



**MODELO NUMÉRICO DOS CONSUMOS ENERGÉTICOS E
EMISSÕES DE CO₂ COMO APOIO AOS PLANOS DE
MOBILIDADE**

EDWIN FRANCISCO FERREIRA SILVA

TESE DE DOUTORADO EM TRANSPORTES

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

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

**MODELO NUMÉRICO DOS CONSUMOS ENERGÉTICOS E
EMISSÕES DE CO₂ COMO APOIO AOS PLANOS DE
MOBILIDADE**

EDWIN F. F. SILVA

ORIENTADOR: AUGUSTO CESAR DE MENDONÇA BRASIL

TESE DE DOUTORADO EM TRANSPORTES

**PUBLICAÇÃO: T.TD-003/2023
BRASÍLIA/DF: MARÇO/2024**

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

**MODELO NUMÉRICO DOS CONSUMOS ENERGÉTICOS E
EMISSÕES DE CO₂ COMO APOIO AOS PLANOS DE
MOBILIDADE**

EDWIN F. F. SILVA

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 REQUISITOS 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.: LUIZA CARLA GIRARD MENDES TEIXEIRA, Dr^a. (UFPA)
(EXAMINADORA EXTERNA)**

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

BRASÍLIA/DF, 21 de DEZEMBRO de 2023.

FICHA CATALOGRÁFICA

SILVA, EDWIN FRANCISCO FERREIRA

Modelo numérico dos consumos energéticos e emissões de CO₂ como apoio aos planos de mobilidade. Brasília, 2023

xvi, 128p., 210x297mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Transportes, 2023).

Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1 – Consumo energético

3 – Modelo

I – ENC/FT/UnB

2 – Emissões de CO₂

4 – Planos de mobilidade

II – Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

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.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: EDWIN FRANCISCO FERREIRA SILVA

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Modelo numérico dos consumos energéticos e emissões de CO₂ como apoio aos planos de mobilidade.

GRAU: Doutor ANO: 2023

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.

Edwin Francisco Ferreira Silva

E-mail: edw3in@gmail.com

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

Distrito Federal: 70910-900

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho ao meu filho Henrique e a minha esposa Alinne por ter tido paciência quanto aos momentos em que estive ausente e por terem me guiado ao longo dessa jornada.

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, devo uma imensa gratidão à minha família, que foi a base de todo o apoio e incentivo que recebi durante este desafiador percurso acadêmico. A presença e o amor de vocês foram a força motriz que me impulsionou a seguir em frente, mesmo nos momentos mais difíceis.

Um agradecimento especial é direcionado ao Professor Augusto, cuja paciência e sabedoria foram pilares essenciais na minha jornada. Em momentos em que a desistência parecia inevitável, suas orientações e palavras encorajadoras, como "que nada, vamos em frente", iluminaram meu caminho. Sou eternamente grato por sua inestimável contribuição.

Expresso minha gratidão ao meu grande amigo de vida e de tese, Wesley, por sua companhia e apoio durante os inúmeros finais de semana dedicados a este trabalho, longe de nossas famílias. Sua presença foi indispensável para tornar esta jornada mais suportável e significativa.

Meus sinceros agradecimentos também aos amigos Cleber e Mauro, que sempre me encorajaram a concluir este projeto.

À Camila, agradeço por estar sempre torcendo por mim, incentivando-me a concluir o doutorado e oferecendo suporte nas questões burocráticas.

Um agradecimento especial à Ângela, por sua amizade e apoio constantes.

Aos Professores Thiago, Fabiana, Mona Lisa e Luiza Carla, expresso minha sincera gratidão por suas orientações valiosas e pelo incentivo que me proporcionaram. Suas contribuições foram fundamentais para o enriquecimento deste trabalho.

À Cristina, minha gratidão por sua acolhida tão carinhosa e por estar sempre disponível nos dias de orientação.

Agradeço, à Universidade de Brasília, à Faculdade de Tecnologia, ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental e ao Programa de Pós-graduação em Transportes (PPGT), também gostaria de agradecer a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Por fim, mas não menos importante, agradeço aos meus colegas da Unieuro, cuja amizade e colaboração foram essenciais para tornar essa experiência acadêmica ainda mais enriquecedora. Este trabalho é o resultado do suporte, da paciência e do amor de cada um de vocês. Minha jornada até aqui foi marcada e iluminada pela presença e pelo incentivo de todos.

Muito obrigado.

RESUMO

Este estudo tem como proposta o desenvolvimento de uma modelo para determinar o consumo energético e emissões de CO₂ em planos de mobilidade. Para isso foram realizadas medidas em campo utilizando três veículos com a mesma relação peso potência. Um veículo a combustão interna, um veículo híbrido e um veículo elétrico. Viagens foram realizadas, em cinco rotas principais, de modo a caracterizar os ciclos de condução do Distrito Federal. Na sequência funções de correlação universais foram propostas para diferentes tecnologias veiculares, para os horários de pico e fora de pico, associando o consumo de combustível e as emissões de CO₂ com a velocidade. Ainda, usando os dados consolidados de velocidade média nas rotas, tanto pela medição dos dados de diagnóstico a bordo OBD, quanto em informações de radares de trânsito. Uma análise da distribuição de frequência foi realizada, caracterizando as respectivas velocidades por faixa, o que permitiu estabelecer o percentual de velocidades que compõem as viagens, para os horários de pico e fora de pico. Em uma segunda abordagem do estudo, os dados obtidos foram codificados usando o Excel de modo a resultar em uma visão agregada modo a dar uma saída de dados agregados do consumo e das emissões de CO₂ em termos do número de viagens, determinadas nos planos de mobilidade, da distância percorrida e da porcentagem de cada tecnologia estabelecida. Assim, um modelo foi desenvolvido e calibrado para a cidade de Brasília, e posteriormente utilizado para simular cenários futuros utilizando diferentes tecnologias, para os horários de pico e fora de pico. Os resultados obtidos com o modelo desenvolvido mostraram que, com a maior participação de veículos mais eficientes, como veículos elétricos a bateria (BEV) e veículos híbridos (HEV), e uma participação ainda maior de veículos movidos a etanol, ocorre uma redução significativa nas emissões de CO₂. Por fim, o uso da ferramenta desenvolvida permite que gestores e especialistas em planejamento de transporte, por meio da geração de cenários futuros, proponham e implementem políticas mais eficazes para reduzir as emissões de CO₂, contribuindo assim para uma mobilidade mais sustentável.

Palavras Chaves: Consumo energético; Emissões de CO₂; Modelo; Planos de mobilidade

ABSTRACT

This study proposes the development of a model to determine energy consumption and CO₂ emissions in mobility plans. For this purpose, field measurements were conducted using three vehicles with the same power-to-weight ratio: an internal combustion vehicle, a hybrid vehicle, and an electric vehicle. Trips were undertaken on five main routes to characterize the driving cycles of the Federal District. Subsequently, universal correlation functions were proposed for different vehicular technologies, for peak and off-peak hours, associating fuel consumption and CO₂ emissions with speed. Additionally, using the consolidated data of average speed on the routes, both from the measurement of onboard diagnostic (OBD) data and from traffic radar information, a frequency distribution analysis was conducted, characterizing the respective speeds by range. This allowed for the establishment of the percentage of speeds that make up the trips, for peak and off-peak hours. In a second approach to the study, the obtained data were coded using Excel to result in an aggregated view, yielding data on the consumption and emissions of CO₂ in terms of the number of trips determined in the mobility plans, the distance traveled, and the percentage of each established technology. Thus, a model was developed and calibrated for the city of Brasília, and later used to simulate future scenarios using different technologies, for peak and off-peak hours. The results obtained with the developed model showed that with a greater participation of more efficient vehicles, such as battery electric vehicles (BEV) and hybrid vehicles (HEV), and an even greater participation of ethanol-powered vehicles, there is a significant reduction in CO₂ emissions. Finally, the use of the developed tool allows managers and transportation planning experts, through the generation of future scenarios, to propose and implement more effective policies to reduce CO₂ emissions, thereby contributing to more sustainable mobility.

Keywords: Energy Consumption; CO₂ Emissions; Model; Mobility Plans

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 OBJETIVOS	3
1.2.1 Objetivo Geral	3
1.2.2 Objetivos Específicos	4
1.3 JUSTIFICATIVA	4
2. REVISÃO DA LITERATURA	8
2.1 Emissões no setor de transporte	8
2.2 Metodologia de Cálculo de emissões	11
2.3 Metodologias brasileiras de avaliação de emissões veiculares	18
2.3.1 Cálculo de emissões Veiculares	18
2.4. POTÊNCIA ESPECÍFICA DO VEÍCULO (VSP)	21
2.5. CICLOS DE CONDUÇÃO DE VEÍCULOS	25
2.5.1 Ciclos Americanos	26
2.5.2 Ciclos Europeus.....	29
2.5.3 Ciclos Asiáticos.....	34
2.5.4 Sistema de Avaliação Brasileiro	35
2.5.5 Ciclos Reais de Condução Veicular	38
2.6. Simulação numérica da dinâmica veicular	40
2.7. Planos de Mobilidade	46
2.7.1 O Planejamento da mobilidade urbana no DF	47
2.7.2 Plano Diretor de Transporte Urbano do Distrito Federal.....	48
2.7.3 Medidas de sustentabilidade e cálculo de emissões em Planos de Mobilidade	50
3. MATERIAIS E MÉTODOS	52
3.1 CARACTERIZAÇÃO DAS ROTAS	53
3.2 ESTUDO EXPERIMENTAL COM MEDIÇÕES DE VELOCIDADES, CONSUMOS E EMISSÕES DE CO₂	55
3.2.1 Determinação das propriedades do combustível e calibração dos consumos ..	56
3.2.2 Caracterização dos ciclos de condução nas rotas	59
3.3 CARACTERIZAÇÃO DA FROTA DE VEÍCULOS LEVES	60
3.4 VEÍCULOS USADOS NAS ROTAS	62
3.5 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DE VEÍCULOS NAS ROTAS	63

3.6	CARACTERIZAÇÃO DOS CICLOS DE VELOCIDADES E FUNÇÕES PROPOSTAS DE CONSUMO ENERGÉTICO E CO₂	70
3.7	ABORDAGEM DAS EMISSÕES POR VSP	72
3.7.1	Emissões usando o método VSP	75
3.8	MODELO PROPOSTO PARA CONSUMO DE ENERGIA / COMBUSTÍVEL E EMISSÕES DE CO₂	75
4.	ANÁLISE DOS RESULTADOS	78
4.1	CICLOS DE CONDUÇÃO, CONSUMO DE COMBUSTÍVEL E EMISSÕES DE CO₂ DE VEÍCULOS NAS ROTAS	78
4.2.	FUNÇÕES DE CORRELAÇÃO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL E CO₂ 81	
4.3.	HISTOGRAMA DO PERFIL DE VELOCIDADE MÉDIA NAS ROTAS	85
4.4.	ABORDAGEM VSP	91
4.5.	ESTIMATIVA DE EMISSÕES PARA AS DIFERENTES ROTAS UTILIZANDO VSP	93
4.6.	CONSOLIDAÇÃO DO MODELO	96
4.7.	APLICAÇÃO DO MODELO NAS ROTAS DE BRASÍLIA	99
5.	CONCLUSÃO	105
5.1	CONCLUSÕES GERAIS	105
5.2	LIMITAÇÕES DO TRABALHO	106
5.3	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	107
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108
	APÊNDICE A: CARACTERÍSTICAS DOS VEÍCULOS UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES	121
	APÊNDICE B: CICLOS DE CONDUÇÃO	122
	APÊNDICE C: ABORDAGEM A RESPEITO DAS EMISSÕES DE HC, CO e NO_x ..	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Definição dos modos VSP.....	23
Tabela 2.2 Taxas médias de emissão por modo de (VSP) para automóveis de passageiros Tier2	24
Tabela 2.3 Comparação NEDC e WLTP	32
Tabela 2.4 Comparação entre os principais ciclos de condução selecionados.....	35
Tabela 3.1 Características da média das rotas para teste com o tanque externo	58
Tabela 3.2 Principais características dos ciclos de condução para diferentes horários e diferentes tecnologias.....	60
Tabela 3.3 Veículo convencional FOX – 2013 – parâmetros de simulação em diferentes ciclos e com diferentes tecnologias	66
Tabela 3.4 FOX - Valores médios gerais das medições do ciclo real, valores médios simulados e simulações médias para o FTP-75.....	68
Tabela 3.5 PRIUS - Valores médios gerais das medições do ciclo real, valores médios simulados e simulações médias para o FTP-75.....	68
Tabela 3.6 Consumo energético para as 5 rotas usando o BEV (km/kWh).....	69
Tabela 3.7 Distribuição de VSP por faixa.....	74
Tabela 4.1 Características das rotas	79
Tabela 4.2 Diferenças identificadas entre o Consumo e CO ₂ para as rotas e o ciclo FTP-75 .	80
Tabela 4.3 Melhor correlação do consumo de combustível em função da velocidade para diferentes tecnologias.....	84
Tabela 4.4 Melhor correlação de emissões de CO ₂ em função da velocidade para diferentes tecnologias.....	85
Tabela 4.5 Fluxo médio de veículos nas rotas	89
Tabela 4.6 VSP <i>mode</i> nos horários de pico e fora de pico.....	94
Tabela 4.7 Variáveis de entrada do Modelo.....	97
Tabela 4.8 Características do cenário atual.....	99

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Série histórica de emissões de CO ₂ do Transporte Terrestre do Brasil (1990-2020)	8
Figura 2.2 Vendas globais, anuais de veículos de passageiros por tecnologia no mundo	9
Figura 2.3 Curva de penetração de tecnologias no licenciamento de veículos leves	10
Figura 2.4 Quatro forças na dinâmica do movimento do veículo	22
Figura 2.5 Gráfico do ciclo Urban Dynamometer Driving (UDDS)	27
Figura 2.6 Federal Test Procedure (FTP)	28
Figura 2.7 Highway Fuel Economy Test (HWFET)	29
Figura 2.8 The New European Driving Cycle (NEDC)	30
Figura 2.9 Ciclo de condução transitório – WLTC	31
Figura 2.10 O ciclo ARTEMIS	33
Figura 2.11 Ciclo 10-15 Mode	34
Figura 2.12 Ciclo JC08	35
Figura 2.13 Padrão de etiqueta utilizada pelo PBEV	37
Figura 2.14 Processo de simulação do PSAT	42
Figura 2.15 ADVISOR. Tela principal e arquitetura de bibliotecas	44
Figura 2.16 Emissões de gases de efeito estufa no setor de transporte rodoviário	50
Figura 3.1 Detalhamento dos tópicos a serem explorados ao longo do trabalho	53
Figura 3.2 Rotas da área de estudo	54
Figura 3.3 Representação de um OBD2 e do software Torque Pró	55
Figura 3.4 Representação de um recorte dos dados obtidos nas rotas pelo OBD	56
Figura 3.5 Etapas e procedimentos adotados para determinar o consumo de combustível com uso de um tanque externo	57
Figura 3.6 Histograma da idade da frota de veículos leves com os níveis correspondentes e a linha sólida representa a função de distribuição de probabilidade da idade dos veículos	61
Figura 3.7 Economia de combustível e fator de emissão de CO ₂ influenciados pelo ano de fabricação e Nível	62
Figura 3.8 Mapa de emissões em termos da rotação do motor e do torque	64
Figura 3.9 Diagrama de blocos central do Simulink para simulação de veículos	65
Figura 3.10 Sub-blocos usados na caracterização dos veículos	65
Figura 3.11 Calibração do CO ₂ com base nos dados de RUBIN & ZHAI, 2012	71
Figura 3.12 Distribuição de VSP para média de dados obtidos para as diferentes rotas, em horários de pico e fora de pico	72
Figura 3.13 Distribuição de VSP para média de dados obtidos para as diferentes rotas, em horários de pico e fora de pico, sem os VSPs = 0	73
Figura 3.14 Distribuição de VSP para média de dados obtidos para, em horários de pico e fora de pico para HEV	74
Figura 3.15 Metodologia ascendente para determinar o consumo de energia / combustível e as emissões de CO ₂ para estudos de planejamento de transporte	76
Figura 4.1 Ciclos de condução no mundo real de cinco rotas durante horários de pico e fora de pico, em comparação com FTP-75	78
Figura 4.2 Ciclos de condução no mundo real de cinco rotas durante horários de pico e fora de pico, em comparação com FTP-75	79
Figura 4.3 Velocidade em função do consumo utilizando gasolina para um veículo a combustão interna	82
Figura 4.4 Velocidade em função do consumo utilizando etanol para um veículo a combustão interna	83
Figura 4.5 Velocidade em função do consumo utilizando gasolina para um veículo híbrido	83
Figura 4.6 Velocidade em função do consumo para um veículo elétrico	84
Figura 4.7 Fluxo de tráfego e Histograma de velocidades - Eixo Norte / Brasília – DF	86

Figura 4.8 Fluxo de tráfego e Histograma de velocidades - Eixo Sul / Brasília – DF	86
Figura 4.9 Fluxo de tráfego e Histograma de velocidades nos horários de pico e fora de pico - Eixo Leste / Brasília – DF	87
Figura 4.10 Fluxo de tráfego e Histograma de velocidades nos horários de pico e fora de pico - Eixo Oeste (Ceilândia)/ Brasília – DF	87
Figura 4.11 Fluxo de tráfego e Histograma de velocidades nos horários de pico e fora de pico - Eixo Oeste (Taguatinga)/ Brasília – DF.....	88
Figura 4.12 Curva média de fluxo de veículos para as cinco rotas	88
Figura 4.13 Histogramas das velocidades para as cinco rotas, para horários de pico e fora de pico, estabelecendo o percentual de velocidades que compõem as viagens	90
Figura 4.14 Relação entre VSP (KW/ton) e as taxas de emissão de CO ₂ em (g/s) - MCI.....	91
Figura 4.15 Relação entre VSP (KW/ton) e as taxas de emissão de CO ₂ em (g/s) - HEV	92
Figura 4.16 Comparação dos Valores em Pico e Fora de Pico para diferentes poluentes	95
Figura 4.17 Comparação das Emissões de CO ₂ em Pico e Fora de Pico usando OBD e VSP	96
Figura 4.18 Estrutura geral do modelo.....	97
Figura 4.19 PDTT - Linhas de Desejo – 2036	99
Figura 4.20 Aumento da participação de etanol na frota	100
Figura 4.21 Aumento da participação dos HEV a Gasolina na frota	101
Figura 4.22 Aumento da participação HEV à etanol	101
Figura 4.23 Aumento da participação de BEV na frota	102

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADVISOR	<i>Advanced Vehicle Simulator</i>
ANL	<i>Argonne National Laboratory</i>
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
BEV	Veículo Elétrico a Bateria
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CMEM	<i>Comprehensive Modal Emission Model</i>
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
COPERT	Emissões de Transporte Rodoviário
DETRAN	Departamento Estadual de Trânsito
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EEA	Agência Ambiental Europeia
EPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FASTsim	<i>Future Automotive Systems Technology Simulator</i>
FTP	<i>Federal Test Procedure</i>
GEE	Gases de Efeito Estufa
HC	Hidrocarbonetos
HEV	Veículo Elétrico Híbrido
HWFET	<i>Highway Fuel Economy Test</i>
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IVE	Modelo Internacional de Emissão de Veículo
MARVEL	Modular Vehicle Fleet Simulation Tool
MCI	Veículos a Combustão Interna
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MOBILE	<i>Mobile Source Emission Factor Model</i>
MOVES	<i>Motor Vehicle Emission Simulator</i>
MS	Ministério da Saúde
MV-F	Medidor de Velocidade do tipo Fixo
NEDC	<i>New European Driving Cycle</i>
NMOG	Gases Orgânicos não metanos
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
OBD	<i>On-Board Diagnostics</i>
OMS	Organização Mundial da Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
PBEV	Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular
PDTT	Plano de Desenvolvimento do Transporte Público sobre Trilhos
PDTU	Plano Diretor de Transporte Urbano
PMU	Planos de Mobilidade Urbana
PNMU	Política Nacional de Mobilidade Urbana
PROCONVE	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores
PSAT	<i>Powertrain systems analysis toolkit</i>
PTU	Programa de transporte Urbano
UDDS	<i>Urban Dynamometer Driving Schedule</i>
UE	União Europeia
UDC	<i>Urban Driving Cycle</i>

UPS	<i>Unidade Padrão de Severidade</i>
VSP	<i>Vehicle Specific Power</i>
WLTC	<i>Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle</i>
WLTP	<i>Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure</i>
WTT	<i>Well-to-Tank</i>

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 Representação sintetizada das atualizações do MOBILE ao longo dos anos	13
Quadro 2.2 Relação entre os pontos fortes e as limitações dos modelos apresentados.	17
Quadro 2.3 Diferentes simuladores suas principais características.....	45
Quadro 3.1 Rotas da área de estudo	54
Quadro 3.2 Ficha técnica dos veículos FOX/PRIUS/LEAF	63

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O setor de transportes é um dos principais consumidores de energia no mundo, respondendo por cerca de 20% do consumo final (AGENCY, 2021). Além disso, é uma importante fonte de emissões de gases de efeito estufa, especialmente dióxido de carbono. Estima-se que o transporte rodoviário seja responsável por aproximadamente 75% das emissões relacionadas ao setor (SHUKLA *et al.*, 2022).

No Brasil, segundo relatório realizado pelo Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), o transporte é o principal consumidor de combustíveis fósseis e faz com que esse segmento seja o maior emissor de gás carbônico do setor de energia, com 196 milhões de toneladas emitidas em 2019, (47% de toda emissão por energia), (SEEG, 2022). Considerando que a frota nacional de veículos leves deverá continuar crescendo e corresponderá, em 2030, a cerca de 60 milhões de veículos, fica evidente o impacto dos veículos no consumo de energia e emissões de CO₂ para as próximas décadas (MACHADO *et al.*, 2018).

Adicionalmente, de acordo com estimativas da Organização Mundial da Saúde (OMS), a poluição do ar é responsável por 4,2 milhões de mortes prematuras por ano em todo o mundo (SHADDICK *et al.*, 2020). Mesmo que muitas fontes tenham contribuído para esses números, os veículos à combustão interna são a principal fonte de poluição do ar em áreas urbanas (KALGHATGI, 2018).

Além da preocupação com os padrões de qualidade do ar, nas últimas décadas, os gestores e autoridades em transporte têm promovido ações para a redução das emissões de gases de efeito estufa na tentativa de reverter o aquecimento global (YANG *et al.*, 2017). No sentido de atender, tanto aos problemas de impactos à saúde, quanto ao aquecimento global, muitos países passaram a impor políticas para limitar as emissões dos veículos automotores como, por exemplo, o teste de homologação em emissões imposto aos fabricantes antes da comercialização dos veículos, de forma a comprovar se esses atendem aos limites definidos em

lei. Medidas como essas vêm favorecendo a evolução tecnológica dos motores, bem como os sistemas de pós-tratamento de emissões nos veículos, de forma a melhorar a qualidade do ar, mesmo diante do contínuo aumento da frota (ANDRADE, 2020).

Todavia, quantificar os níveis de emissões e o consumo energéticos ainda é bastante complexo, e requer informações completas sobre: características do tráfego (composição da frota e condições de tráfego), os quilômetros percorridos anuais, os ciclos de velocidade de percursos típicos urbanos, o percentual de recursos energéticos renováveis da matriz elétrica, a participação de combustíveis renováveis na matriz energética do setor dos transportes, a tecnologia veicular e o sistema de propulsão dos veículos (CETESB, 2019).

Na gestão das cidades, as simulações numéricas para previsão dos impactos das emissões e consumos energéticos, têm sido pouco contempladas nos Planos de Mobilidade Urbana (PMU) (ARIOLI, 2020; QUIRÓS-TORTÓS *et al.*, 2020; TOLEDO, 2019). De maneira geral, os PMU avaliam as emissões de poluentes para a hora pico, a partir das alternativas propostas nos planos, usando a metodologia de cálculo de inventário de emissões veiculares (CETESB, 2015). Erros na quantificação das emissões veiculares podem implicar na implementação de políticas de transporte ineficientes e expor o meio ambiente e a população a maiores impactos no futuro (JACONDINO, 2005; MAES, 2020).

A ausência de dados, tais como a idade da frota e quilômetros anuais percorridos, principalmente em países em desenvolvimento, faz com que a metodologia *Top-down* seja a mais facilmente usada para determinar as emissões totais anuais, (BORGE *et al.*, 2014; MAES *et al.*, 2019). Mesmo quando as simulações em 4 (quatro) etapas são usadas para avaliação dos impactos das emissões veiculares em PMU, os modelos levam em conta o fator de emissão veicular com base em ciclo de velocidades pré-estabelecidos, ou seja, as simulações são realizadas para a hora do pico sem levar em consideração as variações ao longo das 24 (vinte e quatro) horas com o conseqüente impacto nas variações das emissões totais (QUINTANILHA *et al.*, 2019; SIMÕES, 2019).

Em grande parte, os modelos utilizados nos PMU, para previsões de cenários, são limitados devido, principalmente, à indisponibilidade de dados de entrada, tais como, ciclos de velocidades típicos em centros urbanos, variações do fluxo de tráfego ao longo de 24h e por não contemplar o impacto das mudanças tecnológicas, como é o caso do aumento da frota de

veículos híbridos, veículos elétricos, e o uso de etanol na frota veicular (AGGARWAL & JAIN, 2016; IBARRA-ESPINOSA, 2017; SEUM *et al.*, 2020).

Nesse sentido, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de um modelo para mensurar o consumo energético e as emissões de CO₂ que leve em consideração dados desagregados de trânsito e demanda de viagens, os avanços tecnológicos, ciclos de condução reais, mas sobretudo sendo um modelo que demanda um baixo poder de processamento computacional. A combinação desses elementos em uma única ferramenta representa um avanço significativo na quantificação das emissões e do consumo energético para integrar estudos dos Planos de Mobilidade Urbana.

Ao longo dos próximos capítulos será possível observar que o desenvolvimento do modelo proposto requereu uma fase de estudos prévios, com levantamento de dados numéricos e experimentais, para a devida consolidação do modelo. No seguimento dessa fase de estudos prévios, houve outra fase de desenvolvimento do modelo proposto e o teste do modelo com simulações de cenários. Como consequência dessas duas fases houve a necessidade de organização do trabalho nas seguintes etapas, e que será visto ao longo do texto da tese:

- Levantamento e caracterização de vias típicas, bem como, as suas condições de trânsito.
- Realização de estudos experimentais nas vias, com veículos de diferentes tecnologias.
- Simulações numéricas de veículos nas vias, com implementação das condições reais das vias e características dos veículos.
- Análise e proposta de uma metodologia de determinação dos consumos e emissões de CO₂, considerando funções de correlação e a distribuição de velocidades nas vias.
- Desenvolvimento do modelo numérico proposto, que considera os dados de Matriz O-D e determina os consumos energéticos e emissões de CO₂, com possibilidade de simular cenários de redução das emissões.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Com base no que foi descrito anteriormente, o objetivo geral do presente trabalho é propor um modelo a ser integrado aos estudos de Planos Diretores, ou Planos de Mobilidade,

para determinar o consumo energético e as emissões de CO₂, em diferentes cenários de frotas veiculares.

1.2.2 Objetivos Específicos

Além do objetivo geral, os seguintes objetivos específicos fazem parte da presente tese:

- Caracterizar ciclos de condução reais em rotas do Distrito Federal por meio de experimentos com veículos instrumentados;
- Adaptar as principais ferramentas de pacotes numéricos para realizar simulações do consumo energético e dos níveis de emissão CO₂ em diferentes condições de trânsito e tecnologias veiculares, considerando veículos convencionais, híbridos e elétricos;
- Propor correlações para modelar o consumo instantâneo de combustível e as emissões de CO₂ em função de parâmetros operacionais;
- Calibrar dados experimentais do número de viagens, ocupação de passageiros por veículo e fluxo de veículos, nas principais rotas do DF.

1.3 JUSTIFICATIVA

As áreas urbanas no Brasil sempre se expandiram devido ao crescimento populacional, que multiplicou a demanda por mobilidade e, conseqüentemente, aumentou o consumo de energia e as emissões de gases de efeito estufa. Estudos de planejamento de transporte para as cidades brasileiras têm se consolidado como grandes investimentos dos governos locais para atender às demandas de mobilidade e às necessidades de infraestrutura de transporte. Embora os PMU's considerem o problema contemporâneo do consumo de combustíveis não renováveis e das emissões de CO₂, a frota de automóveis leves de passageiros e o número de quilômetros percorridos anualmente continuam aumentando, sendo que as emissões e o consumo de energia acompanham esse crescimento (CETESB, 2019).

No Brasil, o etanol como combustível renovável para veículos leves se consolidou nas últimas cinco décadas. No entanto, em 2019, o etanol respondeu por apenas 18,8% do consumo total de combustível veicular brasileiro (EPE, 2021). O uso do etanol tem contribuído para a redução das emissões brasileiras de CO₂ provenientes do transporte, mas devido à sua limitada participação, o etanol em si não será o principal fator para reverter o aumento das emissões brasileiras de CO₂ veicular nas próximas décadas (SALVO JUNIOR & SOUZA, 2018).

Em breve, a frota composta por veículos elétricos a bateria aumentará a eficiência energética da mobilidade urbana e terá o papel principal na redução das emissões de CO₂ (BRIGHT & REVANKAR, 2016; WU *et al.*, 2015; XU, 2020). No entanto, no Brasil, o uso de etanol em veículos híbridos, combinado com uma frota cada vez maior de veículos elétricos a bateria, provavelmente será a configuração mais comum por algumas décadas e representa uma boa opção para diminuir o consumo de energia/combustível e emissões de CO₂ (MELO *et al.*, 2023).

Em um cenário dinâmico e dependendo de uma série de variáveis, os PMUs surgem como uma ferramenta útil para monitorar o consumo de energia e as emissões de CO₂ nas cidades brasileiras (AMORIM, 2019; MARTINS *et al.*, 2017). Para o cálculo das emissões atmosféricas e consumo de energia, as instituições governamentais brasileiras utilizam a metodologia do inventário de emissões veiculares (CETESB, 2019), semelhante às aplicadas pelo COPERT (FAMELI & ASSIMAKOPOULOS, 2015) e (EPA, 2014). Essa metodologia é baseada na abordagem *Bottom-Up*, que, segundo (YAO *et al.*, 2020), adota um procedimento em microescala para quantificar as emissões veiculares.

Algumas questões surgem em relação à previsão futura de consumo de combustível/energia e emissões de CO₂ ao aplicar a metodologia brasileira. Por exemplo, como os ciclos de direção do mundo real diferem do procedimento de teste federal (FTP-75) e ainda como essas diferenças se manifestam considerando as variações de tráfego. Em ARAÚJO (2021), ao considerar as variações de tráfego em ciclos de condução para situações reais, observou-se um erro de até 35%. Disparidades também foram observadas no trabalho de LI *et al.*, (2019), que comparou situações de tráfego congestionado e de fluxo livre e encontrou altas emissões durante a fase de transição, quando o fluxo de tráfego mudou de livre para congestionado.

A não consideração das condições reais das vias nos modelos utilizados para determinar o consumo de energia e as emissões veiculares pode levar a erros significativos quanto aos níveis de emissões (ANDRADE, 2020; GU *et al.*, 2019; SINGH *et al.*, 2022). Enquanto a maioria dos estudos analisa as emissões com base em testes de chassis-dinamômetro, os quais refletem apenas um subconjunto de condições de condução do mundo real, este trabalho propõe o desenvolvimento de um modelo/metodologia baseado na abordagem *Bottom-Up* com simulações numéricas suportadas por dados experimentais. Isso é apresentado como uma opção

mais precisa para determinar o consumo de combustível/energia e as emissões de CO₂ para complementar os estudos de planejamento de transporte.

Um desafio central na implementação dos PMUs é quantificar com precisão os impactos energético-ambientais da mobilidade, de forma a subsidiar políticas e medidas mitigatórias. Porém, as ferramentas atualmente utilizadas apresentam limitações significativas, uma vez que os modelos tradicionais baseiam-se frequentemente em dados agregados ou simplificações excessivas, sem capturar a complexidade das interações do sistema de transporte (MARTINS *et al.*, 2017). Por exemplo, não incorporam adequadamente os efeitos de mudanças comportamentais, avanços tecnológicos ou melhorias na infraestrutura.

Além disso, a maioria das abordagens foca na hora de pico, desconsiderando variações de fluxo ao longo do dia que podem alterar substancialmente as estimativas (WYATT *et al.*, 2014). Outra lacuna é a utilização de ciclos padronizados que não refletem as especificidades locais e condições reais de direção (LIMA & GONÇALEZ, 2017).

Assim, esta tese busca desenvolver um modelo, combinando simulações computacionais e dados experimentais, para quantificar consumo energético e emissões de CO₂ em PMUs. O objetivo é aprimorar as estimativas ao incorporar: (i) ciclos de condução característicos da localidade; (ii) diferentes condições de tráfego; (iii) tecnologias veiculares emergentes.

A proposta diferencia-se por calibrar as simulações à realidade local, provendo projeções mais realistas para subsidiar o planejamento. Espera-se, com isso, preencher lacunas no conhecimento e fornecer aos gestores uma ferramenta mais robusta para políticas de descarbonização da mobilidade.

Por fim, é importante enfatizar que o modelo procura preencher as atuais lacunas na literatura, especialmente no que tange à forma de quantificar as emissões e o consumo energético em planos de mobilidade. A abordagem proposta neste trabalho, dessa forma, se configura como um passo importante no apoio à formulação de plano de mobilidade mais consciente e responsável, capaz de enfrentar os desafios ambientais e fomentar um futuro mais equilibrado e resiliente para as cidades.

Os próximos capítulos detalharão a metodologia empregada, a abordagem experimental realizada para coleta de dados, os procedimentos computacionais, os resultados obtidos e as conclusões alcançadas. Ao final, espera-se que esta tese possa trazer contribuições quanto à modelagem de emissões e ao consumo energético de forma mais transparente e, assim, subsidiar políticas e medidas para minimizar as emissões de gases de efeito estufa.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 EMISSÕES NO SETOR DE TRANSPORTE

O setor de transporte é um dos maiores responsáveis pela emissão de CO₂, e, de acordo com os relatórios de agências internacionais de energia, mais de 97% das emissões globais são provenientes da queima de combustíveis fósseis (petróleo e gás) (IEA, 2019; RANA, 2020). Para um horizonte de projeções de longo prazo, a organização *World Energy Outlook* traça um Cenário de Desenvolvimento Sustentável, subordinado às metas do Acordo de Paris. Nesse sentido, para se atender aos objetivos primários do acordo, o consumo de petróleo teria de diminuir em 3 milhões de barris/dia até 2025. E, de forma mais audaciosa, pensando em zerar as emissões líquidas em nível mundial até 2050, demandaria ações de longo alcance pautadas, principalmente, na eletrificação, nos ganhos de eficiência e nas mudanças comportamentais (IEA, 2019)

No Brasil, houve uma pequena queda, nos últimos quatro anos, das emissões de CO₂, no setor de transporte, principalmente devido à desaceleração econômica enfrentada pelo país nos últimos anos, que acarretaram um menor consumo/queima de combustíveis (POTENZA; *et al.*, 2020). Apesar dessa diminuição, os valores relacionados ao setor de transporte terrestre ainda são muito elevados, conforme pode ser observado na Figura 2.1.

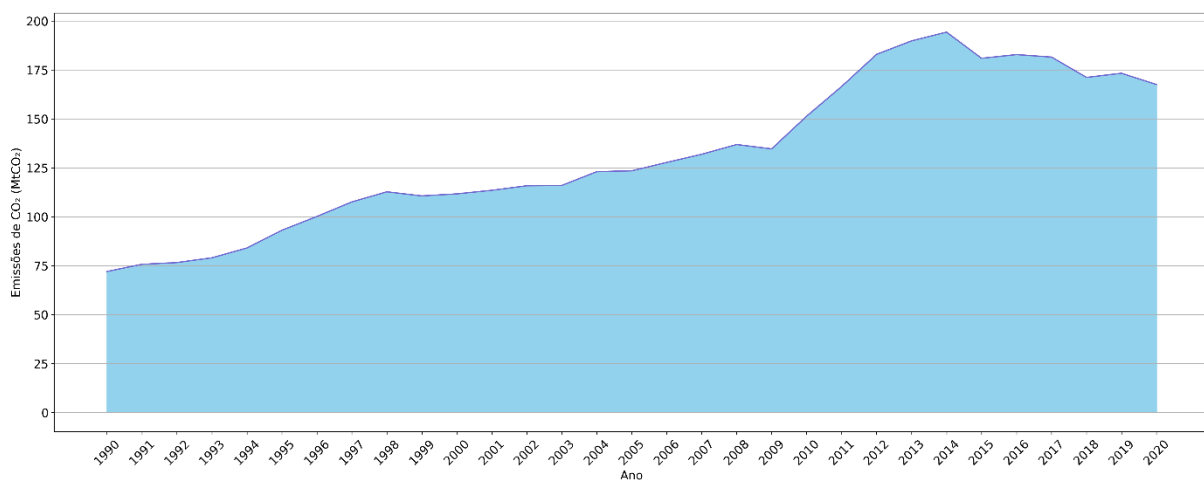


Figura 2.1 Série histórica de emissões de CO₂ do Transporte Terrestre do Brasil (1990-2020)
Fonte: SEEG - Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa, 2020

De acordo com o gráfico exposto na Figura 2.1, pode-se observar uma leve queda nos últimos anos; no entanto, o setor de transporte terrestre ainda contempla um impacto muito significativo na produção de emissões antrópicas. Visto que o transporte é um segmento que impacta de forma significativa para a produção de emissão de gases de efeito estufa, é fundamental quantificar de forma efetiva no intuito de implementar ações de combate e mitigação às mudanças climáticas.

Com respeito a políticas para descarbonizar o setor de transportes, o Brasil adota algumas iniciativas, como é o caso do etanol, com o Programa da Indústria Automobilística Brasileira ROTA 2030 e programas de controle de emissões do Ministério do Meio Ambiente (JUNIOR & SANTOS, 2020). De forma mais ampla, muitos países já anunciaram para 2030 ou 2040 o fim da comercialização de veículos a combustão interna. Esse comportamento pode ser observado na Figura 2.2, que ilustra a projeção anual de vendas globais de veículos de passageiros por tecnologia (trem de força), realizada para os próximos anos, de acordo com o provedor de pesquisas estratégicas Bloomberg (BNEF, 2018).

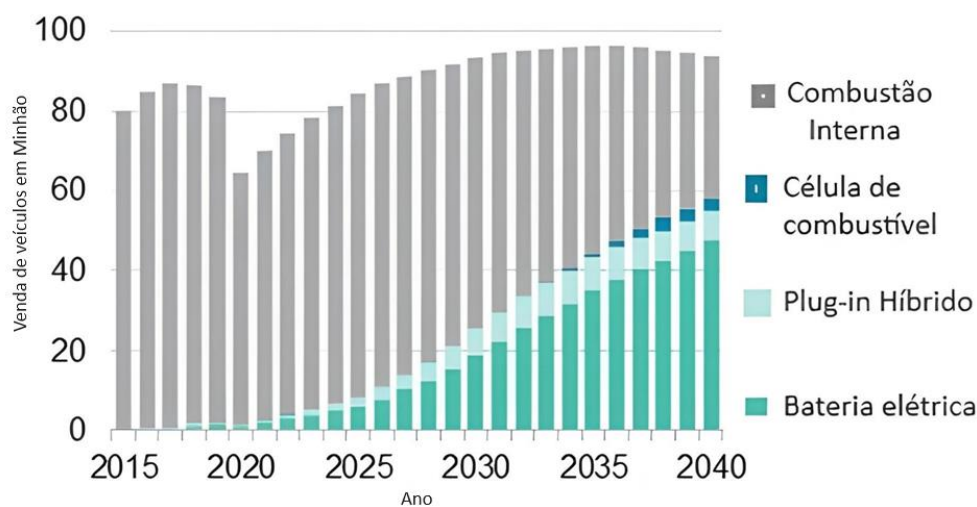


Figura 2.2 Vendas globais, anuais de veículos de passageiros por tecnologia no mundo
Fonte: Bloomberg New Energy Finance, 2018

Diante dos dados da Figura 2.2, observa-se uma mudança de tecnologia veicular ao longo dos próximos anos, visto que muitos países já vêm adotando a mobilidade elétrica como uma solução promissora, para reduzir as emissões locais e a dependência de combustíveis fósseis, além de aumentar a eficiência da operação do veículo (IEA, 2019; LI *et al.*, 2017; MANJUNATH & GROSS, 2017; SANTOS, 2017; WU *et al.*, 2015).

No Brasil, apesar do aumento da venda de veículos elétricos, a frota dessa categoria ainda não representa parâmetro de destaque. De acordo com dados da Secretaria Nacional de Trânsito (SENATRAN), até o ano de 2019, circulavam no país cerca de 22.919 veículos elétricos e híbridos. Para Brasília, ainda de acordo com dados do SENATRAN, a frota de veículos híbridos e elétricos é de 2761, o que corresponde a valores próximos de 1% da frota do Distrito Federal. Apesar da baixa representatividade dos veículos elétricos a bateria (BEVs) na frota brasileira, para os próximos anos, o cenário é de aumento, conforme pode ser observado no relatório da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2021), por meio da Figura 2.3, a qual apresenta duas perspectivas de cenários.

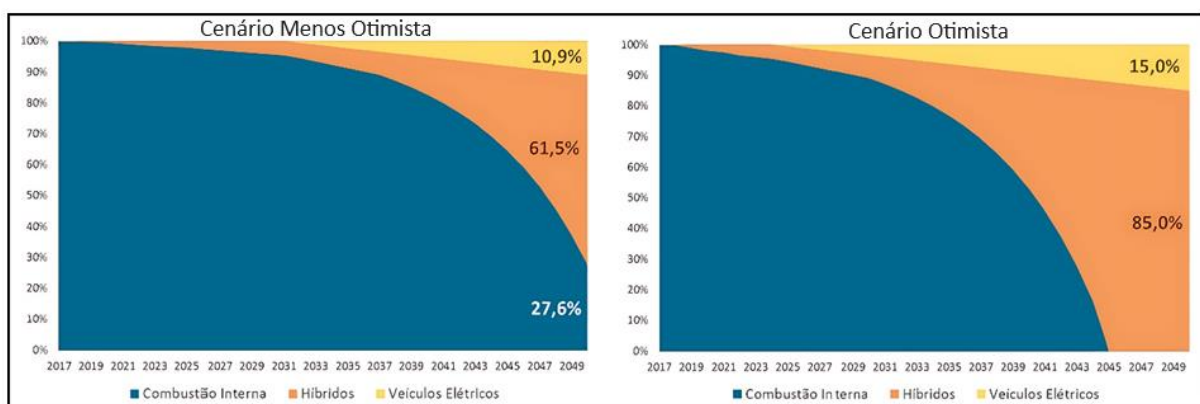


Figura 2.3 Curva de penetração de tecnologias no licenciamento de veículos leves
 Fonte: Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2021

De acordo com a Figura 2.3, é possível observar que, para os dois cenários, após 2030, haverá uma clara aceleração no licenciamento de veículos leves elétricos. Para um cenário mais otimista, é projetada a total substituição dos veículos a combustão interna (MCI), decorrente de políticas para a proibição dos carros a combustão. Mesmo com um aumento no número de BEV para os dois cenários, espera-se um predomínio da eletrificação frota por meio dos veículos híbridos. Esse predomínio no futuro deve ser revertido para os BEV devido a questões de restrições do uso de combustíveis fósseis. Nesse sentido, mesmo no cenário menos promissor a substituição da frota por veículos menos poluentes impactará nas questões ambientais de forma significativa. Assim, é fundamental o uso de ferramentas computacionais que possam projetar cenários a fim de auxiliar gestores na tomada de decisão, e principalmente no preparo da infraestrutura.

Para (SOUZA & HIROI, 2021), a mudança de MCI para BEVs ainda é uma realidade distante, visto a limitação por questões tecnológicas e pelo fato de o país não considerar as metas de

redução de emissão de poluentes uma prioridade em sua agenda de políticas públicas. Nessa mesma linha, (OECKSLER *et al.*, 2019) apontam a falta de políticas públicas e fiscais associada à falta de infraestrutura como fatores impeditivos para implementação dos veículos elétricos no mercado brasileiro. Todavia, constata-se ausência de investimentos significativos para a promoção ou implementação de instrumentos e apoio governamentais para o desenvolvimento das cadeias de suprimentos essenciais para expansão da mobilidade elétrica.

Dessa forma, busca-se um sistema de transporte cada vez mais sustentável, voltado para o combate às mudanças climáticas e à redução da dependência do petróleo. Nesse sentido, as metodologias de avaliação das emissões devem ser precisas e se adequar a essas mudanças tecnológicas que vêm ocorrendo.

2.2 METODOLOGIA DE CÁLCULO DE EMISSÕES

Quantificar as emissões, no mundo real, é uma questão muito complexa, visto que envolve variáveis comportamentais relacionadas a condições de direção, características meteorológicas, composição do fluxo de tráfego entre outros. Nesse sentido, as emissões são geralmente calculadas utilizando dados experimentais obtidos a partir de medições de laboratório, sob diferentes condições simuladas de condução (BERKOWICZ *et al.*, 2006; XU, 2020).

Diante da complexidade e do número de variáveis envolvidas, muitas metodologias foram desenvolvidas para quantificar as emissões veiculares, como é o caso dos modelos de emissão de CO₂ veiculares, tais como: *Mobile Source Emission Factor Model* - (MOBILE), Simulador de Emissão de Veículo Motorizado (MOVES), Programa de Computador para Calcular Emissões de Transporte Rodoviário (COPERT), Modelo Internacional de Emissão de Veículo (IVE), e o *Comprehensive Modal Emission Model* (CMEM) (LI *et al.*, 2019). De forma geral, os modelos estatísticos, como são geralmente chamados, são empregados caracteristicamente em cidades, como é o caso do MOBILE e o COPERT.

O MOBILE (1978) constitui modelo desenvolvido pela EPA (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos) para estimar as emissões de veículos motorizados sob várias condições, como por exemplo, temperatura ambiente e velocidade. Dentre as suas funcionalidades, está a capacidade de calcular a média de fatores de emissão da frota para diferentes poluentes em uma determinada frota a gasolina, diesel e gás natural, em veículos leves, pesados e motocicletas,

desde o ano de 1952 até 2050. Acrescenta-se também a capacidade de estimar o número de partículas de escape e poluentes relacionados, hidrocarbonetos aromáticos cíclicos e dióxido de carbono (AHN & RAKHA, 2008).

A primeira versão do MOBILE foi estabelecida no final da década de 1970 (MOBILE1) e atualizada periodicamente para refletir dados aprimorados, mudanças no veículo, motor e tecnologias de sistema de controle de emissões, mudanças nos regulamentos aplicáveis, nos padrões de emissão e nos procedimentos de teste, a fim de aprimorar a compreensão dos níveis de emissão em uso, compreendendo os fatores que os influenciam em análises regionais e nacionais (EPA, 2013). Nessa perspectiva, esse modelo não é adequado para estimar as emissões de CO₂ do tráfego, em nível local, visto que se destina a prever inventários de emissões para grandes áreas regionais. Por isso, eles não são adequados para avaliar melhorias operacionais de natureza “microscópica”, como medição de rampa, coordenação de sinais e muitas estratégias de ITS (PULIAFITO *et al.*, 2015). Embora o MOBILE seja adequado para análises regionais e nacionais agregadas de emissões e qualidade do ar, ele não é adequado para realizar avaliação de emissões de fontes móveis em escalas temporais e espaciais relevantes para projetos de transporte e medidas de controle específicos (EPA, 2013).

A questão de se avaliar fontes móveis em escalas temporais é bastante complexa, visto que há uma dificuldade em obter os dados de fluxo de tráfego classificados em um padrão temporal, sendo mais comuns os dados de fluxo de tráfego, que são apresentados pelos órgãos competentes a partir de dados estatísticos anuais, sem o monitoramento de campo (LIETZKE *et al.*, 2015). O MOBILE 6.2, lançado em 2004, foi a última versão, substituída, posteriormente, pelo MOVES. O Quadro 2.1 traz uma representação sintetizada das atualizações do MOBILE ao longo dos anos.

Quadro 2.1 Representação sintetizada das atualizações do MOBILE ao longo dos anos

Ano	Versão	Especificação
1978	MOBILE1	O primeiro modelo para fatores de emissão de veículos rodoviários. Capaz de calcular os fatores de emissão de HC CO e NOX de 6 tipos de veículos durante 1970-1999
1981	MOBILE2	Atualizado com novos dados sobre veículos com emissão controlada (ou seja, conversores catalíticos, modelo anos 1975 e posteriores) em idades / quilometragem mais altas. Fornecido controle de usuário adicional de opções de entrada.
1984	MOBILE3	Eliminou as taxas de emissão de veículos na Califórnia. Continuou a modelar emissões de baixa e alta altitude. Adicionadas taxas de adulteração e impactos de emissões associados e benefícios do programa anti-adulteração. Emissões ajustadas sem exaustão para levar em conta a volatilidade do combustível do "mundo real" medida pela pressão de vapor Reid (RVP).
1989	MOBILE4	Adicionadas perdas por evaporação como uma fonte de emissão distinta para veículos movidos a gasolina. Efeito da volatilidade do combustível modelado (RVP) nas taxas de emissão de gases de escape. Opções expandidas controladas pelo usuário para dados de entrada.
1991	MOBILE4.1	Recursos adicionados que permitem o controle do usuário demais parâmetros que afetam os níveis de emissão em uso, incluindo mais projetos de programas de inspeção.
1993	MOBILE5	Com base em novas equações básicas de taxa de emissão em um banco de dados muito maior derivado de programas de teste IM240 implementados pelo Estado. Efeitos incluídos do novo procedimento de teste de emissão evaporativa. Adicionados efeitos da gasolina reformulada (RFG). Adicionado o impacto dos combustíveis oxigenados nas emissões de HC. Efeito adicionado dos padrões de emissão Tier 1 para serviços leves e novo padrão NOx de 4,0 g / bhp-hr para motores pesados. Adicionada opção de avaliação em 1º de julho. Modelagem permitida de programas de veículos de baixa emissão (LEV) padronizados de acordo com os regulamentos da Califórnia. Correções de velocidade revisadas.
1993	MOBILE5a	O MOBILE5a foi lançado cerca de 4 meses após o MOBILE5 para corrigir uma série de erros menores detectados em certas condições específicas.
1996	MOBILE5b	Atualizado para refletir os impactos dos novos regulamentos promulgados, incluindo: sistemas de recuperação de vapor de reabastecimento a bordo, aditivos de gasolina para detergente e requisitos de RFG da Fase II. Cálculo reativado de fatores de emissão ociosos e intervalo de ano calendário expandido para o qual os fatores de emissão podem ser calculados de 2020 a 2050. Maior flexibilidade de modelagem de programas I / M, proporcionando modelagem mais fácil de programas I / M híbridos baseados em reteste, pressão do sistema de emissão evaporativa e testes de purga, treinamento técnico e créditos de certificação (TTC), e testes ASM. Aumento gradual dos benefícios de emissão corrigidos para o primeiro ciclo de operação do programa I / M.
2001	MOBILE6	Atualizado com dados novos e aprimorados em muitas áreas, incluindo deterioração em uso de veículos de 1981 e mais novos, efeitos de velocidade de serviço leve, efeitos de enxofre da gasolina e emissões evaporativas. Algoritmo de benefício I / M revisado. Cálculo removido do benefício do teste de purga. Algoritmos revisados para ar-condicionado e direção de alta aceleração. Adicionados os efeitos do Nível 2 e as novas regras para motores pesados e combustível diesel. Número expandido de subclasses de veículos de oito para vinte oito. Adicionado cálculo por hora de emissões e estimativas de emissão por tipo de estrada. Emissões de exaustão separadas de partida e operação. Cálculo removido de emissões ociosas. Permitiu a entrada do usuário de informações mais detalhadas sobre a atividade do veículo
2002	MOBILE6.2	Adicionada capacidade de modelar fatores de emissão para material particulado e seis tóxicos do ar Adicionada capacidade de modelar tóxicos adicionais do ar com fatores de emissão fornecidos pelo usuário. Adicionada opção de saída de planilha. Fatores de emissão de monóxido de carbono aprimorados.

Fonte: Adaptado de EPA, 2015.

Em relação ao MOVES, entende-se que se trata de um modelo utilizado para estimar as emissões de carros, caminhões, motocicletas e ônibus, o qual foi desenvolvido pela EPA. O modelo MOVES oferece uma plataforma de modelagem capaz de suportar diferentes análises, permitindo ao usuário trabalhar com diferentes ciclos de operação do veículo e estimar as emissões de escapamento em função da potência específica do veículo (DA COSTA, 2017). Ademais, esse modelo estima as emissões, incluindo GEEs e poluentes atmosféricos para todos os tipos de atividades de veículos rodoviários, como tubo de escape, evaporação de combustível e desgaste de freios e pneus (KOUPAL *et al.*, 2005).

A robustez no MOVES se deve ao fato de se usar uma estrutura de *software* centrada em um banco de dados aberto, com informações de atividade coletadas a partir de testes de dinamômetro, o que favorece maior flexibilidade para avaliar as emissões de CO₂ do tráfego, no nível do projeto (ALAM *et al.*, 2017).

Mesmo com os dados padrões do MOVES serem definidos para o contexto dos Estados Unidos, as entradas de dados como padrões de direção, em diferentes estradas, taxas de emissão, classe de veículo, podem ser configuradas para outras localidades (RANA, 2020). No trabalho de (HUNG *et al.*, 2007), foi realizada uma abordagem comparativa de CO₂ para mundo real, confrontando-se com os dados obtidos por meio do MOVES. Os resultados mostraram que as medidas para os níveis de CO₂ nos ciclos FTP e SC03, quando comparadas com o MOVES, foram ligeiramente inferiores às observadas no mundo real.

Já o modelo COPERT, desenvolvido pela Agência Ambiental Europeia (EEA), é uma outra metodologia bastante difundida e utilizada na composição dos inventários de transporte rodoviário e para projeções de emissões de diferentes países da Comunidade Europeia, inclusive pelo Brasil (KOURIDIS, 2009; O'DRISCOLL *et al.*, 2016). Essa metodologia faz uso de um grande banco de dados com informações sobre a composição da frota, volume de tráfego, velocidade média, consumo de combustível, tipo de estrada e quilometragem para cada categoria de veículo, (automóveis de passageiros, ônibus, caminhões e etc.), (ONG *et al.*, 2011). Além de fatores de emissão mais comuns, essa ferramenta também analisa as partidas a frio e a degradação dos equipamentos de redução de emissões em razão da idade (quilometragem) dos veículos (RANA, 2020).

Além do COPERT ser bem difundido na União Europeia, uma variedade de pesquisas tem sido conduzida em outras localidades, como pode ser observado nos trabalhos de (LANG *et al.*, 2014) e (LI *et al.*, 2019), na China; (SOFWAN & LATIF, 2021), na Índia; (D'ANGIOLA *et al.*, 2010), na América do Sul. Apesar do COPERT ter uma boa aceitação, estudos apresentam algumas limitações, assim como pode ser visto no trabalho de (SMIT *et al.*, 2010), o qual concluiu que o COPERT subestimou os resultados das emissões para diferentes tipos de poluentes.

A metodologia COPERT, ainda é capaz de contabilizar diferentes velocidades médias em segmentos urbanos, rurais e rodoviários livres (ALI *et al.*, 2021). No estudo de Lejri (2018), que levou em consideração a dinâmica do veículo em situações de congestionamento, os resultados apontaram para a subestimação da avaliação relacionada ao consumo de combustível em períodos de congestionamentos.

De forma mais ampla, Tang *et al.*, (2019) integraram a ferramenta COPERT para aproximar as emissões dos veículos em escala nacional e, em seguida, inseriram o mapeamento espacial com uma escala mais precisa para visualizar a distribuição das emissões no nível da rua, com base no volume de tráfego. Os resultados desse estudo apontam que, se as características da frota da cidade não fossem consideradas, as emissões estimadas seriam diferentes, variando de 1,6% a 21,8 % para diferentes poluentes.

Uma outra metodologia bastante difundida é o *International Vehicle Emissions* (IVE), capaz de auxiliar países em desenvolvimento na modelagem de emissões locais de fontes móveis. É um modelo projetado para estimar as emissões com base na demanda por potência do veículo, e, ainda, sob diferentes tecnologias e situações de direção. Por meio do modelo IVES, é possível estimar emissões de poluentes para veículos de passeio, caminhões, ônibus e motocicletas. Sua base de funcionamento pode ser caracterizada pelas seguintes características: distribuição da frota veicular por categoria; atributos da região de estudo (condições atmosféricas, declive/aclive das vias, tipo de combustíveis forma de condução, dentre outros); fatores de emissão dos veículos (tipo de tecnologia) (ARAÚJO, 2016). Quando esse modelo é comparado com o MOBILE e o COPERT, sua precisão e confiabilidade precisam ser melhoradas (YANG *et al.*, 2017; YAO *et al.*, 2020).

Um aspecto que vale salientar, a respeito das metodologias apresentadas é que o IVE, o MOBILE e o COPERT não são bons para avaliar as emissões de CO₂ do tráfego, em escala local ou de bairro, visto que esses modelos foram pensados para a elaboração de inventários de emissões de grandes áreas regionais. Sendo assim, não são adequados para avaliar melhorias operacionais de natureza mais “microscópica”, como coordenação de sinais e muitas estratégias de Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS) (PULIAFITO *et al.*, 2015).

De forma mais recente, o CMEM – *Comprehensive Modal Emissions Model* – é um modelo de emissão baseado na demanda por potência, desenvolvido, em conjunto, pelas universidades da Califórnia e de Michigan, e tem sido amplamente aplicado em escala local (NESAMANI *et al.*, 2017; WANG & RAKHA, 2017; ZHENG *et al.*, 2019). O CMEM usa as informações de um veículo individual e do seu perfil de velocidade segundo a segundo como entrada; assim, é possível prever o consumo de combustível segundo a segundo e as emissões do tubo de escape de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrocarbonetos (HC) e óxidos de nitrogênio (NO_x) (OSWALD *et al.*, 2019).

No estudo de Oswald *et al.*, (2019), foi realizada uma aplicação do CMEM, a qual forneceu uma avaliação de energia e emissões precisa em veículos automatizados que prometem um potencial de reduzir o consumo de combustível e das emissões. Os resultados, em locais de cruzamento, baixas velocidades, utilizando CNEM, foram bem próximos aos dados reais; enquanto isso, utilizando a metodologia MOVES, os dados foram subestimados. Ainda, com respeito ao CNEM, é difícil a inclusão de categorias de veículos, porque implica a realização de várias medições em dinamômetro (Turkensteen, 2017) mostrou, em seu trabalho, que, em comparação com os resultados calculados de condições de direção do mundo real, a suposição de velocidade fixa do CMEM subestima as emissões, às vezes, em mais de 50%. O Quadro 2.2 apresenta, de forma sintetizada, uma relação entre os pontos fortes e as limitações dos modelos apresentados.

Quadro 2.2 Relação entre os pontos fortes e as limitações dos modelos apresentados.

Modelo / Simulador	Origem	Categorias de veículos	Poluentes	Propostas	Principais Recursos	Diferenciais	Aspectos Positivos	Limitações
PHEM	TU Graz - Áustria	Veículos pesados	CO, HC, NOx, CO2, PM	Mapeia o Consumo e emissões	Simula fatores de emissão	Foco em veículos pesados e cargas	Boa acurácia para veículos pesados	Dificuldade em prever emissões de novas tecnologias
CMEM	Universidade da Califórnia-Riverside - EUA	Veículos leves	CO, HC, NOx, CO2	Mapeia emissões	Simula emissões por modo de operação	Mapeia emissões considerando modo de direção	Representa impacto do modo de condução	Requer muitos dados de entrada
ADVISOR	NREL - EUA	Veículos leves	PM, CO, HC, NOx	Mapeia consumo e emissões	Simulação de tecnologias alternativas	Ênfase em veículos híbridos e elétricos	Avalia emissões de tecnologias emergentes	Dificuldade em representar condições reais e cenários futuros
FASTSim	NREL - EUA	Veículos leves e pesados	CO2	Modelagem de emissões	Simulação rápida de powertrains	Comparação simplificada de tecnologias	Simulações ágeis	Menor precisão e limitação quanto a entrada de dados não suporta dados para características da frota
MOBILE	EPA - EUA	Vários tipos de veículos e combustíveis	HC, CO, NOx	Modelagem de emissões	Adaptável para diferentes veículos/combustíveis	Uso histórico nos EUA	Amplo uso e adaptabilidade	Podem não refletir tecnologias recentes
MARVEL	TARDEC - EUA	Simulação de frotas	-	Análise de custo do ciclo de vida	Compara frota modular versus convencional	Ênfase em custo total de propriedade	Compara alternativas considerando custo total	Não avalia emissões diretamente – modular
COPERT	EMEP - Europa	Ampla gama de veículos e combustíveis	HC, CO, NOx, PM	Modelagem de emissões	Baseado em dados europeus	Abrangência	Precisão	Podem não ser adequados fora da Europa, Limitações para adaptação
MOVES	EPA - EUA	Veículos e fontes não rodoviários	Consumo, HC, CO, NOx, PM	Estimativa ampla de emissões	Estima emissões de ampla gama de fontes	Condições parametrizáveis pelo usuário	Abarca diversas categorias	Requer parametrização cuidadosa
MATLAB Simulink	MathWorks - EUA	Vários tipos de veículos	Adaptável	Modelagem e simulação	Bibliotecas Adaptável	Flexibilidade	Podem simular diversos cenários	Requer conhecimento de programação

O Quadro 2.2 fornece uma visão geral dos principais simuladores de modelagem de emissões e consumo veicular apresentando, sua origem, poluentes analisados, principais características, pontos positivos e limitações. Nos simuladores, há uma boa cobertura de tipos de veículos (de veículos pesados a veículos leves) e poluentes, sendo comuns CO₂, NO_x, PM e HC. Os modelos apresentados possuem limitações em relação à precisão das novas tecnologias, aos extensos requisitos de dados e às necessidades de localização fora das regiões originais. Dessa forma faz-se necessário o desenvolvimento de uma proposta de modelo que abarque essas lacunas apresentadas.

2.3 METODOLOGIAS BRASILEIRAS DE AVALIAÇÃO DE EMISSÕES VEICULARES

No Brasil, uma das primeiras metodologias para o cálculo de emissões por veículos automotores foi publicada pelo Ministério do Meio Ambiente, em 2011 a fim de auxiliar futuras decisões relacionadas ao planejamento e à implantação de políticas voltadas à melhoria da qualidade ambiental e à mitigação das mudanças climáticas (Ministério do Meio Ambiente, 2011).

Posteriormente, essa metodologia foi aperfeiçoada pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB – e utilizada até hoje para estimar as emissões de gases e partículas poluentes emitidas por frotas de veículos em condições reais de utilização. Essas estimativas foram realizadas, ao longo dos anos, por meio de ensaios laboratoriais realizados para certificação do controle de emissões veiculares para todos os modelos de veículos leves do ciclo *Otto* no Brasil. Dessa forma, foi possível a criação de um banco de dados de fatores de emissão e consumo, segundo metodologia de teste que simula condições reais de uso (CETESB, 2015).

No Brasil, a metodologia do Ministério do Meio Ambiente - MMA e da CETESB são referências, com a CETESB utilizando uma abordagem mais prática baseada em ensaios reais. A escolha entre abordagens *Top-down* e *Bottom-up*, as quais serão pormenorizadas mais adiante, depende do nível de detalhe desejado e dos dados disponíveis.

2.3.1 Cálculo de emissões Veiculares

O monitoramento e a avaliação das emissões veiculares são ferramentas fundamentais para determinar a qualidade do ar no meio urbano, visto que essa tem impacto direto na saúde da população. Segundo a *European Environment Agency* - EEA (2018), o uso de inventários de emissões atmosféricas é a base para todos os programas de gerenciamento da qualidade do ar. Dessa forma, a elaboração de inventários de emissão ajuda na tarefa de gerenciar a poluição. O inventário de emissões é uma ferramenta fundamental para a identificação e hierarquização de fontes predominantes de emissão, bem como para apontar as tendências anuais de redução ou aumento de determinados poluentes na atmosfera (Ministério do Meio Ambiente, 2011; UEDA & TOMAZ, 2011).

Esta ferramenta pode ser usada com vários propósitos, mas frequentemente é desenvolvida para atender às requisições regulamentadas pelas agências ambientais. No contexto urbano, utiliza-se, na maioria das vezes, para a determinação do cálculo das emissões de GEE de transportes, as diretrizes do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC).

Os inventários de emissões veiculares são geralmente elaborados a partir do uso de fatores de emissão vinculados a parâmetros do nível de atividade dos veículos. De acordo com (LANG *et al.*, 2014), vários fatores devem ser levados em consideração no cálculo dos poluentes emitidos na atmosfera, em especial, o tipo de veículo, o combustível utilizado e a forma de sua condução. Além desses aspectos apresentados, a deterioração dos veículos é outro aspecto importante que influencia nas emissões, visto que os mais novos apresentam tecnologias do uso de combustíveis mais eficientes e, conseqüentemente, uma menor emissão de poluentes (POLICARPO *et al.*, 2018).

Para Jacondino (2005), os parâmetros atuais de uso da velocidade média e do volume de tráfego, como única variável de poder explanatório do nível de atividade dos veículos, conduz à inventários de emissões imprecisos. Esse aspecto ainda pode ser agravado quando são analisadas políticas de transporte que modifiquem o padrão de atividade dos veículos (ex: redução dos eventos de aceleração).

Para elaborar estimativas para emissões de poluentes veiculares, há duas metodologias já consolidadas: a metodologia *Bottom-up*, (abordagem de baixo para cima) e a metodologia *Top-Down* (abordagem de cima para baixo) (EPA, 2013). A metodologia *Bottom-up*, em grande parte, faz uso do modelo ASIF, que necessita de uma quantidade de dados superior ao requerido pela abordagem *Top-down*.

As emissões locais do transporte rodoviário no modelo ASIF são resultados da idade do veículo, da quilometragem percorrida no período de um ano e dos fatores de emissão de cada categoria veicular (KOUPAL *et al.*, 2005). Esse procedimento é utilizado pela CETESB para a composição dos dados do inventário de emissões veiculares. No trabalho de Ibarra-Espinosa (2017) foi usada a metodologia *Bottom-up* para avaliar as emissões veiculares em diferentes cenários na região metropolitana de São Paulo, sendo perceptível que as emissões simuladas foram maiores em relação às estimativas da CETESB para todos os poluentes.

Nesta mesma linha, Arioli *et al.*, (2020), aborda o processo de elaboração de inventários de emissões de gases de efeito estufa associados à mobilidade urbana e identifica pontos críticos que comprometem a qualidade do inventário, como por exemplo a abrangência das emissões no limite da cidade, o déficit de dados para o modo de transporte motorizado individual e a determinação do grau de participação do consumo de etanol. Conclui-se, assim, que novos métodos, como as simulações, poderiam trazer maior precisão a esses relatórios.

Na metodologia *Top-down* são determinadas as emissões de forma global, ou seja, geralmente há referência a dados agregados espacialmente (nacionalmente) desagregados, para fornecer uma visão sobre uma região ou cidade específica (POLICARPO *et al.*, 2018). Em grande parte das vezes, o *Top-down* é usado em macro escala e na elaboração de inventários nacionais de emissões (FAMELI & ASSIMAKOPOULOS, 2015). Para compensar essa falta de dados Tuia *et al.*, (2007), empregou técnicas de desagregação espacial das emissões, ou seja, utilizando a densidade das vias, o que demonstrou melhores resultados. Todavia, ocorreu a subestimação para centros urbanos, ruas com alto fluxo e a superestimação para áreas residenciais.

Em relação às metodologias internacionais, a avaliação de emissões veiculares brasileiras apresenta certas lacunas. Muitos modelos globais têm integrado, de forma mais ágil, as rápidas mudanças tecnológicas, como a adoção de veículos elétricos e híbridos. Além disso, há uma maior ênfase em sistemas internacionais no desenvolvimento de banco de dados em tempo real. Esses sistemas permitem uma visão mais instantânea e precisa das emissões, em vez de depender estritamente de ensaios laboratoriais ou simulações. Também é importante notar que, em termos de rigor e transparência, algumas metodologias estrangeiras são frequentemente revisadas por organismos internacionais, garantindo precisão e confiabilidade maiores em suas estimativas.

Embora o Brasil tenha feito esforços significativos para monitorar e gerenciar as emissões veiculares, há espaço para melhorias em termos de metodologia, precisão e abordagem. A contínua revisão e atualização dos modelos, juntamente com a adoção de tecnologias emergentes e políticas progressivas, serão cruciais para uma gestão mais eficaz das emissões de gases de efeito estufa.

2.4. POTÊNCIA ESPECÍFICA DO VEÍCULO (VSP)

O conceito de VSP, desenvolvido por Jiménez, é uma forma de estimar as emissões de veículos a partir de dados de rodagem, como velocidade, aceleração e inclinação da via (JIMENEZ-PALACIOS, 1998). Esse autor calcula a potência instantânea demandada pelo veículo para quantificar o esforço do motor e relacionar com as emissões.

$$VSP = \frac{Potência}{Massa} = \frac{\left[\frac{d}{dt} (E_{Cinética} + E_{Potencial}) + (F_{Rolamento} + F_{Aerodinâmica}) * v \right]}{m}$$
$$= v(a * (1 + \varepsilon) + grade + g * C_R) + \frac{1}{2} \rho_a \frac{C_d * A}{m} v^3$$

Equação 1

Onde:

(VSP) representa a potência específica do veículo em (kW/ton);

(v), a velocidade do veículo em (m/s);

(ε) é o fator de massa translacional equivalente dos componentes rotativos do grupo motopropulsor do veículo;

(g) é a gravidade local;

(h) é a altitude do veículo (m);

(C_R) é o coeficiente de resistência ao rolamento;

(ρ_a) é a densidade do ar ambiente em (kg/m³);

C_d é coeficiente de arrasto;

(A) é a área frontal do veículo em (m²);

(a) é a aceleração (m/s²) e

($grade$) é a elevação vertical dividida pela distância horizontal.

O VSP é uma função da velocidade instantânea do veículo (v), da aceleração do veículo (a) e da inclinação da estrada (r), que pode ser calculado com base nas simplificações apontadas no estudo de Jiménez-Palacios (1999), usando a equação 2.

$$VSP = v \left[1,1a + 9,81 \left(\text{sen}(\tan^{-1}(grade)) \right) + 0,132 \right] + 3,02 \times 10^{-4} v^3$$

Equação 2

Onde:

VSP = Potência específica do veículo com resolução de 1 Hz (kW/ton);

v = Velocidade com resolução de 1 Hz (m/s);

a = Aceleração com resolução de 1 Hz (m/s²);

grade = O gradiente do terreno para mudança na elevação *versus* distância.

O movimento de um veículo ao longo de uma estrada é influenciado por diversas forças que podem acelerar, desacelerar ou alterar sua trajetória. Ao se analisar o desempenho e a eficiência de um veículo, é importante considerar todos os componentes de força relevantes que interagem durante o deslocamento.

Dentre as principais forças resistivas atuando sobre o veículo, podem ser destacadas aquelas relacionadas à aceleração ou à desaceleração, que dependem da massa do veículo e da intensidade da aceleração imposta por motor e freios. Em trechos de subida ou descida, a força gravitacional paralela à inclinação da estrada exerce um papel importante, sendo maior quanto mais íngreme for a ladeira.

Outro fator resistivo fundamental é o atrito entre os pneus e o solo, também chamado de força de rolamento, que se opõe ao giro das rodas e depende de características do contato pneu-solo como material, pressão de inflagem, equilíbrio do veículo, etc. Por fim, em velocidades mais elevadas, a resistência oferecida pelo ar se torna cada vez mais significativa, sendo influenciada pelo formato aerodinâmico, área frontal e outros atributos do veículo (Figura 2.4).

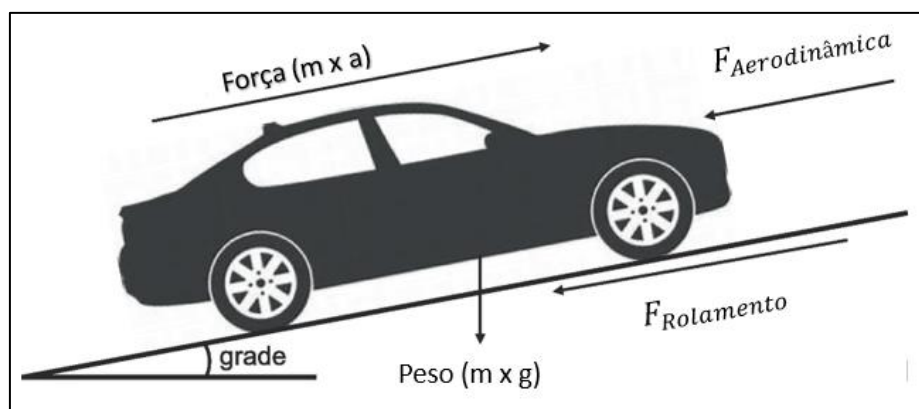


Figura 2.4 Quatro forças na dinâmica do movimento do veículo

Fonte: Adaptado de BALCI *et al.*, 2021

A abordagem de categorizar a VSP em classes de intervalos foi originalmente desenvolvida e publicada pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), no guia do usuário do modelo MOVES (Motor Vehicle Emission Simulator), em 2009 (Moves, 2009). Nessa perspectiva, a EPA estabeleceu as classes de intervalos VSP apresentadas na Tabela 2.1 para

representar o amplo espectro de condições operacionais enfrentadas pelos veículos em uso real nas ruas e nas rodovias. Cada classe VSP corresponde a uma faixa típica de demanda de potência experimentada durante a condução.

Tabela 2.1 Definição dos modos VSP

Modo VSP	Gama VSP [W/kg]	Modo VSP	Gama VSP [W/kg]
1	$VSP < -2$	8	$13 \leq VSP < 16$
2	$-2 \leq VSP < 0$	9	$16 \leq VSP < 19$
3	$0 \leq VSP < 1$	10	$19 \leq VSP < 23$
4	$1 \leq VSP < 4$	11	$23 \leq VSP < 28$
5	$4 \leq VSP < 7$	12	$28 \leq VSP < 33$
6	$7 \leq VSP < 10$	13	$33 \leq VSP < 39$
7	$10 \leq VSP < 13$	14	$39 \leq VSP$

O VSP é uma métrica importante, consolidada para entender o desempenho do veículo sob diferentes condições de condução. Ao correlacionar os histogramas de VSP com o tipo de combustível, é possível extrair informações sobre eficiência energética e as emissões. Diferentes autores têm usado, em seus estudos, a abordagem VSP para modelagem de emissões de tráfego rodoviário. (BRUNI, 2018; WANG *et al.*, 2023; XU *et al.*, 2021; YAO *et al.*, 2007).

Segundo a EPA, os modos VSP são categorizados de forma a refletir diferentes estados e atividades do veículo durante a condução. Os modos VSP 1 e 2 estão tipicamente associados a valores negativos de VSP, indicando situações de desaceleração do veículo ou movimento descendente em declives. O modo VSP 3 representa condições de marcha lenta, com o veículo parado ou em velocidade muito baixa. Já os modos VSP de 4 a 14 abrangem faixas crescentes de VSP positivo, correspondendo a cenários como aceleração, velocidade de cruzeiro, constante em diferentes níveis, ou subida em terrenos inclinados.

A EPA estima taxas médias de emissão para cada modo VSP e cada veículo testado. Através da ponderação dessas taxas modais pelo tempo total gasto em cada modo VSP durante um trajeto específico, são calculadas as taxas médias de emissão para toda a trajetória, conforme detalhado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 Taxas médias de emissão por modo de (VSP) para automóveis de passageiros Tier2

T1 PC (n=24); T2 PC (n=39)		Tier 2 - carros leves de passageiro, taxas médias de emissões			
VSP Mode	VSP Range	NO _x _mg/s	HC _mg/s	CO _mg/s	CO ₂ g/s
1	VSP < - 2	0,6	0,3	1,4	1,1
2	0 ≤ VSP ≤ -2	0,6	0,2	1,6	1,3
3	0 ≤ VSP ≤ 1	0,2	0,2	1,3	0,9
4	1 ≤ VSP ≤ 4	1,2	0,4	2,7	2,2
5	4 ≤ VSP ≤ 7	1,8	0,5	3,7	3,0
6	7 ≤ VSP ≤ 10	2,3	0,6	5,0	3,8
7	10 ≤ VSP ≤ 13	2,5	0,7	6,8	4,5
8	13 ≤ VSP ≤ 16	2,6	0,8	7,8	5,1
9	16 ≤ VSP ≤ 19	2,7	0,9	10,3	5,7
10	19 ≤ VSP ≤ 23	2,8	1,0	12,4	6,2
11	23 ≤ VSP ≤ 28	3,4	1,1	16,7	6,7
12	28 ≤ VSP ≤ 33	4,0	1,1	27,3	7,4
13	33 ≤ VSP ≤ 39	4,7	1,3	34,9	8,2
14	39 ≤ VSP	6,5	1,4	69,5	9,2

Fonte: BOROJENI & FREY, 2014

Essa abordagem permite uma avaliação mais precisa e contextualizada das emissões dos veículos, levando em conta a variedade de condições reais de operação e condução.

A metodologias VSP têm ampla aceitação na determinação do consumo de combustível e quantificação das emissões (MERA *et al.*, 2022; WANG *et al.*, 2014; XU *et al.*, 2021; YAO *et al.*, 2013; ZHANG *et al.*, 2022). No estudo de Yao, *et al.* (2013) verificou-se a influência da variação da velocidade, devido às condições de tráfego ao longo do dia, sobre as distribuições VSP.

Essa abordagem voltada a caracterizar as condições de tráfego através do VSP, para determinar as emissões e consumo de combustível, também foi verificada em Beijing (China). Nela, um modelo de VSP ajustado foi calibrado e obtiveram-se resultados satisfatórios quando comparados com medidas reais, principalmente para valores acima de 20km/h (SONG *et al.*, 2012).

Em Portugal, um estudo semelhante foi desenvolvido para caracterizar o consumo de combustível utilizando o método VSP. Veículos MCI e veículo elétrico híbrido (HEV) foram analisados em situações de tráfego por meio de medidas reais e as obtidas por meio do modelo desenvolvido. Como resultado, obteve-se R² superior a 0,9 para veículos convencionais e híbridos (DUARTE *et al.*, 2015). PANG *et al.*, (2018) usando os conceitos de VSP, determinou

o consumo de combustível para um veículo leve, em situações de aclave e declive, e tiveram alta precisão nos resultados.

O uso do VSP também foi evidenciado no trabalho de Wang *et al.* (2023) para avaliar o consumo de combustível e as diferentes emissões, em sete cidade chinesas. Estabeleceu-se um modelo de emissão microscópico baseado em VSP que avaliou efetivamente as emissões instantâneas do veículo e os resultados de emissões totais.

2.5. CICLOS DE CONDUÇÃO DE VEÍCULOS

Um ciclo de condução é um modelo que contém dados de velocidade do veículo ao longo do tempo e deve refletir as características dos veículos de cada localidade, descrevendo, assim, o padrão de vários usuários. De acordo com Subramanian (2011), o ciclo de condução é definido como uma sequência de condições de operação (marcha lenta, aceleração, desaceleração, distância, tempo de condução, frequência das partidas e paradas), desenvolvida para representar um padrão típico de condução em uma determinada região, aproximando-se da realidade. É amplamente utilizado em estudos de emissões veiculares, bem como para estimativas e medições de emissões, além de medir o consumo de combustível, conforme a recomendação de normas (LAI *et al.*, 2013). O processo de obtenção de ciclos de condução envolve 3 (três) fases, de acordo com Huertas *et al.* (2018): (a) instrumentação de um ou vários veículos para registrar sua velocidade em 1Hz; (b) amostragem representativa de ciclos reais (*floatings*) e (c) análise dos dados para construir um ciclo de condução representativo.

Há uma diversidade de ciclos desenvolvidos em vários países, que busca reproduzir aspectos das condições de tráfego local e das características da rota percorrida. Barlow *et al.*, (2009) apresentam, em seu estudo, 256 ciclos padrões de condução, com várias origens e finalidades. Os aspectos avaliados no estudo contemplam ciclos nos quais são tomados dados de trânsito congestionado, sem congestionamento, em veículos como vans, dentre outras peculiaridades. Todavia, alguns desses ciclos se sobressaem ao serem aderidos por diversos países, e não somente por aquele responsável pelos seus desenvolvimentos.

A fim de garantir que o ciclo de condução reflita a realidade, é necessário que ele seja baseado em condições reais de direção de veículos. Nesse sentido, gestores/órgão de controle de diferentes localidades estabeleceram perfis de velocidade em função do tempo para representar o comportamento real de direção em condições de teste em um dinamômetro. Os ciclos de

condução controlados são utilizados para padronizar viagens típicas vividas em uma cidade, país ou região. Eles são usados para desenvolver fatores de emissão para a comparação de veículos em uma base normalizada e para homologação de veículos a fim de verificar se as emissões do veículo estão em conformidade com os regulamentos (GOYNS, 2008). A avaliação padronizada é feita com um veículo colocado sobre um dinamômetro de rolos, com as respectivas características de inércia e atrito do veículo em um ciclo de condução normalizado, simulando, assim, condições de carga do veículo na estrada.

Os testes realizados em laboratório, por meio de um dinamômetro, objetivam reproduzir as condições de rodagem de forma que possa ser realizada a repetibilidade e, com isso, seja possível comparar os padrões de emissões. Dessa forma, os ciclos padrões são utilizados pelas autoridades como referência para a homologação de veículos quanto ao consumo de combustível e emissões de poluentes. De acordo com Miller (2005), os ciclos normatizados devem ser utilizados como referências para comparação, e não como uma representação fiel das condições de operação reais. O perfil de condução, estabelecido nos ciclos padrões, cobre somente parte da maneira como se conduz nas vias; por isso, para contemplar essa limitação, Giechaskiel *et al.* (2016) sugere que novos ciclos sejam realizados para melhorar a representação da realidade das ruas, bem como para reduzir as tolerâncias permitidas no preparo e conduções dos ensaios.

Em suma, os ciclos do mundo real trazem uma série de incertezas e, diante disso, fica difícil estabelecer padrões, pois há inúmeros tipos de veículos e diversos modos de condução pelo motorista, uma vez que cada um possui estilos variados de direção. Assim, gestores e fabricantes de automóveis vêm desenvolvendo seus próprios ciclos de condução de modo a produzir estimativas mais realistas do consumo energético, em condições reais, para veículos específicos.

Na sequência, serão apresentados os principais ciclos de condução utilizados como referência na certificação veicular.

2.5.1 Ciclos Americanos

Na literatura, existem inúmeros ciclos Americanos, dentre os quais se destacam o UDDS, FTP75 e HWFET. O Ciclo *Urban Dynamometer Driving Schedule* (UDDS) simula uma rota

urbana de 12,07 km, com paradas frequentes. A velocidade máxima durante esse ciclo é de 91,3 km/h e a velocidade média é cerca de 31,5 km/h. A Figura 2.5 ilustra o ciclo UDDS.

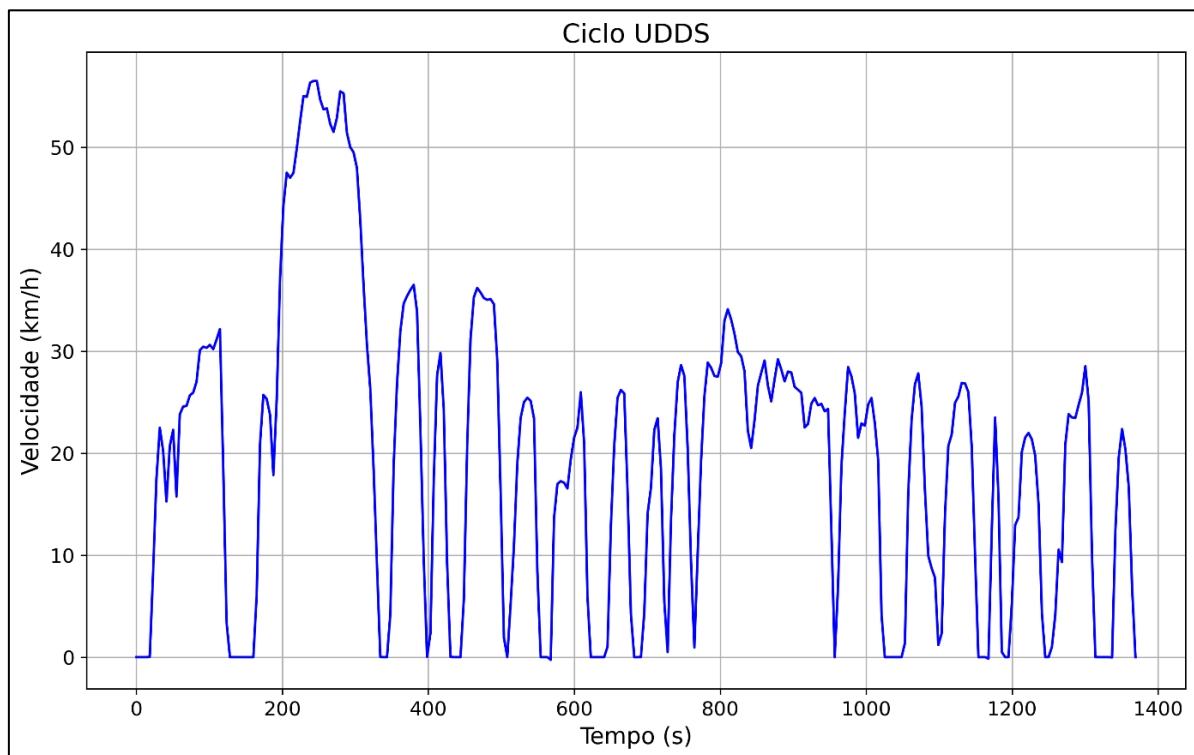


Figura 2.5 Gráfico do ciclo Urban Dynamometer Driving (UDDS)

Fonte: Adaptado de *Matlab/Simulink*, 2021

O ciclo UDDS possui duas fases distintas: a primeira, com duração de 505s, com 5,78 km de distância a 50,6 km/h de velocidade média. A segunda fase tem uma duração de 867s, com 6,29 km de distância e 31,2 km/h de velocidade média (FONSECA, 2018).

Por volta da década de 70, a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), estabeleceu o ciclo de condução utilizado na certificação de veículos o FTP, (*Federal Test Procedure*). Esse ciclo tem sido amplamente utilizado nos Estados Unidos da América para a avaliação das emissões e consumos de veículos ligeiros. O ciclo de condução foi estabelecido a partir de medições de velocidade realizadas durante viagens matinais na Califórnia, simulando a condução de um veículo por um trajeto misto de rodovias e vias urbanas.

No ciclo FTP-75, as emissões de descarga geradas são coletadas de formas distintas, uma para cada etapa do ciclo de condução. As emissões produzidas em cada etapa do teste são coletadas em recipientes separados permitindo a comparação de diferentes modos de operação, como as partidas a quente e a frio. A Figura 2.6 traz uma representação do ciclo de condução FTP-75.

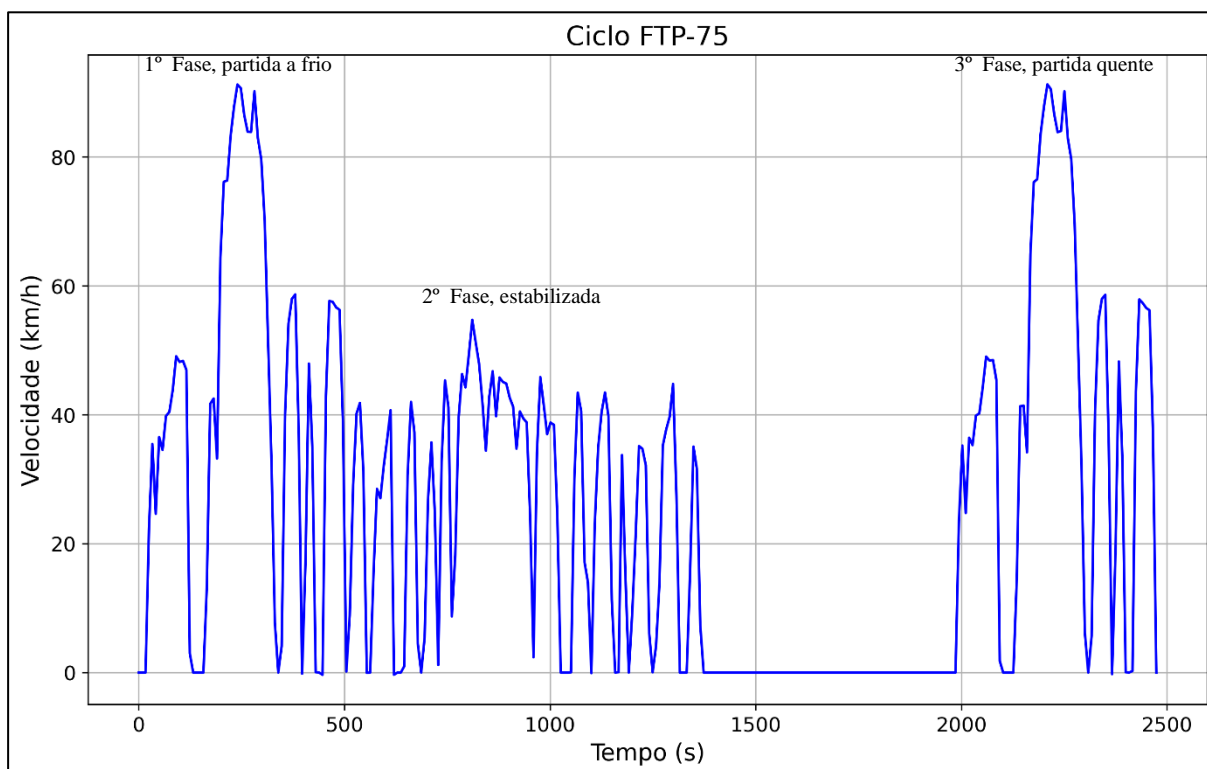


Figura 2.6 Federal Test Procedure (FTP)

Fonte: Adaptado de *Matlab/Simulink*, 2021

Como pode ser observado na Figura 2.6, o ciclo de condução FTP75 pode ser dividido em três fases: uma fase de partida a frio, primeiro recipiente; uma fase estabilizada, segundo recipiente e uma fase de partida a quente, terceiro recipiente. Ao final da fase de estabilização, o veículo é desligado por 600 segundos a fim de se preparar para a fase de partida a quente. O ciclo cobre uma distância total aproximada de 17,77 km, com uma velocidade média de 34,12 km/h e ainda, uma velocidade limite de 91,2 km/h, que foram estabelecidas para acomodar ao dinamômetro de chassi disponível na época em que os testes foram estabelecidos (Bittencourt, 2005).

Outro ciclo bastante difundido nos Estados Unidos é o *Highway Fuel Economy Test* (HWFET ou HFET), que é um padrão de condução no dinamômetro elaborado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) para determinar a economia de combustível de veículos leves em rodovias, já que a classificação da cidade é baseada no teste FTP-75, Figura 2.7.

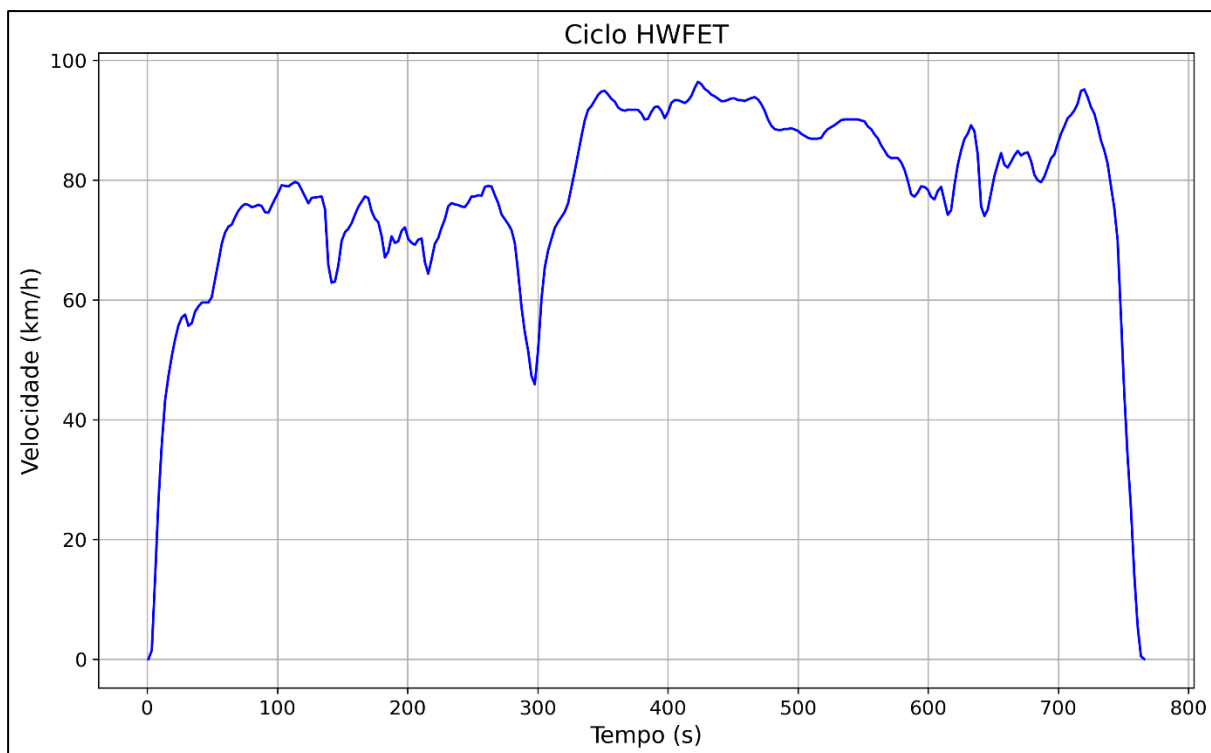


Figura 2.7 Highway Fuel Economy Test (HWFET)

Fonte: Adaptado de *Matlab/Simulink*, 2021

O ciclo HWFET tem duração de 765s e é realizado duas fases, com uma interrupção de cerca de 17s. A primeira fase funciona como uma sequência de condicionamento do veículo, enquanto, na segunda fase, o consumo é mensurado. O ciclo cobre uma distância total aproximada de 16,45 km, com uma velocidade média de 77,7 km/h e uma velocidade máxima de 96,4 km/h.

2.5.2 Ciclos Europeus

Em relação aos ciclos padrões desenvolvidos na Europa, destacam-se o NEDC (*New European Driving Cycle*), um ciclo de condução, que consiste na combinação entre dois ciclos distintos, o *Urban Driving Cycle - ECE-15* (UDC ECE-15) e o *Extra-Urban Driving Cycle* (EUDC). O NEDC foi adaptado, em 1989, e aplicado, desde 1993, em automóveis de passageiros na União Europeia (UE) para avaliar os níveis de emissões e o consumo de combustível em veículos de passageiros com peso inferior a 2500 kg (excluindo-se caminhões ligeiros e veículos comerciais pesados), (DUAN *et al.*, 2017).

O ciclo NEDC traz uma representação do uso típico de um veículo na Europa e é usado como referência para a homologação de veículos segundo a norma Euro6, na Europa, e em outros países (PACHECO *et al.*, 2013). O NEDC foi desenvolvido a partir da reunião de informações

coletadas em viagens feitas na União Europeia e unifica os padrões de emissão que os carros devem cumprir. Esse ciclo é definido para simular a operação normal com a maior precisão possível, conforme é apresentado na Figura 2.8.

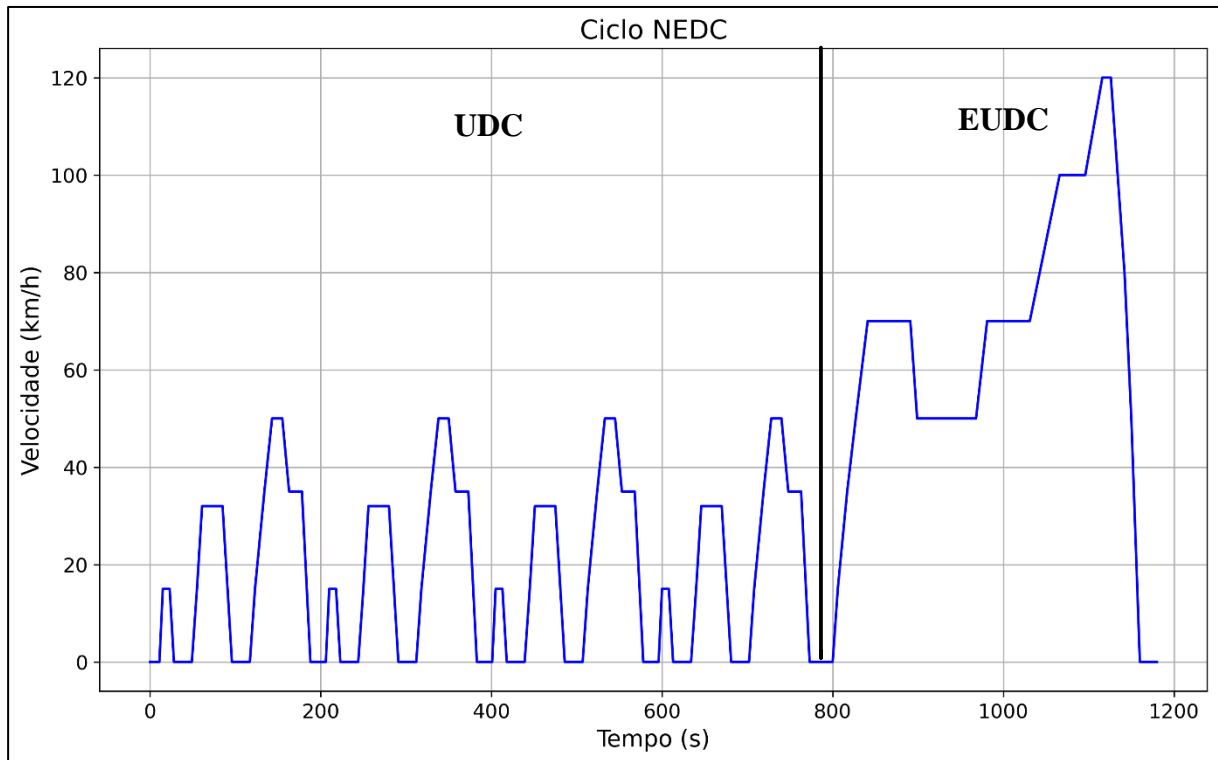


Figura 2.8 *The New European Driving Cycle (NEDC)*

Fonte: Adaptado de *Matlab/Simulink*, 2021

O Ciclo de Condução Europeu (NEDC) está organizado em quatro subciclos que simulam a direção na cidade (UDC), caracterizados por baixa velocidade do veículo e baixa temperatura dos gases de escape, e um subciclo adicional voltado para direção em rodovias (EUDC), marcado por direção em alta velocidade. A duração do ciclo total é de 1180s, em um percurso de 11 km, com velocidade média de 33,6 km/h e máxima de 120 km/h (BARLOW *et al.*, 2009).

Posteriormente, novo procedimento foi criado e adotado com o fim de estabelecer normas mais realistas, em razão da divergência entre os ciclos normatizados para regiões da Europa. O *Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure* (WLTP) foi criado em 2007 e implantado em 2017 para o teste em veículos leves. Esse procedimento possui o ciclo de condução WLTC (*World harmonized Light vehicles Test Cycle*), que vem substituindo gradualmente o NEDC a fim de reduzir as diferenças entre os ciclos de laboratório e as

condições reais de rodagem, principalmente para os poluentes como o NOx e para o consumo de combustível (GIECHASKIEL *et al.*, 2016).

As orientações quanto aos procedimentos de teste do WLTP são rígidas em aspectos como: condições de teste no dinamômetro, peso total do veículo (passageiros, equipamentos extras e cargas), tipo de carga da estrada (forças contrárias ao movimento natural do veículo), qualidade do combustível utilizado, condições de temperatura do ambiente e pressão do pneu utilizado (POLICARPO *et al.*, 2018).

Outro aspecto significativo no WLTP é que os testes realizados no mesmo circuito levam em consideração as condições de trânsito, demonstrando, assim, maior robustez e precisão no ciclo de condução. Isso facilita alguns programas na realização de simulações, bastando importar o mapa da localidade para, assim, obter variações no fluxo de veículos, na velocidade e nas rotas (DONATEO & GIOVINAZZI, 2017). A Figura 2.9 apresenta o padrão dos ciclos de condução utilizados na Europa, no ciclo de condução transitório – WLTC, Classe 3.

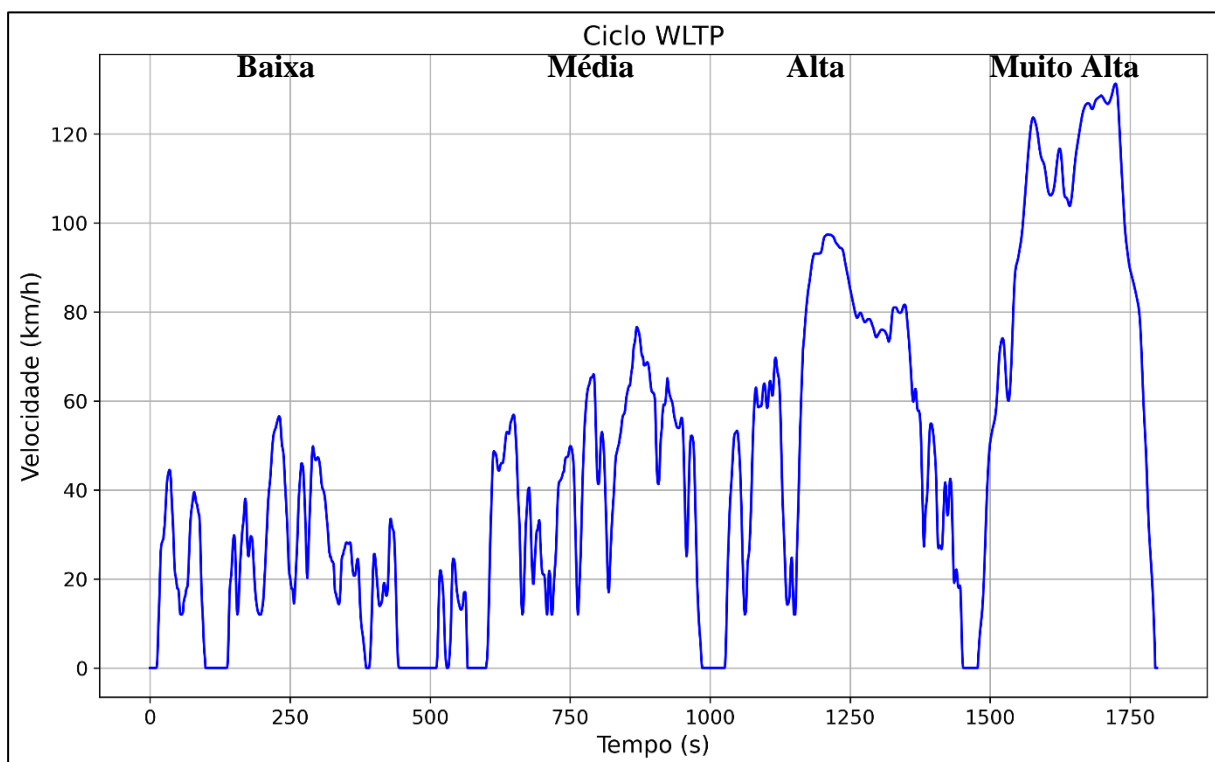


Figura 2.9 Ciclo de condução transitório – WLTC

Fonte: Adaptado de *Matlab/Simulink*, 2021

Na Figura 2.9, as classes de veículos são caracterizadas pela razão entre a potência e a massa do veículo (PMR). A classe utilizada é a 3, a qual representa a grande maioria dos veículos

européus e é composta por quatro fases de velocidade (baixa, média, alta e muito alta). O WLTC dura 1800s, apresenta um perfil de velocidade mais dinâmico, uma quilometragem maior do que o NEDC e, portanto, as emissões de CO₂ da partida a frio têm um impacto menor na economia de combustível geral, em comparação com o NEDC. Uma análise mais completa das características básicas e da relação entre ciclos de condução podem ser encontrados em (PAVLOVIC *et al.*, 2016).

Desse modo, a substituição do ciclo NEDC pelo WLTP tem o intuito de corrigir a discrepância entre a medição oficial e a condição real de rodagem. No entanto, o WLTP ainda apresenta divergência com os valores em uso real (TIETGE *et al.*, 2017). O ciclo WLTC se sobressai ao NEDC por ter acelerações mais acentuadas e velocidades de cruzeiro maiores, enquanto o NEDC contém muito tempo de veículo parado, em marcha lenta (DONATEO & GIOVINAZZI, 2017).

Os procedimentos padronizados FTP-75, proposto nos Estados Unidos com o *Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle* (WLTC), concluiu que o FTP-75 exigiu maiores valores de aceleração média e máxima, implicando em condições de direção mais agressivas. Por outro lado, o WLTC apresentou uma aceleração mais homogênea por diagrama de velocidade, proporcionando maior velocidade média e desvio padrão de velocidade (por exemplo, condições mais transitórias) mais parecido com as condições reais de acionamento. Pôde-se concluir que o WLTC cobre uma ampla gama de condições de operação do motor, mantendo pontos mais dispersos do que o FTP-75.

Além disso, o WLTC continha pontos com maior carga, o que fez com que os resultados de consumo de combustível fossem maiores em comparação ao FTP-75. As principais características da classe 3 do ciclo WLTC em comparação ao NEDC podem ser vistas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 Comparação NEDC e WLTP

CARACTERÍSTICAS	NEDC	WLTP
Duração do ciclo	20 minutos	30 minutos
Distância	11 km	23,25 km
Velocidade máxima	120 km/h	131,3 km/h
Velocidade média	34 km/h	46,5 km/h
Fases de condução	2 Fases	4 fases mais dinâmicas

Fonte: Adaptado de PAVLOVIC *et al.*, 2016

Acrescenta-se como outra vantagem do ciclo WLTP é que este permite avaliar a autonomia dos veículos híbridos e elétricos e ainda realizar procedimentos de testes visando projetar e testar a transmissão de veículos elétricos ou outros componentes (DIESEL NET, 2021).

Portanto, fica evidente que o ciclo WLTP estabelece parâmetros para uma condução mais próxima da realidade, além de apresentar várias vantagens quando comparado com o ciclo NEDC, como, por exemplo, maior média de velocidades, situações de condução mais variadas, teste mais longo, assim como acelerações e travagens mais dinâmicas.

Um outro ciclo bastante difundido na Europa é o Artemis. Apesar de não ser utilizado para certificação de poluentes ou consumo de combustível, os fabricantes de automóveis usam esse ciclo para avaliar o desempenho real de seus veículos. O ciclo Artemis baseia-se num estudo estatístico feito na Europa dentro do chamado projeto Artemis. É feito de três configurações distintas, além de uma variante adicional: o ciclo urbano, o rural e a autoestrada a 130 km/h e a 150 km/h. A Figura 2.10 traz uma representação desse ciclo.

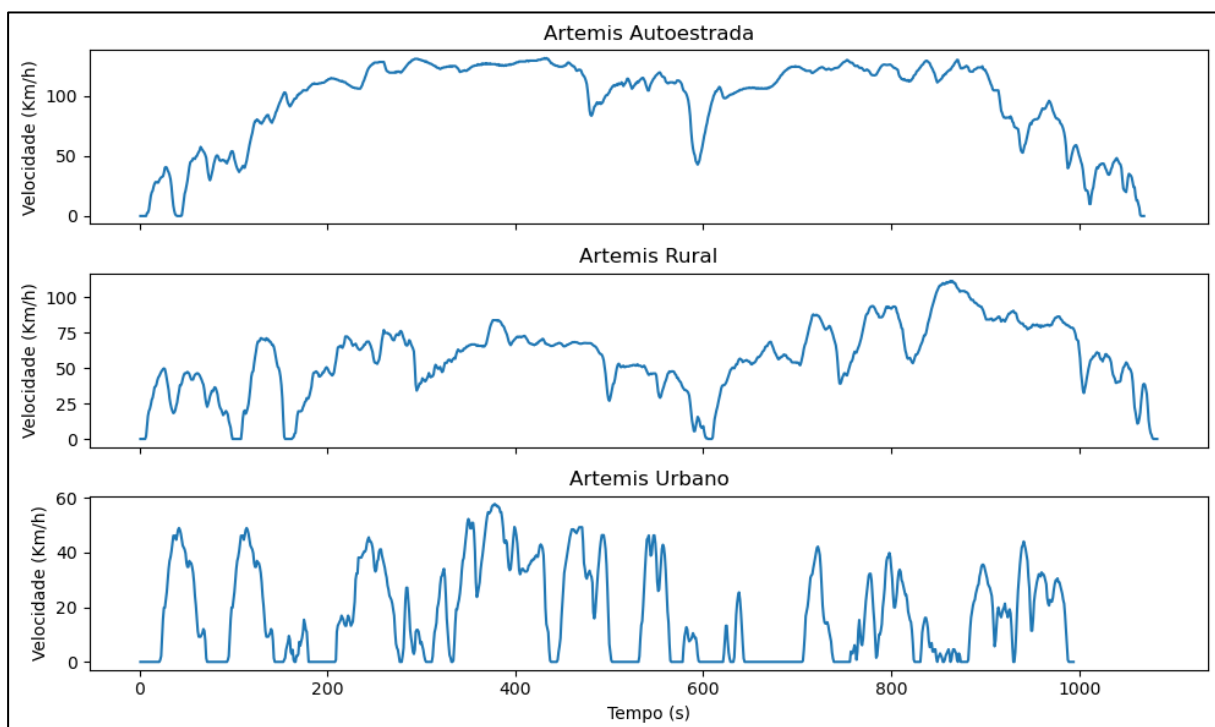


Figura 2.10 O ciclo ARTEMIS
Fonte: Adaptado de *Matlab/Simulink*, 2021

Com base na Figura 2.10, é possível observar diferenças significativas nos três padrões produzidos. Para o ciclo de direção urbana, a velocidade média está em torno de 17,5 km/h e a

velocidade no percurso é de 24,4 km/h, com 21 paradas. A condução rodoviária do ciclo rodoviário tem a velocidade de 63 km/h, com 2 paradas, representando uma parada para cada 7 km percorridos. Já a velocidade média de condução em autoestrada é de cerca de 120 km/h, com nenhuma parada no ciclo (FONSECA, 2018).

2.5.3 Ciclos Asiáticos

Em relação aos ciclos produzidos em países da Ásia, destaca-se o ciclo japonês (10-15 *Mode*) caracterizado por possuir um ciclo urbano (10 *Mode*), um ciclo extra urbano (15 *Mode*) e um ciclo combinado que se inicia com o ciclo 15 *Mode*, seguido de três ciclos 10 *Mode*. Ele termina outra vez com um ciclo 15 *Mode*, razão pela qual ele é denominado como 10-15 *Mode*. Trata-se de um ciclo utilizado para avaliar emissões de veículos leves para áreas urbanas e rodoviárias e que contempla características de marcha lenta, acelerações, viagem de cruzeiro e desacelerações (SUN & YU, 2009). A Figura 2.11 traz uma representação do ciclo 10-15 *Mode*.

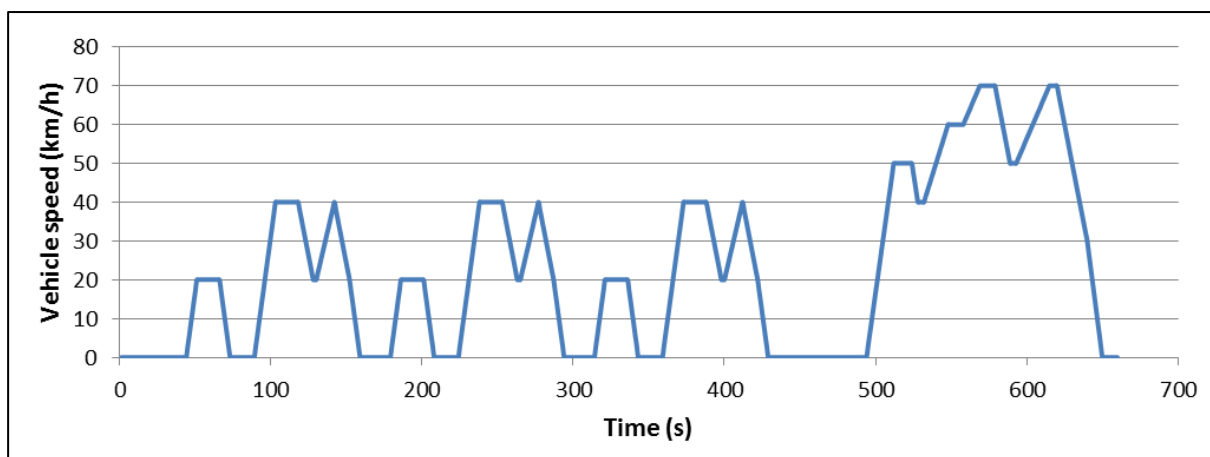


Figura 2.11 Ciclo 10-15 *Mode*

Fonte: OBANDO, 2009

De acordo com a Figura 2.11, o ciclo 10-15 *Mode* tem uma duração de 660s, velocidade média de 22,7 km/h e uma distância total de 4,16 km. Esse ciclo tem uma série de desvantagens, semelhantes àsquelas do NEDC (YAO *et al.*, 2020). Por isso, especialistas, autoridades japonesas e fabricantes de automóveis decidiram alterar os testes de homologação para um ciclo mais realista a partir de 2011, ciclo esse denominado ciclo JC08, Figura 2.12.

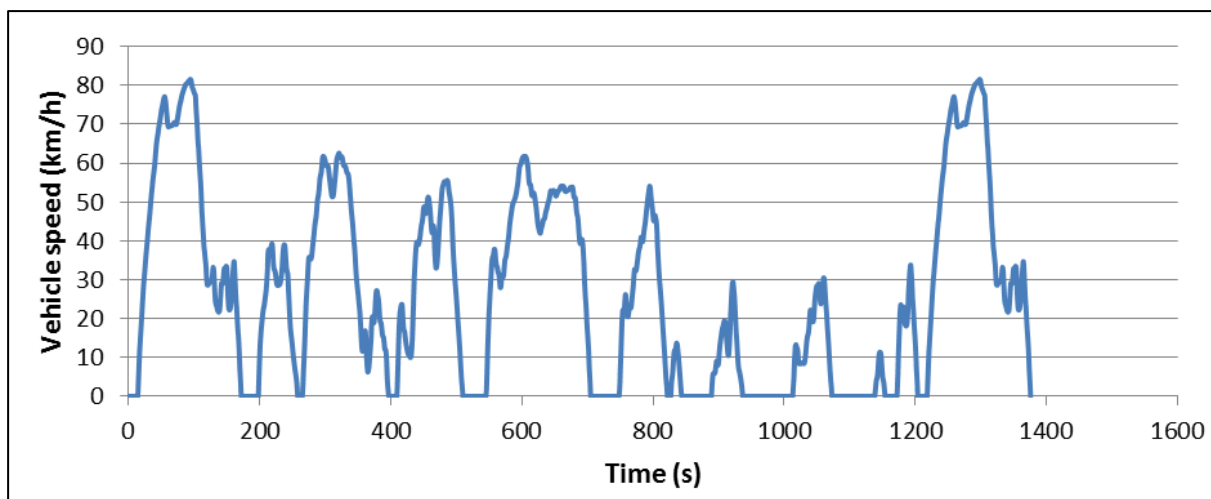


Figura 2.12 Ciclo JC08

Fonte: OBANDO, 2009

De acordo com a Figura 2.12, o ciclo JC08 tem uma duração de 1204s, velocidade média de 24,4 km/h e uma distância total de 8,17 km. O JC08 é um ciclo padrão mais exigente do que o ciclo 10-15 *Mode*. É realizado tanto em partida a frio como a quente, além de contemplar conduções em condição congestionada, com fortes acelerações e desacelerações.

Para fins de resumo, a Tabela 2.4 faz um comparativo entre os principais ciclos de condução usados na certificação de veículos e apresentados nesta seção.

Tabela 2.4 Comparação entre os principais ciclos de condução selecionados

CARACTERÍSTICAS	NEDC	ECE-15	US FTP-75	JTC 10-15 - MODE
País	EU	EU	USA	Japão
Duração da Viagem (s)	1180	780	1874	660
Distância da Viagem (km)	11,00	4,05	17,77	4,16
Velocidade Média (km/h)	33,6	18,7	34,1	22,7
Velocidade Máxima (km/h)	120	50	91	70

Fonte: Adaptado de Weiss *et al.*, 2011.

No intuito de se minimizar as emissões veiculares em diferentes países, vem aumentando o rigor quanto a emissão de poluentes advinda dos veículos a combustão. Outro aspecto que bastante explorado é a produção de bancos de dados, com emissão de diferentes veículos e, ainda, ciclos que buscam incorporar aspectos do mundo real.

2.5.4 Sistema de Avaliação Brasileiro

No Brasil, são adotados pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), como padrão de avaliação de consumo, os ciclos-padrão americano: FTP-75, para consumo nas cidades e HWFET, para o consumo nas estradas, embasadas nas especificações

impostas pela norma ABNT NBR 7024, que determina os procedimentos técnicos e instrumentos laboratoriais para a quantificação dos níveis de consumo.

O sistema de avaliação brasileiro, embora sofisticado e em conformidade com padrões internacionais, apresenta algumas limitações intrínsecas e desafios no contexto nacional. Devido às inconsistências dos valores obtidos em laboratório, ao simular o consumo dos veículos, segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017), diante dos valores obtidos nas ruas pelos condutores, o Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO) lançou a Portaria nº 10, de 11 de janeiro de 2012, que estabelece, em seu Art. 1º, que os consumos obtidos, segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017), devem ser ajustados para melhor se adequarem às situações cotidianas brasileiras, a fim de minimizar a diferença entre os testes (BRASIL, 2012).

Os procedimentos quanto aos ensaios são descritos na Norma Brasileira (ABNT, NBR 6601, para áreas urbanas; NBR 7024, para rodovias) e regulados pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB, 2015), por meio do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE). Para Fonseca (2018), esse programa busca trazer inovações e melhorias, mas com foco no controle de poluentes emitidos por veículos novos.

Outro controle/homologação de avaliação dos níveis de emissões e do consumo de combustível é feito pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV), que controla, de forma não obrigatória, a divulgação do consumo e dos níveis de emissão dos veículos homologados no Brasil. O PBEV tem por objetivo medir, padronizar e registrar a eficiência energética de cada veículo etiquetado, de modo a fornecer um maior nível de informação ao consumidor, no exercício de sua demanda (COSTA, 2019). A Figura 2.13 ilustra o modelo de etiqueta usado no Brasil para representar os níveis de emissões e o consumo de combustível em diferentes veículos.

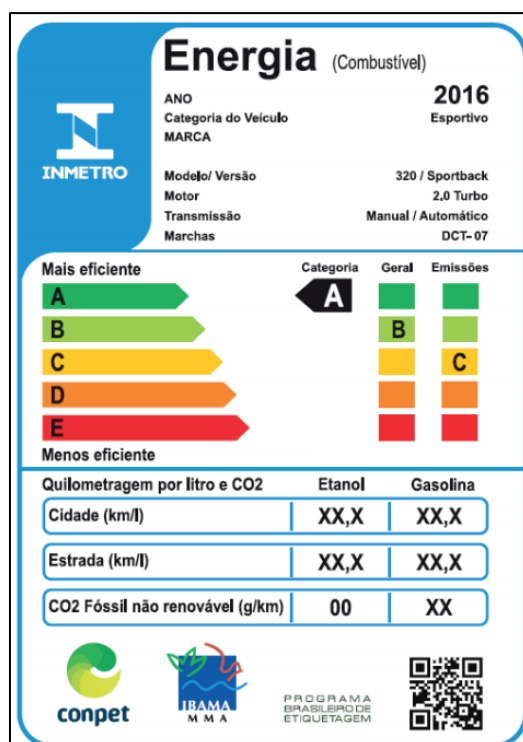


Figura 2.13 Padrão de etiqueta utilizada pelo PBEV

Fonte: Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia - INMETRO

A etiqueta apresentada na Figura 2.13 é colocada, de forma voluntária, em modelos veiculares participantes, classificando-os de acordo com a sua eficiência energética em suas respectivas categorias, que vão de uma escala de 'A' – mais eficiente – até 'E' – menos eficiente (BRASIL, 2013).

O Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) e o Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV) são passos positivos em direção a um monitoramento mais robusto. No entanto, focam predominantemente em veículos novos. É importante reconhecer a vasta frota de veículos mais antigos em circulação no Brasil, que pode não atender aos padrões mais recentes e, portanto, contribuir significativamente nas emissões totais.

Na busca de parâmetros mais rigorosos quanto a avaliação do consumo energético e das emissões de CO₂, a RESOLUÇÃO Nº 492, DE 20 DE DEZEMBRO DE 2018 estabelece as Fases PROCONVE L7 de exigências do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE. De acordo com a resolução, a medição de poluentes seguirá o formato americano, com acompanhamento de emissões de hidrocarbonetos, aldeídos e etanol por NMOG, sigla que, traduzida do inglês, significa “gases orgânicos não metanos”.

O equipamento de medição será calibrado para mensurar precisamente o nível de poluição de cada um dos compostos de forma separada, com adição do etanol no controle, que antes não tinha nível de emissões medido nos carros flex. Para calcular os índices de poluição de cada veículo, o Ibama, órgão responsável pelo controle, faz a soma do NMOG - que é a junção da emissão de hidrocarbonetos, aldeídos e etanol - com os óxidos de nitrogênio (NOx), o gás gerado na câmara de combustão dos veículos e depois tratado no catalisador. Essa medida mais precisa, somada às emissões de NOx, confere um panorama mais realista da poluição gerada por esses veículos quando utilizam etanol.

Por fim, é essencial destacar que a eficácia de qualquer sistema de avaliação está intimamente atrelada à sua correta implementação e fiscalização. Por mais robustas que sejam as ferramentas e regulamentações instituídas, o verdadeiro desafio está em garantir sua ampla adoção, com um monitoramento rigoroso e atualizações periódicas frente às mudanças tecnológicas e comportamentais. O contraste com os sistemas internacionais sugere um caminho potencial para melhorias contínuas e refinamento no sistema brasileiro.

2.5.5 Ciclos Reais de Condução Veicular

No decorrer dos anos, muitos ciclos de condução foram estabelecidos e utilizados para determinar o consumo de combustível e quantificar as emissões veiculares. Esses ciclos de condução são geralmente definidos como trajetórias de velocidade em função do tempo. As emissões veiculares e o consumo são quantificados utilizando dinamômetros em ciclos de direção legislativos padronizados. Todavia, esse procedimento para ciclos de condução padrão, que avalia veículos com diferentes características, pode acarretar discrepâncias significativas, de modo que a maioria dos ciclos de condução tenha curtas distâncias e duração, e assim, sejam inadequados para representar uma gama de condições reais de direção (ARUN *et al.*, 2017; DEMBSKI; *et al.*, 2002; TONG *et al.*, 2011). Para Portella *et al.*, (2020) é consenso entre pesquisadores que as formas de condução em cada cidade são únicas, haja vista que cada uma possui peculiaridades diferentes. Assim, decorrente principalmente dos avanços tecnológicos, a medição das emissões em campo, chamadas de emissões do mundo real, torna-se cada vez mais frequente para dados mais precisos.

Pesquisadores vêm mostrando que os ciclos de laboratórios para quantificar o consumo e as emissões veiculares trazem discrepâncias significativas quando comparados aos ciclos do

mundo real. Isso se justifica pelo fato de os ciclos de laboratório não levarem em consideração questões significativas, como por exemplo, variações nas características da estrada, topografia, condições de tráfego, modo de condução do veículo (BORLAUG *et al.*, 2020; FRUTUOSO *et al.*, 2023), condições meteorológicas (ALVAREZ & WEILENMANN, 2012), tipo de combustível (SPLITTER *et al.*, 2016) e cargas auxiliares (TAMMI *et al.*, 2018). Por exemplo, os frequentes engarrafamentos em grandes cidades, com os veículos operando mais em marcha lenta, não são bem representados nos ciclos padrão. Da mesma forma, as variações de terreno com subidas e descidas em regiões montanhosas, exigindo mais acelerações e desacelerações, não são contempladas nos testes realizados em dinamômetros planos (WYATT *et al.*, 2014)

A IEA (2019) realizou comparativos, de consumo combustível, em ciclos de condução entre o mundo real e os usados em homologação, e pode-se perceber um aumento na diferença ao longo do tempo. Na China, a diferença entre o ciclo do mundo real e o ciclo utilizado nas homologações resultou em um aumento de 20% em 10 anos. Na Europa, aumentou 30%, em 16 anos, enquanto, no Japão, houve aumento de 22%, em 6 anos. Já nos Estados Unidos, a diferença aumentou de 1%, em 2001, para 4% em 2007, chegando ao valor de 8% em 2008 e quase zerando, em 2015, em virtude do emprego de uma nova legislação com o uso de ciclos-padrão mais condizentes da realidade local (IEA, 2019). No Brasil, com o trabalho de Andrade (2020), percebe-se a diferença entre o ciclo do mundo real e o ciclo utilizado nas homologações, medido na cidade do Recife, apontou um erro médio de 24% (a menos) no consumo de combustível. Outros autores confirmam essa disparidade entre o ciclo do mundo real e o ciclo utilizado nas homologações, para o cenário brasileiro (ARAÚJO, 2021; MOREIRA, 2017).

É possível, assim, concluir que os ciclos de condução constituem uma forma padrão de avaliar se a legislação de emissões é cumprida pelos fabricantes de veículos e como a maioria das aplicações são destinadas à realização de homologações, principalmente, com caráter de preservação ambiental. Portanto, a elaboração de ciclos de condução reais para cada situação analisada é favorável aos órgãos fiscalizadores e, sobretudo, benéfico, uma vez que promove a sustentabilidade. Outro aspecto que vale ressaltar é que em decorrência da diferença de tráfego médio existente entre os FTP (Estados Unidos) e o Brasil, há uma considerável variação entre os consumos registrados nos dois países, conforme apresentado. Como forma de medidas mais precisas, foi criada, com base na Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017), a Portaria n.º 10, de 11 de janeiro de 2012, já apresentada anteriormente, que estabeleceu a correção sobre os valores de consumo medidos.

2.6. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA DINÂMICA VEICULAR

Em todos os veículos, a previsão de desempenho e alcance é de fundamental importância. Por isso, com o auxílio de *softwares* computacionais, é possível realizar uma série de simulações para diferentes contextos, levando em consideração aspectos do veículo, tais como, potência do motor, tipo e tamanho da bateria, massa do veículo; e, após a calibração com essas variáveis, é possível analisar como as mudanças afetam o desempenho e o alcance do veículo.

Diferentes autores defendem o uso da modelagem para simular consumo de combustível e emissões de CO₂, visto que sob várias condições, esse procedimento pode contribuir na análise de políticas energéticas. (FONTARAS *et al.*, 2007; GENIKOMSAKIS & MITRENTSIS, 2017; MARKEL *et al.*, 2002; MOHAMMADI *et al.*, 2019; RANA, 2020). Ainda, a modelagem computacional pode ser utilizada nas simulações de diferentes trens de força, tanto para veículos convencionais como para veículos elétricos/híbridos, visando minimizar custos e podendo testar diferentes configurações antes mesmo de sua fabricação.

Inicialmente, essas ferramentas de simulações foram projetadas para analisar trens de forças específicos, sendo que cada modelo foi desenvolvido para atender os cenários particulares de cada empresa. Isso fez com que muitos desses programas tivessem acesso restrito devido a questões comerciais (JOERI *et al.*, 2004). Por consequência, o interesse nos EV cresceu, por volta de 1970, pois se tratava de uma alternativa para amenizar os altos níveis de emissões. As pesquisas foram realizadas em vários protótipos desenvolvidos para testar essas tecnologias (NIKOPOULOS *et al.*, 1997). Diante desse cenário, vários *softwares* de simulação computacional foram desenvolvidos para descrever os trens de força para veículos BEV, como é o caso do: *V-Elph*; *PSAT*, *MARVEL*, *Fastsim* e *Advisor* (TURKMEN *et al.*, 2017; VANFRETTI & MILANO, 2007; VILCHEZ & JOCHEM, 2019). Em complemento, Tammi; *et al.*, (2018), aponta que houve uma evolução de *softwares* que antes eram exclusivos para avaliar a eletrificação nos veículos e que passaram a ser ferramentas gerais de simulação multissistema com modelos de componentes. Em complemento, Tammi *et al.*, (2018) chama a atenção que, por volta de 1995, ferramentas de simulação de veículos CI já eram utilizadas há bastante tempo, mas uma ferramenta de análise e otimização para sistemas híbridos e totalmente elétricos ainda precisava ser aperfeiçoada.

O *V-Elph* é um pacote de modelagem de trens de força desenvolvida na Universidade do Texas usado em simulações de veículos elétricos (BEV) e Veículos elétricos híbridos (HEV). Projetado na linguagem de simulação gráfica *Matlab/Simulink*, tem como base explorar os aspectos relacionados à eficiência energética, ao consumo de combustível e às emissões veiculares para os veículos convencionais, elétricos e híbridos. Em Butler *et al.*, (1997) foi criado um modelo computacional para analisar os trens de força de diferentes veículos híbridos, em que foi possível realizar diferentes configurações e estratégias de controle.

Ainda na mesma linha de simulação para veículos elétricos, Rahman *et al.*, (2000), realizou um estudo comparativo para diferentes plataformas híbridas (série e paralelo) a fim de avaliar o consumo energético e as emissões por meio de simulações que apresentaram como resultado que os veículos híbridos com taxas de hibridização mais altas resultam em melhor economia de combustível e redução nas emissões de poluentes.

Já o *Powertrain systems analysis toolkit* (PSAT) foi desenvolvido pela *Argonne National Laboratory* (ANL) em 1995 e posteriormente incorporada à General Motor (GM), o que resultou no aprimoramento quanto a simulação de uma série de modelos veiculares, incluindo veículos convencionais, veículos elétricos a bateria, veículos elétricos a célula de combustível, veículos híbridos paralelos, veículos híbridos em série, entre outros Chen, (2010). De forma geral é possível criar os modelos do trem de força e escolher cada modelo de componente a ser usado, o que permite ao usuário implementar seus próprios modelos de componentes de forma detalhada e assim analisar de forma precisa o comportamento desses componentes dentro do sistema (VANFRETTI & MILANO, 2007). Esse procedimento foi feito no trabalho de Nesamani *et al.*, (2017) que selecionou uma configuração específica dentro dos bancos de dados para simular uma combinação de células de combustível a hidrogênio e simular em diferentes condições de direção e ciclos de direção e em todos os casos a vantagem econômica de combustível do veículo com célula de combustível pode ser vista claramente. A Figura 2.14 traz uma representação das etapas do processo de simulação PSAT.

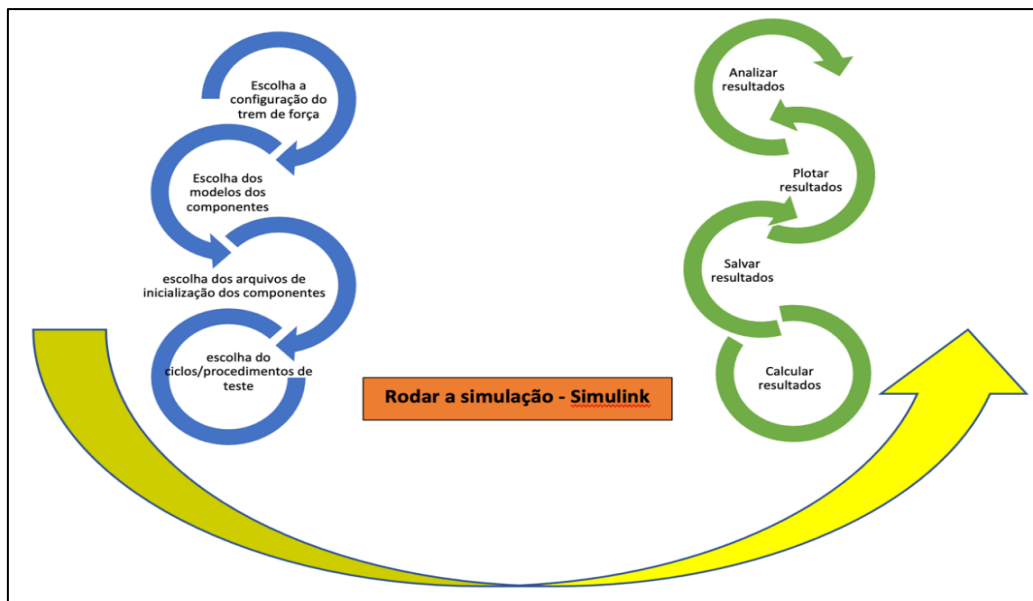


Figura 2.14 Processo de simulação do PSAT

Fonte: Adaptado de CHEN, 2010

A fase do *PSAT* está relacionada à escolha entre os seguimentos elétricos, convencionais ou células de combustível. Posteriormente, o usuário pode selecionar cada componente com base nas especificações dos veículos, como potência do motor a combustão ou elétrico, gerador, peso dos componentes entre outros. Após a configuração dos diferentes componentes do veículo o usuário pode selecionar os ciclos e condução de diferentes localidades a fim de avaliar a economia de combustível para diferentes tipos de veículos como carros, ônibus e caminhões em várias condições de teste diferentes.

Portanto, a estrutura do sistema *PSAT* é bastante ampla, o que possibilita a inserção de novas funcionalidades como estimativas de custo vitalício do veículo ou outros itens de interesse, que são adicionados sem alterar o código central do programa.

Outro *software* bastante difundido é o *MARVEL*, *Modular Vehicle Fleet Simulation Tool*, o qual foi desenvolvido pelo Centro de Pesquisa Automotiva TARDEC, do Exército dos EUA, em conjunto com o Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Michigan. É uma ferramenta de simulação utilizada para dar suporte à decisão ao avaliar a modularidade de veículos terrestres, como por exemplo, os custos e benefícios de operar uma frota convencional de veículos *versus* uma modular para executar um conjunto ações-padrão.

Por meio do programa, é possível realizar análise da modulação de frotas de veículos puramente elétricos, híbridos em substituição a uma frota de convencionais incluindo o custo total do ciclo

de vida (BAYRAK *et al.*, 2015; SISIOPIKU *et al.*, 2006). De acordo com Trindade (2016), nos veículos elétricos, o *MARVEL* permite avaliar os custos levando em consideração o ciclo de vida mínimo que identifica a combinação ideal de bateria (série/paralelo) para diferentes tipos de veículos e emissões.

Já o *FASTsim*, *Future Automotive Systems Technology Simulator*, do Laboratório Nacional de Energia Renovável, trata-se de uma ferramenta avançada para a análise de sistemas de trem de força em veículos de alto nível, suportada pelo Escritório de Tecnologias de Veículos do Departamento de Energia dos EUA. Esse *software* fornece uma abordagem rápida e simples que compara os grupos motopropulsores a fim de estimar o impacto das melhorias tecnológicas na eficiência, desempenho, custo e duração da bateria de veículos leves e pesados.

Sendo assim, os dados de entrada para a maioria dos veículos leves podem ser importados automaticamente. Esses *inputs* podem ser alterados para representar variações do veículo ou trem de força. Logo, o veículo e os seus componentes são simulados por meio de ciclos de velocidade *versus* tempo. A cada passo, o *FASTSim* analisa a resistência a arrasto, aceleração, subida, resistência ao rolamento, eficiência e limites de potência de cada componente do trem de força e a frenagem regenerativa. Os *Powertrains* com tração elétrica, opcionalmente, podem ser simulados com o uso de tecnologias de estradas elétricas, como transferência dinâmica de energia sem fio.

Advisor, *Advanced Vehicle Simulator*, é um simulador de veículos avançado do *National Renewable Energy Laboratory*, criado para conferir suporte aos sistemas de propulsão híbrida do Departamento de Energia dos EUA e foi projetado para ser preciso, rápido, flexível, facilmente compartilhável e fácil de usar. Várias funcionalidades podem ser destacadas, como a economia de combustível, o desempenho e as emissões de veículos que usam tecnologias alternativas, incluindo células de combustível, baterias, motores elétricos e motores de combustão interna (WU *et al.*, 2015). O *Advisor* foi criado no ambiente *Matlab/Simulink* com intuito de representar sistemas complexos graficamente usando diagramas de blocos.

O *Advisor* é um dos principais simulares utilizados por pesquisadores para, principalmente verificar o consumo de combustível e emissões de poluentes, como pode ser visto nos trabalhos de (AGGARWAL *et al.*, 2011; ZHUANG *et al.*, 2020) entre outros. Em Mubarak *et al.*, (2021) e (FIORI *et al.*, 2016) são realizadas análises para um modelo convencional e outros dois

híbridos (série e paralelo) para situações do mundo real e, posteriormente, o simulador é calibrado para, assim, tirar conclusões a respeito da economia de combustível e das emissões para diferentes formas de direção. Os resultados apontam para consumo significativo de combustível e reduções de emissões pelos veículos eletrificados em comparação com a contraparte convencional.

Ainda com respeito aos programas de simulação, muitos foram atualizados para atender à diversidade de configurações possíveis dos BEVs ou HEVs, isso para atender a grandes empresas e à comunidade científica na implementação de modelos mais específicos, focados em projetos específicos, baseados em plataformas reconhecidas como é o caso do *Matlab/Simulink* (TROVÃO *et al.*, 2009).

De forma geral, o simulador utiliza um ambiente *simulink/Matlab*, sendo que o *Matlab* está relacionado com o ambiente de programação de matriz para realizar as combinações matemáticas complexas, enquanto o *Simulink* está associado a um sistema gráfico que utiliza diagramas de blocos. O programa apresenta três janelas principais conforme pode ser observado na Figura 2.15.

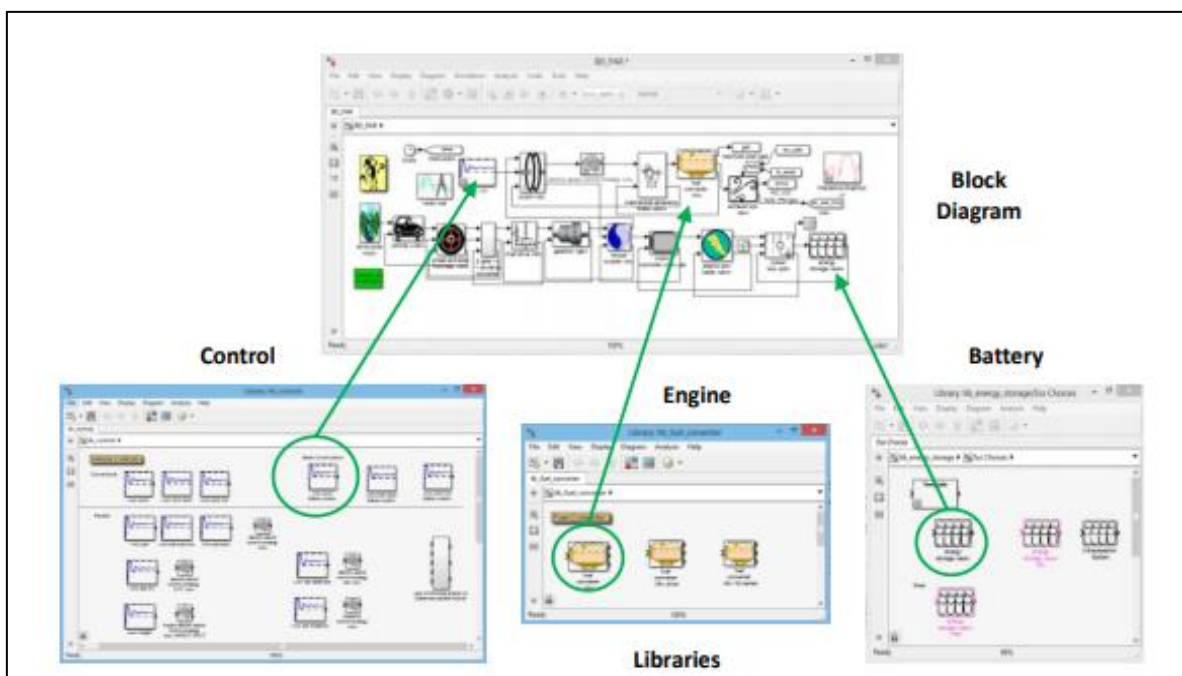


Figura 2.15 ADVISOR. Tela principal e arquitetura de bibliotecas
Fonte: MARKEL *et al.*, 2002

O simulador permite configurar cada componente do veículo, e faz o cálculo da energia necessária para o cumprimento de um determinado ciclo de condução nas rodas, e conseqüentemente estabelece um fluxo de potência com a modelagem dos componentes desde o trem de força até o motor.

De modo a determinar resultados mais precisos o simulador ADVISOR passou por vários estudos realizados pela NREL. Em Balci *et al.* (2021) foi realizado um estudo de modo a verificar as diferenças entre os valores simulados e medidos dos consumos de combustível e emissão de poluentes para ciclos de condução em condições reais nas vias. Os resultados da simulação indicaram uma diferença de consumo de combustível e emissões em cerca de 14% e 21%. No entanto, o trabalho de Senger *et al.* (1998), que comparou o resultado de extensas simulações utilizando as ferramentas *SIMPLEV*, *HVEC*, *SCM HEV*, *V-ELPH* e *ADVISOR* aponta boa concordância com os experimentais em modo totalmente elétrico (o erro foi da ordem de 1%); enquanto, para o híbrido, observou-se distorção dos dados e erros muito elevados. Resumidamente, no Quadro 2.3 explicita as principais características em diferentes simuladores.

Quadro 2.3 Diferentes simuladores suas principais características.

Simulador	Principais Recursos	Diferenciais
<i>V-Elph</i>	Simulação de trens de força para EVs e HEVs. Modelado no <i>Matlab/Simulink</i>	Foco em análise de eficiência energética e emissões
<i>PSAT</i>	Simulação de múltiplos designs de powertrain. Alto nível de customização	Modelagem detalhada de componentes. Análises de custo e consumo
<i>MARVEL</i>	Simulação de frotas. Comparação modularidade vs convencional	Ênfase em custo total de propriedade e ciclo de vida
<i>FASTSim</i>	Simulação rápida de powertrains. Importação automática de dados	Comparação simplificada de tecnologias. Análise de desempenho
<i>ADVISOR</i>	Simulador avançado para HEVs e FCVs. Integração <i>Matlab/Simulink</i>	Preciso e flexível. Integração com ferramentas <i>MATLAB</i>

Embora úteis, esses simuladores possuem limitações que devem ser consideradas, como a dificuldade de modelar precisamente o comportamento humano ao dirigir e as variações complexas do mundo real. Além disso, os resultados dependem dos dados e premissas adotadas. Pesquisas futuras devem buscar integrar modelos de tráfego, clima e outros aspectos ao contexto local para aumentar o realismo das simulações. Igualmente importante é aprimorar as interfaces e facilitar o compartilhamento de dados e modelos entre plataformas.

Em conclusão, os *softwares* de simulação veicular evoluíram rapidamente nas últimas décadas. Porém, há espaço para avanços contínuos, combinando modelagem precisa dos componentes com representação mais ampla dos sistemas de transporte e seu contexto operacional, que reflitam situações reais. Nesse sentido, os simuladores poderiam ser integrados a submodelos que adotem curvas de regressão aliados ao perfil de velocidade, no intuito de apresentar resultados mais preciso em termos de emissões e consumo energético.

2.7. PLANOS DE MOBILIDADE

O Plano de Mobilidade Urbana – (PMU) é utilizado como ferramenta de direcionamento no planejamento de curto, médio e longo prazo de modo a integrar o planejamento urbano ao transporte e trânsito, levando em consideração as questões sociais e ambientais. Estabelecida pela lei 12.587/2012 a Política Nacional de Mobilidade Urbana – PNMU visa contribuir para o acesso universal à cidade, integrar os diferentes modos de transporte, melhorar a acessibilidade e mobilidade de pessoas e cargas nos diferentes territórios (BRASIL, 2012). Para Azevedo Filho (2012), ainda há uma confusão, visto que o antigo “Plano Diretor de Transporte Urbano” passou a se chamar “Planos de Mobilidade Urbana”, e fica evidente no caso do plano elaborado para o Distrito Federal (STDF, 2009).

De acordo com Silva (2009), o PMU confere subsídios para elaboração de ações voltadas para a resolução de problemas e necessidades da população, identificados por meio de diagnósticos e da participação dos atores sociais. O PMU pode ajudar a garantir que as propostas de transporte estejam em consonância com sistema de transporte existente garantindo o enfrentamento de desafios reais (GIZ, 2013).

Outro aspecto apresentado no PMU e que tem sido uma preocupação mundial é a questão ambiental, para a qual se sugere que seja realizado monitoramento e controle das emissões dos gases de efeito local e de efeito estufa dos modos de transporte motorizado. Recentemente, a lei 12.587 alterou os prazos, uma vez que substituiu o Artigo 24, o qual trata da principal ferramenta de planejamento de mobilidade urbana: o PMU estabelecendo sua obrigatoriedade, como já citado, para todas as cidades com mais de 20 mil habitantes. Este Plano de Mobilidade Urbana além de necessitar seguir os princípios de diretrizes da PMU deve ainda ser integrado ao Plano Diretor – que regula o uso e ocupação do solo, pois, conforme a literatura revisada, o uso do solo tem reflexos diretos na mobilidade da cidade.

Embora diversas prefeituras estejam empenhadas em cumprir as diretrizes estabelecidas pela Lei nº 12.587, que institui as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana, observa-se que muitos Planos de Mobilidade têm priorizado a análise da distribuição modal e as previsões relacionadas ao crescimento da frota de veículos. Contudo, frequentemente, esses planos não exploram de maneira suficiente as emissões de CO₂.

Comumente, a metodologia adotada para o cálculo dos gases de efeito estufa segue uma abordagem simplista, conhecida como "fonte em linha". Essa técnica estima as emissões de CO₂ para cada categoria de veículo ao longo de segmentos de um quilômetro, utilizando coeficientes de emissão obtidos em condições controladas de laboratório, como é o caso do ciclo de testes FTP-75.

Essa metodologia foi aplicada no Plano Diretor de Transporte Urbano (PDTU) do Distrito Federal, assim como no Plano de Desenvolvimento do Transporte Público sobre Trilhos do DF. Ambos os planos serão discutidos mais adiante, com o intuito de ilustrar a aplicação prática dessa abordagem e suas implicações para a política de mobilidade urbana.

É crucial que os Planos de Mobilidade não apenas se alinhem com as projeções de crescimento veicular, mas também desenvolvam estratégias efetivas para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa, considerando, a longo prazo, o impacto ambiental e a sustentabilidade das cidades.

2.7.1 O Planejamento da mobilidade urbana no DF

Em termos de planejamento da mobilidade, o Programa de transporte Urbano (PTU), implantado em 2007, visava melhorar os aspectos relacionados à mobilidade e à acessibilidade da população do Distrito Federal. As ações estavam voltadas para aumentar a integração dos núcleos urbanos da área metropolitana de Brasília priorizando o transporte público coletivo. De acordo com o relatório de 2013, estabelecido para o PTU/DF, alguns dos objetivos são:

- Criar vias exclusivas para ônibus e melhorar o acesso dos usuários nos veículos, nas paradas e nos terminais;
- Construir ou reformar pontos de parada e terminais de ônibus;

- Melhorar as ações do Governo com relação aos transportes, como a fiscalização dos serviços e o atendimento aos usuários, mediante o fortalecimento institucional da Secretaria de Transportes;
- Melhorar a segurança de trânsito para os pedestres, os ciclistas e os veículos;

Apesar das várias propostas estabelecidas no PTU, sua execução, em termos de implantação de infraestrutura, ficou praticamente limitada à implantação e expansão da ligação entre Taguatinga e o Plano Piloto (EPTG).

2.7.2 Plano Diretor de Transporte Urbano do Distrito Federal

O rápido crescimento do Distrito Federal e seu entorno acarretou uma série de problemas, dentre eles a questão da mobilidade e respectivamente na qualidade de vida (PDTU/DF, 2011). Com o propósito de reparar os problemas associados ao sistema de transportes e sua estrutura, foi instituída a Lei nº 4.566/2011 - Lei Orgânica do Distrito Federal, que instaura o Plano Diretor de Transporte Urbano do Distrito Federal – PDTU/DF com a finalidade de criar diretrizes estratégicas quanto à reformulação da mobilidade entre as cidades do Distrito Federal e de seu Entorno.

O PDTU/DF visa integrar os vários modos de transporte buscando contemplar os desejos de deslocamento da população, otimizando a eficiência do sistema e garantindo condições adequadas de mobilidade para os usuários (MAIA *et al.*, 2014). Esse plano definiu, ainda, diretrizes a serem utilizadas na orientação de ações do governo em relação aos transportes coletivos não motorizados e individuais, buscando atender às necessidades atuais e futuras da mobilidade urbana.

Outro instrumento que vai na mesma abordagem é o Plano de Desenvolvimento do Transporte Público sobre Trilhos do DF - PDTT/DF, desenvolvido entre 2015 e 2018, que teve como objetivo especificar a rede pretendida para o Sistema de Transporte Público Coletivo do DF - STPT/DF em um horizonte de 20 anos, tomando como ponto de partida a análise dos dados levantados na Pesquisa de Mobilidade Urbana do DF - PMU/DF.

Outro aspecto fundamental contemplado no PDTU/DF, foi a questão da sustentabilidade. Os aspectos apresentados nas diretrizes direcionam para mudanças na matriz energética, ou seja,

mudança no consumo dos combustíveis fósseis e limitação da poluição urbana. Assim, buscase que a mobilidade limpa e ambientalmente “ética”, devendo se encaixar no território da política energética em uma lógica das redes inteligentes, considerando as questões de saúde pública e controle das emissões de gases de efeito estufa – (GEE - PDTU, 2011).

As emissões de dióxido de carbono (CO₂) provenientes do setor de transportes têm sido uma preocupação crescente no Distrito Federal, dada a sua contribuição significativa para a poluição atmosférica e os impactos climáticos. O PDTU/DF e o PDTT/DF reconhecem a necessidade urgente de abordar essa questão. Ambos os planos enfatizam a transição para modos de transporte mais limpos e eficientes para reduzir as emissões, como o transporte sobre trilhos.

Na mesma linha, o relatório da (CODEPLAN, 2018) embasado nas necessidades de redução de GEE no DF, aponta que os estados devem realizar diferentes ações simultâneas, como a aceleração do progresso tecnológico na motorização (veículos elétricos), incentivo das pessoas ao transporte de massa e modos não motorizados (CODEPLAN, 2018).

Em seu trabalho Santos (2017), pontua que o uso excessivo da gasolina contribui de forma significativa nos impactos ambientais da mobilidade urbana do DF, e que, mesmo com alterações e investimentos no transporte coletivo, o impacto seria pouco significativo, considerando o sistema como um todo, devido à forte influência energética do transporte.

Com respeito às emissões, é importante salientar o seu rápido crescimento, principalmente, em decorrência do aumento do uso da gasolina a partir de 2009 até o ano de 2012 no DF, devido às políticas fiscais de redução de impostos sobre veículos novos (CODEPLAN, 2018). Outro aspecto que contribuiu para o aumento das emissões por transporte foi a diminuição do consumo de etanol nesse período, provavelmente em decorrência do aumento do preço. Essa tendência de crescimento é interrompida em 2018, com a retomada do consumo de álcool hidratado, conforme pode ser observado na Figura 2.16.

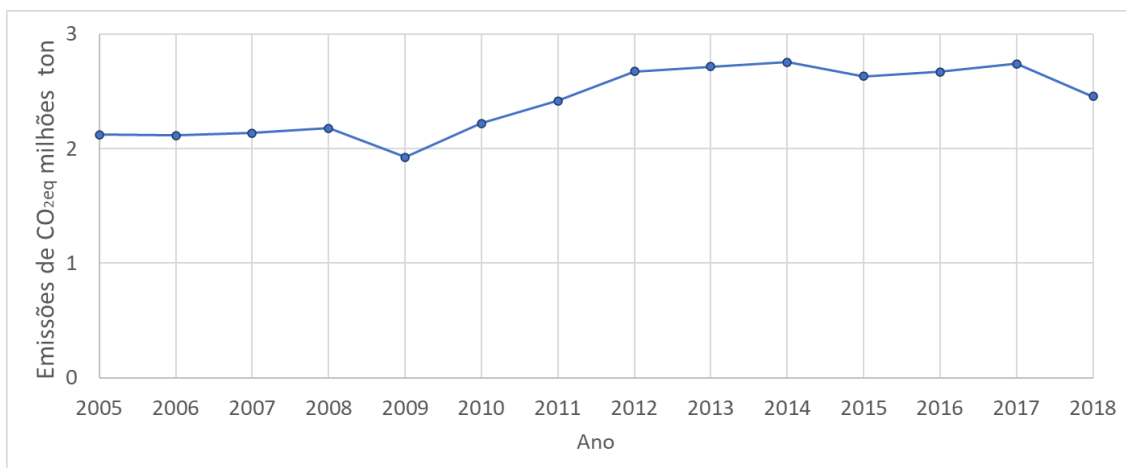


Figura 2.16 Emissões de gases de efeito estufa no setor de transporte rodoviário
 Fonte: Adaptado de STDF, 2009

As emissões de álcool hidratado e anidro não são contabilizadas no inventário porque não tem efeito líquido sobre o efeito estufa, sendo mostradas apenas para informação. No entanto, o crescimento das emissões provenientes do consumo de gasolina aumentou no período de 2009 a 2018. A Figura 2.16 apresenta a evolução das emissões no setor transporte rodoviário.

A partir disso, é possível observar que as emissões de CO₂ são predominantes, respondendo por mais de 97% das emissões em todo o período, de 2005 a 2018. As emissões CO₂ do setor rodoviário cresceram entre 2005 e 2018 em 15,83%, reiterando que o número de veículos no mesmo período cresceu 119%. As emissões de CO₂ só não foram maiores pelo uso de biocombustíveis, em especial, pelo uso de etanol nos automóveis e biodiesel em ônibus e caminhões. O etanol segue sendo o biocombustível mais utilizado no DF, mas o uso do biodiesel vem aumentando ao longo dos anos.

O uso de biocombustíveis apresentou um crescimento de 101,75%, entre 2005 e 2018, e representou 12,33% das emissões evitadas do setor transporte rodoviário, em 2005, e 19,89%, em 2018. O uso de biocombustíveis atingiu um máximo no período de 21,53%, em 2009, e um mínimo de 11,92%, em 2012, pelo menor uso de etanol no DF.

2.7.3 Medidas de sustentabilidade e cálculo de emissões em Planos de Mobilidade

Algumas medidas sustentáveis para a mobilidade urbana e a redução dos impactos da poluição atmosférica por fonte veicular podem ser adotadas como a utilização do transporte público e do

transporte não-motorizado; com a renovação das frotas e a utilização de veículos com menor impacto poluidor (elétricos, híbridos, a gás natural, ou veículos a diesel com menor teor de enxofre ou que sejam equipados com sistemas avançados de controle de emissões); com alternativas energéticas que promovam a redução de emissões de gases de efeito estufa, de forma a reduzir os impactos do setor de transportes sobre o aquecimento global.

Um ponto crítico é a dificuldade de quantificar com precisão o consumo energético e as emissões oriundas do setor de transportes. As estimativas costumam basear-se em modelos simplificados, que não capturam adequadamente a complexidade das interações e padrões de deslocamento reais. Por exemplo, no Plano Diretor de Transporte do DF, as projeções de emissões consideram basicamente o crescimento da frota veicular. Porém, não incorporam fatores comportamentais, tecnológicos e de infraestrutura que podem alterar substancialmente as emissões ao longo do tempo.

Comumente, a metodologia adotada para o cálculo dos gases de efeito estufa segue uma abordagem simplista, conhecida como "fonte em linha". Essa técnica estima as emissões de CO₂ para cada categoria de veículo ao longo de segmentos de um quilômetro, utilizando coeficientes de emissão obtidos em condições controladas de laboratório, como é o caso do ciclo de testes FTP-75. Essa metodologia foi aplicada no Plano Diretor de Transporte Urbano (PDTU) do Distrito Federal, assim como no Plano de Desenvolvimento do Transporte Público sobre Trilhos (PDTT) do DF. Contudo, essa abordagem simplista tem limitações.

Para superar esses desafios, é essencial o desenvolvimento de um modelo híbrido que combine métodos estatísticos e computacionais. Tal modelo deve ser calibrado com dados locais específicos, incluindo informações sobre a frota, tipos de combustíveis, topografia e padrões de condução. Isso permitirá a realização de cenários futuros mais precisos e úteis para especialistas e gestores, na abordagem relativa as emissões em Planos de Mobilidade, demonstrando como o avanço de determinadas tecnologias pode influenciar o consumo energético e as emissões de CO₂.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

É oportuno, inicialmente, fazer uma descrição geral do procedimento metodológico e entrar em detalhes nos itens seguintes, visando melhor entendimento do desenvolvimento do trabalho. Para o desenvolvimento metodológico deste trabalho, foram planejadas etapas que incluíram, primeiramente, a caracterização de rotas de transporte veicular em vias do Distrito Federal. Os consumos de combustível, energia, e as emissões de CO₂ foram medidos segundo a segundo nessas rotas, por meio da utilização de um veículo com motor à combustão interna (MCI), um veículo elétrico híbrido (HEV) e um veículo elétrico a bateria (BEV), (RIMPAS *et al.*, 2020). Os ciclos de condução em condições reais foram comparados ao FTP-75 para verificar as diferenças entre o ciclo FTP-75 e os ciclos em condições reais, determinando a influência dos ciclos nos cálculos de inventário de consumo de combustível (ou energia) e emissões de CO₂ (QUIRAMA *et al.*, 2020). Além disso, nessa primeira etapa foram levantados o volume de tráfego em pontos específicos, nas rotas, e a média de passageiros por veículo nessas mesmas rotas. Nessa etapa do estudo também foram realizadas simulações numéricas com o pacote *Matlab/Simulink*, onde os veículos MCI, HEV e BEV foram totalmente implementados numericamente, bem como, foram implementadas numericamente no *Matlab* as condições reais dos veículos nas vias. As simulações numéricas foram realizadas com dois objetivos, o primeiro foi determinar numericamente as emissões de CO₂ e consumo de combustível (ou energia) e comparar os valores com os resultados experimentais, mas também foram calculadas numericamente as emissões de outros poluentes, nomeadamente HC, CO, NO_x os quais não foram determinados experimentalmente. O segundo objetivo da simulação numérica foi, dentro da margem de erro entre valores numéricos e experimentais, adaptar o modelo proposto a ser utilizado em qualquer cidade, visando a aplicação em Planos de Mobilidade. Ou seja, se não houver a possibilidade de caracterização dos ciclos de velocidade reais nas vias em uma cidade, a simulação numérica poderá suprir o levantamento experimental dos veículos nas vias.

O levantamento do número de passageiros por veículo nas vias, tanto na hora pico, quanto fora de pico foi fundamental e serviu para calibrar a relação entre o número de viagens na hora pico, publicado nos estudos do PDTU, e o número de veículos também na hora pico. A estrutura geral adotada do procedimento metodológico para a concepção do modelo, desde os estudos preliminares, é sintetizada na Figura 3.1.

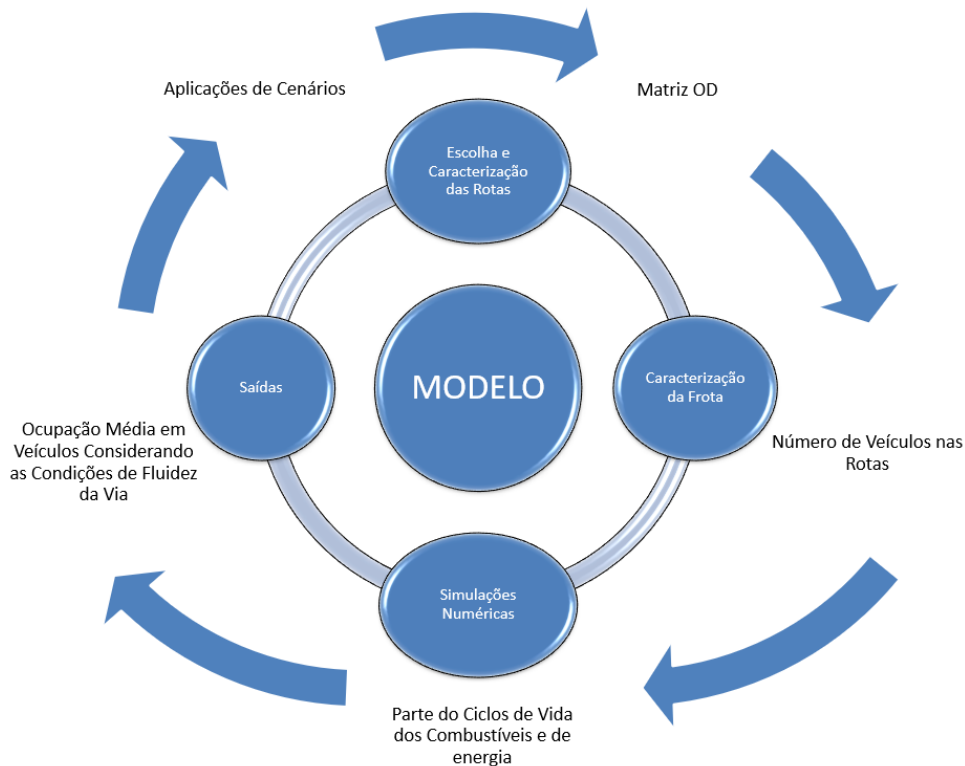


Figura 3.1 Detalhamento dos tópicos a serem explorados ao longo do trabalho

3.1 CARACTERIZAÇÃO DAS ROTAS

Brasília tem cerca de 3 milhões de habitantes e a zona central é o polo de atração das viagens a partir dos bairros periféricos (IBGE, 2020). São 35 regiões administrativas que compõem a região metropolitana, e os habitantes dessas regiões administrativas acessam a região central por meio de cinco rotas principais: uma do Norte, uma do Sul, uma do Leste e duas do Oeste. Essas regiões são as de maior demanda, Origem-Destino, de viagens na região metropolitana de Brasília (PDTU, 2010; METRÔ, 2019). Portanto, cinco rotas apresentadas na Figura 3.2 foram escolhidas para as medidas experimentais e a caracterização do ciclo de condução de Brasília.

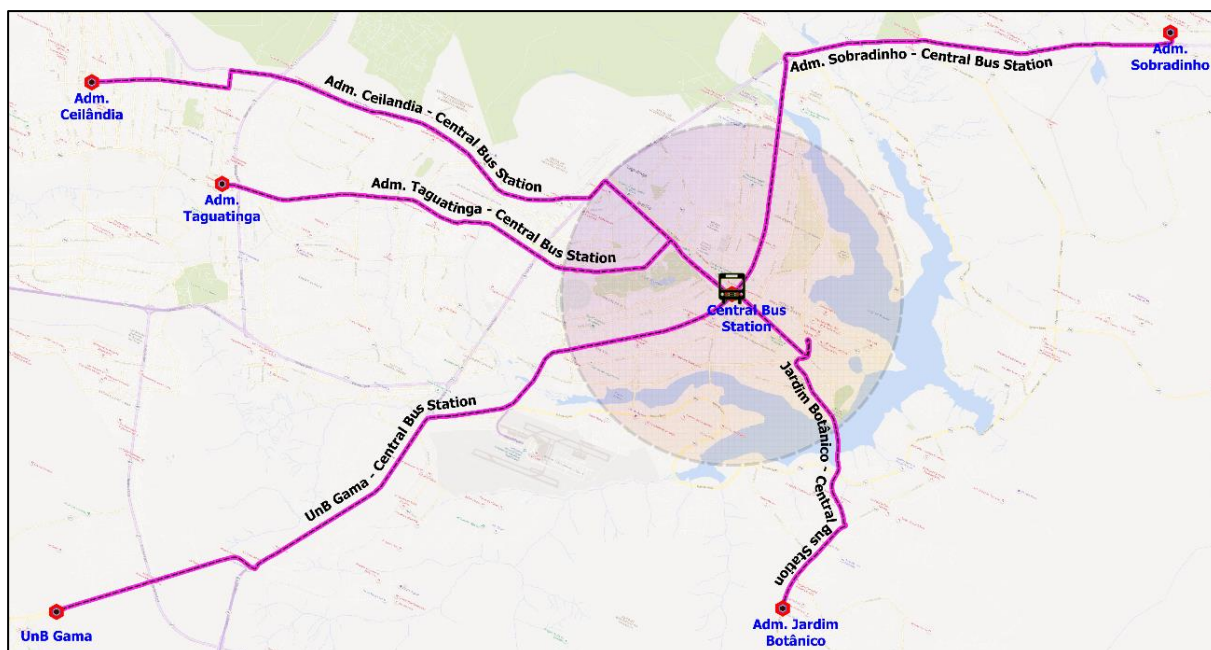


Figura 3.2 Rotas da área de estudo

Conforme a Figura 3.2, pode-se observar que essas rotas foram caracterizadas da seguinte forma: uma rota da região sul do Distrito Federal (de UnB – *campus* Gama – para Rodoviária do Plano Piloto); uma rota da região norte (de Administração de Sobradinho para Rodoviária do Plano Piloto); uma rota da região oeste (de Administração do Jardim Botânico para Rodoviária do Plano Piloto); duas rotas da região leste (de Administração de Taguatinga para Rodoviária do Plano Piloto e de Administração de Ceilândia para Rodoviária do Plano Piloto). Assim, para auxiliar no entendimento e facilitar análise dos dados, as rotas serão classificadas como disposto no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 Rotas da área de estudo

ROTA	EIXO PERCORRIDO
Rota 1:	EIXO SUL (UnB Gama – Rod. do Plano Piloto)
Rota 2:	EIXO LESTE (Adm. Jardim Botânico – Rod. do Plano Piloto)
Rota 3:	EIXO NORTE (Adm. Sobradinho – Rod. do Plano Piloto)
Rota 4:	EIXO OESTE (Adm. Ceilândia – Rod. do Plano Piloto)
Rota 5:	EIXO OESTE (Adm. Taguatinga – Rod. do Plano Piloto)

Com o objetivo de condensar a nomenclatura das rotas, horários e veículos, bem como, para melhor apresentação dos resultados, definiu-se a partir desse ponto, um padrão sintetizado, conforme o esquema:

(ODHT)	(O)rigem	(D)estino	(H)orário	(T)ecnologia
--------	----------	-----------	-----------	--------------

Exemplo:

(GP7G)	Gama	Plano Piloto	7h	Gasolina
--------	------	--------------	----	----------

3.2 ESTUDO EXPERIMENTAL COM MEDIÇÕES DE VELOCIDADES, CONSUMOS E EMISSÕES DE CO₂

Para o estudo experimental dos consumos e emissões, e a devida avaliação do Ciclo de Condução típico do Distrito Federal, utilizou-se um dispositivo (OBD2 ELM327 - *on-board diagnostic*), que segue a resolução do Conama 492/2018, assim como a ISSO 15765 CAN. O OBD2 ELM327 foi conectado na porta OBD dos veículos que registrou dados a uma taxa de 1 Hz, os quais eram enviados, via Bluetooth, e armazenados em um dispositivo Android 9. Também foi utilizado o aplicativo *Torque Pro* para os veículos MCI e HEV, e o *Leaf Spy Pro*, para o BEV. Os aplicativos serviram para a sincronização dos dados do OBD e dos dados do dispositivo Android. A Figura 3.3 traz uma representação de um leitor OBD2 e dos aplicativos.



Figura 3.3 Representação de um OBD2 e do software Torque Pró

Fonte: CCM (2021).

Para os veículos MCI e HEV foi utilizado o aplicativo *Torque Pro* e configurado para obter os seguintes parâmetros: velocidade instantânea do veículo (km/h), rotação do motor (RPM), carga do motor (%), consumo de combustível (litros/s) e emissões de CO₂ (g/s). Para o BEV foi utilizado o aplicativo *Leaf Spy Pro* para obter os seguintes parâmetros: velocidade instantânea do veículo (km/h), rotação do motor elétrico (RPM), consumo de Energia (kWh) e temperatura das baterias. Além disso, o dispositivo Android, com GPS integrado, registrou as coordenadas geográficas, velocidades instantâneas (m/s), altitudes (m), acelerações (m/s²), tempos parciais (s) e trechos das viagens (m). Cabe acrescentar que ao veículo HEV e BEV, foram adicionados os seguintes parâmetros: potência elétrica consumida (Watts), torque real no motor elétrico e a carga da bateria (RIMPAS *et al.*, 2020). Os dados foram consolidados em planilha, conforme pode ser visto na Figura 3.4.

Longitude	Latitude	GPS Speed (m/s)	Altitude	CO ₂ (Instantaneo) (g/km)	CO ₂ (Average) (g/km)	Trip Distance (km)	Kilometers Per Litre(Instant) (kpl)	Trip average KPL(kpl)	Throttle Position(Manifold) (%)	Engine RPM(rpm)	Fuel flow rate/hour (l/hr)	Speed (GPS)(km/h)	Speed (OBD)(km/h)
-4.804.373.177	-1.598.731.032	0,00	1.214,25	1.111,37	1.111,37	0,01	1,39	1,39	4,31	812,75	5,05	0	0,00
-4.804.373.177	-1.598.731.032	0,00	1.214,26	1.111,37	1.111,37	0,01	1,39	1,39	4,31	812,75	5,05	0	0,00
-4.804.373.176	-159.873.103	0,00	1.214,26	1.111,37	1.111,37	0,02	1,39	1,39	4,31	812,75	5,05	0	0,00
-4.804.373.177	-159.873.103	0,00	1.214,27	1.095,51	1.103,44	0,02	2,38	1,88	4,31	812,75	6,72	0	0,00
-4.804.373.175	-15.9873103	0,00	1.214,26	1.095,51	1.103,44	0,02	2,38	1,88	4,31	821,50	6,72	0	0,00
-4.804.373.114	-15.98730965	0,00	1.214,96	1.095,51	1.103,44	0,05	2,38	1,88	5,49	821,50	6,72	0	0,00
-48.04372947	-15.98730839	0,00	1.213,82	1.218,60	1.141,83	0,05	2,41	2,06	5,49	821,50	9,53	0	0,00
-48.04372829	-15.98730803	0,00	1.213,15	1.218,60	1.141,83	0,05	2,41	2,06	5,49	821,50	9,53	0	0,00
-48.04372729	-15.98730827	0,17	1.213,76	792,78	1.054,57	0,08	2,41	2,06	5,49	821,50	9,53	1	0,00
-48.04372725	-15.98730719	0,00	1.214,11	792,78	1.054,57	0,08	2,17	2,09	5,49	821,50	17,05	0	0,00
-48.04372507	-15.98730492	0,00	1.214,13	792,78	1.054,57	0,08	2,17	2,09	5,49	802,00	17,05	0	0,00
-48.04372523	-15.98730551	0,18	1.213,83	779,54	999,56	0,11	3,34	2,34	5,88	802,00	12,29	1	0,00

Figura 3.4 Representação de um recorte dos dados obtidos nas rotas pelo OBD

Vale ressaltar que um único condutor pilotou o veículo em todos os experimentos, a fim de eliminar a variação devido a diferentes comportamentos ao volante e analisar a consistência das características ao conduzir o veículo, conforme indicado na literatura (PUTRADAMAZMAN & SYAHMI, 2021).

3.2.1 Determinação das propriedades do combustível e calibração dos consumos

Os dados de consumo de combustível obtidos pela leitura do dispositivo ELM327, foram validados por meio de novos testes, que requereram um estudo experimental adicional, utilizando um medidor externo de consumo acoplado ao veículo. O medidor externo consiste em um tanque auxiliar da marca *Planatc* (Figura 3.5a), com capacidade para 9L, posicionado no assoalho do lado do passageiro sobre uma balança de precisão da marca Toledo (Figura 3.5b).

Após o sistema de alimentação de combustível do veículo ter sido isolado, foram realizadas medições para cada rota, em situações de pico e fora de pico. Aferia-se a massa inicial do conjunto tanque + combustível no início e final de cada rota. A diferença entre a massa final e inicial indicava a massa de combustível consumido. Também foi verificado o teor de etanol presente na gasolina, para garantir a qualidade do combustível utilizado e sua conformidade com as especificações técnicas da gasolina E27. Esse procedimento não só validou a precisão dos dados de consumo medidos no OBD, mas também a qualidade e propriedades do combustível em teste (Figura 3.5c). Conhecendo a densidade da gasolina utilizada, que foi previamente determinada com uso de um densímetro, para a temperatura de 25 °C, pode-se assim determinar o volume consumido de combustível em litros.

Por meio das etapas descritas, foi possível comparar os dados de consumo obtidos pela leitura OBD com o consumo do veículo usando um tanque externo (FONSECA, 2012). O procedimento descrito foi adotado nas medições das rotas. Esse mesmo procedimento foi

também realizado para situações controladas em laboratório, com uso do dinamômetro de rolo da Universidade de Brasília (Figura 3.5d). Foram realizados testes em ciclos que simulavam tanto situações de pista plana com altas velocidades, quanto situações com inclinações acentuadas. Usando esse procedimento, foi possível comparar os dados em situações reais de condução e em condições controladas de teste. Vale ressaltar que o ciclo de condução no dinamômetro de chassi e um auxílio ao motorista é fornecido por um monitor que mostra a velocidade desejada em cada instante e a atual do veículo, sendo possível, por exemplo, uma variação na velocidade instantânea de $\pm 3,2$ km/h, pela legislação brasileira (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012).



Figura 3.5 Etapas e procedimentos adotados para determinar o consumo de combustível com uso de um tanque externo

Para o procedimento com o uso do tanque externo, foram realizadas vinte medições para o trecho completo da Rota Sul, e mais seis medições em laboratório utilizando o dinamômetro de rolo. A justificativa para esse número de viagens (20 na Rota Sul e 6 em laboratório), foi para obter estatisticamente os valores consistentes, já que em várias viagens as medições tiveram que ser descartadas por erros inerentes. Para a Rota Sul foram realizadas tanto viagens

completas, quanto viagens fracionadas em cinco etapas, nas quais, em cada parada, os dados eram aferidos. Já no dinamômetro de rolo foram realizadas aferições para situações do veículo na posição horizontal e em posição de aclives, onde o veículo desenvolveu o ciclo de velocidades das vias. Das medições realizadas na Rota Sul, nove foram validadas, e no rolo de dinamômetro duas foram validadas. As características da média das rotas são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 Características da média das rotas para teste com o tanque externo

	Média dos trechos da Adm Gama ao Balão do Gama	Média dos trechos do Balão do Gama ao Catetinho	Média dos trechos do Catetinho à Floricultura	Média dos trechos da Floricultura ao Início do Eixão	Média dos trechos do Início do Eixão, Rod. Plano Piloto	Média das rotas completas GP7G	Média das rotas completas PG10G	Simulação Pista Plana Dinamômetro	Simulação 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 gasto (L)	0,527	0,301	0,370	0,342	0,519	1,671	1,825	0,329	0,534
Volume de gasolina E27 observado 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 (Km)	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 CO ₂ Média registrada no trajeto (g/CO ₂)	156,7	132,1	132,0	149,1	149,1	164,5	143,8	216,3	243,4

Em relação ao procedimento realizado para comparar o consumo de combustível usando um tanque externo e o dispositivo ELM327, em situações reais e situações simuladas em um dinamômetro de rolo, verificou-se que os dados obtidos pelo dispositivo ELM327, quando comparados com os dados do medidor externo, tiveram um erro relativo baixo, que é evidenciado por meio do coeficiente de correlação de *Pearson*, em uma correlação positiva forte com um coeficiente de aproximadamente 0,8634 com padrões de consumo semelhantes para os dois métodos.

De acordo com a Tabela 3.1, os testes realizados em trechos reais de rodovia (GP7G e PG10G) demonstraram erros maiores entre as medições de consumo pelo OBD comparadas às medições com o tanque externo. Enquanto no trecho GP7G o erro relativo foi de 3,49%, no trecho PG10G esse valor aumentou para 7,89%, indicando possível subestimação do consumo real pelo OBD em trechos com variações de aclive e declive.

Já nas simulações em dinamômetro, observou-se menor discrepância de medições na simulação de pista plana (erro de 0,1%) em relação ao teste de subida (erro de 5,09%). Esses resultados reforçam a ideia que variações no perfil da via, como a presença de aclives e declives, contribuem para aumentar a divergência entre os valores medidos pelo OBD. É importante considerar que, em aclives, o uso do tanque externo também pode introduzir erros adicionais referentes ao uso do próprio tanque, visto que variações de pressão na linha e vazão de

combustível, devido à variação de demanda de potência do veículo, não conseguem ser supridas pela capacidade limitada do tanque externo.

3.2.2 Caracterização dos ciclos de condução nas rotas

Para a caracterização dos ciclos, foram realizadas medições nas cinco rotas com viagens em dois horários distintos: às 7h da manhã (Horário de Pico) e às 10h da manhã (fora de pico). Esse procedimento foi realizado para todos os veículos. O combustível utilizado para as rotas foi a gasolina E27 e o Etanol E100%.

Em uma primeira rodada de estudo experimental, os ciclos de condução das cinco rotas foram totalmente caracterizados por meio da medição das variáveis do veículo MCI abastecido com gasolina, e, posteriormente, as medições foram repetidas com o veículo MCI abastecido com etanol. Ressalta-se que as medições do veículo abastecido com etanol foram feitas garantindo 100% de etanol veicular, e que não houvesse gasolina remanescente no tanque, nem no sistema de alimentação do motor.

Uma segunda rodada do estudo experimental mediu-se, apenas na rota Sul, considerando as mesmas variáveis explicadas anteriormente, mas utilizando os veículos HEV movido a gasolina e o BEV. Essa sintetização para a rota Sul foi possível após observar que o veículo MCI nas 5 rotas apresentou padrões médios similares, e que a rota Sul foi aquela que melhor representou as rotas do Distrito Federal. Conseqüentemente, as medições dos veículos HEV e BEV puderam ser concentradas apenas na rota Sul.

Ainda com respeito aos ciclos de condução caracterizados, a Tabela 3.2 apresenta, de forma sintetizada, os detalhes da velocidade máxima e média, distância total e tempo de realização do ciclo em condições reais, para as diferentes tecnologias e diferentes horários. Os resultados preliminares sobre os ciclos nas rotas apresentados brevemente nas tabelas serão explorados de forma mais detalhada no capítulo 4. Embora a análise completa seja reservada para o capítulo de análise de resultados, é relevante destacar aqui algumas características iniciais desses ciclos nas rotas selecionadas.

Tabela 3.2 Principais características dos ciclos de condução para diferentes horários e diferentes tecnologias

CARACTERÍSTICAS	GP7G	CP7G	JP7G	SP7G	TP7G	PG10G	PC10G	PJ10G	PS10G	PT10G
FOX – MCI - GASOLINA										
Duração do ciclo (s)	2407	2598	2373	2086	2419	1217	1500	954	1174	1592
Distância (km)	27,7	23,99	27,95	23,4	19,8	27,4	25,3	14,6	23,7	20,1
Velocidade Máxima (km/h)	91	88	84	82	85	100	97	99	98	99
Velocidade Média (km/h)	42	34	44	41	31	81	62	57	72	47
FOX – MCI – ETANOL										
Duração do ciclo (s)	3031	2807	2093	1568	1930	1304	1693	984	1196	1375
Distância (km)	27,7	24,0	28,0	23,4	19,8	27,4	25,3	14,7	23,7	20,1
Velocidade Máxima (km/h)	84	90	90	95	81	114	109	104	105	99
Velocidade Média (km/h)	34	34	28	48	38	78	55	61	71	54
PRIUS – HEV - GASOLINA										
Duração do ciclo (s)	2815	-	-	-	-	1984	-	-	-	-
Distância (km)	27,7	-	-	-	-	27,4	-	-	-	-
Velocidade Máxima (km/h)	86,7	-	-	-	-	108,4	-	-	-	-
Velocidade Média (km/h)	30,7	-	-	-	-	66,3	-	-	-	-
NISSAN LEAF -BEV - ELÉTRICO										
Duração do ciclo (s)	3011	-	-	-	-	1517	-	-	-	-
Distância (km)	27,7	-	-	-	-	27,4	-	-	-	-
Velocidade Máxima (km/h)	87,3	-	-	-	-	131,7	-	-	-	-
Velocidade Média (km/h)	35,2	-	-	-	-	73,2	-	-	-	-

Com a sintetização dos dados apresentados, e com os ciclos de condução obtidos, foi possível calibrar a simulação numérica e será detalhado mais à frente neste trabalho a partir do item 3.5.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DA FROTA DE VEÍCULOS LEVES

Além do estudo experimental descrito anteriormente, foram analisados os dados das idades dos veículos que compõem a frota de Brasília disponibilizados pela autoridade de trânsito brasileira (SENATRAN, 2020). Outro conjunto de dados também foi consolidado, de fatores de emissão (por modelo e ano) e autonomia de combustível (por modelo e ano), os quais foram obtidos do Inventário de Emissões de Emissões Veiculares para a cidade de São Paulo (CETESB, 2018). É importante notar que esses fatores de emissão e autonomia de combustível são baseados no ciclo de condução FTP-75 e, portanto, foram usados para serem comparados com os resultados do estudo experimental e simulações numéricas de ciclos de condução real realizados em Brasília.

A Figura 3.6 representa um histograma da idade dos carros leves de passageiros da frota de Brasília com as Fases PROCONVE correspondentes, onde a linha contínua é a função de distribuição de probabilidade da idade dos veículos.

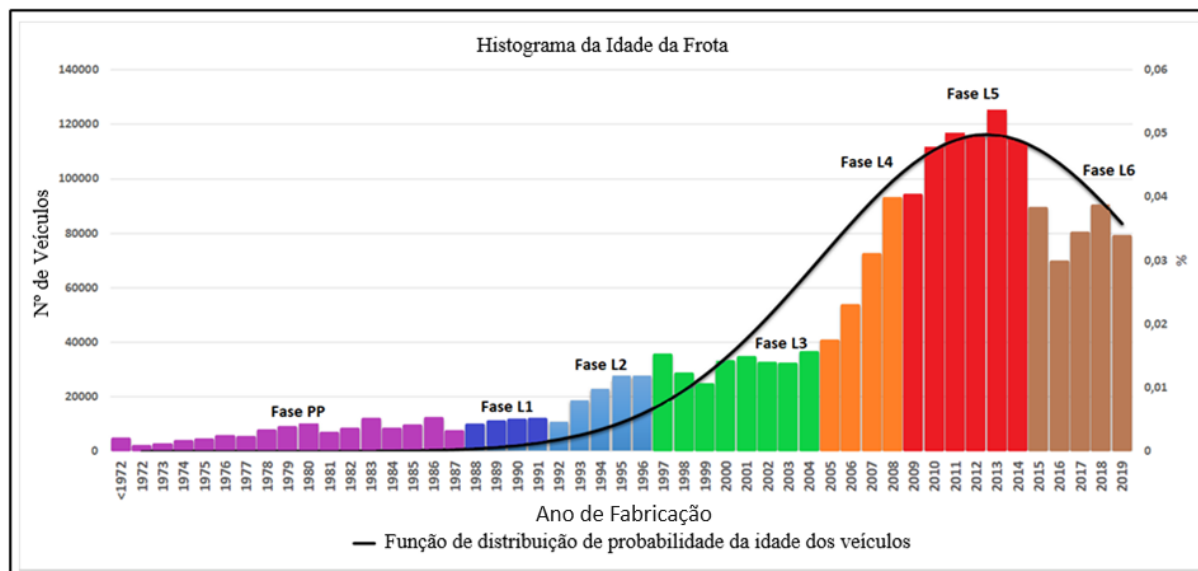


Figura 3.6 Histograma da idade da frota de veículos leves com os níveis correspondentes e a linha sólida representa a função de distribuição de probabilidade da idade dos veículos
 Fonte: Adaptado de SENATRAN, 2021

A idade mais comum dos veículos da frota é daqueles fabricados entre os anos de 2012 e 2013, coincidindo com a transição das Fases L5 para L6. Além da análise dos dados relacionados ao inventário de emissões veiculares (CETESB, 2018), foram analisados os dados adicionais dos fatores de emissão e consumo de combustível obtidos a partir de testes de dinamômetro realizados em todos os modelos de veículos produzidos de 2012 a 2022 (INMETRO, 2022). Vale ressaltar que esses fatores de emissão e valores de consumo de combustível são baseados no ciclo de condução FTP-75. Ou seja, para efeito do presente estudo, eles servem como uma base de comparação com os resultados do estudo experimental e as simulações numéricas de ciclos de condução do mundo real. Ressalta-se que do total da frota circulante no DF, apresentada na Figura 3.4, não estão contemplados os 2919 veículos adaptados para utilizar GNV em circulação (DETRAN, 2021).

Com base nos dados dos fatores de emissão e consumos referidos no parágrafo anterior, foi analisado também o efeito da diminuição do consumo de combustível e dos fatores de emissão de CO₂, em relação ao ano de fabricação dos veículos da frota, através da função de melhor ajuste representada na Figura 3.7. Portanto, para o modelo proposto no presente trabalho, o

consumo de combustível da frota e as emissões de CO₂ foram calculados considerando o número de veículos, considerando o consumo de combustível e o fator de emissão para cada ano de fabricação e Fase PROCONVE.

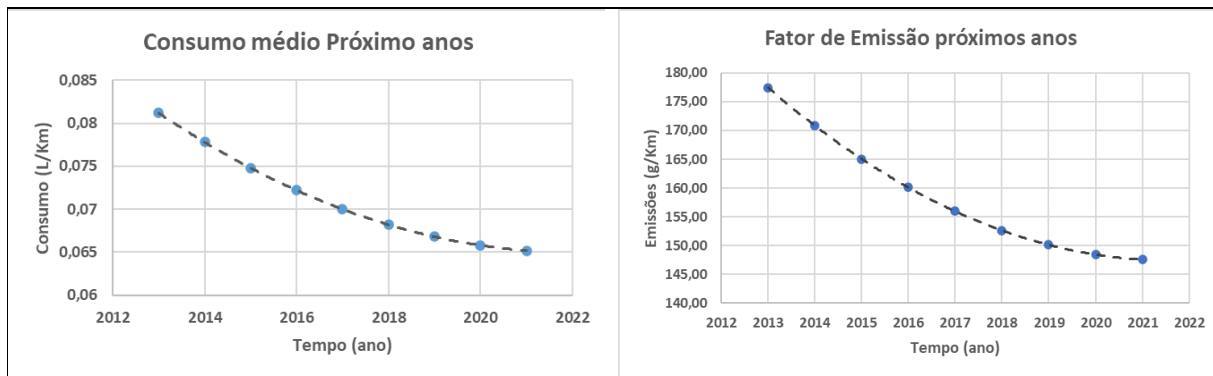


Figura 3.7 Economia de combustível e fator de emissão de CO₂ influenciados pelo ano de fabricação e Nível
Fonte INMETRO, 2022

De acordo com os dados da Figura 3.7, há uma tendência decrescente e assintótica, tanto para o consumo médio de combustível, quanto para o fator de emissão. Isso sugere que os veículos estão se tornando mais eficientes e menos poluentes ao longo do tempo e que esse ganho nos consumos e emissões serão menores para os próximos anos. Esse efeito e a função decrescente na Figura 3.5 foram considerados para simular o impacto para um cenário em 2036.

Por fim, o conhecimento do perfil da frota por combustível é essencial para estimar o consumo desses combustíveis e para o desenvolvimento de políticas relacionadas à substituição de derivados de petróleo, bem como a mitigação de emissão de gases responsáveis pelo efeito estufa.

3.4 VEÍCULOS USADOS NAS ROTAS

Os veículos MCI e HEV usados no estudo experimental foram selecionados com base na análise descrita no item anterior, considerando o ano de fabricação mais frequente e fase PROCONVE, conforme apresentado na Figura 3.4. Além disso, a relação de potência específica máxima também foi estabelecida igualmente para os dois veículos, com cerca de 0,07 kW/kg. Um veículo *flex* gasolina/etanol (FOX) com motor à combustão interna (MCI) e um veículo híbrido a gasolina (PRIUS) foram usados nas medições das rotas. A configuração e escolha do veículo elétrico a bateria (BEV) usado no estudo experimental não foi com base na maior frequência

(moda) na frota, pois os poucos veículos elétricos em circulação no DF eram fabricados no ano de 2021 e 2022. Sendo assim, o BEV foi escolhido com base nas mesmas características de relação Peso-Potência dos veículos MCI e HEV. As principais características dos veículos selecionados para o presente estudo seguem apresentadas na Figura 3.8.

Quadro 3.2 Ficha técnica dos veículos FOX/PRIUS/LEAF

	FOX 1.6 - Flex	PRIUS - Hybrid	LEAF ZE - Elétrico
Modelo			
Potência (a 5.250 rpm)	101 cv (G)/104 cv (A)	134 cv (G)	149 cv
Torque (a 2.500 rpm)	15.4 kgfm (G)/15.6 kgfm (A)	14.5 kgfm	32.6 kgfm
Relação Peso-Potência	10.06 kg/cv	10.55 kg/cv	10.62 kg/cv
Capacidade do tanque de combustível / Capacidade da Bateria	50 Litros	45 Litros	40 KWh
Peso	1,046 kg	1,415 kg	1,582
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 (G)	6 km/KWh ou 28,7 km/l equivalente (G)
Consumo em Rodovia	11.1 km/l (G)/8.5 km/l (A)	14.3 km/l (G)	6,5 km/KWh ou 29,4 km/l equivalente (G)
Autonomia	430 km (G)/330 km (A)	706.5 km (G)	240 km

Vale ressaltar que o MCI tem as características - Fox, 1.6. Ano 2013, Flex, o HEV, (Prius, ano 2012, híbrido), esse, disponibilizado pela Universidade de Brasília – *campus* Gama e o Nissan Leaf, ano 2022, elétrico.

3.5 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DE VEÍCULOS NAS ROTAS

Como explicado anteriormente, o estudo de simulação numérica desenvolvido no presente trabalho teve dois objetivos. O primeiro foi comparar os valores com os resultados experimentais e incluir as emissões de outros poluentes, nomeadamente HC, CO, NO_x os quais não foram determinados experimentalmente. O segundo objetivo foi calibrar a margem de erro entre valores numéricos e experimentais para que o modelo proposto possa ser aplicado em Planos de Mobilidade de qualquer cidade, quando não houver a possibilidade de caracterização dos ciclos de velocidade reais nas vias.

As simulações numéricas no *Matlab/Simulink* foram realizadas contemplando as características das rotas e dos veículos descritos nos itens anteriores, com implementação numérica detalhada dessas características físicas dos veículos, do perfil de altitudes das vias e condições de trânsito.

O *Software* utiliza um ambiente de *design* balizado em modelo e simulação para sistemas dinâmicos e embarcados, integrado ao *Matlab*. O Simulink, desenvolvido pela *MathWorks*, constitui uma ferramenta de linguagem gráfica de programação de fluxo de dados, a qual modela, simula e analisa sistemas dinâmicos de vários domínios. Trata-se de uma ferramenta gráfica de diagramação de blocos com um conjunto personalizável de bibliotecas de blocos. O *software* permite incorporar algoritmos *Matlab* em modelos, além de exportar os resultados da simulação para *Matlab* em análises posteriores.

Esse *software* possui modelos de referência, como veículo convencional, híbrido e elétrico, no qual é possível utilizar uma variedade de ciclos de velocidade padrões e personalizados. Ainda, é possível determinar o consumo de combustível, aceleração, emissões de HC, CO, NO_x e CO₂ de um determinado veículo e plotar ou registrar qualquer número de valores intermediários e finais. Vale salientar que as emissões de HC, CO, NO_x e CO₂ e o consumo de combustível do motor, são computadas com base nos mapas dos motores que constituem o banco de dados do pacote numérico, os quais correlacionam as emissões e o consumo de combustível com o torque, requeridos para o cumprimento do perfil de velocidade e inclinações da via, estabelecidos no ciclo de condução, Figura 3.8.

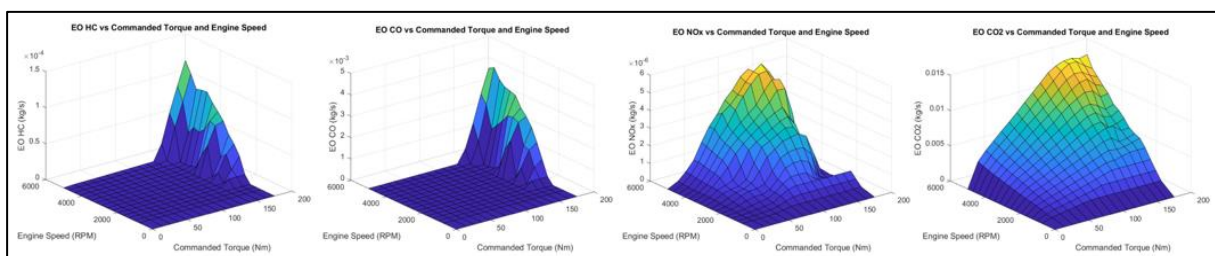


Figura 3.8 Mapa de emissões em termos da rotação do motor e do torque
Fonte: Adaptado de Mathworks,2019

Com respeito a estrutura central do simulador, a Figura 3.9 traz uma representação sintetizada do diagrama geral da estrutura de blocos que foi calibrada para esse procedimento metodológico utilizada pelo *Simulink* para representar um modelo completo de veículo convencional.

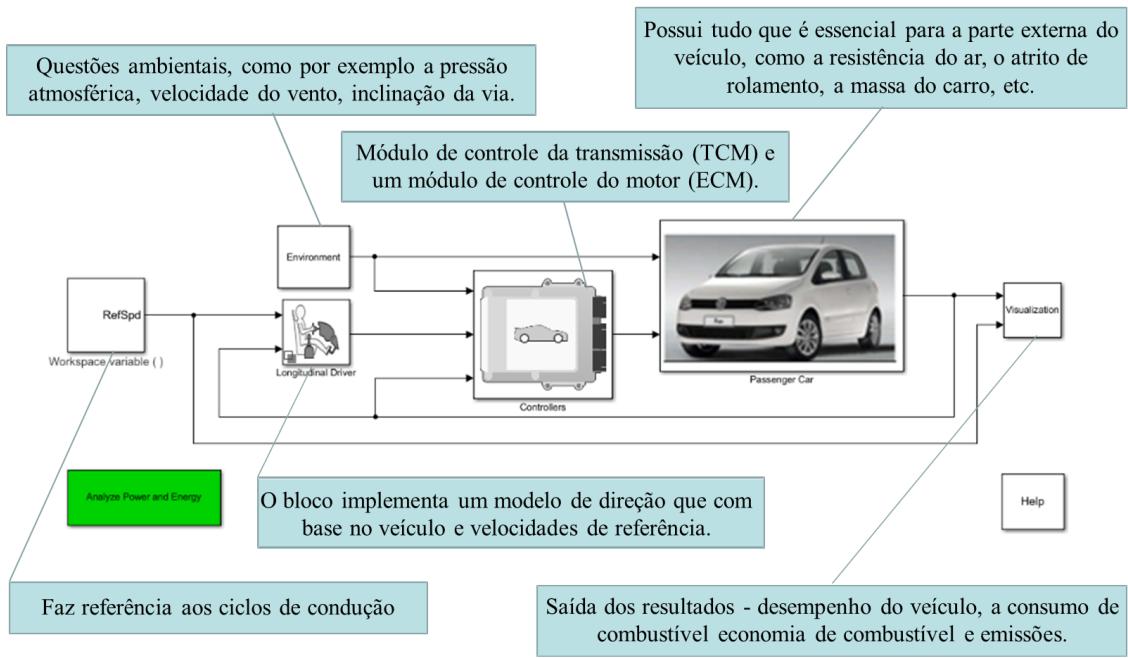


Figura 3.9 Diagrama de blocos central do Simulink para simulação de veículos
 Fonte: Adaptado de Mathworks, 2020.

De acordo com a Figura 3.9, é possível observar que o diagrama está disposto em seis blocos, sendo que cada bloco central é constituído de sub-blocos com características específicas usadas para caracterizar o veículo, Figura 3.10.

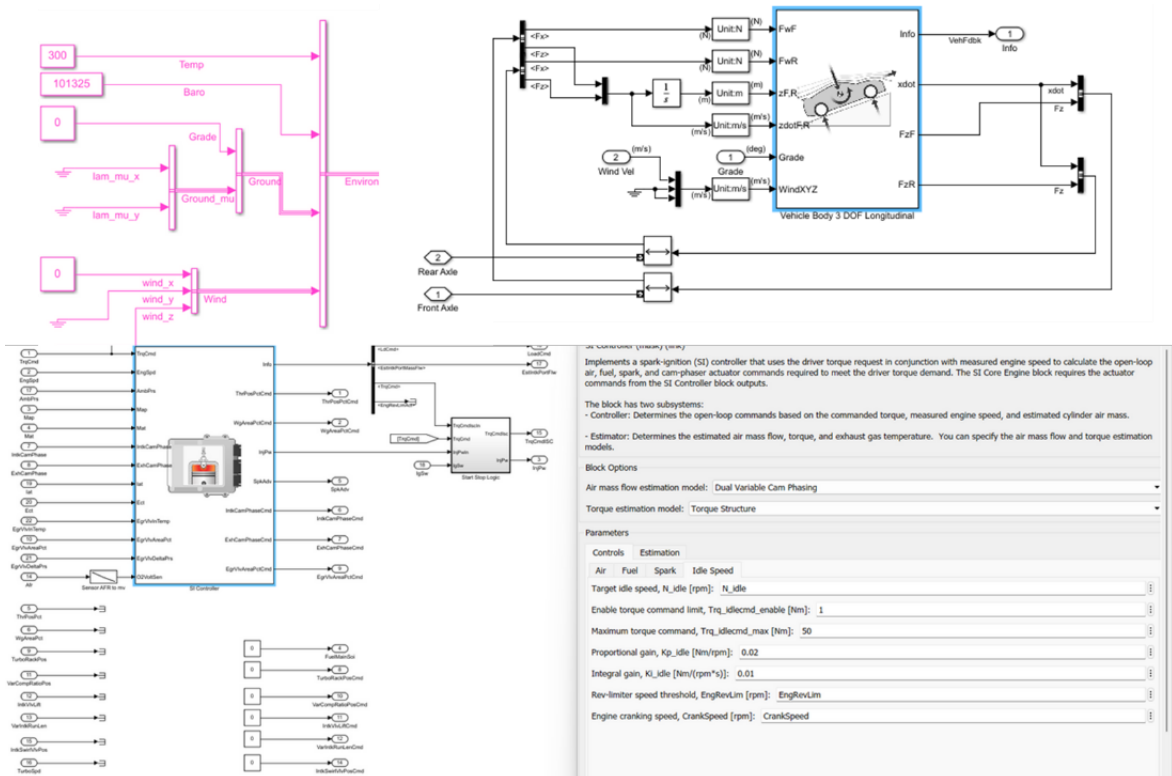


Figura 3.10 Sub-blocos usados na caracterização dos veículos

Com respeito à caracterização do ambiente dos trajetos, foi assumido como padrão as temperaturas e pressões atmosféricas médias para a cidade de Brasília nos dias e meses da coleta de dado com valores de 102 kPa e 18 °C. As inclinações das vias nas cinco rotas foram obtidas por meio dos valores de altitudes medidos no GPS integrado ao dispositivo Android, durante a realização dos ciclos de condução nas rotas pré-determinadas, segundo a segundo. As inclinações foram implementadas no ambiente simulado do *Matlab*. Adicionalmente, foram configuradas as características dos veículos, tais como, massa, curva de potência e mapa do motor, dispositivos embarcados de acordo com a tecnologia veicular, entre outros aspectos apresentados. A Tabela 3.3 mostra um exemplo de parâmetros do veículo a combustão (MCI) que foram levados em consideração nas simulações do veículo.

Tabela 3.3 Veículo convencional FOX – 2013 – parâmetros de simulação em diferentes ciclos e com diferentes tecnologias

	Ambiente	Gasolina		Etanol		Fonte
		GP7G	GP10G	GP7A	GP10A	
Ambiente	Ciclos	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	https://www.meteoblue.com/pt/tempo/semana/bras%3%adlia_brasil_3469058
	Inclinação	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	
	Temperatura (K)	292	297	288	296	
	Pressão (Pa)	101200	101200	101200	101200	
Motor	Fuel lower heating value (MJ/kg)	46,4	46,4	26,7	26,7	https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html
	Fuels Higher Calorific Values (MJ/kg)	46,4	46,4	29,7	29,7	
	Density (kg/m ³)	0,750	0,750	0,853	0,853	http://www.anp.gov.br/ - (0,7300 e 0,7700) e (0,875 e 0,811)
	Maximum torque command (Nm)	151	151	165	165	
Diferencial	Carrier to driveshaft ratio, Ndiff	3,0	3,0	4,0	4,0	Matlab/Simulink / Ndiff representa a relação final da engrenagem de transmissão.
Módulo de controle do motor (ECM)	Stoichiometric air-fuel ratio	14,6	14,6	9,0	9,0	Matlab/Simulink / Proporção ar combustível
Veículo FOX 1.6 Flex - Ano 2013	Mass (kg)	1046		1046		Ficha técnica / Manual
	Frontal área (m ²)	2,17		2,17		Ficha técnica / Manual
	Coefficiente de arrasto	0,353		0,353		Ficha técnica / Manual
	Altura do centro de gravidade do veículo	0,53 m		0,53 m		Ficha técnica / Manual
	Fração de peso no eixo de tração	0,59		0,59		Ficha técnica / Manual
	Distância entre eixos	2,46 m		2,46 m		Ficha técnica / Manual
	Peso do veículo sem carga/Tara	1046 kg		1046 kg		Ficha técnica / Manual
	Peso da carga	400 kg		400 kg		Ficha técnica / Manual
	Tração	Dianteira		Dianteira		Ficha técnica / Manual
	Potência gasolina	81 KW (110 cv) a 5.750 rpm		81 KW (110 cv) a 5.750 rpm		Manual
	Potência etanol	88 KW (120 cv) a 5.750 rpm		88 KW (120 cv) a 5.750 rpm		Manual
	Torque gasolina	155 Nm (15,8 kgfm) a 4.000 rpm		155 Nm (15,8 kgfm) a 4.000 rpm		Manual
	Torque etanol	165 Nm (16,8 kgfm) a 4.000 rpm		165 Nm (16,8 kgfm) a 4.000 rpm		Manual

Legenda

- Veículo Usando Gasolina
- Veículo Usando Etanol

Após a estruturação do diagrama de blocos no *Matlab* para o perfil dos veículos utilizados, foi realizada uma primeira rodada de simulações. Os veículos com motor MCI, HEV e BEV foram numericamente simulados, no horário de pico e fora de pico, realizando os ciclos de condução em condições reais na rota Sul. Para esse procedimento, foram implementadas numericamente as características do veículo, as velocidades segundo a segundo e o perfil de inclinação das vias. Essa primeira rodada de simulação serviu para inferir os erros dos resultados numéricos em comparação com os valores medidos de consumo de combustível e emissões de CO₂.

As condições dos ciclos de condução para todas as cinco rotas, no horário de pico e fora de pico, foram simuladas numericamente, obtendo os resultados de autonomia, potência do motor, torque, velocidade do motor e emissões de HC, CO, NO_x e CO₂. A demanda de energia para condução do veículo, nos ciclos de condução, foi calculada por meio da potência total e pode ser observado da seguinte forma:

$$P_{total} = P_{acel.} + P_{ar} + P_{rol} + P_{trans.} + P_{aux}$$

Equação 3

Onde:

P_{total} é a demanda total de potência para condução do veículo (W);

$P_{acel.}$ é a demanda de potência de aceleração (W);

P_{ar} é a perda de energia devido à resistência do ar (W);

P_{rol} é a perda de energia devido à resistência ao rolamento (W);

P_{trans} é a perda da transmissão (W); e

P_{aux} é o consumo de energia dos auxiliares (W).

O consumo de energia calculado foi transmitido ao motor através do módulo de transmissão. O procedimento de simulação numérica foi realizado para diferentes tecnologias dos veículos; MCI a gasolina e etanol, e HEV a gasolina. Para efeito de análise das diferenças entre os ciclos reais e o FTP-75, os veículos também foram simulados nas condições do ciclo FTP-75. De forma a sintetizar os resultados das simulações, comparados aos resultados experimentais, as Tabelas 3.4 e 3.5 apresentam a média geral das medições dos ciclos reais (OBD), dos ciclos reais simulados, e a média do ciclo simulado para a condição do FTP-75.

Os valores apresentados são para a autonomia dos veículos MCI e HEV nas diferentes situações das cinco rotas, considerando o uso de gasolina e etanol. Durante o estudo experimental, a rota Gama (rota Sul) foi totalmente caracterizada em comparação com as outras rotas. Portanto, é importante observar que o HEV e BEV realizaram apenas a rota Gama (rota Sul), portanto os valores medidos para as viagens em HEV estão disponíveis apenas para aquela rota conforme observado nas Tabelas 3.5 e 3.6. Outro detalhe perceptível na Tabela 3.7 são os resultados simulados para o HEV realizando o ciclo de condução real de todas as rotas que operam com gasolina e etanol. Os resultados preliminares sobre os ciclos nas rotas, apresentados brevemente nas tabelas, serão explorados de forma mais detalhada no capítulo 5. Embora a análise completa

seja reservada para o capítulo de análise de resultados, é relevante destacar aqui algumas características iniciais desses ciclos nas rotas selecionadas.

Tabela 3.4 FOX - Valores médios gerais das medições do ciclo real, valores médios simulados e simulações médias para o FTP-75

ROTA	7h – Pico						10h – Fora de Pico					
	Consumo Gasolina (Km/L)			Consumo Etanol (Km/L)			Consumo Gasolina (Km/L)			Consumo Etanol (Km/L)		
	OBD2	Simulado	FTP75	OBD2	Simulado	FTP75	OBD2	Simulado	FTP75	OBD2	Simulado	FTP75
Gama	10,48	10,90	11,20	9,01	9,31	10,10	11,68	12,1	11,72	11,84	12,7	10,19
Ceilândia	7,24	7,40	11,20	7,21	7,43	10,10	14,6	11,4	11,72	12,86	10,00	10,19
Jardim	8,87	9,72	11,20	7,76	7,25	10,10	12,46	11,00	11,72	11,03	8,92	10,19
Sobradinho	11,61	11,28	11,20	10,8	11,25	10,10	12,57	11,78	11,72	12,35	11,93	10,19
Taguatinga	11,97	11,90	11,20	11,03	11,73	10,10	11,60	10,81	11,72	12,73	11,90	10,19

Tabela 3.5 PRIUS - Valores médios gerais das medições do ciclo real, valores médios simulados e simulações médias para o FTP-75

ROTA	7h – Pico						10h – Fora de Pico					
	Consumo Gasolina (Km/L)			Consumo Etanol (Km/L)			Consumo Gasolina (Km/L)			Consumo Etanol (Km/L)		
	OBD2	Simulado	FTP75	OBD2	Simulado	FTP75	OBD2	Simulado	FTP75	OBD2	Simulado	FTP75
Gama	12,00	12,67	10,30	-	9,19	10,35	12,6	11,19	10,30	-	8,69	10,35
Ceilândia	-	8,00	10,30	-	5,54	10,35	-	13,67	10,30	-	9,21	10,35
Jardim	-	10,33	10,30	-	8,43	10,35	-	11,04	10,30	-	8,11	10,35
Sobradinho	-	13,50	10,30	-	8,28	10,35	-	12,66	10,30	-	9,10	10,35
Taguatinga	-	12,16	10,30	-	10,28	10,35	-	10,85	10,30	-	8,97	10,35

O erro médio geral entre as medições e os resultados numéricos foram inferiores a 2,5% para todas as rotas e horários do dia. Além disso, o FTP-75 simulado resultou em um erro médio de 8,25% em relação aos valores medidos dos ciclos reais.

Uma segunda abordagem foi a simulação numérica do consumo de energia de um BEV, usando a configuração do veículo demonstrado na Figura 3.9 (Nissan Leaf 2022). As características do Veículo Elétrico a Bateria (BEV) foram definidas a partir de um veículo disponível no mercado equivalente às especificações de relação Peso-Potência do veículo com motor MCI. O veículo MCI e o BEV estão na mesma faixa de potência específica máxima de 0,07 kW/kg (Relação Peso-Potência de 10 kg/cv). Portanto, no *Matlab/Simulink* foi implementado um modelo dinâmico de um veículo elétrico, com as características do Nissan Leaf. Assim pôde-se determinar aspectos do consumo de energia elétrica para os BEV nas 5 diferentes rotas no Distrito Federal.

As simulações numéricas foram realizadas para todos os ciclos de condução caracterizados anteriormente nas cinco rotas durante as horas de pico e fora do pico. Dois ciclos foram simulados para cada rota e hora. Os resultados das simulações numéricas do BEV para os dois ciclos reais foram comparados com o ciclo simulado FTP-75, conforme mostrado na Tabela 3.6. Os resultados preliminares sobre o consumo energético nas rotas, apresentados brevemente nas tabelas serão explorados de forma mais detalhada no capítulo 5. Contudo, cabe destacar aqui algumas características iniciais.

Tabela 3.6 Consumo energético para as 5 rotas usando o BEV (km/kWh)

ROTA	7h – Pico			10h – Fora de Pico		
	OBD2	Simulado	FTP75	OBD2	Simulado	FTP75
Gama	12,2	10,2	9,3	6,8	6,95	9,3
Ceilândia	-	9,4	9,3	-	7,5	9,3
Jardim	-	9,1	9,3	-	7,7	9,3
Sobradinho	-	9,6	9,3	-	8,0	9,3
Taguatinga	-	9,3	9,3	-	7,4	9,3

Comparando os resultados apresentados nas Tabelas 3.6, 3.7 e 3.8, em geral, os valores simulados e medidos de consumo de combustível mostraram uma pequena diferença. No entanto, ao considerar a hora do pico em comparação com situações fora do horário de pico, o consumo de combustível do HEV fica entre 4% e 9% menor durante a hora do pico, enquanto o consumo de combustível do MCI foi de 7% e 12% maior durante a hora do pico.

Para os valores do BEV, o consumo de energia, na hora do pico, variou entre 29% e 35% - valor maior do que o consumo de energia quando comparado com situação fora de pico. Na comparação do consumo de energia, considerando as condições às 7h, o valor médio para o veículo MCI Gasolina na Tabela 3.6 resultou em uma autonomia energética equivalente de cerca de 1,2 km/kWh, enquanto o valor médio para o HEV na Tabela 3.7 resultou em cerca de 1,5 km/kWh. Esses resultados podem ser comparados a cerca de 4 km/kWh para o BEV.

Portanto, os veículos híbridos têm o melhor potencial para reduzir o consumo de combustível e as emissões de CO₂ durante as condições de tráfego, enquanto os veículos elétricos são a melhor opção para reduzir o consumo total de energia e, conseqüentemente, diminuir as emissões de CO₂.

3.6 CARACTERIZAÇÃO DOS CICLOS DE VELOCIDADES E FUNÇÕES PROPOSTAS DE CONSUMO ENERGÉTICO E CO₂

O ciclo de velocidades realizado pelo veículo em um percurso é um dos principais fatores de influência nos consumos e emissões de CO₂. Portanto, para o desenvolvimento do modelo proposto no presente trabalho, foi feito um estudo específico da distribuição de velocidades dos ciclos e os consequentes consumos energéticos e emissões de CO₂, considerando as diferentes condições analisadas no presente trabalho. Assim, inicialmente foram construídos os histogramas das frequências relativas das velocidades, para as horas de pico e fora de pico, que indicaram diferenças marcantes nos ciclos. Na sequência, funções de correlação foram construídas para modelagem matemática dos consumos instantâneos de combustível e as emissões de CO₂ em função das velocidades instantâneas. Para tal, foram correlacionados os valores de consumos energéticos (l/km e kWh/km) com os valores das velocidades a cada segundo ao longo dos ciclos de condução. Semelhantemente, também foram correlacionados os valores das emissões de CO₂ (g/km) com as velocidades a cada segundo. As funções de correlação obtidas foram comparadas com resultados publicados na literatura.

Vários autores propuseram correlações matemáticas do consumo de combustível em função da velocidade instantânea nas estradas, como (AKCELIK *et al.*, 1983), (EL-SHAWARBY *et al.*, 2005; NTZIACHRISTOS *et al.*, 2009). No Brasil, a mesma abordagem foi aplicada por (ANTP, 1999; ROMERO *et al.*, 2004; DA SILVA & BRASIL, 2020). Para o presente estudo, as funções de correlação de consumo de combustível e emissões de CO₂ foram obtidas por um modelo de regressão, usando o grande volume de dados das medições de estradas do presente trabalho e os dados disponíveis do trabalho de Rubin & Zhai, (2012), em Lisboa, Portugal, que utilizou um veículo EURO IV *Ford Focus* 1.8-L com potência específica máxima de 0,07 kW/kg em condições reais. Os valores experimentais instantâneos de consumo de combustível (l/km) e emissões de CO₂ (g/km) foram correlacionados com as velocidades instantâneas (km/h) e depois comparados com os dados disponíveis de (RUBIN & ZHAI, 2012) e resultados publicados de (LAI *et al.*, 2013).

Cabe ressaltar que os valores das emissões de CO₂ capturados pelo OBD, especialmente em velocidades baixas, indicaram uma relação muito acima do valor estimado para uma reação química estequiométrica da gasolina, e com grande quantidade de valores nulos. Sendo assim, optou-se por calibrar os valores de emissões de CO₂ através de uma correlação com os valores

medidos de consumo de combustível. Utilizaram-se, para isso, dados obtidos experimentalmente em Portugal, referenciados no estudo de (RUBIN & ZHAI, 2012), além dos dados do presente trabalho obtidos diretamente do OBD nas rotas do Distrito Federal.

Para desprezar os valores *outliers*, foi implementado o método de remoção baseado no desvio padrão dos resíduos, o que aumentou o coeficiente de determinação (R^2), indicando um ajuste mais preciso e representativo das relações entre as variáveis. Por fim, a Figura 3.11 ilustra as relações entre o consumo, emissões de CO_2 e correção das Emissões de CO_2 . Os símbolos azuis representam os valores capturados do OBD nas rotas do DF e os símbolos verdes representam os valores medidos no estudo de (RUBIN & ZHAI, 2012). A correlação para o DF (em azul) foi ajustada para coincidir com a correlação obtida em Portugal (em verde) e levando em consideração que a gasolina brasileira contém 27% em volume de etanol.

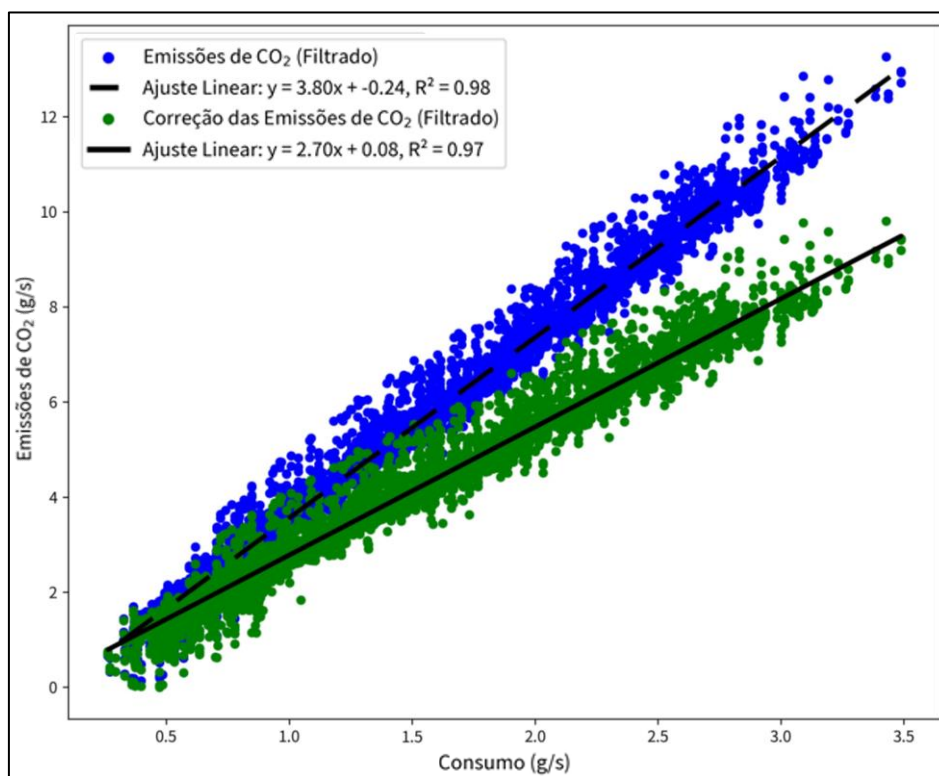


Figura 3.11 Calibração do CO_2 com base nos dados de RUBIN & ZHAI, 2012

Fonte: RUBIN & ZHAI, 2012

Convém destacar que essa função de correlação foi necessária para determinar com melhor precisão os valores de emissão de CO_2 a partir dos valores de consumo de combustível, já que os valores de consumo de combustível obtidos do OBD são mais confiáveis que os valores de emissão de CO_2 do OBD.

3.7 ABORDAGEM DAS EMISSÕES POR VSP

Uma abordagem adicional foi realizada para analisar as emissões veiculares de em função da *Vehicle Specific Power* (VSP). Foram calculadas as taxas médias de emissão para cada modo VSP nas diferentes rotas e, ainda, para diferentes tecnologias. Tal abordagem é importante para demonstrar qual o regime de potência específica os veículos foram submetidos ao longo dos ciclos de velocidades em condições reais, e assim poder comparar até que ponto o FTP-75 está dentro das mesmas condições.

O OBD2 foi usado para registrar dados do veículo e do motor, incluindo velocidade do veículo, consumo de combustível, emissões de CO₂, rotações por minuto do motor (RPM) e outros fatores, conforme descrito anteriormente na Figura 3.3. A inclinação foi obtida por meio da relação entre a diferença de altitude pela distância, extraídos do GPS do *smartfone*.

Na sequência, por meio da Equação 2 determinaram-se os valores de VSP segundo a segundo para o agregado das rotas, nos diferentes horários e para diferentes tecnologias. Histogramas foram plotados de modo a visualizar a frequência dos VSPs determinados. Para essa análise, considerou-se um intervalo de [-40;40], visto que valores nesse intervalo correspondem a aproximadamente 99% dos dados. O total de dados válidos resultou em uma soma de 23369 para o horário de pico e 13113 para o horário fora de pico. Os resultados mais detalhados serão apresentados mais à frente. Contudo, cabe mostrar aqui alguns resultados das principais características do VSP para as rotas estudadas. A Figura 3.12 apresenta os histogramas para as os diferentes horários e as diferentes tecnologias, bem como para o FTP-75.

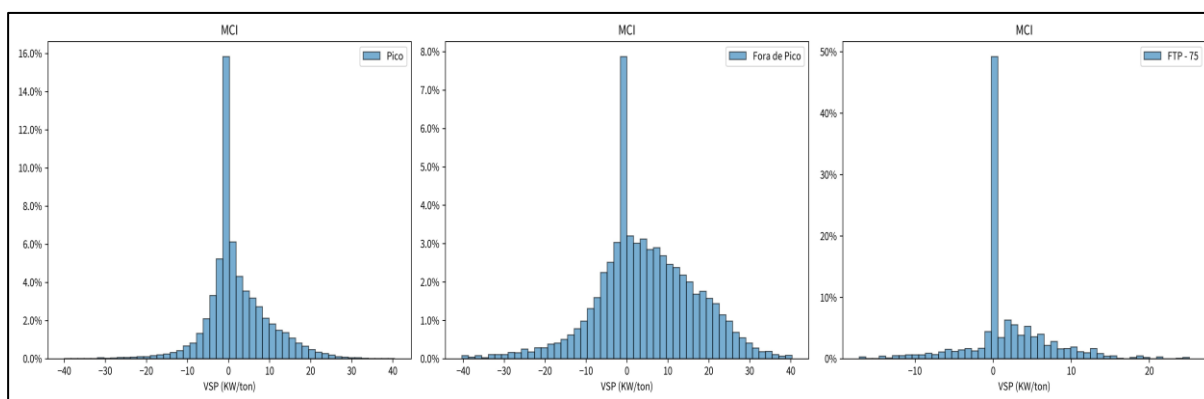


Figura 3.12 Distribuição de VSP para média de dados obtidos para as diferentes rotas, em horários de pico e fora de pico

Os resultados obtidos nos histogramas para uma amostra total são importantes, visto que permite uma análise comparativa com os valores das rotas de forma isolada, que serão apresentadas na sequência. Na Figura 3.12 também é apresentado o histograma do VSP para o ciclo FTP – 75, que será usado para futuras comparações nesse trabalho.

As distribuições apresentadas nos histogramas da Figura 3.12 de VSP, para a amostra total de dados, têm um grande percentual de valores iguais a zero, 13,2 % para o pico, 6,2% fora de pico e 38,7% para o FTP-75, o que representa momentos em que o veículo está com velocidades e acelerações muito baixas (aproximadamente iguais a zero) ou não está em movimento, esse fato é mais evidente no histograma de pico, por ter momentos mais acentuados de paradas devido ao elevado nível de serviço da via, e, no FTP-75, que tem momento de parada. Uma representação dos histogramas sem os zeros pode ser vista na Figura 3.13.

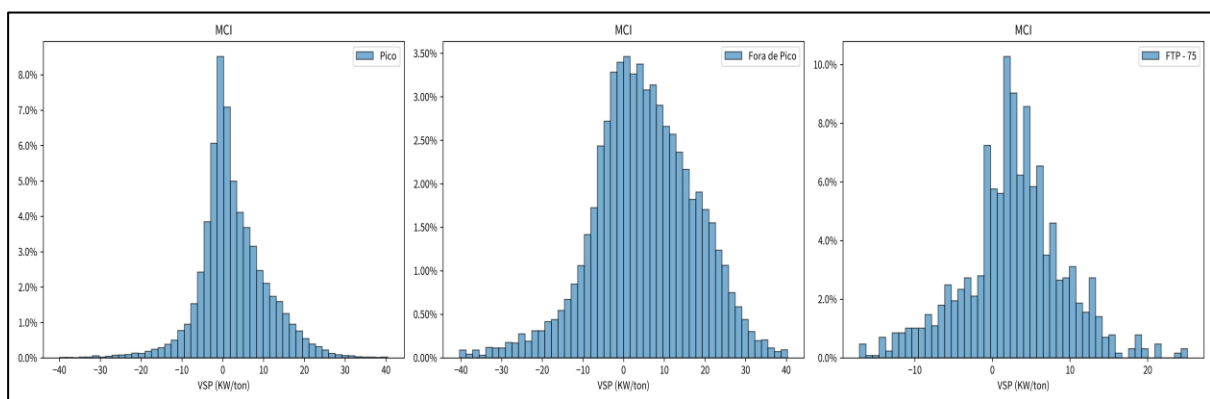


Figura 3.13 Distribuição de VSP para média de dados obtidos para as diferentes rotas, em horários de pico e fora de pico, sem os VSPs = 0

A Tabela 3.7 mostra os valores utilizados na construção dos histogramas da Figura 3.13, agrupados em classes menores de VSP, com exceção do zero, que é mostrado separadamente. Esse agrupamento em classes menores de VSP, com zero isolado, possibilita uma análise mais precisa dos resultados de VSP.

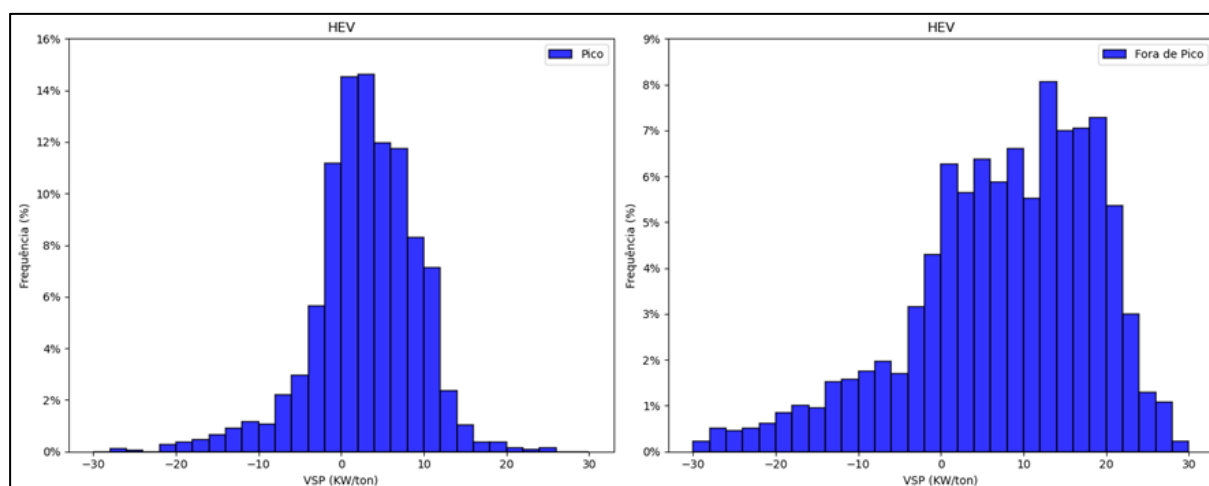
Na Figura 3.13, o MCI para o horário de pico tem um VSP mais concentrado em faixas específicas, para todas as rotas apresentadas, indicando uma operação mais consistente. É possível observar também que, para histogramas no horário fora de pico, os valores de VSPs são maiores, significando maior demanda do motor, o que pode ser confirmado nos ciclos de condução que apresentam, para horários fora de pico, velocidades maiores, conforme Tabela 3.7.

Tabela 3.7 Distribuição de VSP por faixa

Distribuição	Pico	Fora de pico	FTP - 75
-30 a -21	0,18%	0,79%	0%
-20 a -11	0,67%	2,03%	0%
-10 a -1	2,99%	5,81%	2,51%
0	13,64	7,64%	38,63
1 a 10	68,37%	52,03%	51,31%
11 a 20	11,76%	20,34%	7,07%
21 a 30	2,39%	11,36%	0,48%

Observando tanto a Figura 3.13 quanto a Tabela 3.7, fica evidente uma predominância de aceleração ($VSP > 0$) em relação à desaceleração ($VSP < 0$). Durante o horário de pico, o veículo passa 3,84% do tempo desacelerando, enquanto 82,52% do tempo é gasto acelerando. Já em horários fora do pico, a desaceleração ocorre 8,63% do tempo, enquanto a aceleração, em 83,73%. Essa variação tem implicações diretas no consumo de combustível e nas emissões. Valores positivos de VSP tendem a resultar em emissões mais elevadas, especialmente em faixas de VSP mais altas, que exigem mais potência do motor (JIMENEZ-PALACIOS, 1999). Ainda de acordo com a Tabela 3.7, os resultados da distribuição de VSP reforçam a grande diferença de tempo parado para as condições de pico e fora de pico.

O mesmo procedimento usado no MCI para representar as frequências de VSP foi adotado para o HEV e BEV. Todavia, os ensaios foram realizados apenas na rota padrão (Rota Sul). A Figura 3.14 apresenta os histogramas para as os diferentes horários e diferentes tecnologias.

**Figura 3.14** Distribuição de VSP para média de dados obtidos para, em horários de pico e fora de pico para HEV

Os resultados para a distribuição dos VSP apresentam comportamento similar aos vistos para o MCI, ou seja, para o horário de pico faixas mais concentradas de VSP, enquanto o fora de pico apresenta faixas mais esparsadas.

3.7.1 Emissões usando o método VSP

Com a conclusão da identificação das distribuições de VSP para o agregado dos trechos, foi possível estimar as emissões de poluentes mais relevantes. As taxas médias de emissão modal foram estimadas para MCI e para HEV. Essas taxas modais foram ponderadas pelo tempo gasto em cada modo VSP para as respectivas rotas, a fim de, estimar as taxas médias da trajetória.

Para estimar as emissões, usaram-se os fatores de emissão desenvolvidos para o MOVES (Motor Simulador de Emissões Veiculares), sistema de modelagem de emissões de fontes móveis, criado pela Agência de Proteção Ambiental Americana (EPA). O MOVES possui ampla aceitação no meio acadêmico e na prática profissional, sendo a ferramenta oficial da EPA para estimativas de emissão nos Estados Unidos. No MOVES, cada modo VSP contém fatores de emissão padronizados para poluentes selecionados, aplicáveis a diversos tipos de veículos de acordo com tecnologia de redução de emissões e ano de fabricação. Dessa forma, o MOVES permite estimar emissões veiculares de modo contextualizado, por meio dos fatores de emissão associados às faixas de demanda de potência, representadas pelos modos VSP.

3.8 MODELO PROPOSTO PARA CONSUMO DE ENERGIA / COMBUSTÍVEL E EMISSÕES DE CO₂

O modelo proposto nesta tese tem como objetivo determinar as emissões de CO₂ e consumos de combustíveis (ou energia) a ser utilizado como uma ferramenta em estudos de Planos de Mobilidade, ou Planos Diretores de Transportes. Portanto, os estudos numéricos e experimentais realizados ao longo do trabalho serviram para dar subsídio à implementação do modelo.

O estudo experimental apresentado acima caracterizou os ciclos reais de condução nas cinco rotas da cidade de Brasília, determinando a distribuição de velocidades instantâneas, o consumo de combustível e as emissões de CO₂. Adicionalmente, foram feitas medições de fluxo de tráfego e número de passageiros por veículo nas cinco rotas, determinando a relação entre o número de veículos e o número de viagens por hora (disponíveis no PDTU), bem como a relação

entre o número de veículos na hora pico e o número de veículos em 24 horas. No estudo numérico, simulações realizadas nas cinco rotas caracterizadas puderam estimar os consumos de combustível, os consumos de energia elétrica e as emissões de CO₂ influenciados pela tecnologia veicular.

Essa abordagem que reúne as simulações numéricas apoiadas pelos dados experimentais, levou a um modelo *Bottom-up* para determinar o consumo de energia/combustível e as emissões de CO₂, representado no fluxograma da Figura 3.15 abaixo.

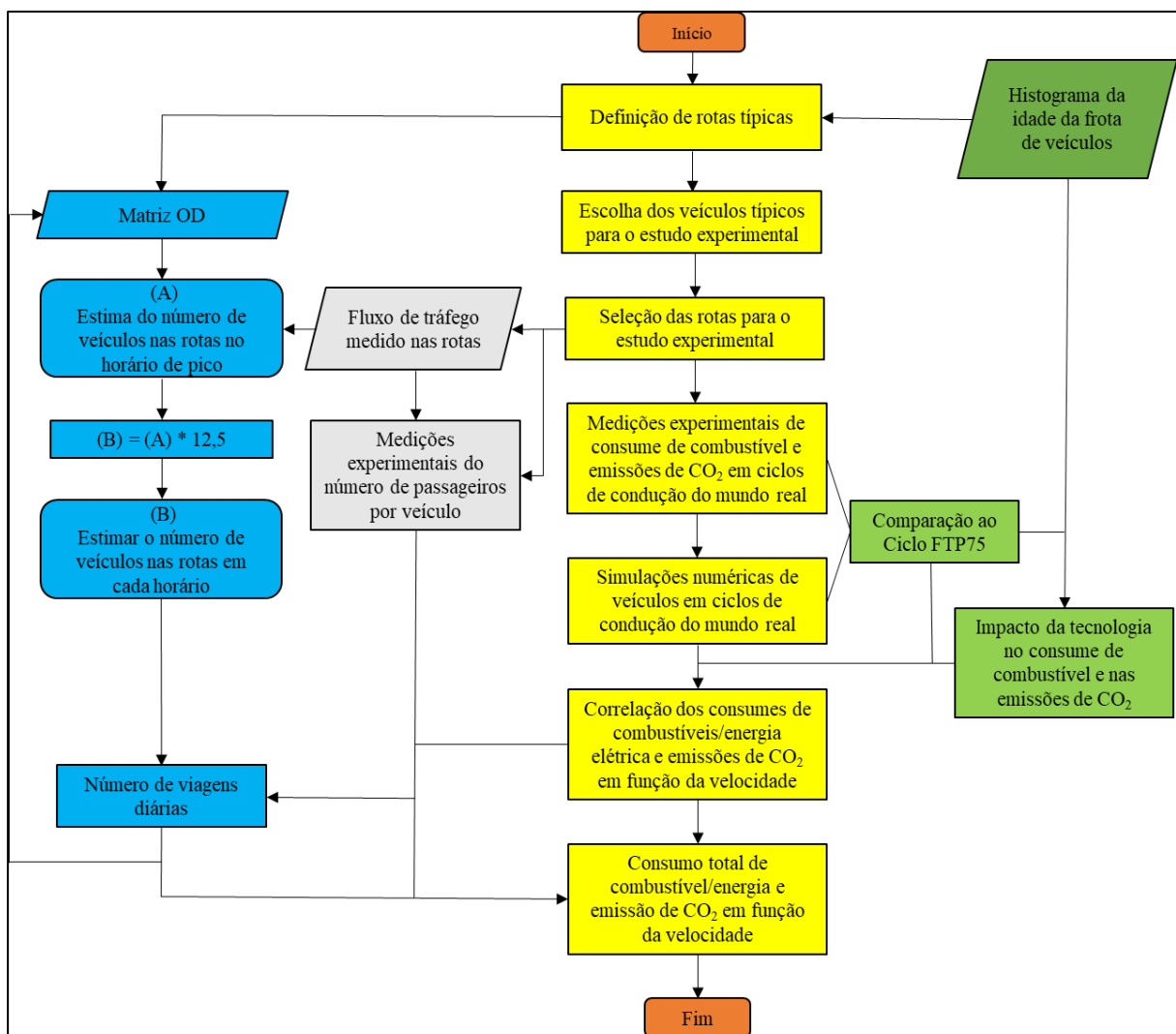


Figura 3.15 Metodologia ascendente para determinar o consumo de energia / combustível e as emissões de CO₂ para estudos de planejamento de transporte

O fluxograma descreve os passos do modelo proposto para o cálculo das emissões de CO₂ e consumos de combustível (ou energia) a ser usado em Planos de Mobilidade Urbana (PMU). No lado esquerdo do fluxograma, as viagens geradas de carro das regiões periféricas para a área

central da cidade são determinadas a partir da matriz OD tradicional e de uma modelagem em 4 etapas. Em seguida, é estimado o número de veículos nas estradas durante a hora de pico. Para isso, o número de passageiros por veículo é necessário para transformar o número de viagens (obtido da Matriz OD) em número de veículos nas vias. As medidas do fluxo de tráfego durante 24h podem calibrar o fluxo calculado da hora pico e inferir a relação entre o fluxo das 24h e o fluxo da hora de pico. Essa relação foi avaliada para verificar e propor um valor que multiplica o fluxo da hora de pico para atingir o fluxo de 24h.

Na sequência, do lado direito do fluxograma, também é necessária uma caracterização da frota, avaliando a idade dos veículos, o impacto da tecnologia na autonomia do combustível e no fator de emissão de CO₂. A tecnologia do HEV foi contemplada assumindo o aumento percentual do número de veículos híbridos e elétricos que compõem a frota.

No final da linha central do fluxograma, os consumos de combustível/energia e as emissões de CO₂ puderam ser determinados para Brasília, combinando os procedimentos do lado direito e esquerdo do fluxograma com os estudos experimentais e numéricos do presente trabalho, e usando a proposta de correlações de consumo de combustível/energia e emissão de CO₂ em função da velocidade. Com isso, pode-se determinar os consumos e emissões relativos aos PMUs.

Por fim, o procedimento acima pode ser usado em Estudos de Planejamento de Transporte como uma ferramenta para estimar o consumo de combustível/energia e as emissões de CO₂ para a próxima década, de uma forma mais robusta.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 CICLOS DE CONDUÇÃO, CONSUMO DE COMBUSTÍVEL E EMISSÕES DE CO₂ DE VEÍCULOS NAS ROTAS

Foram realizadas, inicialmente, para as cinco rotas, comparações entre os ciclos de condução reais e o FTP-75 (ciclos usados na homologação de veículos no Brasil), para o horário de pico (7h) e fora de pico (10h) para os três veículos apresentados no subtópico 3.4. Os ciclos de conduções obtidos para todas as rotas encontram-se em anexo. A Figura 4.1 e 4.2 apresenta, de forma sintetizada, os resultados para a rota (Gama/Plano Piloto). Mais adiante, serão apresentados os resultados mais detalhados de todas as rotas.

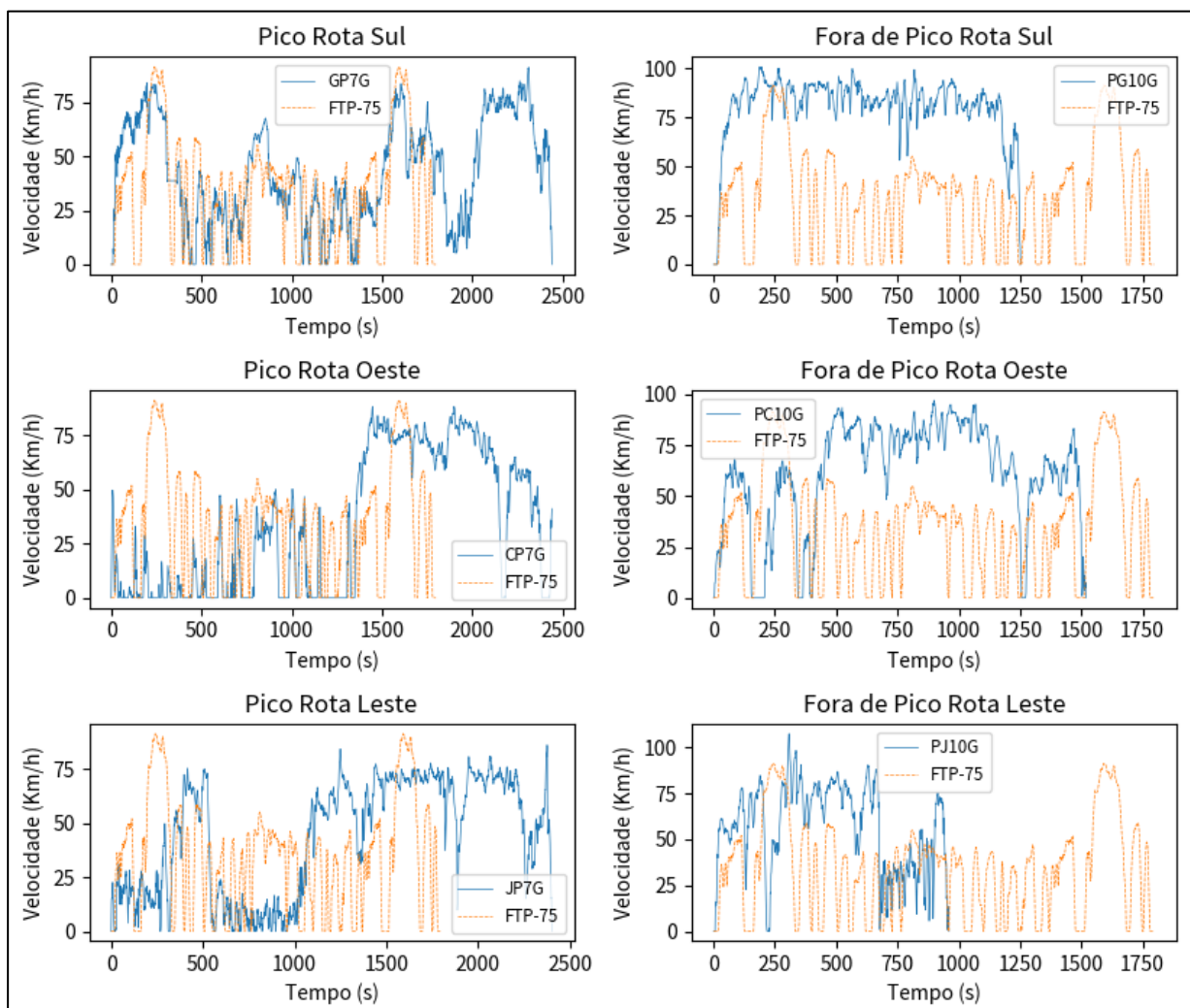


Figura 4.1 Ciclos de condução no mundo real de cinco rotas durante horários de pico e fora de pico, em comparação com FTP-75

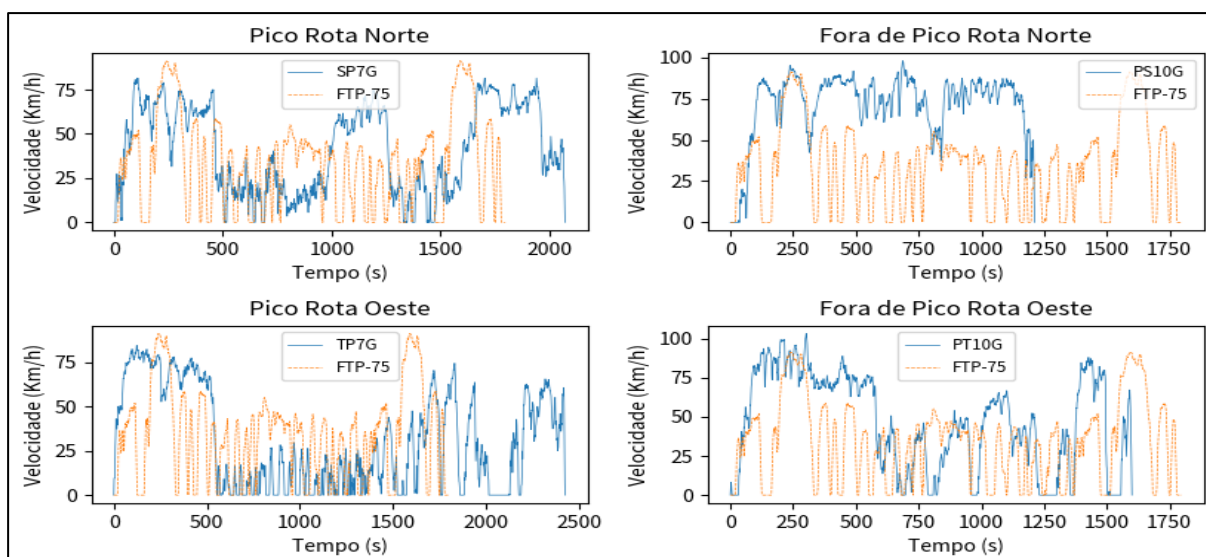


Figura 4.2 Ciclos de condução no mundo real de cinco rotas durante horários de pico e fora de pico, em comparação com FTP-75

Nas Figuras 4.1 e 4.2, observa-se que, para os ciclos apresentados, o perfil de velocidade do ciclo FTP-75 e dos ciclos obtidos em situações reais para o horário de pico se assemelharam bastante. Já para o horário fora de pico, nota-se que, entre o segundo 0 e 1300, o ciclo real apresentou média de velocidade de 80 km/h, enquanto o FTP-75 apresentou média abaixo de 40 km/h.

Ainda, com respeito aos ciclos de condução, a Tabela 4.1 apresenta detalhes como velocidade média, distância total, tempo de realização do ciclo, autonomia média e emissão de CO₂ média para os ciclos realizados nas rotas. Como referência, os dados médios obtidos para as rotas foram comparados com o ciclo FTP-75.

Tabela 4.1 Características das rotas

Rotas	Velocidade média (km/h)	Distância média (km)	Duração do ciclo (s)	Autonomia média			Emissões médias de CO ₂ (g/km)	
				Gasolina (km/l)	Etanol (km/l)	Elétrico (km/kWh)	Gasolina	Etanol
1(HEV)	48,4	27,7	2815	13,00	-	-	107,28	-
2(BEV)	54,0	27,7	2264	-	-	9,5	-	-
1	42,4	27,7	2474	11,67	9,92	-	265,64	238,87
2	41,1	23,4	2086	11,73	9,18	-	244,97	225,11
3	43,2	15,2	2373	11,29	10,49	-	294,58	247,87
4	30,8	19,8	2419	11,52	11,41	-	275,83	129,57
5	34,6	24,9	2688	11,40	9,82	-	294,56	206,27
FTP-75	34,1	17,8	2474	11,20* ¹	10,52* ¹		189,52* ¹	183,38* ¹

¹ Os valores para autonomia e emissões de CO₂ do FTP-75 foram obtidos por meio de simulações numéricas com uso do Matlab/Simulink.

De acordo com a Tabela 4.1, é possível observar algumas diferenças e semelhanças entre os detalhes dos ciclos reais e do ciclo FTP-75. Para os ciclos avaliados, a maior diferença percentual observada entre a velocidade média do ciclo real e o FTP-75 foi de 29,25%. Ao comparar o consumo de energia e as emissões de CO₂ do FTP-75, com ciclos de condução reais, foi identificada uma discrepância significativa nas rotas examinadas. A Tabela 4.2 apresenta, em detalhes, as discrepâncias entre o OBD e o FTP-75.

Tabela 4.2 Diferenças 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 FTP75			
			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	7:00h	Rota Sul	0,09	110,34	0,09	111	-0,80%	-4,47%	0,60%	-3,03%
		Rota Oeste	0,10	118,96	0,09	111	-8,67%		-7,17%	
		Rota Leste	0,09	117,39	0,09	111	-7,24%		-5,76%	
		Rota Norte	0,09	106,48	0,09	111	2,73%		4,08%	
		Rota Oeste	0,10	118,62	0,09	111	-8,37%		-6,87%	
	10:00h	Rota Sul	0,08	96,66	0,09	111	11,70%	10,90%	12,92%	12,13%
		Rota Oeste	0,07	86,96	0,09	111	20,56%		21,66%	
		Rota Leste	0,08	105,84	0,09	111	3,31%		4,65%	
		Rota Norte	0,07	90,62	0,09	111	17,21%		18,36%	
		Rota Oeste	0,09	107,58	0,09	111	1,72%		3,08%	
MCI-FOX Etanol	7:00h	Rota Sul	0,14		0,13		-5,41%	-2,29%		
		Rota Oeste	0,14		0,13		-7,44%			
		Rota Leste	0,16		0,13		-25,81%			
		Rota Norte	0,10		0,13		20,97%			
		Rota Oeste	0,12		0,13		6,25%			
	10:00h	Rota Sul	0,10		0,13		19,34%	6,92%		
		Rota Oeste	0,11		0,13		14,85%			
		Rota Leste	0,10		0,13		20,08%			
		Rota Norte	0,18		0,13		-36,60%			
		Rota Oeste	0,11		0,13		16,93%			
HEV Gasolina	7:00h	Rota Sul	0,04	53,03	0,05	71	21,19%	21,19%	25,30%	25,30%
	10:00h	Rota Sul	0,03	39,85	0,05	71	40,79%	40,79%	43,87%	43,87%
BEV	7:00h	Rota Sul	0,07		0,11		31,16%	31,16%		
	10:00h	Rota Sul	0,10		0,11		4,04%	4,04%		

Para o veículo, fazendo uso de gasolina, o erro médio no consumo e nas emissões de CO₂ nos horários de pico foram de 4,47% e 3,03%, superior ao FTP-75, respectivamente. Inversamente, nos horários fora de pico, tanto o consumo de energia como as emissões de CO₂ apresentaram valores inferiores ao FTP-75, com diminuições de 10,9% e 12,13%, respetivamente. Considerando o uso do etanol, o consumo de energia no horário de pico foi de 2,29% superior ao registrado pelo FTP-75, enquanto as emissões de CO₂ foi de 6,92% menor fora do horário de pico.

O HEV, por sua vez, apresentou consumo de energia e emissões de CO₂ em relação ao FTP-75 de 21,19% e 53,03 menor que o FTP-75, nos horários de pico, e 40,79% e 43,87 menor, no período fora de pico. O comportamento foi semelhante ao Veículo Elétrico Híbrido (HEV), com consumo de energia inferior ao FTP-75, sendo 31,16% menor, no horário de pico, e 4,04% menor, no período fora de pico.

O objetivo da comparação entre os ciclos reais de condução e o FTP-75 foi identificar possíveis discrepâncias entre esses ciclos. Tais diferenças foram evidenciadas especialmente em situações de fluxo livre, ou seja, fora dos horários de pico. Estas observações sugerem que os dados reportados podem representar cenários que não correspondem totalmente à realidade do consumo de energia e das emissões de CO₂.

Com respeito aos Poluentes, NO_x, HC e CO, os mesmos foram determinados por meio de simulações numéricas utilizando o *Matlab* Simulink. Os valores médios para todas as rotas utilizando gasolina foram de 0,0012 para o óxido de nitrogênio (NO_x), 0,09 para hidrocarbonetos (HC) e 0,396 para o monóxido de carbono. Uma abordagem a respeito do procedimento estatístico e algumas considerações para a não inserção no modelo, encontra-se em anexo

Por meio dos resultados, é possível observar discrepâncias para os consumos energéticos médios, em percursos reais, em comparação ao ciclo FTP75. Isso pode estar associado a diferentes aspectos, que foram levados em consideração nesse estudo para os ciclos reais, como a energia associada às variações de altitude (grade), temperatura, variações na fluidez, e ainda, na dinâmica mais agressiva da circulação real em horários fora de pico.

4.2. FUNÇÕES DE CORRELAÇÃO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL E CO₂

Os dados experimentais de consumo de combustível/energia e das emissões de CO₂ nas 5 rotas avaliadas no DF, bem como, os dados de simulação numérica veicular do *Matlab/Simulink*, serviram de base para consolidar funções de correlação a partir da regressão dos valores do consumo instantâneo e velocidades instantâneas. Nesse procedimento, foi levado em consideração as diferentes tecnologias veiculares para os horários de pico e fora de pico.

Usando um código desenvolvido em *Python* (anexo), foi possível realizar as análises iniciais dos dados gerados nas simulações. Esse procedimento inicial retirou os *outliers* das amostras para os diferentes horários e diferentes tecnologias. Na sequência, o código implementa regressões do tipo potencial e polinomial e escolhe o melhor o coeficiente de determinação (R^2) para cada ajuste de curva, fornecendo aos dados observados uma medida quantitativa da qualidade do ajuste do modelo. Posteriormente, os dados originais e a curva de regressão foram plotados para uma visualização gráfica da adequação do modelo aos dados.

A melhor função de correlação, obtida por meio de simulações numéricas, para o veículo FOX usando gasolina E-27, é apresentada na Figura 4.3. Sendo a correlação para o consumo do veículo FOX, usando etanol, apresentada na Figura 4.4. Vale ressaltar que a gasolina usada no Brasil é a E-27, ou seja, 27% de etanol. O etanol utilizado nos veículos durante as medições foi o E-100, ou seja, etanol 100%.

Nas Figuras a seguir, os símbolos representam as medições de consumo de combustível/energia do OBD e velocidades a cada segundo. As linhas representam as melhores funções de correlação para os horários de pico e fora de pico. Importante lembrar que a correlação para o ciclo FTP-75 foi obtida da simulação numérica dos consumos de combustível/energia dos veículos a cada segundo do ciclo FTP-75, Figuras 4.3 e 4.4.

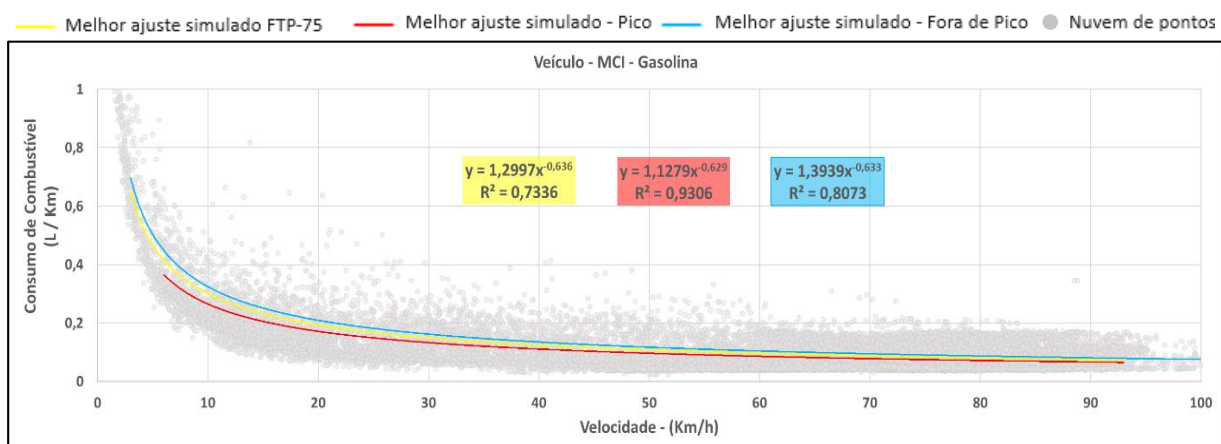


Figura 4.3 Velocidade em função do consumo utilizando gasolina para um veículo a combustão interna

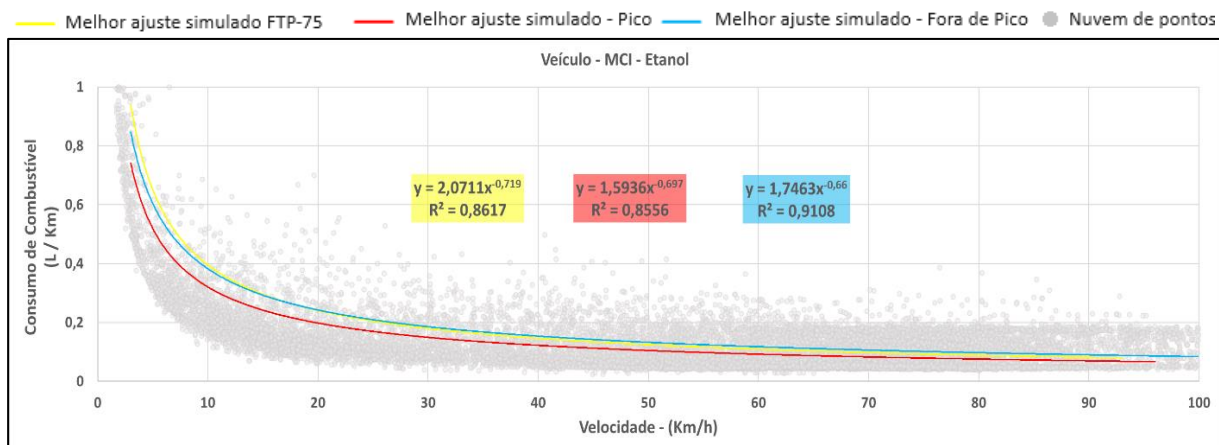


Figura 4.4 Velocidade em função do consumo utilizando etanol para um veículo a combustão interna

As funções de correlações obtidas na média tiveram valores bastante representativos para o grau de explicação dos dados utilizados na regressão. Vale notar que as constantes obtidas para a gasolina e o etanol ficaram dentro do esperado com o etanol, dando um consumo de aproximadamente 30% maior.

O procedimento descrito anteriormente também foi realizado para o veículo híbrido (Prius), em que a melhor função de correlação, obtida por meio de simulações numéricas, usando gasolina, pode ser visualizada na Figura 4.5.

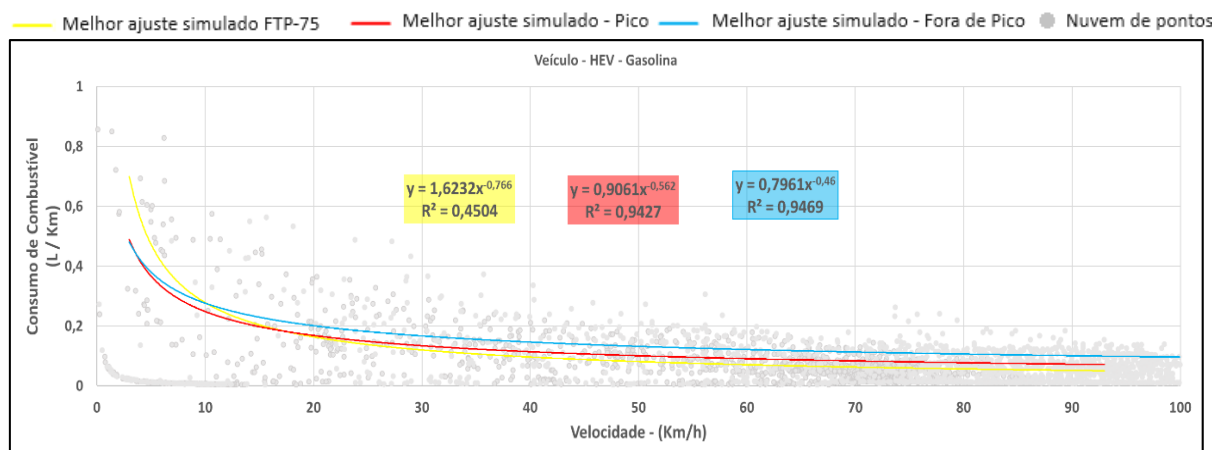


Figura 4.5 Velocidade em função do consumo utilizando gasolina para um veículo híbrido

As correlações obtidas para o HEV se assemelham com o trabalho de Song *et al.* (2012) especialmente para velocidades elevadas. Ressalta-se também que a função de correlação obtida para o FTP-75, para baixas velocidades, registram consumos maiores visto que, para esse veículo o acionamento do grupo elétrico influencia bastante nos consumos.

Por fim, o mesmo procedimento foi realizado para o veículo totalmente elétrico (Nissan Leaf), no qual a melhor função de correlação em (kwh/km), obtida por meio de simulações numéricas, pode ser visualizada na Figura 4.6.

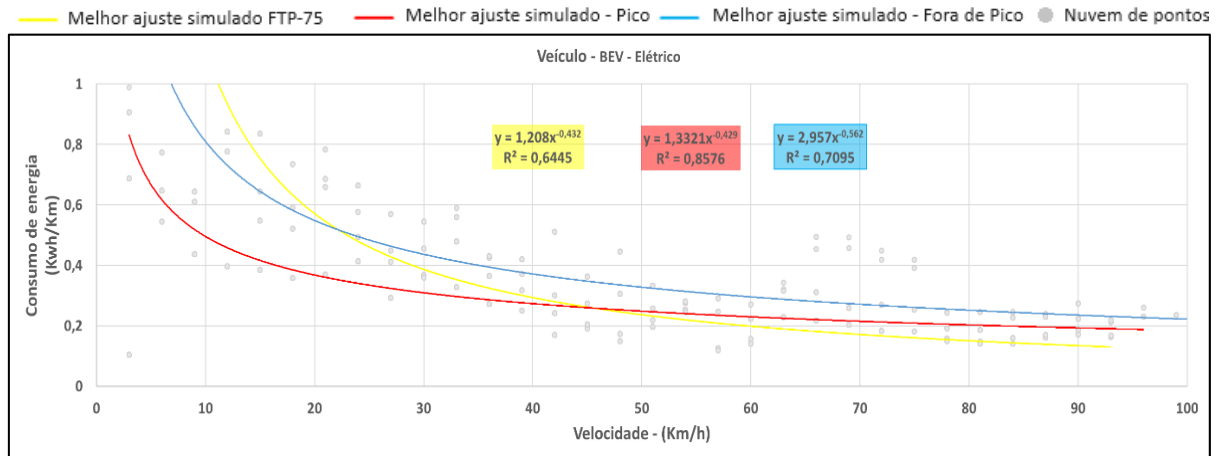


Figura 4.6 Velocidade em função do consumo para um veículo elétrico

Portanto, funções universais propostas com base nos resultados experimentais e numéricos do presente trabalho, também a partir de resultados experimentais de Song *et al.* (2012), são mostradas na Tabela 4.3 e representa a correlação entre o consumo de combustível e a velocidade.

Tabela 4.3 Melhor correlação do consumo de combustível em função da velocidade para diferentes tecnologias

Consumo (L/Km) em Função da Velocidade (km/h)							
	Veículo (MCI)		Veículo (HEV)		Veículo (BEV)		Outros autores (MCI)
	Pico	Fora de pico	Pico	Fora de pico	Pico	Fora de pico	
	$C = av^b$				$C = av^b$		$C = av^b$
Gasolina	a = 1,0594 b = - 0,636	a = 1,268 b = - 0,593	a = 0,9061 b = - 0,562	a = 0,7961 b = - 0,460	a = 1,3321 b = - 0,429	a = 2,957 b = - 0,562	a = 1,0183 b = - 0,610
Etanol	a = 1,4921 b = - 0,630	a = 1,7096 b = - 0,633	a = 1,4697 b = - 0,618	a = 1,00645 b = - 0,465			a = 1,687 b = - 0,737

Uma abordagem semelhante foi realizada para determinar as funções de correlação de CO₂, a partir de simulações numéricas para diferentes tecnologias. A melhor função de correlação para os resultados experimentais são apresentadas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 Melhor correlação de emissões de CO₂ em função da velocidade para diferentes tecnologias

Emissões (g/km) em Função da Velocidade (km/h)							
	Veículo (MCI)		Veículo (HEV)		Veículo (BEV)		Outros autores (MCI)
	Pico	Fora de pico	Pico	Fora de pico	Pico	Fora de pico	--
	$E = av^b$		$E = av^2 + bv + c$				$E = av^2 + bv + c$
Gasolina	a = 2022,5 b = -0,562	a = 2393,7 b = -0,57	a = -0,107 b = -7,143 c = 186,68	a = -0,0429 b = 3,6019 c = 191,52	-	-	a = -0,0001 b = 0,0036 c = 0,932
Etanol	a = 1091,6 b = -0,625	a = 904,45 b = -0,551	a = -0,0136 b = 0,1777 c = 187,05	a = -0,0185 b = 1,9924 c = 171,71	-	-	-

A Tabela 4.4 apresenta correlações entre emissão de CO₂ para MCI e HEVs simulado dentro de uma faixa de velocidade de 0 a 140 km/h. Para HEVs, vale ressaltar que o coeficiente de correlação R² entre fatores de emissão de CO₂ e velocidades médias nas rotas ficaram significativamente menores que os de veículos a gasolina e etanol. Isso ocorre porque os HEVs dependem, em grande parte, do motor elétrico para arrancar usando a eletricidade (Fontaras *et al.*, 2008).

As funções de correlações são partes fundamentais para determinação do consumo energético e das emissões de CO₂ em função da velocidade. Dessa forma com o histograma de velocidades, que será apresentado no próximo tópico, é possível determinar o consumo e as emissões totais nos respectivo trechos.

4.3. HISTOGRAMA DO PERFIL DE VELOCIDADE MÉDIA NAS ROTAS

Em um segundo momento foi definida uma linha de fronteira para avaliar a quantidade de veículos que acessam a região central de Brasília, pelas cinco rotas, conforme representado na circunferência presente na Figura 3.1. Assim, por meio dos contadores de veículos (radares), obtidos junto à autoridade de tráfego local, foi possível adquirir o fluxo de tráfego das cinco vias das linhas de fronteira, que acessam a região central de Brasília.

Os dados de número de veículos por hora foram analisados durante 24h, de segunda a sexta, e comparados durante 3 meses diferentes do ano. A Figura 4.7 a 4.11 apresenta uma representação para todas as rotas do fluxo de tráfego, bem como o histograma das velocidades por número de veículos.

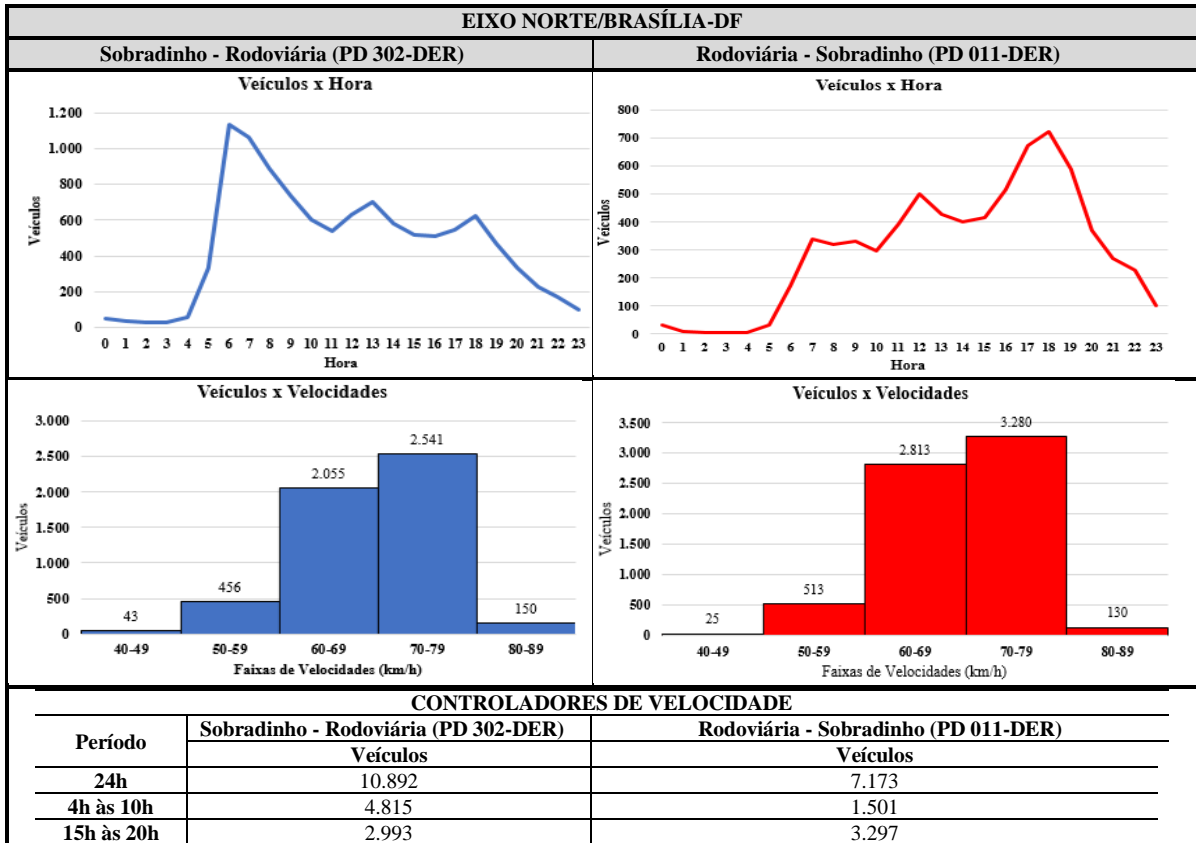


Figura 4.7 Fluxo de tráfego e Histograma de velocidades - Eixo Norte / Brasília – DF

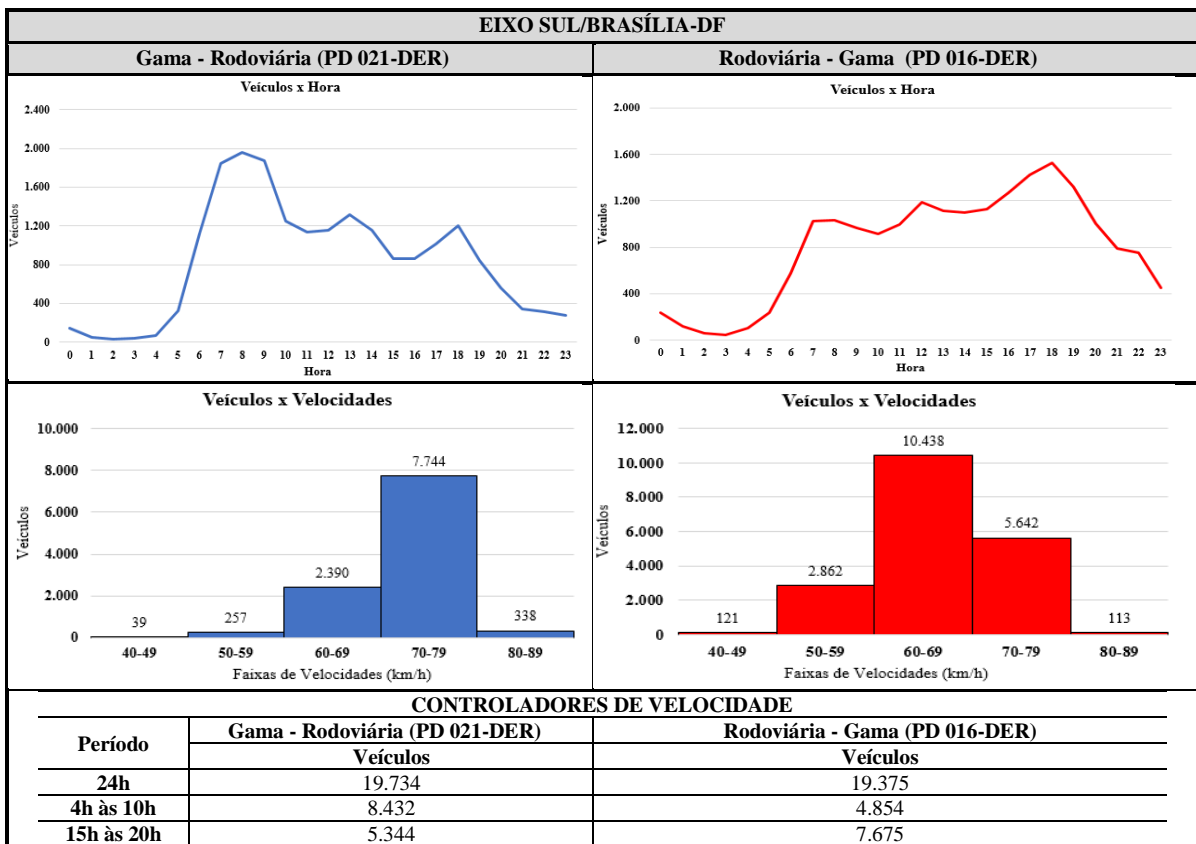


Figura 4.8 Fluxo de tráfego e Histograma de velocidades - Eixo Sul / Brasília – DF

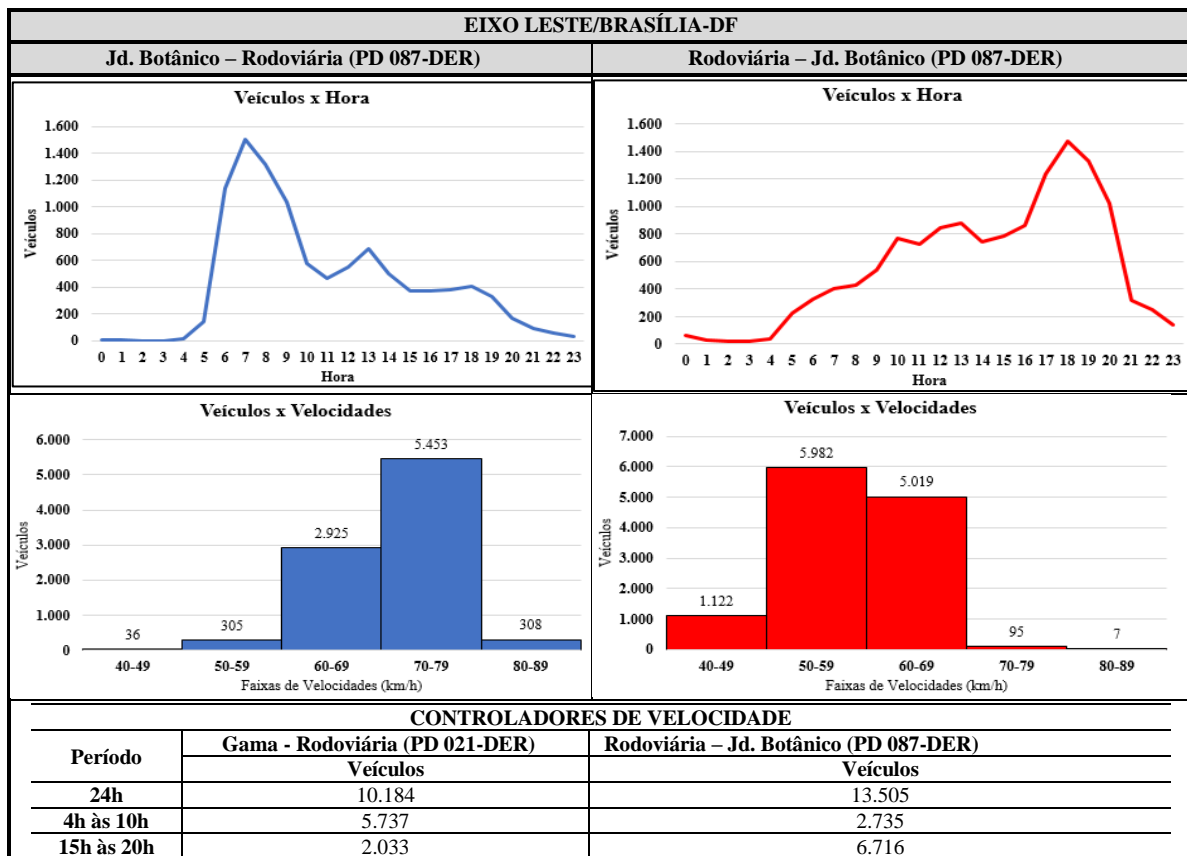


Figura 4.9 Fluxo de tráfego e Histograma de velocidades nos horários de pico e fora de pico - Eixo Leste / Brasília – DF

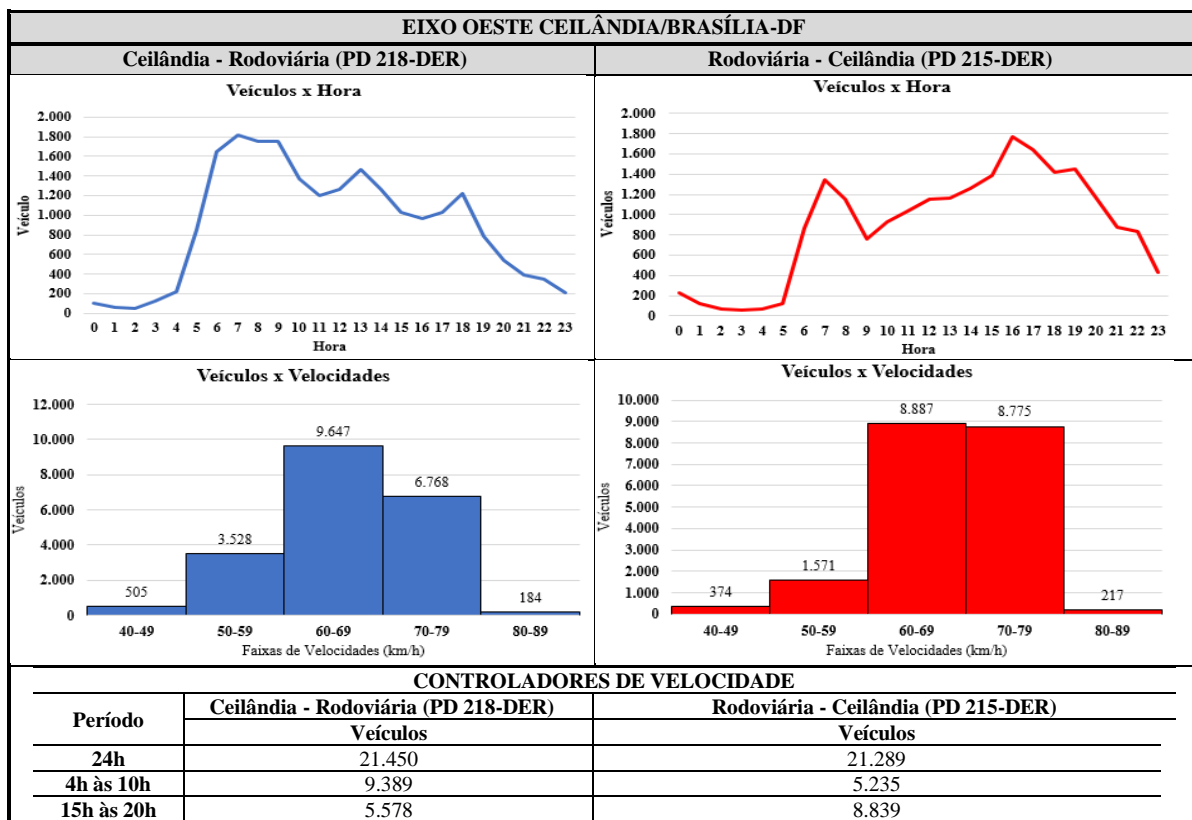


Figura 4.10 Fluxo de tráfego e Histograma de velocidades nos horários de pico e fora de pico - Eixo Oeste (Ceilândia)/ Brasília – DF

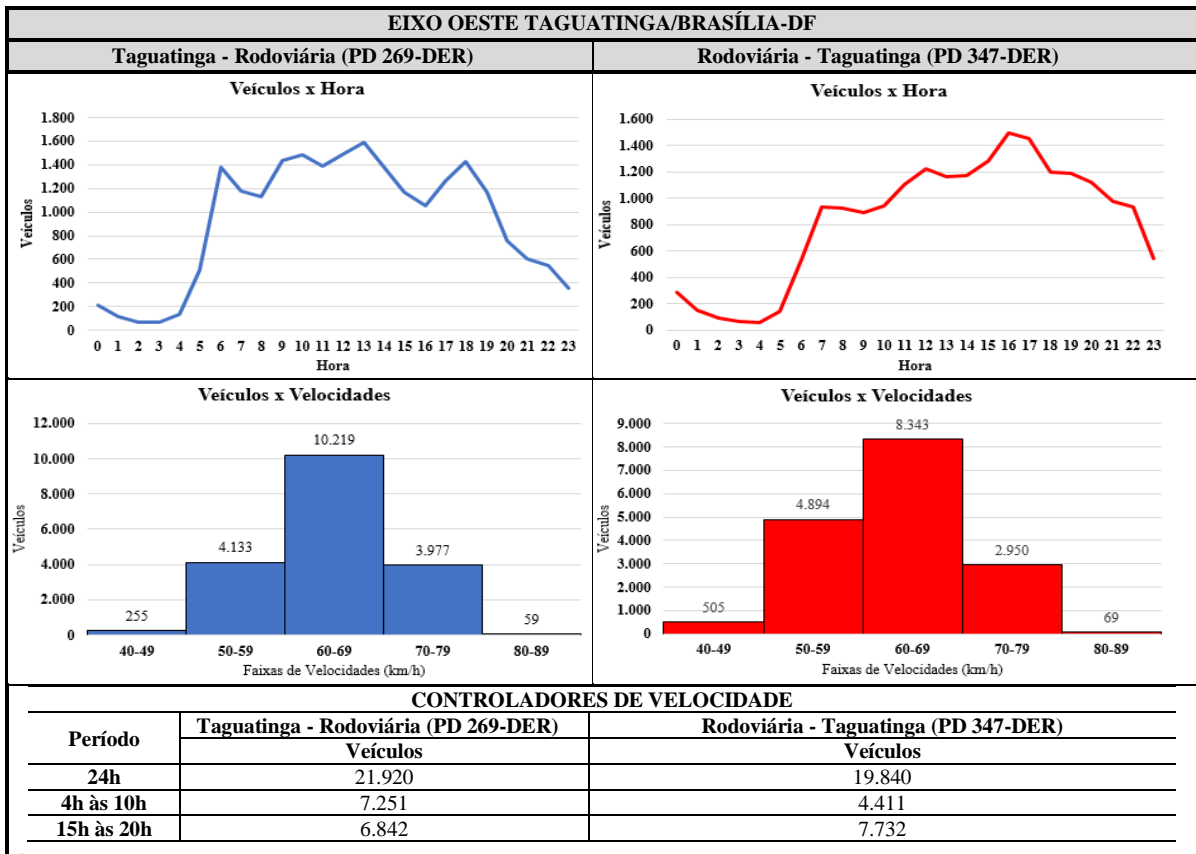


Figura 4.11 Fluxo de tráfego e Histograma de velocidades nos horários de pico e fora de pico - Eixo Oeste (Taguatinga)/ Brasília – DF

Ainda, de forma sintetizada a Figura 4.12 demonstra uma representação do fluxo médio de veículos, ao longo de 24h das rotas analisadas, em direção à Rodoviária do Plano Piloto.

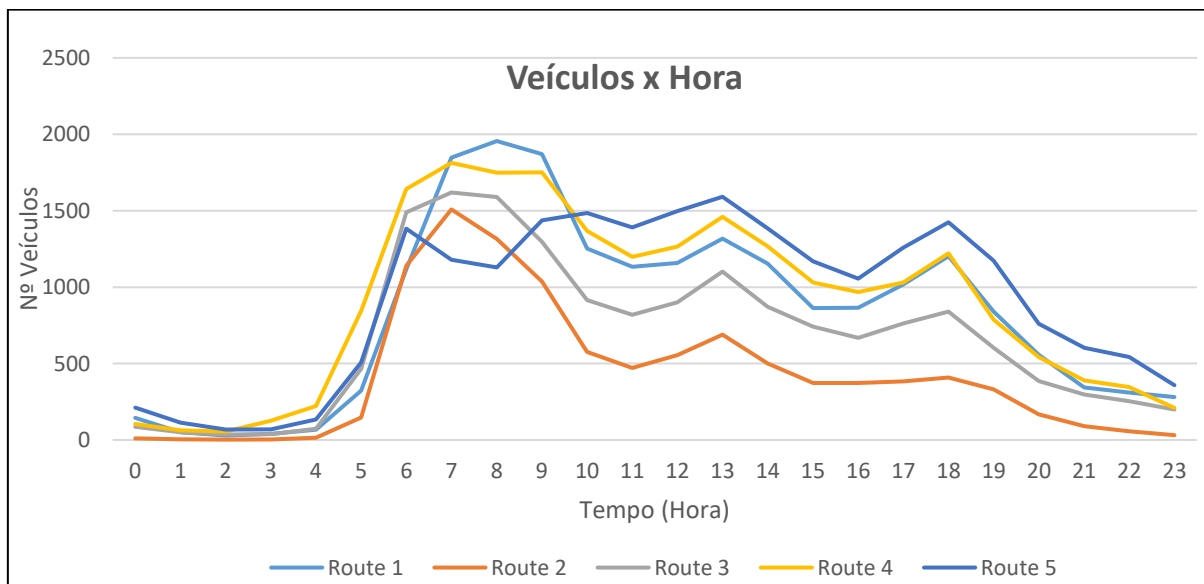


Figura 4.12 Curva média de fluxo de veículos para as cinco rotas

Vale ressaltar que, na Figura 4.12, há um fluxo de tráfego mais acentuado no período das 6h às 10h observando-se uma queda até um valor que tende a ser constante e, após as 19h, uma queda acentuada, para um dos lados da via.

A fim de determinar uma constante de proporcionalidade, relacionado o fluxo de tráfego médio nas rotas e os intervalos de maior pico e fora de pico, foi usada a relação:

$$\text{Constante Multiplicadora } (n) = \frac{\sum(\text{fluxo de veículos em 24h})}{\text{intervalo médio do horário de pico e fora de pico}}$$

Equação 4

Também foi determinado o número médio de passageiros nos carros. Esse procedimento foi realizado com auxílio de uma câmera, com a qual foi possível filmar o fluxo de tráfego para os horários de pico e fora de pico em que foram feitas as viagens e, posteriormente, a análise e a contagem do número de pessoas que ocupavam cada veículo. Esse procedimento foi realizado para as cinco rotas, e os dados para o número médio de pessoas nos veículos, bem como a constante (n) obtida por meio da Equação 4, para todas as rotas nos horários de pico e fora de pico, estão sintetizados na Tabela 4.5. Vale ressaltar que o horário de pico e fora de pico para essa etapa foi adotado com base nos dados da Figura 4.12.

Tabela 4.5 Fluxo médio de veículos nas rotas

Rotas	Pico	Fora de Pico
Rota 1: Eixo Sul (UnB – Rod. do Plano Piloto)	fluxo de 24h = 18867 horário de pico = 8497 n = 2,22 (Eq. 1)	fluxo de 24h = 18867 horário fora de pico = 10370 n = 1,82 (Eq. 1)
Rota 2: Eixo Leste (Adm. Jardim Botânico – Rod. do Plano Piloto)	fluxo de 24h = 13759 horário de pico = 5880 n = 2,34 (Eq. 1)	fluxo de 24h = 13759 horário fora de pico = 7879 n = 1,75 (Eq. 1)
Rota 3: Eixo Norte (Adm. Sobradinho – Rod. do Plano Piloto)	fluxo de 24h = 49888 horário de pico = 20183 n = 2,47 (Eq. 1)	fluxo de 24h = 49888 horário fora de pico = 29705 n = 1,68 (Eq. 1)
Rota 4: Eixo OESTE (Adm. Ceilândia – Rod. do Plano Piloto)	fluxo de 24h = 21370 horário de pico = 8416 n = 2,56 (Eq. 1)	fluxo de 24h = 21370 horário fora de pico = 12954 n = 1,65 (Eq. 1)
Rota 5: Eixo OESTE (Adm. Taguatinga – Rod. do Plano Piloto)	fluxo de 24h = 20880 horário de pico = 6698 n = 3,12 (Eq. 1)	fluxo de 24h = 20880 horário fora de pico = 14182 n = 1,47 (Eq. 1)
Passageiros por veículo	1,3 ± 0,2	1,1 ± 0,3

Visando aplicar a metodologia proposta, estimou-se a demanda de viagens de carro para cada trajeto no horário de pico e fora de pico. Em seguida, dividiu-se essa demanda de viagens pela

ocupação média de carros para determinar o número de veículos. O fluxo medido na hora de pico e fora de pico dos veículos foi comparado com o calculado e multiplicado pela constante calculada na Tabela 4.5 para resultar em um fluxo de 24h.

Diferente do que é feito nos estudos de Planos de Mobilidade atualmente, que é analisado somente o horário de pico, pode-se perceber por meio da Tabela 4.5, principalmente para as rotas 2 e 3, uma variação bastante acentuada entre o horário de pico e fora de pico, para a constante (n).

Vale ressaltar que, para uma abordagem macro do trabalho, a quantidade de veículos que utilizam etanol e gasolina foi baseada na série histórica média de combustíveis vendidos em Brasília, com 23% de etanol e 77% de gasolina (ANP, 2020).

Na sequência, com os dados consolidados de velocidade média nas rotas, tanto pela medição dos dados do OBD, quanto pelos obtidos pelos radares, foi possível realizar uma distribuição de frequência caracterizando as respectivas velocidades por faixa. Assim, a Figura 4.13 apresenta os histogramas das velocidades médias para as cinco rotas, estabelecendo o percentual de velocidades que compõem as viagens, para os horários de pico e fora de pico.

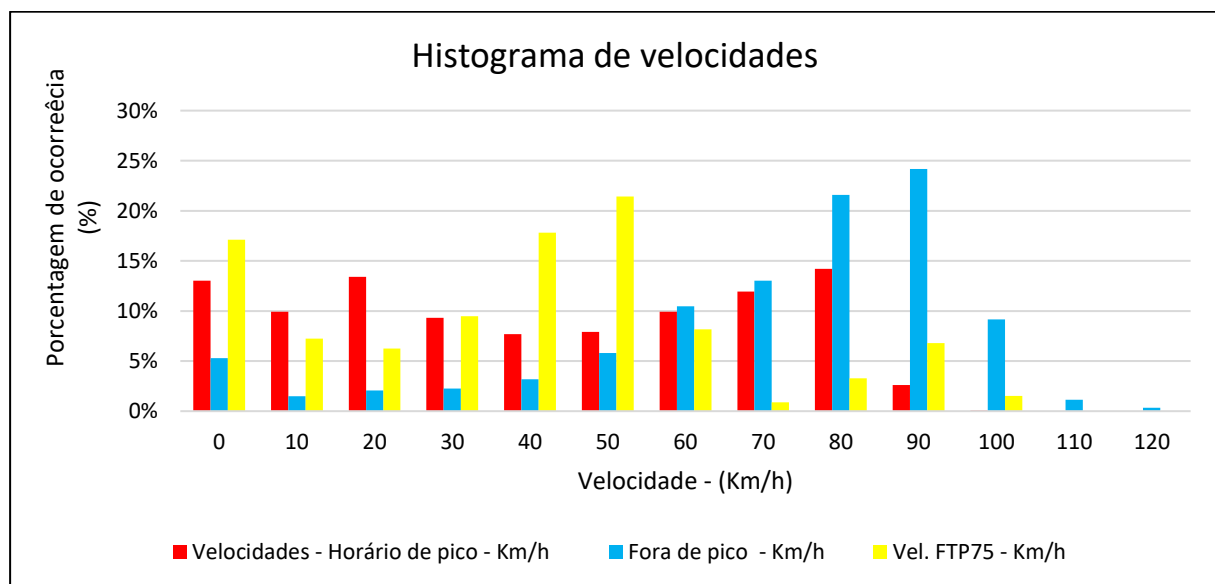


Figura 4.13 Histogramas das velocidades para as cinco rotas, para horários de pico e fora de pico, estabelecendo o percentual de velocidades que compõem as viagens

De acordo com a Figura 4.8, percebe-se que, para as velocidades no horário de pico, uma distribuição percentual abaixo de 80 km/h se destaca, com valores em torno de 20 km/h,

enquanto para velocidades fora de pico, como era esperado, há um predomínio percentual de velocidades entre 80 e 90 km/h. Quanto ao FTP-75, há um predomínio percentual de velocidade em torno de 50 e 60 km/h.

4.4. ABORDAGEM VSP

Quanto aos comportamentos de condução nas cinco rotas foram analisadas o agregado das distribuições dos modos VSPs em horários de pico e fora de pico. Diferenças significativas foram observadas nas distribuições dos modos VSPs nas diferentes rotas. A Figura 4.14 constitui uma representação, por meio de gráficos de dispersão, das emissões em função do VSP para as cinco rotas em comparação com o ciclo FTP-75, em diferentes horários, ou seja, para horários de pico e fora de pico.

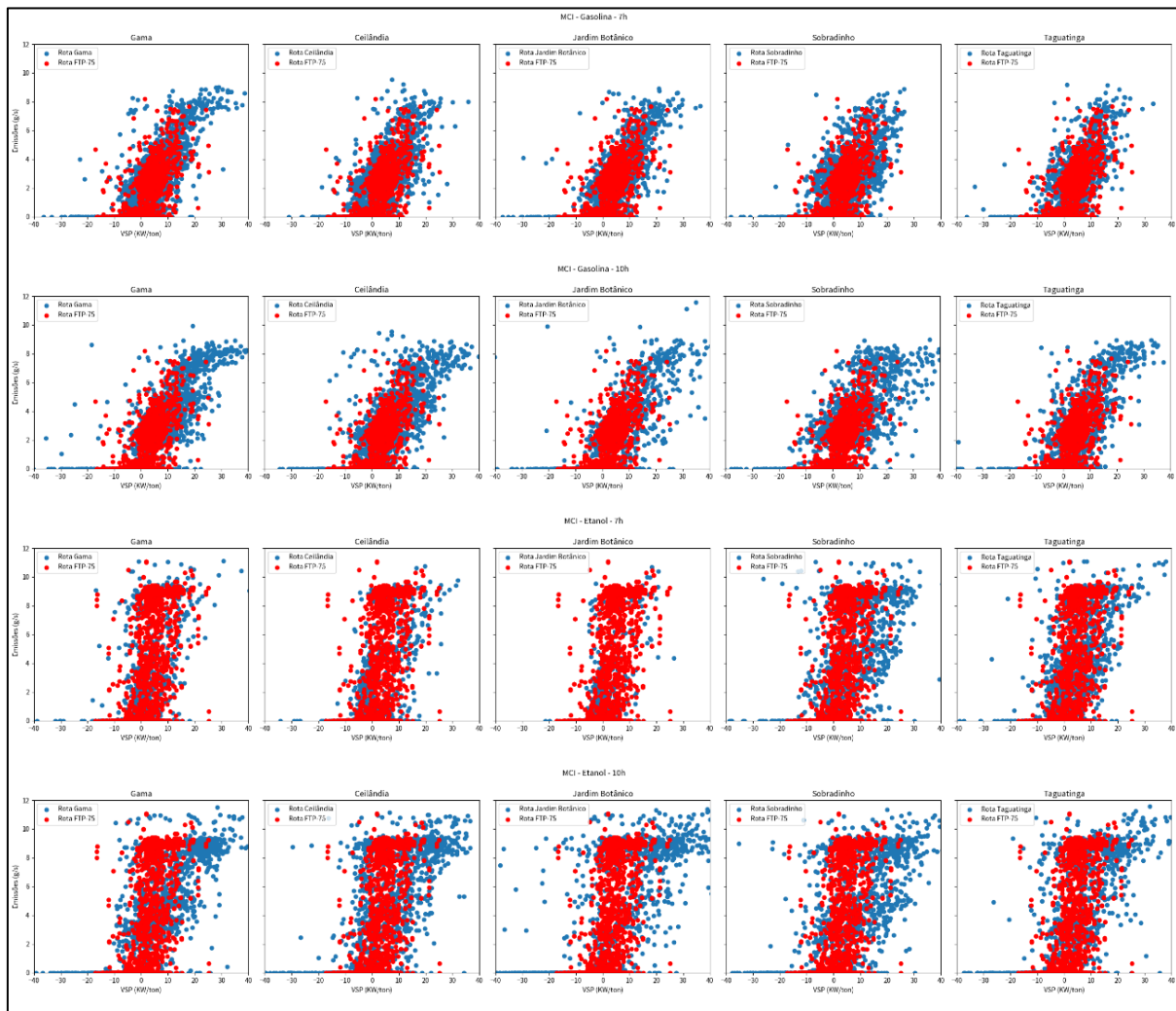


Figura 4.14 Relação entre VSP (KW/ton) e as taxas de emissão de CO₂ em (g/s) - MCI

Por meio dos gráficos presentes na Figura 4.9, é possível observar padrões e tendências distintas para os combustíveis a gasolina e etanol, bem como para os horários de 7h (pico) e 10h (fora de pico). Durante o horário de pico, observa-se um aumento nas emissões em todas as rotas, independentemente do tipo de combustível. Isso pode ser devido ao tráfego intenso, frequentes paradas e partidas, e períodos prolongados de marcha lenta, todos contribuindo para uma combustão menos eficiente e, portanto, maiores emissões de CO₂. Em contrapartida, a presença de veículos em faixas de VSP mais altas, durante o horário fora de pico, sugere condições de tráfego mais fluidas, corroborando a observação de emissões mais baixas.

Assim como a gasolina, o etanol apresenta uma dispersão menor nas emissões durante o horário de pico. No entanto, a dispersão é ligeiramente menor em comparação com a gasolina. As emissões de etanol fora do pico são mais espalhadas, semelhantes às da gasolina, o que indica situações em que o motor é mais exigido.

Comparando as emissões durante os horários de pico e fora de pico com o ciclo FTP-75, nota-se que as emissões no ciclo real de condução (horários de pico e fora de pico) são frequentemente mais elevadas. Isso sugere que os testes padrão podem subestimar as emissões reais em condições de tráfego real.

O mesmo procedimento usado no MCI para representar as emissões de gases de efeito estufa, em função do VSP realizado, foi adotado para o HEV. Todavia, os ensaios foram realizados apenas na rota padrão (Rota Sul). A Figura 4.15 traz uma representação dos dados de dispersão das emissões em função do VSP em comparação com o ciclo FTP-75, em horários de pico e fora de pico.

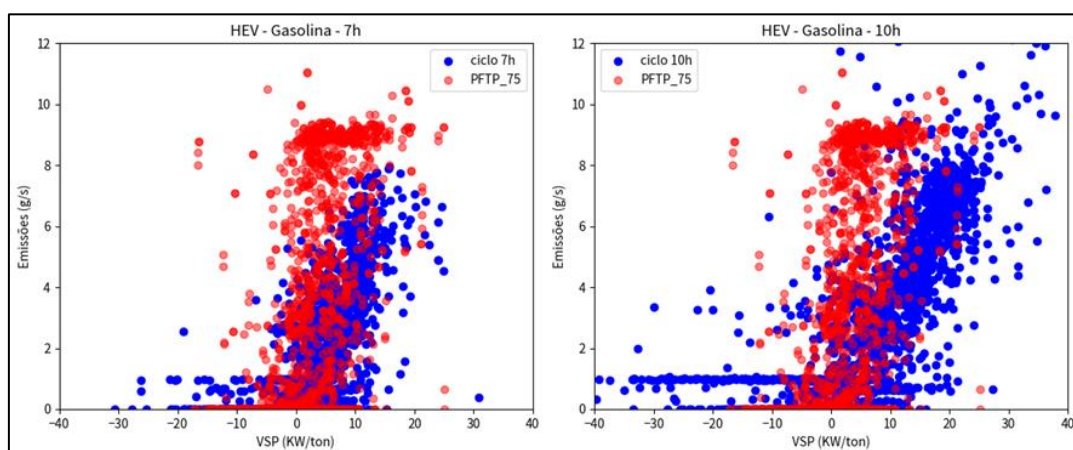


Figura 4.15 Relação entre VSP (KW/ton) e as taxas de emissão de CO₂ em (g/s) - HEV

Os pontos vermelhos, representam o ciclo FTP-75, e apresentam uma dispersão significativa nas emissões de CO₂ em relação ao VSP. Isso é esperado, visto que, no ciclo FTP-75, o veículo é submetido a uma ampla gama de condições de condução, desde baixas demandas (baixo VSP) até condições mais exigentes (alto VSP). A variação nas emissões de CO₂ sugere que o ciclo FTP-75 simula diferentes fases de condução, incluindo arranque, aceleração, condução estável e desaceleração.

Em relação ao horário de pico, é possível observar que mesmo em momentos nos quais o VSP é elevado, as emissões são relativamente baixas. Isso pode ser atribuído às fases do ciclo em que o motor elétrico do HEV é mais utilizado, aproveitando sua eficiência e resultando em emissões reduzidas. Em contrapartida para o horário fora de pico, pode -se observar emissões de CO₂ mais elevadas, assim como os valores de VSP.

Ao analisar o ciclo de condução observam-se velocidades elevadas, ou seja, o veículo opera frequentemente em condições que exigem mais potência. Essa demanda elevada de potência, representada por valores mais altos de VSP, está correlacionada com maiores emissões de CO₂. Uma possível explicação para esse fenômeno é que, fora dos horários de pico, as estradas mais livres permitem velocidades mais altas e, conseqüentemente, o motor a combustão do HEV é mais solicitado, levando a um aumento nas emissões.

4.5. ESTIMATIVA DE EMISSÕES PARA AS DIFERENTES ROTAS UTILIZANDO VSP

Com o objetivo de estimar as emissões, utilizou-se o *VSP mode* correspondente a cada segundo dos ciclos de condução das diferentes rotas, para o pico e fora do pico, conforme metodologia apresentada em documento publicado pela EPA (Estados Unidos, 2009). Os VSP modos de operação identificados para cada segundo dos ciclos de condução são apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 VSP *mode* nos horários de pico e fora de pico

VSP Mode	Gama		Celândia		Jardim Botânico		Sobradinho		Taguatinga	
	Pico	Fora de Pico	Pico	Fora de Pico	Pico	Fora de Pico	Pico	Fora de Pico	Pico	Fora de Pico
1	619	207	476	283	457	265	489	260	416	362
2	328	55	307	110	395	62	326	68	317	107
3	245	43	917	160	244	44	214	77	695	303
4	412	90	256	167	420	88	322	137	334	209
5	297	107	232	179	315	83	204	116	265	146
6	188	135	201	149	213	83	160	127	160	141
7	119	160	106	120	131	86	121	122	118	104
8	84	126	103	97	105	68	107	89	70	82
9	60	101	51	100	60	39	77	53	30	53
10	45	99	26	62	40	56	36	73	18	44
11	18	68	9	51	17	43	16	41	2	24
12	17	31	3	23	4	14	0	22	1	14
13	5	17	1	14	2	19	0	19	1	7
14	5	14	2	4	1	11	1	9	0	5
	2442	1253	2690	1519	2404	961	2073	1213	2427	1601

Essa identificação dos modos de operação do veículo a cada segundo permitiu estimar as emissões a partir dos ciclos de condução das diferentes rotas nos horários de pico e fora de pico. Sabendo em que modo de operação o veículo está (aceleração, desaceleração, marcha lenta, etc) a cada segundo do ciclo, é possível calcular as emissões esperadas em cada parte do ciclo por meio da metodologia da EPA. Dessa forma, foi determinada a estimativa das emissões totais para as rotas.

As emissões totais dos poluentes NO_x, HC e CO foram calculadas com a utilização do modelo VSP. Para a classificação e quantificação dessas emissões, adotou-se como referência os padrões estabelecidos pelo *Tier 2* das Taxas Médias de Emissão, conforme diretrizes da Agência de Proteção Ambiental dos EUA (EPA). Essa metodologia permite uma categorização mais precisa dos poluentes com base nos diferentes modos VSPs. Os valores médios para os poluentes NO_x, HC, CO₂ e CO para os modos VSP (fatores de emissão) são mostrados na Figura 4.16.

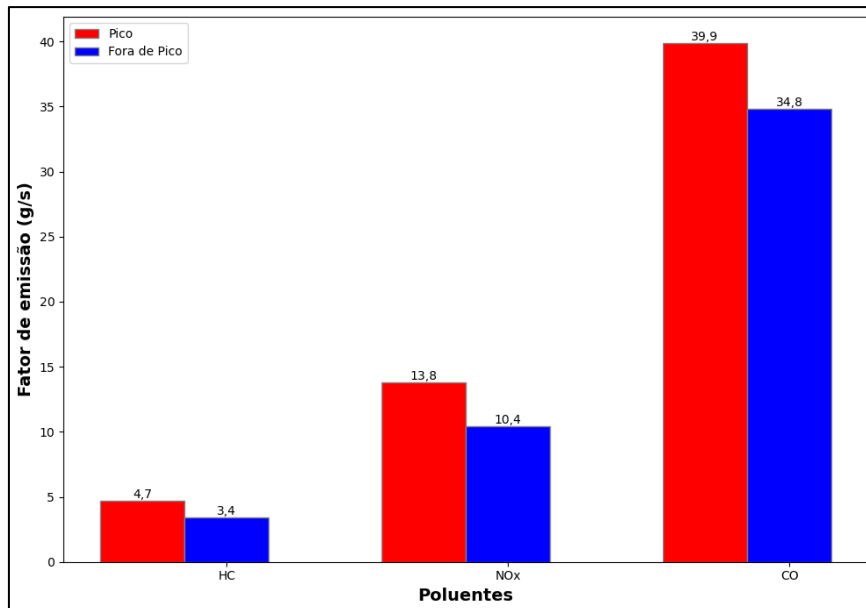


Figura 4.16 Comparação dos Valores em Pico e Fora de Pico para diferentes poluentes

Com base no gráfico apresentado na Figura 4.11, observa-se uma clara distinção nas emissões de poluentes entre os horários de pico e fora de pico. Para todos os três poluentes (NO_x, HC e CO), as emissões são mais elevadas durante os horários de pico. Especificamente, durante os horários de pico, as emissões de NO_x são superiores em 24,6%, as de HC, em 38,2% e as de CO, em 14,7%, comparando-se com os valores fora de pico. Esses dados corroboram a ideia de que há uma maior concentração desses poluentes em momentos de intensa atividade veicular. A análise reforça a noção de que a condição de tráfego, especialmente nos horários de maior movimentação, tem um impacto significativo nas emissões desses poluentes.

De forma análoga, uma avaliação foi conduzida para determinar as emissões de CO₂, utilizando o VSP. Esse procedimento teve como intuito oferecer uma visão mais abrangente sobre o comportamento das emissões de CO₂ em diferentes condições de tráfego, sendo em pico e fora de pico. Por meio do gráfico da Figura 4.17 é possível tirar algumas conclusões a respeito do comportamento das emissões de CO₂ em diferentes condições de fluidez da via.

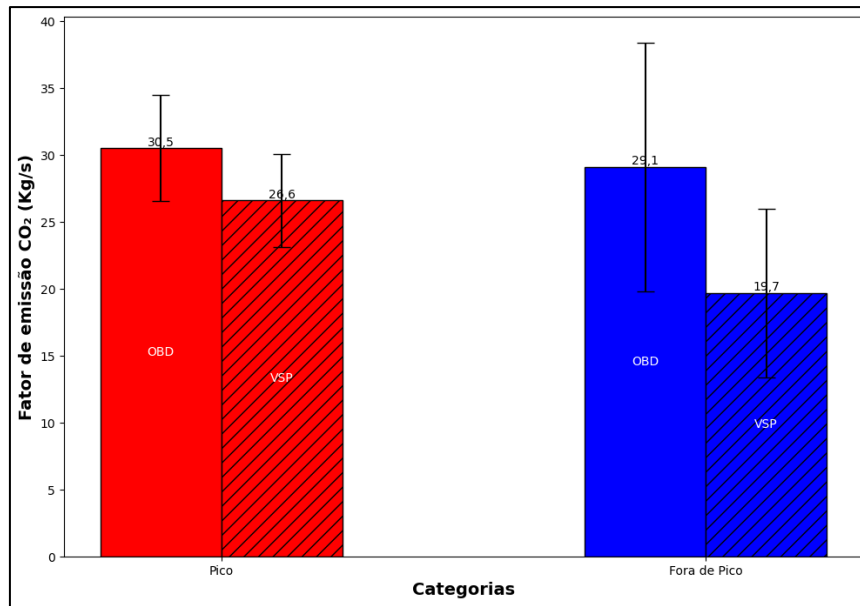


Figura 4.17 Comparação das Emissões de CO₂ em Pico e Fora de Pico usando OBD e VSP

A análise do gráfico revela que as emissões de CO₂ durante os horários de pico são significativamente mais altas quando medidas pelo sistema On-Board Diagnostics (OBD), em comparação com as estimativas obtidas pelo método (VSP). Esta diferença é quantificada em um erro relativo de 12,8%. Este padrão é ainda mais acentuado durante os horários fora de pico, onde o erro relativo entre as medições do OBD e as estimativas do VSP chega a 32,2%. Este aumento no erro sugere uma variação mais complexa na intensidade e na dinâmica do tráfego nesses períodos. Vale ressaltar que, embora o sistema OBD forneça dados valiosos sobre as emissões reais, há uma margem de erro inerente associada a essas medições, decorrente de variações no processo de medição e nas condições operacionais dos veículos.

4.6. CONSOLIDAÇÃO DO MODELO

Para validar a metodologia ilustrada na Figura 3.15 estimou-se primeiro a demanda por viagens de carro para as cinco rotas nos horários de pico. Na sequência, a demanda de viagens é então dividida pela ocupação média de automóveis durante os horários de pico, fornecendo o número de veículos em cada rota. Posteriormente, o fluxo observado de veículos nos horários de pico é multiplicado pela variável representada na Tabela 4.5 para produzir um fluxo de 24 horas. Por último, são aplicados os histogramas de velocidade da Figura 4.13 e as funções de correlação, considerando a composição da frota da Figura 3.6 e os fatores de consumo de energia e emissão de CO₂, da Figura 3.7, nas diferentes tecnologias. Todos esses componentes foram consolidados no modelo, permitindo a determinação do consumo de energia e das emissões de CO₂ e

considerando as diversas características da frota de veículos. Uma representação sucinta dessas etapas pode ser visualizada na Figura 4.18.

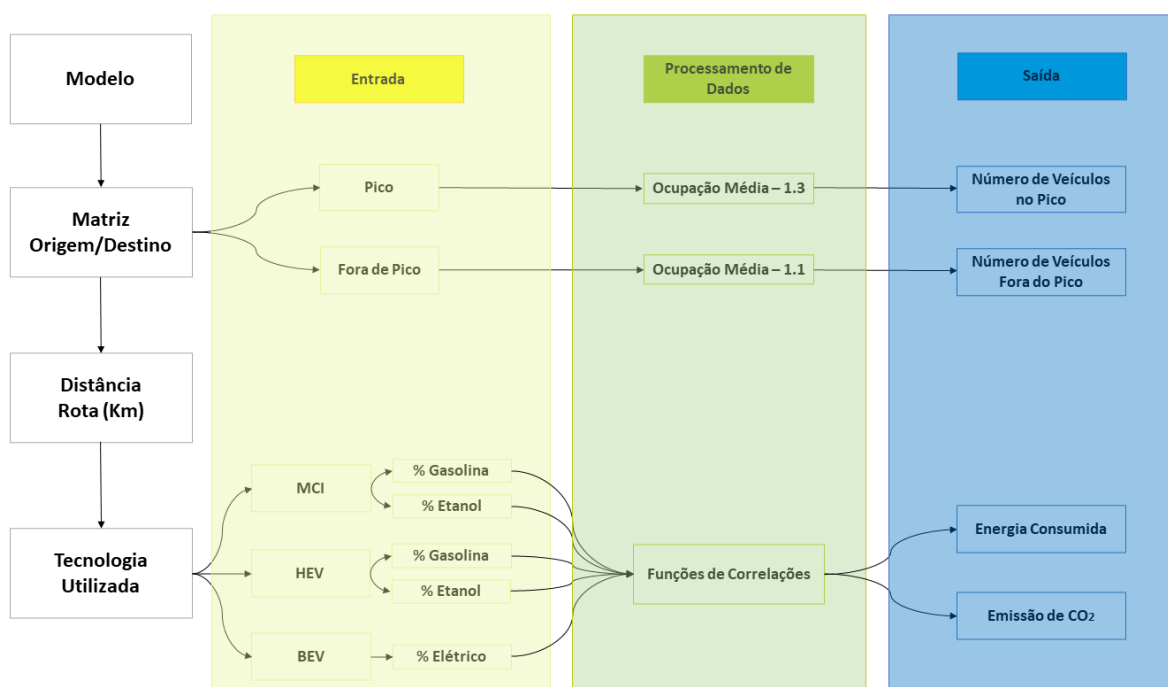


Figura 4.18 Estrutura geral do modelo

Com base na metodologia apresentada ao longo do presente trabalho, utilizando as curvas de correlações dos consumos e emissões de CO₂, em função das velocidades instantâneas, juntamente com o uso dos histogramas das velocidades, o modelo desenvolvido tem as seguintes variáveis de entrada: número de viagens (Matriz Origem/destino), distância da Rota (Km), ocupação média dos veículos, percentual de veículos a Etanol na frota, percentual de veículos híbridos na frota e percentual de veículos elétricos. Uma representação do input do modelo é apresentada na Tabela 4.7, onde as células em vermelho representam as entradas fornecidas pelo usuário.

Tabela 4.7 Variáveis de entrada do Modelo

INPUT										
Rota	Descrição da origem e destino da rota	MATRIZ O-D	Distância da rota	Ocupação do Veículo (Pass/veíc) Para Pico	Ocupação do Veículo (Pass/veíc) Para fora	% de Veículos à Etanol		% de Veículos híbridos		% de Veículos Elétricos
				1,3	1,1	19,00%	0,73%	0,27%	0,00%	
		Viagens no pico	km	Ocupação	Ocupação	Etanol	Gasolina	Etanol	Elétrico	
Rota 1	EIXO SUL (UnB Gama – Rod. do Plano Piloto)	10823	27,4	1,30	1,10	19,00%	0,73%	0,27%	0,00%	
Rota 2	EIXO LESTE (Adm. Jardim Botânico – Rod. do Plano Piloto)	8591	25,4	1,30	1,10	19,00%	0,73%	0,27%	0,00%	
Rota 3	EIXO NORTE (Adm. Sobradinho – Rod. do Plano Piloto)	9784	15,2	1,30	1,10	19,00%	0,73%	0,27%	0,00%	
Rota 4	EIXO OESTE (Adm. Ceilândia – Rod. do Plano Piloto)	17668	23,7	1,30	1,10	19,00%	0,73%	0,27%	0,00%	
Rota 5	EIXO OESTE (Adm. Taguatinga – Rod. do Plano Piloto)	8461	20,1	1,30	1,10	19,00%	0,73%	0,27%	0,00%	

Assim, para determinar o consumo energético e as emissões totais no modelo proposto, inicialmente, entra-se com as variáveis em vermelho, apresentadas na Tabela 4.7. Na sequência, o número de viagens (Matriz Origem/Destino) são divididos pela ocupação média nos veículos, para determinar o número de carros nas rotas. Para as rotas analisadas neste trabalho, a ocupação média para os horários de pico e fora de pico foram classificadas em 1,3 e 1,1. O percentual do uso de etanol na frota foi determinado pela série histórica das vendas de etanol em Brasília, disponível no site da Agência Nacional de Petróleo – ANP (ANP, 2020). Já a quantidade de HEV e BEV circulando na frota foi obtida no banco de dados do SENATRAN e DETRAN. É importante ressaltar que esses *inputs* podem ser alterados para representar variações em diferentes cenários.

Foi adotada a abordagem “do tanque às rodas” para determinar o consumo de energia e as emissões de CO₂. No modelo, essa abordagem foi ajustada para incluir o fator de emissão por litro consumido, bem como para contabilizar as emissões totais de CO₂ ao longo de parte do ciclo de vida, usando a perspectiva “do poço ao tanque”.

Na avaliação “*Well-to-Tank*” (WTT) do etanol, especialmente quando derivado de fontes como a cana-de-açúcar, os valores das emissões de gases de efeito estufa (GEE) variam significativamente em função das práticas agrícolas e processos de produção utilizados. Para o etanol de cana-de-açúcar, que é amplamente produzido e utilizado no Brasil, os valores de emissões WTT são geralmente mais baixos em comparação com os combustíveis fósseis, como a gasolina, devido à maior eficiência energética e menor intensidade de carbono do processo de produção. Os valores adotados na etapa de produção do etanol são os estabelecidos nos trabalhos de (DÍAZ *et al.*, 2010; MERA *et al.*, 2023).

Para modelar as emissões de CO₂ na geração de eletricidade no Brasil, é essencial considerar a composição e as mudanças na matriz energética, particularmente o aumento previsto na participação de fontes renováveis. Essas emissões são um fator crítico na avaliação do impacto ambiental do setor elétrico brasileiro e foram representadas no modelo para garantir a validade e relevância da análise. Nesse sentido foi adotado no modelo a média anual dos Fatores de emissão de CO₂ para energia elétrica da margem de operação pelo método simples ajustado (tCO₂/MWh) (Ministério da Ciência Tecnologia e Inovação, 2023).

4.7. APLICAÇÃO DO MODELO NAS ROTAS DE BRASÍLIA

Após a consolidação do modelo para as características de Brasília, quatro cenários para diferentes tecnologias veiculares foram pré-definidos para analisar o comportamento das emissões de CO₂. Para esse fim, foi utilizado o cenário projetado para o ano de 2036 na matriz Origem/Destino do Plano de Desenvolvimento do Transporte Ferroviário Público (PDTT) (Metrô/DF, 2018), na Figura 4.19.

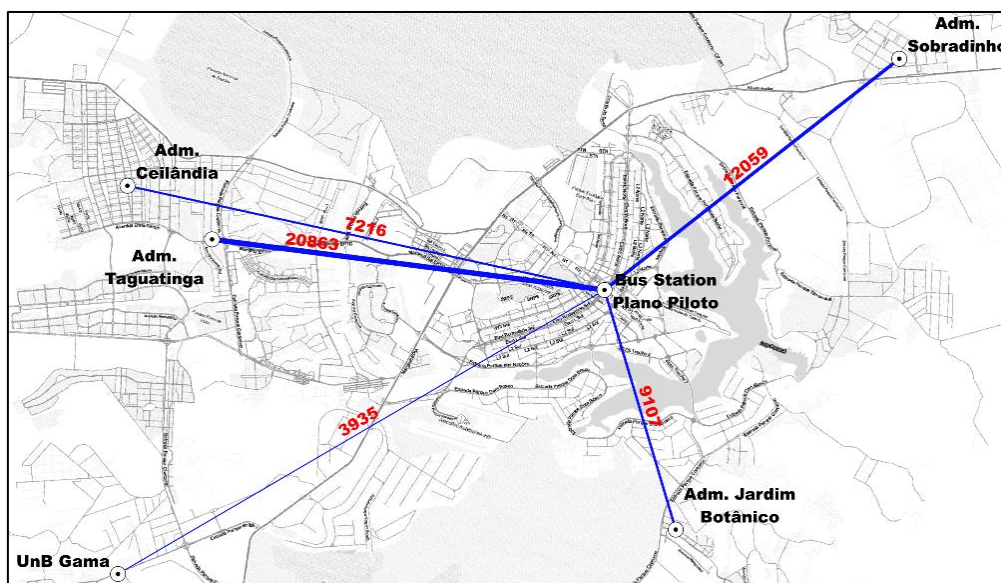


Figura 4.19 PDTT - Linhas de Desejo – 2036

Esses cenários foram desenvolvidos considerando a situação atual da frota de veículos local. Na Tabela 4.8, quatro cenários são apresentados, cada um representando um aumento na influência de uma determinada tecnologia de veículo na frota.

Tabela 4.8 Características do cenário atual

Cenários	MCI		HEV		BEV
	Gasolina	Etanol	Gasolina	Etanol	Elétrico
Cenário Atual	79%	20%	1%	0%	0%
Cenário 1		10% - 80%			
Cenário 2			10% - 80%		
Cenário 3				10% - 80%	
Cenário 4					10% - 80%

Os dados na Tabela 4.8 representam o cenário atual e os cenários em que a participação de Veículos MCI, HEV e BEV são variados. O cenário atual é usado como referência para analisar o comportamento de cenários futuros decorrentes da modificação tecnológica da frota de veículos. De acordo com a Tabela 4.8, para o cenário atual, a maior parte da frota é composta

por MCI a gasolina (79%), com alguns MCI a etanol (20%) e uma porcentagem muito pequena de HEVs a gasolina (1%). Atualmente, os HEVs a etanol e BEVs para Brasília correspondem a uma parcela muito pequena, que, para o cenário atual, foi considerada como zero. Em cada um dos outros cenários (1 a 4), uma tecnologia é progressivamente aumentada a partir da porcentagem atual até 80%, reduzindo o uso da gasolina para manter um total de 100%.

Cada um desses cenários possibilita analisar o impacto de uma maior influência de cada tecnologia nas emissões de CO₂ da frota de veículos. Comparando esses com o cenário atual, é possível avaliar como as mudanças na composição da frota podem afetar as emissões de CO₂ na região. Com os cenários estabelecidos, pode-se observar o comportamento das emissões de CO₂ a partir do cenário atual da região com o aumento da influência de uma determinada tecnologia na frota de veículos, como pode ser observado nas Figuras 4.20 a 4.23.

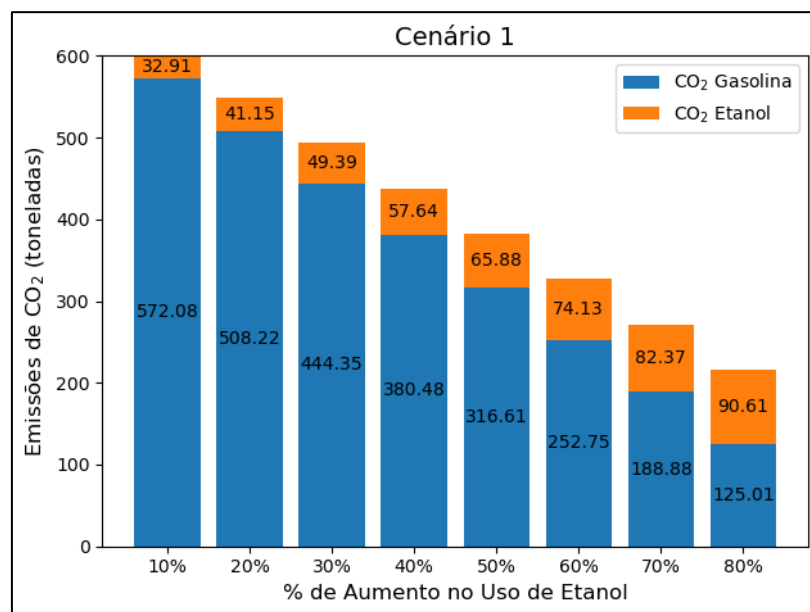


Figura 4.20 Aumento da participação de etanol na frota

No cenário 1, observa-se uma redução progressiva nas emissões de CO₂ referente ao uso da gasolina com o aumento do uso de etanol, partindo de 572,08 toneladas para 125,62 toneladas (uma redução de aproximadamente 78%), ao passar de 10% para 80% de uso de etanol. Nota-se que as emissões totais de CO₂ apresentam uma redução significativa, de 604,99 para 215,62, o que evidencia o potencial do etanol em reduzir as emissões de CO₂. A contribuição do etanol permanece relativamente constante, variando de 32,91 a 90,61 toneladas, o que demonstra sua eficácia como alternativa mais limpa.

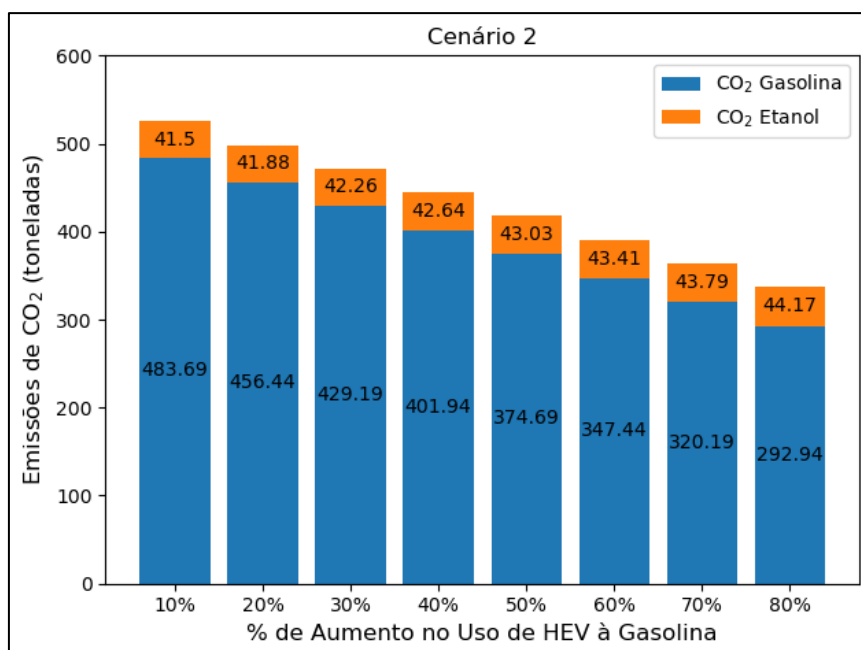


Figura 4.21 Aumento da participação dos HEV a Gasolina na frota

Já o cenário 2 simula uma situação na qual ocorre uma diminuição no uso da gasolina de 483,69 para 292,94 toneladas, fazendo com que as emissões totais de 527,14 toneladas caiam para 325,85 toneladas. Uma redução significativa, mas menos acentuada que no Cenário 1. Isso sugere que, embora os HEV à gasolina sejam uma melhoria em relação aos veículos puramente a gasolina, eles não oferecem o mesmo potencial de redução de emissões que o etanol. O CO₂ do etanol aumenta ligeiramente de 41,50 para 44,17 toneladas, refletindo um aumento moderado na contribuição do etanol à medida em que a participação dos híbridos a gasolina aumenta.

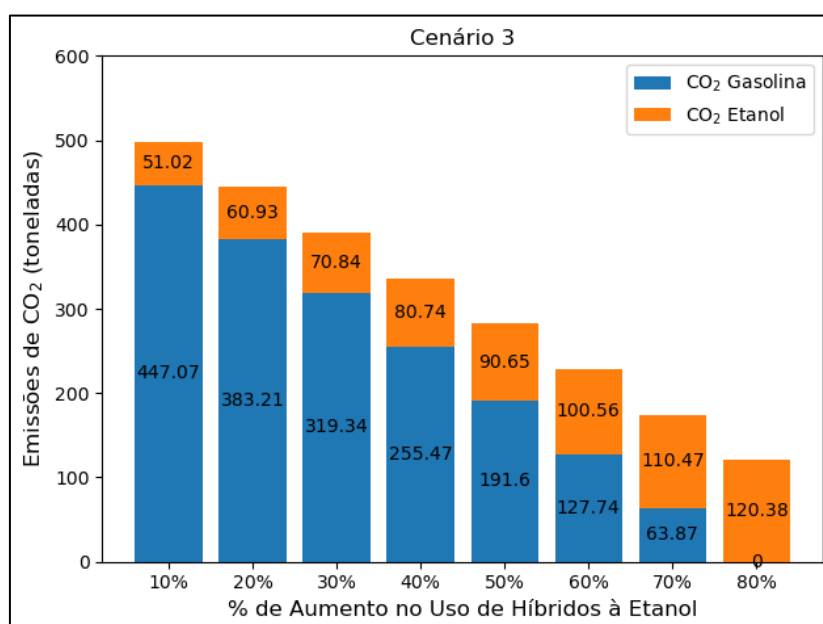


Figura 4.22 Aumento da participação HEV à etanol

O cenário 3 é o que apresenta uma redução mais acentuada nas emissões de CO₂ totais, de 498,09 toneladas para 120,38 toneladas. O CO₂ do etanol, por outro lado, aumenta de 33,78 para 120,38 toneladas. Este cenário destaca o potencial dos híbridos a etanol em eliminar completamente as emissões de CO₂ decorrente da gasolina, ao mesmo tempo em que mantém as emissões do etanol em um nível gerenciável.

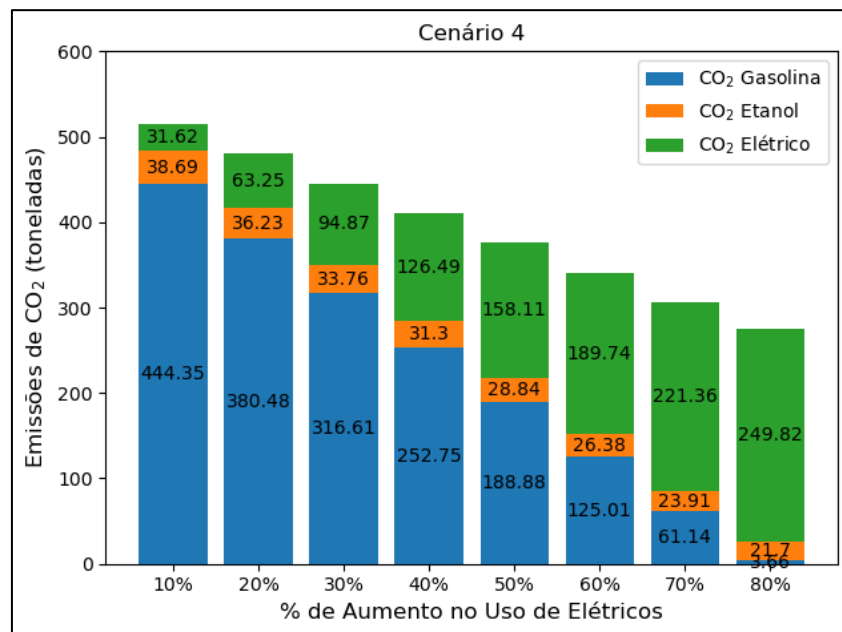


Figura 4.23 Aumento da participação de BEV na frota

Por fim, o cenário 4 introduz a mobilidade elétrica à frota, o que faz com que as emissões totais do início, com valor de 514,66 toneladas caiam para 275,18 toneladas. As emissões de CO₂ da gasolina diminuem de 444,35 para 3,66 toneladas, enquanto as emissões de CO₂ do etanol variam de 38,69 para 21,70 tonelada. Já as emissões de CO₂ associadas aos elétricos aumentam de 31,62 para 249,82 toneladas, refletindo o aumento na participação dos veículos elétricos. Esse cenário ilustra o potencial dos veículos elétricos em reduzir as emissões de CO₂ dos combustíveis fósseis, embora também destaque a necessidade de considerar as emissões associadas à geração de eletricidade para esses veículos.

Observa-se a partir da caracterização dos cenários que, à medida em que veículos vão empregando tecnologias mais limpas, como etanol, híbrido e elétrico, há uma redução progressiva nas emissões de CO₂. Veículos elétricos se destacam por emitir um CO₂ muito baixo ao considerar o ciclo de vida, enquanto veículos movidos a etanol e híbridos de etanol também mostram reduções significativas nas emissões de CO₂ em comparação com veículos a gasolina (MCI).

Em resumo, esses cenários demonstram que a transição para tecnologias mais limpas, como etanol e veículos elétricos, pode resultar em reduções significativas nas emissões de CO₂. A análise destaca a importância de estratégias integradas que combinem diversas tecnologias para maximizar a eficiência e minimizar o impacto ambiental no setor de transportes.

A transição para combustíveis alternativos demonstra um potencial significativo para mitigar as emissões de CO₂, conforme evidenciado pelos cenários analisados. No primeiro cenário, observa-se que a substituição de 80% dos veículos de combustão interna por veículos a etanol resulta em uma diminuição de aproximadamente 78% nas emissões de CO₂ em comparação com a situação atual, caindo de 572,08 toneladas para 125,01 toneladas.

No segundo cenário, um aumento na proporção de veículos híbridos a gasolina para 80% do total resulta em uma redução de cerca de 40% nas emissões de CO₂ originadas da gasolina, diminuindo de 483,69 para 292,94 toneladas. Além disso, no segundo cenário, as emissões de CO₂ relacionadas ao etanol aumentaram ligeiramente, de 41,50 para 44,17 toneladas, mas em menor extensão do que no cenário um. No cenário três, as emissões de CO₂ da gasolina diminuíram drasticamente em cerca de 100%, e as emissões de CO₂ do etanol aumentaram de 51,02 toneladas para 120,38 toneladas.

Por fim, no cenário quatro, quando se atinge 80% de veículos elétricos, as emissões de CO₂ da gasolina diminuem acentuadamente, uma redução de quase 99% em comparação com as emissões iniciais de gasolina, de 444,35 para 3,66 toneladas. As emissões de CO₂ de veículos elétricos aumentam de 31,62 para 249,82 toneladas, mas permanecem relativamente baixas em comparação às emissões relacionadas à gasolina. Esse cenário ilustra o potencial dos veículos elétricos em reduzir as emissões de CO₂ dos combustíveis fósseis, embora também destaque a necessidade de considerar as emissões associadas à geração de eletricidade para esses veículos.

A ideia de trabalhar com os cenários é que são geradas informações importantes para orientar políticas e decisões em direção a uma frota veicular mais sustentável. Apesar do modelo indicar os melhores cenários para uma redução nas emissões de CO₂, uma transição para um cenário menos poluente deve considerar investimento em infraestrutura, tecnologia e políticas governamentais.

De forma geral, fica evidente que as opções mais efetivas para a descarbonização envolvem tanto a substituição de combustíveis fósseis por alternativas renováveis como etanol, quanto a eletrificação da frota no longo prazo. Por fim, o uso de ferramentas, como a que foi desenvolvida e apresentada ao longo deste trabalho, são capazes de auxiliar no monitoramento e na projeção de cenários futuros de forma eficiente.

5. CONCLUSÃO

5.1 CONCLUSÕES GERAIS

O estudo forneceu uma visão abrangente do consumo de energia e das emissões de CO₂ para diferentes tecnologias veiculares em ciclos de condução reais. Foram propostas funções de correlação universais para diferentes tecnologias veiculares, associando o consumo de combustível e a velocidade. Essas funções mostraram-se bastante representativas e foram verificadas em trabalhos similares. Um modelo elaborado foi calibrado para a cidade de Brasília e utilizado para simular cenários futuros com um aumento na presença de tecnologias de veículos mais limpas, como carros movidos a etanol, híbridos e elétricos.

Os resultados obtidos demonstram que, ao aumentar a participação de veículos mais eficientes e menos poluentes na frota, há uma redução significativa nas emissões de CO₂. Veículos elétricos se destacam por suas baixas emissões de CO₂ ao longo do ciclo de vida. Além disso, o modelo desenvolvido neste estudo é extremamente relevante, pois pode servir como uma ferramenta de apoio valiosa para determinar o consumo de energia e as emissões de CO₂, considerando diferentes situações de fluidez, ou seja, de forma mais realista.

Além disso, um entendimento aprofundado do perfil de emissões de CO₂ e do consumo de combustível da frota de veículos permite que gestores e especialistas em planejamento de transporte proponham e implementem políticas mais eficazes para reduzir as emissões de CO₂, contribuindo, assim, para uma mobilidade mais sustentável.

Outro ponto considerado no modelo foi uma abordagem para ciclos reais, onde observou-se que o ciclo usado para homologação (FTP75) se assemelha bastante aos ciclos reais obtidos em horários de pico e diferem bastante quanto a ciclos reais fora de pico. Nesse sentido, os principais instrumentos de avaliação de emissões utilizam dados apenas do horário de pico, ou fatores de consumo e emissão, obtidos em laboratórios, o que pode acarretar erros significativos quanto ao monitoramento de consumo e emissões decorrente da frota veicular.

Com respeito a abordagem VSP, usada para a determinação das emissões de CO₂, tanto para o horário de pico como fora de pico as emissões foram subestimadas, acarretando erros superiores a 32% em comparação das medidas obtidas nas rotas.

Por fim, este estudo fornece informações valiosas que podem orientar políticas e decisões em direção a uma frota de veículos mais sustentável e menos poluente. No entanto, é importante ressaltar que cada contexto exige uma análise detalhada das condições locais, incluindo a disponibilidade de recursos, infraestrutura existente e políticas governamentais específicas. Esses fatores devem ser considerados ao determinar a melhor estratégia para reduzir as emissões de CO₂ no setor de transporte.

Este estudo abre uma série de possibilidades para trabalhos futuros em mobilidade sustentável e planejamento urbano. Um caminho promissor para pesquisas futuras reside na evolução constante da tecnologia veicular. Uma análise dos impactos dessas inovações na eficiência energética e nas emissões de CO₂ seria um avanço valioso para a literatura. Assim, é importante acompanhar de perto os avanços tecnológicos no campo dos veículos motorizados, pois o desenvolvimento de tecnologias mais limpas e eficientes é um dos principais mecanismos para reduzir as emissões de gases de efeito estufa.

5.2 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Ressalta-se que uma abordagem voltada a outros gases foi proposta inicialmente, utilizando apenas simulações no *Matlab* Simulink, todavia, as funções obtidas tiveram um grau de representação muito baixo (R^2), e como não foi feito nem um ensaio em campo, optou-se por retirar essa abordagem do modelo desenvolvido, deixando apenas uma análise das emissões médias dos gases (NO_x, HC e CO).

Outro aspecto que foi limitado fora as emissões a frio, onde o estudo considerou apenas operações onde o motor já estava aquecido no início dos ciclos de condução para as diferentes rotas. Esta é uma limitação, pois as emissões a frio podem diferir consideravelmente daquelas de um motor aquecido e têm implicações em cenários reais. Assim, é enfatizada a necessidade de investigações futuras abordando as emissões a frio para uma análise mais abrangente das emissões veiculares.

5.3 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, recomenda-se ajustes nas funções de consumo energético e nas emissões de CO₂. Dada a complexidade e a variabilidade dos fatores que influenciam essas variáveis em diferentes contextos, seria pertinente explorar técnicas de otimização que possam refinar ainda mais as funções propostas. Além disso, a integração de dados em tempo real, como padrões de tráfego e condições meteorológicas, podem melhorar ainda mais a qualidade dos dados.

Um outro aspecto essencial na abordagem futura é realizar ajustes das curvas de consumo e emissões de CO₂ para contemplar as melhorias na tecnologia dos veículos ao longo dos anos. A evolução tecnológica e as mudanças nas normas de fabricação têm impacto direto nas características e desempenho dos veículos ao longo dos anos.

Vale ressaltar que para uma abordagem completa, seria interessante em trabalhos futuros explorar a participação do diesel e biodiesel nas emissões veiculares, o uso de hidrogênio como combustível veicular e seu impacto nas emissões de CO₂. Ainda, uma abordagem considerando outros gases como o (NO_x, HC e CO) e ainda as emissões de gases orgânicos não metano (NMOG) provenientes do escapamento de veículos rodoviários leves de passageiros e leves comerciais, traria grande contribuições para uma abordagem macro.

Por fim, sugere-se um estudo aprofundado sobre as emissões a frio dos veículos. As emissões produzidas durante a fase inicial de partida do motor, quando ainda está frio, são frequentemente superiores às emissões em condições normais de operação, devido à ineficiência temporária dos sistemas de controle de emissões.

A análise detalhada das emissões a frio, considerando diferentes tipos de veículos, combustíveis e condições climáticas, pode proporcionar uma compreensão mais abrangente sobre seu impacto no balanço total de emissões. Este foco permitirá não apenas uma quantificação mais precisa das emissões veiculares, mas também a proposição de estratégias e tecnologias para mitigar esse fenômeno específico, contribuindo para uma mobilidade mais sustentável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGENCY, I. E. (2021) Global EV outlook 2021. OECD Publishing.
- AGGARWAL, P., & JAIN, S. (2016) Energy demand and CO₂ emissions from urban on-road transport in Delhi: current and future projections under various policy measures. *Journal of Cleaner Production*, 128, 48–61.
- AHN, K., & RAKHA, H. (2008) The effects of route choice decisions on vehicle energy consumption and emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 13(3), 151–167.
- AKCELIK, R., BAYLEY, C., BOWYER, D., & BIGGS, D. (1983) A hierarchy of vehicle fuel consumption models. *Traffic Engineering & Control*, 24(10), 491–495.
- 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*, 283–300.
- ALI, M., KAMAL, M. D., TAHIR, A., & ATIF, S. (2021) Fuel Consumption Monitoring through COPERT Model—A Case Study for Urban Sustainability. *Sustainability*.
- ALVAREZ, R., & WEILENMANN, M. (2012) Effect of low ambient temperature on fuel consumption and pollutant and CO₂ emissions of hybrid electric vehicles in real-world conditions. *Fuel*, 97, 119–124.
- AMORIM, I. C. de O. M. (2019) Avaliação do potencial de planos de mobilidade urbana para o desenvolvimento sustentável de cidades e regiões metropolitanas. Universidade Federal de Pernambuco. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE.
- ANDRADE, G. M. S. de (2020) Desenvolvimento de método simplificado de construção e análise de ciclos de condução locais para carros e motos: um estudo de caso no horário fora de pico na cidade do Recife. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE.
- ANTP (1999) Redução das deseconomias urbanas com a melhoria do transporte público. In *Revista dos Transportes Públicos - ANTP* (Vol. 21, Issue 1, pp. 35–92). IPEAANTP São Paulo, SP.
- ANP (2022) Resolução ANP nº 894, de 18 de novembro de 2022 - DOU de 23-11-2022. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-894-2022-estabelece-os-coeficientes-de-correcao-da-densidade-massa-especifica-e-do-volume-dos-derivados-de-petroleo?origin=instituicao&q=894>. Acessado em: 07/10/2022
- ARAÚJO, F. W. C. de (2021) Construção de ciclos de condução veiculares adaptados às várias condições de tráfego de uma via a partir de monitoramento por vídeo. Universidade

Federal de Pernambuco. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE.

- ARAÚJO, I. B. (2016) Quantificação, espacialização e especificação das emissões atmosféricas de origem veicular na Região Metropolitana da Grande Vitória. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo Universidade do Espírito Santo.
- ARIOLI, M. S. (2020) Sistematização de um inventário de emissões de Gases de Efeito Estufa para mobilidade urbana. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- ARIOLI, M. S., D'AGOSTO, de A. M., AMARAL, F. G., & CYBIS, H. B. B. (2020) The evolution of city-scale GHG emissions inventory methods: A systematic review. *Environmental Impact Assessment Review*, 80.
- ARUN, N. H., MAHESH, S., RAMADURAI, G., & SHIVA, N. S. M. (2017) Development of driving cycles for passenger cars and motorcycles in Chennai, India. *Sustainable Cities and Society*, 32, 508–512.
- AZEVEDO FILHO, M. A. N. de. (2012) Análise do processo de planejamento dos transportes como contribuição para a mobilidade urbana sustentável. Escola de Engenharia de São Carlos, Doutorado. Universidade de São Paulo.
- BALCI, Ö., KARAGÖZ, Y., KALE, S., DAMAR, S., ATTAR, A., KÖTEN, H., DALKILIÇ, A. S., & WONGWISES, S. (2021) Fuel consumption and emission comparison of conventional and hydrogen feed vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(30), 16250–16266.
- BARLOW, T. J., LATHAM, S., MCCRAE, I. S., & BOULTER, P. G. (2009) A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions. TRL Published Project Report.
- BAYRAK, E., EGILMEZ, M., KUANG, H., LI, X., PARK, J. M., PAPALAMBROS, P., & ANDERSON, E. (2015) MARVEL—A modular vehicle fleet simulation tool. Proc. of the 2015 Ground Vehicle Systems Engineering and Technology Symp. (GVSETS).
- BERKOWICZ, R., WINTHER, M., & KETZEL, M. (2006) Traffic pollution modelling and emission data. *Environmental Modelling and Software*, 21(4), 454–460.
- BNEF (2018). Electric Buses in Cities - Driving Towards Cleaner Air and Lower CO₂. Bloomberg New Energy Finance (BNEF). Bloomberg New Energy Finance.
- BORGE, R., LUMBRERAS, J., PÉREZ, J., de LA PAZ, D., VEDRENNE, M., de ANDRÉS, J. M., & RODRÍGUEZ, M. E. (2014) Emission inventories and modeling requirements for the development of air quality plans. Application to Madrid (Spain). *Science of the Total Environment*, 466–467.

- BOROUJENI, B. Y., & FREY, H. C. (2014) Road grade quantification based on global positioning system data obtained from real-world vehicle fuel use and emissions measurements. *Atmospheric Environment*, Volume 85, 35(6), 179-186.
- BORLAUG, B., HOLDEN, J., WOOD, E., LEE, B., FINK, J., AGNEW, S., & LUSTBADER, J. (2020) Estimating region-specific fuel economy in the United States from real-world driving cycles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 86, 102448.
- BRIGHT, B., & REVANKAR, P. P. (2016) Modeling of Vehicular Based Electric Power Generation System Using *Matlab/Simulink*. *International Journal of Application or Innovation in Engineering and Management (IJAIEEM)*, 5(7).
- BRUNI, A. de C. (2018) Critérios para identificação de veículos leves do ciclo Otto com elevadas emissões, utilizando dispositivo de sensoriamento remoto. Tese, Universidade de São Paulo.
- BUTLER, K. L., STEVENS, K. M., & EHSANI, M. (1997) A versatile computer simulation tool for design and analysis of electric and hybrid drive trains. *SAE Technical Papers*.
- CCM (2022) Leading Media Group. Disponível em: <https://br.ccm.net/download/baixaki-19066-torque-pro>. Acessado em: 20/05/2021
- CETESB (2015) Relatório de qualidade do ar do estado de São Paulo 2014. Cetesb, 134.
- CETESB (2019) Relatório de qualidade do ar do estado de São Paulo 2018. Disponível em: <http://ar.cetesb.sp.gov.br/publicacoes-relatorios/>. Acessado em: 14/02/2022.
- CHEN, D. (2010) The effects of drive cycle accessory load and degree of hybridization on fuel economy and emissions for hybrid electric buses. In *ProQuest Dissertations and Theses*. The University of Alabama.
- CODEPLAN (2018) Pesquisa Distrital Por Amostra de Domicílios. GDF. Disponível em: <https://www.codeplan.df.gov.br/pdad-2018/>. Acessado em: 25/04/2022.
- COSTA, J. E. G. (2019) Mass introduction of electric passenger vehicles in Brazil: impact assessment on energy use, climate mitigation and on charging infrastructure needs for several case studies. Universidade NOVA de Lisboa (Portugal).
- DA COSTA, J. O. P. (2017) Normalização para a inovação: o Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBE-V). *Políticas de Inovação Pelo Lado Da Demanda No Brasil*, 486.
- DA SILVA, C. P., & BRASIL, A. C. D. M. (2020) Avaliação do Potencial de Economia de Energia e Redução de Emissões de CO₂ em um Sistema De Transporte Público. *Revista Estudos e Pesquisas Em Administração*, 4(1), 124.
- D'ANGIOLA, A., DAWIDOWSKI, L. E., GÓMEZ, D. R., & OSSES, M. (2010) On-road traffic emissions in a megacity. *Atmospheric Environment*, 44(4), 483–493.

- DEMBSKI, N., GUEZENNEC, Y., & SOLIMAN, A. (2002). Analysis and experimental refinement of real-world driving cycles. SAE Technical Papers, 111, 322–333.
- DÍAZ, M. A., CARVALHO, V. C. DA H. A., & GOMES, M. S. DE P. (2010) Análise do ciclo de vida e balanço energético do etanol da cana-de-açúcar brasileira. Disponível em: <https://www.abcm.org.br/anais/conem/2010/PDF/CON10-0491.pdf>. Acessado em: 30/02/2023.
- DIESEL NET (2021) Emission Test Cycles. Disponível em: <https://dieselnet.com/standards/cycles/index.php>. Acessado em: 05/04/2022.
- DONATEO, T., & GIOVINAZZI, M. (2017) Building a cycle for Real Driving Emissions. Energy Procedia, 126, 891–898.
- DUAN, X., FU, J., ZHANG, Z., LIU, J., ZHAO, D., & ZHU, G. (2017) Experimental study on the energy flow of a gasoline-powered vehicle under the NEDC of cold starting. Applied Thermal Engineering, 115, 1173–1186.
- DUARTE, G. O., GONÇALVES, G. A., BAPTISTA, P. C., & FARIAS, T. L. (2015) Establishing bonds between vehicle certification data and real-world vehicle fuel consumption – A Vehicle Specific Power approach. Energy Conversion and Management, 92, 251–265.
- EL-SHAWARBY, I., AHN, K., & RAKHA, H. (2005) Comparative field evaluation of vehicle cruise speed and acceleration level impacts on hot stabilized emissions. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 10(1), 13–30.
- EPA (2014) User Guide for MOVES2014a.
- EPA (2015) MOVES and Mobile Source Emissions Research. Disponível em: <https://www.epa.gov/moves>, acessado em fevereiro de 2020.
- EPE (2021) Relatório Síntese Balanço Energético Nacional Relatório Síntese. Rio de Janeiro. Disponível Em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>. Acessado em: 18/12/2021.
- FAMELI, K. M., & ASSIMAKOPOULOS, V. D. (2015) Development of a road transport emission inventory for Greece and the Greater Athens Area: Effects of important parameters. Science of the Total Environment, 505, 770–786.
- FIORI, C., AHN, K., & RAKHA, H. A. (2016) Power-based electric vehicle energy consumption model: Model development and validation. Applied Energy, 168, 257–268.
- FONSECA, F. M. R. DA (2018) Avaliação do impacto da introdução de cargas auxiliares na autonomia de veículos elétricos.
- FONTARAS, G., KOURIDIS, H., SAMARAS, Z., ELST, D., & GENSE, R. (2007) Use of a vehicle-modelling tool for predicting CO₂ emissions in the framework of European regulations for light goods vehicles. Atmospheric Environment, 41(14), 3009–3021.

- FONTARAS, G., PANAYOTIS, P., & ZISSIS, S. (2008) Experimental evaluation of hybrid vehicle fuel economy and pollutant emissions over real-world simulation driving cycles. *Atmospheric Environment*, 42(18), 4023 – 4035.
- FRUTUOSO, F. S., ALVES, C. M. A. C., ARAÚJO, S. L., SERRA, D. S., BARROS, A. L. B. P., CAVALCANTE, F. S. Á., ARAÚJO, R. S., POLICARPO, N. A., & OLIVEIRA, M. L. M. (2023) Assessing light flex-fuel vehicle emissions with ethanol/gasoline blends along an urban corridor: A case of Fortaleza/Brazil. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 12(2), 447–459.
- GENIKOMSAKIS, K. N., & MITRENTSIS, G. (2017) A computationally efficient simulation model for estimating energy consumption of electric vehicles in the context of route planning applications. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 50, 98–118.
- GIECHASKIEL, B., VLACHOS, T., RICCOBONO, F., FORNI, F., COLOMBO, R., MONTIGNY, F., LE-LIJOUR, P., CARRIERO, M., BONNEL, P., & WEISS, M. (2016) Implementation of portable emissions measurement systems (PEMS) for the real-driving emissions (RDE) regulation in Europe. *Journal of Visualized Experiments*, (118).
- GOYNS, P. H. (2008) Modelling Real-World Driving, Fuel Consumption and Emissions of Passenger Vehicles: A Case Study in Johannesburg. *PQDT - Global*, January, 224.
- GU, W., ZHAO, X., YAN, X., WANG, C., & LI, Q. (2019) Energy technological progress, energy consumption, and CO₂ emissions: Empirical evidence from China. *Journal of Cleaner Production*, 236, 117666.
- HUNG, W. T., TONG, H. Y., LEE, C. P., HA, K., & PAO, L. Y. (2007) Development of a practical driving cycle construction methodology: A case study in Hong Kong. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 12(2), 115–128.
- IBARRA-ESPINOSA, S. (2017) Air pollution modeling in São Paulo using bottom-up vehicular emissions inventories. PhD dissertation. Universidade de São Paulo.
- IEA (2019) CO₂ emissions from fuel combustion: Highlights. International Energy Agency. In *Oecd/Iea* (pp. 1–156).
- JACONDINO, G. B. (2005) Quantificação das emissões veiculares através do uso de simuladores de tráfego. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- JIMENEZ-PALACIOS, J. L. (1998) Understanding and quantifying motor vehicle emissions with vehicle specific power and TILDAS remote sensing. Massachusetts Institute of Technology.
- JOERI, V. M., GASTON, M., & PETER, B. (2004) Simulation methodologies for innovative vehicle drive systems. 11th International Conference EPE-PEMC'2004, Power Electronics and Motion Control Conference.

- JUNIOR, J. A. C., & SANTOS, L. B. (2020) Estado e Indústria Automobilística no Brasil: Análise das Políticas Inovar-Auto e Rota 2030. *Revista Entre-Lugar*, 11(21), 101–127.
- KALGHATGI, G. (2018) Is it really the end of internal combustion engines and petroleum in transport? *Applied Energy*, 225, 965–974.
- KOUPAL, J., LANDMAN, L., NAM, E., WARILA, J., SCARBRO, C., GLOVER, E., & GIANNELLI, R. (2005) “MOVES 2004 energy and emission inputs.” US Environmental Protection Agency Document EPA-420-P-05-003, Washington, DC.
- KOURIDIS, C. (2009) Uncertainty estimates and guidance for road transport emission calculations. Publications Office of the European Union, EUR, 24296, 187.
- LAI, J., YU, L., SONG, G., GUO, P., & CHEN, X. (2013) Development of city-specific driving cycles for transit buses based on VSP distributions: Case of Beijing. *Journal of Transportation Engineering*, 139(7), 749–757.
- LANG, J., CHENG, S., ZHOU, Y., ZHANG, Y., & WANG, G. (2014) Air pollutant emissions from on-road vehicles in China, 1999-2011. *Science of the Total Environment*, 496, 1–10.
- LI, L., WANG, X., & SONG, J. (2017) Fuel consumption optimization for smart hybrid electric vehicle during a car-following process. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 87, 17–29.
- LI, Y., ZHENG, J., DONG, S., WEN, X., JIN, X., ZHANG, L., & PENG, X. (2019) Temporal variations of local traffic CO₂ emissions and its relationship with CO₂ flux in Beijing, China. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 67(November 2018), 1–15.
- LIETZKE, B., VOGT, R., FEIGENWINTER, C., & PARLOW, E. (2015) On the controlling factors for the variability of carbon dioxide flux in a heterogeneous urban environment. *International Journal of Climatology*, 35(13), 3921–3941.
- LIMA, M., & GONÇALEZ, C. (2017) Evaluation of the electrical energy potential of woody biomass of an isolated community in the Northern of Brazil. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 11(2), 83–90–83–90.
- MACHADO, G. V., DA COSTA, A. O., RIBEIRO, M. D. B., HENRIQUES, R. M., & ARAUJO, R. B. (2018) Demanda de Energia dos Veículos Leves do Ciclo Otto: 2018 - 2030.
- MAES, A. DE S. (2020) Avaliação de fatores que influenciam as emissões veiculares em centros urbanos. Programa de Pós-Graduação Em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina.
- MAES, A. DE S., HOINASKI, L., MEIRELLES, T. B., & CARLSON, R. C. (2019) A methodology for high resolution vehicular emissions inventories in metropolitan areas: Evaluating the effect of automotive technologies improvement. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 77, 303–319.

- MAIA, A., FEITOSA, Z. O., MAHA, Y. B., & GONZALES-TACO, P. W. (2014). Análise do processo participativo da audiência pública do plano de outorgas do distrito federal.
- MANJUNATH, A., & GROSS, G. (2017) Towards a meaningful metric for the quantification of GHG emissions of electric vehicles (EVs). *Energy Policy*, 102, 423–429.
- MARKEL, T., BROOKER, A., HENDRICKS, T., JOHNSON, V., KELLY, K., KRAMER, B., O'KEEFE, M., SPRIK, S., & WIPKE, K. (2002) ADVISOR: A systems analysis tool for advanced vehicle modeling. *Journal of Power Sources*, 110(2), 255–266.
- MARTINS, M. DE F., VASCONCELOS, A. C. F., & SALLES, M. C. T. (2017) Plano de mobilidade urbana do município de Campina Grande-PB: uma análise à luz da sustentabilidade urbana. *Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, 6(2), 42–58.
- MELO, W. C. DE, SILVA, E. F. F., & BRASIL, A. C. DE M. (2023) Model to Estimate the Impact of Future CO₂ Emissions Due to the increase in the Electric Vehicle Fleet – The Case of the Brazilian Capital.
- MERA, Z., BIEKER, G., & CIEPLINSKI, A. N. A. B. R. E. A. (2023) Comparação das emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida de carros de passeio a combustão e elétricos no Brasil.
- MERA, Z., VARELLA, R., BAPTISTA, P., DUARTE, G., & ROSERO, F. (2022) Including engine data for energy and pollutants assessment into the vehicle specific power methodology. *Applied Energy*, 311, 118690.
- MILLER, J. (2005) *Hybrid Electric Vehicles*. London: Springer London, 21–36.
- MINISTÉRIO DA CIÊNCIA TECNOLOGIA E INOVAÇÃO – MCTI (2023) Fatores de Emissão de CO₂ pela Geração de Energia Elétrica no Sistema Interligado Nacional do Brasil. <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/dados-e-ferramentas/fatores-de-emissao>. Acessado em: 15/02/2022.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (2011) 1º INEAVAR - Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários – Relatório Final, Brasília.
- MOHAMMADI, F., NAZRI, G. A., & SAIF, M. (2019) Modeling, simulation, and analysis of hybrid electric vehicle using *Matlab/Simulink*. 5th International Conference on Power Generation Systems and Renewable Energy Technologies, PGSRET.
- MOREIRA, C. A. F. (2017) Fusão sensorial para caracterização de ciclos de condução de automóveis.
- MUBARAK, M., ÜSTER, H., ABDELGHANY, K., & KHODAYAR, M. (2021) Strategic network design and analysis for in-motion wireless charging of electric vehicles. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 145, 102179.
- NESAMANI, K. S., SAPHORES, J. D., MCNALLY, M. G., & JAYAKRISHNAN, R. (2017) Estimating impacts of emission specific characteristics on vehicle operation for

- quantifying air pollutant emissions and energy use. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 4(3), 215–229.
- NIKOPOULOS, A., HONG, H., & KREPEC, T. (1997) Energy consumption study for a hybrid electric vehicle. *SAE Technical Papers*.
- NTZIACHRISTOS, L., GKATZOFLIAS, D., KOURIDIS, C., & SAMARAS, Z. (2009) COPERT: A European road transport emission inventory model. In *Environmental Science and Engineering (Subseries: Environmental Science)* (pp. 491–504). Springer Berlin Heidelberg.
- O'DRISCOLL, R., APSIMON, H. M., OXLEY, T., MOLDEN, N., STETTLER, M. E. J., & THIYAGARAJAH, A. (2016) A Portable Emissions Measurement System (PEMS) study of NO_x and primary NO₂ emissions from Euro 6 diesel passenger cars and comparison with COPERT emission factors. *Atmospheric Environment*, 145, 81–91.
- OECKSLER, C. F., VOLAN, T., VAZ, C. R., & MALDONADO, M. U. (2019) Cadeia de suprimentos de veículos elétricos: uma análise bibliométrica. XXXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Santos, São Paulo.
- ONG, H. C., MAHLIA, T. M. I., & MASJUKI, H. H. (2011) A review on emissions and mitigation strategies for road transport in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 3516–3522.
- OSWALD, D., SCORA, G., WILLIAMS, N., HAO, P., & BARTH, M. (2019) Evaluating the Environmental Impacts of Connected and Automated Vehicles: Potential Shortcomings of a Binned-Based Emissions Model. *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, ITSC 2019*, 3639–3644.
- PACHECO, A. F., MARTINS, M. E. S., & ZHAO, H. (2013) New European Drive Cycle (NEDC) simulation of a passenger car with a HCCI engine: Emissions and fuel consumption results. *Fuel*, 111, 733–739.
- PANG, R., JIAN, X., MENG, X., & JIN, D. (2018) Comprehensive fuel consumption model of light vehicle specific power based on typical mountainous city. *Sci. Technol. Eng*, 18(6), 156–161.
- PAVLOVIC, J., MAROTTA, A., & CIUFFO, B. (2016) CO₂ emissions and energy demands of vehicles tested under the NEDC and the new WLTP type approval test procedures. *Applied Energy*, 177, 661–670.
- PAVLOVIC, J., CIUFFO, B., FONTARAS, G., VALVERDE, V., & MAROTTA, A. (2018) How much difference in type-approval CO₂ emissions from passenger cars in Europe can be expected from changing to the new test procedure (NEDC vs. WLTP)? *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 46(2), 136 – 147.
- 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 vehicle emission inventory of a Brazilian metropolitan area and insights for other

- emerging economies. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 58, 172–185–172–185.
- PORTELLA, A. A., PACHECO, R. M. R., & FLEXOR, M. H. O. (2020) Participação popular no processo de elaboração do orçamento participativo. A experiência de Porto Alegre. *REVISTA QUAESTIO IURIS*, 13(03), 1540–1571–1540–1571.
- POTENZA, R. F., GABRIEL DE OLIVEIRA, Q., ANDERSON MATHEUS, C., DAVID SHILING, T., MARCELO DOS SANTOS, C., FELIPE BARCELLOS E, S., KACCNNY, C., IRIS, C., JULIA, S., CAMILA, S., EDRIANO, S., BÁRBAR, A Z., ANE, A., CLAUDIO. ANGELO, & TASSO, A. (2020) Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas de clima do Brasil (1970-2019). *Observatório Do Clima.*, 10–19.
- PULIAFITO, S. E., ALLENDE, D., PINTO, S., & CASTESANA, P. (2015) High resolution inventory of GHG emissions of the road transport sector in Argentina. *Atmospheric Environment*, 101, 303–311.
- 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.
- QUINTANILHA, W. F. L., RIBEIRO, J. P., CASSIANO, D. R., BERTONCINI, B. V., BRITO, J. I. C., CAVALCANTE, R. M., & DE LIMA, A. C. A. (2019) Análise Das Emissões De CO₂ Em Vias Urbanas Com Diferentes Classificações Funcionais: Um Estudo Para Fortaleza–CE.
- QUIRAMA, L. F., GIRALDO, M., HUERTAS, J. I., & JALLER, M. (2020) Driving cycles that reproduce driving patterns, energy consumptions and tailpipe emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 82, 102294.
- QUIRÓS-TORTÓS, J., GODÍNEZ-ZAMORA, G., VICTOR-GALLARDO, L., ANGULO-PANIAGUA, J., RAMOS, E., HOWELLS, M., USHER, W., & DE LEÓN, F. (2020) Cómo llegar a cero emisiones netas: resumen para diseñadores de políticas sobre las lecciones en los sectores. Editado Por C, 40.
- RAHMAN, Z., BUTLER, K. L., & EHSANI, M. (2000) A comparison study between two parallel hybrid control concepts. *SAE Technical Papers*.
- RANA, I. (2020) Developing a City Scale Emissions Inventory and Exploring Electrification of Transportation: A Case Study of the City of Waterloo. *University of Waterloo*.
- RIMPAS, D., PAPADAKIS, A., & SAMARAKOU, M. (2020) OBD-II sensor diagnostics for monitoring vehicle operation and consumption. *Energy Reports*, 6, 55–63.
- ROMERO, S. M. A., ROMERO, R. R. DA, & BRASIL, A. C. DE M. (2004) Influência do congestionamento e modo de condução, nas velocidades, consumos e emissões de um ônibus urbano. *Transportes*, 12(2).

- RUBIN, E. S., & ZHAI, H. (2012) The cost of carbon capture and storage for natural gas combined cycle power plants. *Environmental Science and Technology*, 46(6), 3076–3084.
- SALVO JUNIOR, O. DE, & SOUZA, M. T. S. DE (2018) A regulamentação como indutora de tecnologias ambientais para a redução de emissões tóxicas em veículos leves no Brasil. *Cadernos EBAPE.BR*, 16(4), 748–760.
- SANTOS, M. L. M. (2017) CIDADE SUSTENTÁVEL? Impactos ambientais e a eficiência energética do sistema de mobilidade urbana do Distrito Federal. *Universitas Nusantara PGRI Kediri*, 01, 1–7.
- SEEG (2022) Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa. <https://energiaambiente.org.br/produto/seeg>. Acessado em: 19/04/2022.
- SEEG (2020) Base de Dados de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa No Brasil 1970-2020. Disponível em: <https://plataforma.seeg.eco.br/?highlight=br-net-emissions-by-sector>. Acessado em: 20/05/2023.
- SENGER, R. D., MERKLE, M. A., & NELSON, D. J. (1998) Validation of ADVISOR as a simulation tool for a series hybrid electric vehicle [Virginia Tech]. In *SAE Technical Papers*.
- SEUM, S., EHRENBERGER, S., & PREGGER, T. (2020) Extended emission factors for future automotive propulsion in Germany considering fleet composition, new technologies and emissions from energy supplies. *Atmospheric Environment*, 233, 117568.
- SHADDICK, G., THOMAS, M. L., MUDU, P., RUGGERI, G., & GUMY, S. (2020) Half the world's population are exposed to increasing air pollution. *NPJ Climate and Atmospheric Science*, 3(1), 23.
- SHUKLA, P. R., SKEA, J., SLADE, R., AL KHOURDAJIE, A., VAN DIEMEN, R., MCCOLLUM, D., PATHAK, M., SOME, S., VYAS, P., & FRADERA, R. (2022) Climate change 2022: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 10, 9781009157926.
- SILVA, C. O. (2009) Cidades concebidas para o automóvel: mobilidade urbana nos planos diretores posteriores ao Estatuto da Cidade. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília.
- SIMÕES, J. B. (2019) Análise e estimativa de inventários de emissões veiculares no estado do Rio Grande do Norte. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- SINGH, A., OBADAT, M. S., SINGH, S., AGGARWAL, A., KAUR, K., SADOUN, B., KUMAR, M., & HSIAO, K.-F. (2022) A simulation model to reduce the fuel consumption through efficient road traffic modelling. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 121, 102658.

- SISIOPIKU, V. P., ROUSSEAU, A., FOUAD, F. H., & PETERS, R. W. (2006) Technology Evaluation of Hydrogen Light-Duty Vehicles. *Journal of Environmental Engineering*, 132(6), 568–574–568–574.
- SMIT, R., NTZIACHRISTOS, L., & BOULTER, P. (2010) Validation of road vehicle and traffic emission models - A review and meta-analysis. *Atmospheric Environment*, 44(25), 2943–2953.
- SOFWAN, N. M., & LATIF, M. T. (2021) Characteristics of the real-driving emissions from gasoline passenger vehicles in the Kuala Lumpur urban environment. *Atmospheric Pollution Research*, 12(1), 306–315.
- SONG, G., YU, L., & TU, Z. (2012) Distribution characteristics of vehicle-specific power on urban restricted-access roadways. *Journal of Transportation Engineering*, 138(2), 202–209.
- SOUZA, C. C. R. DE, & HIROI, J. (2021) the Electric Car Market in Brazil: Analysis of Barriers and Suggestions for Expansion. *Revista Práticas Em Contabilidade e Gestão*, 9(1).
- SPLITTER, D., PAWLOWSKI, A., & WAGNER, R. (2016) A historical analysis of the co-evolution of gasoline octane number and spark-ignition engines. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 1.
- STDF (2009) Plano Diretor de Transporte Urbano e Mobilidade do Distrito Federal e Entorno. 305. Disponível: https://www.cnpq.org.br/site/images/arquivos/gndh/mobilidade_urbana/Plano_de_Transporte_Urbano_do_DF.pdf. Acessado em: 15/02/2022.
- SUN, F., & YU, J.-Y. (2009) A 10–15-yr modulation cycle of ENSO intensity. *Journal of Climate*, 22(7), 1718–1735.
- TAMMI, K., MINAV, T., & KORTELAJINEN, J. (2018). Thirty years of electro-hybrid powertrain simulation. *IEEE Access*, 6, 35250–35259.
- TANG, J., MCNABOLA, A., MISSTEAR, B., PILLA, F., & ALAM, M. S. (2019) Assessing the impact of vehicle speed limits and fleet composition on air quality near a school. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(1), 149.
- TIETGE, U., MOCK, P., FRANCO, V., & ZACHAROF, N. (2017) From laboratory to road: Modeling the divergence between official and real-world fuel consumption and CO₂ emission values in the German passenger car market for the years 2001–2014. *Energy Policy*, 103, 212–222.
- TOLEDO, A. L. L. (2019) Emissões de gases de efeito estufa da mobilidade urbana: o caso de Natal. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- TONG, H. Y., TUNG, H. D., HUNG, W. T., & NGUYEN, H. V. (2011) Development of driving cycles for motorcycles and light-duty vehicles in Vietnam. *Atmospheric Environment*, 45(29), 5191–5199.

- TRINDADE, I. M. (2016) Modelagem, controle e otimização de consumo de combustível para um veículo híbrido elétrico série-paralelo. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo.
- TROVÃO, J. P., PEREIRINHA, P. G., & JORGE, H. M. (2009) Simulation model and road tests comparative results of a small urban electric vehicle. IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference), 836–841.
- TUIA, D., DE EICKER, M. O., ZAH, R., OSSES, M., ZARATE, E., & CLAPPIER, A. (2007) Evaluation of a simplified top-down model for the spatial assessment of hot traffic emissions in mid-sized cities. *Atmospheric Environment*, 41(17), 3658–3671.
- TURKENSTEEN, M. (2017) The accuracy of carbon emission and fuel consumption computations in green vehicle routing. *European Journal of Operational Research*, 262(2), 647–659.
- TURKMEN, A. C., SOLMAZ, S., & CELIK, C. (2017) Analysis of fuel cell vehicles with advisor software. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 1066–1071.
- UEDA, A. C., & TOMAZ, E. (2011) Inventário de emissão de fontes veiculares da Região Metropolitana de Campinas, São Paulo. *Química Nova*, 34(9), 1496–1500.
- VANFRETTI, L., & MILANO, F. (2007) Application of the PSAT, an open-source software, for educational and research purposes. 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, PES.
- VILCHEZ, J. J. G., & JOCHEM, P. (2019) Simulating vehicle fleet composition: A review of system dynamics models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115, 109367.
- WANG, H. W., WEN, H. Y., YOU, F., & YANG, G. F. (2014) Research on VSP Microcosmic Emission Model and Numerical Simulation for Motor Vehicle. *Key Engineering Materials*, 579, 835–840.
- WANG, J., & RAKHA, H. A. (2017) Convex Fuel Consumption Model for Diesel and Hybrid Buses. *Transportation Research Record*, 2647(1), 50–60.
- WANG, W., BIE, J., YUSUF, A., LIU, Y., WANG, X., WANG, C., ZHENG CHEN, G., LI, J., JI, D., XIAO, H., SUN, Y., & HE, J. (2023) A new vehicle specific power method based on internally observable variables: Application to CO₂ emission assessment for a hybrid electric vehicle. *Energy Conversion and Management*, 286, 117050.
- WU, X., FREESE, D., CABRERA, A., & KITCH, W. A. (2015) Electric vehicles' energy consumption measurement and estimation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 34, 52–67.
- WYATT, D. W., LI, H., & TATE, J. E. (2014) The impact of road grade on carbon dioxide (CO₂) emission of a passenger vehicle in real-world driving. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 32, 160–170.

- XU, D., GAO, Z., GUO, Y., YAN, Y., WANG, F., & SHI, F. (2021) Study on fuel consumption and emission characteristics of China VI heavy duty vehicle based on vehicle specific power. *E3S Web of Conferences*, 268, 01055.
- XU, J. (2020) Individual and Environmental Determinants of Traffic Emissions and Near-Road Air Quality [University of Toronto (Canada)]. In ProQuest Dissertations and Theses.
- YANG, Y., WANG, C., LIU, W., & ZHOU, P. (2017) Microsimulation of low carbon urban transport policies in Beijing. *Energy Policy*, 107, 561–572.
- YAO, Y., ZHAO, X., LIU, C., RONG, J., ZHANG, Y., DONG, Z., SU, Y., & CHEN, F. (2020) Vehicle Fuel Consumption Prediction Method Based on Driving Behavior Data Collected from Smartphones. *Journal of Advanced Transportation*, 2020, 1–11–1–11.
- YAO, Z., WANG, Q., HE, K., HUO, H., MA, Y., & ZHANG, Q. (2007) Characteristics of Real-World Vehicular Emissions in Chinese Cities. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 57(11), 1379–1386.
- YAO, Z., WEI, H., LIU, H., & LI, Z. (2013) Statistical Vehicle Specific Power Profiling for Urban Freeways. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 96, 2927–2938.
- ZHANG, L., ZHU, Z., ZHANG, Z., SONG, G., ZHAI, Z., & YU, L. (2022) An improved method for evaluating eco-driving behavior based-on speed-specific vehicle-specific power distributions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 113, 103476.
- ZHENG, F., LI, J., VAN ZUYLEN, H. J., & LU, C. (2019) Influence of driver characteristics on emissions and fuel consumption. *IET Intelligent Transport Systems*, 13(12), 1770–1779.
- ZHUANG, W., (EBEN), S. L., ZHANG, X., KUM, D., SONG, Z., YIN, G., JU, F., LI (EBEN), S., ZHANG, X., KUM, D., SONG, Z., YIN, G., JU, F., (EBEN), S. L., ZHANG, X., KUM, D., SONG, Z., YIN, G., & JU, F. (2020) A survey of powertrain configuration studies on hybrid electric vehicles. *Applied Energy*, 262 (December 2019), 114553.

APÊNDICE A: CARACTERÍSTICAS DOS VEÍCULOS UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES

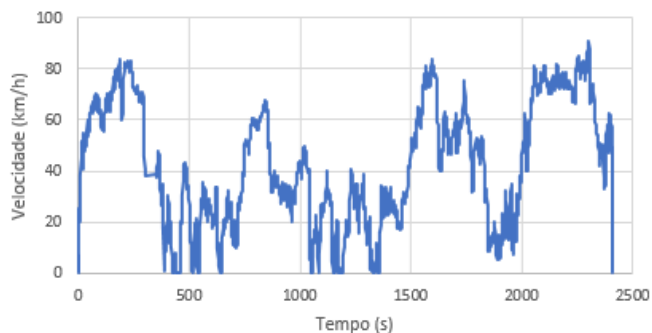
	Especificação	Valor	Fonte
	Coefficiente de arrasto	0,353	Ficha técnica
	Altura do centro de gravidade do veículo	0,53 m	FASTSim
	Fração de peso no eixo de tração	0,59	FASTSim
	Distância entre eixos	2,46 m	Ficha técnica
	Peso do veículo sem carga/Tara	1046 kg	Ficha técnica
	Peso da carga	400 kg	Ficha técnica
	Tração	Dianteira	Ficha técnica
	Potência gasolina	81 KW (110 cv) a 5.750 rpm	Manual
	Potência etanol	88 KW (120 cv) a 5.750 rpm	Manual
	Torque gasolina	155 Nm (15,8 kgfm) a 4.000 rpm	Manual
	Torque etanol	165 Nm (16,8 kgfm) a 4.000 rpm	Manual
	Stoichiometric air-fuel ratio - gasolina	14,7	<i>Matlab</i>
	Stoichiometric air-fuel ratio - etanol	9,0	<i>Matlab</i>
	Potência máxima	114 kW	Toyota
	Potência específica	2 kW/kg	Toyota
	Peso do empilhamento de células a combustível	56 kg	Toyota
	Tempo para que a célula a combustível atinja potência máxima	5 s	FASTSim
	Peso do tanque de hidrogênio	87,5 kg	Toyota
	Tempo de abastecimento	300 s	Toyota
	Capacidade do tanque de hidrogênio	5 kg de H ₂	Toyota
	Pressão normal de operação do tanque de hidrogênio	70 Mpa	Toyota
	Massa do sistema de transmissão	114 kg	FASTsim
	Eficiência de transmissão	0,98	FASTSim
	Raio	0,316 m (195/55/R15)	Ficha técnica
	Momento de inércia	0,82 kg·m ²	FASTSim
	Coefficiente de rolamento	0,0076	FASTSim
Bateria	Tipo	Níquel-hidreto metálico	Toyota
	Número de módulos de bateria	34	Toyota
	Voltagem por módulo	7,2 V	Toyota
	Voltagem nominal do banco de baterias	244,8 V	Toyota
	Capacidade	6,5 Ah	Toyota
	Potência por módulo	1,35 Kw	PEVE
	Peso do módulo de bateria	1,04 kg	PEVE
	Potência específica	1,30 kW/kg	PEVE
	Densidade de energia	0,046 kWh/kg	PEVE
Motor elétrico	Potência	113 kW	Toyota
	Eficiência do motor	0,95	FASTsim
Parâmetros de Controle	SOC mínimo	0,4	FASTSim
	SOC máximo	0,8	FASTSim
Performance	Consumo de Combustível (Estimativa EPA para ciclo combinado)	67 MPGe	EPA
	Velocidade Máxima	114 mph	Ficha técnica
	Aceleração de 0-60 mph	6,8 s	Ficha técnica
	Aceleração de 0-100 km/h	10,8 s	Ficha técnica
	Autonomia (Estimativa EPA)	312	Toyota

APÊNDICE B: CICLOS DE CONDUÇÃO

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

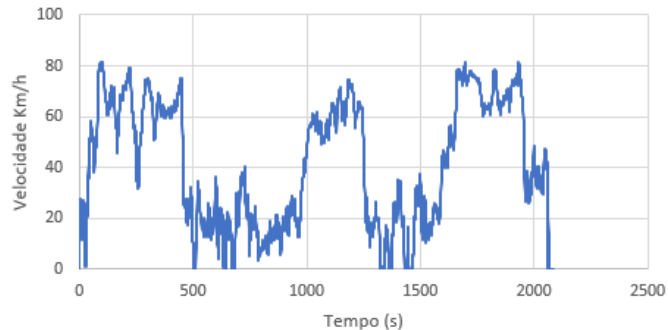
1

Eixo Sul/Gama



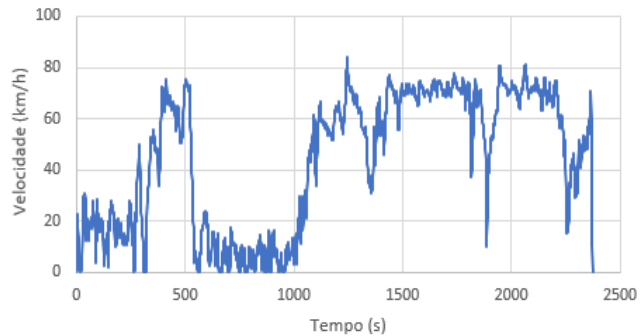
2

Eixo Norte/Sobradinho



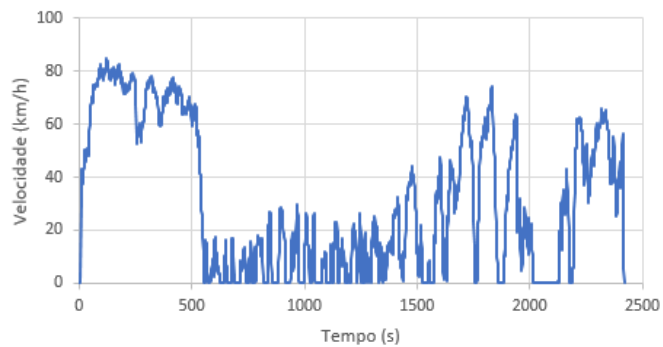
3

Eixo Leste/Jardim Botânico



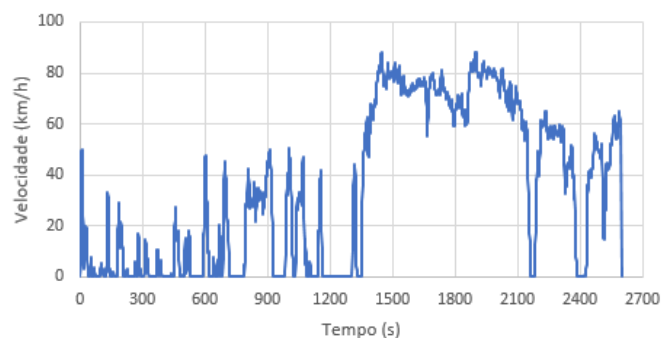
4

Eixo Oeste/Taguatinga



5

Eixo Oeste/Ceilândia



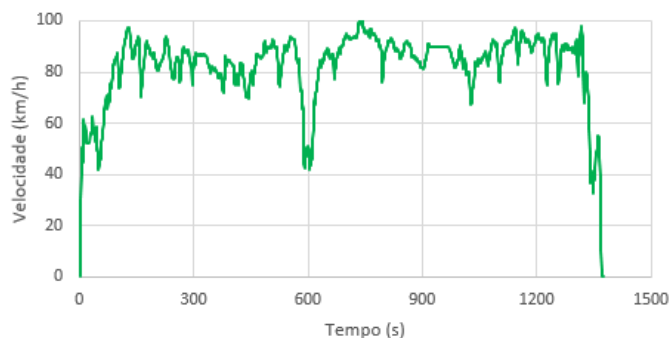
CARACTERÍSTICAS DAS ROTAS

ROTAS	\bar{V} (m/s)	X(km)	t(s)	Km/l	CO ₂ (g/km)
1	11,77	27,22	2.407	11,67	269,54
2	11,42	23,44	2.086	11,73	282,12
3	12,24	15,20	2.373	11,29	280,07
4	8,55	19,84	2.419	11,52	299,84
5	9,62	24,91	2.688	11,40	250,63

CICLOS DE CONDUÇÃO – Rodoviária Plano Piloto Sentido Eixos 09:30h

1

Eixo Sul/Gama



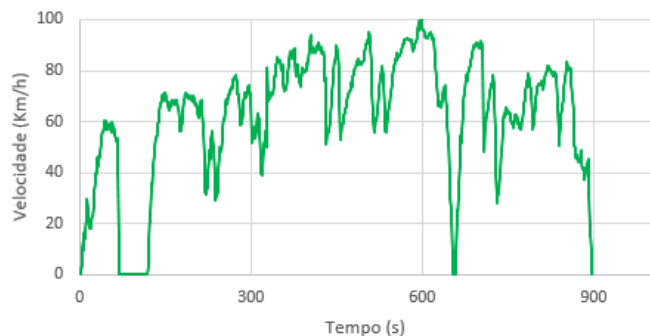
2

Eixo Norte/Sobradinho



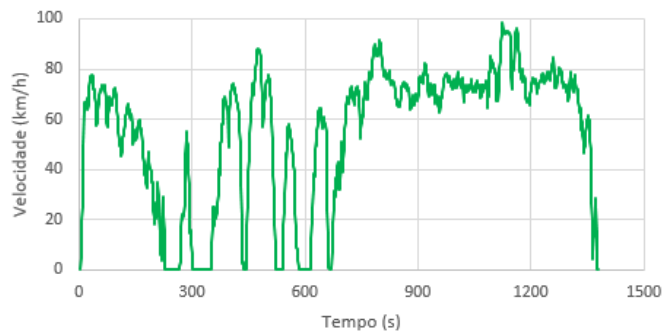
3

Eixo Leste/Jardim Botânico



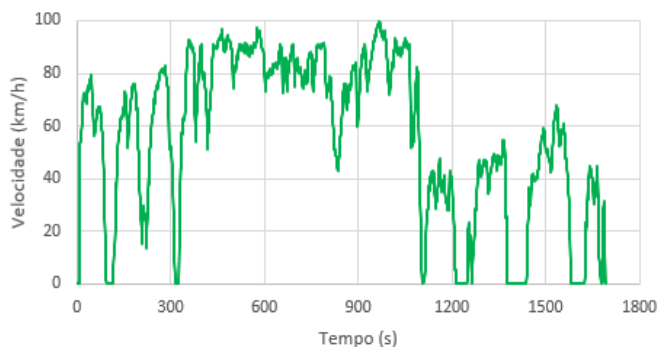
4

Eixo Oeste/Taguatinga



5

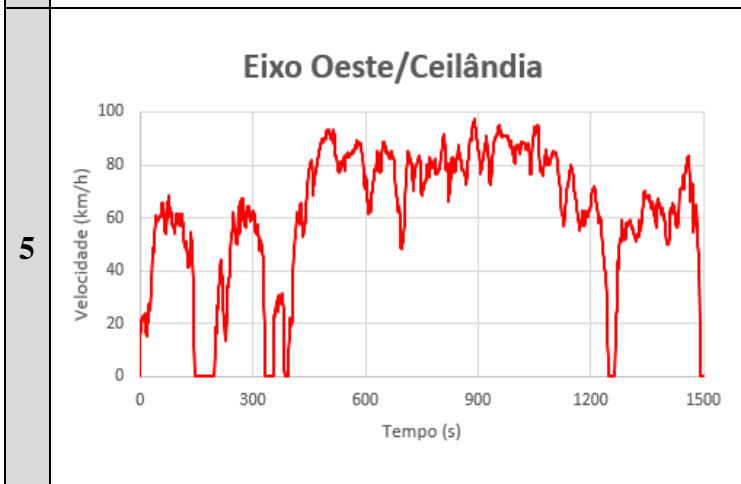
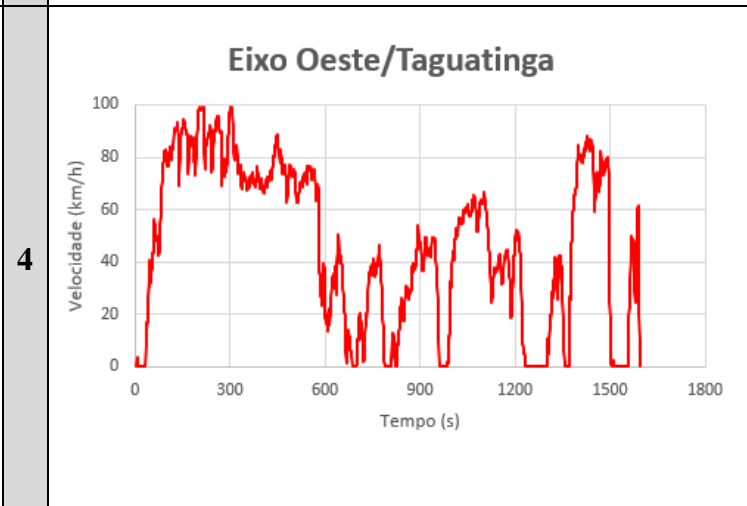
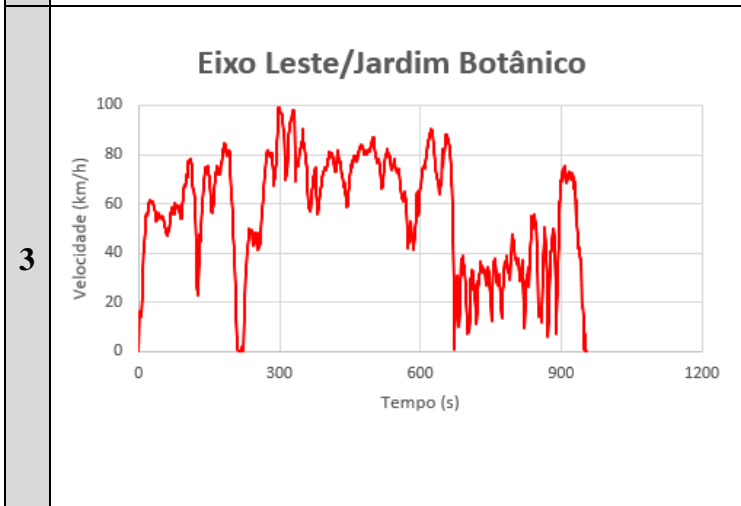
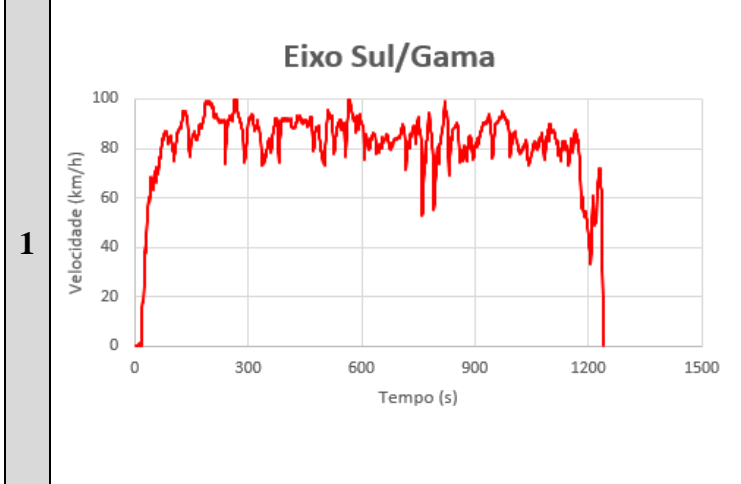
Eixo Oeste/Ceilândia



CARACTERÍSTICAS DAS ROTAS

ROTAS	\bar{V} (m/s)	X(km)	t(s)	Km/l	CO ₂
1	22,94	27,22	1.372	12,27	271,66
2	17,57	23,44	1.416	11,43	299,77
3	17,35	15,20	893	11,26	333,75
4	15,32	19,84	1.376	11,49	315,18
5	15,76	24,91	1.693	11,25	307,02

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



CARACTERÍSTICAS DAS ROTAS					
ROTAS	\bar{V} (m/s)	X(km)	t(s)	Km/l	CO ₂
1	22,67	27,22	1.217	12,91	259,94
2	19,92	23,44	1,174	13,35	262,47
3	15,79	15,20	954	11,72	323,35
4	12,98	19,84	1.592	11,49	288,59
5	16,92	24,91	1.517	13,24	245,46

APÊNDICE C: ABORDAGEM A RESPEITO DAS EMISSÕES DE HC, CO E NO_x

Com respeito a abordagem relacionada aos gases HC, CO e NO_x buscou-se inicialmente realizar uma análise de regressão exponencial, que é frequentemente usada quando se espera que o aumento ou diminuição de uma variável seja proporcional ao valor atual da mesma. Os resultados dos ajustes exponenciais não foram satisfatórios, indicando parâmetros com magnitudes extremas que não são consistentes com o comportamento esperado das emissões de gases veiculares.

Buscando uma outra abordagem estatística, realizou-se uma transformação logarítmica aos dados de emissões para linearizar a relação exponencial e, em seguida, ajustou-se um modelo de regressão linear aos dados transformados. Esta abordagem resultou em um melhor ajuste, como indicado pelos gráficos abaixo.

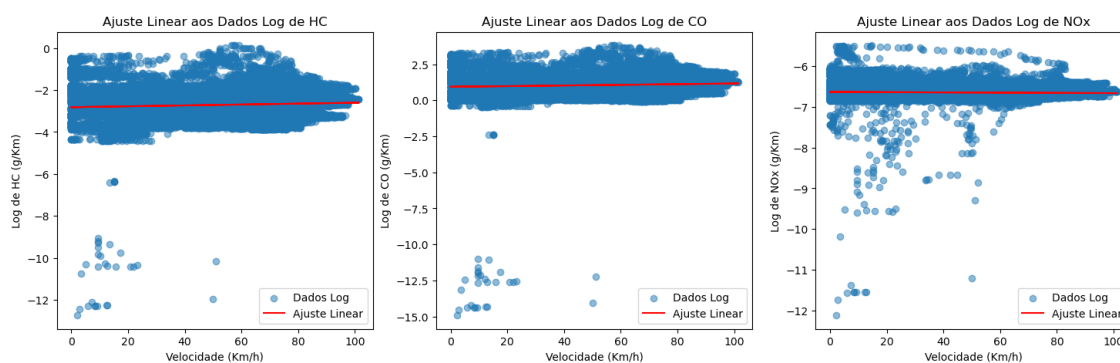


Gráfico a: Neste gráfico, a transformação logarítmica dos dados de HC (Hidrocarbonetos) mostra uma tendência que é modelada por um ajuste linear. No entanto, é evidente que há uma grande dispersão dos dados, com alguns pontos bastante afastados da linha de tendência, indicando a possibilidade de outliers ou de uma variação não capturada pelo modelo.

Gráfico b: Para as emissões de CO (Monóxido de Carbono), o ajuste linear aos dados log-transformados também indica uma tendência. Contudo, assim como para o HC, os dados exibem uma dispersão significativa, o que sugere que a relação entre as emissões de CO e a velocidade pode não ser tão direta ou que outros fatores estejam influenciando essa relação.

Gráfico c: O gráfico das emissões de NO_x (Óxidos de Nitrogênio) segue um padrão similar aos de HC e CO, com a linha de ajuste linear apresentando uma tendência geral. A dispersão aqui é igualmente notável, indicando a mesma potencial inconsistência na relação entre as emissões de NO_x e a velocidade.

Apesar dos ajustes lineares indicarem uma tendência após a transformação logarítmica dos dados, a dispersão significativa sugere que os modelos podem não estar capturando toda a complexidade das relações entre as emissões e a velocidade. Isso pode ser devido a variabilidade inerente aos dados, presença de outliers, erros de medição, ou a influência de fatores não considerados na análise.

Essa inconsistência ressalta a importância de uma análise mais aprofundada e, possivelmente, a necessidade de revisão quanto as simulações realizadas no *Matlab/Simulink* que possam influenciar as emissões de gases veiculares.

APÊNDICE D: CÓDIFICAÇÃO EM PYTHON PARA CLASSIFICAR AS REGRESSÕES PARA AS DIFERENTES TECNOLOGIAS EM DIFERENTES HORÁRIOS

```
import pandas as pd
import numpy as np
from scipy.optimize import curve_fit
import matplotlib.pyplot as plt
from sklearn.metrics import r2_score
from sklearn.base import BaseEstimator, RegressorMixin

def func_pot(x, a, b):
    return a * x**b
def func_poli(x, a, b, c):
    return a * x**2 + b * x + c
class PotenciaRegressor(BaseEstimator, RegressorMixin):
    def __init__(self):
        self.params = None
    def fit(self, X, y):
        self.params, _ = curve_fit(func_pot, X, y)
        return self
    def predict(self, X):
        return func_pot(X, *self.params)
class PolinomialRegressor(BaseEstimator, RegressorMixin):
    def __init__(self):
        self.params = None
    def fit(self, X, y):
        self.params, _ = curve_fit(func_poli, X, y)
        return self
    def predict(self, X):
        return func_poli(X, *self.params)
dfs = pd.read_excel('Planilha', sheet_name=['aba1', 'aba2', 'aba3'])
fig, axs = plt.subplots(1, 2, figsize=(20, 6))
cores = ['red', 'blue', 'yellow']
for i, (sheet_name, df) in enumerate(dfs.items(), start=1):
    x = df['Velocidade'].values
    y = df['Consumo'].values
    reg_pot = PotenciaRegressor().fit(x, y)
    reg_poli = PolinomialRegressor().fit(x, y)
    x_grid = np.linspace(min(x), max(x), 100)
    y_pred_pot_grid = reg_pot.predict(x_grid)
    y_pred_poli_grid = reg_poli.predict(x_grid)
    r2_pot = r2_score(y, reg_pot.predict(x))
    r2_poli = r2_score(y, reg_poli.predict(x))
    axs[0].plot(x_grid, y_pred_pot_grid, color=cores[i-1], label=f'{sheet_name} ($R^2$ = {r2_pot:.2f})')
    # Plotando no segundo subplot (índice 1) a regressão polinomial
    axs[1].plot(x_grid, y_pred_poli_grid, color=cores[i-1], label=f'{sheet_name} ($R^2$ = {r2_poli:.2f})')
    print(f'Planilha {sheet_name}')
    print(f'Potência: a = {reg_pot.params[0]:.2f}, b = {reg_pot.params[1]:.2f}, R^2: {r2_pot:.2f}')
```

```
print(f'Polinomial: a = {reg_poli.params[0]:.2f}, b = {reg_poli.params[1]:.2f}, c =  
{reg_poli.params[2]:.2f}, R^2: {r2_poli:.2f}')  
axs[0].set_title('Regressões Potenciais para Pico, Fora de Pico e FTP-75')  
axs[0].set_xlabel('Velocidade (Km/h)')  
axs[0].set_ylabel('Consumo (L/Km)')  
axs[0].grid(True)  
axs[0].legend()  
axs[1].set_title('Regressões Polinomiais para Pico, Fora de Pico e FTP-75')  
axs[1].set_xlabel('Velocidade (Km/h)')  
axs[1].set_ylabel('Consumo (L/Km)')  
axs[1].grid(True)  
axs[1].legend()  
plt.tight_layout() # Ajusta o layout para evitar sobreposição  
plt.show()
```