internacional da participação das fontes renováveis na matriz elétrica.

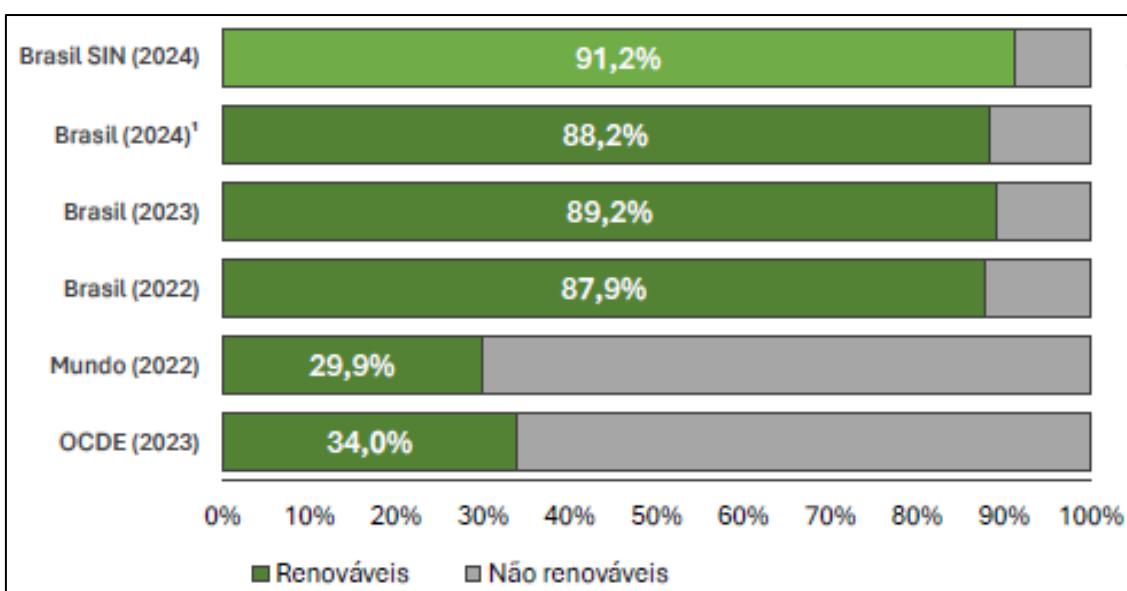


Figura 2.7: Comparação Internacional Fontes Renováveis na Matriz Elétrica
Fonte: EPE/BEN (2025)

Na Figura no item “Brasil SIN (2024)” o valor de 91,2% é devido apenas ao Sistema Interligado Nacional (SIN), o que exclui os sistemas isolados, a importação de eletricidade e a autoprodução não-injetada na rede. Já o item “Brasil (2024)” foi determinado com base na Oferta Interna de Energia Elétrica (OIEE), ou seja, toda a geração nacional mais a importação líquida.

No caso do consumo de energia elétrica no ano de 2024, verificou-se um crescimento na oferta interna de 39,7 TWh, 5,5% em relação ao ano de 2023. O principal destaque foi o avanço da geração solar, com um aumento de 39,6%. A geração hidráulica reduziu 1%, acompanhando a queda na importação de energia elétrica de 6,5%. Em contrapartida, a geração eólica obteve

um crescimento de 12,4%, alcançando uma produção de 107 GWh.

Nesta conjuntura, o *Plano Decenal de Expansão de Energia* apresentado em abril de 2022 pelo Governo Federal, projeta até 2031 que as fontes renováveis serão responsáveis por pelo menos metade da capacidade total de geração de energia elétrica. Ao todo, o governo espera adicionar 75 GW à capacidade elétrica instalada no Brasil até 2031, um aumento de 37% em relação ao cenário atual. A geração solar distribuída, feita a partir de painéis fotovoltaicos pelos próprios consumidores, deve crescer 363%, e a geração solar centralizada, contratada em leilões, deve se expandir em 134%.

2.5.2 Emissões de CO₂ na Matriz Energética Brasileira

Em 2024, o total de emissões de CO₂ antrópicas associadas à matriz energética brasileira atingiram 431,3 milhões de toneladas de CO₂ equivalente, um aumento de 0,6% em relação ao ano de 2023. Sendo 214,3 Mt CO₂ proveniente dos transportes, 74,8 Mt CO₂ das indústrias, 18,6 Mt CO₂ das residências e 123,6 Mt CO₂ de outros setores. Na Figura 2.8 é exposto a evolução das emissões de CO₂ totais associadas à matriz energética brasileira devido a produção e no uso da energia.

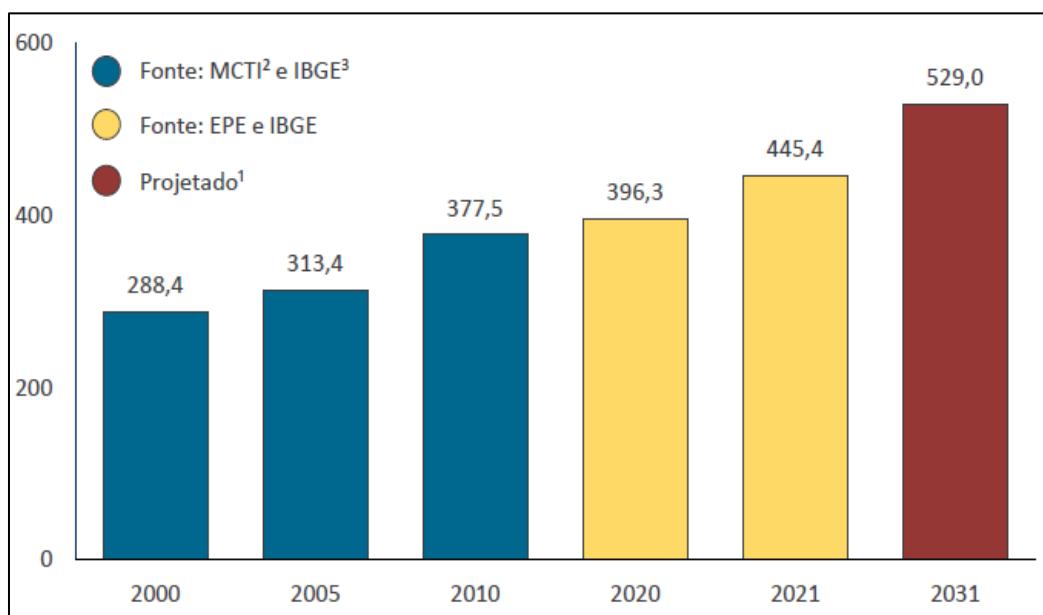


Figura 2.8: Emissões de CO₂ Totais da Matriz Energética Brasileira
Fonte: MME/EPE (2022).

Pela Figura é perceptível que a taxa de crescimento das emissões totais associadas à matriz energética brasileira entre os anos de 2000 - 2021 obteve um crescimento anual de 2,1%,

enquanto a taxa projetada para o horizonte 2021 - 2031, indica um crescimento em ritmo inferior de 1,7% ao ano, conforme projeção do Plano Decenal de Expansão de Energia (MME/EPE, 2022).

Com respeito as emissões de CO₂ na produção de energia elétrica, o Brasil emitiu em 2024 um total de 61 kg CO₂/MWh. Portanto, para produzir 1 MWh o setor elétrico brasileiro emite certa de 23% do valor emitido pela União Europeia, 17% do que é emitido pelo setor elétrico americano e 9% do que é emitido pelo setor elétrico chinês (EPE/BEN, 2025).

Ademais, nos próximos anos, busca-se diminuir ainda mais as emissões de CO₂ na produção de eletricidade por meio do aumento da participação de fontes renováveis na geração de energia elétrica. Neste quesito, o país tem investido na ampliação da capacidade elétrica instalada, com o aumento de geração fotovoltaica e eólica. Por consequência, é necessário determinar qual será o impacto que a adoção de VE's irá ocasionar, tanto no consumo de energia elétrica quanto nas emissões de CO₂ devido a geração de eletricidade.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este Capítulo aborda as estratégias e processos adotados para o desenvolvimento deste estudo e a obtenção de resultados que visam atender os objetivos delineados na Tese. Inicialmente, será apresentado e detalhado o procedimento metodológico utilizado para a elaboração do modelo proposto.

Em primeiro lugar, foi realizado o *Estudo Experimental* com a *Caracterização das Rotas*, que se baseia na aplicação de técnicas empíricas para mensurar e analisar o consumo de energia e a emissão de CO₂ da frota circulante, estabelecendo a base experimental sobre a qual as fases subsequentes são construídas e validadas. Prossegue-se com a *Modelagem do Consumo Energético e Emissão de CO₂*, que utiliza técnicas de regressão e simulação nos dados coletados durante a fase experimental, de modo a prever o comportamento futuro do consumo de combustíveis e das emissões em cenários distintos, apoiando-se em fundamentações teóricas sólidas para a escolha dos parâmetros e das variáveis envolvidas.

Posteriormente, ocorre a *Modelagem dos Cenários*, que consiste na criação de cenários futuros baseados em premissas de desenvolvimento tecnológico e políticas públicas. Esta fase é essencial para entender as possíveis trajetórias de emissão de CO₂ e consumo energético, permitindo avaliar a eficácia de diferentes estratégias de mitigação. Finalmente, a *Quantificação para as Próximas Décadas dos Consumos de Combustível, Energia Elétrica e das Emissões de CO₂* projeta os resultados obtidos nas fases anteriores para um horizonte temporal mais extenso, oferecendo uma perspectiva de longo prazo que será fundamental no planejamento estratégico voltado para a sustentabilidade ambiental, social e econômica do país.

Nesta perspectiva, a Figura 3.1 exibe sucintamente a estrutura geral utilizada no procedimento metodológico para a concepção do modelo.

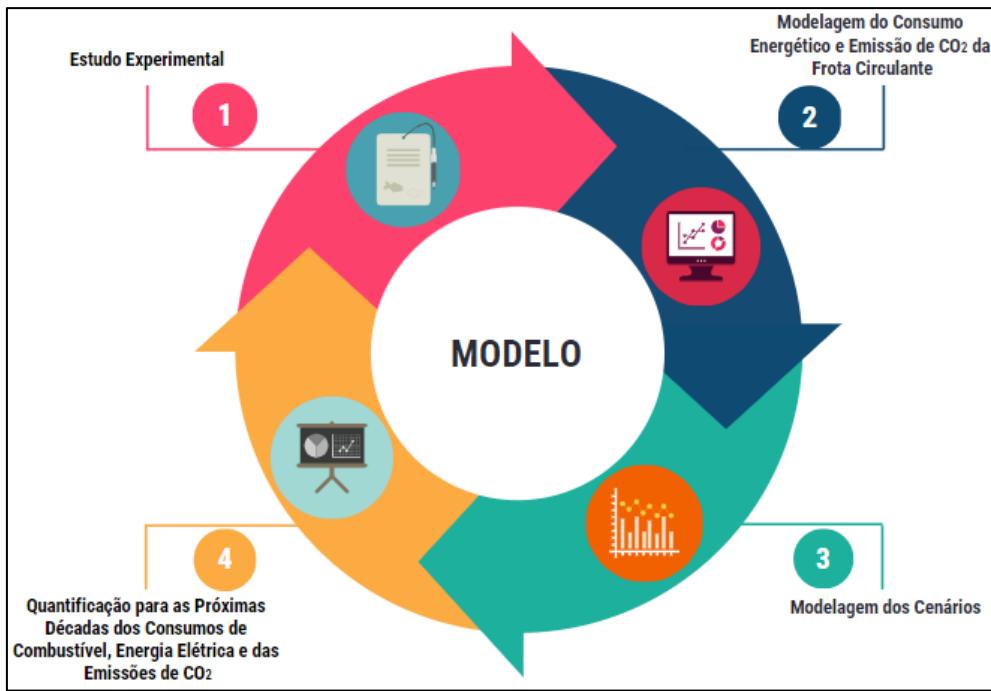


Figura 3.1: Procedimentos Metodológicos para Concepção do Modelo

A metodologia adotada neste estudo não apenas alinha-se com os objetivos propostos, mas também reflete a complexidade e a multidisciplinaridade das questões relacionadas à sustentabilidade ambiental e à eficiência energética. A integração dessas diferentes fases metodológicas para a concepção do modelo se torna fundamental para a coesão e a robustez da Tese, proporcionando uma base sólida para conclusões confiáveis e recomendações pragmáticas.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DAS ROTAS

Foi definido Brasília, Distrito Federal (DF) como sendo a área de estudo. A escolha do DF para a aplicação/validação do modelo proposto, se justifica pela cidade ter um dos maiores PIB per capita do país (IBGE, 2024), permitindo que seja uma das candidatas ao grande crescimento da frota de veículos híbridos e elétricos nas próximas décadas, devido a relação entre o PIB per capita e a taxa de motorização per capita.

Neste contexto, foram caracterizadas as principais vias do DF, com maiores movimentações diárias, de modo a identificar as rotas a serem estudadas experimentalmente (PDTU, 2010). Por essas rotas, foram realizadas viagens com três veículos, um veículo com motor a combustão interna (MCI) *Flexfuel* utilizando ora gasolina, ora etanol, um veículo híbrido (HEV), utilizando gasolina e um veículo elétrico à bateria BEV. Os veículos MCI e HEV foram selecionados

levando em consideração as características dos veículos mais frequentes da frota circulante do local de estudo, já o BEV utilizado foi selecionado a partir da relação peso-potência, de forma a ser semelhante ao MCI e HEV.

3.1.1 Caracterização da Área de Estudo

A área de estudo está situada no Centro-Oeste do país, na cidade de Brasília. Esta cidade foi fundada em 1960, tombada pela Unesco e totalmente planejada. Hoje, Brasília e sua região metropolitana possuem cerca de 3 milhões de habitantes (IBGE, 2024), e suas características de mobilidade são as mesmas de muitas cidades no mundo, ou seja, o centro da cidade é o ponto de atração de viagens das Regiões Administrativas (RA's), que são regiões periféricas que ficam ao redor de Brasília, e compõem o Distrito Federal.

Brasília foi concebida e organizada tendo uma área central e cidades-satélites, denominação dada na época da inauguração. Hoje são 35 RA's que compõem a área metropolitana (SEGOV, 2024). Complementarmente à região metropolitana, os municípios vizinhos de outros estados fazem parte da zona de influência de Brasília, atraindo viagens-diárias que ocorrem para todos os fins, como trabalho, estudo, compras e lazer, sendo caracterizados como deslocamentos pendulares.

Nesse contexto, torna-se fundamental a aplicação deste estudo na capital federal, dada a relevância de se mapear os principais parâmetros que influenciam o consumo energético e as emissões de CO₂ da frota veicular urbana. Entre esses fatores destacam-se os ciclos de condução, a idade média da frota, o tipo de combustível utilizado, consumo de combustível e emissão de CO₂. A análise integrada desses elementos permite compreender de que forma a eletrificação da frota pode contribuir para a mitigação das emissões de CO₂ na cidade, oferecendo subsídios para políticas públicas de mobilidade sustentável.

3.1.2 Rotas Estudadas

As rotas do estudo foram determinadas de forma a se obter o ciclo condução real da frota de veículos do Distrito Federal-DF. Para tanto, utilizou-se como referência a separação em eixos rodoviários, proposta pelo Plano Diretor de Transporte Urbano do Distrito Federal (PDTU-DF) em 2010, e ratificadas pelo Plano de Desenvolvimento do Transporte Público sobre Trilhos do Distrito Federal (PDTT-DF) em 2018.

Além disso, foram consultados os registros dos dispositivos controladores eletrônicos de velocidade³ distribuídos pela cidade, com o objetivo de confirmar que essas rotas correspondem às principais vias utilizadas pelos veículos leves de passageiros no DF. Os dispositivos controladores eletrônicos, localizados nos pontos pré-determinados das vias estudadas e o Fluxo veicular nas rotas estão detalhados no “Apêndice B”.

Na Figura 3.2 são apresentadas as cinco principais rotas caracterizadas no estudo.

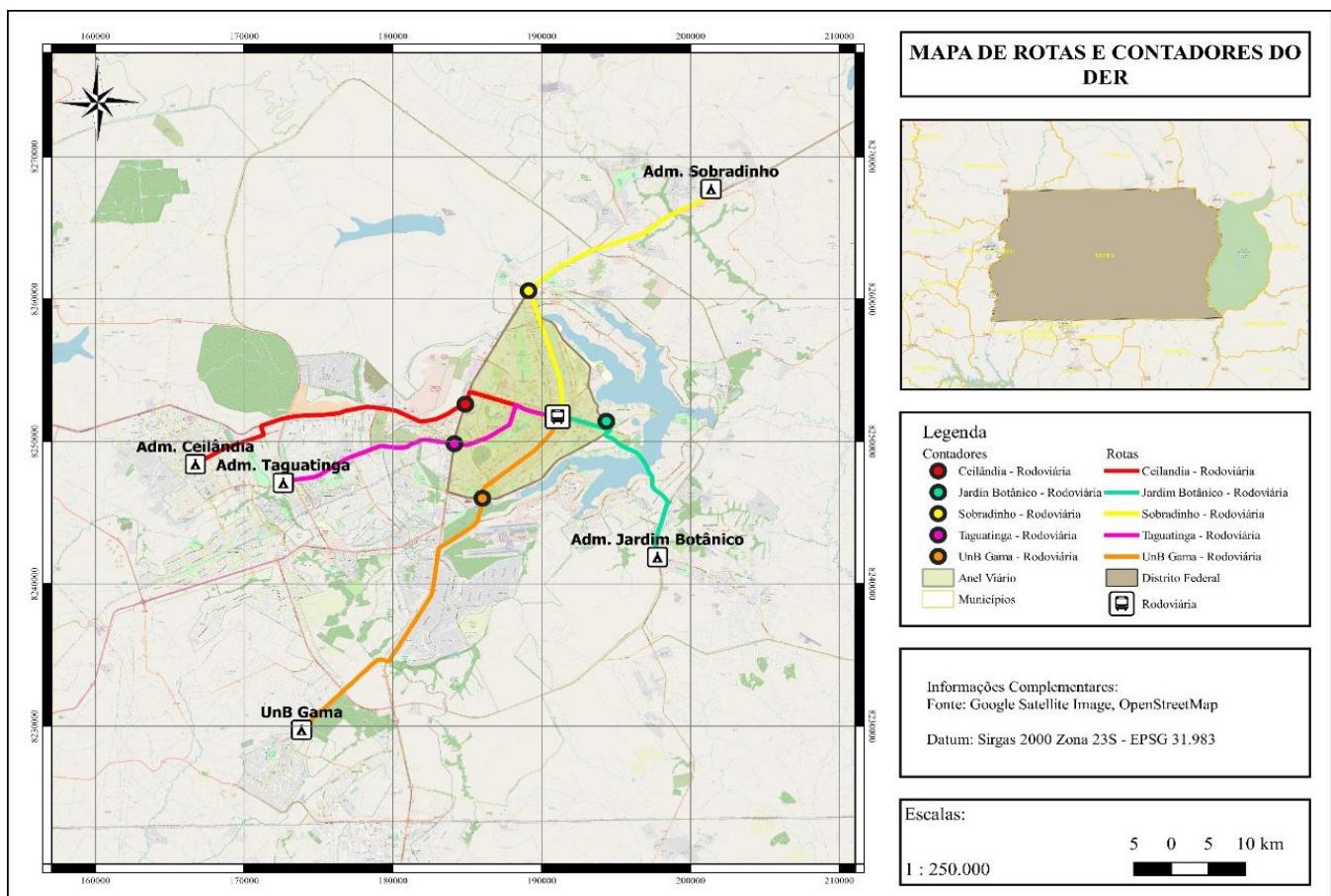


Figura 3.2: Rotas Caracterizadas no Estudo

Nas cinco rotas para a avaliação dos ciclos de condução de Brasília, todas as viagens terminam no mesmo ponto: Rodoviária Central de Brasília. Particularmente as viagens da rota sul iniciam no Campus UnB Gama, as viagens das outras quatro rotas começaram em frente aos respectivos

³Equipamento metrológico fixo destinado a fiscalizar o cumprimento do limite máximo de velocidade regulamentado para a via, instalado em locais definidos. Esses equipamentos além de controlarem as velocidades, realizam a contagem do volume do fluxo veicular por categoria e ao longo das 24h do dia.

edifícios das Administrações Regionais (equivalente a uma Câmara Municipal de uma cidade). A Tabela 3.1 mostra alguns detalhes das cinco rotas analisadas no presente estudo.

Tabela 3.1: Algumas Características das Rotas Estudadas

ROTAS	CORES	CARACTERÍSTICAS	DISTÂNCIA MÉDIA
Norte	Amarelo	Partida da Administração Regional de Sobradinho com a chegada a Rodoviária Central de Brasília.	27,22 km
Sul	Alaranjado	Partida do Terminal BRT Gama com a chegada a Rodoviária Central de Brasília.	23,44 km
Leste	Verde	Partida da Administração Regional do Jardim Botânico com a chegada a Rodoviária Central de Brasília.	15,30 km
	Vermelho	Partida da Administração Regional de Ceilândia com destino a Rodoviária Central de Brasília.	24,91 km
Oeste	Rosa	Partida da Administração Regional de Taguatinga com destino a Rodoviária Central de Brasília.	18,84 km

Em Brasília existem outras vias que acessam o centro da cidade, mas conforme apresentado pelo PDTT-DF (2018) e nos registros dos dispositivos controladores eletrônicos distribuídos pela cidade, conforme pode ser observado no “APÊNDICE B”, a maioria dos veículos da frota se deslocam por essas cinco vias.

3.1.3 Frota de Veículos

A Frota de Veículos de Brasília no ano de 2024 era composta por 2.159.414 veículos (SENATRAN, 2025), sendo composta por 1.776.781 automóveis, 32.862 caminhões, 21.211 ônibus urbano e rodoviário, 291.253 motocicletas, 34.621 reboques e 2.686 diversos. Para este estudo, foram utilizadas as informações da Frota Circulante e a Idade dos Veículos referentes a Brasília, a da base de dados do ano de 2021 disponibilizados pela Secretaria Nacional de Trânsito (SENATRAN, 2023), dos quantitativos de veículos emplacados e datas de fabricação. No Distrito Federal não é realizada a inspeção anual pelo Departamento de Trânsito do Distrito Federal (DETRAN), sem essa vistoria não são coletados os dados do hodômetro, resultando na ausência de dados que quantifique a quilometragem percorrida pelos veículos da frota do DF anualmente.

Neste sentido, para determinar os quilômetros anuais percorridos, em função da idade do veículo, foi utilizado dois métodos distintos. O primeiro método baseou-se na curva de quilômetros percorridos em função da idade do veículo, conforme proposto no Relatório de Emissões de Veículos do Estado de São Paulo (CETESB, 2018). O segundo método consistiu em adaptar essa curva ao contexto de Brasília, através da análise de amostras de veículos em duas bases de dados de veículos usados, de uma rede revendedora de veículos local e a outra através de *sites* na *internet* dedicados a venda de automóveis. Posteriormente, as informações do ano de fabricação dos veículos com o total de quilômetros registrados nos hodômetros foram correlacionadas.

Com respeito aos dados de idades dos veículos da Frota Circulante de Brasília, foram obtidas a partir dos dados do órgão de trânsito brasileiro (SENATRAN, 2023), que permitiu construir uma função de distribuição de probabilidade para a idade dos veículos. Na Figura 3.3 é apresentado um histograma da idade dos veículos leves de passageiros da frota de Brasília com as Fases PROCONVE correspondentes, juntamente com a função de distribuição de probabilidade da idade dos veículos representada pela linha contínua.

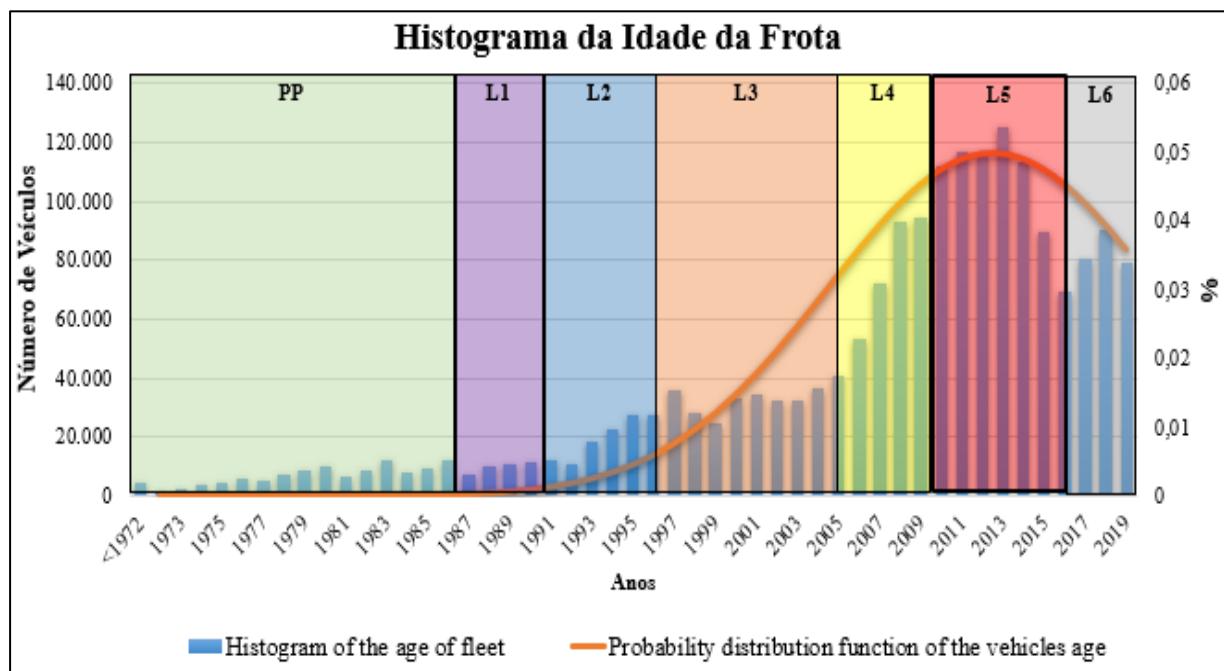


Figura 3.3: Histograma da Idade da Frota com os Níveis Correspondente e a Linha Contínua que Representação a Função de Distribuição de Probabilidade da Idade dos Veículos

Fonte: O Autor com Base nos dados do SENATRAN, 2021

Como resultado, a idade mais frequente da frota de veículos corresponde aos fabricados entre os anos de 2010 e 2014, com a categoria PROCONVE de emissão veicular sendo a 'L5'. De

acordo com os dados do SENATRAN, relativos à frota de Brasília em 2021, 6,96% dos veículos emplacados no Distrito Federal são de 2012, o que posiciona esse ano entre os com maior volume de emplacamentos na capital. Vale ressaltar que os dados apresentados na Figura 3.3 não incluem os 2.919 veículos adaptados à tecnologia GNV em circulação (DETRAN, 2023).

Na sequência foram examinados os fatores de emissão de CO₂ e consumo de combustível derivados de testes de dinamômetro, aplicados aos modelos de veículos produzidos de 2012 a 2023 (INMETRO, 2024) utilizando como combustível a Gasolina (E27) - mistura de gasolina com 27% de etanol, com o ciclo de vida do poço ao tanque. Ao utilizar os dados de fatores de emissão e consumo de combustível mencionados, analisou-se o impacto da redução no consumo de combustível e nas emissões de CO₂ em função do ano de fabricação dos veículos da frota através da função de melhor ajuste. Na Figura 3.4 é exibido a representação sintetizada do consumo de combustível e o fator de emissão de CO₂ levando em conta o ano de fabricação e Fase PROCONVE para diferentes tecnologias veiculares.

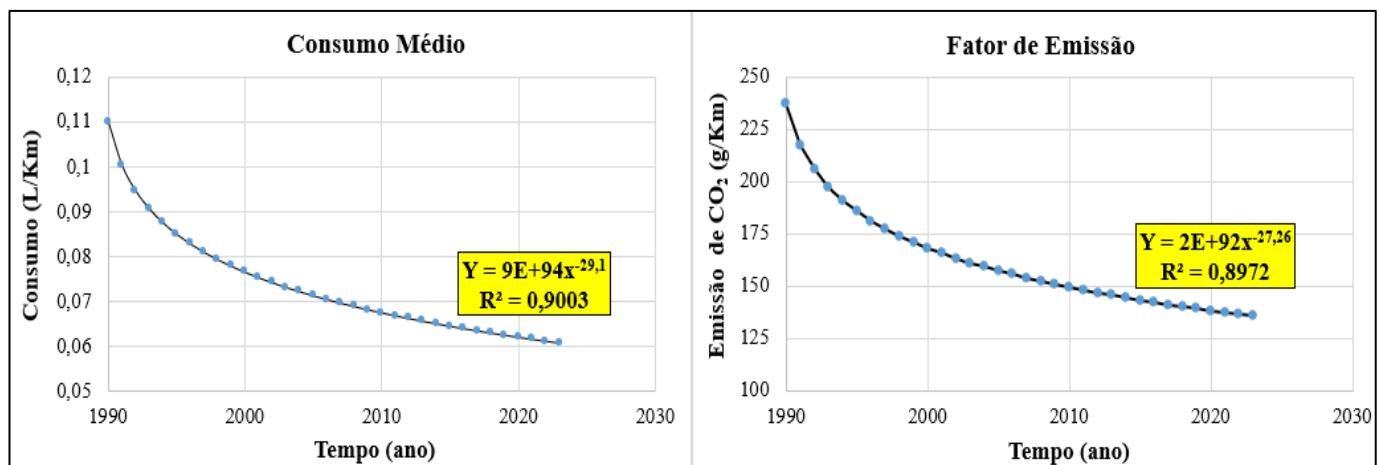


Figura 3.4: Consumo de Combustível/Fator de Emissão de CO₂ por ano de Fabricação e Fases PROCONVE

Fonte: O Autor com Base nos dados do INMETRO, 2024.

Os dados da Figura 3.4 indicam uma tendência decrescente, tanto para o consumo médio de combustível, quanto para o fator de emissão, demonstrando que os veículos estão se tornando progressivamente mais eficientes e menos poluentes ao longo do tempo, e sugere que os avanços futuros em termos de redução de consumo e emissões tendem a ser mais modestos.

Para o modelo desenvolvido neste estudo, o consumo de combustível e as emissões de CO₂ da frota foram estimados com base na metodologia do inventário, levando em conta o número de veículos, assim como o consumo de combustível e o fator de emissão específicos para cada ano de fabricação

e Fase PROCONVE⁴. Nesse sentido, é possível com o uso do modelo projetar valores de fator de emissão de CO₂ e consumo de combustíveis para os anos futuros, até 2050, utilizando funções de ajustes logarítmicas apresentadas na Figura 3.4.

Também é importante destacar que os dados sobre consumo de combustível e emissão de CO₂ são baseados no ciclo de condução FTP-75, servindo, portanto, como referência para comparações com os resultados dos fatores de emissão e autonomia de combustível do estudo experimental realizado nos ciclos de condução do mundo real aplicado na cidade de Brasília.

Ademais, o modelo proposto neste estudo considerou que o quilômetro anual percorrido pelos veículos é uma função da idade do veículo. Essa função também é considerada pelo Inventário de Emissões Veiculares (CETESB, 2024), e foi validada localmente para efeito da modelagem da presente Tese. A calibração da curva de quilometragem anual percorrida em função do ano de fabricação, para o contexto de Brasília, foi obtida a partir de dados das duas maiores plataformas de venda de veículos na internet e do banco de dados dos veículos à venda de uma rede de concessionárias local. Os dados de quilometragem do hodômetro e ano de fabricação dos veículos foram cruzados para obter a curva de quilômetros percorridos anuais.

3.1.4 Veículos Utilizados

Para selecionar os veículos a serem utilizados nas rotas, foram consideradas as características da frota de Brasília, focando nos modelos mais prováveis em termos de idade e fase PROCONVE. Com base nos resultados apresentados na Figura 3.3, foram escolhidos veículos do ano de 2012, pertencentes à fase L5 do PROCONVE, com relação Peso-Potência Máxima de aproximadamente 0,07 kW/kg. Outro fator que fundamenta a escolha dos veículos MCI e HEV utilizados nesse estudo com o ano de fabricação 2012 é o fluxo veicular determinado pelos controladores de velocidade distribuídos nas rotas estudadas, conforme pode ser observado no “APÊNDICE B”.

Dessa maneira, os veículos escolhidos foram: um MCI-Flexfuel FOX, fabricado pela Volkswagen em 2012, movido a gasolina/etanol, e um veículo híbrido a gasolina PRIUS,

⁴ Programa de Controle de Emissões Veiculares, que tem como objetivo reduzir os níveis de emissão de poluentes por veículos automotores no Brasil, estabelecendo limites de emissão de poluentes cada vez mais restritivos ao longo de suas diferentes fases. Além de controlar as emissões de veículos leves e pesados, o programa também visa aprimorar a qualidade dos combustíveis e estimular o desenvolvimento tecnológico da indústria automotiva nacional.

também de 2012, produzido pela Toyota, gentilmente cedido pela Universidade de Brasília (UnB) – Campos Gama.

Já a escolha do veículo elétrico Leaf ZE Elétrico, fabricado pela Nissan em 2022 não seguiu o critério de prevalência (moda) na frota atual, dada a limitada quantidade de veículos elétricos em circulação no Distrito Federal, que são predominantemente fabricados nos anos de 2021 e 2022. A escolha do BEV foi baseada nas características de proximidade da relação Peso-Potência Máxima de 0,07 kW/kg (10 kg/cv) dos veículos MCI e HEV utilizados, garantindo assim uma comparação mais equitativa e consistente nos parâmetros avaliados. Na Tabela 3.2 é exibido as características dos três veículos selecionados para as medições.

Tabela 3.2: Principais Características FOX/PRIUS/LEAF

FICHA TÉCNICA	FOX 1.6-FLEXFUEL Gasolina/Etanol	PRIUS HÍBRIDO Gasolina	LEAF ZE Elétrico
Potência (a 5.250 rpm)	101 cv (G)/104 cv (A)	99 cv	149 cv
Torque (a 2.500 rpm)	15,4 kgfm (G)/15,6 kgfm (A)	14,5 kgfm	32,6 kgfm
Peso/potência	10,06 kg/cv	10,55 kg/cv	10,62 kg/cv
Tanque de combustível/ Capacidade da Bateria	50 litros	45 litros	40kWh
Peso	1.046 kg	1.415 kg	1.582 kg
Aceleração 0-100 km/h	10,5 s	10,3 s	7,9 s
Consumo Urbano	8,6 km/l (G)/6,6 km/l (A)	15,7 km/l	11 km/kWh
Consumo Rodoviário	11,1 km/l (G)/8,5 km/l (A)	14,3 km/l	6 km/kWh
Autonomia	430 km (G)/330 km (A)	706,5 km (G)	240 km

Inicialmente, o veículo MCI-*Flexfuel* percorreu as diferentes situações nas cinco rotas selecionadas, utilizando gasolina ou etanol como combustível. Essa experimentação revelou que as cinco rotas apresentam padrões médios semelhantes, sendo a Rota Sul a que melhor representou as condições das vias do Distrito Federal. Assim, as medições dos veículos HEV e BEV foram concentradas exclusivamente na Rota Sul.

Para registrar os dados das viagens, assim como os consumos e emissões, e avaliar o ciclo de condução típico do Distrito Federal, foram utilizados equipamentos e *softwares* específicos.

Para os veículos MCI e HEV, foi conectado ao seu sistema *On-Board Diagnostic* (OBD)⁵ o equipamento *HH Advanced OBD2*, e instalado no celular do condutor o *software Torque Pro*. Já para o veículo BEV, que possui protocolos específicos, foi utilizado o equipamento *ELM 327 MINI*, conectado ao seu OBD, e instalado no celular do condutor o *software Leaf Spy Pro*. O *HH Advanced OBD2* e o *ELM 327 MINI*, ambos em conformidade com a Resolução Conama 492/2018 e a norma ISO 15765 CAN. Esses dispositivos registravam dados a uma taxa de 1 Hz, transmitidos via *Bluetooth* e armazenados em um celular com o *software Android 9*.

Nos veículos MCI e HEV foram monitorados os parâmetros velocidade OBD; velocidade GPS; altitude; RPM; vazão do combustível consumido; potência nas rodas; posição do acelerador; autonomia em km/l do percurso; autonomia em km/l instantânea; distância percorrida total e parcial; diferença de velocidade entre GPS e OBD; emissão de CO₂ em g/km-média; emissão de CO₂ em g/km-instantâneo e o volume do combustível consumido na viagem em litros. Especificamente no veículo PRIUS foi acrescentado: potência consumida no banco de baterias (Watts), torque real no motor elétrico e o nível de carga da bateria.

Já no veículo Leaf ZE (BEV), além de terem sido monitorados os parâmetros velocidade OBD; velocidade GPS; altitude; distância percorrida; tempo de deslocamento e diferença entre as velocidades OBD e GPS, foram monitorados os parâmetros particulares dos veículos elétricos, tais como, voltagem das baterias; temperatura das baterias; consumo de energia do ar-condicionado; potência utilizada pelo motor; regeneração e consumo de energia nas baterias.

Na Tabela 3.3 são caracterizados os Equipamentos e os *Softwares* utilizados:

⁵ OBD (do inglês *on-board diagnostic*) designa um sistema de auto diagnóstico disponível na maioria dos veículos automóveis que circulam atualmente. A conexão ao sistema consiste em um conector padronizado que foi sancionado como obrigatório na Europa e nos Estados Unidos para todos os veículos produzidos desde 1996, e no Brasil a partir de 2010 com o padrão de segunda geração OBD2. A medida tem a finalidade de popularizar o serviço de reparo eletrônico, reduzindo drasticamente o custo das oficinas, possibilitando o consumidor pagar mais barato por esse gênero de serviço. Além disso, a padronização e abertura dos protocolos de comunicação trouxeram ao mercado equipamentos possibilitando a compra dos mesmos pelos próprios consumidores para "diagnóstico em casa". Com tecnologia *bluetooth* para sincronização com um computador ou aparelho celular *smartphone*.

Tabela 3.3: Características Técnicas dos Equipamentos e dos *Softwares* Utilizados



H OBD2 ADVANCED ELM 327: Realiza a verificação sem fio e com alta qualidade, possui suporte para a maioria dos protocolos OBD2, sendo possível principalmente monitorar códigos de falhas da injeção eletrônica, sensor de oxigênio, consumo de combustível, tensão da bateria, RPM do Motor, velocidade, distância percorrida, dados do GPS, temperatura, dentro outras medidas, sendo possível sua utilização nos veículos MCI e HEV.



ELM 327 Mini: Possui um conjunto de *softwares* que possibilita realizar o monitoramento/diagnóstico dos Veículos Elétricos, devido a leitura de parâmetros específicos desta tecnologia veicular, monitorando, velocidade, distância percorrida, dados do GPS, potência consumida-Watts, torque real no motor elétrico, carga da bateria, dentre outras medidas.



TORQUE PRÓ: Atua como um relé e obtém informações em tempo real do sistema veicular, sendo um *software* de diagnóstico específico para automóveis movidos a combustão interna. Ele é usado para analisar e transmitir dados sobre seu carro em relação a métricas de desempenho e dados de sensores, apresentando as informações em uma tela de *smartphone*, computador ou *tablet*.



LEAF SPY PRO: Realiza o diagnóstico avançado do veículo elétrico Nissan Leaf, de modo a monitorar a tensão de cada um dos 96 pares de células da bateria, histograma de voltagens de pares de células, leitura da temperatura da bateria, estado de saúde da bateria, velocidade, consumo, distância percorrida, configurações do veículo, pressão do pneu, realiza armazenamento de informações interno e externo, acessa localização com alta precisão por meio do GPS do dispositivo conectado, dentro outros. Calcula o kWh restante na bateria, distância para acabar a energia com base em suas configurações pessoais de uso (quilômetros por kWh) e a quantidade de energia que você deseja deixar como reserva de emergência.

É importante destacar que em todos os experimentos realizados, um único condutor operou os veículos, conforme proposto por Putradamazman & Syahmi (2021). Esse fato busca reduzir qualquer variação devido a diferentes estilos de condução e analisar a consistência das características de condução do veículo. Na Tabela 3.4 é exemplificado como os dados são obtidos nas rotas a partir da utilização do equipamento.

Tabela 3.4: Dados Obtidos nas Rotas com a Utilização do OBD

Longitude	Latitude	Altitude (m)	Velocidade GPS (m/s)	Velocidade OBD (km/h)	RPM (rpm)	Distância (km)	CO ₂ (g/km)
-47.93917204	-15.86424038	1.020,28	15,02	56,00	1.628,75	17,29	245,34
-47.93902516	-15.86420635	1.019,74	16,17	56,00	1.628,75	17,29	245,34
-47.9388743	-15.8641599	1.019,00	17,49	62,00	1.780,00	17,33	246,01
-47.93872615	-15.86409335	1.018,33	18,19	62,00	1.780,00	17,33	246,01
-47.93859643	-15.86398344	1.017,75	19,46	62,00	2.029,75	17,33	246,75
-47.93849041	-15.86383983	1.016,46	20,57	70,00	2.029,75	17,38	246,75
-47.93842678	-15.86366995	1.015,71	20,92	70,00	2.029,75	17,38	246,75
-47.9383999	-15.86348439	1.015,99	21,35	76,00	2.184,00	17,44	247,47
-47.93838025	-15.86328094	1.016,59	22,87	76,00	2.184,00	17,44	247,47
-47.93836801	-15.86309335	1.015,23	20,70	76,00	2.184,00	17,44	247,47
-47.93835754	-15.86289009	1.015,31	21,98	81,00	2.320,50	17,50	248,17
-47.93831569	-15.86268055	1.015,03	23,06	81,00	2.320,50	17,50	248,17
-47.93826965	-15.86248037	1.015,71	23,18	81,00	2.320,50	17,50	248,17

Ademais, os resultados obtidos no estudo experimental serão comparados com os fatores de emissão e autonomia de combustível do ciclo de condução FTP-75, validado no Brasil pela ABNT NBR 6601 (2012).

3.1.5 Calibração do Consumo de Combustível

Para calibrar e validar os dados de consumo de combustível obtidos através dos dispositivos *HH Advanced OBD2*, foi utilizado um medidor externo de consumo acoplado ao veículo, composto por um tanque auxiliar da marca *Planatc* com capacidade de 9 litros, posicionado no assoalho do lado do passageiro sobre uma balança de precisão da marca Toledo. Na Figura 3.5 é apresentado o medidor externo de consumo acoplado ao veículo.



Figura 3.5: Medidor Externo de Consumo Acoplado ao Veículo

Para a validação dos dados, o sistema de alimentação de combustível do veículo foi isolado e foram realizadas viagens na Rota Sul, tanto em horários de pico quanto fora de pico. A massa inicial do conjunto tanque + combustível foi medida no início e ao final de cada viagem, permitindo determinar o consumo de combustível pela diferença entre as massas final e inicial. Além disso, foi verificado o teor de etanol presente na gasolina para garantir a qualidade do combustível utilizado, conforme as especificações técnicas da gasolina E27.

Esse procedimento não apenas validou a precisão dos dados de consumo medidos pelo OBD, mas também garantiu a qualidade e as propriedades do combustível em teste. Conhecendo a densidade da gasolina utilizada, determinada previamente com um densímetro à temperatura de 25 °C, foi possível calcular o volume de combustível consumido em litros. Na Figura 3.6 é exibido parte do teste de qualidade do combustível.



Figura 3.6: Teste de Qualidade do Combustível

Além disso, seguindo os passos propostos por Fonseca (2018), foram comparados os dados de consumo obtidos pela leitura do OBD com o consumo do veículo medido por meio de um tanque externo. A Figura 3.7 expõe o procedimento adotado para a calibração do consumo de combustível.



Figura 3.7: Calibração do Consumo de Combustível

Também foram realizadas medições controladas em laboratório, utilizando o dinamômetro de rolo da Universidade de Brasília. Os testes no dinamômetro seguiram ciclos que simulavam tanto situações de pista plana com altas velocidades quanto situações com inclinações acentuadas.

Na Figura 3.8 é possível comprovar a execução do teste do dinamômetro para o consumo de combustível.



Figura 3.8: Teste do Dinamômetro - Consumo de Combustível

A aplicação deste procedimento permitiu a comparação dos dados em situações reais de condução e em condições controladas. É importante ressaltar que o ciclo de condução no dinamômetro de chassi é fornecido por um monitor que exibe a velocidade desejada a cada instante e a atual do veículo, permitindo uma variação na velocidade instantânea de até $\pm 3,2$ km/h, conforme a legislação brasileira (ABNT, 2012).

Foram realizadas vinte aferições com o uso do tanque externo para o trecho completo da Rota Sul e mais seis medições em laboratório utilizando o dinamômetro de rolo. Esse número de viagens foi necessário para obter valores estatisticamente consistentes, uma vez que algumas viagens as medições tiveram que ser descartadas devido a erros inerentes. Na Rota Sul, foram realizadas tanto viagens completas quanto viagens fracionadas em cinco etapas, nas quais os dados eram aferidos em cada parada. Já no dinamômetro de rolo, foram realizadas aferições para situações do veículo na posição horizontal e em aclives, simulando o ciclo de velocidades

das vias. Na tabela 3.5 é apresentado as médias dos resultados realizados nos testes com o tanque externo.

Tabela 3.5: Média dos Resultados dos Testes com o Tanque Externo

Itens Analisados	UnB-Gama ao Balão do Gama	Balão do Gama ao Catetinho	Catetinho à Floricultura	Floricultura ao Eixão Sul	Eixão Sul à Rodoviária	Rota Completa 7:30h	Rota Completa 10h	Pista Plana Dinamômetro	Pista Subida Dinamômetro
Variação da Massa Aferida (kg)	0,385	0,220	0,270	0,250	0,379	1,220	1,332	0,240	0,390
Densidade Observada 25°C	0,726	0,726	0,726	0,726	0,726	0,726	0,726	0,726	0,726
Densidade Corrigida para 20°C	0,730	0,730	0,730	0,730	0,730	0,730	0,730	0,730	0,730
Volume de Gasolina E27 (L)	0,527	0,301	0,370	0,342	0,519	1,671	1,825	0,329	0,534
Volume de Gasolina E27 no OBD2 (L)	0,440	0,090	0,347	0,496	0,390	1,731	1,980	0,328	0,563
Distância Percorrida na Rota	6,01	5,03	7,80	7,70	6,03	30,32	36,49	5,82	3,40
Consumo na Via (Km/L)	11,40	16,69	21,09	22,48	11,61	18,14	20,00	17,70	6,36
Consumo OBD2 (Km/L)	13,41	18,72	22,48	18,35	12,23	17,51	18,42	17,72	6,04
Emissões CO₂ (g/CO₂) Registrada Durante o Trajeto	156,7	132,1	132,0	149,1	149,1	164,5	143,8	216,3	243,4

No procedimento realizado para comparar o consumo de combustível entre o tanque externo e o dispositivo *HH Advanced OBD2*, tanto em situações reais quanto simuladas no dinamômetro de rolo, verificou-se que os dados obtidos pelo dispositivo OBD, quando comparados com os do medidor externo, apresentaram um erro relativo baixo. Isso foi evidenciado pelo coeficiente de correlação de Pearson, que mostrou uma correlação positiva forte com um coeficiente de aproximadamente 0,8634, indicando padrões de consumo semelhantes para os dois métodos. Nos testes realizados em trechos reais de rodovia, os erros entre as medições de consumo pelo OBD, em comparação com o tanque externo, foram maiores.

Já nas simulações no dinamômetro, observou-se menor discrepância nas medições durante a simulação de pista plana (erro de 0,1%) em relação ao teste de subida (erro de 5,09%). Esses resultados reforçam a ideia de que variações no perfil da via, como a presença de aclives e declives, aumentam a divergência entre os valores medidos pelo OBD.

É importante considerar que, em aclives, o uso do tanque externo também pode introduzir erros adicionais devido ao próprio tanque. Outro fator observado foi a ocorrência de variações de pressão na linha de vazão de combustível, causadas pela variação de demanda de potência do veículo, pois a capacidade de combustível limitada do tanque externo não conseguiu suprir.

3.1.6 Caracterização dos Ciclos de Condução

Inicialmente, com o veículo MCI as viagens foram realizadas nas cinco rotas, com partidas em horário de pico às 07:30h nas rotas das Regiões Administrativas em direção a Região Central da cidade. Após chegar a Rodoviária Central de Brasília, foi realizado outra viagem de retorno às Regiões Administrativas às 09:00h no contrafluxo. Depois uma outra viagem sentido Rodoviária Central de Brasília fora da hora pico às 10:00h, e finalmente, às 17h:30h de modo a caracterizar o horário de pico do final da tarde. Esses horários foram escolhidos por meio da análise da base de dados referente a contagem volumétrica de cada rota, disponibilizada pelas autoridades de trânsito.

As viagens foram executadas com o veículo utilizando como combustível Gasolina-E27 e depois repetidas com o veículo utilizando como combustível Etanol-E100, por ser um veículo *Flexfuel*. As medições realizadas com o veículo abastecido com etanol foram conduzidas com a garantia de que o tanque continha exclusivamente etanol, sem qualquer resquício de gasolina no tanque ou no sistema de alimentação do motor.

Após percorrer as cinco rotas com o veículo MCI, os resultados mostraram padrões médios semelhantes. A rota Sul destacou-se como a que melhor representa as rotas do Distrito Federal. Portanto, as medições dos veículos HEV e BEV foram concentradas exclusivamente na rota Sul.

Por conseguinte, com o HEV realizou-se medições apenas na Rota Sul para avaliar o impacto da tecnologia híbrida no consumo de combustível e nas emissões de CO₂. As viagens iniciaram às 07:30h a partir do Campus UnB Gama em direção área central de Brasília, com retorno no contrafluxo e outra viagem fora da hora pico às 10:00h. As viagens foram executadas com o veículo utilizando como combustível apenas gasolina.

Nas viagens com o BEV, também apenas na Rota Sul, foi mantido o mesmo padrão das viagens com o MCI e HEV, ou seja, iniciada às 07:30h a partir do Campus UnB Gama em direção área central de Brasília, com retorno no contrafluxo e outra viagem fora da hora pico às 10:00h.

Em todas as viagens nas rotas quando o trânsito não estava congestionado, era obedecida a velocidade máxima da via (alguns trechos as vias possuem velocidade máxima de 80 km/h e em outros trechos 60 km/h). As rotas foram percorridas às terças e quartas-feiras dos meses de

maio e agosto; foram escolhidos esses meses, por eles caracterizarem meses com movimentação veicular normal, ou seja, não são meses de férias escolares.

Na Tabela 3.6 é apresentado os resultados preliminares dos ciclos de condução realizados as 07:30h nas rotas de forma resumida com velocidade máxima e média, distância total e tempo de realização dos ciclos em condições reais para as diferentes tecnologias. Esses resultados serão explorados de forma mais detalhada no capítulo 4.

Tabela 3.6: Resultados Parciais dos Ciclos de Condução para as Diferentes Tecnologias

MCI/FOX/GASOLINA/7:30h					
CARACTERÍSTICAS	GAMA	CEILÂNDIA	J. BOTÂNICO	SOBRADINHO	TAGUATINGA
Duração do Ciclo (s)	2.407	2.598	2.373	2.086	2.419
Distância (km)	27,7	23,99	27,95	23,4	19,8
Velocidade Máxima (km/h)	91	88	84	82	85
Velocidade Média (km/h)	42	34	44	41	31
MCI/FOX/ETANOL/7:30h					
CARACTERÍSTICAS	GAMA	CEILÂNDIA	J. BOTÂNICO	SOBRADINHO	TAGUATINGA
Duração do Ciclo (s)	3.031	2.807	2.093	1.568	1.930
Distância (km)	27,7	23,99	27,95	23,4	19,8
Velocidade Máxima (km/h)	84	90	90	95	81
Velocidade Média (km/h)	34	33	28	48	38
HEV/PRIUS/GASOLINA/7:30h					
CARACTERÍSTICAS	GAMA	CEILÂNDIA	J. BOTÂNICO	SOBRADINHO	TAGUATINGA
Duração do Ciclo (s)	2.815	-	-	-	-
Distância (km)	27,7	-	-	-	-
Velocidade Máxima (km/h)	87,3	-	-	-	-
Velocidade Média (km/h)	35,2	-	-	-	-
BEV/NISSAN LEAF/ELÉTRICO/7:30h					
CARACTERÍSTICAS	GAMA	CEILÂNDIA	J. BOTÂNICO	SOBRADINHO	TAGUATINGA
Duração do Ciclo (s)	3.011	-	-	-	-
Distância (km)	27,7	-	-	-	-
Velocidade Máxima (km/h)	87,3	-	-	-	-
Velocidade Média (km/h)	35,2	-	-	-	-

Outro fator primordial para esta Tese foi a análise dos dados obtidos a partir dos controladores eletrônicos de velocidade distribuídos nas rotas estudadas, juntamente com os dados das experimentações realizadas com os veículos nas rotas. A caracterização do ciclo de condução

nas rotas e horários estabelecidos foi validada por meio da comparação entre os resultados obtidos e os dados dos controladores de velocidade, confirmando a consistência dos ciclos de condução.

3.2 MODELAGEM DO CONSUMO ENERGÉTICO E EMISSÃO DE CO₂ DA FROTA CIRCULANTE

A partir da caracterização dos ciclos de condução, consumo de energia e emissão de CO₂, foi possível realizar a modelagem do Consumo Energético e Emissão de CO₂ da Frota Circulante, indicado na *Fase 2* (Figura 3.1). Deste modo foram usados os dados referentes à frota circulante, tais como, a curva dos quilômetros percorridos anuais em função do ano de fabricação do veículo, a quantidade de veículo por ano de fabricação e Fase PROCONVE, o fator de emissão de CO₂ para cada ano de fabricação e o consumo de combustível por ano de fabricação.

Para estudar a frota circulante foi adotada a metodologia apresentada nos relatórios intitulados “*Emissões Veiculares no Estado de São Paulo*”, que desde 2012 tem aplicado a metodologia deliberada pelo “*Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores*” de autoria do Ministério do Meio Ambiente (MMA) em 2012.

Embora a presente tese tenha realizado os estudos experimentais de avaliação dos consumos energéticos e emissões de CO₂ nas rotas típicas do DF, é importante ressaltar que o submodelo de cálculo para toda a frota se baseou na metodologia de inventário, como descrito acima. Adicionalmente, vale mencionar que os estudos experimentais serviram para identificar o erro e a influência dos ciclos de condução típicos do DF no cálculo do inventário, já que, como mencionado anteriormente, os valores de fator de emissão e autonomia disponíveis nos relatórios intitulados “*Emissões Veiculares no Estado de São Paulo*” são baseados no ciclo de condução FTP-75, validados pela ABNT NBR 6601 (2012).

3.3 MODELAGEM DOS CENÁRIOS

Para que se alcance sucesso na proposta na *Fase 3* (Figura 3.1), deve ser determinada a futura frota de veículos para a área de estudo nas próximas três décadas, pois para esse período, mundialmente está previsto um aumento na frota de VE’s e a Política Energética Brasileira já tem projetado até o ano de 2050 o aumento do consumo energético devido à tendência de

eletrificação crescente, principalmente com a projeção da melhoria da economia e o aumento do uso de energia elétrica nos transportes (MME/EPE, 2020).

Outro fator que deve ser levado em conta na aplicação da metodologia é que particularmente no Brasil, os biocombustíveis renováveis continuarão desempenhando um papel importante como fontes de energia para a frota veicular, de modo que a propulsão elétrica enfrentará uma concorrência com a tecnologia híbrida, principalmente com a possibilidade de intensificação do uso de etanol.

Neste contexto, a modelagem da futura frota de veículos, para as próximas três décadas, foi realizada aplicando-se as *Funções de Gompertz* para as séries temporais de crescimento populacional, crescimento do PIB e licenciamento de veículos. Para tanto, as séries temporais de propriedade de veículos, população e PIB foram obtidas no IBGE (2022) e CODEPLAN (2022). As *Funções de Gompertz* já foram supracitadas nas Equações 1, 2 e 3 no Capítulo 2. Assim, foram levantadas as séries temporais do PIB, da população e da frota, em seguida foram ajustadas *Funções de Gompertz*, semelhante ao estudo de Huapu Lu *et al.* (2017) e Lian *et al.* (2018), para estimar os cenários até 2050.

Para melhor entendimento da influência que a adoção de VE's podem acarretar nas emissões de CO₂ e consumo de energia elétrica, este estudo propõe seis possibilidades de cenários para estimar a futura composição da frota na área de estudo: Cenário MENOS OTIMISTA, Cenário PRÉ-OTIMISTA, Cenário OTIMISTA, Cenário EXCESSIVAMENTE OTIMISTA, Cenário REFERÊNCIA e o Cenário ALTERNATIVO.

-**MENOS OTIMISTA**: frota composta apenas por veículos com MCI, utilizando apenas gasolina até 2050;

-**PRÉ-OTIMISTA**: a frota de veículos com MCI utilizando apenas gasolina seria reduzida a zero até 2050, sendo substituída parcialmente 50% por BEV e 50% por veículos HEV Flex, utilizando gasolina ou etanol;

-**OTIMISTA**: a frota de veículos com MCI utilizando apenas gasolina seria reduzida a zero até 2050, sendo substituída parcialmente 50% por BEV, 25% por veículos HEV Flex utilizando gasolina e 25% HEV Flex utilizando apenas etanol;

-**EXCESSIVAMENTE OTIMISTA**: a frota de veículos com MCI utilizando gasolina seria reduzida a zero até 2050, sendo substituída apenas por BEV.

-REFERÊNCIA: a frota de veículos com MCI utilizando gasolina seria reduzida a 28% até 2050, sendo substituída parcialmente 11% por BEV e 61% por veículos HEV, utilizando apenas etanol;

-ALTERNATIVO: a frota de veículos com MCI utilizando gasolina seria reduzida a zero até 2050, sendo substituída parcialmente 15% por BEV e 85% por veículos HEV, utilizando apenas etanol;

Nesta tese, foram propostos quatro cenários: MENOS OTIMISTA e EXCESSIVAMENTE OTIMISTA, definidos a partir das condições extremas, ou seja, nenhuma mudança ou mudança total, o PRÉ-OTIMISTA e OTIMISTA, que buscaram ponderar trajetórias intermediárias entre os extremos. Em complemento, os cenários REFERÊNCIA e ALTERNATIVO foram incorporados com base no Plano Nacional de Energia 2050, que é um conjunto de estudos e diretrizes elaboradas pelo Ministério das Minas e Energia (MME) como uma estratégia de longo prazo para o setor elétrico brasileiro, (MME/EPE, 2020).

3.4 QUANTIFICAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO₂ NO CICLO E VIDA DOS COMBUSTÍVEIS E DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Para realizar a predição dos cenários propostos, é crucial quantificar as emissões de CO₂ provenientes da matriz energética. Isso inclui considerar as emissões geradas em todas as etapas do ciclo de vida, desde a extração de recursos naturais, passando pela produção, distribuição e consumo. Ao realizar uma avaliação abrangente dessas emissões, podemos obter uma visão completa do impacto ambiental associado a diferentes tecnologias veiculares.

A quantificação precisa das emissões de CO₂ é essencial para comparar o desempenho ambiental das diferentes tecnologias veiculares. Essa análise detalhada permite identificar quais tecnologias oferecem maiores benefícios em termos de redução de emissões e qual o impacto ambiental de cada uma ao longo de todo o seu ciclo de vida, e assim, obter uma visão completa do impacto ambiental devido as tecnologias veiculares.

Neste contexto, analisou-se as emissões associadas à extração, processamento e transporte dos combustíveis utilizados nos veículos a MCI e HEV, assim como na geração da eletricidade utilizada nos veículos BEV, na Figura 3.9 é exibido detalhadamente um esquema do sub-modelo para cálculo da emissão de CO₂ no ciclo de vida dos combustíveis e da eletricidade.

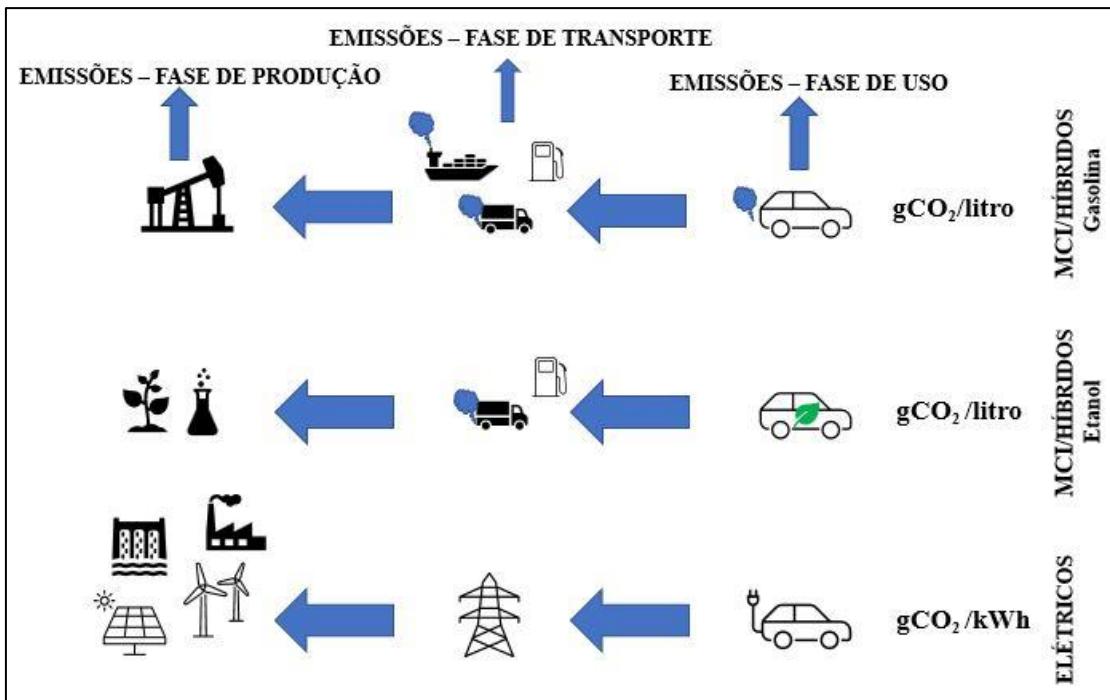


Figura 3.9: Sub-Modelo para Cálculo da Emissão de CO₂ no Ciclo de Vida dos Combustíveis

No submodelo apresentado na Figura 3.9, utilizado para o cálculo da emissão de CO₂ no ciclo de vida dos combustíveis, a primeira etapa considera as emissões na fase de produção, que são provenientes dos processos de refinamento e produção do combustível. Isso inclui as emissões geradas durante a extração e o processamento do petróleo, bem como aquelas associadas à obtenção da matéria-prima para os biocombustíveis. No caso dos veículos elétricos, são levadas em conta as emissões de CO₂ resultantes da geração de energia elétrica a ser utilizada.

A segunda etapa determina as emissões na fase de transporte, que envolve toda a distribuição do combustível até o ponto de abastecimento, seja rodoviário, hidroviário ou dutoviário. Por fim, a terceira e última etapa corresponde as emissões na fase de uso, abrange as emissões de CO₂ decorrentes da queima do combustível ou do uso da fonte de energia nos veículos. Esse momento representa o impacto final no meio ambiente e fecha a análise do ciclo completo, conhecido como "do poço à roda", permitindo uma avaliação abrangente da sustentabilidade do combustível em questão.

Ademais, para o caso brasileiro, a partir deste Sub-Modelo as emissões de CO₂ tanque-rosa foram consideradas apenas para o motor MCI utilizando o combustível gasolina (E27), ou seja foi levando em conta todo ciclo de vida da mistura gasolina e etanol, enquanto as emissões tanque-rosa na fase de uso quando utilizando apenas o combustível etanol e VE's foram consideradas zero, sendo contabilizado todas as emissões na produção do recurso energético.

Portanto, os valores estimados das emissões na fase de produção e distribuição de combustível foram de 0,57 kg CO₂/litro de gasolina, obtido da base de fatores de emissão da IEA (2024), e 0,30 kg CO₂/litro de etanol, obtidos do estudo de Aguiar *et al.* (2024). Com respeito as emissões de CO₂ na produção de energia elétrica, o Brasil emitiu no de 2024 um total de 59,9 kg CO₂/MWh (EPE/BEN, 2025).

3.5 PROJEÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E EMISSÕES DE CO₂

Com o intuito de projetar o total de energia elétrica a ser gerada e suas emissões de CO₂ para as próximas décadas, foi necessário estimar a demanda futura de energia elétrica e a participação na matriz energética de recursos não renováveis. Para tanto, com expectativas de evolução do consumo de energia por fonte, foram utilizados os estudos: o Plano Decenal de Expansão de Energia (MME/EPE, 2022), o Plano Energético Brasileiro Horizonte 2050 (EPE, 2017) e Cenários da Matriz Elétrica 2050 (Kelman, 2015).

Adicionalmente, as emissões de CO₂ do sistema de geração elétrica brasileiro foram avaliadas com base no inventário de fatores de emissão publicado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (Dantas, 2019). Uma função de correlação foi obtida para as emissões de CO₂ com a geração termelétrica a combustível fóssil, estimando o aumento do fator de emissão de CO₂/TWh da energia elétrica brasileira até 2050, permitindo assim, determinar a quantidade de CO₂ que será emitido com a geração de energia elétrica que será consumida pela frota de veículos BEV ao decorrer dos anos até 2050, conforme será apresentado posteriormente.

3.6 MODELO PROPOSTO PARA O CONSUMO DE ENERGIA/COMBUSTÍVEL E EMISSÕES DE CO₂

A partir da execução dos procedimentos metodológico supracitados, foi possível elaborar o modelo proposto nesta tese, que tem como objetivo simular o crescimento da frota de veículos de transporte individual, considerando os veículos com motor a combustão interna, híbridos e elétricos, de modo a determinar os impactos nos consumos energéticos e emissões líquidas de CO₂ para as próximas três décadas.

Essencialmente, o modelo busca antecipar e compreender o panorama futuro da frota de veículos e seus efeitos ambientais, proporcionando percepções valiosos para políticas públicas

e estratégias de sustentabilidade. Na Figura 3.10 é apresentada as etapas do Modelo proposto, destacando sua estrutura e funcionamento.

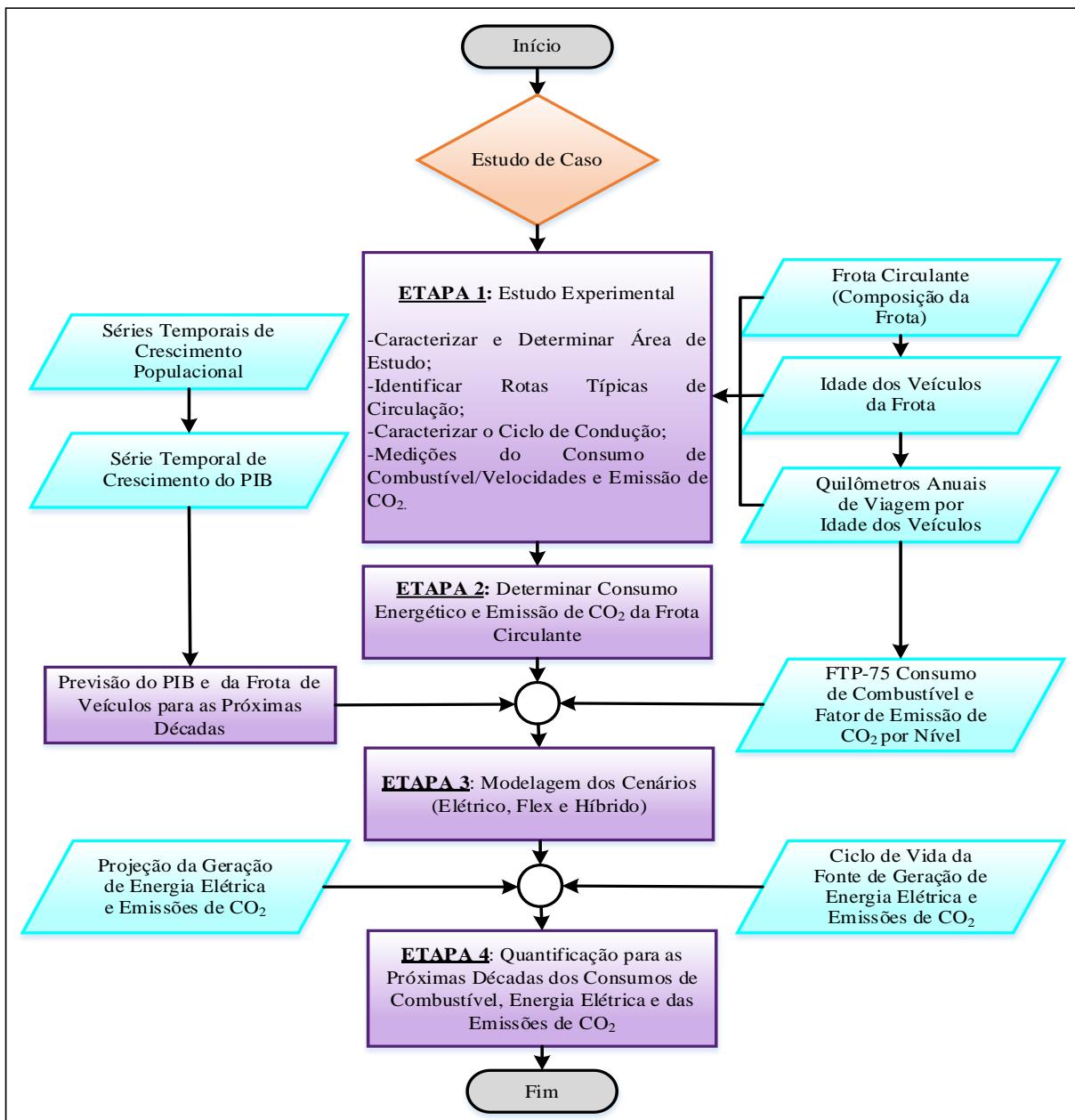


Figura 3.10: Modelo Proposto para Determinar Consumo de Combustível e Emissão de CO₂

Para melhor compreensão, o modelo foi dividido em quatro etapas, como apresentado no eixo central da Figura 3.10. O desenvolvimento do modelo requereu submodelos, indicados em caixas azuis, na parte lateral da Figura acima. Ao lado esquerdo da Figura, consta o submodelo de crescimento de frota, com base no crescimento do PIB e População do Distrito Federal, bem como, o submodelo de determinação das emissões de CO₂ da matriz elétrica brasileira aplicada

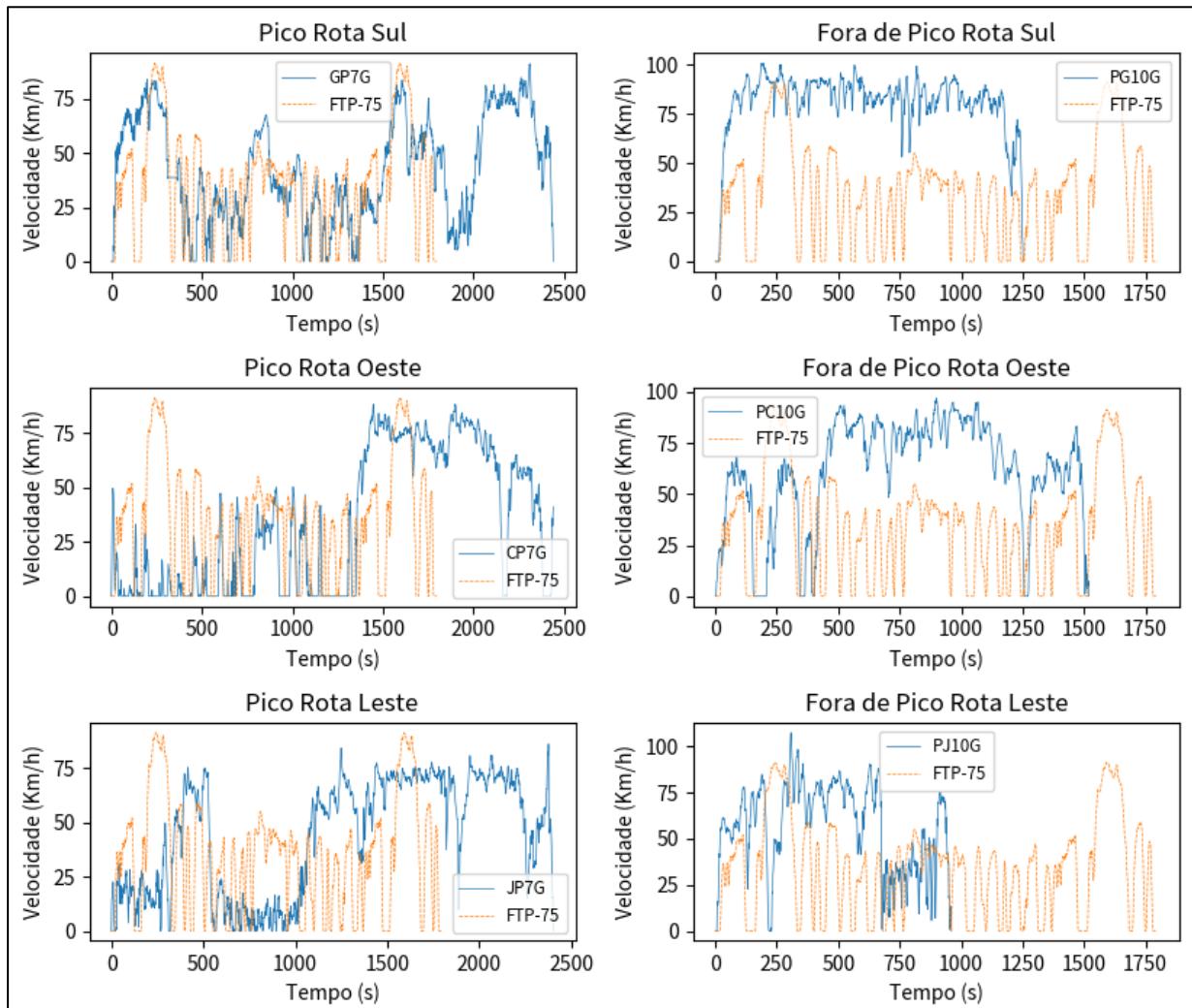
à região do Distrito Federal. Ao lado direito da figura, consta o submodelo de determinação do inventário dos consumos energéticos e emissões de CO₂ da frota do Distrito Federal.

Esse modelo foi desenvolvido para ser uma ferramenta a ser utilizada como apoio as tomadas de decisões por planejadores e gestores do setor público e privado na busca pela sustentabilidade, de modo a ser replicado em qualquer cidade ou País, assim como, para frotas de veículos elétricos de carga ou de passageiros.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 CONSUMO ENERGÉTICO E EMISSÕES DE CO₂ NAS ROTAS

Para determinar o consumo energético e a emissão de CO₂, foram caracterizados os ciclos de condução em condições reais e comparados com o ciclo padronizado FTP-75 nas cinco rotas com os veículos apresentados no estudo. Os ciclos de condução obtidos para todas as rotas e suas características constam no "APÊNDICE C". A Figura 4.1 apresenta um resumo dos ciclos de condução no mundo real para as cinco rotas nos horários de pico (07:30h) e fora de pico (10:00h).



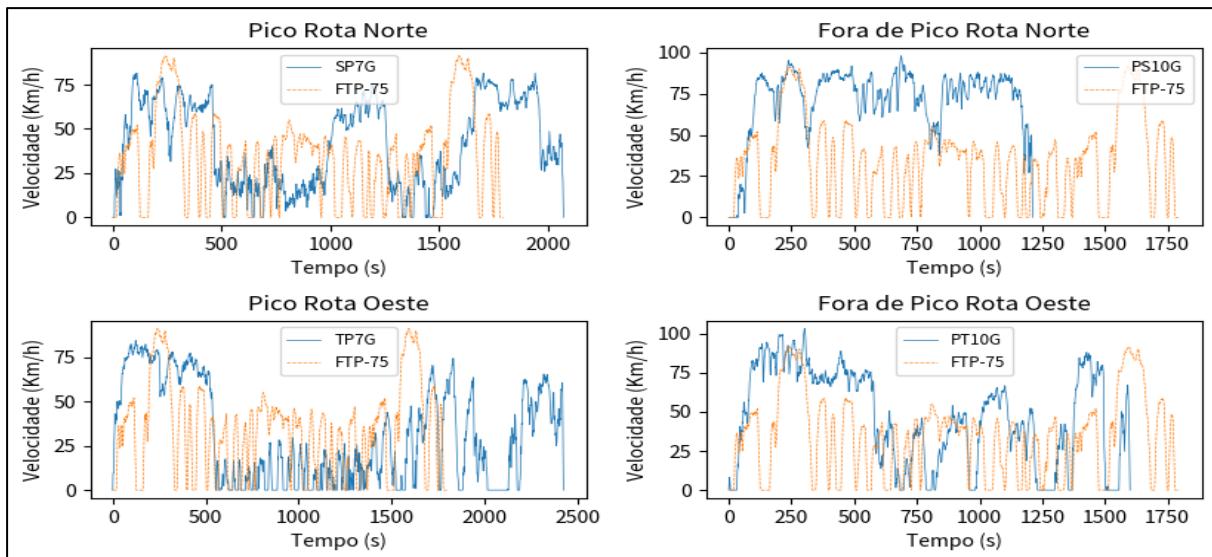


Figura 4.1 Ciclos de Condução em Condições Reais nas Cinco Rotas e FTP-75 em horário de pico e fora de pico, em comparação com o FTP-75

Para os ciclos analisados, existe uma diferença no tempo de duração em relação FTP-75 e a velocidade média é 13,2% superior à registrada no ciclo FTP-75. Apesar disso, a autonomia média de combustível (km/l) em condições reais foi 2,87% maior do que no ciclo FTP-75, indicando um desempenho energético ligeiramente mais eficiente. Por outro lado, as emissões médias de CO₂ nesses mesmos ciclos foram 45,86% mais elevadas em comparação com as emissões observadas no ciclo FTP-75.

Na Tabela 4.1 são apresentados a velocidade média, a distância total, o tempo de realização do ciclo, a autonomia média e a emissão média de CO₂ para os ciclos realizados nas rotas.

Tabela 4.1 Características das rotas

Rotas	Veicular	Velocidade Média (km/h)	Distância (km)	Duração do ciclo (s)	Autonomia média			Emissões Médias de CO ₂ (g/km) ⁶	
					Gasolina (km/l)	Etanol (km/l)	Elétrico (km/kWh)	Gasolina	Etanol
Sul/Gama	HEV	48,4	27,7	2.815	13,00	-	-	107,28	-
Sul/Gama	BEV	54,0	27,7	2.264	-	-	9,5	-	-
Sul/Gama	MCI	42,4	27,7	2.474	11,67	9,92	-	265,64	238,87
Oeste/Ceilândia		41,1	23,4	2.086	11,73	9,18	-	244,97	225,11
Leste/Jd. Botânico		43,2	15,2	2.373	11,29	10,49	-	294,58	247,87
Norte/Sobradinho		30,8	19,8	2.419	11,52	11,41	-	275,83	129,57
Oeste/Taguatinga		34,6	24,9	2.688	11,40	9,82	-	294,56	206,27
FTP-75		34,1	17,8	2.474	11,20	10,52		189,52	183,38

⁶ Os valores para autonomia e emissões de CO₂ do ciclo FTP-75 foram validados no estudo de SILVA (2023).

De acordo com a Tabela 4.1, é possível identificar particularidades entre os ciclos de condução reais e o ciclo FTP-75. Além disso, ao comparar o consumo de energia e as emissões de CO₂ entre o ciclo FTP-75 e os ciclos de condução reais, observou-se uma discrepância significativa nas rotas analisadas. A Tabela 4.2 apresenta as discrepâncias identificadas entre os dados obtidos nos ciclos de condução reais e FTP-75.

Tabela 4.2 Diferenças Médias identificadas entre o Consumo e CO₂ para as rotas e o ciclo FTP-75

Veículo	Hora	Rota	OBD		FTP75		Diferenças percentuais verificadas entre OBD e FTP 75			
			Consumo	CO ₂	Consumo	CO ₂	Consumo	Média Consumo	CO ₂	Média CO ₂
			(l/km)	(g/km)	(l/km)	(g/km)				
MCI-FOX Gasolina	7:30h	Sul	0,09	110,34	0,09	111	-0,80%	-4,47%	0,60%	-3,03%
		Oeste	0,10	119,96	0,09	111	-8,67%			
		Leste	0,09	117,39	0,09	111	-7,24%			
		Norte	0,09	106,48	0,09	111	2,73%			
		Oeste	0,10	118,62	0,09	111	-8,37%			
	10:00h	Sul	0,08	96,66	0,09	111	11,70%	10,90%	12,92%	12,13%
		Oeste	0,07	86,96	0,09	111	20,56%			
		Leste	0,08	105,84	0,09	111	3,31%			
		Norte	0,07	90,62	0,09	111	17,21%			
		Oeste	0,09	107,58	0,09	111	1,72%			
MCI-FOX Etanol	7:30h	Sul	0,14	-	0,13	-	-5,41%	-2,29%	-	-
		Oeste	0,14	-	0,13	-	-7,44%			
		Leste	0,16	-	0,13	-	-25,81%			
		Norte	1,10	-	0,13	-	20,97%			
		Oeste	1,12	-	0,13	-	6,25%			
	10:00h	Sul	0,10	-	0,13	-	19,34%	6,92%	-	-
		Oeste	0,11	-	0,13	-	14,85%			
		Leste	0,10	-	0,13	-	20,08%			
		Norte	0,18	-	0,13	-	-36,60%			
		Oeste	0,11	-	0,13	-	16,93%			
HEV Gasolina	7:30h	Sul	0,04	53,03	0,05	71	21,19%	21,19%	25,30%	25,30%
	10:00h		0,03	39,85	0,05	71	40,79%	40,79%	43,87%	43,87%
BEV	7:30h		0,07	-	0,11	-	31,16%	31,16%	-	-
	10:00h		0,10	-	0,11	-	4,04%	4,04%	-	-

Os resultados do MCI utilizando como combustível gasolina, apresentaram um erro médio de 4,47% no consumo de energia e 3,03% nas emissões de CO₂ durante a execução dos percursos nos horários de pico, em relação aos valores do ciclo FTP-75. Fora dos horários de pico, ocorreu uma redução de 10,9% no consumo de energia e 12,13% nas emissões de CO₂, sendo inferiores aos do FTP-75. Com o uso de etanol, o consumo de energia nos horários de pico foi 2,29% superior ao registrado pelo FTP-75, enquanto as emissões de CO₂ foram 6,92% menores fora dos horários de pico.

O veículo híbrido elétrico (HEV) apresentou uma redução de 21,19% no consumo de energia e de 53,03% nas emissões de CO₂ em relação ao FTP-75 durante os horários de pico, e uma

redução de 40,79% e 43,87%, respectivamente, fora dos horários de pico. De maneira similar, o comportamento do HEV mostrou um consumo de energia 31,16% menor no horário de pico e 4,04% menor fora do horário de pico, em comparação ao FTP-75.

Também é observado que os resultados das emissões de CO₂ tanque-rosa em g/km, seguiram o mesmo padrão de erros de economia de combustível, sendo consistentemente maiores para os percursos fora do horário de pico. Já eficiência energética dos veículos pode ser analisada para as condições do horário de pico, como comparação, considerando o menor poder calorífico da gasolina e do etanol. A autonomia energética equivalente média do veículo SI para as cinco rotas resultou em 1,33 km/kWh para gasolina e 1,64 km/kWh para etanol, enquanto a autonomia energética equivalente do HEV resultou em 2,91 km/kWh.

Esses resultados quando comparados com a autonomia do BEV de 13,8 km/kWh indicam um grande ganho de eficiência energética para o sistema de propulsão elétrica. Portanto, para as próximas décadas, o aumento da frota de veículos híbridos tem potencial para diminuir o consumo de energia durante as condições de tráfego, enquanto os veículos elétricos a bateria são a melhor opção para diminuir o consumo total de energia e diminuir as emissões de CO₂. No entanto, é importante notar que as emissões de CO₂ tanque-rosa são zero tanto para a eletricidade quanto para o etanol, portanto os veículos híbridos a etanol podem ser uma notável opção de transição para a frota nas próximas décadas.

Neste contexto, foi realizado essa comparação entre os ciclos reais de condução e o FTP-75 de modo a identificar possíveis discrepâncias entre esses ciclos. Essas diferenças foram especialmente evidentes em situações de fluxo livre, ou seja, fora dos horários de pico. Essas observações sugerem que os dados reportados podem não representar completamente a realidade do consumo de energia e das emissões de CO₂.

Assim, foi possível observar discrepâncias nos consumos energéticos médios entre os percursos reais e o ciclo FTP-75. Essas diferenças podem estar associadas a diversos fatores considerados neste estudo para os ciclos reais, incluindo a energia requerida para superar variações de altitude (rampas), a influência da temperatura, variações do fluxo veicular nas vias e a dinâmica mais agressiva da condução em condições reais, especialmente fora dos horários de pico.

4.2 MODELAGEM DO CONSUMO ENERGÉTICO E EMISSÃO DE CO₂

Com o intuito de realizar a modelagem do consumo energético e emissão de CO₂, inicialmente

foi determinada a relação dos quilômetros anuais percorridos pela frota veicular em função da idade do veículo, para tanto foram utilizados dois métodos distintos. O primeiro, foram coletadas e analisadas amostras em plataformas de venda de veículos no Distrito Federal e o segundo, em banco de dados de uma rede de revendedoras locais, com um total de 1.389 veículos com menos de 20 anos de idade.

O primeiro método baseou-se na curva de quilômetros percorridos em função da idade do veículo, conforme proposto pelo Relatório de Emissões de Veículos do Estado de São Paulo 2013 (CETESB, 2014) e validada para o caso da cidade de Brasília. Para esse procedimento foi realizada uma regressão potencial, relacionando os quilômetros percorridos por ano e a idade dos veículos, usando os dados obtidos de uma rede revendedora de veículos local. Assim, é exibido na Figura 4.2 a Intensidade de Uso – Curva da Quilometragem dos Veículos em Função da Idade.

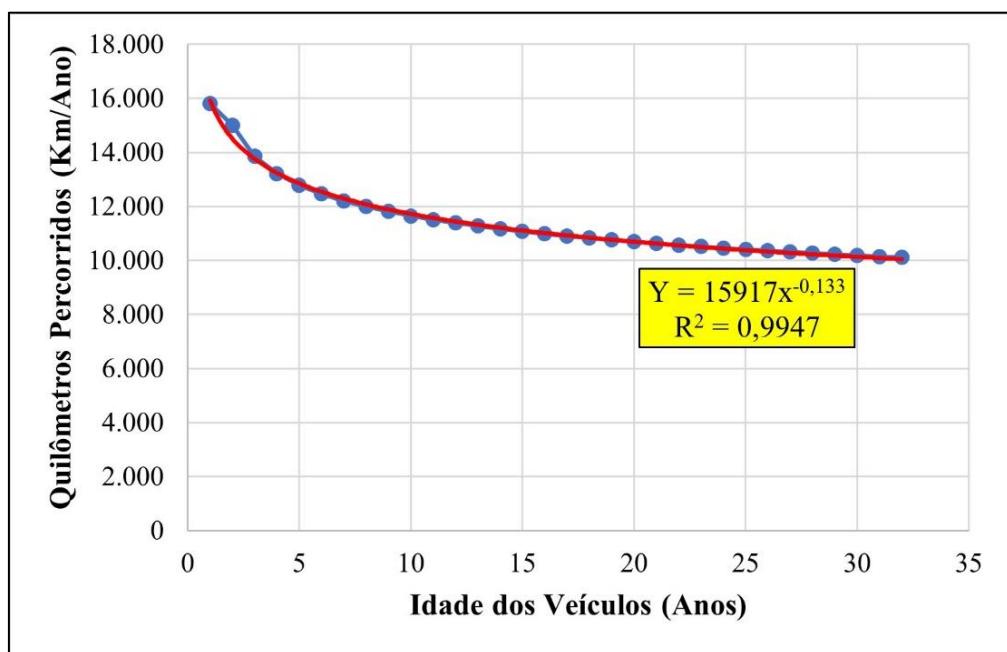


Figura 4.2: Intensidade de Uso - Curva da Quilometragem dos Veículos em Função da Idade
Frota de Veículos de Brasília-DF

Na Figura 4.2 a intensidade de uso é mostrada pela curva de quilômetros percorrido por ano em função da idade do veículo e indica um valor máximo de 16.000 km/ano para os veículos novos e observa-se uma diminuição nos quilômetros viajados ao longo dos anos, com uma tendência de que seja percorrido 10.000 km/ano pelos veículos com mais de 30 anos. Ao mesmo tempo, o espalhamento da cidade de Brasília, com moradias mais distantes do centro, fez com que os quilômetros médios de viagem aumentassem na última década.

Portanto, o mesmo banco de dados que serviu para determinar a curva da Figura 4.2, também foi usado para estimar a variação da média dos quilômetros anuais ao longo dos próximos anos, cujo resultado indica que Brasília é de fato uma região em expansão e que as distâncias percorridas anualmente têm tendência de aumentar para as próximas décadas, conforme Figura 4.3.

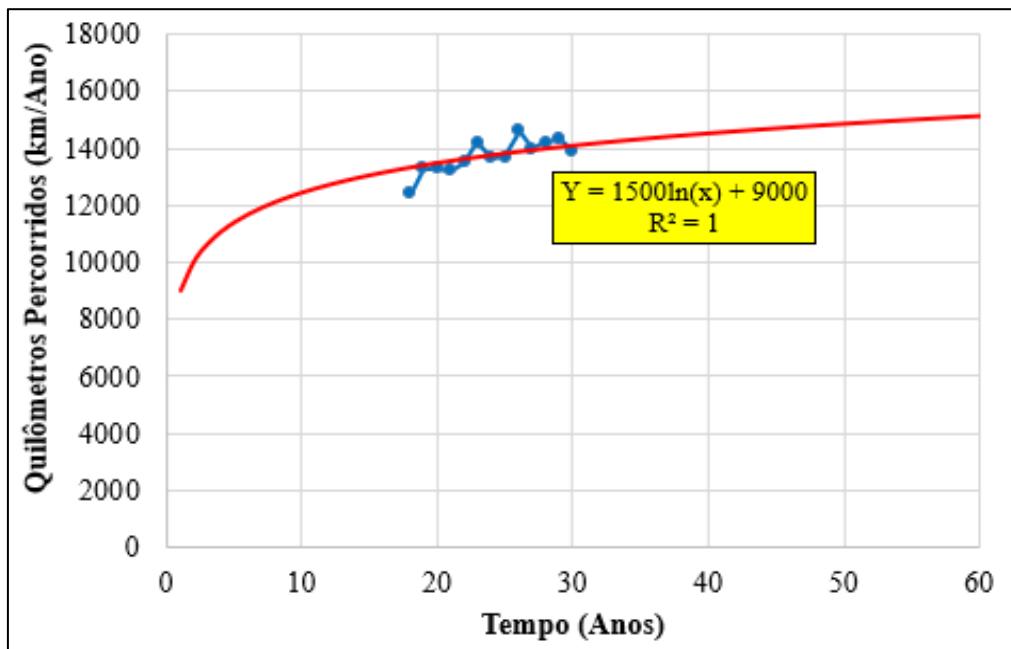


Figura 4.3: Quilometragem Percorrida em Função dos Anos
Frota de Veículos de Brasília-DF

Na Figura 4.3 como resultado, obteve-se para a cidade de Brasília a tendência de quilômetro médio de viagem de 15.000 km/ano e com projeção de que continue aumentando devido à expansão da cidade e ao aumento do PIB per capita, que promove o aumento do uso de automóveis leves. Ressalta-se que os símbolos circulares na cor azul na Figura representam a média dos quilômetros percorridos por veículo e por ano para o Distrito Federal, informações coletadas de 1.389 veículos com menos de 20 anos de idade.

Ademais, em algumas cidades brasileiras, os dados dos quilômetros anuais são disponibilizados pelos DETRAN locais, devido as inspeções veiculares, como é o caso da cidade de São Paulo. Para as cidades que não tenham tais dados, propõe-se a curva de quilômetros percorridos em função da idade do veículo, conforme já utilizado no Relatório de Emissões de Veículos do Estado de São Paulo 2019 (CETESB, 2020).

O impacto da evolução tecnológica dos veículos sobre o fator de emissão de CO₂ também foi

considerado. Para isso, o modelo proposto utilizou os conjuntos de dados disponibilizados até o ano de 2020 pela CETESB (2024) e pelo INMETRO (2024). Na Figura 4.4 é apresentada a função histórica decrescente dos fatores de emissão de CO₂ utilizando como base o combustível gasolina (E27) - mistura de gasolina com 27% de etanol.

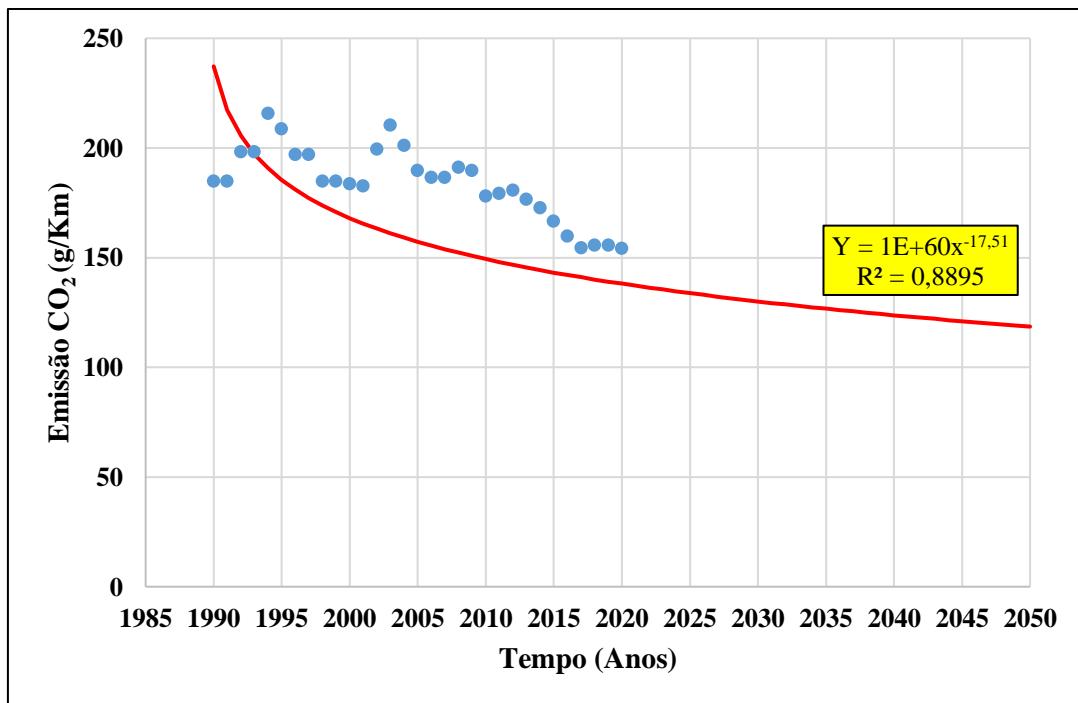


Figura 4.4: Fatores Históricos de Emissão CO₂

Na Figura 4.4 a linha vermelha indica que os fatores de emissão de CO₂ estão decrescendo ao decorrer das décadas. Essa redução está diretamente associada ao avanço contínuo das tecnologias veiculares implementadas no país. A análise dessa tendência do fator de emissão médio tornou-se essencial para a projeção das emissões futuras de CO₂ da frota veicular. No modelo proposto, foi incorporada uma função de tendência que representa a evolução dos fatores de emissão, possibilitando a simulação de cenários futuros com base na progressiva adoção de tecnologias na frota nacional.

Após a análise detalhada dos fatores anteriormente discutidos, procedeu-se ao levantamento minucioso dos dados necessários para a elaboração do Inventário da Frota de Veículos do Distrito Federal referente ao ano base de 2022 até o ano de 2050. O ano base de 2022 foi escolhido por ser o ano já sem influência dos impactos da pandemia na quantidade de veículos em circulação. A partir desse conjunto de informações, foram estimadas as emissões anuais de CO₂, incluindo as fases do ciclo de vida do recurso energético, determinando a massa total de

combustível consumido e a energia efetivamente utilizada pelos veículos ao longo do período analisado.

Os cálculos indicaram que, sob as condições vigentes e sem a aplicação de medidas de mitigação, a frota veicular do Distrito Federal obteve, em 2022, uma emissão anual de 5,38 milhões de toneladas de CO₂, consumiu aproximadamente 1.986 milhões de litros de combustível e demandou um total de 80.074,65 GJ de energia. Esses valores fornecem uma base técnica sólida e abrangente para o diagnóstico ambiental, servindo como linha de base essencial para projeções futuras e avaliação da eficácia de políticas públicas voltadas à eficiência energética e redução de emissões de CO₂. A título de informação atualizada para o ano de realização do presente trabalho, os valores calculados pelo inventário, para o ano de 2024, somam 5,99 milhões de toneladas de CO₂ e consumo de cerca de 2.206 milhões de litros de combustível.

4.3 PROJEÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E EMISSÕES DE CO₂

Para projetar o total de energia elétrica a ser gerada e as emissões de CO₂ para as próximas décadas, foi essencial estimar a futura demanda de energia elétrica. Nesse contexto, a Figura 4.5 exibe a Projeção do Consumo Elétrico Brasileiro até o ano de 2050.

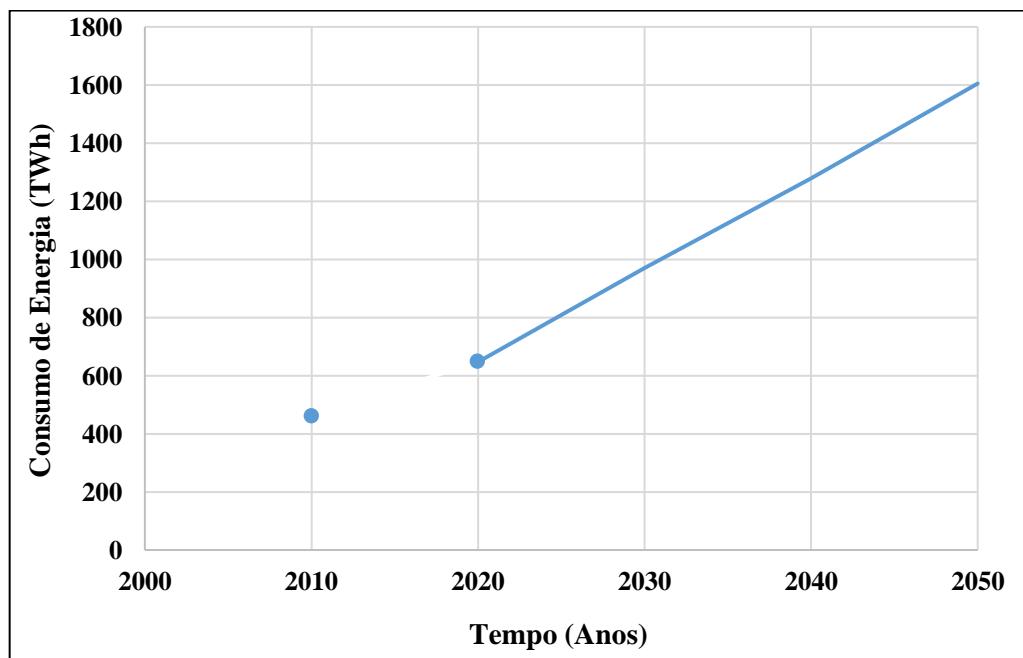


Figura 4.5: Projeção do Consumo Elétrico Brasileiro
Fonte: O Autor com Base nos dados de EPE (2022)

A Figura 4.5 projeta que, em 2050, o consumo anual total de energia elétrica no Brasil atingirá

1.605 TWh, que foi possível determinar a partir das informações reais representadas pelos círculos de cor azul. Esse aumento reflete a crescente demanda energética impulsionada por fatores como o crescimento populacional, a expansão econômica e, conforme discutido neste estudo, a intensificação da eletrificação no setor de transporte.

Diante desse cenário, para estimar as emissões de CO₂ na matriz elétrica, foi fundamental compreender as características que a matriz elétrica brasileira deverá apresentar até 2050. Nesse sentido, a Figura 4.6 ilustra a Projeção da Participação na Matriz Elétrica Brasileira.



Figura 4.6: Projeção da Participação da Matriz Elétrica Brasileira
Fonte: O Autor com Base nos dados de EPE (2022)

A Figura 4.6 indica que a matriz elétrica brasileira continuará majoritariamente sustentada por fontes renováveis ao longo dos próximos anos. Contudo, a partir de 2038, observa-se uma tendência de crescimento na participação das fontes não renováveis. Projeções para 2049 apontam que a composição da matriz será de aproximadamente 66% de fontes renováveis, 30% de fontes não renováveis e 4% de energia nuclear. Essa mudança gradual na estrutura da matriz energética tem implicações ambientais relevantes, especialmente no que se refere às emissões de CO₂.

Neste contexto, a Figura 4.7 exibe a série histórica do consumo de energia elétrica e emissão de CO₂ para o período de 2010-2024, evidenciando que o aumento da participação das Fontes Não Renováveis na Matriz Elétrica Brasileira está fortemente associado ao crescimento das

emissões de CO₂, reforçando a correlação direta entre consumo de energia devido a fontes não renováveis e emissão de CO₂.

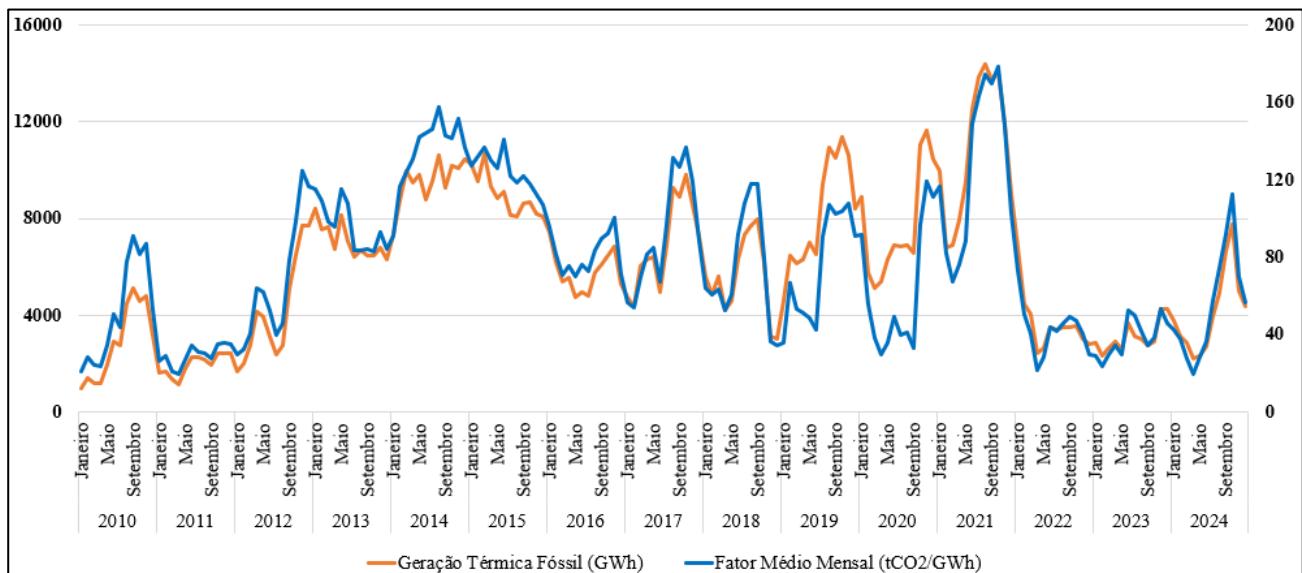


Figura 4.7: Consumo de Eletricidade e Emissões de CO₂ na Matriz Elétrica Brasileira
Fontes Não Renováveis

Fonte: O Autor com Base nos dados de MCTI (2025) e ONS (2025)

De modo a estimar o fator de emissão de CO₂ devido a geração de energia elétrica que será consumida pela frota de veículos BEV até o ano de 2050, foi determinada a correlação das emissões de CO₂ com a geração de energia elétrica por fontes não-renováveis, a Figura 4.8 expõe os resultados da correlação.

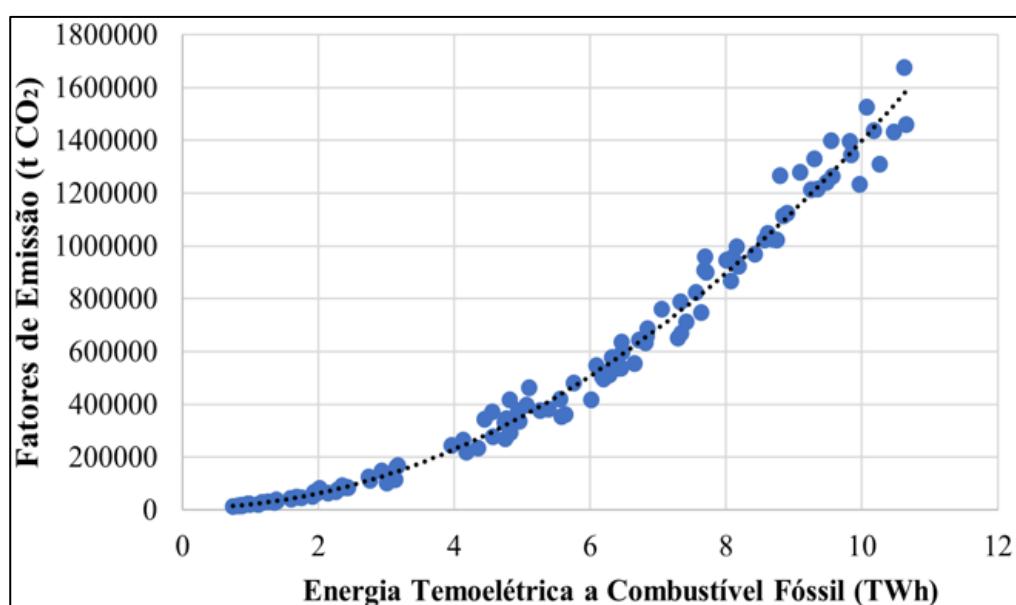


Figura 4.8: Fator de Emissão CO₂ em Função da Geração de Energia por Térmoeletricidade a Combustível Fóssil

Fonte: O Autor com Base nos dados de EPE (2022)

A modelagem do fator de emissão da matriz elétrica para os cenários futuros, leva em conta os resultados apresentados nas Figuras mostradas acima. Ou seja, o crescimento do consumo de energia elétrica no Brasil, o percentual de fontes não renováveis na participação da geração, e a relação entre consumo das não-renováveis em função do aumento do fator de emissão de CO₂. Assim, foi possível obter a projeção para os próximos anos das emissões de CO₂ por kWh consumido.

4.4 MODELAGEM DOS CENÁRIOS

Para realizar a Modelagem dos Cenários, inicialmente, foi necessário utilizar a ferramenta computacional *Microsoft Excel*, integrada à linguagem de programação *Visual Basic for Applications* (VBA), com o objetivo de garantir maior eficiência, precisão e reproduzibilidade na simulação de cenários e nos processos de análise e modelagem dos dados contemplados neste estudo.

Mediante ao exposto, a planilha foi alimentada com as informações previamente obtidas das séries históricas e suas projeções para o crescimento populacional e o Produto Interno Bruto (PIB), conforme apresentado na Figura 4.9. Os símbolos (círculos) da Figura representam as projeções de crescimento da população e PIB indicados pelo IBGE, já as linhas representam uma função de crescimento que pode variar de acordo com as simulações à vontade do usuário do modelo. As setas dispostas na Figura permitem ao usuário do modelo variar a projeção da curva de crescimento populacional e a curva de crescimento do PIB, variando assim o PIB per capita.

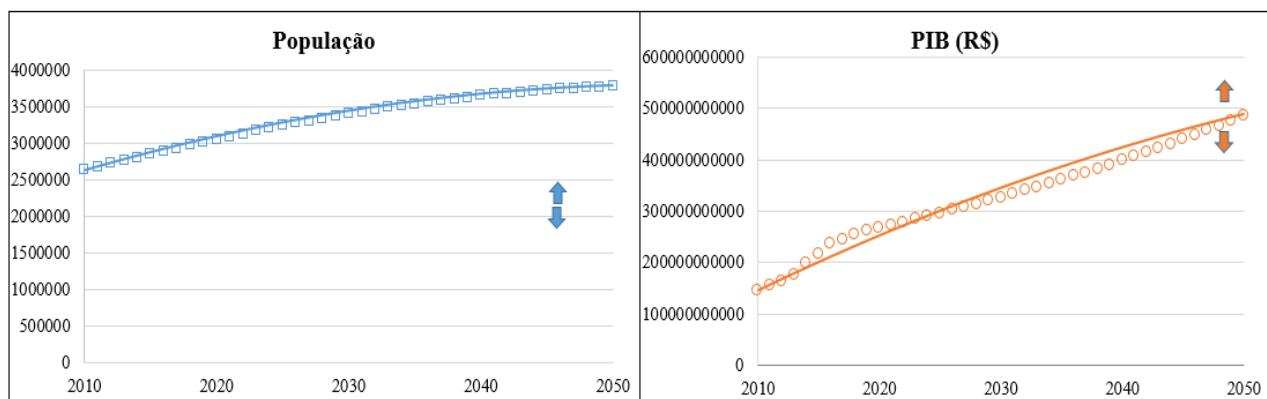


Figura 4.9: Projeções para o Crescimento Populacional e PIB

Com base nesses dados, foi possível estimar o crescimento da frota de veículos no Distrito

Federal por meio da Equação de *Gompertz*, ferramenta estatística apropriada para modelagem de crescimento assimétrico. A equação também foi aplicada para projetar o quantitativo da frota de veículos para os cenários propostos.

Na sequência, os dados foram organizados para determinar a correlação da idade dos veículos (anos desde a fabricação) em função da quantidade de veículos circulantes por faixa de idade da frota, bem como, da correlação da intensidade de uso (km/ano) em função da idade dos veículos. Também foi realizada a caracterização dos fatores de emissão com base na evolução tecnológica dos veículos, conforme as fases do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (Proconve), permitindo estabelecer correlações entre o consumo energético e as emissões de CO₂. Complementarmente, foram determinados os fatores de emissão e os padrões de consumo específicos para veículos MCI e HEV, ampliando a análise comparativa entre diferentes tecnologias veiculares. Esse procedimento de idealizar funções de correlação foi necessário para projetar uma função densidade probabilidade da idade da frota para anos futuros, bem como, projetar o consumo de combustível e fator de emissão dos veículos no futuro.

A Figura 4.10 apresenta uma visão geral dos resultados na planilha desenvolvida no *Excel*, que serviu como base para a realização das projeções e simulações conduzidas neste estudo.

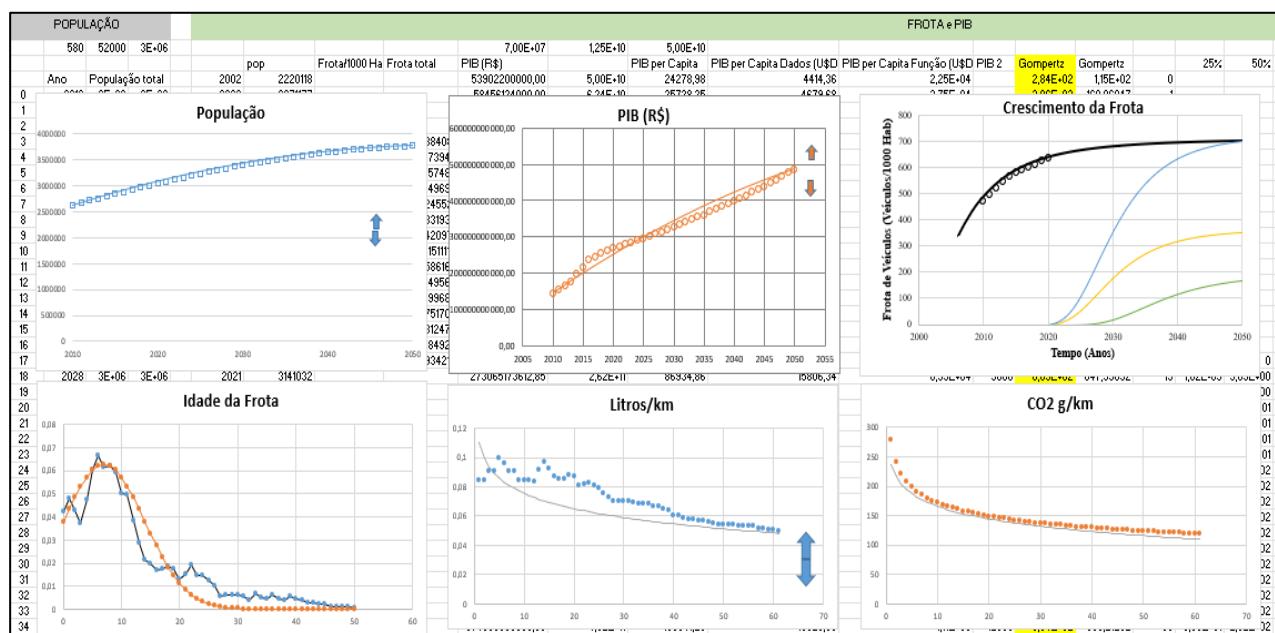


Figura 4.10: Visão da Planilha em Excel Utilizada para Tabular os Dados

Nesse contexto, com o intuito de atender ao objetivo central deste estudo, e quantificar o

consumo de combustível, o uso de energia elétrica e as emissões de CO₂ nas próximas décadas, a partir de todas as informações obtidas foi necessário desenvolver um submodelo específico para estimar o impacto da inserção de veículos elétricos na frota veicular ao longo dos anos.

Esse submodelo, representado na Figura 4.11, permitiu avaliar os efeitos da eletrificação progressiva da frota veicular para os próximos anos, a partir dos cenários sugeridos.

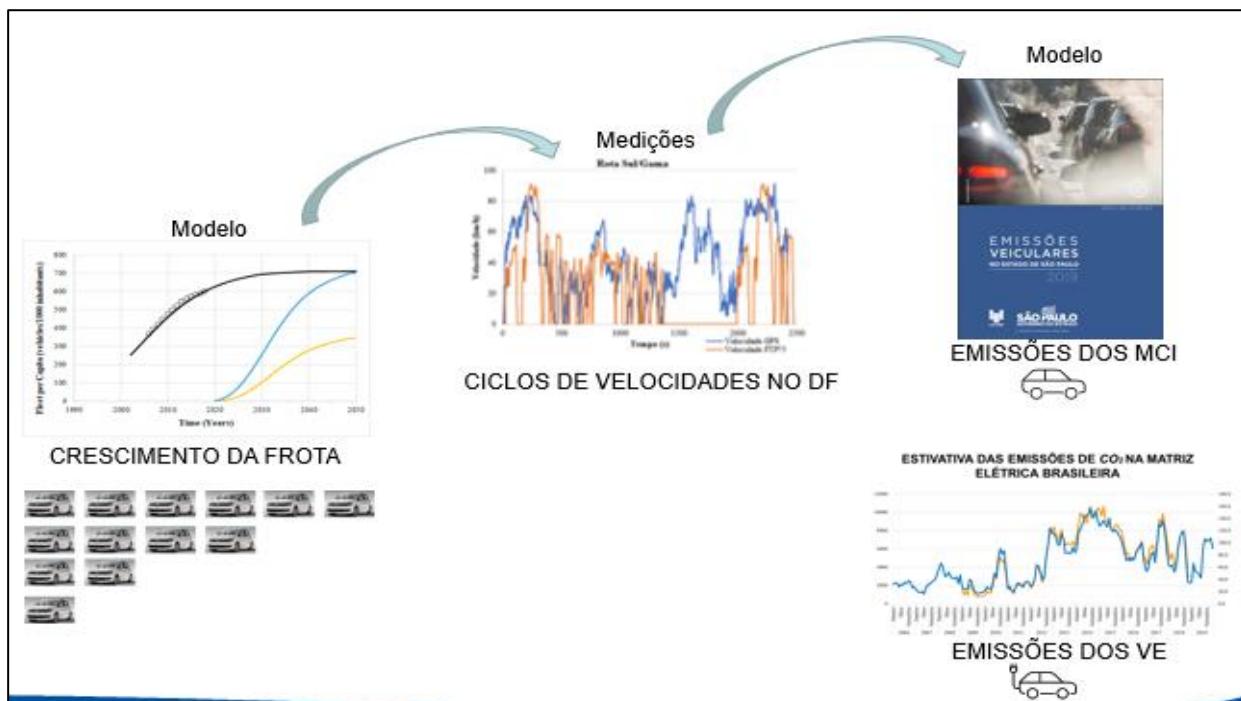


Figura 4.11: Sub-modelo Utilizado para Calcular o Impacto da Frota de Veículos Elétricos

O desenvolvimento deste sub-modelo, fundamentou-se, inicialmente, no crescimento da Frota de veículos no Distrito Federal a partir da Equação de *Gompertz*. Em seguida, foram analisados os ciclos de velocidade obtidos por meio de medições nas cinco rotas previamente definidas pela cidade. A etapa posterior consistiu na estimativa das emissões de CO₂ e do consumo de combustíveis, com base na metodologia estabelecida pelo Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores, publicado pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) em 2012. Por fim, realizou-se uma correlação entre os dados históricos de geração de energia elétrica e as emissões de CO₂, o que possibilitou a quantificação das emissões atribuíveis aos veículos elétricos (VE's) no contexto do Distrito Federal.

Após esse breve detalhamento da forma como foi conduzido o estudo, foi possível simular os cenários propostos. A modelagem foi desenvolvida para prever a frota futura de veículos,

utilizando séries temporais do PIB e da população, com o objetivo de estimar o cenário para o ano de 2050. Posteriormente, foram analisadas as correlações entre a posse de veículos e o PIB, permitindo assim a projeção da frota futura de veículos na cidade de Brasília.

Inicialmente obteve-se correlação do PIB per capita versus frota de veículos por 1000 habitantes, determinada através da Equação 04. Na Figura 4.12 é exibida a função para crescimento da frota, plotada por ano.

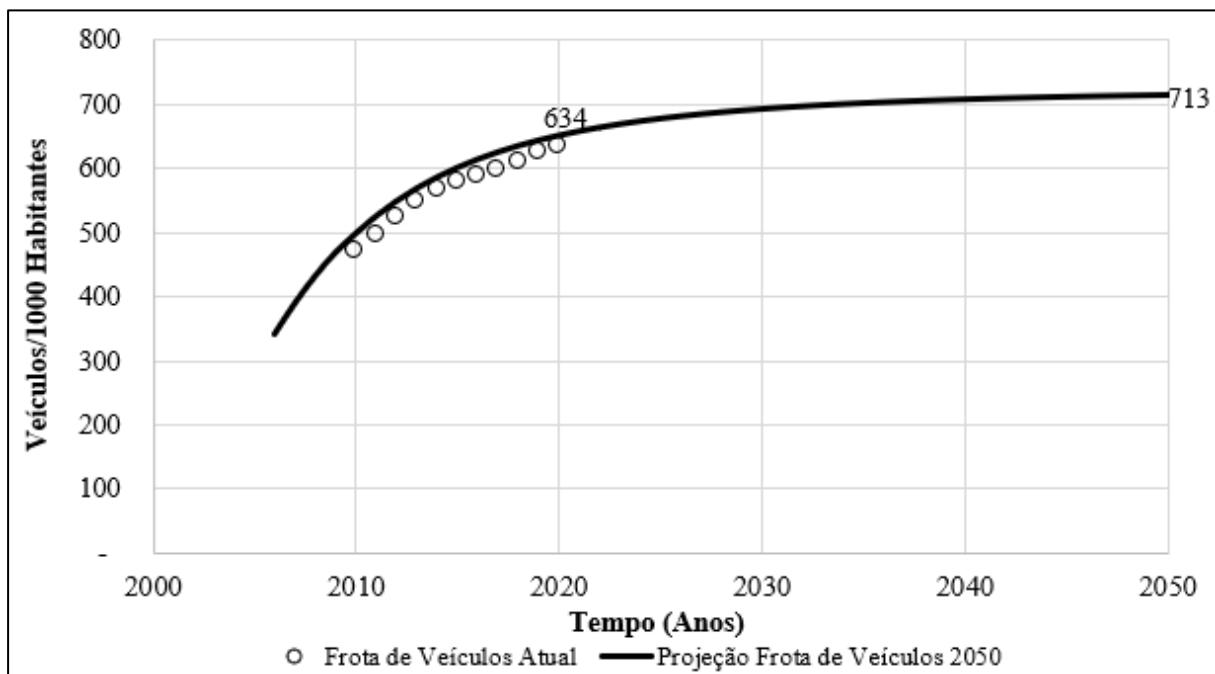


Figura 4.12: Função *Gompertz* do Crescimento da Frota de Veículos até 2050

Conforme ilustrado na Figura, os símbolos circulares representam o crescimento da frota de veículos em Brasília no período de 2010 a 2020. A função de crescimento prevê que a Capital Federal no ano de 2050 tenha 713 veículos para cada 1.000 habitantes.

Posteriormente, foram assumidos no equacionamento os seis cenários: **MENOS OTIMISTA** (com veículos MCI utilizando apenas como combustível a gasolina (E27) em 2050), um **PRÉ-OTIMISTA** (os veículos MCI sendo substituídos parcialmente 50% por BEV's e 50% por veículos HEV's Flex, utilizando como combustível gasolina (E27%) ou etanol), um **OTIMISTA** (os veículos MCI sendo substituídos parcialmente 50% por BEV's, 25% por veículos HEV's Flex utilizando gasolina (E27) e 25% por veículos HEV's Flex utilizando etanol), um **EXCESSIVAMENTE OTIMISTA** (os veículos MCI sendo substituídos totalmente por BEV's em 2050), um **REFERÊNCIA** (os veículos MCI sendo reduzidos a 28% utilizando gasolina (E27), sendo substituída parcialmente 11% por BEV's e 61% por veículos

HEV's Flex, utilizando como combustível apenas etanol) e um **ALTERNATIVO** (os veículos MCI utilizando gasolina (E27) sendo substituída totalmente por 15% por BEV's e 85% por veículos HEV's Flex, utilizando como combustível apenas etanol).

Na Figura 4.13 é apresentado os resultados das Funções *Gompertz* para a projeção do Crescimento da Frota de Veículos até o ano de 2050 para a cidade de Brasília, levando em conta os cenários propostos:

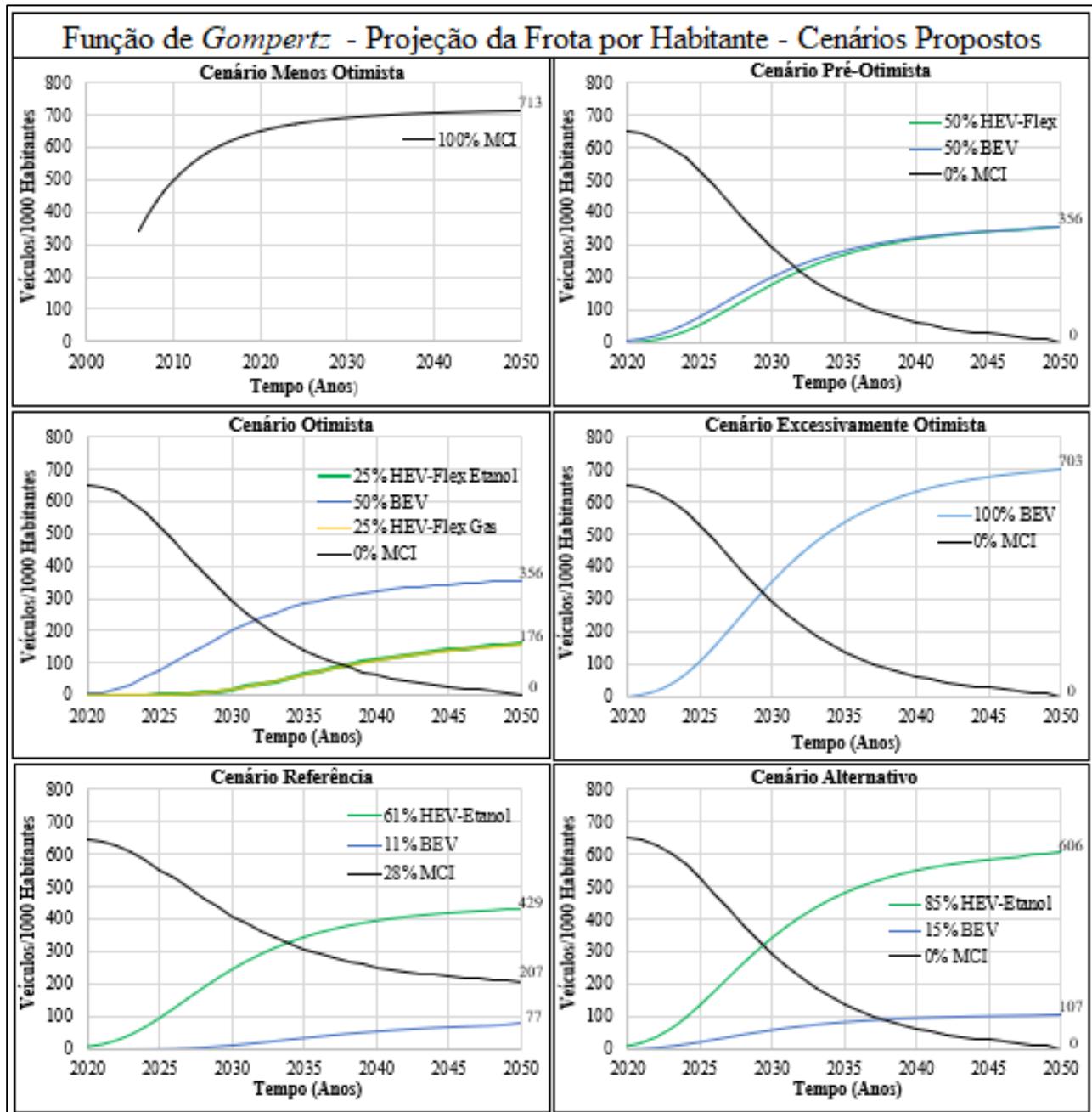


Figura 4.13: Função *Gompertz* do Crescimento - Frota de Veículos até 2050

A aplicação da Função de *Gompertz* na correlação da posse de veículos para os cenários

propostos, projetam os seguintes resultados:

- MENOS OTIMISTA**: A linha preta projeta para o ano de 2050 uma frota total de 713 veículos por 1.000 habitantes, com 100% de veículos MCI movidos a gasolina (E27).
- PRÉ-OTIMISTA**: A projeção da linha azul para o ano de 2050 indica que 356 veículos por 1.000 habitantes utilizarão tecnologia BEV, enquanto outros 356 veículos por 1.000 habitantes optarão por veículos HEV Flex movidos a gasolina (E27) ou etanol. Nesse cenário, a frota de veículos MCI será completamente substituída.
- OTIMISTA**: A projeção da linha amarela para o ano de 2050 indica que 176 veículos por 1.000 habitantes optarão por veículos HEV Flex movidos a gasolina (E27) e a linha verde indica que 176 veículos por 1.000 habitantes optarão por veículos HEV Flex movidos a etanol – na Figura 4.14 essas duas linhas se sobrepõem, surgindo uma nova linha da cor verde claro. Nesse cenário, a frota de veículos BEV é de 352 veículos por 1.000 habitantes e a frota de veículos MCI será completamente substituída.
- EXCESSIVAMENTE OTIMISTA**: A linha azul projeta para o ano de 2050 uma frota total de 703 veículos por 1.000 habitantes, com 100% de veículos BEV. Nesse cenário, a frota de veículos MCI será completamente substituída.
- REFERÊNCIA**: A projeção da linha azul para o ano de 2050 indica que 77 veículos por 1.000 habitantes utilizarão tecnologia BEV, enquanto da linha verde determina que 429 veículos por 1.000 habitantes optarão por veículos HEV Flex movidos a etanol. Nesse cenário, a frota de veículos MCI será reduzida a 207 veículos por 1.000 habitantes.
- **ALTERNATIVO**: A projeção da linha verde para o ano de 2050 indica que 606 veículos por 1.000 habitantes utilizarão HEV Flex movidos a etanol, enquanto a linha azul determina que 107 veículos por 1.000 habitantes optarão por veículos BEV. Nesse cenário, a frota de veículos MCI será completamente substituída.

4.5 ESTIMATIVAS DE EMISSÕES DE CO₂ DA FROTA VEÍCULAR PARA AS PRÓXIMAS DÉCADAS

Por fim, a execução integral das etapas delineadas no modelo metodológico proposto na Figura 3.10 permitiu a estimativa das emissões futuras de CO₂ provenientes da frota veicular da cidade de Brasília, ao longo das próximas décadas. A primeira simulação realizada corresponde ao CENÁRIO MENOS OTIMISTA, no qual se considera a permanência exclusiva de veículos com motores de combustão interna (MCI) movidos a gasolina (E27) até o ano de 2050. Os

resultados dessa projeção estão apresentados na Figura 4.14, evidenciando uma tendência ascendente nas emissões anuais de CO₂ ao longo do período analisado.

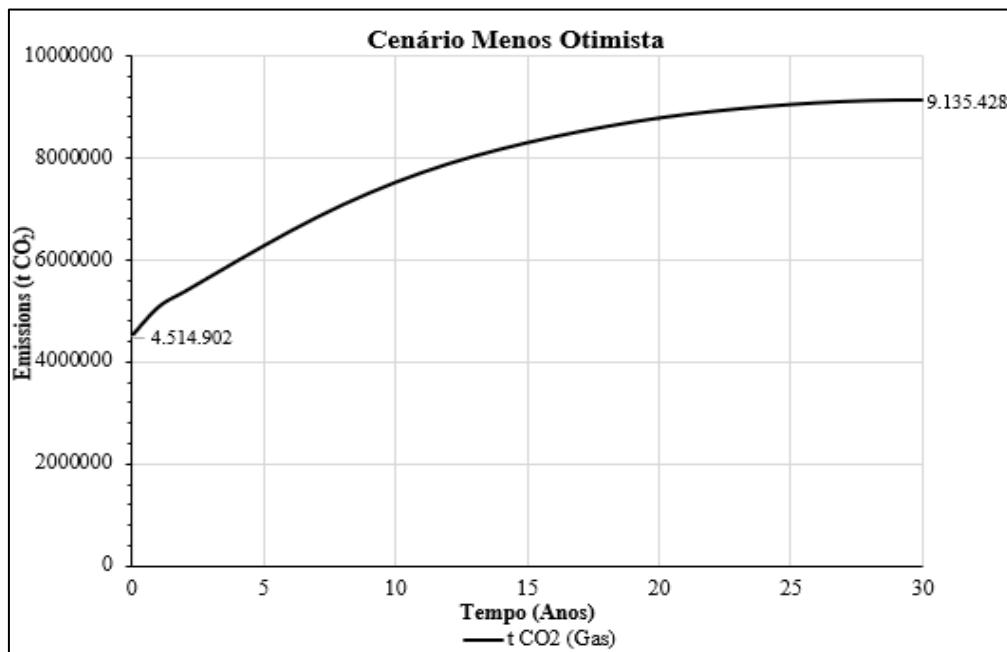


Figura 4.14: Cenário Menos Otimista - Frota de Veículos até 2050

Na Figura 4.14, o eixo vertical representa as emissões CO₂, expressas em toneladas, enquanto o eixo horizontal corresponde ao intervalo temporal em anos. A linha da cor preta ilustra a projeção das emissões de CO₂ estimadas, considerando o Cenário Menos Otimista. Esse cenário parte da suposição de que toda a frota veicular manterá motores de combustão interna (MCI) movidos exclusivamente a gasolina (E27) até o ano de 2050. Sob tais premissas, as emissões anuais partem de um valor inicial de 4.514.902 toneladas de CO₂, alcançando um total de 9.135.428 toneladas ao fim de três décadas — o que representa praticamente o dobro das emissões registradas no início do período projetado.

Esse comportamento tende a confirmar projeções anteriores sobre a persistência do uso de combustíveis fósseis e sua relação direta com o agravamento das emissões atmosféricas (IEA, 2023). Estudos indicam que, na ausência de políticas públicas efetivas para a transição energética no setor de transporte, o volume de emissões continuará a crescer de forma acelerada (GHG Protocol, 2022). Além disso, a permanência dos motores MCI como tecnologia predominante pode comprometer metas de mitigação previstas em acordos internacionais como o Acordo de Paris (UNFCCC, 2015).

Além disso, com o intuito de comparar as emissões CO₂ associadas a diferentes tecnologias

veiculares ao longo das próximas três décadas, partindo da base de modelagem estabelecida no Cenário Menos Otimista, foram realizadas simulações complementares por meio do modelo proposto. Essas simulações incorporaram, de forma progressiva, BEV, HEV abastecidos com gasolina e os veículos HEV movidos a etanol. Para fins de consistência metodológica, foi adotada a premissa de que essas tecnologias substituirão, integralmente, o quantitativo de veículos MCI ao final do período de 30 anos. Os resultados são referentes aos ciclos de vida do poço a roda, as projeções comparativas serão exibidas na Figura 4.15, possibilitando uma avaliação mais abrangente dos impactos ambientais associados a cada configuração tecnológica da frota.

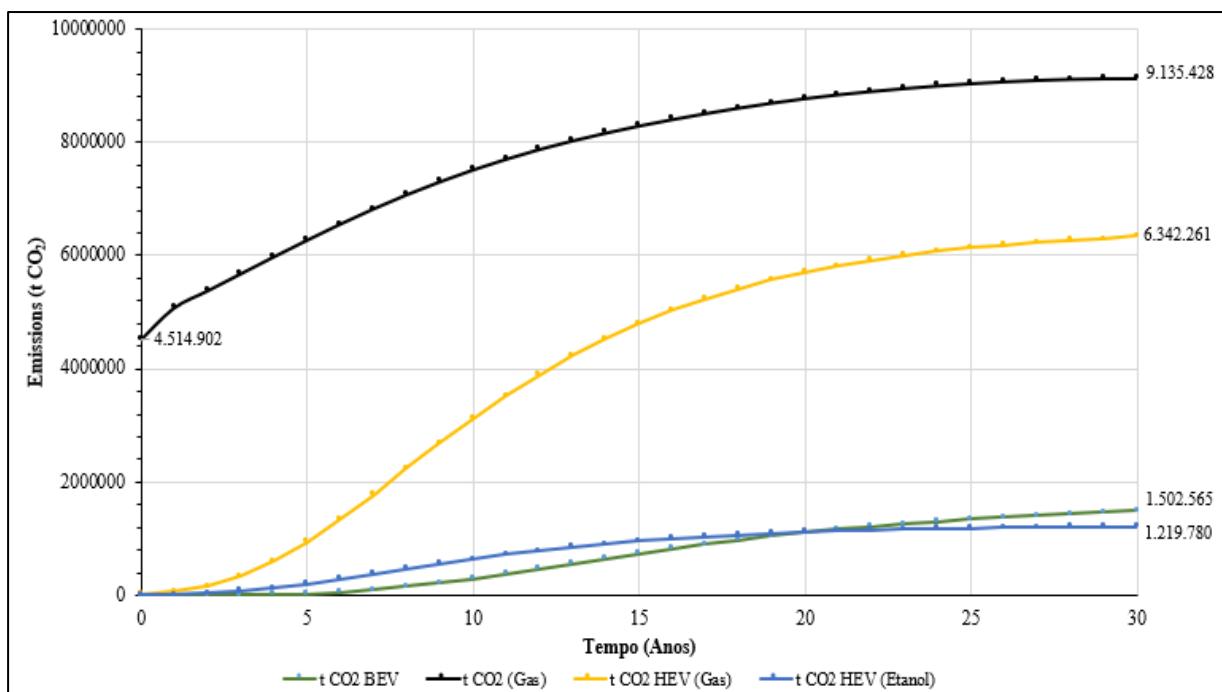


Figura 4.15: Projeções com Diversas Tecnologias - Frota de Veículos até 2050

De acordo com a Figura 4.15, o eixo vertical representa as emissões CO₂, expressas em toneladas, enquanto o eixo horizontal corresponde ao intervalo temporal em anos. A linha da cor preta ilustra a projeção das emissões de CO₂ estimadas, descrevendo o Cenário Menos Otimista. A linha amarela representa as emissões dos veículos HEV movidos a gasolina (E27) e emite 30% a menos do que o Cenário Menos Otimista. A linha verde mostra as emissões associadas ao consumo de energia elétrica pelos BEV e emite 84% a menos do que o Cenário Menos Otimista. A linha azul descreve as emissões considerando os veículos HEV movidos a etanol e emite 86% a menos do que o Cenário Menos Otimista.

Como resultado, observa-se que as tecnologias adicionadas a este cenário demonstram um

potencial significativo de mitigação das emissões CO₂, provenientes da frota de veículos leves de passageiros. As simulações indicam que, caso a substituição dos MCI ocorra majoritariamente por veículos BEV ou HEV abastecidos com etanol, as emissões de CO₂ poderão ser reduzidas em até seis vezes em comparação a continuidade do uso exclusivo de MCI a gasolina (E27).

Por conseguinte, a segunda simulação realizada corresponde ao CENÁRIO PRÉ-OTIMISTA, que considera a substituição da frota de veículos MCI movidos a gasolina até o ano de 2050. Nesse cenário, assume-se que 50% desses veículos serão substituídos por BEV e os outros 50% por HEV Flex, capazes de operar com gasolina (E27) ou etanol. Os resultados dessa projeção são exibidos na Figura 4.16, revelando uma tendência de queda nas emissões anuais de CO₂ ao longo do período analisado.

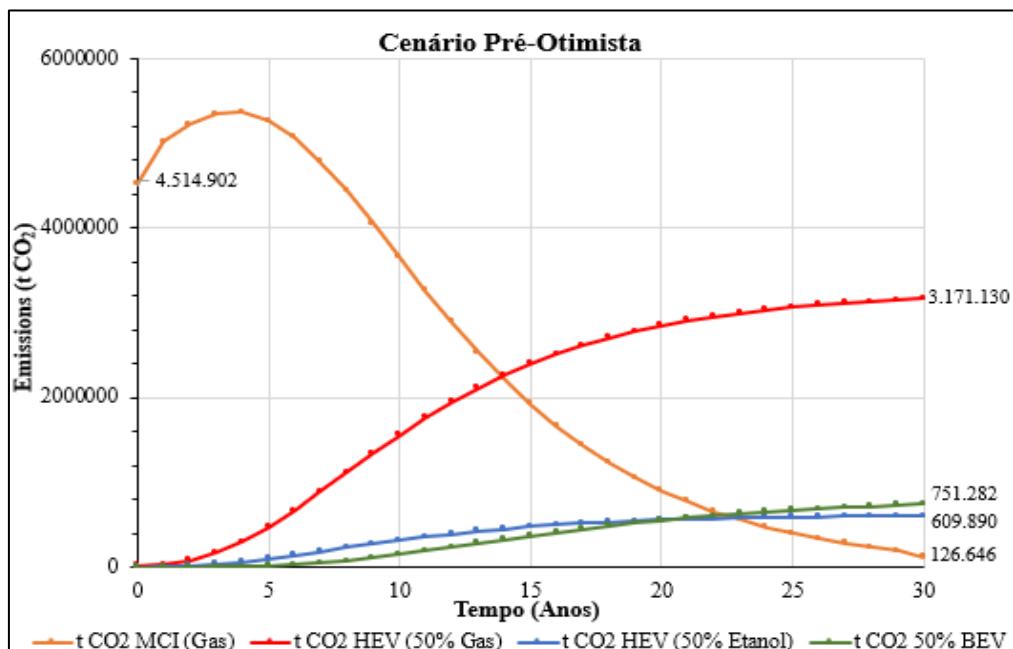


Figura 4.16: Cenário Pré-Otimista - Frota de Veículos até 2050

Na Figura 4.16, o eixo vertical representa as emissões de CO₂, expressas em toneladas, enquanto o eixo horizontal corresponde ao intervalo temporal, em anos. A linha de cor laranja ilustra a projeção da frota composta exclusivamente por veículos com MCI movidos a gasolina (E27). As tecnologias HEV aparecem em dois contextos distintos: a linha vermelha representa os HEV utilizando gasolina como combustível, enquanto a linha azul retrata os HEV operando com etanol. Por fim, a linha de cor verde indica os veículos BEV, assumindo a substituição de 50% da frota originalmente MCI.

Os resultados evidenciam que a diversificação tecnológica pode exercer um papel fundamental na mitigação das emissões de CO₂. A simulação combinando 50% de veículos BEV com 50% de HEV abastecidos com gasolina resultou em emissões totais de 4.049.058 toneladas de CO₂, o que representa uma redução de aproximadamente 50% em relação ao total projetado no Cenário Menos Otimista. Ainda mais expressivo, o cenário que combina 50% de BEV com 50% de HEV movidos a etanol apresenta uma emissão total de 1.487.818 toneladas de CO₂, uma redução de cerca de seis vezes em comparação ao Cenário Menos Otimista. Esses resultados corroboram estudos internacionais que apontam a eletromobilidade associada ao uso de biocombustíveis como uma estratégia eficaz e adaptável para países em desenvolvimento, como o Brasil (IEA, 2023). A incorporação de múltiplas tecnologias também proporciona flexibilidade na transição energética, considerando aspectos como infraestrutura, custo e disponibilidade de recursos naturais (EMBRAPA, 2021; ICCT, 2022).

Na terceira simulação realizada, que corresponde ao CENÁRIO OTIMISTA, considera a substituição da frota de veículos MCI movidos a gasolina (E27) até o ano de 2050. Nesse cenário, assume-se que 50% desses veículos serão substituídos por BEV e os outros 50% por HEV Flex, 25% utilizando apenas o combustível gasolina e 25% utilizando apenas como combustível o etanol. Os resultados dessa projeção são apresentados na Figura 4.17, que também revela uma tendência de queda nas emissões anuais de CO₂ ao longo do período analisado.

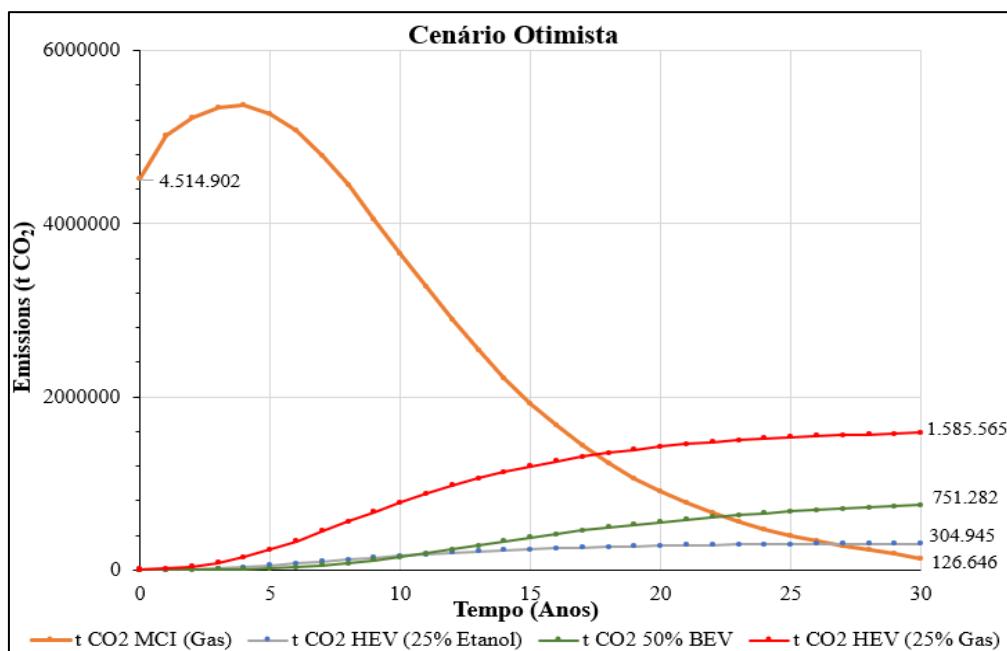


Figura 4.17: Cenário Otimista - Frota de Veículos até 2050

Na Figura 4.17, o eixo vertical representa as emissões de CO₂, expressas em toneladas, enquanto o eixo horizontal corresponde ao intervalo temporal, em anos. A linha de cor laranja ilustra a projeção da frota composta exclusivamente por veículos com MCI movidos a gasolina. As tecnologias HEV aparecem em dois contextos distintos: a linha vermelha representa os HEV utilizando como combustível gasolina (E27), enquanto a linha azul retrata os HEV operando com etanol. Por fim, a linha de cor verde indica os veículos BEV.

Os resultados evidenciam que a diversificação tecnológica pode exercer um papel fundamental na mitigação das emissões de CO₂. A simulação combinando 50% de veículos BEV com 25% de HEV abastecidos com gasolina (E27) e 25% de HEV abastecidos com etanol resultando em emissões totais de 2.768.438 toneladas de CO₂, o que representa uma redução de aproximadamente 3 vezes em relação ao total projetado no Cenário Menos Otimista. Tais achados reforçam a importância da transição tecnológica combinada ao uso estratégico de combustíveis alternativos como ferramentas eficazes de descarbonização do setor de transportes (IEA, 2023).

Ademais, a quarta simulação corresponde ao CENÁRIO EXCESSIVAMENTE OTIMISTA, que considera a substituição da frota de veículos MCI movidos a gasolina (E27) até o ano de 2050 por veículos BEV. Os resultados dessa simulação são apresentados na Figura 4.18.

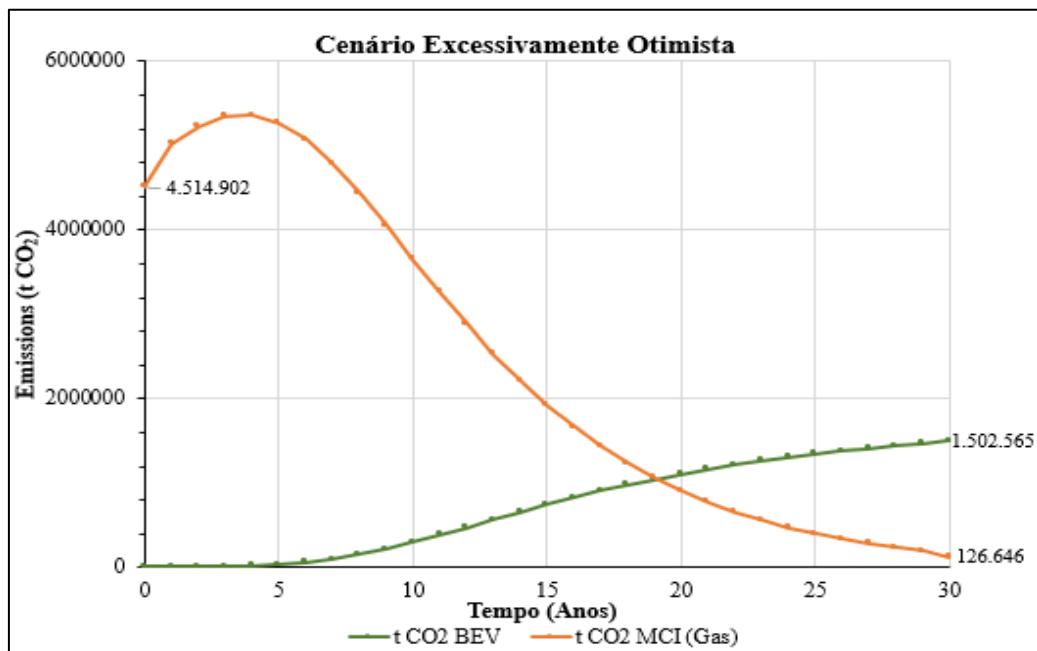


Figura 4.18: Cenário Excessivamente Otimista - Frota de Veículos até 2050

Os resultados apresentados na Figura 4.18 indicam, no eixo vertical, as emissões de CO₂ em

toneladas, enquanto o eixo horizontal representa o intervalo temporal, em anos. A linha laranja corresponde à projeção da frota composta exclusivamente por veículos com motor MCI movidos a gasolina (E27). Já a linha verde refere-se aos veículos com tecnologia BEV. Este cenário evidencia uma redução expressiva nas emissões de CO₂, da ordem de aproximadamente seis vezes em relação ao total projetado no Cenário Menos Otimista. Tal resultado ressalta a urgência de adoção, por parte do país, de tecnologias alternativas e sustentáveis, visando mitigar os impactos ambientais decorrentes do setor de transportes e promover a transição para uma matriz energética menos poluente.

Nesta conjuntura, a quinta simulação realizada corresponde ao CENÁRIO REFERÊNCIA, que considera a redução para 28% da frota de veículos MCI movidos a gasolina (E27) até o ano de 2050, sendo substituída parcialmente por 11% de BEV's e 61% por veículos HEV's Flex, utilizando como combustível apenas etanol. A Figura 4.19 apresenta os resultados dessa projeção, com uma tendência de queda nas emissões anuais de CO₂ ao longo do período analisado.

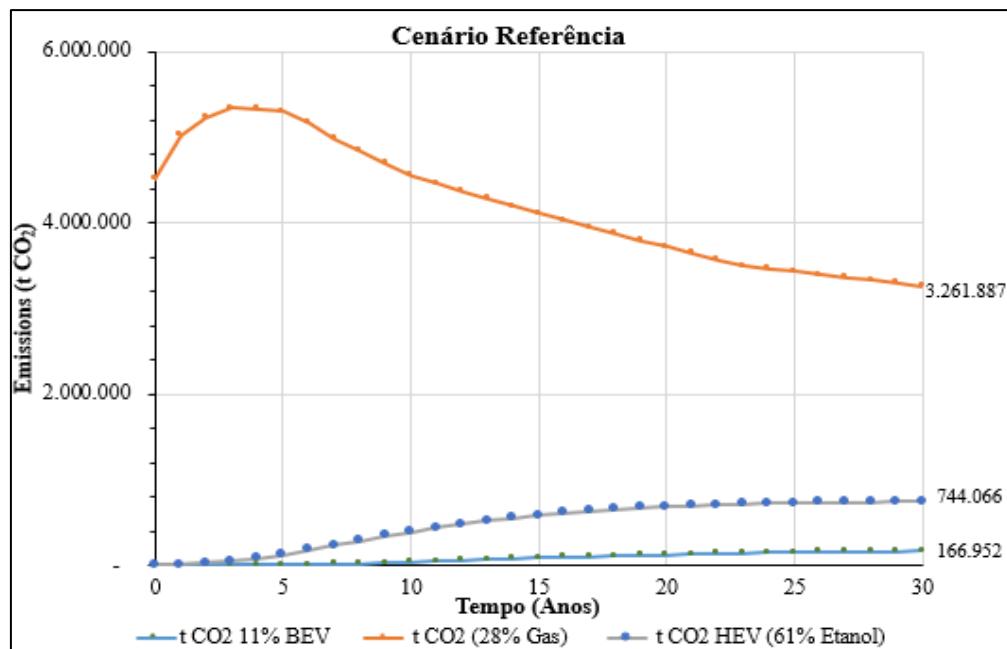


Figura 4.19: Cenário Referência - Frota de Veículos até 2050

Na figura apresentada, o eixo vertical representa as emissões de CO₂, expressas em toneladas, enquanto o eixo horizontal indica o intervalo temporal, medido em anos. A linha laranja corresponde à projeção da frota composta exclusivamente por veículos MCI movidos a gasolina (E27). A linha verde representa os BEV, ao passo que a linha azul se refere aos HEV abastecidos com etanol. Nesse cenário, as emissões de CO₂ ao final do período analisado atingem 4.172.905

toneladas de CO₂ por ano, valor que representa uma redução de 55% em relação ao total estimado no Cenário Menos Otimista.

Por conseguinte, a sexta simulação realizada corresponde ao CENÁRIO ALTERNATIVO, que considera a substituição da frota de veículos MCI movidos a gasolina (E27) até o ano de 2050. Nesse cenário, assume-se que 15% desses veículos serão substituídos por BEV e os outros 85% por HEV utilizando como combustível apenas etanol. Os resultados dessa projeção são exibidos na Figura 4.20.

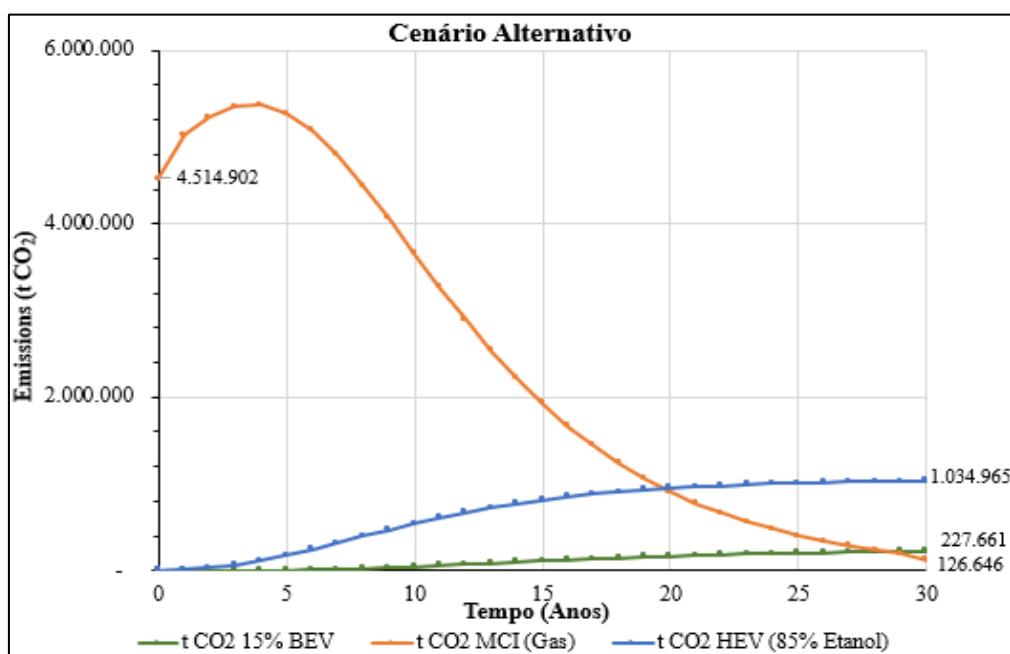


Figura 4.20: Cenário Alternativo - Frota de Veículos até 2050

Na Figura 4.20, o eixo vertical representa as emissões de CO₂, expressas em toneladas, enquanto o eixo horizontal corresponde ao intervalo temporal, em anos. A linha de cor laranja ilustra a projeção da frota composta exclusivamente por veículos com MCI movidos a gasolina (E27). A linha verde representa os BEV, ao passo que a linha azul se refere aos HEV abastecidos com etanol. Para esse cenário, as emissões de CO₂ ao final do período analisado atingem 1.389.272 toneladas de CO₂ por ano, valor que representa uma redução de 85% em relação ao total estimado no Cenário Menos Otimista.

Na Tabela 4.3 é apresentado a projeção as Emissões Totais de CO₂ para os Cenários propostos.

Tabela 4.3: Emissões Totais de CO₂ determinadas nos Cenários

Cenário	Emissão de CO ₂ (tCO ₂)
Menos Otimista	9.135.428
Pré-Otimista	4.658.948
Otimista	2.768.438
Excessivamente Otimista	1.629.211
Referência	4.172.905
Alternativo	1.389.272

Na Tabela 4.3 as emissões totais de CO₂ nos cenários simulados destacam o impacto potencial da redução das emissões de CO₂ em veículos de passageiros leves, caso a frota de motores MCI seja substituída por BEV ou HEV movido a etanol nas próximas três décadas. No Cenário Menos Otimista, representado pela linha preta na Figura 4.14, as emissões totais da frota no ano de 2050 serão de 9 milhões de toneladas de CO₂. Em contraste, no Cenário Excessivamente Otimista, as emissões são reduzidas para 1,5 milhão de toneladas de CO₂ por ano, com uma frota composta exclusivamente por BEV.

Para os Cenário Pré-Otimista e Cenário Otimista, mesmo substituindo os veículos MCI parte por BEV e parte por HEV movidos a gasolina ou etanol, as emissões totais ficam próximas de 4 milhões de toneladas de CO₂ por ano em 2050, entretanto no Cenário Alternativo utilizando uma pequena parte de veículos BEV e o restante HEV movidos a Etanol a redução das emissões de CO₂ por ano obtém o resultado de aproximadamente 1,3 milhão de toneladas de CO₂, bem próximo do Cenário Excessivamente Otimista. Porém o Cenário Referência em 2050 reduz em 37% as emissões de CO₂ quando comparado ao Cenário Menos Otimista, podendo ser uma alternativa modesta para o futuro.

Assim, a aplicação deste modelo configura-se uma alternativa a descarbonização do setor de transportes no país, pois proporciona auxílio a planejadores e gestores de políticas públicas e de planejamento energético, de modo a minimizar os eventuais impactos sobre a matriz energética, mobilidade das cidades, saúde pública e sustentabilidade, contribuindo significativamente para o cumprimento das metas climáticas estabelecidas em acordos internacionais, alinhando-se aos compromissos assumidos pelo Brasil no âmbito de iniciativas globais como as da UNEP (2022) e do IPCC (2022).

5 CONCLUSÕES

5.1 CONCLUSÕES GERAIS

Este estudo desenvolveu um modelo de simulação para estimar o crescimento da frota de veículos elétricos, consumo e emissões de CO₂ no Brasil para os próximos 25 anos. A partir dessa abordagem, foi possível identificar os principais parâmetros que influenciam o consumo energético e as emissões de CO₂ da frota veicular, incluindo os ciclos de condução, a idade da frota, o tipo de combustível utilizado e a tecnologia embarcada em cada categoria de veículo.

A aplicação do modelo demonstrou que, embora a eletrificação da frota apresente elevado potencial para a redução das emissões de CO₂, os efeitos positivos dessa transição estão diretamente condicionados à matriz elétrica adotada no país. No contexto brasileiro, caracterizado por uma matriz predominantemente renovável, a expansão dos veículos elétricos tende a promover benefícios ambientais relevantes. No entanto, os cenários projetados indicam que, em períodos de alta demanda energética, a utilização intensiva de termelétricas pode comprometer parte desses ganhos, especialmente em regiões onde a geração térmica representa uma parcela expressiva da oferta.

O estudo também apontou que municípios com maior PIB per capita, como Brasília, São Paulo e Rio de Janeiro, apresentam maior propensão à adoção de tecnologias de baixa emissão, o que pode gerar uma distribuição regional desigual dos benefícios ambientais associados à mobilidade elétrica. Nesse sentido, destaca-se a necessidade de políticas públicas inclusivas que promovam eletromobilidade, com acesso equitativo à infraestrutura de recarga e ofereçam incentivos fiscais e logísticos para viabilizar a transição em diferentes contextos socioeconômicos.

Os resultados obtidos nas viagens realizadas pelas rotas pré-estabelecidas na cidade de Brasília evidenciaram ainda que, em ambientes urbanos com relevo predominantemente plano e tráfego mais fluido, a tecnologia híbrida apresenta melhor desempenho em termos de autonomia e eficiência energética. Por outro lado, em contextos com maior densidade de tráfego e topografia mais acidentada ou sinuosa, os veículos elétricos se mostraram mais vantajosos, em especial

devido à capacidade de regeneração de energia e ao melhor aproveitamento em paradas frequentes e retomadas.

Com base nas evidências apresentadas, este estudo oferece subsídios relevantes para planejadores urbanos, gestores públicos e formuladores de políticas ambientais. Fica evidente que a expansão da frota de veículos elétricos deve ser acompanhada de um planejamento energético estratégico, que assegure a predominância de fontes limpas e renováveis. Além disso, o estudo aponta que a adoção de veículos híbridos flex, especialmente os movidos com o combustível etanol, pode representar uma estratégia eficaz para reduzir as emissões de CO₂, considerando as particularidades do mercado brasileiro.

Por fim, este estudo contribui para o entendimento de como a eletrificação do transporte individual pode se desenvolver no Brasil, evidenciando os principais desafios e oportunidades da transição energética no setor de mobilidade. A continuidade dos estudos é recomendada, com a inclusão de novos cenários e a consideração de avanços tecnológicos que possam surgir, como melhorias na tecnologia de baterias e a evolução das políticas energéticas globais.

5.2 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

A primeira limitação refere-se à não utilização de veículos leves híbridos flex, especialmente com combustível o etanol. A ausência desses modelos no mercado brasileiro, no momento da pesquisa, impossibilitou sua inclusão nos testes e medições em condições reais de uso. Essa restrição limitou a diversidade de dados obtidos e impedindo uma avaliação mais precisa sobre o consumo energético e as emissões de CO₂ dessa categoria veicular nas rotas definidas para o estudo.

Outro fator limitante foi a distribuição geográfica da cidade onde o estudo foi realizado. Trata-se de um município com grande extensão territorial, o que dificultou a logística das coletas de dados. Foram necessárias múltiplas viagens para cobrir as rotas previstas, além da realização de medições em horários variados, o que demandou mais tempo, recursos humanos, custo e planejamento.

5.3 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados, recomenda-se que estudos futuros considerem a análise de cenários adversos, como crises econômicas ou mudanças desfavoráveis nas políticas públicas. Esses contextos podem oferecer uma visão mais abrangente dos desafios e oportunidades associados à transição para a mobilidade elétrica, ampliando a compreensão dos impactos em diferentes condições socioeconômicas.

Sugere-se também a expansão do escopo geográfico da pesquisa, abrangendo outras regiões brasileiras, com o intuito de capturar a diversidade de realidades existentes no território nacional. Além disso, estudos comparativos internacionais poderiam enriquecer a análise, possibilitando a identificação de práticas bem-sucedidas em outros países e o reconhecimento de barreiras específicas ao contexto brasileiro.

Outra recomendação é a exploração de tecnologias emergentes e mudanças na infraestrutura de recarga de veículos elétricos. Investigar a utilização de novas soluções, como baterias avançadas, hidrogênio verde, GNV e biocombustíveis aplicados à mobilidade, pode contribuir significativamente para o aprimoramento do modelo energético nacional. A análise também pode ser estendida à influência de alterações na mistura de combustíveis, como a variação do percentual de etanol na gasolina, o uso de biodiesel e a participação de fontes renováveis na geração de eletricidade.

No que diz respeito à abrangência da frota, propõe-se aplicar a metodologia desta pesquisa a outros segmentos de veículos, como motocicletas, veículos de carga e transporte público. Essas categorias representam uma parcela significativa das emissões no setor de transportes e possuem características operacionais distintas que merecem atenção específica. Além disso, seria relevante expandir o estudo para avaliar a emissão de outros poluentes atmosféricos, além do dióxido de carbono, permitindo uma análise mais completa dos impactos ambientais.

Por fim, sugere-se investigar aspectos comportamentais, como a redução da quilometragem anual percorrida por veículos leves e a diminuição do número de veículos por mil habitantes. Tais mudanças podem influenciar diretamente os resultados esperados na transição para uma mobilidade mais sustentável, sendo elementos estratégicos para a formulação de políticas públicas eficazes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 6601 (2012) Associação Brasileira de Normas Técnicas. Veículos rodoviários automotores leves - Determinação de hidrocarbonetos, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, dióxido de carbono e material particulado no gás de escapamento. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT NBR 7024 (2017) Associação Brasileira de Normas Técnicas. Veículos rodoviários automotores leves - Medição do consumo de combustível- Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2017.

AGUIAR, D. R. D., SILVA, D. A. L. & TAHERIPOUR, F. (2024) Ethanol fuel in Brazil: policies and carbon emission avoidance. *Biofuels*. 16. 1-11. [10.1080/17597269.2024.2405765](https://doi.org/10.1080/17597269.2024.2405765).

AGUIAR, H. S., WEISS, M. C., LUPPE, M. R. & CONSONI, F. L. (2019) O Veículo Elétrico: Estudo da Percepção dos Brasileiros. *Revista Científica da FAEX*. Volume 1, N. 15, Edição 15, ISSN 2238-1899, Extrema-MG, Brasil. Disponível em: <<http://periodicos.faex.edu.br/index.php/e-Locucao/article/view/180>> Acesso em 16 de novembro de 2019.

ALAM, M. S., HYDE, B., DUFFY, P. & MCNABOLA, A. (2017) Assessment of pathways to reduce CO₂ emissions from passenger car fleets: Case study in Ireland. *Applied Energy*, 189, 283 – 300.

ALI, S., ZHANG, J., AZEEM, A. & MAHMOOD, A. (2020) Impact Of Electricity Consumption On Economic Growth: An Application Of Vector Error Correction Model and Artificial Neural Networks. *The Journal of Developing Areas*. v. 54, n. 4, p. 89-104, 2020.

AL-MULALI, U., TANG, C. F., TAN, B. W. & OZTURK, I. (2019) The nexus of electricity consumption and economic growth in Gulf Cooperation Council economies: evidence from non-stationary panel data methods. *Geosystem Engineering*. v. 22 (1), p. 40-47, 2019.

ALVES, M. A., DIAS, R. C. & SEIXAS, P. C. (2019) Smart Cities no Brasil e em Portugal: o estado da arte. *Urbe. Revista Brasileira De Gestão Urbana*, 11. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.011.e20190061>

ANEEL (2017) Agência Nacional de Energia Elétrica. *Prospecção Tecnológica no Setor de Energia Elétrica: Evolução Tecnológica Nacional no Segmento de Distribuição de Energia Elétrica*. V. 5, Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, Brasília, DF, Brasil.

ANDRÉ, M. (2005) The ARTEMIS European driving cycles for measuring car pollutant emissions. *Science of the Total Environment*, v. 334–335, p. 73–84, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.04.070>.

ANP (2024) Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Fatores de Emissão e Indicadores Ambientais de Biocombustíveis – Relatório Técnico 2024. Brasília: ANP,

2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/biocombustiveis>. Acesso em: maio 2025.

ARAÚJO, B. J. O. (2015) Desenvolvimento de um Modelo de Caracterização Energética de Ciclos de Condução. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade do Minho, Escola de Engenharia. Braga/Guimarães, Portugal.

BARASSA, E., CRUZ, R. F. & MORAES, H. B. (2020) 1º Anuário Brasileiro da Mobilidade Elétrica. Plataforma Nacional de Mobilidade Elétrica-PNME. Rio de Janeiro, Brasil.

BARBOSA, A. R. (2023) Crescimento Econômico, Energia e Mobilidade Sustentável no Brasil. Revista Brasileira de Energia e Sociedade, v. 11, n. 1, p. 55-72, 2023.

BARLOW, T. J., LATHAM, S., MCCRAE, I. & BOULTER, P. A. (2009) Reference Book of Driving Cycles for Use in the Measurement of Road Vehicle Emissions. TRL Published Project Report.

BRAJTERMAN, O. (2016) Introdução de Veículos Elétricos e Impactos Sobre o Setor Energético Brasileiro. (Dissertação de Mestrado) UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 142 p.

BREETZ, H. C., MANDEL, G. & BROWN, A. (2018) The politics of technology adoption: the case of electric vehicles. *Review of Policy Research*, v. 35, n. 4, p. 470–500, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/ropr.12282>> Acesso em 20 maio 2022.

CASSIANO, D. R., RIBAU, J., CAVALCANTE, F. S. A., OLIVEIRA, M. L. M. & SILVA, C. M. (2016) On-board Monitoring and Simulation of Flex Fuel Vehicle in Brazil. *Transportation Research Procedia*, 2016, 14, 3129 - 3138

CASTRO, N., MOREIRA, G., MOSZKOWICZ, M. & LIMA, A. (2018). Setor Elétrico Brasileiro e as Perspectivas Relacionadas à Mobilidade Elétrica. Grupo de Estudos do Setor Elétrico-GESEL, UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil.

CLIMATE ACTION TRACKER. (2024) Global emissions trends and policy impacts 2024. Disponível em: <https://climateactiontracker.org>. Acesso em: 2 jun. 2025.

CHENG, R., ZHANG, W., YANG, J., WANG, S. & LI, L. (2025) Analysis of the Effects of Different Driving Cycles on the Driving Range and Energy Consumption of BEVs. *World Electric Vehicle Journal*. 2025; 16(3):124. <https://doi.org/10.3390/wevj16030124>. Acesso em 26 maio 2025.

CETESB (2014) Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Emissões Veiculares no Estado de São Paulo 2013. Elaboração Bruni, A. C., Dias, C., Barbosa, L. J. & Bales, M. P.; São Paulo, Brasil.

CETESB (2016) Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Emissões Veiculares no Estado de São Paulo 2015. Elaboração Bruni, A. C., Dias, C. & Barbosa, L. J. São Paulo, Brasil.

CETESB (2017) Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Plano de Controle de Poluição Veicular 2017-2019. Elaboração Bruni, A. C., Dias, C., Barbosa, L. J., Bales, M. P. & Silva, S. R.; São Paulo, Brasil.

CETESB (2018) Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Emissões Veiculares no Estado de São Paulo 2017. Elaboração Bruni, A. C., Dias, C., Barbosa, L. J., Bales, M. P. & Silva, S. R.; São Paulo, Brasil.

CETESB (2020) Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Emissões Veiculares no Estado de São Paulo 2019. Elaboração Bruni, A. C., Dias, C., Barbosa, L. J., Bales, M. P. & Silva, S. R.; São Paulo, Brasil.

CETESB (2024) Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Emissões Veiculares no Estado de São Paulo 2023. Elaboração Bruni, A. C., Dias, C., Barbosa, L. J., Bales, M. P. & Silva, S. R.; São Paulo, Brasil.

CLIMATE ACTION (2024) European Commission. Reducing CO₂ emissions from transport. Disponível em: <https://climate.ec.europa.eu>. Acesso em: 2 jun. 2025.

COP29 (2024) Conferência das Partes. Relatório da Conferência das Partes sobre sua vigésima nona sessão, realizada em Baku de 11 a 22 de novembro de 2024. Bonn: UNFCCC, 2025. Disponível em: <<https://unfccc.int/cop29>> Acesso em: 2 jun. 2025.

CZÉGÉ, L., VÁMOSI, A. & KOCSIS, I. (2020) Review on Construction Procedures of Driving Cycles. International Journal of Engineering and Management Sciences. 5. 266-285. 10.21791/IJEMS.2020.2.31.

DANTAS, G. A. R. (2019) Fatores de Emissão de CO₂ para o Setor Elétrico Nacional: Subsídios para o Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de GEE por Queima de Combustíveis – 2019. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações – MCTI, 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/centrais-de-conteudo/fatores-de-emissao-energia>. Acesso em: jul. 2023.

DA SILVA, C. P. (2020) Avaliação do Impacto da Propulsão Elétrica e Sistema BRT no Consumo Energético e Emissões de CO₂ no Transporte Público no Distrito Federal. (Dissertação de Mestrado em Transportes) Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, Distrito Federal, Brasil.

DARGAY, J., GATELY, D. & SOMMER, M. (2007) Vehicle ownership and income growth, worldwide: 1960–2030. Energy Journal, 28(4): 163–190.

DELGADO, F., COSTA, J. E. G., FEBRADO, J. & SILVA, T. B. (2017) Carros Elétricos. Cadernos FGV Energia, Ano 4, N°. 7., Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em: <http://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/caderno_carros_eletricos-fgv-book.pdf> Acesso em 12 de novembro de 2018.

DEMIRKOL, S. (2024) Renewable Energy in Brazil Reaches 49.1% of Energy Matrix. Brazilian NR, 22 jun. 2024.

DENG, Y., MA, M. & ZHOU, N. (2024) China's plug-in hybrid electric vehicle transition: an operational carbon perspective. arXiv, 12 maio 2024. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/2405.07308>> Acesso em: 9 jun. 2025.

DETRAN-DF (2023) Departamento de Trânsito do Distrito Federal. *Boletim Estatístico da Frota*. Brasília: DETRAN-DF, 2023. Disponível em: <https://www.detran.df.gov.br>. Acesso em: 12 novembro 2023.

DIAS, I. L. G. (2017) Análise Experimental da Influência do Ar-Condicionado Automotivo nas Emissões e no Consumo de Combustível em Veículos Leves Considerando o Ciclo Urbano (FTP-75). (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica) Programa de Pós Grauação em Energia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais-UFMG. Belo Horizonte, MG.

DI LORENZO, S. (2023) Índice de eficiência energética de mobilidade urbana - IEEMU: uma abordagem multicritério e multidisciplinar. 177 f. Dissertação Mestrado em Desenvolvimento, Tecnologia e Sociedade) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2023.

ECKERT, J. J., SILVA, F., SILVA, S. F., BUENO, A. V., OLIVEIRA, M. L. M. & SILVA, L. C. A. E. (2022) Optimal design and power management control of hybrid biofuel-electric powertrain. *APPLIED ENERGY*, v. 325, p. 1-21.

EGGLESTON, H. S., GAUDIOSO, D., GORISSEN, N., JOUMARD, R., RIJKEBOER, R. C., SAMERES, Z. & ZIEROCK, K. H. (1991) CORINAIR Working Group on Emission Factors for Calculating 1990 Emissions from Road Traffic. Vol. I., Methodology and Emission Factors. Final Report, Contract n.B4/3045(91) IOPH, Directorate Generale XI. European Environmental Agency Task Force, Commission of European Communities, Bruxelles, Belgium.

EHSANI, M., GAO, Y., LONGO, S. & EBRAHIMI, K. (2018) Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles. Boca Raton: CRC Press. Evidência Científica. *Braz. J. Phys. Ther.*(Impr.), 11(1), 83-89.

EMBRAPA (2021) Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Biocombustíveis no Brasil: O papel estratégico do etanol. Brasília: EMBRAPA Agroenergia, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br>. Acesso em: 12 maio 2025

EPE (2017) Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2017: Ano Base 2016. Rio de Janeiro: EPE.

EPE (2017) Empresa de Pesquisa Energética. Plano Energético Nacional 2050 – PNE 2050. Rio de Janeiro: EPE, 2017. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PNE-2050>. Acesso em: maio 2020.

EPE/ONS (2017) Empresa de Pesquisa Energética/Operador Nacional do Sistema Elétrico. Projeção da Demanda de Energia Elétrica Para os Próximos 10 Anos (2017-2026). Nota Técnica DEA 001/17. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Disponível em <<http://www.epe.gov.br/default.aspx>>. Acesso em: 22 de junho de 2018.

EPE/BEN (2018) Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2018 Ano Base 2017. Rio de Janeiro: EPE

EPE/BEN (2019) Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2019 Ano Base 2018. Rio de Janeiro: EPE.

EPE/BEM (2020) Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2020 Ano Base 2019. Rio de Janeiro: EPE.

EPE/BEN (2021) Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2021 Ano Base 2020. Rio de Janeiro: EPE.

EPE (2022) Empresa de Pesquisa Energética. Projeção do Consumo Elétrico Brasileiro até o ano de 2050 – Balanço Energético Nacional 2022. Rio de Janeiro: EPE, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/BEN-2022>. Acesso em: maio 2023.

EPE (2024) Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2024: Ano base 2023. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Brazilian Energy Balance 2024 Year 2023 / Empresa de Pesquisa Energética – Rio de Janeiro: EPE, 2024.

EPE (2024) Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2025 – Ano Base 2024. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2025. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/BEN-2025>. Acesso em: janeiro 2025.

EPE/BEN (2025) Empresa de Pesquisa Energética. Relatório Síntese 2025 Ano Base 2024. Rio de Janeiro: EPE.

EPE (2025) Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional: Relatório Síntese 2025 (ano base 2024). Rio de Janeiro: EPE, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/brasil-avanca-na-renovabilidade-das-matrizess-em-2024-aponta-balanco-energetico-nacional>. Acesso em: 2 jun. 2025.

EPA (2025) Environmental Protection Agency. Description and history of the MOBILE highway vehicle emission factor model. Disponível em: <https://www.epa.gov/moves/description-and-history-mobile-highway-vehicle-emission-factor-model>. Acesso em: 9 jun. 2025.

EEA. (2024) European Environment Agency. EMISIA SA. 1.A.3.b.i-iv – Road transport chapter. EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2023 – Update 2024. Copenhague: EEA, 2024.

FAMELI, K. & ASSIMAKOPOULOS, V. (2015) Development of a road transport emission inventory for Greece and the Greater Athens Area: Effects of important parameters. *Science of The Total Environment*, 2015, 505, 770 – 786.

FENABRAVE (2024) Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores. Relatório Anual 2024: desempenho do setor automotivo brasileiro. São Paulo, 2024. Disponível em: <https://www.fenabrade.org.br>. Acesso em: 2 jun. 2025.

FEIX VAZ, É. & FARRET, F. A. (2020) Correlações de Pearson entre o Consumo de Energia Elétrica e os Índices de Desenvolvimento Humano e Econômico. In: Congresso Brasileiro de Automática 2020, 2020. Anais do Congresso Brasileiro de Automática 2020.

FERREIRA, J. S. (2021) O Impacto das Emissões de CO₂ no Trânsito Brasileiro. Good Green 1^a Edição, Belo Horizonte, Brasil.

FGV ENERGIA (2022) *Fundação Getúlio Vargas. A Transição Energética no Setor de Transportes para Nações em Desenvolvimento: A Perspectiva Brasileira. Rio de Janeiro, Brasil.* Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmnnibpcajpcglclefindmkaj/https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/caderno_de_transicao_energetica_no_setor_de_transportes_rev4.pdf> Acesso em 10 de abril de 2022.

FGV ENERGIA (2024) Fundação Getúlio Vargas. Caderno de Transição Energética no Setor de Transportes. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 2024. Disponível em: <https://fgvenergia.fgv.br/publicacao/caderno-de-transicao-energetica-no-setor-de-transportes>. Acesso em: 2 jun. 2025.

FONTARAS, G., PISTIKOPOULOS, P. & SAMARAS, Z. (2008) Experimental evaluation of hybrid Vehicle fuel economy and pollutant emissions over real-world simulation driving cycles Atmospheric environment, Elsevier, 2008, 42, 4023-4035

FONSECA, F. M. R. (2018) Avaliação do impacto da introdução de cargas auxiliares na autonomia de veículos elétricos. MS thesis. Universidade de Lisboa (Portugal), 2018.

GHG PROTOCOL (2022) Transportation Sector Guidance – Emissions Quantification and Reporting. Washington, DC: World Resources Institute, 2022. Disponível em: <https://ghgprotocol.org>. Acesso em janeiro de 2024.

GONGO, A. (2019) Desafios para a Implantação do Teste Real Drive Emissions na Realidade Brasileira. (Tese de Doutorado em Transportes) Universidade Federal do Rio de Janeiro, COOPE, Programa de Engenharia de Transportes, Rio de Janeiro, RJ, 112p.

GOMEZ, J. P. E. (2016) O Veículo Elétrico no Brasil: Análise Baseada nos Sistemas Tecnológicos de Inovação (STI). (Dissertação de Mestrado em Transportes) Publicação <http://www.anpet.org.br/xxviiianpet/anais/documents/AC289.pdf>. Acesso em 15/05/2016.

GONÇALVES, R. F. (2021) Potencial do Etanol em Veículos Híbridos no Brasil: Uma Avaliação Técnica e Ambiental. Revista Brasileira de Mobilidade Sustentável, v. 7, n. 2, p. 45–60, 2021.

HAYTZMANN, G. & CIEPLINSKI, A. (2025) Tecnologias de propulsão e emissões de CO₂ e: Comparação de Veículos Elétricos e Híbridos no Brasil. Conselho Internacional de Transporte Limpo.

HILL, G., HEIDRICH, O., CREUTZIG, F. & BLYTHE, P. (2019) The role of electric Vehicle near-term mitigation pathways and achieving the UK's carbon budget. *Applied Energy*, 2019, 251, 113111.

HUAPU LU, HE MA, ZHIYUAN S. & JING W. (2017) Analysis and Prediction on Vehicle Ownership Based on an Improved Stochastic Gompertz Diffusion Process. *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2017, Article ID 4013875, 8 pages, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/4013875>.

IEA (2021) International Energy Agency. *The Global EV Outlook 2021*. Energy Technology Policy/Division of the Directorate of Sustainability. Paris, France.

ICCT (2022) International Council on Clean Transportation. *Decarbonizing Road Transport: Scenarios for Sustainable Mobility*. Disponível em: <https://theicct.org>. Acesso em: 12 maio 2025.

IBGE (2021) Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Produto Interno Bruto – PIB*. Brasil. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/pib.php> Acesso em: 20 de novembro de 2022.

IBGE (2024) Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. População estimada do país chega a 212,6 milhões de habitantes em 2024. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/41111-populacao-estimada-do-pais-chega-a-212-6-milhoes-de-habitantes-em-2024>. Acesso em: 2 jun. 2025.

IBGE (2024) Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Indicadores Econômicos e Energéticos do Brasil 2024*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2024.

IBGE (2025) Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. PIB cresce 3,4% em 2024 e fecha o ano em R\$ 11,7 trilhões. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/42774-pib-cresce-3-4-em-2024-e-fecha-o-ano-em-r-11-7-trilhoes>. Acesso em: 2 jun. 2025.

IBPT (2023) Instituto Brasileiro de Planejamento e Tributação. Frota brasileira fecha 2023 em 119.227.657 veículos. *O Tempo*, 2024. Disponível em: <https://www.otempo.com.br/economia/frota-brasileira-fecha-2023-em-119-227-657-um-veiculo-para-cada-1-7-habiente-1.3346324>. Acesso em: 2 jun. 2025.

IEMA (2023) Instituto de Energia e Meio Ambiente. Análise das emissões por transporte no Brasil. Disponível em: <https://energiaeambiente.org.br>. Acesso em: 2 jun. 2025.

INMETRO (2024) Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. *Light Vehicle 2024*. Available: <https://www.gov.br/inmetro/pt-br>. Acesso em Setembro 2024.

IPEA (2024) Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Cenários para o setor de transportes no Brasil: expansão da frota e infraestrutura veicular. Brasília, 2024. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br>. Acesso em: 2 jun. 2025.

IPCC (2022) Intergovernmental Panel on Climate Change Climate Change 2022. Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report (AR6). Genebra: IPCC, 2022. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3>. Acesso em: 22 de maio 2025.

ICCT (2025) International Council on Clean Transportation. Comparação de veículos híbridos e elétricos no Brasil: emissões do poço à roda (jan/2023–abr/2024). Washington, 2025.

IEA (2023) International Energy Agency. World Energy Outlook 2023. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>. Acesso em: fevereiro 2025.

IEA (2024) International Energy Agency. Well-to-Wheel Greenhouse Gas Emissions Factors – 2024 Update. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports>. Acesso em: 15 junho 2024.

JAMES, D. (2018) Urban Transportation and Mobility Challenges in Developing Countries. *Journal of Urban Planning*, v. 45, n. 3, p. 230-248, 2018.

KELMAN, J. (2015) Cenários da Matriz Elétrica Brasileira até 2050: Sustentabilidade, Segurança e Custo. Rio de Janeiro: Instituto Ilumina, 2015.

KRAUSE, J., THIEL, C., TSOKOLIS, D., SAMARAS, Z., ROTA, C., WARD, A., PRENNINGER, P., COOSEMANS, T., NEUGEBAUER, S. & VERHOEVE, W. (2020) EU Road HEVicle Energy Consumption and CO₂ Emissions by 2050 – Expert-Based Scenarios, *Energy Policy*, Volume 138.

LAVRADOR, R. B.; TELES, B. A. S. (2022) Life Cycle Assessment of Battery Electric Vehicle and Internal Combustion Vehicle Using Sugarcane Ethanol in Brazil: A Critical Review. *Cleaner Energy Systems*, 2. <https://doi.org/10.1016/j.cles.2022.100008>.

LI, X. (2024) A fuel consumption-based method for developing local-specific CO₂ emission rates. *Journal of Big Data*, v. 12, 2024.

LIAN, L., TIAN, W., XU, H. & ZHENG, M. (2018) Modeling and Forecasting Passenger Car Ownership Based on Symbolic Regression. *Sustainability* 2018, 10, 2275.

LIMA, G. C. L. S. & PORTUGAL, L. S. (2018) Perspectivas para o Desenvolvimento da Eletrificação dos Transportes. XXXII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte-ANPET. Gramado-RS.

LIU H., GUENSLER R., LU H., XU Y., XU X. & RODGERS, M. O. (2019) MOVES-Matrix for High-Performance On-road Energy and Running Emission Rate Modeling Applications. *J Air Waste Manag Assoc.* 2019 Dec;69(12):1415-1428. doi: 10.1080/10962247.2019.1640806. Epub 2019 Oct 28. PMID: 31291170.

LOMBARD, M., PANERALI, K., ROUSSELET, S. & SCALISE, J. (2018) Electric Vehicle for Smarter Cities: The Future of Energy and Mobility. *World Economic Forum*. Geneva. Disponível

em:<http://www3.weforum.org/docs/WEF_2018_%20Electric_For_Smarter_Cities.pdf> Acesso em: 19 de novembro de 2018.

LUCZKIEWICZ, C. A. (2017) Estudo de um Sistema de Propulsão para Veículos Elétricos Populares. (Dissertação de Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Porto Alegre, RS, 127p.

MCTI (2025) Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Fatores de Emissão da Margem de Operação pelo Método da Análise de Despacho. Ano Base 2025. Inventários Corporativos, Brasil. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/dados-e-ferramentas/fatores-de-emissao>. Acesso em 13 de janeiro de 2025.

MMA (2013) Ministério do Meio Ambiente. Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários-Ano Base 2012. Relatório Final, Brasil.

MMA (2023) Ministério do Meio Ambiente. Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mma>. Acesso em: 2 jun. 2025.

MME/EPE (2019) Ministério de Minas e Energia/Empresa de Pesquisa Energética. Plano Decenal de Expansão de Energia 2029. MME/EPE, 2019, Brasília, DF, Brasil.

MME/EPE (2020) Ministério de Minas e Energia/Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 50 Anos: Cinquenta Anos de Estatísticas Energéticas. MME/EPE, 2020, Brasília, DF, Brasil.

MME/EPE (2022) Ministério de Minas e Energia/Empresa de Pesquisa Energética. Plano Decenal de Expansão de Energia 2031 – PDE 2031. Brasília: MME/EPE, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PDE-2031>. Acesso em: 27 jul. 2023.

MME (2024) Ministério de Minas e Energia. Panorama Energético Brasileiro 2024. Brasília: MME, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mme>. Acesso em: 2 jun. 2025.

MCID (2024) Ministério das Cidades. Mobilidade Urbana Sustentável: Renovação de Frota. Brasília: Ministério das Cidades, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/novo-pac-selecoes/mobilidade-urbana-sustentavel-renovacao-de-frota>. Acesso em: 2 jun. 2025

METRÔ-DF (2018) Companhia do Metropolitano do Distrito Federal. Plano de Desenvolvimento do Transporte Público sobre Trilhos do Distrito Federal – PDTT-DF 2018. Brasília: METRÔ-DF, 2018. Disponível em: <https://www.metro.df.gov.br/pdtt>. Acesso em: 23 março 2019.

MINUCCI, A. S. (2020) Previsão do Consumo de Energia e Emissões de Gases com Efeito de Estufa no Setor dos Transportes em Portugal. (Dissertação de Mestrado) Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, Portugal, 118p.

MOLINARI, W. (2025) Oportunidades e desafios para crescimento do mercado de veículos elétricos no Brasil. Novo Varejo Automotivo, maio 30, 2025. Disponível em: [link]. Acesso em: 9 jun. 2025.

MUNSI, M. S. & CHAOUI, H. (2024) Energy Management Systems for Electric Vehicles: A Comprehensive Review of Technologies and Trends. IEEE Access, jan. 2024. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3371483.

NREL (2023) National Renewable Energy Laboratory. Electric Vehicle Efficiency Ratios for Light-Duty Vehicles Registered in the United States. Golden, CO: U.S. Department of Energy, 2023. Relatório Técnico NREL/TP-5400-84631. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy23osti/84631.pdf>. Acesso em: 11 set. 2025.

OLIVEIRA, B. L., SILVA, H. M. R., JUGEND, D. & FIORINI, P. C. (2022). Factors influencing the intention to use electric cars in Brazil. *ResearchGate*, [s.l.], 2022. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/356982208>. Acesso em: 11 set. 2025.

ONS (2025) Operador Nacional do Sistema Elétrico. Resultado da Operação – Histórico da Operação 2024. Brasil. Disponível em: https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao_energia.aspx. Acesso em abril de 2025.

PASCOAL, E. T., FURTADO, A. E. & FERREIRA, V. S. (2018) Eletromobilidade no Brasil: Iniciativas, Oportunidades e Desafios. XXVI Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva, Blucher Engineering Proceedings, V. 5, São Paulo, Brasil. DOI: 10.5151/simea2018-PAP04.

PDTU (2010) Secretaria de Estado de Transporte do Distrito Federal. Plano Diretor de Transporte Urbano e Mobilidade do Distrito Federal e Entorno – PDTU 2010. Brasília: Governo do Distrito Federal, 2010. Disponível em: <https://www.seduh.df.gov.br/pdtu>. Acesso em: 27 março 2019.

PRATI, M. V., COSTAGLIOLA, M. A., GIUZIO, R., CORSETTI, C. & CARLO BEATRICE, C. (2001). Emissions and Energy Consumption Of a Plug-in Hybrid Passenger Car in Real Driving Emission (RDE) Test. *Transportation Engineering*, Volume 4, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2021.100069>

POLICARPO, N. A., SILVA, C., LOPES, T. F. A., DOS SANTOS ARAÚJO, R., CAVALCANTE, F. S. Á., PITOMBO, C. S. & DE OLIVEIRA, M. L. M. (2018) Road HEVicle emission inventory of a Brazilian metropolitan area and insights for other emerging economies. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 58, 172p.

PUTRADAMAZMAN, M. F. & SYAHMI, A. (2021) Behavior analysis of light-duty Vehicle drivers using naturalistic driving data collection. *Nat. Volatiles & Essent. Oils*, 8(5):12178-12190.

RECHIN, M. (2018) Brasil tem Potencial para Vender 150 Mil Carros Elétricos ao Ano. *Revista Época Negócios*. Editora Globo, Rio de Janeiro, Edição, Ano, N°, 08 de fev. 2018. Disponível em: <<https://epocanegocios.globo.com/Tecnologia/noticia/2018/02/brasil-tem-potencial-para-vender-150-mil-carros-eletricos-ao-ano>>

tem-potencial-para-vender-150-mil-carros-eletricos-ao-ano.html> Acesso em: 22 de novembro 2018.

ROSO, V. R. (2016) Ciclos Reais de Condução Veicular em Santa Maria e Seus Impactos em Consumo e Emissões. (Dissertação de Mestrado) Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 87p.

RUOSO, A. C. & RIBEIRO, J. L. D. (2022) An assessment of barriers and solutions for the deployment of electric vehicle in the Brazilian market, *Transport Policy*, Vol. 127. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2022.09.004>

SAMPAIO, R. F. & MANCINI, M. (2007) Estudos de revisão sistemática: Um guia para síntese criteriosa da evidência científica. *Revista Brasileira de Fisioterapia - REV BRAS FISIOTER.* 11. 10.1590/S1413-35552007000100013.

SANTOS, L., LOUREIRO, S. A. S, LIMA JR, O. F., BERTONCINI, B. V. & BEZERRA, O. B. (2016) O uso do método de revisão sistemática da literatura na pesquisa em logística, transportes e cadeia de suprimentos. *Transportes*, 24(1), 95-106.

SEGOV (2024) Secretaria de Governo do Distrito Federal. Administrações Regionais. Disponível em: <https://segov.df.gov.br/category/administracoes-regionais/> Acesso em 16 de abril 2024.

SENATRAN (2023) Secretaria Nacional de Trânsito. Estatísticas da Frota de Veículos: Brasília – Ano-base 2021. Brasília: Ministério dos Transportes, 2023. Disponível em: <https://portal.senatran.gov.br/estatisticas>. Acesso em: 12 novembro2023.

SENATRAN (2024) Secretaria Nacional de Trânsito Estatísticas. Frota de Veículos 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/conteudo-SENATRAN/estatisticas-frota-de-veiculos-SENATRAN>> Acesso em 08 abril 2024.

SCHVARTZ, C., MELO, M. T. R., ALVES, C. R. & DUARTE, P. A. M. (2024) Analysis of the factors influencing the purchase of electric vehicles in Brazil. *Sustainability*, Basel, v. 16, n. 22, p. 9957, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/22/9957>. Acesso em: 11 set. 2025.

SEEG BRASIL (2023) Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa. Emissões do setor de transportes no Brasil. Disponível em: <https://seeg.eco.br>. Acesso em: 2 jun. 2025.

SCHIAVI, M. T. (2020) Estudo das Tendências e Desenvolvimentos Tecnológicos do Carro Elétrico no Brasil. (Tese de Doutorado) Centro de Educação e Ciências Humanas, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 200p.

SILVA, E. F. F. (2023) Modelo numérico dos consumos energéticos e emissões de CO₂ como apoio aos planos de mobilidade. Publicação T.DM-003/2023. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 144p.

SONI, G. & KADALI, R. (2011) A critical analysis of supply chain management content in empirical research. *Business Process Management Journal*, v. 17, n. 2, p. 238–266, 2011.

THAKER, M. A. M. T., THAKER, H. M. T., AMIN, M. F. & PITCHAY, A. A. (2019) Electricity Consumption and Economic Growth: A Revisit Study of Their Causality in Malaysia. *Etikonomi: Jurnal Ekonomi*. v. 18 (1), p. 1 – 12, 2019.

THEOTONIO, S. B. (2018) Veículos Elétricos e Híbridos: Panorama Patentário no Brasil. Instituto Nacional da Propriedade Industrial. INPI, Diretoria de Patentes-DIRPA, Coordenação Geral de Estudos, Projetos e Disseminação da Informação Tecnológica – CEPIT, Coordenação de Pesquisa em Inovação e Propriedade Intelectual – COPIP, Divisão de Estudos e Projetos- DIESP. Rio de Janeiro-RJ.

UN-HABITAT (2024) Urbanização no Brasil: construindo cidades inclusivas e sustentáveis. Disponível em: <https://unhabitat.org/brazil>. Acesso em: 2 jun. 2025.

UNITED NATIONS-ONU (2015) Agreement Paris. Framework Convention on Climate Change-CP21. FCCC, CP, 2015, L.9, Rev. 1. Paris, France. Disponível em: <<https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/109r01.pdf>> Acesso em: 23 de novembro 2018.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (2015) The Paris Agreement. Bonn: UNFCCC Secretariat, 2015. Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>. Acesso em: 12 maio 2025.

UNEP (2022) United Nations Environment Programme. Emissions Gap Report 2022: The Closing Window – Climate Crisis Calls for Rapid Transformation of Societies. Nairobi: Disponível em: <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2022>. Acesso em: 20 maio 2025.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY (2022) Electric Vehicle Benefits and Considerations. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy (EERE), 2022. Disponível em: https://afdc.energy.gov/fuels/electricity_benefits.html. Acesso em: 11 set. 2025.

VASCONCELOS, Y. (2017) A Ascensão dos Elétricos. *Revista Pesquisa FAPESP*, São Paulo-SP. Edição 258, p. 18-27.

VAZ, L. F. H., BARROS, D. C. & CASTRO, B. H. R. (2015) Veículos Híbridos Elétricos: Sugestões de Políticas Públicas para o Segmento. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 41, p. [295]-344, mar. 2015.

VONBUN, C. (2015) Impactos Ambientais e Econômicos dos Veículos Elétricos e Híbridos Plug-In: uma Revisão da Literatura. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). Brasília, DF, Brasil.

WANG, Y., WEN, Y., ZHU, Q., LUO, J., YANG, Z., SU, S., WANG, X., HAO, L., TAN, J., YIN, H. & GE, Y. (2022) Real Driving Energy Consumption and CO₂ & Pollutant Emission Characteristics of a Parallel Plug-in Hybrid Electric HEVicle Under Different

Propulsion Modes. Energy, Volume 244, Part B, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.123076>. Acesso em: 23 de novembro 2023.

WU, X., ZHANG, S., WU, Y.; LI, Z., KE, W., FU, L. & HAO, J. (2015) On-road Measurement of Gaseous Emissions and Fuel Consumption for Two Hybrid Electric Vehicle in Macao Atmospheric Pollution. Research, 2015, 6, 858 – 866

YAN, S. & SUN, H. (2024) Constrained Optimal Fuel Consumption of HEVs under Observational Noise. *arXiv preprint arXiv:2410.20913*. Disponível em: <http://arxiv.org/abs/2410.20913>. Acesso em: 03 abril 2025.

APÊNDICE A – REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Para Sampaio & Mancini (2007), a revisão sistemática é uma forma de pesquisa que utiliza como fonte de dados a literatura sobre determinado tema, em que disponibiliza um resumo dos trabalhos relacionados a um assunto específico, mediante a aplicação de métodos explícitos e sistematizados de busca, apreciação crítica e síntese da informação selecionada.

A realização da revisão sistemática trará ao estudo as principais bases teóricas que serão abordadas e também a noção de quanto a comunidade científica vem discutindo e aprofundando o tema que está se propondo para esta tese. Para desenvolver esta análise, ela será baseada nos trabalhos desenvolvidos por Sampaio & Mancini (2007), Soni & Kadali (2011) e Santos *et al.* (2016), que sugerem alguns “passos” para determinar o número de publicações por palavra-chave e base de dados, como é apresentado na Tabela A.1:

Tabela A.1: Número de Publicações por Palavra-Chave e Base de Dados

PASSOS	CONCEITOS
1	Definição do problema de pesquisa claro, objetivo e conciso;
2	Definição do período de pesquisa (horizonte), dos termos de busca e estratégia de pesquisa, mediante a escolha das bases de dados, como por exemplo, <i>Google Scholar</i> , <i>Crossref</i> , <i>Science Direct</i> , Periódicos Capes, entre outros;
3	Definição de critérios para inclusão ou exclusão de trabalhos;
4	Seleção de jornais científicos;
5	Seleção dos artigos, conforme a estratégia de pesquisa (Passo 2) e critérios de inclusão e exclusão (Passo 3);
6	Refinamento entre os documentos encontrados de acordo com o tema de pesquisa;
7	Analise e classificação dos artigos e trabalhos sobre o tema.

Fonte: Soni & Kadali (2011); Santos *et al.*, (2016), com adaptações.

Com a execução dos passos apresentados, foi possível a construção o Quadro A.1 que apresenta os pré-requisitos para a revisão sistemática, como definição de problema, definição de horizonte, principais termos para pesquisa e critérios de inclusão e exclusão de trabalhos.

Quadro A.1: Pré-requisitos para a Revisão Sistemática

PASSOS	DESCRÍÇÃO	FINALIDADE
1. Definição dos problemas de pesquisa	A partir de sua matriz elétrica brasileira, quais os ganhos ambientais da ampliação da utilização de carros elétricos para os próximos anos?	Subsidiar o conhecimento relacionado à matriz elétrica brasileira e o quanto será impactada com a implantação de carros elétricos.
2. Definição de horizonte, bases e identificação do estudo	Horizonte de tempo: De 2010 a 2020; Bases de pesquisas: <i>ScienceDirect</i> , <i>Google Scholar</i> , <i>Crossref</i> e <i>Capes</i> .	Abranger o período entre as primeiras publicações sobre o tema pesquisado até o corrente ano, em bases de dados tradicionais.
	Identificação de estudos: Busca de trabalhos publicados com termos clássicos sobre o tema, por meio de 3 grupos e 15 combinações de termos de busca.	Abranger o tema pesquisado com as palavras-chave nas bases de pesquisa
3. Definição da estratégia de pesquisa	Grupo A: termos de busca 1.(“Veículo Elétrico”); 2.(“Ciclo de Condução”); 3.(“Matriz elétrica Brasileira”); 4.(“Emissão de CO ₂ ”); 5.(“Eficiência Energética dos Veículos”).	Identificar publicações relacionadas a consumo de combustível e emissão de CO ₂ , mediante aos cinco termos clássicos sobre o tema.
	Grupo B: Publicações relacionadas com “Veículo Elétrico, Matriz elétrica Brasileira, Composição da Frota Veicular Brasileira, Ciclos de Condução, , Emissão de CO ₂ e “Eficiência Energética dos Veículos”. [termos de busca: “Electric HEVicle” and “Brazilian Energy Matrix”; “Electric HEVicle” and “Composition of the Brazilian HEVicle Fleet”; “Electric HEVicle” and “HEVicle Energy Efficiency”; “Composition of the Brazilian HEVicle Fleet” and “CO ₂ Emission”; “Brazilian Energy Matrix” and “HEVicle Energy Efficiency”; “Driving Cycles” and “CO ₂ Emission”; “Driving Cycles” and “HEVicle Energy Efficiency”; “Composition of the Brazilian HEVicle Fleet” and “HEVicle Energy Efficiency”].	Identificar publicações relacionadas a consumo de combustível, emissão de CO ₂ , veículo elétrico, composição da frota veicular mediante a combinação de duas palavras-chave (com o operador booleano de inclusão <i>and</i>) e palavras envolvidas ao assunto como: eficiência energética dos veículos e ciclo de condução.
	Grupo C: Publicações relacionadas a “Matriz elétrica Brasileira”, “Emissão de CO ₂ ”, “Eficiência Energética dos Veículos” e Ciclo de Condução. [termos de busca: “Brazilian Energy Matrix” and “CO ₂ Emission” and “HEVicle Energy Efficiency” “Driving Cycle” and “CO ₂ Emission” and “HEVicle Energy Efficiency”].	Identificar publicações relacionados com 4 termos principais.
4. Definição de critérios para inclusão ou exclusão de trabalhos	Critérios de exclusão: -Todos os trabalhos que não sejam artigos científicos. -Todos os resultados repetidos. -Todos os arquivos que não estejam disponíveis para acesso.	Limpeza da base de dados, evitando trabalhos repetidos e não classificados como artigo.
	Critérios de inclusão: -Todos os artigos científicos que atendem aos grupos B e C.	Identificar estudos que abordem o tema de estudo.
5. Seleção dos artigos	Critérios de seleção: -Artigos científicos que atendem totalmente ao objetivo do Trabalho.	Selecionar artigos que abordem a temática do estudo.
6. Análise dos artigos selecionados	Elementos para análise: -Relação de artigos publicados por revista; evolução das publicações por ano; evolução das publicações por País;	Ampliar a compreensão sobre a temática do estudo. Análise da literatura internacional.
7. Apresentação dos resultados	Resultado - Revisão bibliográfica para tese.	Apresentar os resultados, destacando as lacunas e pesquisas futuras oportunidades.

De acordo com os “Passos 1 e 2” e os “Passos 5 e 6”, foi possível montar o Quadro A.2, onde são indicados os principais resultados para cada “Grupo” e “Termos” que foram pesquisados. Neste Quadro, também são apresentadas as plataformas pesquisadas: *Science Direct*, *Google Scholar*, *Crossref* e *Capes* e as palavras-chave buscadas tanto em português quanto em inglês: “*Veículo Elétrico/Electric Vehicles*”, “*Ciclo de Condução/Driving Cycle*”, “*Matriz elétrica Brasileira/Brazilian Energy Matrix*”, “*Emissão de CO₂/HEVicle CO₂ Emission*” e “*Eficiência Energética dos Veículos/Vehicles e Energy Efficiency*”. Devido a temática em estudo ser de grande importância na atualidade, para mapear o comportamento do tema no contexto mundial, foi adotado uma delimitação de horizonte temporal dos últimos 10 anos, ou seja, 2010 a 2020 e não foram utilizados filtros por áreas/categorias de estudos.

Quadro A.2: Resultado do Levantamento das Principais Bases de Dados

GRUPOS	TERMOS UTILIZADOS DA BUSCA	SCIENCE DIRECT	GOOGLE SCHOLAR	CROSSREF	CAPES	TOTAL	%
A	“ <i>Electric Vehicles</i> ”	74.841	594.600	189.394	103.659	5.006.166	32,2
	“ <i>Driving Cycle</i> ”	159.129	347.300	258.541	195.695		
	“ <i>Brazilian Energy Matrix</i> ”	28.496	238.879	1.049.689	15.180		
	“ <i>Vehicles CO₂ Emission</i> ”	7.053	185.935	274.364	17.149		
	“ <i>Vehicles Energy Efficiency</i> ”	108.376	27.800	1.064.470	65.616		
B	“ <i>Electric Vehicles</i> ” and “ <i>Brazilian Energy Matrix</i> ”	1.635	33.500	1.231.794	124	7.756.051	49,7
	“ <i>Electric Vehicle</i> ” and “ <i>Composition of the Brazilian Vehicle Fleet</i> ”	498	22670	592.429	120		
	“ <i>Electric Vehicle</i> ” and “ <i>Vehicle Energy Efficiency</i> ”	51.350	34.830	1.157.724	137		
	“ <i>Composition of the Brazilian Vehicle Fleet</i> ” and “ <i>CO₂ Emission</i> ”	149	20.410	508.240	1		
	“ <i>Brazilian Energy Matrix</i> ” and “ <i>Vehicle Energy Efficiency</i> ”	2.831	27.654	1.278.292	2		
	“ <i>Driving Cycles</i> ” and “ <i>CO₂ Emission</i> ”	6.004	35.442	236.484	46		
	“ <i>Driving Cycles</i> ” and “ <i>Vehicle Energy Efficiency</i> ”	18.355	38.524	1.128.225	33		
	“ <i>Composition of the Brazilian Vehicle Fleet</i> ” and “ <i>Vehicle Energy Efficiency</i> ”	645	20.410	1.307.492	1		

GRUPOS	TERMOS UTILIZADOS DA BUSCA	SCIENCE DIRECT	GOOGLE SCHOLAR	CROSSREF	CAPES	TOTAL	%
C	<i>“Brazilian Energy Matrix” and “CO₂ Emission” and “Vehicle Energy Efficiency”</i>	364	20.162	1.425.236	0	2.823.342	18,1
	<i>“Driving Cycle” and “CO₂ Emission” and “Vehicle Energy Efficiency”</i>	1.719	26.401	1.349.460	0		
Total Geral		461.445	1.674.517	13.051.834	397.763	15.585.559	100

O Quadro A.2 evidencia que os termos *“Veículo Elétrico, Ciclo de Condução, Matriz elétrica Brasileira, Emissão de CO₂ e Eficiência Energética dos Veículos”*, nos últimos 10 anos, foram assuntos bastante pesquisados, obtendo 32,2 % estudos; quando estes 5 termos se relacionam na pesquisa, aumenta ainda mais a quantidade de literatura sobre eles, alcançando 49,7% de estudos. Isso mostra a importância e diversidade da temática deste estudo na atualidade e o quanto ele tem a contribuir com o meio científico em nosso País.

O próximo passo será apresentar os estudos encontrados nos Grupos B e C, após a seleção dos artigos e trabalhos referentes à Temática desta Tese, que deverão ser lidos e considerados dentro do estudo. Durante a leitura verificou-se que havia publicações das áreas de Ciência Sociais, Química, Ciência da Computação, Medicina, entre outras. E também, estudos que faziam referências a outras categorias veiculares, tecnologias e áreas não relacionadas a transporte, não estando dentro do objeto de estudo; sendo assim, todos foram descartados.

A partir disso, foram destacados estudos relevantes sobre a temática no contexto mundial, além de comparar com o que tem sido estudado no contexto nacional. Tal fato dará embasamento para o desenvolvimento da metodologia a ser aplicada. Para os Termos propostos no Grupo B, foram determinados 22 estudos e para os Termos definidos no Grupo C, foram encontrados 14 estudos, conforme serão apresentados posteriormente.

Com o intuito de explorar mais a revisão bibliográfica, buscou-se no Grupo B outros conteúdos que pudessem auxiliar na construção desta Tese. Foram determinadas oito combinações mais próximas ao foco principal do estudo, avaliando o conteúdo que aparecia nas combinações buscadas, tanto em português quanto em inglês: *“Veículo Elétrico” e “Matriz elétrica Brasileira”/“Electric HEVicle” and “Brazilian Energy Matrix”*, *“Veículo Elétrico” e*

“*Composição da Frota Brasileira de Veículos*”/“*Electric HEVicle*” and “*Composition of the Brazilian HEVicle Fleet*”, “*Veículo Elétrico*” e “*Eficiência Energética Veicular*”/“*Electric HEVicle*” and “*HEVicle Energy Efficiency*”, “*Matriz elétrica Brasileira*” e “*Eficiência Energética Veicular*”/“*Brazilian Energy Matrix*” and “*HEVicle Energy Efficiency*”, “*Ciclos de Condução*” e “*Emissão de CO₂*”/“*Driving Cycles*” and “*CO₂ Emission*”, “*Ciclos de Condução*” e “*Eficiência Energética Veicular*”/“*Driving Cycles*” and “*HEVicle Energy Efficiency*” e “*Composição da Frota Brasileira de Veículos*” e “*Eficiência Energética Veicular*”/“*Composition of the Brazilian HEVicle Fleet*” and “*HEVicle Energy Efficiency*”. O Quadro A.3 apresenta os estudos selecionados, listados em ordem cronológica e expondo o título, autor, ano e objetivo.

Quadro A.3: Estudos Relevantes para a Temática do Grupo B

AUTORES	TÍTULO	ANO	OBJETIVO
Faria, R.; Marques, P.; Moura, P.; Freire, F.; Delgado, J.; De Almeida, A. T.	Impact of the electricity mix and use profile in the life-cycle assessment of electric Vehicle.	2013	Avaliar o Ciclo de Vida (LCA) ambiental e econômica para tecnologias convencionais e elétricas de veículos, com foco principalmente na fonte de energia primária e nas emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) da fase de operação do veículo.
Junior, I. C. L.; Valva, D. C.; Guimarães, V. A.; Teodoro, P.	Análise da matriz de transporte brasileira: consumo de energia e emissão de CO ₂ .	2015	Estimar o consumo de energia e a emissão de dióxido de carbono (CO ₂) do setor, com base na matriz de transporte atual.
Fameli, K.; Assimakopoulos, V.	Development of a road transport emission inventory for Greece and the Greater Athens Area: effects of important parameters.	2015	Estimar as emissões rodoviárias na Grécia e na Ática com base na abordagem de cima para baixo.
Liu, J.; Wang, X.; Khattak, A.	Customizing driving cycles to support HEVicle purchase and use decisions: fuel economy estimation for alternative fuel HEVicle users.	2016	Desenvolver uma alternativa de gerar ciclos de condução individualizados, usando um banco de dados de direção do mundo real em grande escala.
Duarte, G. O.; Gonçalves, G. A.; Farias, T. L.	Analysis of fuel consumption and pollutant emissions of regulated and alternative driving cycles based on real-worked measurements.	2016	Analizar o consumo de combustível do veículo e das emissões de poluentes do ciclo de certificação europeu (NEDC) e da proposta mundial de procedimento de teste de veículos (WLTP), Ciclo Classe 3 usando dados coletados na rodovia.
Brady, J.; O` Mahony	Development of a driving cycle to evaluate the energy economy of electric Vehicle in urban areas.	2016	Apresenta dados de EVs utilizados no ciclo de condução do mundo real de modo a avaliar o veículo elétrico.
Roso, V. R.	Ciclos reais de condução veicular em Santa Maria e seus impactos em consumo e emissões.	2016	Avaliar ciclos de condução frente a ciclos reais de condução para a cidade de Santa Maria/RS, no que tange ao consumo de combustíveis e emissões de gases.
Cassiano, D. R.; Ribau, J.; Cavalcante, F. S. A.; Oliveira, M. L. M.; Silva, C. M.	On-board Monitoring and Simulation of Flex Fuel Vehicle in Brazil.	2016	In this paper a novel approach will be followed. A real flex HEVicle will be experimentally measured on the road and results are used to calibrate its HEVicle/powertrain model in AVL-BOOST integration with AVL-CRUISE. Afterwards the hybridization will take place with the calibrated model in computer environment.

Rossito, E. A.	Estudo para aplicação de novas tecnologias visando à melhoria da eficiência energética veicular, no contexto INOVAR.	2017	Analizar as relações entre os subsistemas de veículos leves e os impactos na eficiência energética veicular em um contexto adicional que não apenas a massa média veicular, já conhecida no Inovar Auto.
Lin, b.; Ankranh, I.; Manu, S. A.	Brazilian energy efficiency and energy substitution: a road to cleaner national energy system.	2017	Fornecer uma visão sobre economia e impactos ambientais que o consumo de combustíveis do transporte rodoviário proporciona ao Brasil, dando alternativas para uma energia mais limpa.
Alam, M. S.; Hyde, B.; Duffy, P.; McNabola,	Assessment of pathways to reduce CO ₂ emissions from passenger car fleets: Case study in Ireland.	2017	Modelar frota de passageiros (PC) e outras categorias de transporte rodoviário na Irlanda, de 2015 a 2035 para avaliar o impacto das políticas atuais e potenciais de mitigação de gases de efeito estufa nas emissões de CO ₂ .
Huapu L.; He M.; Zhiyuan S.; Jing W.	Analysis and Prediction on HEVicle Ownership Based on an Improved Stochastic Gompertz Diffusion Process,	2017	Introduzir uma nova equação diferencial estocástica aprimorada, relacionada à curva de <i>Gompertz</i> para a projeção de crescimento da propriedade de veículos.
Plötz, P.; Funke, S. A.; Jochem, P.	The impact of daily and annual driving on fuel economy and CO ₂ emissions of plug-in hybrid electric Vehicle.	2018	Analizar o impacto do ciclo de condução diário e das distâncias anuais percorridas na economia de combustível do PHEV e emissões de CO ₂ , relacionadas com os dados empíricos e simulados.
Lian, L.; Tian, W.; Xu, H.; Zheng, M.	Modeling and Forecasting Passenger Car Ownership Based on Symbolic Regression.	2018	Aplicar a regressão simbólica baseada em dados para encontrar automaticamente uma função generalizada, nomeada como nova equação por regressão simbólica (NE-SR), para propriedade de automóveis de passageiros em seis Países representativos: Japão, Inglaterra, EUA, Finlândia, Polônia e Austrália.
Dong, X.; Wang, B.; Yip, H. L.; Chan, Q. N.	CO ₂ emission of electric and gasoline Vehicle under various road conditions for China, Japan, Europe and world average – Prediction through year 2040.	2019	Utilizar experimentalmente um modelo dinâmico de veículos validado para simular o consumo de gasolina e eletricidade para CVs e VEs, respectivamente, em oito ciclos de condução para diferentes Países/regiões.
Mourad, M; Mahmoud K.	Electrification strategy of hybrid electric HEVicle as a solution to decrease CO ₂ emission in cities.	2019	Apresentar uma metodologia para diminuir a emissão veicular, especialmente a emissão de gases de efeito estufa dentro das cidades.
Hill, G.; Heidrich, O.; Creutzig, F.; Blythe, P.	The role of electric Vehicle in near-term mitigation pathways and achieving the UK's carbon budget.	2019	Demonstrar que EVs, quando comparados a um ICE eficiente, fornecem poucos benefícios em termos de mitigação de CO ₂ até 2030.
Lima, L. M.; Bacchi, M. R. P.	Assessing the impact of Brazilian economic growth on demand for electricity.	2019	Contribuir com a literatura existente, avaliando os impactos de diferentes taxas de crescimento do PIB sobre demanda por eletricidade.
Birke, F. J. B	Who will bell the cat? On the environmental and sustainability risks on electric Vehicle.	2020	Conscientizar os autores e revisores sobre os riscos associados à substituição dos veículos convencionais – especialmente aqueles altamente eficientes em termos de emissões de CO ₂ , por veículos elétricos.
Marín, P. F.; Perales, C. M.	Environmental Aspects of the Electric HEVicle.	2020	Compreender o impacto ambiental completo dos veículos elétricos (EVs) em comparação com os motores de combustão tradicionais (ICE), por meio de uma análise de como as regras europeias têm se adaptado para cobrir esses impactos.
Craglia, M.; Cullen, J.	Do HEVicle efficiency improvements lead to energy savings? The rebound effect in Great Britain.	2020	Determinar por meio de um conjunto de dados de mais de 275 milhões de testes de inspeção técnica de veículos se os custos de viagem podem diferir entre os tipos de veículos e áreas socioeconômicas

			na Grã-Bretanha, verificando que ocorre o efeito rebote.
Czégé, L.; Vámosi, A.; Kocsis, I.	Review on Construction Procedures of Driving Cycles.	2020	Apresentar as técnicas utilizadas na construção de ciclos de condução, de modo a construir ciclos de condução para vários tipos de veículos e rotas.

Para as combinações apontadas, foram separados 97 trabalhos científicos. A partir desses trabalhos, foram realizadas análises em que se descartaram os que foram relacionados a mais de um termo de busca na base, sendo este repetido, e também os que não estavam dentro do objeto de estudo, resultando em 22 trabalhos finais escolhidos.

Para análise realizada no Grupo C, fizeram-se duas combinações, com os quatro termos mais próximos ao foco principal do estudo, avaliando o conteúdo que aparecia nas combinações buscadas, tanto em português quanto em inglês. O primeiro Termo buscado foi “Matriz Elétrica Brasileira” e “Emissão de CO₂”, e “Eficiência Energética Veicular”/“Brazilian Energy Matrix” and “CO₂ Emission” and “HEVicle Energy Efficiency”; o segundo Termo buscado “Ciclo de condução” e “Emissão de CO₂” e “Eficiência energética veicular”/“Driving Cycle” and “CO₂ Emission” and “HEVicle Energy Efficiency”. O Quadro A.4 apresenta os estudos selecionados, listados em ordem cronológica e expondo o título, autor, ano e objetivo.

Quadro A.4: Estudos Relevantes para a Temática do Grupo C

AUTORES	TÍTULO	ANO	OBJETIVO
Borba, B. S. M. C.; Lucena, A. F. P.; Rathmann, R.; Costa, I. V. L.; Nogueira, L. P. P.; Rochedo, P. R. R.; Branco, D. A. C.; Júnior, M. F. H.; Szklo, A.; Schaeffer, R.	Energy-related climate change mitigation in Brazil: potential, abatement costs and associated policies	2012	Estimar o potencial para reduções de emissões de GEE relacionadas à energia e seus custos médios de abatimento no Brasil e propõe algumas medidas políticas para reduzir essas emissões.
Vaz, L. F. H.; Barros, D. C.; Castro, B. H. R.	Veículos híbridos e elétricos: sugestões de políticas públicas para o segmento.	2015	Sugerir políticas públicas para favorecer a difusão de veículos híbridos e elétricos no Brasil, com o objetivo de alcançar um mercado mais eficiente energeticamente, mais sustentável e que induza a inovação no País.
Wu, X.; Zhang, S.; Wu, Y.; Li, Z.; Ke, W.; Fu, L.; Hao, J.	On-road measurement of gaseous emissions and fuel consumption for two hybrid electric Vehicle in Macao.	2015	Avaliar o desempenho de dois Prius HEVs usando um sistema portátil de medição de emissões (PEMS) no mundo real com relação a fatores de emissão gasosa e consumo de combustível.
Liao, F; Molin, E.; Wee, B.	Consumer preferences for electric Vehicle: a literature review.	2017	Orientar os formuladores de políticas públicas e fornecer dados coerentes para pesquisas sobre as preferências que o consumidor do veículo elétrico possui.
Zhou, B.; Zhang, S.; Wu, Y.; Ke, W.; He, X.; Hao, J.	Energy-saving benefits from plug-in hybrid electric Vehicle: perspectives based on real-world measurements.	2017	Apresenta regulamentações globais e políticas de apoio devem enfatizar os benefícios de energia e clima do mundo real do transporte eletrificado emergente tecnologias.

Triantafyllopoulos, G.; Kontses, A.; Tsokolis, D.; Ntziachristos, L.; Samaras, Z.	Potential of energy efficiency technologies in reducing HEVicle consumption under type approval and real-world conditions.	2017	Analizar se o novo procedimento direcionará o desenvolvimento de veículos para novas opções de tecnologia para reduzir o CO ₂ e avaliar o impacto das opções de tecnologia identificadas na redução do consumo de combustível.
Almeida, J. R. C. U.; Santos, A. A. B. S.; Jr. Silva, A. F.; Junior, J. U. P.	Veículos elétricos no Brasil, desafios para sua adoção e seu potencial de contribuição na redução dos gases de efeito estufa.	2018	Realizar uma avaliação de como os avanços plausíveis em EVs poderiam impactar sobre a demanda futura de combustíveis fósseis no Brasil, bem como nos esforços do Brasil para alcançar metas climáticas internacionais, que subsidiaram a pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada (INDC ou iNDc, na sigla em inglês) brasileira no que se refere à produção e uso da energia.
Policarpo, N. A.; Silva, C.; Lopes, T. F. A.; dos Santos Araújo, R.; Cavalcante, F. S. Á.; Pitombo, C. S.; De Oliveira, M. L. M.	Road HEVicle emission inventory of a Brazilian metropolitan area and insights for other emerging economies.	2018	Estimar as emissões dos veículos rodoviários de CO, NMHC, RCHO, NOx e PM, considerando as principais categorias de veículos e tipos de combustíveis usados no Brasil (ou seja, gasolina, etanol hidratado e diesel).
Teixeira, A. C. R; Sodré, J. R.	Impacts of replacement of engine powered Vehicle by electric Vehicle on energy consumption and CO ₂ emissions.	2018	Avaliar os impactos no consumo de energia e nas emissões de dióxido de carbono (CO ₂), a partir da introdução de veículos elétricos em uma rede inteligente, como um estudo de caso.
Charadsuksawat, A.; Laoonual, Y.; Chollacoop, N.	Comparative study of hybrid electric HEVicle and conventional HEVicle under New European Driving Cycle and Bangkok Driving Cycle.	2018	Investigar e comparar o consumo de combustível, emissão de CO ₂ , operação do motor e tanque para a eficiência das rodas de veículos elétricos híbridos e convencionais veículos usando um dinamômetro de chassi com o novo Ciclo Europeu de condução (NEDC) e o Ciclo de condução de Bangkok (BDC).
Risso, M. L.	O Desenvolvimento da Indústria de Veículos Elétricos no Brasil: O Papel das Políticas Públicas	2018	Discussir o papel das políticas públicas no desenvolvimento da emergente indústria de veículos elétricos no Brasil, dado o potencial transformador que os mesmos podem ter no processo de renovação da indústria automotiva nacional e na redução das emissões de CO ₂ .
Volan, T.; Vaz, C. R.; Maldonado, M. U.	Panorama do estado atual da difusão de veículos elétricos no Brasil.	2019	Contribuir com o panorama atual da difusão de veículos elétricos no País, apresentando os avanços atuais do setor bem como os desafios de curto e longo prazo.
Qiao, Q.; Zhao, F.; Liu, Z.; He, X.; Hao, H.	Life cycle greenhouse gas emissions of Electric Vehicle in China: combining the HEVicle cycle and fuel cycle.	2019	Analizar as emissões de GEE da fase Cradle-to-Gate (CTG), fase Well-to-Wheel (WTW) e fase Grave-to-Cradle (GTC) para diferentes veículos em diferentes tempos, com o intuito de descobrir os principais fatores e oportunidades de redução, que são baseados no modelo “sedan compacto classe A0-A” bem vendido atualmente na China.
Liu, H.; Guensler, R.; Lu, H.; Xu, Y.; Rodgers, M. O.	MOVES-Matrix for high-performance on-road energy and running emission rate modeling applications	2019	Apresentar estudo de caso hipotético realizado com MOVES-Matrix que é capaz de gerar exatamente os mesmos resultados de emissão que o modelo MOVES para garantir a validade para análise regulatória. A matriz resultante permite aos usuários vincular as taxas de emissão a projetos de big data e para avaliar as mudanças nas emissões para sistemas de transporte dinâmicos em tempo quase real.

Para as duas combinações apresentadas, foram separados 54 trabalhos científicos. A partir desses trabalhos, foram realizadas análises em que se descartaram os que foram relacionados aos dois termos de busca na base, e também os que não estavam dentro do objeto de estudo, resultando em 14 trabalhos finais escolhidos.

A partir dos dois grupos, B e C, têm-se 34 trabalhos, entre dissertações e teses (mestrado ou doutorado), periódicos e publicações de organizações internacionais. Vale destacar que nem todas as referências utilizadas tratam apenas de veículo elétrico ou emissão de CO₂, mas sim listam princípios e conceitos que devem nortear o estudo desta Tese.

Outro fator primordial que ocorreu, de acordo com a Temática deste estudo e a partir das análises realizadas nos trabalhos científicos, foi a necessidade de realizar levantamentos em busca de Balanços, Documentos, Inventário, Normas, Notas Técnicas e Relatórios que não constam nas bases de dados pesquisadas, mas são de grande relevância para o estudo.

Sendo assim, foram realizadas buscas nas bases de dados do *Google*, Governo Federal, Governo do Distrito Federal, Autarquias e Empresas Públicas. Foram então, identificados Balanços, Notas e Relatórios da Empresa de Pesquisa Energética (EPE/BEM), do Ministério de Minas e Energia (MME), da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Bancos de Dados, Relatórios e Documentos do Departamento de Trânsito do Distrito Federal (DETRAN-DF) e do Departamento Nacional de Trânsito (SENATRAN). Relatórios e Inventários da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), isso para o período de 2010 a 2020.

Após a definição dos estudos relevantes ao desenvolvimento da Tese, serão apresentados os resultados da revisão da literatura com apoio de uma revisão sistemática acerca dos estudos mais relevantes sobre a temática e as revisões de assuntos primordiais para esta pesquisa, tais como: veículo elétrico, ciclo de condução, matriz elétrica brasileira, emissão de CO₂, eficiência energética dos veículos e as pesquisas desenvolvidas dentro da temática abordada.

APÊNDICE B – CONTROLADORES DE VELOCIDADES ROTAS ESTUDADAS

Quadro B.1: Localização dos Controladores do DER

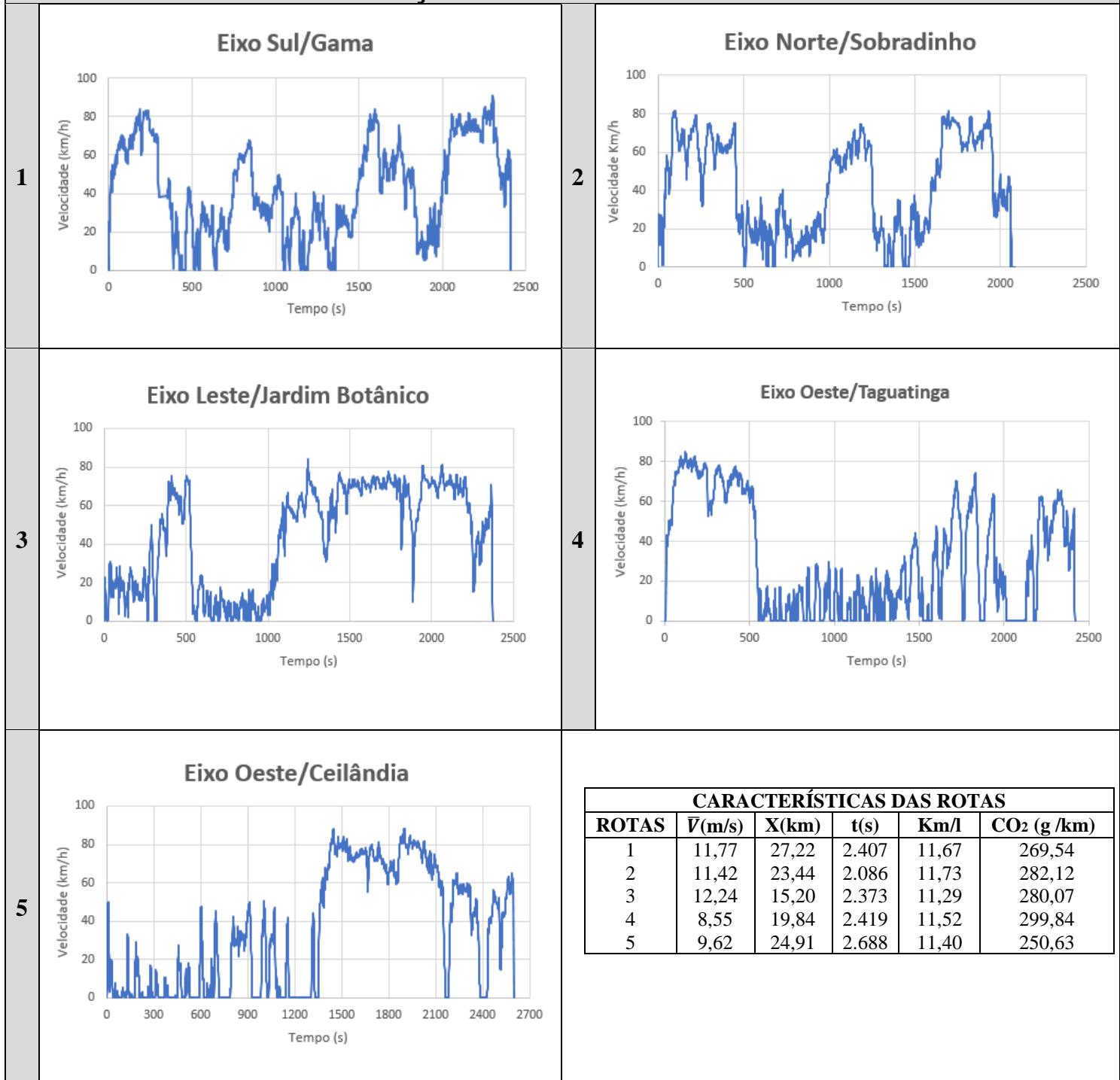
ROTAS	LOCALIDADE	CONTROLADOR	DESCRÍÇÃO
Norte	Sobradinho	PD 302	DF-003 - BR-020/DF-001 à DF-095 - km 3,6 - sentido Sul (DF-095)
		PD 303	DF-003 - BR-020/DF-001 à DF-095 - km 4,2 - sentido Norte (Balão do Colorado)
	Ponte do Bragueto	PD 001	DF-007 (EPTT) km 1,1 - sentido Ponte do Bragueto
		PD 002	DF-007 (EPTT) km 1,4 - sentido Ponte do Bragueto
	Eixão Norte	PD 011	DF-002 (Eixão Norte) km 5,8 - sentido Ponte do Bragueto
		PD 012	DF-002 (Eixão Norte) km 5,8 - sentido Rodoviária
Sul	Gama	PD 367	DF-480 - km 1,7 - sentido DF-001 (Balão do Gama)
		PD 369	DF-480 - km 1,9 - sentido Gama
	EPIA	PD 324	DF-003 - (EPIA) km 27,7 Sentido Norte
		PD 181	DF-003 - (EPIA) km 25,8 Sentido Sul
	Aeroporto	PD 123	DF-025 - (EPDB) km 1,3 Sentido DF-003 (EPIA)
		PD 371	DF-025 - (EPDB) km 1,4 sentido dF-047 (Balão do Aeroporto)
	Eixão Sul	PD 016	DF-002 - (EIXO SUL) km 8,6 Sentido Aeroporto
		PD 021	DF-002 - (EIXO SUL) km 10 Sentido Rodoviária
Leste	Jardim Botânico	PD 076	DF-027 - (EPJK) - km 0,7 - Sentido Ponte JK
		PD 087	DF-001 - (EPCT) - km 26,9 - Sentido DF-027 (Balão da EPJK)
		PD 092	DF-001 - (EPCT) km 28,6 Sentido DF-035 (Balão da ESAF)
Oeste Taguatinga	Taguatinga	PD 269	DF-085 (EPTG) - km 1,8 Taguatinga Sentido Plano Piloto
		PD 347	DF-085 (EPTG) - km 1,3 Plano Piloto Sentido Taguatinga
		PD 438	DF-085 (EPTG) (Via Principal) - km 6,5 - sentido DF-003 (Plano Piloto)
		PD 433	DF-085 (EPTG) (Via Principal) km 6,7 Via Principal - Sentido DF-001 (Taguatinga)
	Octogonal Sudoeste	PD 247	DF-011 (EPIG) - km 3,5 - sentido Eixo Monumental/DF-085 EPTG
		PD 249	DF-011 (EPIG) - km 4 - sentido EPTG/Eixo Monumental (prox. Posto Gasolina)
Oeste Ceilândia	Estrutural	PD 212	DF-095 (EPCL) Estrutural - km 0,8 - Sentido Bidirecional Pista Sul
		PD 215	DF-095 (EPCL) Estrutural - km 0,8 - Sentido Bidirecional Pista Norte
		PD 218	DF-095 (EPCL) Estrutural - km 4,9 - Sentido DF-003 (EPIA)

Quadro B.2: Fluxo Veicular nas Rotas de Estudo

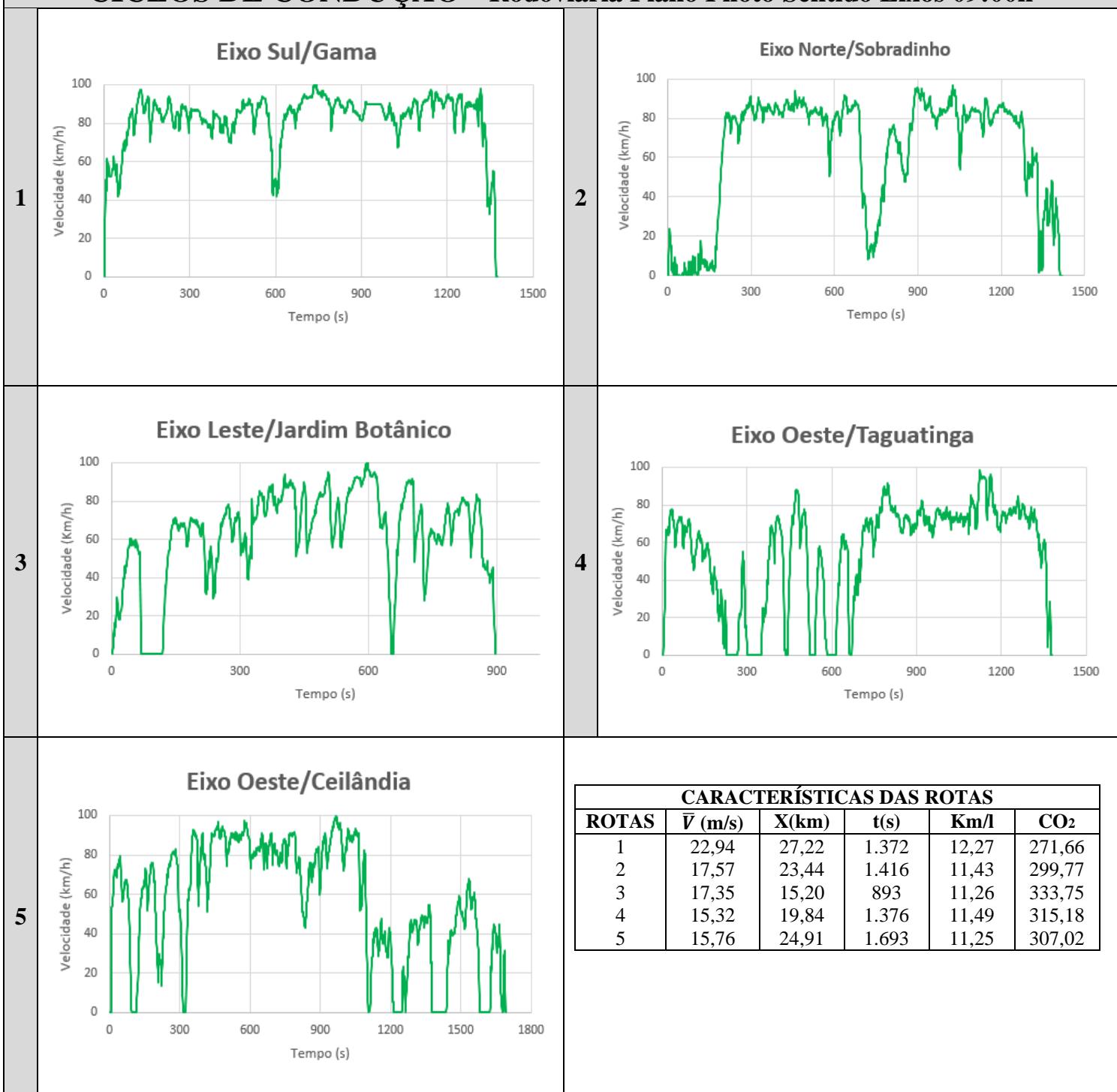
ROTA/PERÍODO	TOTAL VEÍCULOS	VEÍCULOS Ano 2012	TOTAL VEÍCULOS	VEÍCULOS Ano 2012
Norte	Sobradinho/Rodoviária		Rodoviária/Sobradinho	
24h	10.892	758	7.173	499
4h-10h	4.815	335	1.501	104
15h-20h	2.993	208	3.297	229
Sul	Gama/Rodoviária		Rodoviária/Gama	
24h	19.734	1.373	19.375	1.349
4h-10h	8.432	587	4.854	338
15h-20h	5.344	372	7.675	534
Leste	Jardim Botânico/Rodoviária		Rodoviária/Jardim Botânico	
24h	10.184	709	13.505	940
4h-10h	5.737	399	2.735	190
15h-20h	2.033	141	6.716	467
Oeste Ceilândia	Ceilândia/Rodoviária		Rodoviária/Ceilândia	
24h	21.450	1.493	21.289	1.482
4h-10h	9.389	653	5.235	364
15h-20h	5.578	388	8.839	615
Oeste Taguatinga	Taguatinga/Rodoviária		Rodoviária/Taguatinga	
24h	21.920	1.526	19.840	1.381
4h-10h	7.251	505	4.411	307
15h-20h	6.842	476	7.732	538

APÊNDICE C – CICLOS DE CONDUÇÃO

CICLOS DE CONDUÇÃO – Sentido Rodoviária do Plano Piloto 07:30h



CICLOS DE CONDUÇÃO – Rodoviária Plano Piloto Sentido Eixos 09:00h



CICLOS DE CONDUÇÃO – Sentido Rodoviário do Plano Piloto 10:00h

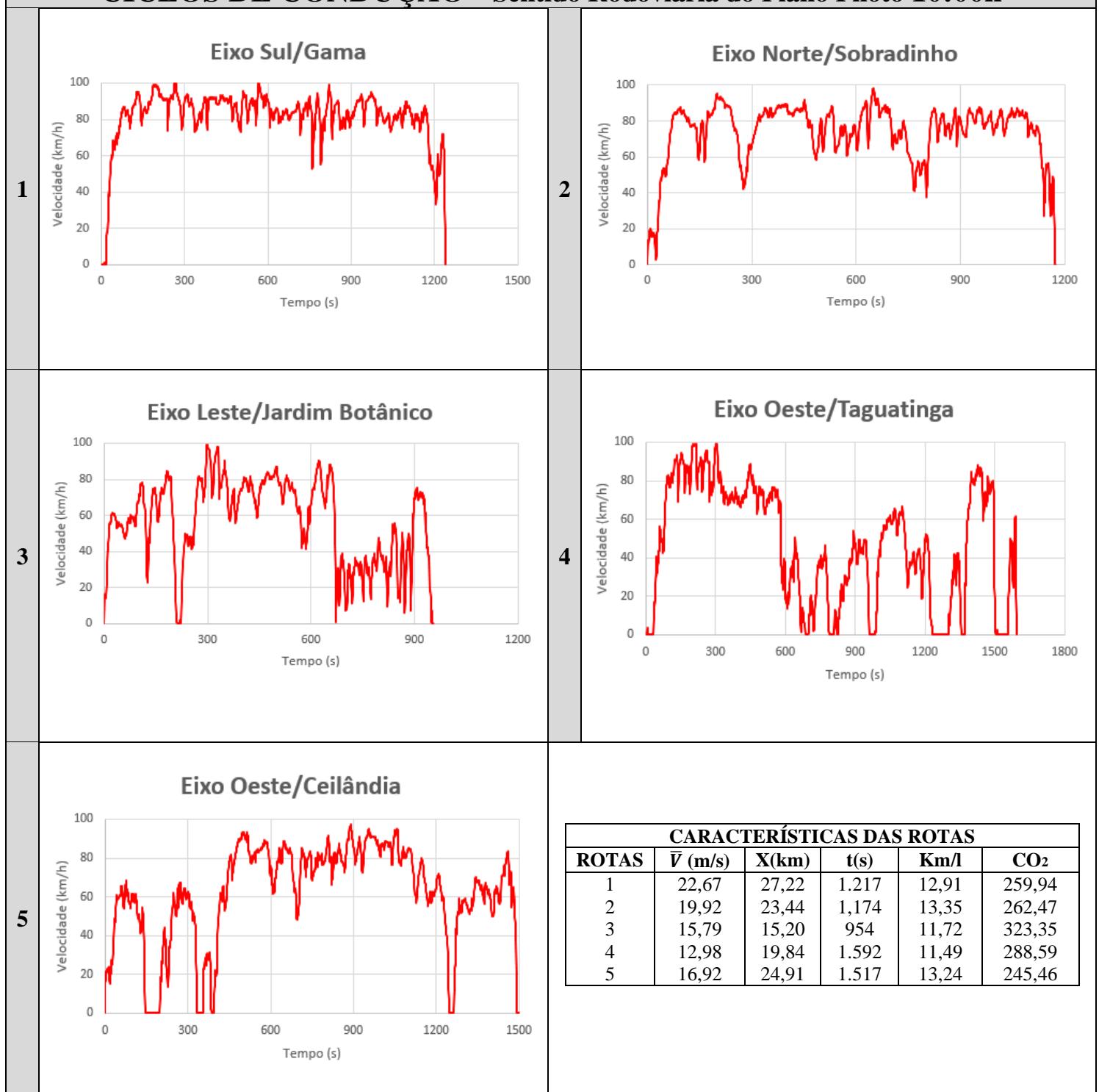


Figura C.1: Ciclos de Condução do Mundo Real/Brasília-DF

Tabela C.1: Características dos Ciclos de Condução nas Rotas/Brasília-DF

Tecnologia	Horário	Rotas	t(s)	X(km)	$\bar{V}(\text{km/h})$	Autonomia	FTP-75 (%)				
MCI-FOX	7:30h	Sul/Gama	2.407	27,70	42	11,0 km/l	-9,1				
		Oeste/Ceilândia	2.598	23,99	34	11,4 km/l	-5,8				
		Leste/Jd. Botânico	2.373	27,95	44	10,3 km/l	-14,9				
		Norte/Sobradinho	2.086	23,40	41	11,4 km/l	-5,8				
		Oeste/Taguatinga	2.419	19,80	31	10,7 km/l	-11,6				
	10:00h	Sul/Gama	1.217	27,40	81	12,6 km/l	4,1				
		Oeste/Ceilândia	1.500	25,30	62	13,2 km/l	9,1				
		Leste/Jd. Botânico	954	14,60	57	11,8 km/l	-2,5				
		Norte/Sobradinho	1.174	23,70	72	13,3 km/l	9,9				
		Oeste/Taguatinga	1.592	20,10	47	11,2 km/l	-7,4				
MCI-FOX	7:30h	Sul/Gama	3.031	27,70	34	9,1 km/l	7,1				
		Oeste/Ceilândia	2.807	24,00	34	8,7 km/l	2,4				
		Leste/Jd. Botânico	2.093	28,00	28	7,6 km/l	-10,6				
		Norte/Sobradinho	1.568	23,40	48	10,5 km/l	23,5				
		Oeste/Taguatinga	1.930	19,80	38	9,5 km/l	11,8				
	10:00h	Sul/Gama	1.304	27,40	78	10,1 km/l	18,8				
		Oeste/Ceilândia	1.693	25,30	55	10,6 km/l	24,7				
		Leste/Jd. Botânico	984	14,70	61	10,3 km/l	21,2				
		Norte/Sobradinho	1.196	23,50	71	12,4 km/l	45,9				
		Oeste/Taguatinga	1.375	19,80	54	10,6 km/l	24,7				
HEV-PRIUS	7:30h	Sul/Gama	2.815	27,70	30	13,2 km/l	17,9				
Gasolina	10:00h		1.984	27,40	66	11,7 km/l	4,5				
BEV-LEAF	7:30h		3.011	27,70	35	12,2 km/kWh	79,4 %				
Elétrico	10:00h		1.517	27,40	73	6,5 km/kWh	- 4,4%				
FTP-75	Veículo Elétrico		2.474	17,77	34	6,8 km/kWh	-				
	MCI Gasolina					12,1 km/l	-				
	MCI Etanol					8,5 km/l	-				

