

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA POLITÉCNICA

ORLANDO DE SALVO JUNIOR

**Medição *on-board* das emissões de CO<sub>2</sub> por meio do consumo energético monitorado via unidade de controle de veículo *flex***

São Paulo  
2020

ORLANDO DE SALVO JUNIOR

**Medição *on-board* das emissões de CO<sub>2</sub> por meio do consumo energético monitorado via unidade de controle de veículo *flex***

**Versão Corrigida**

Tese apresentada ao Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração: Informações espaciais

Orientador: Prof. Dr. Flavio Guilherme Vaz de Almeida Filho

São Paulo  
2020

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_

Assinatura do autor: \_\_\_\_\_

Assinatura do orientador: \_\_\_\_\_

#### Catálogo-na-publicação

Salvo Junior, Orlando de

Medição on-board das emissões de CO<sub>2</sub> por meio do consumo energético monitorado via unidade de controle de veículo flex / O. Salvo Junior -- versão corr. -- São Paulo, 2020.

203 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1.Unidade de controle do motor (ECU) 2.Gases de Efeito Estufa (GEE)  
3.Dinamômetro de chassi 4.Etanol 5.Emissões em tráfego real (RDE)  
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

Nome: SALVO JUNIOR, Orlando de

Título: Medição *on-board* das emissões de CO<sub>2</sub> por meio do consumo energético monitorado via unidade de controle de veículo *flex*

Tese apresentada ao Departamento de Engenharia de Transportes da  
Escolada Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção  
do título de Doutor em Ciências.

Aprovado em: 22/04/2020

#### Banca Examinadora

Prof. Dr. Flavio Guilherme Vaz de Almeida Filho (Presidente)

Instituição: Escola Politécnica – Universidade de São Paulo - USP

Prof. Dr. Vanderlei Borsari

Instituição: Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB

Prof. Dra. Gabriela Scur

Instituição: Centro Universitário da FEI

Prof. Dra. Flávia Luciane Consoni de Mello

Instituição: Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Prof. Dr. Janito Vaqueiro Ferreira

Instituição: Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP



Dedico esta tese a meu Pai Orlando de Salvo (*in memoriam*); graças ao seu suporte e incentivo para seguir na área de engenharia e tecnologia, encontrei o meu propósito de vida.

## AGRADECIMENTOS

Ao longo do desenvolvimento desta tese de doutorado e antes dela, muitas pessoas estiveram envolvidas e, direta ou indiretamente, trouxeram relevantes contribuições.

A Deus, pela inspiração diante das incertezas e por permitir ao longo do caminho encontrasse pessoas especiais que me auxiliaram e orientaram na medida certa para o meu crescimento e aprendizagem.

Ao Professor Dr. Flávio Vaz de Almeida com sua incansável dedicação nas orientações e esclarecimentos que se fizeram necessários ao longo desta caminhada. Agradeço pelos ensinamentos, paciência e exemplo de competência com que me conduziu no desenvolvimento de habilidades para a pesquisa científica e que se consolidaram com a composição desta tese e das publicações.

Ao Dr. Vanderlei Borsari membro da banca de qualificação, pelas inúmeras recomendações e contribuições que muito enriqueceram esta tese e pelo incentivo na realização dos ensaios.

Aos professores Dr. Cláudio Luiz Marte e Dr. Edvaldo Simões da Fonseca Junior, pelos ensinamentos perante os desafios da jornada a fim de cumprir as disciplinas e abrir novos horizontes com o incentivo à pesquisa.

Agradeço à professora Maria Tereza de Souza Saraiva, minha orientadora de mestrado no Centro Universitário da FEI que com seus ensinamentos e experiência me auxiliou na transição do mestrado para o doutorado.

Ao Sr. Francisco A. Marino Salotti, por sua prestatividade na adequação e funcionalidade do laboratório de emissões e dinamômetro do IEE.

Ao Rafael Rodrigues de Mello do IPT, que tanto contribuiu nos métodos de medições de consumo de combustível e verificação das especificações dos combustíveis.

Ao incansável trabalho prestado pelo Bruno Silva Pereira e Demerson Moscardini durante todos os experimentos deste estudo, desde os primeiros testes de consumo até a medição final nos ensaios de rodagem com o analisador de gases portátil. A vocês meu muito obrigado pela dedicação, empenho e prontidão durante esta longa jornada que desenvolvemos nos últimos anos. Ao Lucas Motta de Novaes pela grande contribuição não somente nos preparativos do veículo de ensaio, mas também por viabilizar o ensaio final com o veículo para teste em rodagem. Ao Felipe Jato, por sua dedicação no desenvolvimento do chicote para o uso da unidade de controle de teste que asseguraram o funcionamento do veículo em rodagem.

Ao professor Dr. Edson C. Kitani pelas orientações, não somente sobre as tecnologias de injeção de combustível, mas também, pelo sistema de posicionamento RTK (*Real Time Kinematic*) e principalmente pela ampla experiência passada sobre o desenvolvimento científico e acadêmico.

Ao professor Jhonny Frank Sousa Joca com sua grande contribuição da análise química da combustão incompleta de etanol e gasolina, que ampliou minha compreensão a respeito do resultado da combustão.

Ao professor Marco Aurélio Fróes pelos ensinamentos nos conceitos de medição de consumo de combustível, bem como suas contribuições para viabilizar a rodagem do veículo de teste nos ensaios em RDE.

Ao professor Dr. Alexsander Tressino de Carvalho, diretor da Fatec de Santo André, pelo amplo apoio e incentivo ao desenvolvimento do meu doutorado.

Ao André Luiz Silva Forcetto que tanto participou no desenvolvimento deste trabalho, trazendo grandes contribuições no desenvolvimento dos conceitos, informações sobre regulamentações e diversos estudos que desenvolvemos e que ainda iremos desenvolver.

A vital contribuição da CETESB que viabilizou os ensaios de emissões para a validação do método deste estudo, especialmente ao Sr. Edson Elpídeo Neto, ao Sr. Vanderlei Ferreira, e aos Srs. Rodrigo Viera, Felipe Sonoda dos Santos e todos do laboratório que contribuíram para os ensaios no dinamômetro. Pela incansável prontidão nos diversos ensaios de medição de emissões e consumo de combustível e pareamento do analisador portátil que também permitiu os ensaios em rodagem, meu profundo reconhecimento.

Pela valiosa contribuição da TCA-HORIBA Automotive Test Systems, que forneceu os recursos necessários para os ensaios de emissões em rodagem. Minha gratidão aos Srs. Nikolas Penof, Ricardo Blazek, Gilberto Augusto, Natsuki Adachi e Yoshihisa Shimoda que viabilizaram os ensaios em rodagem para a validação do método deste estudo em condições reais de uso do veículo.

Ao professor Armando Antonio M. Laganá, por sua ampla contribuição em meu desenvolvimento acadêmico, desde o mestrado, pavimentando meu caminho até o doutorado. Pelas incansáveis conversas e reuniões para viabilizar cada etapa de teste e recursos necessários que asseguraram o desenvolvimento deste estudo, nenhuma palavra do dicionário poderia expressar a grandeza de tamanha contribuição na minha jornada.

A todos do PTR que contribuíram para a realização deste trabalho, a secretária sra. Luciane Otomo Watanabe que indicou as informações para o cumprimento de cada etapa exigida para o desenvolvimento desta tese.

À minha inspiradora esposa Vera Lucia, pela paciência em minhas ausências, pelo incentivo que tive a cada dia deste percurso e por me fortalecer diante do cansaço, incertezas e desafios para realizar este projeto que não é somente acadêmico, mas uma crença na contribuição que possa se desdobrar para o mundo.

Aos meus filhos André e Gabriel, pelos momentos de ausência para cumprir cada etapa deste projeto de vida, espero que eu possa retribuir a privação enfrentada durante esta jornada. Que meu exemplo os fortaleça na crença de um mundo melhor por meio do estudo, pesquisa e persistência a fim de que possamos trazer soluções e benefícios para a humanidade.

## RESUMO

O uso de combustíveis fósseis tem significativa contribuição para o aumento da concentração de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera. Em função da ampla participação do setor de transporte rodoviário nas mudanças climáticas, em diversos países as regulamentações têm atuado no sentido de estabelecer maior rigor para a melhoria de eficiência energética veicular e redução das emissões de CO<sub>2</sub>. Diante deste quadro, a indústria automobilística tem investido em novas tecnologias embarcadas como o *downsizing* e redução do atrito nos motores, bem como a ampliação do uso de turbo compressor, comando de válvulas variável e injeção direta de combustível. Com base neste cenário, este estudo tem por objetivo propor novo método para monitorar o consumo de combustível e emissões de CO<sub>2</sub>, de veículos leves *flex-fuel*. As medições foram feitas nos ciclos de ensaio americano e validado por meio rodagem *real-world*. A análise destes dados estabeleceu correlação entre consumo e emissão. Estes valores ficaram registrados da unidade de controle do motor de forma a gerar inventário *on-board* de carbono fóssil e renovável. Para atingir este objetivo, a primeira fase de testes levantou valores de consumo de combustível, por meio de ciclo de testes baseado na faixa de torque máximo do motor do veículo de teste com rotações estabilizadas. O valor da vazão de combustível foi calculado conforme a largura do pulso do injetor e corrigido conforme o fluxo de ar no coletor de admissão. O sensor de etanol utilizado permitiu separar cada elemento do combustível: gasolina, etanol e água. Os ensaios para a validação do método foram feitos por medição em laboratório de emissões e em rodagem por meio de sistema portátil de medição das emissões (PEMS - *portable emissions measurement system*). Os valores de consumo foram comparados entre os ciclos e entre os combustíveis. Estas relações permitiram minimizar os efeitos da calibração acadêmica da unidade de controle eletrônica (ECU) utilizada bem como identificar desvio em algum dos ensaios. Alguns valores dos resultados deste estudo indicaram, por meio do monitoramento da ECU, no ciclo de rodagem urbano com gasolina, um consumo de 81,0 g/km de massa de combustível, sendo 57,60 g/km de gasolina consumida e 23,40 g/km de etanol. No ciclo urbano usando etanol, a gasolina residual no tanque representou somente 3,22 g/km, para uma massa de 103,34 g/km de etanol e 7,08 g/km era água. Estes resultados indicaram a quantidade de gasolina e etanol consumidos nos testes realizados neste estudo. Esse método permitiu fazer a gravação *onboard* do combustível consumo e assim indicar o valor de CO<sub>2</sub> emitido o que viabiliza possibilidades de inventário de GEE por meio do próprio veículo e a fonte desta emissão, fóssil ou renovável.

O objetivo proposto foi atingido e abre caminho para mais investigações sobre o inventário de o CO<sub>2</sub> emitido. Desta forma as políticas públicas terão subsídios para a tomada de decisão e assim direcionem recursos nas áreas com demanda por melhoria nas tecnologias e métodos aplicados nos automóveis visando reduzir o impacto ambiental.

**Palavras-chave:** Unidade de controle do motor (ECU), Gases de Efeito Estufa (GEE), dinamômetro de chassi, etanol, emissões em tráfego real (RDE).

## ABSTRACT

The use of fossil fuels has significant contribution to the increase of greenhouse gases (GHG) concentration in atmosphere. Due to the broad share of road transport sector on climate change, the regulation has worked in several countries to establish riser rigor on vehicle energy efficiency improvement and reduction of CO<sub>2</sub> emissions. Facing this frame, the auto industry has invested in new technologies such as engine downsizing and low friction engine, as well as the diffusion of turbocharger, variable valve timing (VVT) and direct fuel injection. Based on to this scenario, this study aims to propose a new method for monitoring the fuel consumption and CO<sub>2</sub> emissions of light-duty flex-fuel vehicles. The measurements were based on the American cycle tests and validated with real-world driving. The data analysis aims to establish correlation between fuel consumption and emissions. These values were recorded at engine control unit parameters to create the on-board inventory of fossil and renewable. To achieve this objective, the first phase of tests surveyed fuel consumption values by means of a test cycle based on the highest torque range of the engine of vehicle with stabilized rotation. The fuel flow value was calculated according to injector pulse width and corrected according to the air flow in the intake manifold. The ethanol sensor used allowed to separate each fuel element: gasoline, ethanol and water. Tests for method validation were made by measurement in the emissions laboratory and running through portable emissions measurement system (PEMS). The consumption values were compared between cycles and between fuels. These relations allowed to minimize the effects of the academic electronic control unit (ECU) calibration as well as to identify deviation in some of the tests. Some values of the results of this study indicated, through the monitoring of the ECU, a consumption of 81.0 g/km of fuel mass in the urban cycle with gasoline, being 57.60 g/km of gasoline consumed and the remaining 23.40 g/km of ethanol. In the urban cycle using ethanol, the residual gasoline in the tank represented only 3.22 g/km, for a mass of 103.34 g/km of ethanol and 7.08 g/km was water. These results indicated the amount of gasoline and ethanol consumed in the tests conducted in this study. This method allows onboard recording of fuel consumption and thus indicate the value of CO<sub>2</sub> emitted which makes it possible to inventory GHG through own vehicles and the source of emission, fossil or renewable. The proposed objective was achieved and opens paths for further investigations about inventory of emitted CO<sub>2</sub>. Therefore, the public policies will have subsidies for taking decision and thus drive resources in areas with demand for improvement in technologies and methods applied at vehicles to reduce environmental impact.

**Keywords:** Engine control unit (ECU), Greenhouse Gases (GHG), chassis dynamometer, ethanol, real driving emissions (RDE)

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Emissões em rotações estabilizadas.....	129
Tabela 2 - Valor médio dos parâmetros analisados – E36.....	135
Tabela 3 – Média, desvio padrão e amostras fora da faixa.....	142
Tabela 4 – Valor de consumo de combustível acumulado em cada trecho e o total geral.....	146
Tabela 5 – Valor de consumo de combustível acumulado na faixa transiente e o total geral....	147
Tabela 6 – Desvio padrão das porcentagens de cada método – E30 e E92.....	148
Tabela 7 – Variações no consumo para o ensaio completo e sem duas amostras.....	156
Tabela 8 – Correlação entre PEMS e laboratório no ciclo FTP-75.....	164
Tabela 9 – Precisão do consume de combustível no ciclo FTP-75 com E28 e E92.....	169
Tabela 10 – Precisão do consume de combustível no ciclo HWFET com E28 e E92.....	169
Tabela 11 – Consumo de combustível e relação entre ciclos e combustíveis.....	174
Tabela 12 – Valores das variáveis do cálculo de consumo VSP por combustível.....	182
Tabela 13 – Inventário de CO2 da ECU para combustão incompleta.....	185
Tabela 14 - Emissão de CO2 por combustível em diversos ciclos – combustão completa.....	185

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comparação global das emissões de CO <sub>2</sub> para veículos novos de passageiros.....	21
Figura 2 – Representação esquemática de um ensaio de emissões em dinamômetro.....	25
Figura 3 – Ciclos de condução utilizados na Europa para ensaio em laboratório.....	27
Figura 4 – Ciclos de ensaios FTP-75 e HWFET.....	32
Figura 5 – Consumo específico por volume de etanol.....	35
Figura 6 – Comparação do BSFC com três combustíveis conforme rotação.....	36
Figura 7- Comparação de inclinação de vias por meio de dados de GPS e dados de projeto.....	41
Figura 8 – Variação horária de emissões de CO <sub>2</sub> dos métodos do IPCC e por ITS.....	54
Figura 9 – Aceleração e velocidade nos ciclos MIDC, WLTC e rodagem.....	56
Figura 10 – Padrões de velocidades em rodagens real-world e ciclos padrão. (a) Congestionamento. (b) Trânsito médio. (c) Pouco trânsito. (d) MIDC. (e) WLTC.....	57
Figura 11 – Desempenho de emissões de CO <sub>2</sub> durante ensaio.....	64
Figura 12 – Estimativa de economia de combustível e distância do trajeto diário.....	65
Figura 13 – Estimativa de economia de combustível e temperatura ambiente.....	66
Figura 14 – Estrutura do eletro injetor.....	71
Figura 15 - Comparação da taxa de injeção experimental e simulada, 30 MPa.....	72
Figura 16 – Dinâmica do fluxo e taxa do fluxo dos injetores.....	73
Figura 17 – Diagrama esquemático da resposta dinâmica do injetor.....	74
Figura 18 – Variação da pressão da câmara de controle.....	75
Figura 19 – Diagrama com as instalações no veículo de teste.....	104
Figura 20 – Comparação entre os ciclos EUDC e CTE.....	106
Figura 21 – Ciclo urbano FTP-75 - Brasil.....	111
Figura 22 – Índices de verificação do excesso ou falta da dinâmica de condução .....	120
Figura 23 – Veículo de teste no dinamômetro.....	126
Figura 24 – Unidade de controle e programa de calibração e aquisição dos dados.....	127
Figura 25 – Analisador de gases e controle de carga do dinamômetro.....	127
Figura 26 – Medidor da massa de combustível .....	128
Figura 27 – Vazão de combustível, tempo de injeção e rotação do motor.....	131
Figura 28 – Fator de vazão de combustível (ml/s) e rotação .....	132
Figura 29 – Comparação entre parâmetros de consumo de combustível e rotação.....	133

Figura 30 – Relação entre fator de consumo e pressão no coletor de admissão.....	133
Figura 31 – Comparação entre fator de consumo do injetor e o inverso do TPS.....	135
Figura 32 – Curvas com e sem o fator de correção do instrumento.....	137
Figura 33 – Comparação entre <i>speed density</i> do injetor e TPS – E36, C-10%.....	138
Figura 34 – Comparação entre fator de vazão do injetor e o inverso do <i>speed density</i> – E36, 10%.....	138
Figura 35 – Comparação entre fator de vazão do injetor e <i>speed density</i> – E36, C-10%.....	139
Figura 36 – Variações do fator de vazão do injetor em fase transiente – E36.....	139
Figura 37 – Comparação entre taxa de vazão do injetor com e sem o fator de correção com base no valor do <i>speed density</i> – E36.....	140
Figura 38 – Comparação entre taxa de vazão do injetor com e sem o fator de correção com base no valor do <i>speed density</i> – E100.....	141
Figura 39 - Medição de consumo pelo método gravimétrico.....	143
Figura 40 – Consumo de combustível acumulado pelo método gravimétrico - gasolina E30...	143
Figura 41 – Consumo de combustível acumulado pelo método gravimétrico - etanol.....	145
Figura 42 – Medição de consumo de combustível e emissões no ciclo FTP-75 aquecido.....	149
Figura 43 – Emissões de CO e CO <sub>2</sub> em porcentagem – combustíveis E29 e E95.....	150
Figura 44 – Medição de consumo de combustível com E29 no ciclo FTP-75 aquecido.....	152
Figura 45 – Medição de consumo de combustível com E95 no ciclo FTP-75 aquecido.....	154
Figura 46 – Variações do consumo de combustível em relação ao método gravimétrico.....	155
Figura 47 – Distribuição dos componentes do combustível na medição de consumo <i>onboard</i> pelo método de consumo dinâmico.....	157
Figura 48 – Comparação de consumo de combustível com E29 no ciclo FTP-75 aquecido.....	160
Figura 49 – Comparação de consumo de combustível com E95 no ciclo FTP-75 aquecido..	161
Figura 50 – Veículo no laboratório para medir de emissões e correlacionar com o PEMS.....	163
Figura 51 – Veículo instrumentado para a medição de emissões em rodagem com o PEMS....	164
Figura 52 – Mapas das rotas dos ensaios em rodagem.....	165
Figura 53 – Valores do Percentil 95 Velocidade*Acc e RPA – E28 e E92.....	166
Figura 54 - Curva característica de CO <sub>2</sub> do veículo nos ciclos urbano e rural.....	167
Figura 55 – Consumo de combustível em teste de condução em rodagem real com E28.....	170
Figura 56 – Consumo de combustível em teste de condução em rodagem real com E92.....	171
Figura 57 – Emissões veiculares em cada ciclo - E28 e E92.....	172



Figura 58 – Relação entre E28 e E92 em cada ciclo.....	173
Figura 59 – Massa consumida de cada componente do combustível.....	176
Figura 60 – Distribuição dos modos VSP no circuito RDE com E28.....	177
Figura 61 – Massa de combustível por modo VSP com E28.....	178
Figura 62 – Consumo de combustível acumulado pelo PEMS, ECU e VSP – E28.....	179
Figura 63 – Distribuição dos modos VSP no circuito RDE com E28.....	179
Figura 64 – Massa de combustível por modo VSP com E92.....	181
Figura 65 – Consumo de combustível acumulado pelo PEMS, ECU e VSP – E92.....	181

## LISTA DE SIGLAS

AFR	relação ar combustível
BSFC	Brake specific fuel consumption
CADC	Common Artemis Driving Cycle
CAFE	Corporate Average Fuel Economy
CLD	Chemiluminescent detector
CMEM	Comprehensive Modal Emission Model
CH <sub>4</sub>	metano
CO	monóxido de carbono
CO <sub>2</sub>	dióxido de carbono
COPERT	COmputer Programme to calculate Emissions from Road Transport
CTE	ciclo de torque estabilizado
CVT	continuously variable transmission
DCT	dual-clutch transmission
DEM	digital elevation model
DFI	direct fuel injection
E100	etanol hidratado
E22	Gasolina com 22% de etanol anidro
ECU	electronic control unit
EHPS	electro-hydraulic power steering
EPS	electric power steering
ES	Engine Stress
FID	Flame Ionization Detector
FTIR	Fourier Transform Infrared Analyzer
FTP-75	Federal Test Procedure
GEE	Gases de Efeito Estufa
GIS	Geographic Information System

GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GSI	Gear shift indicator
HC	hidrocarbonetos
HBEFA	Handbook of Emission Factors
HWFET	Highway Fuel Economy Test
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ITS	Intelligent Transportation Systems
IVE	Internatinal Vehicle Emissions
LiDAR	Light Detection And Ranging
MAW	moving averaging windows
MIDC	modified Indian Driving Cycle
MOVES	motor vehicle emission simulator
MP	material particulado
NDIR	Nondispersive infrared
NEDC	New European Driving Cycle
N <sub>2</sub> O	óxido nitroso
NO <sub>x</sub>	óxidos de nitrogênio
OBDII	on-board diagnostics
OBFCM	On-board Fuel and/or Energy Consumption Monitoring
OSC	oxygen storage capacity
PBEV	Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular
PEMS	portable emissions measurement system
PFI	port fuel injection
PKE	Positive Kinetic Energy
ppm	partes por milhão
RDE	Real Driving Emissions

RON	research octane number
RPA	Relative Positive Acceleration
SI	spark ignition
SOC	State of charge
THC	hydrocarbonetos totais
TPMS	tire pressure monitoring system
TTW	Tank-to-Wheel
VSP	Vehicle Specific Power
VVT	variable valve timing
WLTC	Worldwide Harmonized Light duty Test Cycle
WLTP	Worldwide harmonized Light duty Test Procedure
WMTC	Worldwide Motorcycle Test Cycle
WTT	Well-to-Tank
WTW	Well-to-Wheel

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	19
1.1 OBJETIVO.....	23
1.1.1 Objetivo específico.....	23
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	24
2.1 CICLO DE ENSAIO.....	24
2.1.1 O ciclo de ensaio em laboratório e oficial.....	24
2.1.2 Regulamentação automotiva de emissões e eficiência energética no Brasil.....	30
2.1.3 Medições de emissões e consumo em dinamômetro de bancada.....	34
2.2 ENSAIO DE CONSUMO E EMISSÕES <i>REAL-WORLD</i> .....	36
2.2.1 A precisão dos parâmetros de GPS na medição <i>real-world</i> .....	40
2.2.2 O método e a regulamentação para os testes <i>real-world</i> .....	43
2.2.3 Monitor de consumo de combustível a bordo.....	46
2.3 MÉTODOS PARA SIMULAR AS EMISSÕES E CONSUMO DE COMBUSTÍVEL.....	47
2.3.1 Método VSP - <i>Vehicle Specific Power</i> .....	48
2.3.2 Resultados de estudos sobre medições e simulação de consumo e emissões.....	53
2.4 CONSUMO DE COMBUSTÍVEL E EMISSÃO VEICULAR.....	62
2.4.1 Formações dos poluentes da combustão em motores por centelha.....	62
2.4.2 Parâmetros de emissões e consumo de combustível.....	62
2.4.3 Eficiência energética e consumo de combustível no Brasil.....	68
2.5 ELEMENTOS COM PARTICIPAÇÃO E MONITORAMENTO DAS EMISSÕES VEICULARES.....	70
2.5.1 Injetor de combustível.....	70
2.5.2 Combustíveis.....	76
2.5.2.1 Combustíveis renováveis.....	77
2.5.2.1.1 Emissões e eficiência com o uso de etanol.....	82
2.5.2.1.2 Emissão de carbono no ciclo produtivo do etanol.....	86
2.5.2.1.3 Nível de ruído de veículos abastecidos com etanol.....	88
2.5.3 Conversor catalítico.....	89
2.5.4 Sistema de monitoramento eletrônico de emissões OBD II.....	92
2.6 TECNOLOGIAS PARA MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	93
2.6.1 Tecnologias do motor com influência no consumo de combustível.....	93
2.6.2 Influências da transmissão e acessórios no consumo de combustível.....	96
2.6.3 Eletrificação do sistema de propulsão.....	98
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	101

3.1 CICLO DE ENSAIO EM REGIME CONSTANTE (ESC – CICLO EUROPEU EM REGIME CONSTANTE) E RESPOSTA EM CARGA (ELR – CICLO EUROPEU DE RESPOSTA EM CARGA) .....	102
3.2 CICLO DE ENSAIO EM REGIME CONSTANTE COM BASE NA ROTAÇÃO DE TORQUE MÁXIMO.....	103
3.2.1 Cálculo do consumo de combustível por meio do CTE.....	106
3.2.2. Método para a medição de consumo com base no tempo de injeção de combustível.....	107
3.2.2.1 Medição do volume de cada combustível e teor de água.....	109
3.3. MATERIAIS E MÉTODOS PARA A ENSAIOS COM FASE TRANSIENTE.....	110
3.3.1 CICLOS DE ENSAIO FTP-75, HWFET E <i>REAL-WORLD</i> .....	110
3.3.2 Modelos para cálculo dos parâmetros levantados em ciclo de laboratório.....	113
3.3.3 Modelos para cálculo dos parâmetros levantados em ciclo <i>real-world</i> .....	116
3.3.4 Precisão da medição de consumo <i>onboard</i> .....	119
3.3.5 Avaliação da dinâmica do percurso em <i>real driving emissions</i> .....	119
3.4 DENSIDADE DOS COMBUSTÍVEIS E EMISSÃO DE CARBONO.....	124
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	126
4.1 COLETA DE DADOS E INSTALAÇÕES UTILIZADAS PARA OS TESTE.....	126
4.1.1 Valores de Emissões .....	128
4.1.2 Consumo de combustível baseado no tempo de injeção.....	129
4.1.3 Análise da base de dados de consumo de combustível com base no ensaio CTE.....	130
4.1.4 Análise dos parâmetros por meio da média dos valores da base de dados.....	134
4.1.5 Análise de fatores com influência na vazão do injetor.....	136
4.2 MEDIÇÃO DE CONSUMO PELO GRAVIMÉTRICO NO CICLO CTE.....	142
4.3 MEDIÇÃO DE CONSUMO PELO GRAVIMÉTRICO E VAZÃO DE COMBUSTÍVEL NO CICLO FTP-75.....	149
4.3.1 Medição de emissões e consumo <i>onboard</i> e <i>offboard</i> .....	149
4.3.1.1 Consumo dinâmico e distribuição da fração de cada elemento dos combustíveis.....	157
4.3.2 Ajuste dos parâmetros e fatores aplicados no cálculo de consumo de combustível.....	159
4.3.3 Cálculo das emissões de carbono conforme ensaios FTP-75 aquecido.....	162
4.4 MEDIÇÃO DE CONSUMO PELO BALANÇO DE CARBONO NOS CICLO FTP-75, HWFET E RDE.....	163
4.4.1 Correlação entre os instrumentos de medição no ciclo FTP-75.....	163
4.4.2 Rotas de condução em <i>real-world</i> .....	164
4.4.3 Avaliação da dinâmica do teste de rodagem.....	165
4.4.4 Curva característica de CO <sub>2</sub> do veículo.....	167

4.4.5 Consumo de combustível no ciclo de ensaio em laboratório.....	168
4.4.6 Consumo de combustível em teste de condução real.....	170
4.4.7 Avaliação das emissões de escapamento.....	172
4.4.8 Análise dos dados de consumo de combustível.....	174
4.4.9 Separação dos componentes do combustível.....	175
4.5 CONSUMO DE COMBUSTÍVEL POR MEIO DO MÉTODO VSP.....	176
4.6 EMISSÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO NO ESCAPAMENTO.....	182
4.7 PADRONIZAÇÃO PARA MEDIÇÃO ONBOARD DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL.....	186
4.8 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS MÉTODOS DE CONSUMO E EMISSÕES .....	187
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	189
6 CONCLUSÕES.....	192
REFERÊNCIAS .....	194

## 1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas causadas pelos Gases de Efeito Estufa (GEE) emitidos na atmosfera são resultado do aumento das emissões de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) pela queima de combustíveis fósseis. A ampliação da presença destes gases na atmosfera é resultado da atividade econômica, como o setor de transporte, segundo maior emissor de  $\text{CO}_2$ , perdendo somente para a geração de energia (IODICE et al., 2016). As emissões de carbono pelo setor de transporte têm contribuído para aumento da concentração de GEE na atmosfera e a tendência ainda não aponta para um processo de redução destes índices (LIU; CIRILLO, 2016). O  $\text{CO}_2$ , metano ( $\text{CH}_4$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) são os mais representativos (CHOI; HO, 2018) GEE, mas além destes, os gases F, hexafluoreto de enxofre ( $\text{SF}_6$ ), hidrofluorcarbonos (HFCs), perfluorcarbonos (PFCs) e trifluoreto de nitrogênio ( $\text{NF}_3$ ) completam a lista dos gases de aquecimento global (AKDAG; HAKAN, 2020).

Em 1992, foi criada a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (CQNUMC) com o objetivo de gerar ações para o controle e mitigação de GEE (CHRISTENSEN; WELLS; CIPCIGAN, 2012). O nível de emissões de GEE deve ser mantido até 450 ppm no ano de 2100 de forma a manter a meta para o controle de temperatura, limitando a elevação em  $2^\circ\text{C}$  em relação a era Pré-Industrial (BISHOP et al., 2016). Para assegurar que esse limite de temperatura não seja maior, estima-se que tenha que ocorrer uma redução de 50 a 85% nas emissões de  $\text{CO}_2$  até 2050 (CHRISTENSEN; WELLS; CIPCIGAN, 2012).

A preocupação com o aquecimento global tem uma relação direta com as emissões de  $\text{CO}_2$  originadas pela ação humana. (CHANG et al., 2013). O  $\text{CO}_2$  é referenciado nos estudos sobre aquecimento global em função de ser o principal GEE envolvido no processo da emissão veicular (ZHANG; SARATHY, 2016). O setor de transporte tem ampla participação nas emissões globais de GEE, respondendo por 24% do  $\text{CO}_2$  emitido, como resultado da combustão dos motores. Por volta de três quartos desta parcela é emitida por veículos rodoviários (IEA, 2019). No Brasil, o setor de transporte rodoviário respondia por menos de 10% das emissões de GEE em 2018, porém, considerando o segmento geração de energia nacional (inclui a área de transporte), a participação deste é de 44,6%. Os valores mais relevantes de emissões de GEE no Brasil estão relacionados à agropecuária e a mudanças de uso da terra (SEEG, 2018).

Os veículos leves de passageiros são uma das principais causas de aumento das emissões de  $\text{CO}_2$  no mundo em função do tamanho da frota. A relevância das emissões destes veículos tem induzido à restrição por meio da regulamentação. O acréscimo da concentração da



população em áreas urbanas leva ao aumento dos congestionamentos, com impacto nas emissões dos veículos. A frota mais antiga em circulação tem impacto não somente no aumento de GEE, mas também de poluentes (MELO; JANNUZZI; SANTANA, 2018). Além do estilo de condução dos usuários e forma de utilização, as emissões sofrem influência do nível tecnológico dos veículos (AMBARWATI et al., 2016) e mesmo com a evolução tecnológica dos automóveis, as emissões continuam como principal fonte antropogênica de poluentes urbanos (SILVA et al., 2006). Além desses fatores, as emissões são afetadas pelo tamanho da frota. Como exemplo, o grande crescimento da frota chinesa nas últimas décadas trouxe a preocupação com a segurança energética, problemas com a poluição e congestionamentos, em um mercado que continua em expansão. Desde a década passada, a regulamentação tem estreitado os limites de consumo de combustível e emissões de forma a reduzir os impactos decorrentes ao crescimento da frota. (ZHANG et al., 2014).

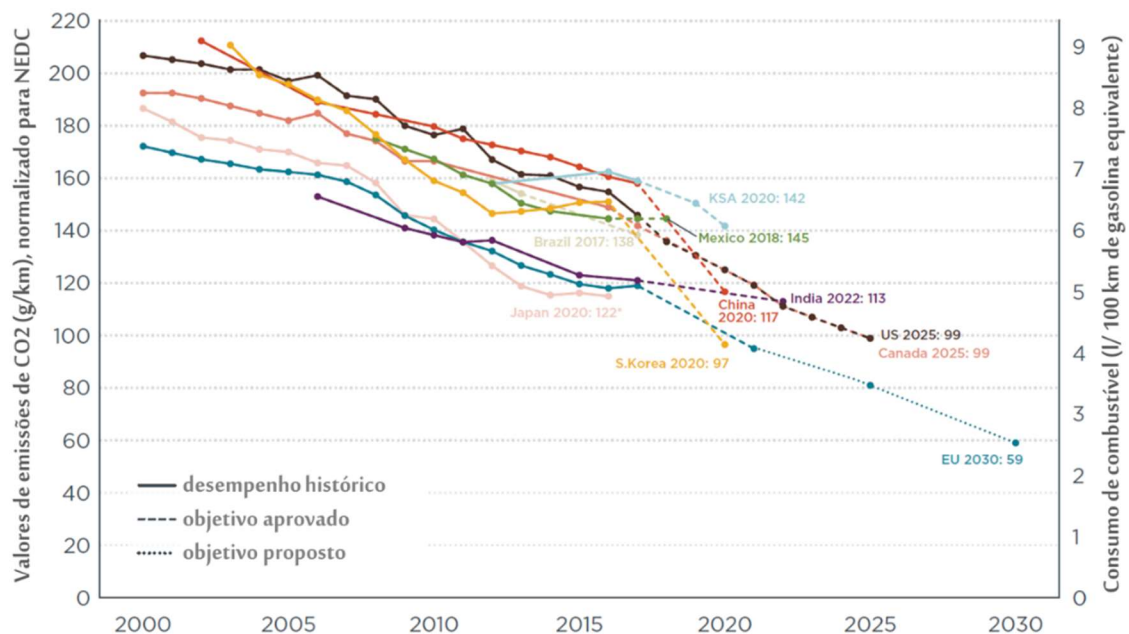
O consumo de combustíveis fósseis tem crescido ao longo das últimas décadas e a busca por fontes alternativas se faz necessária tanto no aspecto econômico como ambiental. Desta forma, a indústria tem visado prioritariamente as fontes renováveis de energia, bem como muitos países, regulamentando o uso destas energias limpas. O setor de transporte tem seguido na direção de inovações em veículos menos poluentes. (SABRI; DANAPALASINGAM; RAHMAT, 2016). A eletrificação da frota é fortalecida em função da maior eficiência energética dos motores elétricos em relação aos motores a combustão interna, porém tem maior impacto ambiental da produção do veículo em função da bateria (AMBROSE; KENDALL, 2016).

Os motores a ignição por centelha (*spark ignition* - SI) são amplamente utilizados ao redor do planeta para uso particular e comercial. Em função do aumento das restrições impostas pela legislação, o setor de transporte tem investido em tecnologias para o aumento de eficiência energética e na procura por combustíveis de fontes renováveis que reduzam o impacto ambiental e a dependência do petróleo. O consumo de combustíveis fósseis tem impacto na saúde, de forma que as regulamentações têm fomentado o uso de tecnologias para a melhoria de desempenho, bem como o uso de combustíveis alternativos ao petróleo. Dentre os combustíveis viáveis, o etanol tem sido aplicado em diversas localidades, com o benefício de reduzir as emissões. Assim, desponta como combustível limpo para substituir a gasolina, tornando-se aditivo na gasolina em vários mercados. Pode ser produzido a partir da biomassa, milho, mandioca e cana de açúcar, contribuindo com o desenvolvimento agrícola. Além de ser um combustível renovável, o oxigênio contido na sua estrutura molecular contribui para a redução das emissões de CO e HC, com melhor queima da mistura de gasolina com etanol na

fase fria, etapa em que o catalisador apresenta baixa eficiência. A adição de etanol pode contribuir para o aumento do desempenho dos motores em função do aumento da octanagem (DENG et al., 2018; IODICE et al., 2016). A redução do rastro de carbono emitido pelo etanol consumido pelo motor ocorre em função da captura do CO<sub>2</sub> durante o crescimento da cana de açúcar (OLMOS et al., 2019). Portanto a maior participação do etanol como fonte de energia contribui para a redução das emissões de GEE.

Países do G20 estabeleceram padrões de emissões de CO<sub>2</sub> e economia de combustível em função da implicação global destas emissões. Portanto, este padrão de regulamentação deve ser seguido por diversos países (OH et al., 2016). As metas de redução de emissões de CO<sub>2</sub> veicular, na Europa por exemplo, ocorre por meio de regulamentação que impõe limites proporcionais ao peso médio da frota, quanto mais pesado maior será o limite (TSIAKMAKIS et al., 2017). Nos EUA esta média é baseada no tamanho do veículo (*footprint*) (SIMMONS et al., 2015). Os limites de emissões de CO<sub>2</sub>/km estão em contínua redução em diversos mercados, como pode ser observado na Figura 1. Os valores de emissões foram convertidos para o *New European Driving Cycle* (NEDC) de forma a comparar na mesma base de ciclo de ensaio (ICCT, 2019).

Figura 1 – Comparação global das emissões de CO<sub>2</sub> para veículos novos de passageiros



Fonte: (ICCT, 2019)

Na Europa, a meta para 2021 é de 95 g CO<sub>2</sub>/km, ante o limite de 2015 de 130 g CO<sub>2</sub>/km (KIM; CHO; MIN, 2015). Para 2025 é proposto redução em 15%, o que representa uma média

corporativa de 81 gCO<sub>2</sub>/km. Seguindo com emissão ainda mais restritiva, em relação à 2021, a meta proposta para 2030 é de 59 gCO<sub>2</sub>/km (ICCT, 2019). O padrão de emissões de CO<sub>2</sub> e consumo de combustível tem sido estabelecido em outros mercados, além da comunidade europeia. O limite imposto na Coreia do Sul é de 82 g CO<sub>2</sub>/km, em 2020, para veículos com menos de 1070 kg. Nos EUA, o padrão corporativo médio de economia de combustível (CAFE) estabeleceu uma redução de 45% de melhoria do consumo de combustível em 2025 (OH et al., 2016). Conforme a regulamentação Rota 2030, a meta de eficiência energética para 2022 exige uma redução de 11% no consumo de combustível (MDIC, 2020).

A regulamentação de eficiência energética tem fomentado a difusão de tecnologias para a economia de combustível. O controle destas ações demanda monitoramento do governo na efetividade da melhoria de eficiência energética. Este controle pode ser mandatório ou voluntário. Estas regulamentações geralmente são regidas por meio de incentivos tributários, e na outra ponta, por meio de penalidades, no caso de descumprimento. A maioria dos países migraram para o controle mandatório. Estes trouxeram bons resultados, mas dependem do modo que estão estruturadas as regras (MELO; JANNUZZI; SANTANA, 2018).

A discrepância entre os valores de emissões e consumo de combustível dos testes para a aprovação oficial e o *real-world* tem chamado a atenção de pesquisadores e legisladores. As emissões de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) tem apresentado divergências na Europa e China, e os valores de CO<sub>2</sub> ainda vêm demonstrando aumento ao longo do tempo (YANG et al., 2016). A divergência entre dados oficiais e condições reais de uso tem sido motivo de preocupação sobre a eficiência dos programas de consumo energético. A discrepância tem crescido ao longo dos últimos anos e desde 2010 não tem apresentado melhorias nos testes *real-world*. Parte do motivo destas variações têm origem em fatores como o trânsito congestionado, o uso de ar condicionado, além da precisão dos métodos utilizados (ZHANG et al., 2016). Além destes fatores, alguns estudos sobre consumo de combustível e emissões de CO<sub>2</sub> nem sempre levam em consideração aspectos como: diferentes tipos de motores, características técnicas dos veículos, diferentes tipos de combustíveis, temperatura, velocidade do vento e características das vias, como a inclinação (EHSANI; AHMADI; FADAI, 2016). É importante que o teste oficial reflita melhor o consumo real de combustível, caso contrário, os inventários de emissão de CO<sub>2</sub> não refletirão a condição atingida pelo setor de transporte (TIETGE et al., 2017).

Apesar da frota brasileira ser de veículos que rodam com biocombustíveis, em função da tecnologia *flex-fuel*, a qualidade do ar e a redução das emissões de GEE não tem ocorrido dentro do esperado. Dentre os principais fatores, o modal de transporte público não tem atendido a demanda, o que faz que o transporte individual seja fomentado por meio de

incentivos tributários específicos. Alguns incentivos implementados não refletiram em melhoria de eficiência energética, em anos anteriores. Esse aumento da frota resultou em aumento do consumo de combustíveis com conseqüente aumento nas emissões de poluentes e GEE. No período de 2000 a 2015, os veículos rodoviários no Brasil apresentaram elevação de 62,2% nas emissões (MELO; JANNUZZI; SANTANA, 2018).

## 1.1 OBJETIVO

Este estudo tem por objetivo propor novo método para monitorar o consumo de combustível e respectivas emissões de CO<sub>2</sub>, de gasolina e etanol, em veículo leve *flex-fuel*. As medições foram feitas por meio dos ciclos de ensaio americano e validado conforme ciclo oficial e em rodagem *real-world*.

Será identificado o volume de injeção de combustível e as emissões de CO<sub>2</sub>, direto e indireto (HC e CO), em veículo *flex*. A relevância desta análise deve levar em consideração dois fatores principais. O primeiro é a amplitude do impacto ambiental e a relevância das emissões de CO<sub>2</sub> pelos automóveis, um dos principais gases de efeito estufa, e estes valores apresentarem discrepância entre consumo oficial e medição real em rodagem. Segundo ponto desta análise deve considerar a diferença entre o consumo do etanol com a gasolina, devido ao poder calorífico de cada combustível, bem como a diferença de densidade entre os dois.

Para chegar a este objetivo, a seguinte questão de pesquisa precisa ser respondida: qual é a relação entre tempo de injeção de combustível, da unidade de controle do motor, e as emissões de CO<sub>2</sub> fóssil e não fóssil (renovável)?

### 1.1.1 Objetivo específico

Para atingir o objetivo geral deste estudo, os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos: a) Levantar a relação entre tempo de injeção de combustível e a vazão real; b) Levantamento do padrão de consumo de combustível em porcentagem (volume) com base no ciclo de teste de torque estabilizado; c) Relacionar as medições efetuadas para estabelecer padrão de resposta do consumo de combustível e respectiva emissão de CO<sub>2</sub>; d) Validação da massa de combustível consumida e emissões de CO<sub>2</sub> com base nos ciclos FTP-75, HWFET e *real-world*, em rodagem; e e) Apresentar meio de comunicação para acesso aos dados *onboard* de inventário do consumo de combustível e massa de CO<sub>2</sub> por quilômetros para gasolina e etanol.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

A medição dos parâmetros de leitura de emissões de escapamento segue padrões para viabilizar a comparação entre os diferentes modelos e tecnologias que compõem os automóveis. Neste capítulo, serão abordados os fundamentos sobre: os ensaios de medições de emissões em laboratório e em rodagem; medição de consumo de combustível e emissões medição por meio do *Global Navigation Satellite System* (GNSS); injetor de combustível; combustíveis; catalisador; tecnologias para melhoria da eficiência energética; medição de emissões em bancada; regulamentação sobre consumo de combustível e eficiência energética; e veículos com propulsão eletrificada.

### 2.1 CICLO DE ENSAIO

A construção de um ciclo de condução deve refletir o padrão de condução dos veículos de cada localidade, envolvendo, portanto, o padrão de vários usuários. O ciclo de condução é utilizado como padrão para avaliação veicular. A estruturação do ciclo é composta de micro viagens que combinam velocidade e tempo coletados e representado de forma gráfica (POURESMAEILI; AGHAYAN; TAGHIZADEH, 2018). Micro viagem é definido pelo intervalo entre dois pontos de marcha lenta (HO; WONG; CHANG, 2014). Nos próximos anos a exigência para a redução das emissões de CO<sub>2</sub> e controle de poluentes demandará soluções integradas por parte das montadoras. A aplicação do ensaio de emissões em condições reais de tráfego (RDE – *Real Driving Emissions*) exige que os ensaios dos fabricantes reflitam cada vez mais as condições reais de uso. Para avaliar o desempenho ambiental dos veículos, as montadoras precisam simular os ciclos de ensaio em dinamômetro, o qual tem restrições para reproduzir plenamente as condições nas vias (BROATCH et al., 2017).

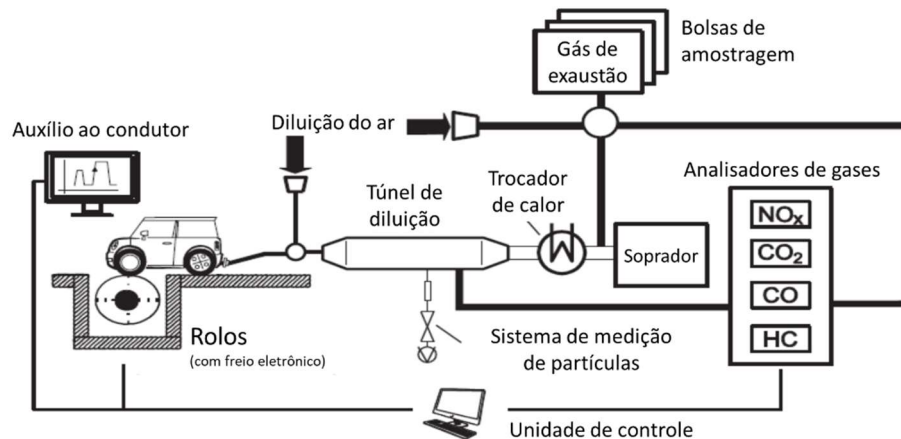
Desta forma, serão apresentados a seguir os conceitos sobre os ciclos de ensaio em laboratório e as medição *real-world*, realizadas em rodagem.

#### 2.1.1 O ciclo de ensaio em laboratório e ensaio oficial

O ensaio de dinamômetro consiste em operar o veículo ancorado, e as rodas de tração sobre os rolos do equipamento. O veículo deve ser conduzido com base no ciclo de ensaio aplicando as variações de velocidade conforme o padrão do ciclo e simulando condições de carga. O ciclo de ensaio engloba rodagens em condições estáveis e transientes. O período de

estabilidade permite a avaliação das emissões em alguns patamares, enquanto os trechos de transição representam melhor a realidade de rodagem em pista. Durante o ciclo de ensaio são coletadas as amostras de gases de escapamento para levantar a concentração e valor emitido em gramas por quilometro (g/km) (FRANCO et al., 2013). A Figura 2 ilustra o processo de medições no dinamômetro de chassi e as respectivas medições das emissões em laboratório.

Figura 2 – Representação esquemática de um ensaio de emissões em dinamômetro



Fonte: Franco et al. (2013)

Para aproximar as condições de uso aos efeitos que ocorrem na condução em vias, alguns fatores de ajuste são aplicados para simular a resistência de rodagem dos veículos durante o ensaio em dinamômetro. Os valores de *coast down* são levantados em pista para definir os coeficientes de ajuste, os quais representam as resistências ao rolamento do veículo. O teste é feito em pista e é medido o tempo de desaceleração do veículo. O coeficiente  $f_0$  refere-se à deformação dos pneus,  $f_1$  é a resistência gerada pelo movimento de rotação de componentes internos, como o powertrain, e o  $f_2$  está relacionado com a resistência aerodinâmica. Este último tem relação com a área frontal e coeficiente aerodinâmico. A Equação 1 esquematiza a utilização dos fatores de resistência (FONTARAS; ZACHAROF; CIUFFO, 2017):

$$m \frac{dv}{dt} = \sum^R = f_0 + f_1 v + f_2 v^2 \quad (1)$$

Sendo  $m$  a massa de referência,  $v$  a velocidade,  $R$  a resistência que atua no veículo e  $f_x$  as cargas referentes ao *coast down* (FONTARAS; ZACHAROF; CIUFFO, 2017). O fluxo de ar circulando no veículo é um dos fatores que influenciam os testes em laboratório, e pode afetar a temperatura em diferentes pontos dos veículos, o que altera a eficiência geral durante os testes.

No caso dos pneus, a variação de temperatura afeta a resistência ao rolamento (BROATCH et al., 2017).

A regulamentação tem potencializado a mudança tecnológica em automóveis e combustíveis, porém o resultado das emissões deve ser considerado em condições reais de rodagem para melhor refletir as emissões. Apesar dos limites impostos para veículos novos, uma verificação periódica permite aferir o nível de emissões ao longo da vida do veículo. A inspeção veicular pode monitorar as condições de uso dos veículos ao longo do tempo, mas nem todas localidades realizam este procedimento e os métodos variam de cada região. Mesmo com a avaliação por meio de inspeção veicular, os níveis de emissões em condições reais apresentam divergência ao ensaio oficial (PUJADAS; DOMÍNGUEZ-SÁEZ; DE LA FUENTE, 2017).

Apesar da evolução tecnológica dos automóveis, as emissões continuam no centro das atenções não somente para a redução de poluentes, mas também para a redução de GEE. Para atingir este objetivo, a evolução das tecnologias do sistema de propulsão tem ampla participação no aumento de eficiência energética, as quais refletem na redução do consumo de combustível. Trazendo um breve histórico, na Europa, a legislação teve os primeiros limites de emissões estabelecidos nos anos 1970, iniciando o Euro em 1991, com efetivação em 1992, com a introdução do Euro 1. O ensaio sobre dinamômetro de chassi segue um ciclo padrão e os gases de emissões CO, HC, NOx são coletados e armazenados em bolsas visando calcular o valor em gramas por quilometro (g/km). Os dados oficiais de emissões e consumo de combustível da Europa são utilizados no programa de etiquetagem. Os dados oficiais baseados no ciclo Europeu NEDC apresentaram diferentes valores comparando algumas regiões da Europa. Diante desses resultados foi elaborado um ciclo de condução que represente melhor as condições reais de rodagem, o WLTP que proporciona um novo padrão de rodagem (DUARTE; GONÇALVES; FARIAS, 2016) como forma de reduzir as diferenças entre laboratório e condução real, principalmente para os poluentes como o NOx e o consumo de combustível (GIECHASKIEL et al., 2016).

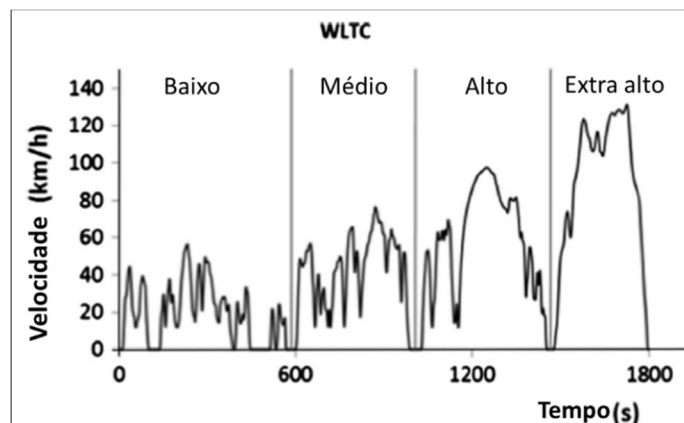
Para superar as limitações dos testes de emissões com base no ciclo NEDC, a comunidade europeia substituiu em setembro de 2017 pelos ciclos Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure (WLTP) e tornou obrigatório o *Real Driving Emissions* (RDE). Desde o início de 2017, testes começaram a ser realizados para a identificação do padrão de consumo de combustível em *real-world*. As montadoras terão de desenvolver os ciclos de teste em condições reais de rodagem, e para este procedimento, devem seguir as regras deste ciclo de teste. Os testes realizados sob o mesmo circuito, mas com diferentes condições de trânsito,

demonstram robustez no ciclo de condução RDE. Alguns programas já permitem fazer a simulação de RDE, bastando importar o mapa para o sistema, e a partir daí realizar variações no fluxo de veículos, velocidade e rotas (DONATEO; GIOVINAZZI, 2017).

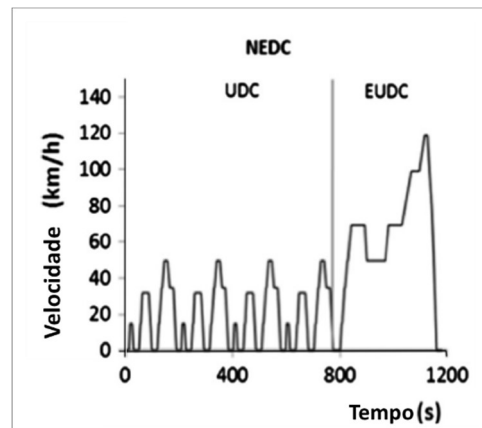
A Figura 3 apresenta o padrão dos ciclos de condução utilizados na Europa para ensaios em dinamômetro.

Figura 3 – Ciclos de condução utilizados na Europa para ensaio em laboratório

(a) WLTC



(b) NEDC



Fonte: adaptado de (SUAREZ-BERTOIA et al., 2015)

O procedimento NEDC foi desenvolvido nos anos 1970 e reflete diferente padrão tecnológico dos automóveis. Desta forma é esperado aumento nas emissões de CO<sub>2</sub> com as mudanças do WLTP. A introdução deste novo padrão teve como o principal motivo a redução da discrepância com a condição real de uso, com a expectativa de reduzir esta divergência pela metade (PAVLOVIC et al., 2018). Alguns estudos indicam redução na diferença entre este novo ciclo e o uso em rodagem, mas ainda não será possível igualar o resultado entre os dois métodos. Além desta redução, a introdução deste novo procedimento pode contribuir com a vinda de



tecnologias que melhoram a eficiência energética com a função de representar melhor a condição real de uso. A mudança de ciclo e procedimento pode também impulsionar a migração para tecnologias que sejam melhor detectadas nesta nova condição de ensaio (TRANTAFYLLOPOULOS et al., 2017).

Diversas pesquisas têm indicado que a emissão de CO<sub>2</sub> tem estreita relação com os valores do certificado de eficiência energética. As emissões de CO, HC e CO<sub>2</sub> compõem este cálculo, sendo o CO<sub>2</sub> com a maior proporção. Desta forma o CO<sub>2</sub> tem sido correlacionado com o consumo energético. O valor de consumo de combustível é utilizado no cálculo das emissões de CO<sub>2</sub>, que leva em consideração a massa atômica do carbono e CO<sub>2</sub>. Para uma análise completa das emissões de CO<sub>2</sub> deveria ser considerado os valores de gases intermediários, como o HC e CO, mas em alguns estudos não são considerados no cálculo em função das baixas proporções que estes apresentam em relação ao CO<sub>2</sub> (OH et al., 2016).

O ensaio em laboratório feito em dinamômetro visa reproduzir as condições de rodagem de forma a manter a repetibilidade e comparar os padrões de emissões, mas o perfil de condução estabelecido cobre somente parte da maneira que se conduz nas vias. Para minimizar estes efeitos, novos ciclos são desenvolvidos de forma a melhor representar a realidade das ruas, bem como reduzir as tolerâncias permitidas no preparo e conduções dos ensaios (GIECHASKIEL et al., 2016). O teste em laboratório é feito sob condições controladas, com simulação feita em dinamômetro, usando fatores de correção visando reproduzir condições reais de uso. Para o ensaio, existem alguns preparos, mas as tolerâncias permitidas podem otimizar o resultado, o que leva ao maior distanciamento da condição real de uso. Entre os parâmetros com tolerância de ajuste, os coeficientes que simulam as resistências dinâmicas do veículo, no dinamômetro, também têm sido explorados ao longo do tempo. O conjunto de elementos que compõem as flexibilidades do teste em dinamômetro teve um impacto estimado, em 2014, na metade das divergências identificadas no teste oficial. A introdução de algumas tecnologias que atenuam os valores de CO<sub>2</sub> do teste, como o sistema start-stop e tecnologias híbridas, não respondem na mesma proporção em condições reais de uso. Outro aspecto é a não utilização de consumidores de carga, como o ar condicionado e sistema de som, durante o teste oficial. As divergências ocorrem de forma variada conforme a base de dados analisada, mas a tendência de aumento nesta variação vem crescendo ao longo do tempo (TIETGE et al., 2017).

A substituição do ciclo NEDC pelo WLTP visa reduzir a discrepância entre medição oficial e condição real de rodagem, no entanto o WLTP ainda apresenta divergência com os valores em uso real (TIETGE et al., 2017). Desde o início da mudança/migração do ciclo NEDC para o novo padrão de ciclo de ensaio harmonizado (WLTC), com base em novos

procedimentos (WLTP), diversos testes têm sido realizados no intuito de identificar as diferenças entre estes padrões de teste. As variações das emissões identificaram aumento nos valores de material particulado (MP) e NO<sub>x</sub>, entre o NEDC e o WLTC, uma redução nas emissões de hidrocarbonetos totais (THC) e CO, porém a variação de CO<sub>2</sub> não foi significativa. As explicações da baixa variação é reflexo da maior dinâmica do teste WLTC, regime no qual o motor responde com maior eficiência, além das transmissões mais recentes que demandam menor rotação do motor (PAVLOVIC et al., 2018).

O método de comparação de Pavlovic et al (2018) foi feito por meio de 16 veículos com base no procedimento WLTP, e para a conversão para o ciclo NEDC foi utilizado o simulador CO<sub>2</sub>MPAS. Este programa é utilizado na fase de transição dos ciclos entre 2017 e 2020. O teste de dinamômetro exige a introdução dos fatores dinâmicos do veículo de forma a gerar as forças que ocorrem em rodagem. O procedimento para obtenção destes fatores do WLTP reduziu as tolerâncias para fortalecer o procedimento. A pressão dos pneus no WLTP é o valor mínimo prescrito, o que não é descrito no NEDC. A pressão do pneu tem uma relação direta com a resistência ao rolamento. Para a troca de marchas de veículos com transmissão manual, o ponto de troca não é mais fixo no WLTP, de forma a permitir dentro de uma faixa de rotação que seja mais adequada ao veículo, o que resulta em melhor eficiência e redução de CO<sub>2</sub> (PAVLOVIC et al., 2018).

O estado da bateria (*state of charge* - SOC) no início do teste não era controlado no NEDC, mas o WLTP não permite carga durante o condicionamento do veículo para o ensaio, o que reflete sua condição normal de uso. Se ocorrer variações significativas na tensão de bateria, o procedimento WLTP demanda a correção dos valores de CO<sub>2</sub>. Segundo alguns estudos, esse valor fica em torno de 2%. A redução das tolerâncias do ciclo de teste tem por objetivo diminuir as variações entre os testes, bem como buscar maior proximidade com os valores reais em rodagem. Isso contribui com a repetibilidade e oferece valores de consumo mais realistas. Com a migração dos testes NEDC para o WLTP, os valores de emissões de CO<sub>2</sub> poderá apresentar valores superiores a 25%, nos casos em que foram usadas as flexibilidades/tolerâncias do procedimento NEDC. O novo teste favorece os veículos Diesel, em função do método de determinação da massa, e aqueles com transmissão manual. (PAVLOVIC et al., 2018).

No comparativo do efeito da massa sobre o consumo, Triantafyllopoulos et al. (2017) fizeram alguns ajustes nas simulações para representar condições mais realistas. No teste em rodagem (CADC) foi adicionado 200 kg: motorista, passageiro, combustível e bagagem. No WLTP foi usado o padrão WLTP-High que representa adicionar a massa de 330 kg em veículo

a gasolina. Uma redução da massa inercial em 100 kg refletirá em melhor redução de consumo no CADC, 2,9 g CO<sub>2</sub>/km, e pior no NEDC, 1,8 g CO<sub>2</sub>/km, em função das acelerações impostas pelo ciclo real. Isso indica que o WLTP (2,3 g CO<sub>2</sub>/km) irá fomentar a redução da massa do veículo, por melhor detectar esse efeito se comparado ao NEDC. O WLTP tem melhor detecção da eficiência das tecnologias. O ciclo NEDC tem um potencial de redução no máximo de 13% com o uso de tecnologias convencionais. Para o cumprimento da meta de 2021 irá demandar eletrificação parcial e redução significativa de peso dos veículos. Combinando todas as tecnologias deste estudo, o efeito total no WLTP foi de 13,9%. A redução da resistência ao rolamento, do arrasto aerodinâmico e da massa do veículo são melhores detectados pelo WLTP se comparado ao NEDC (TRIANAFYLLOPOULOS et al., 2017). Com base nos testes WLTP comparado ao NEDC, segundo Pavlovic et al (2018) foi identificado que a inclusão de massa no veículo apresentou o maior aumento no consumo, 4,3%, seguido da pressão dos pneus, com elevação de 4,0% nas emissões de CO<sub>2</sub>. Por outro lado, a nova regra para a troca de marchas apresentou uma redução média das emissões de CO<sub>2</sub> de 5,0% (PAVLOVIC et al., 2018).

As margens de tolerância permitidas causam impacto na percepção dos veículos tanto de forma positiva como negativa, conforme a maneira que estas foram utilizadas nos testes (TIETGE et al., 2017). Apesar de mais restritivo o novo procedimento de teste WLTP, as tolerâncias existentes poderão ser mais exploradas por meio do monitoramento entre os valores do teste oficial e condição real de uso. Alguns instrumentos e tecnologias poderão ser aplicados, como a instalação de indicadores de consumo de combustível em tempo real (PAVLOVIC et al., 2018).

Nos EUA existem vários ciclos que simulam diversas situações, como condução urbana ou uso do ar condicionado, por exemplo. A ponderação destes ciclos gera o parâmetro oficial de consumo e informação para o público que é veiculado por meio de etiqueta. Apesar dos ciclos utilizados para ensaio em dinamômetro nos EUA, somente 2 são usados na ponderação do consumo oficial: 55% do *Federal Test Procedure* (FTP) e 45% do *Highway Fuel Economy Driving Schedule* (HWFET) para compor a média ponderada (GREENE et al., 2017)

### **2.1.2 Regulamentação automotiva de emissões e eficiência energética no Brasil**

A regulamentação para o controle de emissões de poluentes no Brasil foi introduzida em 1986 por meio da resolução 18 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente). O objetivo foi estabelecer limites de emissões evaporativas e de escapamento para os veículos. O programa evoluiu ao longo do tempo com a introdução periódica de fases com novos limites de

emissões. Atualmente este programa está na fase 6 para veículos leves (L6), conforme regulamentação CONAMA 415 de 2009, e desde 2010 foi introduzido o Sistema de Diagnóstico de Bordo OBDBr-2 pela resolução do CONAMA 354 de 2004, ambos para veículos leves. Em 2022 será introduzida a fase L7, os limites de emissões, e procedimentos foram estabelecidos pela Resolução 492 de 2018 do CONAMA, bem como para a fase L8 (CONAMA, 2018).

As tecnologias no sistema de propulsão introduzidas nos veículos Brasileiros necessitam de ajustes especiais em função da disponibilidade, desde os anos 1970, do etanol produzido a partir da cana de açúcar, quando foram introduzidos no mercado por meio do programa Proálcool. No final dos anos 1970 foi lançado o primeiro veículo a álcool. O auge deste combustível ocorreu em 1985 e no final da década de 1980 foi a primeira grande queda, em função do desabastecimento por mudança na política de incentivos deste combustível e queda no preço do petróleo. Este efeito levou a uma desaceleração nos veículos movidos a etanol com queda na procura deste combustível. A retomada no seu uso ocorreu com a mudança na regulamentação de tributos para veículos flexíveis em 2002 (BASTIN; SZKLO; ROSA, 2010) resultando no início de produção de veículos *flex-fuel* a partir de 2003. Desde então esta motorização dominou o mercado brasileiro, com patamar atual próximo a 90% das vendas (ANFAVEA, 2018).

Apesar da regulamentação de emissões estar em curso desde os anos de 1980, a regulamentação para melhoria da eficiência energética só ocorreu em 2012 por meio do decreto presidencial 7812 daquele ano, estabelecendo a introdução do INOVAR-AUTO, programa para incentivo à inovação tecnológica e investimento em pesquisa e desenvolvimento (ICCT, 2015). Entre as metas estabelecidas pelo programa temos: o limite de consumo energético por peso de veículo e a exigência de etiquetagem veicular.

O programa de etiquetagem veicular foi estabelecido em 2008, como forma de incentivar a melhoria da eficiência energética dos veículos (MELO; JANNUZZI; SANTANA, 2018). Com a introdução da regulamentação para eficiência energética, as montadoras passaram a investir em tecnologias de propulsão e embarcada no intuito de redução do consumo de combustível. Esta regulamentação passou a vigorar a partir de 2013, com a avaliação da eficiência dos veículos vendidos em 2017 (POSADA; FAÇANHA, 2015). Como resultado, diversas tecnologias passaram a equipar os veículos produzidos no Brasil, bem como a oferta de novas tecnologias também em modelos importados, todas em prol da eficiência energética.

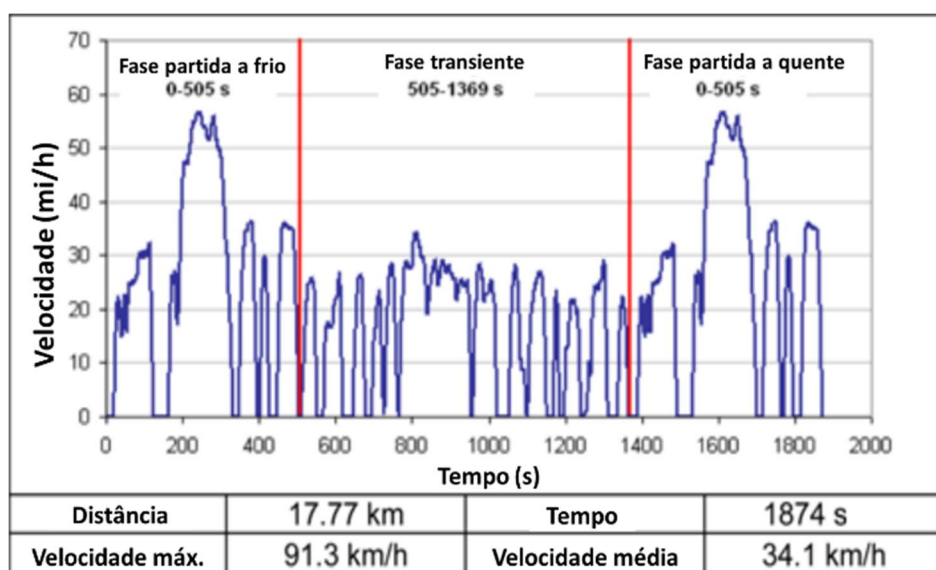
O Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV), coordenado pelo INMETRO, tem como método a comparação do consumo energético entre veículos da mesma categoria, a cada ano. Desta forma, se alguns modelos piorarem a eficiência, os demais ficarão com melhor

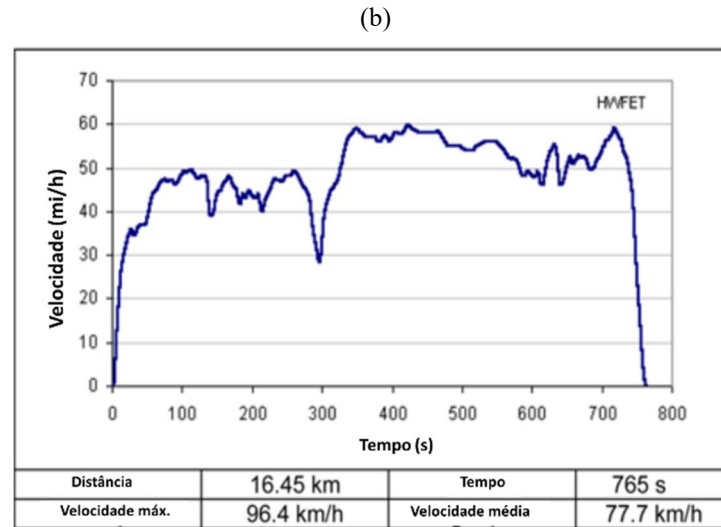
classificação, mesmo sem introduzir melhorias para aumento de eficiência energética (MELO; JANNUZZI; SANTANA, 2018). O PBEV foi potencializado com a regulamentação INOVAR-AUTO, por definir o uso das informações nas etiquetas como uma das metas do programa (CASA CIVIL, 2012). Desta forma, no final desta regulamentação, em 2017, todos os veículos participantes divulgaram as informações de consumo e emissão de CO<sub>2</sub>. O acesso às informações foram facilitadas ao público com a introdução do aplicativo para celular que permite verificar tanto o desempenho de cada modelo, quanto calcular o custo mensal com base no preço dos combustíveis, etanol e gasolina (PETROBRAS/CONPET, 2014). Para minimizar os efeitos da diferença entre o consumo oficial em laboratório e as condições reais de uso, o valor apresentado na etiquetagem tem uma elevação de 19%, para o ciclo urbano, e 27% para o rodoviário (NOGUEIRA; HOLLANDA, 2015).

Para o ensaio de consumo de combustível existem dois ciclos: urbano e rodoviário. O ciclo urbano é feito conforme norma Brasileira NBR 6601, o qual padroniza o ciclo de ensaio *Federal Test Procedure* (FTP-75), e o ciclo rodoviário é feito conforme NBR 7024, conforme o *Highway Fuel Economy Test* (HWFET). Durante os ciclos de ensaio pode ser feita a medição de consumo de combustível. O primeiro ensaio de medição é feito pelo ciclo urbano, o qual contempla a fase fria e partida a quente, seguido pelo ciclo rodoviário, conforme Figura 4 (ABNT, 2017).

Figura 4 – Ciclos de ensaios FTP-75 (a) e HWFET (b)

(a)





Fonte: (OH; CHA, 2015)

Os resultados apresentados na etiqueta de eficiência energética do veículo constam o consumo dos ciclos urbanos e rodoviário, abastecidos com etanol (E100) e gasolina (E22). Além destes valores são apresentados os consumos em ambos os combustíveis para o ciclo combinado, que pondera 55% para o ciclo urbano e 45% para o rodoviário, conforme NBR 7024. Além do consumo de combustível, a norma especifica o consumo energético para cada ciclo que é o quociente da densidade energética do combustível (MJ/L) pela autonomia em quilômetros por litro (km/L), expresso em megajoules por quilômetro (MJ/km) (ABNT, 2017).

Para os ensaios em dinamômetro devem ser inseridos os parâmetros de resistência ao deslocamento que tem como base a desaceleração ao rolamento. Este procedimento é realizado em pista plana, com valores de velocidade do vento, temperatura e pressão atmosférica conforme NBR 10312. A massa total não deve exceder 136 kg, incluindo o condutor. A medição começa com a desaceleração em 100 km/h, medindo a cada intervalo de 10 km/h até atingir 30 km/h. Estes valores dinâmicos da desaceleração servirão de base para o cálculo dos coeficientes de pista  $f_0$  e  $f_2$ . Estes coeficientes são aplicados no cálculo da força resistiva do dinamômetro (ABNT, 2019). Para os modelos equipados de fábrica com o sistema de ar condicionado em mais de um terço dos veículos, deve ser acrescido 10% nos fatores de carga do dinamômetro, conforme NBR 6601 (ABNT, 2012a).

As tecnologias para redução de consumo que não são detectadas por meio do ciclo de ensaio (*off-cycle*) em dinamômetro recebem crédito para fazer o ajuste. Segundo a resolução 74 de 2015 do Ministério da Indústria Comércio Exterior e Serviços (MDIC), as tecnologias *off-cycle* com direito a crédito em MJ/km são: sistema de desligamento em marcha lenta (*start-stop*), sistema de controle de grade frontal, indicador de troca de marchas (GSI - *Gear shift indicator*)

e Sistema de Monitoramento de Pressão de Pneus (TPMS - *tire pressure monitoring system* (MDIC, 2015).

### 2.1.3 Medições de emissões e consumo em dinamômetro de bancada

Em diversos estudos (DENG et al., 2018; ÍLHAK et al., 2020; IODICE et al., 2016; KIM; CHO; MIN, 2015; MELO; JANNUZZI; SANTANA, 2018) têm sido desenvolvidos testes com alimentação parcial ou total de etanol, para um melhor entendimento das emissões, consumo de combustível e torque dos motores. Alguns estudos utilizaram unidade de controle programável para melhoria dos parâmetros alvo do estudo. Foram identificaram diversos efeitos do etanol comparados com a gasolina como redução das emissões de poluentes como THC e CO, oscilações do NOx. Em função da menor capacidade energética, ao adicionar etanol na gasolina o consumo específico aumenta, porém melhora eficiência energética. Os ensaios realizados identificaram limitações na medição de emissões de THC do etanol por meio da chama ionizada (FID - *Flame Ionization Detector*) (MELO et al., 2012).

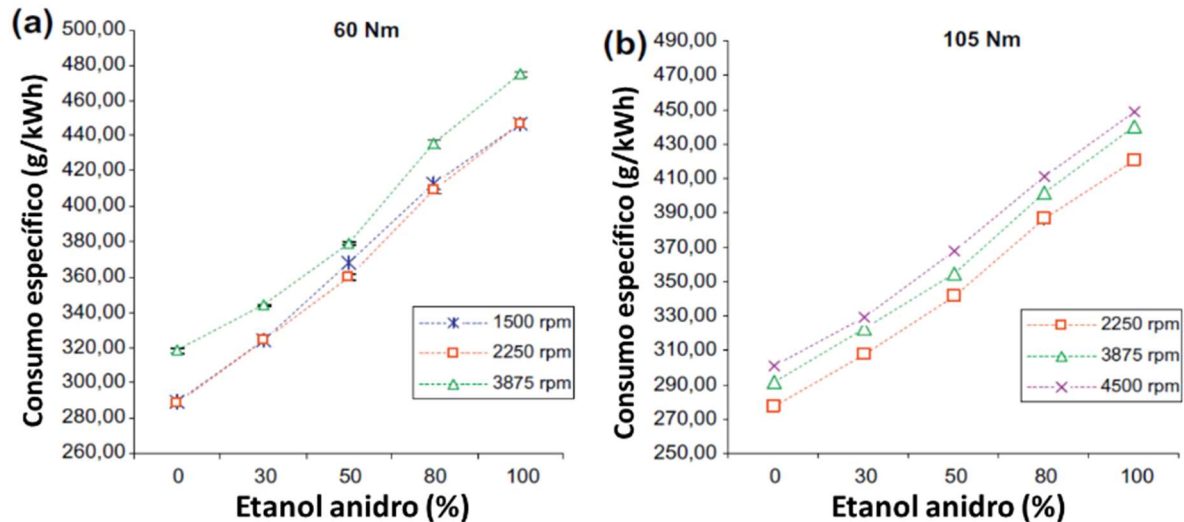
Para investigar as emissões de motor *flex* operando em várias faixas de trabalho, Melo et al. (2012) dosaram diversas proporções do etanol E100 na gasolina E22. Os testes foram realizados combinando a gasolina E22 com o etanol hidratado nas porcentagens de 30%, 50% e 80%, identificados como H30, H50 e H80. As características dos combustíveis, tais como densidade, octanagem e poder calorífico, foram medidos em laboratório. Em misturas acima de 80% etanol a temperatura de ebulição diverge das demais misturas e nesta condição o motor tem menor eficiência volumétrica e maior dificuldade de partida a frio. O motor opera sob o comando de uma unidade programável (*programmable one, model Motec M800*), testado em dinamômetro em condições controladas de temperatura e monitoramento de pressão. Os testes com cada combustível foram realizados com cargas parcial e alta (60 Nm e 105 Nm – de 120/122 Nm), com  $\lambda$  1 e 0,9, respectivamente. O avanço foi ajustado pelo limite de torque, conforme limiar de detonação. As emissões foram medidas antes do catalisador e as aquisições dos dados ocorreram dois minutos após a estabilização do modo de operação (MELO et al., 2012).

As medições realizadas por Melo et al. (2012) foram efetuadas por meio de equipamento *Fourier Transform Infrared Analyzer* (FTIR) e convertidas para g/kWh. Os valores de CO reduziram com o aumento de etanol em função do oxigênio no combustível que oxida este para CO<sub>2</sub>. Por outro lado, o CO<sub>2</sub> aumenta em função do crescimento no consumo. Com o aumento

da concentração de etanol, as emissões de THC diminuem e aumentam de aldeídos e etanol não queimado (MELO et al., 2012).

As medições de Melo et al. (2012) indicam aumento de consumo específico com o aumento de etanol na mistura em função do menor poder calorífico, conforme Figura 5.

Figura 5 – Consumo específico por volume de etanol



Fonte: (MELO et al., 2012)

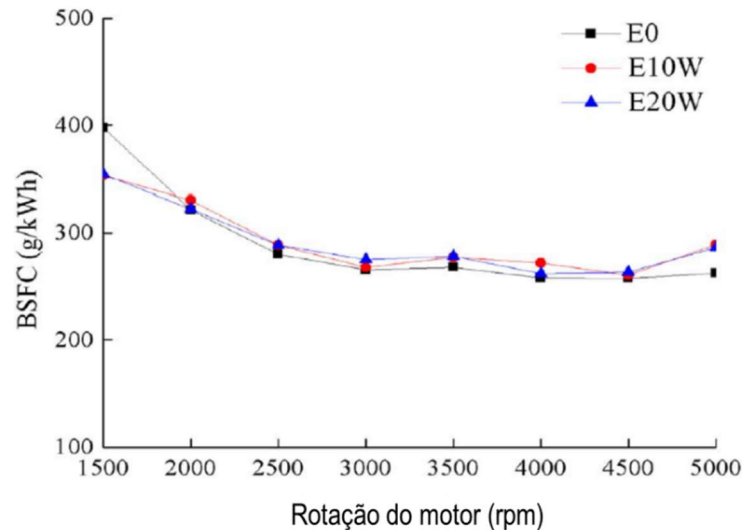
Para avaliar as emissões e nível de ruído, resultante da combustão de gasolina pura (E0), etanol hidratado a 5% adicionado em 10% e 20% na gasolina, Deng et al. (2018) utilizaram um motor 1.5L em dinamômetro. As medições foram feitas por meio de analisador de gases de passagem e medidor de consumo de combustível. As concentrações de NO<sub>x</sub>, HC e CO foram medidas por meio de detector quimioluminescente (*chemiluminescent detector* - CLD), detector por ionização de chama (*flame ionization detector* - FID) e infravermelho não dispersivo (NDIR - *nondispersive infrared*) para cada um dos gases. O ensaio foi feito com variação da rotação a cada 500 rpm (torque máximo a 4500 rpm e potência máxima a 6000 rpm), a plena carga, com medições dos poluentes, consumo específico, ruído, potência e torque (DENG et al., 2018). O consumo específico (*brake specific fuel consumption* - BSFC), verificado por (DENG et al., 2018) apresenta valor mais elevado em rotações mais baixas, conforme Figura 6.

O calor latente da vaporização do etanol hidratado pode baixar a temperatura na admissão, com melhora na eficiência volumétrica, permitindo ganho em potência e torque do motor. O ganho varia conforme a calibração da unidade de controle, ajustada para cada combustível, bem como as características construtivas do motor. Se for utilizado diferentes



combustíveis sem modificações no motor e na calibração, pouco será obtido de melhora com o uso de diferentes combustíveis (DENG et al., 2018).

Figura 6 – Comparação do BSFC com três combustíveis conforme rotação



Fonte: (DENG et al., 2018)

## 2.2 ENSAIO DE CONSUMO E EMISSÕES *REAL-WORLD*

O padrão de condução *real-world* tem uma definição técnica pouco delineada em função dos fatores envolvidos nas medições. O resultado do trajeto avaliado pode variar em função da temperatura ambiente, velocidade média e padrão de aceleração. Para reduzir o efeito destas, e outras, variáveis, o uso de uma base de dados ampla permite fazer uma análise da frota com significância estatística. As variações entre os métodos (oficial e real) podem ocorrer por segmento, combustível, tipo de transmissão e aplicação (TIETGE et al., 2017). Em função do ciclo de ensaio oficial em dinamômetro não representar adequadamente as condições reais de rodagem dos veículos e as respectivas emissões, foi estabelecido no início dos anos de 1990 o conceito de padrão de condução *real-world*. A razão para o uso deste conceito de rodagem real é pelo fato que a divergência entre as emissões oficiais, medidas em laboratório com base em ciclo padrão, e a condição real de condução resulta em subestimação das emissões da frota. Este efeito tem como consequência a degradação da qualidade do ar, mesmo diante de padrões mais restritivos de emissões estabelecido pela regulamentação (PATHAK et al., 2016).

Os veículos novos na Europa têm apresentado redução na emissão de CO<sub>2</sub> desde 2001, apesar do aumento na massa e potência, em função da regulamentação. A redução anual

aumentou em aproximadamente quatro vezes após 2008, após consenso nos limites permitidos. No entanto, diversas pesquisas têm indicado o aumento da divergência entre os valores de emissões de CO<sub>2</sub> oficial e *real-world* dos veículos de passeio. A preocupação desta diferença é pelo fato que os veículos são tributados por eficiência além de divergir o consumo real para o consumidor (TIETGE et al., 2017). Para gerar a informação oficial sobre o consumo de combustível são realizados ciclos de testes padronizados que simulam diversas condições de uso. Apesar do ciclo de teste tentar reproduzir as condições usuais de rodagem, o valor da etiqueta nem sempre representa totalmente a condição real de uso, apresentando variações na faixa de 15 a 20% abaixo do uso real (GREENE et al., 2017). O consumo de combustível está diretamente relacionado com as emissões de CO<sub>2</sub>, e os testes oficiais têm apresentado desempenho diferente ao veículo em uso, com variações de 11% a 42% em relação ao ciclo NEDC (TRIANTAFYLLOPOULOS et al., 2017).

O método de medição oficial feito em laboratório nem sempre reflete as condições reais de rodagem e padrão de manutenção dos veículos (KOUSOULIDOU et al., 2013; ZHANG et al., 2014) e o consumo de combustível e respectivas emissões tem resultado proporcional ao modo de condução e topografia das vias (WANG et al., 2008). A medição de emissões de CO<sub>2</sub> é realizada por meio do ensaio oficial, com base no padrão do ciclo de ensaio utilizado pelo país. O consumo de combustível pode ser calculado por meio do balanço da massa de carbono, dos gases emitidos (CO, CO<sub>2</sub> e HC) durante o ciclo de ensaio. A emissão de CO<sub>2</sub> está diretamente relacionada com o consumo do veículo, e a meta de emissões de carbono tem sido cumprida pelos países. A Europa, por exemplo, atingiu o limite antes do prazo legal de 2015, e continua a reduzir estes valores. Por outro lado, estudos e pesquisas (DUARTE et al., 2015; DUARTE; GONÇALVES; FARIAS, 2016; ZHANG et al., 2014) indicam aumento na divergência de emissão de CO<sub>2</sub> e consumo de combustível em até 40% entre teste *real-world* e ensaio oficial (FONTARAS; ZACHAROF; CIUFFO, 2017). Além destas constatações, existem avaliações que indicam divergência por volta de 15% dos valores oficiais declarados, o que significa que realizando o mesmo ciclo de ensaio em dinamômetro o valor identificado está acima do valor oficial declarado (FONTARAS; ZACHAROF; CIUFFO, 2017). O teste de emissões em rodagem é feito por meio de sistemas de medição de emissões portáteis (*portable emissions measurement system* -PEMS) que mapeia os valores durante o ciclo de medição. Os valores de emissões em rodagem variam em função do tipo de trajeto, inclinação de via e trânsito, temperatura ambiente e o modo de condução (GALLUS et al., 2017).

A medição feita por meio de PEMS permite levantar os padrões de emissões *real-world*, a qual retrata condições operacionais reais de uso dos veículos (KOUSOULIDOU et al., 2013).

O conceito de condução *real-world* é um termo genérico que engloba as diversas condições de rodagem como a forma de condução, características da pista (condição de carga) e condições ambientais (TIETGE et al., 2015), além das condições dinâmicas e aerodinâmicas dos veículos.

As divergências entre os dois métodos são apontadas pelo padrão de teste em laboratório variar da condição real, pela otimização dos veículos em teste oficial e pelo estreitamento dos controles de emissões para cumprir o teste oficial. Para reduzir este efeito, a regulamentação europeia traz o novo ciclo de teste WLTP e a medição em rodagem com PEMS. Alguns mercados começaram a usar o PEMS em algumas aplicações. Os EUA, por exemplo, liberaram o uso do PEMS para avaliação de particulado em veículos pesados em 2005, e a China está trabalhando para o uso deste método nesta categoria de veículos (YANG et al., 2016).

A introdução do controle de emissões de CO<sub>2</sub> na Europa iniciou em 1995, com efeito da primeira meta em 2008, mas de forma voluntária. Para o cumprimento das metas de emissões de CO<sub>2</sub>, estima-se que 10g CO<sub>2</sub>/km foi atingida por medidas suplementares do ciclo, como por exemplo, o indicador de troca de marchas. Este tipo de exigência tem mudado o perfil do veículo europeu que passou a receber motores menores, com maior potência, mas o peso médio da frota tem se mantido. Além destas soluções, combustíveis alternativos como o etanol, gás natural, entre outros, tem se despontado, mas ainda com volume de vendas total abaixo de 3% (FONTARAS; ZACHAROF; CIUFFO, 2017).

Comparando os dados oficiais do ciclo Europeu NEDC com diferentes ciclos testados em algumas regiões da Europa foram identificados valores superiores nestes ciclos. Alguns estudos conduzidos pela Comissão de Pesquisa Europeia aplicaram o ensaio *real-world* e identificou um aumento no consumo de combustível sobre os dados oficiais entre 10 e 15% nestes ensaios. Diante desses resultados foi elaborado um ciclo de condução que represente melhor as condições reais de rodagem, o WLTP que proporciona um novo padrão de rodagem (DUARTE; GONÇALVES; FARIAS, 2016). O ciclo de ensaio visa reproduzir as condições de rodagem real, mas nem sempre atende esta demanda. Além das características limitantes do ciclo, outros fatores de influencia que ocorrem no *real-world* e não são mensurados, como: carga adicional transportada, uso do ar condicionado, modo de condução, partidas a frio, trânsito, alta velocidade e outros. Visando aproximar as condições do ciclo oficial, a comunidade europeia adotou, em 2017, o novo ciclo WLTP, mas mantendo os limites de emissões, e migrando os padrões do ciclo NEDC somente em 2020 (FONTARAS; ZACHAROF; CIUFFO, 2017).

Os ensaios realizados pelo ciclo NEDC são conhecidos por se tratar de um ciclo de baixa carga, com variações em relação ao ciclo de condução *real-world*. Ensaios feitos na

comunidade europeia com PEMS identificou uma diferença de 21% (+/-9%) nos valores de CO<sub>2</sub> acima aos dados oficiais, ciclo NEDC, e 15% (+/-10%) no caso de ensaio NEDC em laboratório comparado aos dados de certificação. Outros comparativos feitos na comunidade apontam uma divergência entre 10 e 15% nos valores de consumo, de veículos a gasolina, entre parâmetros *real-world* e ensaio oficial (DUARTE et al., 2015). Além da legislação Euro, para a redução dos poluentes, as metas para a redução de emissões de CO<sub>2</sub> para 130 g/km, em 2015, trouxeram benefícios nas tecnologias de propulsão dos automóveis. (FONTARAS et al., 2014).

Com base em avaliações realizadas na comunidade europeia, os veículos apresentaram uma redução média de 15% do consumo de combustível, mas quando levado em consideração as condições reais de rodagem, esta melhoria ficou limitada a 2%. A medição oficial é realizada em dinamômetros, com base em um ciclo de ensaio para auferir o consumo de combustível e emissões de CO<sub>2</sub>. Condições reais (*real-world*) tem como fatores adicionais tais como o estilo de condução, tipos de vias, resistência ao rolamento e a aerodinâmica veicular, resultando em valores de consumo superior em relação ao ensaio de laboratório. Com base em comparações efetuadas em seis países europeus, envolvendo mais de meio milhão de automóveis, a diferença entre as medições ficou em 40%, em 2014 (TIETGE et al., 2015).

Para avaliar a influência no modo de condução e inclinação da via sobre as emissões, Gallus et al. (2017) investigaram estes efeitos usando os parâmetros de inclinação do mapa viário (Google). A medição CO e CO<sub>2</sub> foi feita por meio de infravermelho não dispersivo (*Non-Dispersive Infra-Red*) e NO<sub>x</sub> por alinhamento ultravioleta não dispersivo (*Non-Dispersive Ultra-Violet alignment*). Para a medição da vazão do escapamento foi utilizado um medidor de fluxo (*Exhaust Flow Meter* - EFM) e medição da velocidade do veículo. O tubo de amostragem foi aquecido para evitar a condensação do HC. O veículo recebeu peso adicional em função das baterias, garrafas com hidrogênio e sensores para medição das condições climáticas. Os dados da unidade de controle do motor foram adquiridos por meio do dispositivo VN1610 (*Vector Informatik GmbH, Stuttgart, Germany*). Os testes foram realizados em dois veículos Diesel e os valores de CO e HC a frio foram descartados. O teste foi feito na Alemanha, com distância total de 86 km, e velocidades máxima de 50 km/h na cidade, em torno de 70 km/h em ciclo rural e 100 km/h como velocidade máxima. O teste iniciou com partida em temperatura ambiente. Foram usados três estilos de condução: leve, médio e esportivo. Para identificar o estilo de condução foi utilizada a aceleração e as velocidades subsequentes. A inclinação das vias foi dividida em segmentos de 100 m e usada a regressão linear com todos os parâmetros dos testes (GALLUS et al., 2017).

Em função das divergências entre ensaios, as novas tecnologias para a redução de consumo estão ficando menos atrativa ao público que procura por soluções mais baratas que atendam sua necessidade. Os dados de consumo do programa de etiquetagem acabam sendo afetados por estas variações, podendo variar tanto para mais como para menos o valor de consumo real medido pelos usuários quando abastecem os veículos. A divergência entre os valores oficial e real tem diversas causas que vão desde o modo de condução, passando pelo nível de manutenção do veículo chegando até à influência das condições climáticas e características das vias (FONTARAS; ZACHAROF; CIUFFO, 2017), como a inclinação, e consumo dos acessórios embarcados (TRIANTAFYLLOPOULOS et al., 2017).

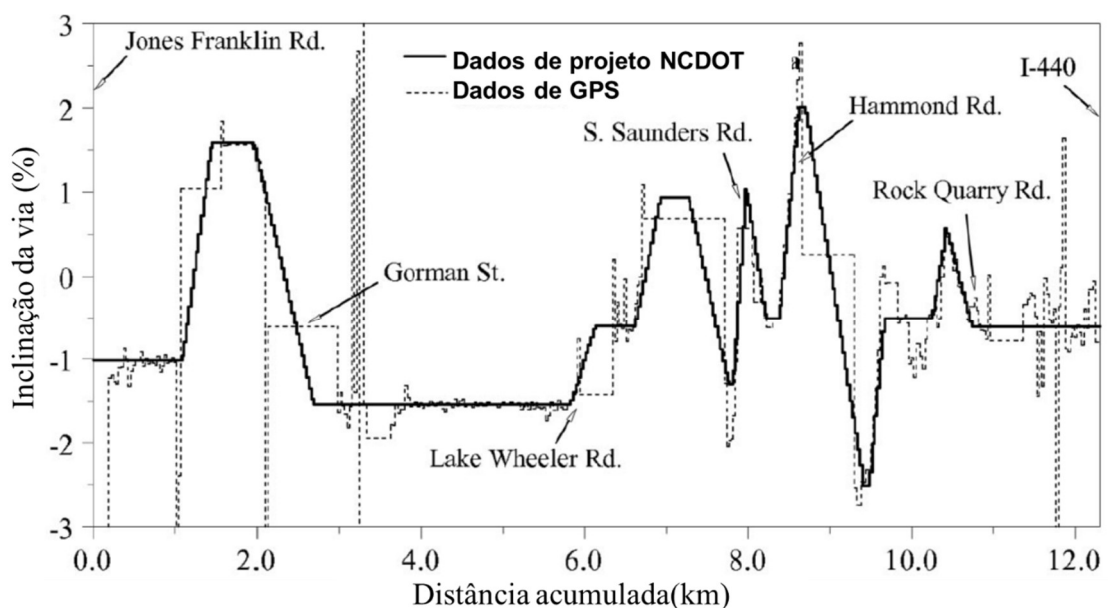
### **2.2.1 A precisão dos parâmetros de GPS na medição *real-world***

O equipamento PEMS com o GPS é instalado no veículo e realizada medições a cada segundo das emissões e do posicionamento. Os dados de posicionamento por satélite são posteriormente tratados por meio de vinculação ao modelo de elevação para calcular a inclinação de pista e os valores de velocidade e aceleração do veículo. Para vincular os parâmetros de posicionamento, os dados armazenados pelo GPS devem ser importados em um programa GIS (*Geographic Information System*) para ajustes de latitude e longitude do GPS, de forma a corrigir os valores de inclinação de pista (WYATT; LI; TATE, 2014).

A aquisição de dados em rodagem conta com informações do sistema de diagnóstico de bordo OBD do veículo e parâmetros de posicionamento do GPS. Os valores de distâncias provenientes do GPS têm boa resolução, mas a inclinação não oferece a mesma precisão. Como o fator de inclinação tem relevância no cálculo VSP, o uso embarcado de giroscópios e informações de modelos digitais de elevação (*digital elevation models - DEM*) tem contribuído no ajuste dos valores reais da inclinação das vias. Estas correções melhoram os parâmetros *real-world* e seus efeitos nas emissões. A inclinação afeta as emissões tanto de gases de efeito estufa, CO<sub>2</sub>, como de poluentes, CO, HC e NO<sub>x</sub> (SENTOFF; AULTMAN-HALL; HOLMÉN, 2015). Para cada trecho tem que ser registrado um segmento, e ajustada a distância para o valor real; corrigida a inclinação conforme as posições de altitude do GPS; e quantificada a precisão da inclinação. Cada trecho não deve ser muito curto para evitar erro aleatório do GPS de pontos curtos, também não muito longo para que as variações da inclinação não sejam atenuadas. A distância percorrida varia conforme a velocidade do veículo em cada trecho medido pelo GPS, em função do intervalo fixo de tempo de aquisição de 1 Hz (BOROUJENI; FREY, 2014).

Os dados de coordenadas e altitude do GPS podem ser integrados ao PEMS para os cálculos de consumo. Desta forma é necessária uma precisão mínima do GPS, preferencialmente o uso de dados pós-processados. A precisão dos valores de rampa pode ser melhorada com a repetição do circuito de rodagem. Outra forma de aumentar a precisão é o uso de GPS combinado com analisador de rodagem dotado de acelerômetros e giroscópios, mas este teste tem custo mais elevado e demanda mais tempo para ser realizado. A Figura 7 apresenta a comparação de inclinação das vias por meio de base de dados provenientes de GPS e dados de projeto (*design drawing data*) da construção das rodovias. O uso de dados de projeto pode ter algumas imprecisões caso ocorram modificações (*as-built*) sem que estas sejam atualizadas na base de dados (ZHANG; FREY, 2006).

Figura 7 - Comparação de inclinação de vias por meio de dados de GPS e dados de projeto



Fonte: (ZHANG; FREY, 2006)

Outra forma de mapeamento preciso da topografia da região é pelo método de medição por meio de *Light Detection And Ranging* (LIDAR). O processo é feito por meio de um sensor LIDAR instalado em um avião com GPS, para posicionar o sensor laser, e o posicionamento é corrigido por meio de estações GPS no solo. Este método oferece um mapeamento preciso da inclinação das vias mapeadas. Os pontos obstruídos por árvores e viadutos são tratados em pós processamento dos dados (ZHANG; FREY, 2006).

A medição de inclinação por meio de acelerômetros e inclinômetros a bordo do veículo tem muito ruído em função do balanço da suspensão, o que leva a medições inconsistentes. Desta forma, as medições por GPS permitem levantar os valores de inclinação de pista e posicionamento de uma forma mais simples e sem estas influências, em função da referência de medição estar fora do veículo (BOROUJENI; FREY, 2014). Se a vinculação dos pontos de medição do GPS for feita com base em referências de medição LIDAR, com modelagem digital de terreno do local de rodagem, é possível realizar os cálculos de inclinação com maior precisão e menor interferência de oscilações dos parâmetros de GPS (WYATT; LI; TATE, 2014).

As medições verticais, para o cálculo da inclinação de pista, podem apresentar erros significativos no caso de mudanças das observáveis dos satélites e em locais com baixo sinal de GPS em função de obstruções por túneis, árvores ou edificações (BOROUJENI; FREY, 2014). A imprecisão na medição da inclinação de pista afeta amplamente os resultados de consumo pelo método de potência específica veicular (*Vehicle Specific Power - VSP*) em função da condição de rampa ter um peso elevado na ponderação do cálculo de consumo de combustível do automóvel (WYATT; LI; TATE, 2014).

Os dados de GPS são utilizados para os cálculos de VSP e estresse do motor (ES), porém os dados de inclinação das vias devem ser baseados no DEM em função da imprecisão do GPS. A medição de velocidade por meio de GPS de baixa frequência tem como limitação não detectar alguma variação de velocidade, o que interfere na precisão do cálculo de emissões. O comportamento de condução é baseado em veículos monitorados, e para os demais veículos circulando na via é considerado comportamento semelhante. Para o monitoramento com várias faixas de rolagem, as distâncias percorridas pelos veículos que se encontram em diferentes faixas das vias em uma curva devem ser compensadas. Para calcular as emissões, a taxa de veículos por nível tecnológico deve ser ponderada para representar tanto a tecnologia de emissões como o peso do veículo. A velocidade média neste tipo de monitoramento pode ser calculada por meio da fusão dos dados de GPS e sensores instalados na pista (CHANG et al., 2013).

As medições de Gallus et al. (2017) identificaram forte correlação entre variação do CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> em relação à inclinação da via. Inclinação significa vias com 1% ou mais de desnível, portanto a precisão mínima é de 0,5%. Variando a inclinação para até 5%, nos três circuitos de rodagem o CO<sub>2</sub> apresentou aumento em trechos com subida, elevando em 81% no ciclo urbano, pior dentre os três circuitos. No caso do NO<sub>x</sub>, o circuito rural apresentou a maior variação, com aumento de 115%. Essas variações são em relação aos valores das vias urbanas sem inclinação. O aumento dessas emissões em vias com mais de 1% de inclinação ocorre pela

elevação no torque em três vezes, repercutindo em três vezes mais potência do motor. Para a análise de correlação com a inclinação os autores utilizaram somente acelerações variando entre  $\pm 0,1 \text{ m/s}^2$ , de forma a assegurar que as variações tenham ocorrido em função de inclinação da via e não por outros fatores (GALLUS et al., 2017).

Os valores de altitude calculados por Gallus et al. (2017) são cumulativos, que representam a somatório das variações de altitude. A diferença entre os valores acumulados do GPS foi de 33 a 45% maior que o mapa (Google). Uma inclinação de 1% da via equivale a uma aceleração de  $0.0981 \text{ m/s}^2$ . Os autores identificaram que a inclinação das vias representou 25% da aceleração do ciclo total (GALLUS et al., 2017).

### **2.2.2 O método e a regulamentação para os testes *real-world***

Os valores de emissões medidos com base nos ciclos de teste em dinamômetro apresentam divergência em relação aos encontrados em RDE, introduzido no Euro 6c em 2016. O RDE demanda que as emissões de NOx e MP não excedam os limites em um ciclo usual de rodagem (GALLUS et al., 2017). O *Worldwide harmonized Light-duty Test Procedure* (WLTP) foi introduzido no mercado europeu em substituição ao *New European Driving Cycle* (NEDC) no intuito de representar melhor as condições reais de uso (GALLUS et al., 2017; TRIANTAFYLLOPOULOS et al., 2017). Para levantar parâmetros exatos de emissões de um veículo só é possível medir por meio de PEMS (DUARTE et al., 2015) e mesmo com a evolução destas sistemas, as emissões coletadas por meio de PEMS, em ciclos fora do padrão oficial, apresentam valores que superam aos apresentados pelo ensaio oficial (FONTARAS et al., 2014). Além dos parâmetros de emissões, são coletados parâmetros da dinâmica veicular, dados do motor, e condições de carga em função da topografia (DUARTE et al., 2015).

Em função destas discrepâncias, a regulamentação europeia estabeleceu a medição de emissões reais em rodagem, RDE, como complemento ao processo de medições em laboratório. O procedimento de medição é feito por meio de PEMS em vias públicas com variações na condução de forma aleatória, incluído trechos urbano, rural e rodoviário (GIECHASKIEL et al., 2016). A regulamentação europeia 427/2016 estabeleceu um roteiro para o desenvolvimento de ensaio para emissões em condições reais de rodagem, RDE, de forma que parâmetros de condução precisam ser respeitados em cada um dos três modos definidos (COMMISSION, 2016a). O primeiro trajeto é o modo urbano, com limite de velocidade de 60 km/h, e deve consumir entre 29 e 44% do trajeto total do ciclo. O tempo total de teste deve ocorrer entre 90 e 120 minutos. Para otimizar o circuito RDE nos padrões estabelecidos pela União Europeia



(UE), Donateo e Giovinazzi (2017) simularam um percurso que apresentasse a mínima distância, mas seguindo a regulamentação UE 2016/427. O estudo resultou em um percurso de 63,5 km, com duração de 91 minutos, com dois terços do tempo total no ciclo urbano (DONATEO; GIOVINAZZI, 2017).

Conforme Regulamentação da Comissão, o ensaio para teste RDE deve ser realizado em via pública, em dias úteis para representar a condição real de uso. O tempo de condução deve ser dividido em torno de 34% urbano (u), 33% rural (r) e 33% em estrada (m), com percurso mínimo de 16 km para cada trajeto. As velocidades devem ser: até 60 km/h no trajeto urbano, entre 60 km/h e 90 km/h no rural e acima de 90 km/h nos testes em estrada, limitado a 145 km/h, podendo superar por somente 3% do tempo a esta velocidade. A distância mínima em cada trajeto deve ser de 16 km. O local para o teste é considerado de altitude moderada até 700 m acima do nível do mar e até 1300 m é classificado como altitude estendida e não deve variar mais de 100 m entre o início e o fim do teste. A temperatura entre 0 e 30°C é a faixa considerada moderada. Durante a rodagem urbana, a velocidade média deve ficar entre 15 e 30 km/h, as paradas não serem muito longas e devem ficar abaixo de 10% do tempo. Após iniciado o teste não pode ser interrompido, podendo desligar o motor, mas sem interromper a aquisição de dados. As emissões de partida a frio ficam registradas, mas são excluídas das avaliações. A fase fria termina a partir dos 70°C ou até 5 minutos de funcionamento (COMMISSION, 2016a). Durante a rodagem, estes limites de aceleração, velocidade, temperatura e altitude são estabelecidos para assegurar representatividade dos parâmetros. Após os testes os dados eram analisados por meio de dois métodos: janelas de média móvel (*moving averaging windows* - MAW) e grupos de potência. A variação esperada entre os métodos era limitado em 10% (GIECHASKIEL et al., 2016).

O PEMS deve utilizar fonte de energia própria, e não a do veículo, adicionar o mínimo de peso ao veículo, medir a concentração de gases de escapamento, e a massa emitida, e monitorar os dados de trajeto por GPS. A coleta de dados deve ter uma frequência mínima de 1 Hz e os dados da unidade de controle eletrônica (ECU – *electronic control unit*) deve ter a frequência elevada para adequação da amostragem. A altitude pode ser medida por GPS ou sensor de pressão e pode ser comparada com o modelo digital do terreno (DEM) e ao identificar variações acima de 40 m o valor deve ser corrigido. O trajeto medido pelo GPS não deve apresentar desvio superior a 4% em relação a uma referência (COMMISSION, 2016a). As emissões devem assegurar ao menos a medição dos poluentes CO e NOx e do valor de CO<sub>2</sub> para verificar a agressividade na condução. A vazão dos gases deve ser medida para assegurar o cálculo da massa dos gases e deve ser usado um GPS para registrar os dados de deslocamento

do veículo. O ar condicionado e outros acessórios podem ser usados conforme condições habituais. O peso do PEMS mais um passageiro gira em torno de 150 kg, podendo a carga atingir até 90% da capacidade do veículo. Deve ser efetuado um ensaio de teste oficial antes e após a rodagem com o PEMS em dinamômetro e avaliada a variação entre os valores emitidos (g/km) entre os instrumentos (GIECHASKIEL et al., 2016).

Os dados da unidade de controle devem ser aquisitados, mas somente para verificação das condições de funcionamento do veículo. Se optar por medir o HC, as amostras devem ser aquecidas a 190°C. A taxa máxima de vazamento dos gases de escapamento é de 0,5%. Os dados de velocidade provenientes de diferentes fontes, como o GPS e ECU, devem ser sincronizados para a análise. Os parâmetros de referências para os cálculos, seja de potência ou CO<sub>2</sub>, usam ensaio em dinamômetro, com preferência ao WLTC. Os valores de emissões específicas, da massa por distância percorrida, devem ser comparados entre o PEMS e a medição em laboratório e ficar dentro das tolerâncias admissíveis, conforme quadro no item 3.3 do anexo 3 no regulamento 2016/427 (COMMISSION, 2016a). Antes do teste, o PEMS deve ser estabilizado por 40 min e a temperatura deve ser assegurada de ao menos 60° C para evitar condensação. Os gases de medição em ensaio de rodagem devem ser calibrados por meio de gás padrão, com a garrafa emitindo os gases a 1 bar, devendo ser usado ao menos o NO<sub>x</sub> e o CO<sub>2</sub>. Mesmo com o veículo desligado durante o ensaio de condução, o PEMS não deve parar de medir e esta condição não deve superar 1% da viagem completa. Perda de sinal ou falha no PEMS devem ser registradas. Os dados via OBD são registrados para o cálculo de emissões em g/kWh. As acelerações devem manter um padrão moderado sem apresentar condução agressiva ou muito branda. A inclinação positiva durante o teste deve ser registrada e deve ficar abaixo de 1200 m/100 km. Ao final do teste, desligar o motor e registrar os dados por 20 segundos, devendo logo a seguir fazer nova calibração no PEMS e verificar a variações dos padrões. Os dados registrados e medição devem cumprir ao menos 99% de validade e ao menos 90% da calibração. Também devem ser verificados os dados instantâneos de umidade e temperatura (GIECHASKIEL et al., 2016).

Os dispositivos de medições e sensoriamento não devem interferir no desempenho do veículo e possuírem precisão, comprovada pelo fabricante, conforme o quadro no item 3.2 do apêndice 2, do regulamento 2016/427. Os valores obtidos por meio do PEMS também devem estar dentro da tolerância, seja para os gases emitidos ou para a distância percorrida. Os limites de cada parâmetro devem seguir os valores do Quadro 1 do apêndice 3 do regulamento. A sonda para a coleta de gases do escapamento não deve alterar a pressão do escapamento de maneira que possa influenciar nas medições (COMMISSION, 2016a).

### 2.2.3 Monitor de consumo de combustível a bordo

Em função das divergências recorrentes entre as emissões de CO<sub>2</sub> medidas durante o teste oficial e os valores identificados em rodagem, a Comissão da União Europeia estabeleceu a introdução de monitoramento de consumo de combustível e energia a partir de 2020 (KÖCK, 2019). Conforme regulamentação Comissão (Europeia) 2018/1832, de 5 de novembro de 2018, definiu-se a aplicação de dispositivo para o monitoramento do consumo de combustível (ou energia elétrica). Este conceito é identificado como ‘Dispositivo de Monitorização do consumo de combustível e/ou de energia a bordo’ (*‘OBFCM device’ - On-board Fuel and/or Energy Consumption Monitoring Device*). Este dispositivo representa qualquer elemento instalado no veículo (a bordo) para armazenar os valores de combustível ou energia consumidos por meio de tecnologia baseada em software e/ou hardware e pode utilizar os parâmetros do veículo (COMMISSION, 2018).

O valor registrado a bordo não deve divergir em mais de 5% em relação ao valor medido em laboratório e limitado em 3% a variação em relação ao valor levantado por meio de fluxo de combustível. Os parâmetros serão armazenados pela unidade de controle, durante toda a vida do veículo, conforme padrão estabelecido pelo OBD, porém, os parâmetros de controle ainda não foram definidos (KÖCK, 2019). O valor do ciclo de vida a bordo do veículo representa a vazão de combustível até o momento de verificação desde o final da produção do veículo. Este valor exige o registro da distância percorrida. O dispositivo deve registrar a bordo valores referentes ao ciclo de vida que incluem, além da distância, a vazão de combustível do motor em gramas por segundo e litros/hora, bem como a velocidade (COMMISSION, 2018).

Atualmente a ECU tem informações do consumo de combustível, mas não acessível via comunicação OBD. As medições via ECU têm utilizado uma frequência de 100 Hz para melhor resolução principalmente em faixas transientes (KÖCK, 2019). Para avaliar a dispersão dos valores de consumo de combustível entre o consumo real e os métodos de medição, Köck (2019) comparou três métodos: balanço de carbono; consumo de combustível via ECU; e medidor de combustível. Cada um dos métodos apresenta alguma incerteza, mais acentuada por meio da ECU e com menor variação pelo medidor de fluxo. Durante o processo de combustão ocorre a queima dos compostos do combustível, hidrogênio e carbono, por meio da combinação estequiométrica com o oxigênio do ar admitido. Desta forma o carbono de entrada do combustível é levado para o escapamento após a combustão, compondo assim o balanço de carbono. A medição pela ECU incorre em imprecisões que variam entre +/- 5% em relação ao

balanço de carbono que também possui imprecisão. A medição de consumo de combustível demanda maior atenção na fase transiente (KÖCK, 2019).

Em medição por meio de ECU em sistema por *Gasoline Direct-Injection* (GDI), Köck (2019) identificou um desvio na faixa de 6,8% para menos, valor que não atenderia a legislação. A medição por meio de instrumento para medição da vazão do combustível usualmente é aplicada para verificar o consumo em comparação com outros métodos além de servir como referência para estes. O instrumento precisa atender ao nível de pressão e temperatura do combustível, bem como à faixa de vazão imposta pelos diversos regimes de operação do motor. Dentre as tecnologias de medições, podem ser citadas: pelo método de vibração; e deslocamento de pistão e engrenagens, sendo a segunda tecnologia a mais indicada para ensaios em rodagem. Os dispositivos de medição não devem influenciar no funcionamento do sistema de combustível, incluindo a vazão e temperatura. Existem instrumentos com tecnologia (*PLUtron Fuel Flow Meter*) para medir pelos métodos gravimétrico e volumétrico, com monitoramento de pressão e temperatura (KÖCK, 2019).

Veículo híbrido também deve armazenar estes parâmetros além do consumo de energia em quilowatts hora. Os dados devem ser armazenados em memória que sejam preservadas sem a alimentação, a partir de 2022. No caso de troca da unidade de controle os valores devem ser transferidos. A precisão deve ser de mais ou menos 5% (com precisão de 3 casas decimais, 0,05) que resulta do quociente entre a diferença do valor consumido no ensaio WLTP e o dispositivo dividido valor consumido no ensaio WLTP (COMMISSION, 2018). A comunidade europeia passou a exigir o dispositivo OBFCM para verificar a precisão dos dados de rodagem de veículos híbridos em relação ao ensaio em laboratório. Os monitores relevantes são verificados em ensaios em dinamômetro para verificar a elevação das emissões causadas. O aumento na complexidade do monitoramento de aumento de emissões, em veículos que combinam propulsão elétrica e a combustão, tem levado ao processo de simulação de falhas na fase de desenvolvimento visando assegurar o monitoramento destes sistemas (RAJAN et al., 2018).

### 2.3 MÉTODOS PARA SIMULAR AS EMISSÕES E CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

O desenvolvimento de metas de eficiência energética usa como referência os parâmetros limites com base no conceito de média corporativa. A meta estabelecida é baseada em análise estatística do mercado, com ponderação das emissões conforme o volume de modelos comercializados. Este método é usado por não ser possível que cada veículo cumpra a meta de

CO<sub>2</sub> em função do mercado demandar diferentes tipos de veículos para satisfazer as expectativas e necessidades do público. Visando aprimorar os parâmetros de previsão, diversos estudos estabeleceram métodos para analisar alguns cenários sobre o consumo de combustível. As ferramentas vão desde programas para simular as condições de uso dos veículos, testes em laboratórios chegando a rodagem *real-world*, para representar a condição real de uso (OH et al., 2016). Para melhor entendimento nos modelos baseados em simulação, a seção 2.3 traz diversos estudos e métodos para simulações de consumo energético e emissões.

### 2.3.1 Método VSP - *Vehicle Specific Power*

O padrão de condução tem influência direta nas emissões, mas fatores dinâmicos e construtivos dos veículos também têm relevância nas emissões. Fatores dinâmicos como velocidade e aceleração, aspectos construtivos como o tipo de motor e as tecnologias utilizadas, bem como condições ambientais e características da via têm influência das emissões instantâneas. O VSP resulta da energia consumida do sistema de propulsão do veículo com base na velocidade, aceleração e inclinação da via, mas também pondera a aerodinâmica do veículo (RODRÍGUEZ et al., 2016).

O *International Vehicle Emissions* (IVE) se aplica na previsão das emissões, monitora a evolução e permite o planejamento sobre o padrão de uso dos veículos. O modo de condução tem ampla influência neste cálculo, pois envolve a dinâmica do veículo que afetam as emissões. O IVE é baseado em dois parâmetros, o VSP e o estresse do motor. O valor do VSP (kW/ton) contempla parâmetros dinâmicos que dependem da velocidade, aceleração e inclinação da via, conforme Equação 2 (POURESMAEILI; AGHAYAN; TAGHIZADEH, 2018):

$$VSP = V \times [1,1 \times a + 9,81(\tan(\text{sen}(incl))) + 0.132] + 0,000302 \times V^3 \quad (2)$$

Sendo  $V$  a velocidade (m/s),  $a$  a aceleração (m/s<sup>2</sup>) e  $incl$  que compara a diferença de altitude [m] a cada segundo, dividido pela variação da velocidade no mesmo intervalo de tempo. O modo de condução é um dos principais fatores de influência no consumo, mas as condições de uso têm participação nos resultados. Entre estas condições temos o efeito da temperatura de operação que modifica o consumo, assim a partida a frio eleva o gasto de combustível. A qualidade e tipo de combustível e as condições ambientais também influenciam as emissões (POURESMAEILI; AGHAYAN; TAGHIZADEH, 2018).

O ciclo de condução *real-world* deve resultar em sequências de velocidade que melhor represente a localidade analisada. As informações do ciclo associada à energia demandada é

possível estabelecer os *bins*. Estes parâmetros combinados com o estresse motor representam a carga do motor. O bin negativo significa desaceleração ou descida. Para o cálculo dos *bins* é necessário agrupar os veículos de testes conforme características com influência no cálculo. Os veículos devem ser separados pela categoria (comerciais, por exemplo), tipo de combustível e tecnologia de controle de emissões (RODRÍGUEZ et al., 2016).

A metodologia VSP também foi conduzida por Duarte, Gonçalves e Farias (2016) para identificar o comportamento de emissões e consumo de veículos em condições rodagem, testes *real-world*. Foram efetuadas medições das emissões de CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, HC e NOx em 16 veículos, com o uso de PEMS, com coleta de dados de emissões a cada segundo, além de integrar parâmetros da unidade de controle via comunicação OBD II e um GPS para aquisição das informações de altitude, posicionamento e velocidade. Os veículos testados são equipados com diversas tecnologias para o aumento de eficiência energética como: o sistema *start-stop* (desliga o motor na marcha lenta), comando de válvulas variável (VVT), turbocompressor, veículo híbrido entre outras. Outro estudo conduzido por Duarte et al. (2015) utilizou veículos Euro 5 equipados com as principais tecnologias dos veículos europeus, e o ensaio de rodagem foi feito em Lisboa, com o uso de PEMS, seguindo duas rotas, uma combinando urbano, rural e rodovia e uma segunda somente urbana. Ambos realizaram a análise dos dados por meio da metodologia VSP que utiliza parâmetros dinâmicos do veículo e topografia das vias para o cálculo de consumo energético (DUARTE; GONÇALVES; FARIAS, 2016), permitindo comparar as taxas de consumo e emissões diante de qualquer ciclo de condução (DUARTE et al., 2015). O VSP permite estimar o consumo de combustível com base nos parâmetros de condução (WANG et al., 2008). A proposta de Duarte et al. (2015) foi desenvolver uma metodologia que forneça consumo de combustível e emissões, independente da tecnologia do veículo, com base em dados públicos de certificação. Estes dados são aplicados na metodologia VSP e resultam em um modelo que permite calcular o consumo dos veículos com qualquer tecnologia de propulsão a combustão, sem a necessidade de fazer uma medição em rodagem.

Outro estudo para avaliar esta divergência crescente entre medição em rodagem e em laboratório foi realizado por Zhang et al. (2014). Os autores efetuaram a coleta de dados por meio de PEMS em veículos testados em rodagem, para aferir os valores de consumo de combustível e emissões de CO<sub>2</sub>. A rodagem foi feita em combinação de itinerários para simular a condição regular de uso, o que inclui vias residenciais, vias expressas e rodovias. A medição de emissões em rodagem foi realizada por meio de PEMS, a cada segundo, com medição do fluxo de gases, e um GPS para aquisitar dados da: velocidade, localização e altitude. A análise dos dados foi feita com base na metodologia de potência específica veicular (VSP). Este método

utiliza no cálculo os parâmetros de potência instantânea por unidade de massa, além das variáveis dinâmicas de resistência ao rolamento e aerodinâmica (ZHANG et al., 2014).

O método VSP recebe dados de rodagem para reproduzir matematicamente os valores de emissões de CO, CO<sub>2</sub> e HC. Os parâmetros necessários são a velocidade, aceleração e a inclinação da via, e considera no cálculo a resistência ao rolamento e a aerodinâmica. Os valores de aceleração e velocidade podem ser adquiridos pelo equipamento de medição PEMS, mas a inclinação depende de dados de posicionamento por satélite. O valor da inclinação da via tem grande influência no consumo de combustível, e a imprecisão na medição da altitude tem relação direta no resultado do consumo (ZHANG; FREY, 2006). Algumas das limitações apontadas ao modelo VSP são por ele apresentar pouca precisão em algumas faixas de funcionamento, como: não utilizar a rotação do motor, o que pode comprometer medições em marcha lenta e acelerações bruscas; e apresentar valores agrupados de um módulo de rodagem (DUARTE; GONÇALVES; FARIAS, 2016).

Além de alimentar o modelo VSP, com base nos dados levantados em rodagem por meio de PEMS e GPS, estes parâmetros contribuem para refinar a base de dados de programas para simulação de consumo e emissões com base em ciclo de rodagem *real-world*. Desta forma, Fontaras et al. (2014) realizou testes de emissões em 7 veículos de passageiros (a gasolina) Euro 5, sob diversos ciclos de ensaio, visando contribuir com os fatores de emissões Euro 5. Os parâmetros levantados foram comparados com os fatores de emissões dos programas COPERT e HBEFA. Os ensaios foram realizados em dinamômetro de chassi, entre 2010 e 2012, com medição dos poluentes NO<sub>x</sub>, HC, CO, PM, CH<sub>4</sub>, além do CO<sub>2</sub>, em diferentes ciclos de condução. Os ciclos de condução usados nos ensaios foram: o NEDC, ensaio oficial; o CADC, para simular condições de condução *real-world*; e o *Worldwide Motorcycle Test Cycle* (WMTC), desenvolvido para a harmonização dos ensaios de emissões veiculares, planejado para motocicleta. Os valores levantados nos ensaios foram confrontados com as emissões dos programas COPERT e HBEFA (FONTARAS et al., 2014).

Os parâmetros levantados por Sentoff; Aultman-Hall e Holmén (2015) serviram de base para o cálculo pelo método VSP que, além de valores de velocidade, aceleração e inclinação, utilizou os coeficientes de resistência ao rolamento, resistência rotacional e arrasto aerodinâmico (kW-s<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>). O resultado VSP foi dividido pela massa em tonelada. A divisão de cada *bin* ficou próxima de 1 kW/ton. Os dados a serem inseridos no MOVES podem ser dados dinâmicos ou distribuição de VSP. O VSP pode ser classificado em 23 *bins* que são influenciados pelo tipo de veículo, combustível utilizado, idade do veículo, tecnologias de

emissões e condições ambientais. Em medições *real-world* o do estilo de condução tem relação com a velocidade desenvolvida, a qual interfere nos resultados por influenciar o consumo de combustível devido as acelerações envolvidas (SENTOFF; AULTMAN-HALL; HOLMÉN, 2015).

Para identificar o padrão de emissões de NO<sub>x</sub> e CO<sub>2</sub> dos veículos mais vendidos na comunidade europeia, Driscoll et al. (2018) utilizaram modelos produzidos na legislação Euro fases 5 e 6. A medição foi feita por meio de PEMS, em circuito com 83 km envolvendo ciclo urbano e rodoviário. O teste limitou a variação altimétrica em 100 m. Os testes foram baseados na regulamentação europeia, anexo III A (EU) (COMMISSION, 2017). As medições realizadas em rodagem com o uso do PEMS apresentam baixa repetibilidade por ter que representar condições reais, e estas são afetadas pelos estilos de condução. Desta forma, O'Driscoll et al. (2018) separaram trechos semelhantes em relação a velocidade, tempo de marcha lenta, VSP, aceleração positiva relativa (*Relative Positive Acceleration* - RPA) e o percentil 95 do resultado entre a velocidade e aceleração positiva ( $v \cdot a_{\text{pos}}[95]$ ). O método VSP calcula a potência veicular instantânea com base na velocidade, aceleração e inclinação da via. A aceleração positiva é um valor que indica os valores de contorno e devem estar dentro de um limite para que os dados do teste RDE sejam válidos. O PEMS foi calibrado no início, meio e final de cada viagem, e a correção foi feita por meio do programa do fabricante do equipamento (DRISCOLL et al., 2018).

Para definir um modelo genérico de consumo de combustível com base no modelo VSP, Duarte et al. (2015) definiram três faixas de potência por peso, variando entre valores positivos e negativos. Estes cálculos utilizam os parâmetros obtidos de consumo do ensaio de certificação. Para gerar uma relação, são confrontados os valores de consumo VSP e de certificação. O parâmetro atribuído para a marcha lenta é relevante por representar 32% do ensaio ECE-15, e varia entre zero e um, sofrendo influência de tecnologias, tais como *star-stop* que desliga o motor em marcha lenta (DUARTE et al., 2015).

O estudo de Duarte, Gonçalves e Farias (2016) com uso do método VSP teve dois objetivos: criar um modelo de consumo e emissões para cada veículo em diferentes condições de rodagem, e criar um perfil dinâmico com base nas condições de rodagem para estimar o consumo e emissões nos ciclos NEDC e WLTP. A limitação do método VSP neste estudo foi a falta da informação da rotação do motor, importante nos ciclos de ensaio e os dados armazenados na rodagem acumulam diferentes condições de rodagem, englobando faixas com diferentes níveis de emissões. Por outro lado, o uso de PEMS favorece este método em função da aquisição de dados reais que podem ser relacionados com os dados oficiais. As medições de



rodagem combinaram condições de subida e descida em cidade e rodovias planas, para cobrir o máximo de condições de condução. Apesar dos testes terem a partida a frio no ciclo, estes dados foram tratados de forma separada e os testes foram predominantemente com motor aquecido (DUARTE; GONÇALVES; FARIAS, 2016), diferente dos testes de Kousoulidou et al. (2013) que iniciou a aquisição de dados somente após motor aquecido.

Para comparar os parâmetros obtidos em rodagem com os dados de dinamômetro, Sentoff; Aultman-Hall e Holmén (2015) igualaram os valores de inclinação VSP a zero para manter a paridade de testes no plano. Os valores médios de VSP sem a inclinação da via são ligeiramente menores, bem como menor desvio padrão se comparados com o VSP com inclinação. Foi feito o cálculo de porcentagem de erro em função do uso da inclinação e a retirada deste parâmetro. Os valores de emissões de CO, CO<sub>2</sub>, HC, NO<sub>x</sub>, COV e consumo de combustível foram comparados com a exclusão da inclinação. Os cálculos por meio do MOVES subestimam os valores de consumo de combustível e emissões de CO<sub>2</sub> com a retirada da inclinação da via. A variação de consumo entre os dois cenários ficou ente 10 e 20% (SENTOFF; AULTMAN-HALL; HOLMÉN, 2015).

A condição de rodagem é aquiritada por meio de coleta de dados de velocidade a cada segundo. Para a análise dos parâmetros foi utilizado o método de micro viagem, assim Yang et al. (2016) separaram em pacotes de 250-350 s para representar os trechos de rodagem *real-world*. Outro fator que influencia as emissões de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> é a carga referente a cada veículo, o próprio peso e os passageiros (YANG et al., 2016). O modo VSP e estresse do motor são divididos em *bins* segmentados conforme a faixa de velocidade. Os valores de *bins* do VSP até 11 indicam desacelerações ou descidas, 12 marcha lenta e acima de 13 acelerações ou subidas. O modelo IVE contempla 1372 tecnologias que englobam o tipo de veículo, a motorização e seus dispositivos com a milhagem acumulada do veículo, representando a idade. A motorização é dividida em três tamanhos, pequeno até 1,5 L, médio até 3,0 L e grande acima dessa cilindrada (POURESMAEILI; AGHAYAN; TAGHIZADEH, 2018).

Para o levantamento em condições reais, o uso de um GPS ou unidade de controle eletrônica do motor (ECU) permitem adquirir parâmetro de várias horas de rodagem de velocidade e altitude, de forma a identificar as variações bruscas de rodagem, condições que não ocorrem em dinamômetro. Estes dados são levantados com custo relativamente baixo, mas a medição das emissões por meio de analisador portátil (PEMS) tem um custo mais relevante, de forma a limitar a amostragem de aquisição de emissões (PATHAK et al., 2016).

Os dados de emissões em rodagem de Poursmaeili et al. (2018) foram comparados com o modelo IVE que recebeu fatores de ajuste com base no teste de campo para o ciclo de teste

do método IVE. Os testes indicaram uma elevada taxa no *bin* 12 que representa mais de 50% das emissões, em função da elevada taxa em marcha lenta. Nas regiões de rodagem urbana e artérias de rodovias operaram na faixa de 8-16. A média de inclinação para o ciclo Iraniano foi de 0,6%, o principal poluente emitido é o CO e referente aos GEE é o CO<sub>2</sub>. A taxa de erro referente aos parâmetros das micro viagens combinadas para compor o ciclo apresentou erro em torno de 2%. A modelagem apresentou baixo estresse de motor e VSP médio (POURESMAEILI; AGHAYAN; TAGHIZADEH, 2018).

Por meio da combinação dos valores coletados em rodagem com as taxas de consumo e emissões do método VSP é possível estimar os valores de consumo emissões, inclusive separando por tipos de tecnologia de alimentação de combustível. Este modelo permite relacionar o consumo de combustível e VSP de forma a estimar os valores com base na taxa VSP, sem necessitar da medição física do consumo (DUARTE; GONÇALVES; FARIAS, 2016; WANG et al., 2008). O sistema OBD III (envio de dados remoto do OBD II) tem sido aplicado em algumas localidades da China em ônibus urbano no intuito de levantar parâmetros de rodagem real em grande escala. Isso contribui para a decisão de política pública das tecnologias de veículos de transporte urbano. Os veículos de carga rodoviário também devem ter as emissões monitoradas (YANG et al., 2016).

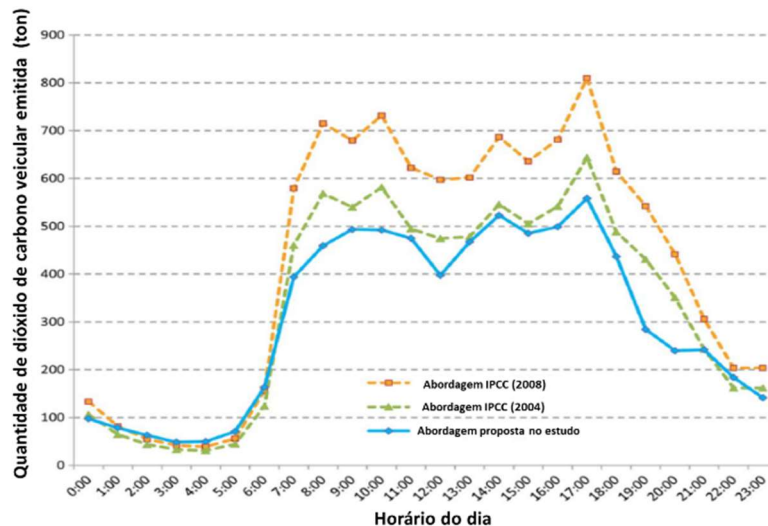
### **2.3.2 Resultados de estudos sobre medições e simulação de consumo e emissões**

Conforme análise de estudos relacionados ao consumo e emissões, este capítulo apresenta os principais resultados identificados. Zhang et al. (2014) calcularam o consumo, dos veículos de testes, com base nos valores de gases medidos nos ensaios, CO, CO<sub>2</sub> e THC (hidrocarboneto total), ponderado com a massa de carbono de cada gás, a densidade com combustível e massa de carbono do combustível. Visando relacionar os valores para cada ciclo de ensaio, foi aplicado o cálculo de medição de consumo do ciclo NEDC. Para relacionar o consumo com os diferentes modos de condução, o ciclo de ensaio foi dividido em micro viagens, divisão normalmente identificada pelos pontos de parada. A velocidade é um parâmetro que caracteriza o padrão do fluxo de trânsito, e as tecnologias para sistemas inteligentes de transporte (ITS - *Intelligent Transportation Systems*) permitem obter dados reais de velocidade.

O comparativo entre os métodos, por ITS e *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), feito por Chang et al. (2013) por meio de dados da frota, aponta para comportamentos semelhantes, mas com valores mais elevados no cálculo do IPCC, conforme Figura 8. Os

motivos podem ser em função dos dados do IPCC serem anuais e do estudo é baseado em fluxo diário, e outro aspecto é a ponderação dos dados de distâncias da frota 2004 para a frota de 2008, por falta de informações de distâncias em 2008, e por fim, deve ser considerado que as bases de dados entre métodos são distintas.

Figura 8 – Variação horária de emissões de CO<sub>2</sub> dos métodos do IPCC e por ITS



Fonte: (CHANG et al., 2013)

Por meio de programa estatístico foi modelado matematicamente o consumo, demonstrando a relação estatística entre velocidade média e consumo de combustível relativo, indicando consumo mais alto em velocidades menores. Em velocidades médias acima de 60 km/h em rodovias intermediárias seria necessário outro modelo matemático que melhor represente esta condição de rodagem (ZHANG et al., 2014). Para Wang et al. (2008), o aumento da velocidade eleva a taxa de consumo de combustível (vazão), e o consumo aumenta em velocidades baixa ou acima de 100 km/h, com o melhor rendimento a 65 km/h, resultando em consumo de 6 L/100 km. A aceleração do veículo confere um aumento significativo no consumo, e o peso do veículo tem influência direta no consumo, mais elevado em veículos com maior peso (WANG et al., 2008). Em função deste efeito do peso, as montadoras desenvolveram soluções e tecnologias para a redução de peso visando contribuir no cumprimento das metas de consumo e emissões da regulamentação (ZHANG et al., 2014).

Como forma de reduzir as emissões de CO e HC na fase fria, adicionar o etanol anidro à gasolina proporciona melhorias nas emissões sem a necessidade de fazer modificações no motor. Em função deste benefício, muitos países passaram a adicionar 10% de etanol à gasolina. Alguns estudos apontam que a redução das emissões de HC ocorre em função do oxigênio

contido no combustível, o qual melhora a combustão em função da queima mais rápida. No caso do CO, a redução das emissões ocorre também em função do oxigênio do etanol, levando ao efeito de empobrecimento. Os valores de gases tóxicos como o CO, HC e NOx apresentaram redução, mas até o limite de adição de 15%. Em caso de redução no volume de etanol resultará em aumento das emissões de CO<sub>2</sub> e NOx. Muitas tecnologias têm sido inseridas nos veículos no intuito de melhoria de rendimento, mas as emissões e rendimento a frio ainda apresentam baixo desempenho principalmente em função do catalisador e motor operarem com baixa eficiência nesta fase (IODICE et al., 2016).

Duarte, Gonçalves e Farias (2016) levantaram os próprios dados de emissão de poluentes, em veículos com ignição por centelha. O valor de HC ficou abaixo dos valores oficiais, porém os valores de NOx estavam acima das emissões em dinamômetro. Efetuando a mesma análise de estimativa com base no ciclo WLTP (*class 3*), foi identificada uma redução no consumo de combustível e emissões de 6% em relação ao ciclo NEDC. Esta queda no consumo resulta da operação do veículo em faixas mais elevadas no ciclo WLTP, condição em que o motor tem maior eficiência. Os veículos mais eficientes no ciclo NEDC podem ter desvantagem no ciclo WLTP em função dos diferentes parâmetros de condução entre os ciclos. Para contribuir com a modelagem do novo ciclo de condução, deveriam ocorrer mais medições em rodagem, com aquisição dos dados de emissões via PEMS, no intuito de aprimorar o teste sob condições com melhor acuracidade na medição de eficiência energética (DUARTE; GONÇALVES; FARIAS, 2016).

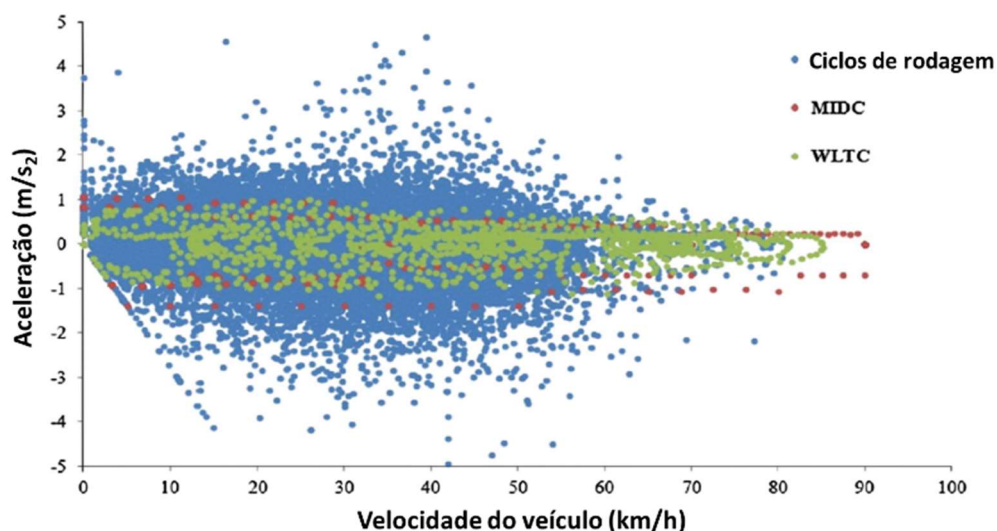
Em função da diferença entre os valores de rodagem e os valores NEDC de homologação, Duarte et al. (2015) desenvolveram um fator para manter a correlação de cada veículo, dividindo o consumo VSP com a média de consumo do ciclo NEDC. Os valores oficiais apresentam consumo 12% abaixo da média observada, e o valor estimado (VSP) apresentou desvio médio de -2,2% e desvio absoluto de 9,2%. O teste de rodagem oferece uma ampla faixa de potências para o modelo VSP, mas fica restrito aos padrões de condução estabelecidos para os testes os quais divergem dos padrões de uso urbano de um usuário normal (DUARTE et al., 2015).

Para avaliar o consumo real da frota circulante de Macau, Zhang et al. (2016) realizaram cálculos com base de dados de consumo e correções em estudos *real-world*. Os dados oficiais foram utilizados para estabelecer a base de cálculo do padrão de consumo, com base em veículos entre 1995 e 2012, e os de rodagem são de 2010 e 2011. A coleta foi feita por meio do uso de PEMS e GPS e o programa foi o COPERT. A média de emissão de CO<sub>2</sub> da frota de Macau, conforme dados oficiais, reduziu em 19% de 1995 a 2012, apesar do aumento médio

no porte dos veículos neste período. Os veículos são importados do Japão e da Europa, em sua maioria. Os modelos provenientes da Europa têm em média maior peso. O resultado dos cálculos de *real-world* apresentou redução de 271 para 226 g/km, no período de 1995 a 2012. Porém, ao comparar os resultados de rodagem com os dados oficiais foi identificada uma discrepância de 55% no consumo de combustível e emissões de CO<sub>2</sub> para mais no teste em rodagem. Entre os principais motivos: baixa velocidade média, uso de ar condicionado e carga extra nos veículos (ZHANG et al., 2016).

Pathak et al. (2016) utilizaram o ciclo WLTC, definido pelo WLTP. Este ciclo visa a harmonização global do ciclo de condução para padronizar a medição de emissões de CO<sub>2</sub> e consumo energético. A comparação deste estudo estabeleceu o cálculo de emissões por meio de IVE tanto para o ciclo *real-world*, quanto para o WLTC. Os dados de rodagem, com velocidade e altitude, foram inseridos nos programas IVE (g CO<sub>2</sub>/km) e CMEM (g CO<sub>2</sub>/s), de forma a comparar a resposta de dois modelos e verificar os critérios. Os ciclos MIDC (*modified Indian Driving Cycle* - adaptado do NEDC) e WLTC foram comparados com os dados reais de rodagem. Os ciclos de ensaio apresentam variações de +/- 1,5 m/s<sup>2</sup>, enquanto no padrão *real-world* esta variação fica entre +/- 2,5 m/s<sup>2</sup>. A Figura 9 consolida os valores de acelerações de desacelerações.

Figura 9 – Aceleração e velocidade nos ciclos MIDC, WLTC e rodagem

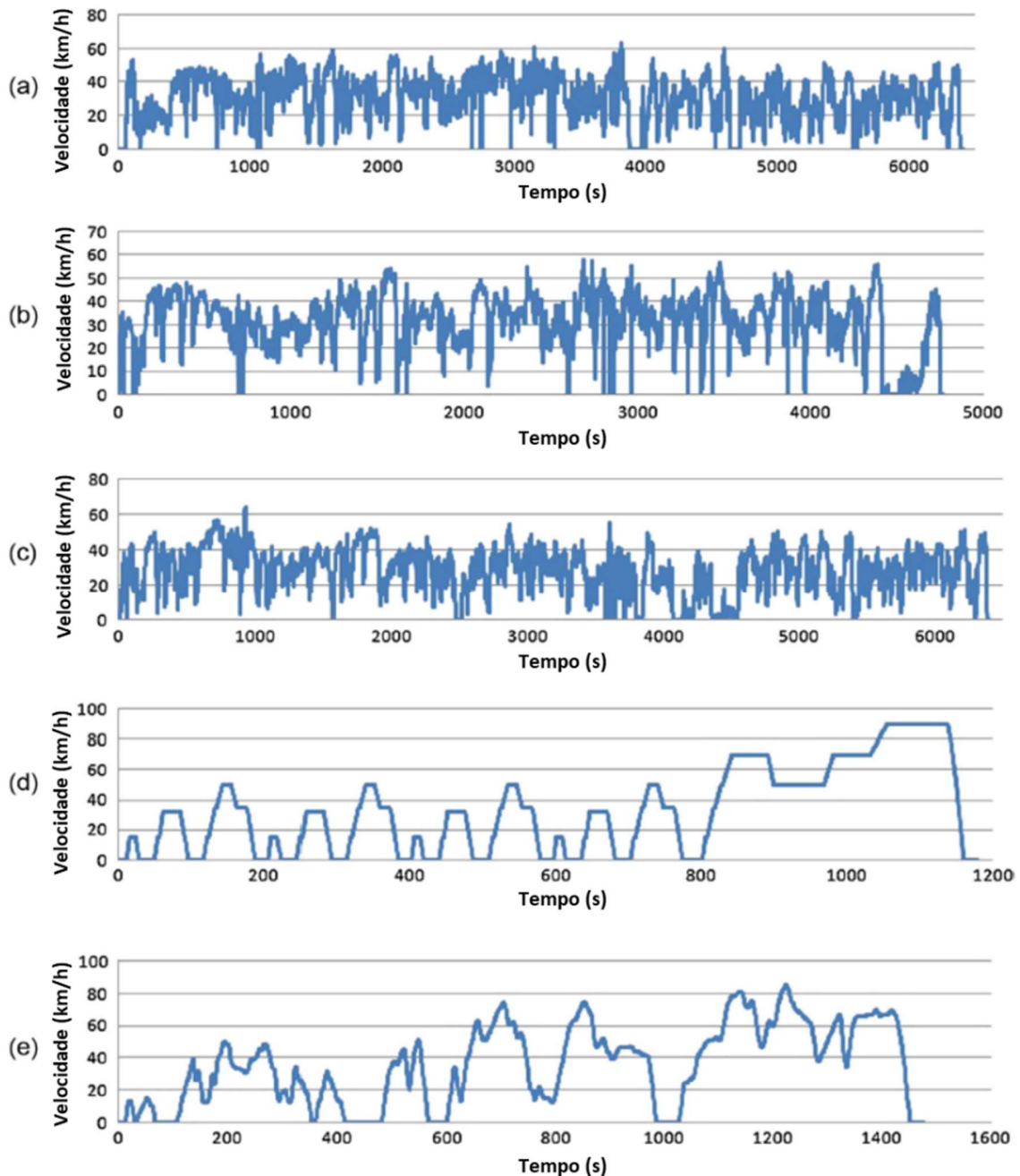


Fonte: (PATHAK et al., 2016)

A Figura 10 traz os padrões de condução dos ciclos de dinamômetro e em *real-world* que indicam o nível de aceleração demandada, o *Positive Kinetic Energy* (PKE). Os testes foram realizados em vias que representem diferentes níveis de congestionamento, e o deslocamento

monitorado por GPS, com sensor de velocidade para verificar a precisão dos dados (PATHAK et al., 2016).

Figura 10 – Padrões de velocidades em rodagens *real-world* e ciclos padrão. (a) Congestionamento. (b) Trânsito médio. (c) Pouco trânsito. (d) MIDC. (e) WLTC.



Fonte: (PATHAK et al., 2016)

Nota: base de tempo não uniforme

O trânsito na Índia demanda muita variação brusca no modo de condução, com muita aceleração, baixa velocidade e alta rotação do motor, o que resulta em temperatura mais elevada

e maior consumo de combustível e emissões. Comparando os padrões de aceleração e velocidade entre ciclo de rodagem e o WLTC, pode ser verificado que o ciclo de rodagem apresenta aceleração 60% ao WLTC, velocidade média 23% inferior ao WLTC e acelerações positivas 55% superiores ao ciclo de dinamômetro. Como resultado destas diferenças, as emissões seguem a tendência de emitir mais nos ciclos *real-world* que o WLTC. As emissões de poluentes apresentaram valores superiores, com a média de CO 155% acima, o HC com média 63% acima e o NOx com desvio de 64%. No caso de GEE, o CO<sub>2</sub> apresentou média 31% superior ao WLTC (PATHAK et al., 2016). Em testes realizados em Macau por Zhang et al. (2016), a análise das emissões conforme o horário do dia, valores de CO<sub>2</sub> impactam em 25% do total somente no período entre 17 e 19h, o que representa 21% do trânsito diário. Esse efeito é devido à baixa velocidade média neste horário. A emissão nesta faixa de horário pode chegar a 80% acima do valor identificado no período noturno (ZHANG et al., 2016).

Nos ensaios realizados por Fontaras et al. (2014), a emissão de todos os poluentes ficou abaixo dos limites legais na maioria dos ciclos, exceto na fase fria. As emissões a frio têm um peso significativo no volume total, e estes valores foram separados nos ensaios. As emissões de CO<sub>2</sub> para veículos a gasolina ficaram pouco acima do limite, em todos os modelos testados, mas o peso e tamanho médio dos veículos e motores também estavam acima da média. A pior situação ocorreu no teste urbano, com 290 g/km (FONTARAS et al., 2014)

Com base no método VSP, Duarte et al. (2015) simularam três diferentes modos de condução, nos veículos mais vendidos de cinco categorias em Portugal, e avaliaram os quesitos de consumo do Tanque à roda (*Tank-to-Wheel, TTW*), energia do combustível para mover o veículo, do poço ao tanque (*Well-to-Tank, WTT*), energia para o combustível chegar até o tanque do veículo, e a junção destes dois parâmetros resulta no Poço à roda (*Well-to-Wheel, WTW*). A validação e verificação desta metodologia foi com base em dados experimentais, apresentando alta correlação entre consumos estimado e medido. O carro pequeno para a família apresentou o melhor rendimento no ciclo urbano, 15% abaixo dos demais, e o supermini superou os demais no ciclo extra urbano e rodoviário, com reduções de 11% e 12%, respectivamente (DUARTE et al., 2015). Para Zhang et al. (2014), o consumo de combustível em teste rodagem normalizado para NEDC é 30% (+/-12%) maior que o valor que o ensaio oficial, indicando variações além das condições dinâmicas dos veículos.

Avaliar o estilo de condução em uma ampla base de dados é desafiador em função das variações do VSP entre motoristas voluntários, o que se pressupõe que são resultantes das condições impostas pelo trânsito. Para identificar estas variações devido ao estilo de condução, Sentoff, Aultman-Hall e Holmén (2015) avaliaram o desvio padrão de cada motorista em

relação a todos os participantes. Foi observada a prevalência de cada condutor em cada VSP sob específico trecho da via. Foi observado que o desvio padrão em relação a frequência de atividade, para todos os condutores do estudo, foi mais elevada em vias restritas do que naquelas sem restrição. Isso sugere que ocorrem variações no VSP em função do estilo de condução e não do controle operacional de trânsito. Mesmo cruzando estes parâmetros para detectar o efeito do estilo de condução no consumo, as variações apresentam valores elevados que podem indicar restrições em vias que alteram o modo de condução. Avaliando os dados calculados é possível indicar que os valores de CO<sub>2</sub> podem variar amplamente entre os condutores. Para identificar as variações nas emissões em função do estilo de condução é necessária uma amostragem muito grande de dados de rodagem. A popularização do GPS por meio de celulares é uma oportunidade para gerar este tipo de informação em grande escala. Avaliando as distribuições e variâncias permitirá identificar *eco-driving* (eco-condução) e também identificar a eficácia de algumas tecnologias em reduzir o consumo de combustível. As medições VSP tiveram o pico de 16 kW/ton em rodovias e zona rural restrita e a região urbana apresentou o maior volume de 0 kW/ton em função dos congestionamentos (SENTOFF; AULTMAN-HALL; HOLMÉN, 2015).

Conforme testes de rodagem realizado com PEMS, Driscoll et al. (2018) identificaram valores de CO<sub>2</sub> menores nos motores Diesel que a gasolina, além dos motores menores apresentarem melhor desempenho. Os veículos com motores pequenos a gasolina podem ser uma alternativa aos veículos diesel, porém, um motor pequeno a gasolina ainda emite 22% mais CO<sub>2</sub> que um motor médio diesel. Isso confirma a economia de veículos diesel sobre os modelos a gasolina. A diferença maior entre diesel e gasolina ocorreu no ciclo urbano. Comparando a estimativa oficial dos fabricantes com o CO<sub>2</sub> emitido em *real-world*, a diferença foi de 61% com gasolina. Comparando com testes de estudos de anos anteriores, a diferença vem aumentando gradualmente ao longo do tempo. Isso reforça a divergência de consumo entre ciclo de teste e condição real de rodagem. Comparando a média anual de rodagem, veículos diesel rodam mais e o balanço final de emissões acaba sendo compensado por esse aumento. Os motores extra pequenos GDI apresentaram emissão de CO<sub>2</sub> 18% menor que com injeção indireta de combustível (*port fuel injection* – PFI) no ciclo rodoviário. Por outro lado, os motores médios GDI apresentaram 15% mais emissões de CO<sub>2</sub> que o PFI no ciclo urbano. Na média dos veículos avaliados, o GDI apresentou redução entre 9 e 12%. Os motores pequenos não apresentam variação significativa entre as duas tecnologias. Os veículos híbridos apresentaram o melhor resultado entre todos os modelos, gasolina e diesel. O uso do sistema de



recuperação cinética de energia apresentou melhor eficiência no ciclo urbano, em regime de rodagem com acelerações e desacelerações (DRISCOLL et al., 2018).

Analisando os resultados da regressão entre consumo real e medição oficial de veículos europeus, Tietge et al. (2017) identificaram que os valores variaram ao longo do tempo. Verificando a mudança em cada variável, os valores da medição oficial reduziram ao longo do tempo, desta forma a divergência aumentou. Os veículos 2001 e 2008 apresentaram maiores diferenças em veículos mais leves e com motores menores, ao passo que os modelos de 2014 variou mais entre os veículos mais pesados e com motores maiores. Os veículos diesel, com maior massa, apresentaram maior redução dos valores oficiais ao longo do tempo. A variação entre os valores aumentou ao longo do tempo, com divergência subindo de 8%, em 2001, para 33% em 2014, para veículos a gasolina. Os valores de desvio padrão também aumentaram. O comportamento de condução dos veículos analisados (somente Alemanha) não tem variado muito ao longo do tempo, mantendo o perfil balanceado dos motoristas. O modelo de regressão comprovou que 90% do consumo real pode ser explicado com base nos dados de consumo oficial, massa do veículo e tamanho do motor. Uma das limitações do método é a exclusão de veículos de empresas, o que pode subestimar o valor de consumo em rodagem. O programa de base, COPERT, possui dados de veículos que foram mais testados, podendo ter uma subestimação de tecnologias dos veículos mais recentes (TIETGE et al., 2017).

Os resultados obtidos por Iodice et al. (2016), sobre emissões a frio com adição de etanol à gasolina, podem contribuir na simulação de cenários de poluição urbana, de maneira a assumir que uma parte ou toda a frota seja aditivada com etanol. As emissões de CO estão diretamente relacionadas com o enriquecimento da mistura e catalisador não operante. A redução das emissões ocorreu em função do oxigênio contido no etanol oxidar o CO na câmara. A adição de 30% de etanol apresentou o menor benefício em função do aumento do calor latente de vaporização e diminuição do aquecimento, baixando a temperatura de combustão e velocidade da queima. Da mesma forma, a queima de HC é mais completa em função do oxigênio presente do etanol. A melhor porcentagem de etanol para reduzir o HC seria 15% em função da pressão de vapor Reid, portanto o G20 (20%) apresentou o melhor desempenho. Novamente o G30 apresentou o menor benefício dos aditivados, em função da volatilidade, aumento do calor latente de vaporização e diminuição do aquecimento, diminuindo a temperatura de chama. (IODICE et al., 2016).

O Quadro 1 consolida os principais resultados identificados nos estudos que contribuam para a identificação de métodos para aquisição de emissões e consumo de combustível.

Quadro 1 – Principais resultados dos estudos pesquisados

Resultado	Atributos	Autores
Consumo de combustível e emissões de CO <sub>2</sub>	Pior consumo em baixa velocidade e acima de 100 km/h. Melhor consumo a 65 km/h. Consumo e emissões em ciclo WLTP (Class 3) 6% inferior ao NEDC. Emissões de CO <sub>2</sub> em outros ciclos de ensaio ficaram acima ao NEDC. Consumo no NEDC normalizado 30% (+/-12%) acima do oficial. Emissões de CO <sub>2</sub> representam 25% do total entre 17 e 19h, o que é 21% do trânsito diário, e 80% acima do valor noturno. motor pequeno a gasolina ainda emite 22% mais CO <sub>2</sub> que um motor médio diesel; na média o GDI apresentou redução entre 9 e 12% em relação ao PFI.	(ZHANG et al., 2014); (WANG et al., 2008); (DUARTE; GONÇALVES; FARIAS, 2016); (FONTARAS et al., 2014); (ZHANG et al., 2016); (DRISCOLL et al., 2018).
Método VSP	Valores oficiais de consumo 12% abaixo do VSP. Limitação em condições de: acelerações curtas e teste em subidas, variações bruscas de velocidade, variações climáticas, composição química do combustível, uso de ar condicionado e estado de conservação dos veículos. Ajustar modelo de simulação de consumo para ensaios acima com velocidade média 60 km/h. Variações que ocorrem no VSP resultam do estilo de condução e CO <sub>2</sub> pode variar amplamente entre os condutores.	(DUARTE et al., 2015); (ZHANG et al., 2014); (SENTOFF; AULTMAN-HALL; HOLMÉN, 2015).
Emissões de CO, HC e NOx	Redução de emissões de CO e HC a frio com adição de 15% de etanol. Pior benefício com 30% de etanol na gasolina. Veículos com ignição por centelha, valor de HC ficou abaixo dos valores oficiais, porém os valores de NOx acima das emissões em dinamômetro.	(IODICE et al., 2016); (DUARTE; GONÇALVES; FARIAS, 2016);
Programas de simulação de emissões	Regressão com base no COPERT para estimar as emissões de CO <sub>2</sub> comprovou que 90% do consumo real pode ser explicado com base nos dados de consumo oficial, massa do veículo e tamanho do motor. Comparação dos dados oficiais são de veículos e de rodagem, por meio de PEMS e GPS, com uso do COPERT. A média de emissão de CO <sub>2</sub> elevou 55% entre resultados de rodagem com os dados oficiais.	(FONTARAS et al., 2014); (TIETGE et al., 2017); (ZHANG et al., 2016).

Fonte: Autor

As emissões e consumo a frio são mais elevadas em função dos componentes móveis apresentarem maior atrito durante esta fase (LEE; PARK; LEE, 2014), o que relaciona diretamente atrito com a temperatura do motor (PARK et al., 2013).

## 2.4 EMISSÃO VEICULAR E CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

Analisando diversos estudos sobre o consumo de combustível e emissões de veículos de passeio e transporte coletivo, esta seção traz os principais conceitos e resultados de outros estudos.

### 2.4.1 Formações dos poluentes da combustão em motores por centelha

Os efeitos que ocorrem na combustão dos motores com ignição por centelha diferem na formação dos principais poluentes. A presença de CO nas emissões denota a falta de oxigênio, resultado de oxidação incompleta. A conversão incompleta de parte do combustível pode levar a fatores como a oxidação parcial do carbono, resultando em CO, ou a associação diatômica do hidrogênio. Quando estes elementos apresentam oxidação completa resulta em CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O. Em situações com maior quantidade de oxigênio na mistura, ocorre a formação de CO em função de uma pequena parcela do carbono do combustível ser oxidada parcialmente (BOZEK, 1992)

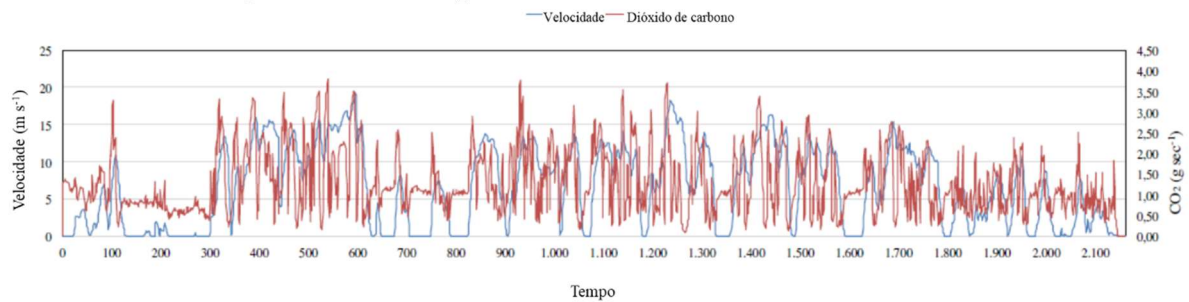
Em condições ideais do processo de combustão a queima do combustível deveria ser completa, mas imperfeições na cadeia molecular do combustível pode levar a combustão incompleta destas moléculas. Outro fator que pode levar à combustão incompleta é o contato da frente de chama com pontos frios dentro do cilindro, como as paredes na fase fria. Parte deste combustível não queimado que deixa a câmara de combustão resultam em moléculas parcialmente oxidadas ou na forma de aldeídos. A formação de NO não está relacionada ao processo de oxidação incompleta, de forma que a oxidação do nitrogênio pode ocorrer sem a presença de combustível, o nitrogênio se comporta como um diluente não reativo. Por outro lado, em condição de alta temperatura na câmara de combustão ocorre a reação do nitrogênio da atmosfera com o oxigênio que resulta em moléculas de NO e suas subsequentes conversões, como o NO<sub>2</sub> (BOZEK, 1992).

### 2.4.2 Parâmetros de emissões e consumo de combustível

Para avaliar os efeitos da octanagem na emissão de GEE, com base no efeito de octanagem sob demanda, Morganti et al. (2017) utilizaram motor com sistema duplo de alimentação de combustível. Para alimentação do combustível de baixa octanagem é usado o sistema de injeção direta de combustível (*direct fuel injection* – DFI) e para alta octanagem o

PFI, etanol ou metanol. Para combustíveis E10 e E30 a alimentação é feita pelo DFI somente. Para calibrar o motor quanto ao torque, o limite de detonação foi testado com cada um dos combustíveis, incluindo a gasolina (RON 90). Os testes com E10 e E30 foram realizados com dois veículos, com motor médio (2.5L) aspirado e pequeno (1.5L) turbo comprimido, respectivamente. Os ciclos utilizados foram os: FTP-75, WLTP e *Supplemental Federal Test Procedure* (US06). O combustível (instantâneo) consumido serviu de base para o cálculo do consumo do ciclo. Comparando o consumo de combustível nos ciclos de teste, os autores identificaram que a gasolina E30 apresentou menor consumo em relação a E10 em todos os ciclos, com os respectivos motores. O ciclo US06 teve economia de quase 4% e no FTP-75 de 11%. Os testes com E30 utilizaram motor turbo alimentado, e o E10 aspirado. A baixa perda de carga parasitas do motor turbo compensou a perda de 8% da densidade energética do E30. O consumo do combustível de maior octanagem depende do limite de detonação em cada ciclo de teste (condição de rodagem). Apesar de possuir densidade energética 25% menor, o metanol tem menor consumo que o etanol por ser melhor antidetonante. O tanque secundário é abastecido com metanol após 12 abastecimentos de gasolina do tanque primário, no ciclo WLTP, caindo para quatro vezes no US06 (MORGANTI et al., 2017).

Visando identificar o impacto do comportamento do condutor nas emissões, Rodríguez et al. (2016) desenvolveram estudo com base em condução *real-world*, na cidade de Bogotá. Para realizar os cálculos foram utilizados os parâmetros dinâmicos e construtivo do veículo. As medições de emissões em tempo real foram feitas por analisadores de gases (SEMTECH-G - Sensors, Inc.). O CO<sub>2</sub> e CO por infravermelho dispersivo, o NO<sub>x</sub> por sensor infravermelho não dispersivo e o HC por meio de chama ionizada. Foi utilizado dispositivo para a medição do fluxo de escapamento. O posicionamento foi feito por meio de GPS e as condições ambientais com o uso de sensores. Os equipamentos possuem diferentes taxas de amostragem, portanto foram alinhados para sincronizar os dados coletados. Os parâmetros da aerodinâmica também foram definidos com base nas características predominante da frota circulante local. Estes valores incluem, além do coeficiente aerodinâmico, a área frontal e a massa do veículo. Desta forma foi estabelecido um fator para a última parcela da Equação 2 (VSP) com base nos parâmetros dos veículos usados neste estudo. Os veículos de teste circularam em diversos trajetos do ambiente urbano e rodoviário e sob diferentes condições de trânsito. Todos os testes foram executados por dois motoristas. Utilizaram a função probabilidade densidade para calcular a relação entre VSP e emissões. Este padrão de cálculo pondera o tempo gasto em cada *bin* durante os testes analisados. A Figura 11 apresenta a velocidade ao longo do teste e a respectiva emissão de CO<sub>2</sub> (RODRÍGUEZ et al., 2016).

Figura 11 – Desempenho de emissões de CO<sub>2</sub> durante ensaio

Fonte: (RODRÍGUEZ et al., 2016)

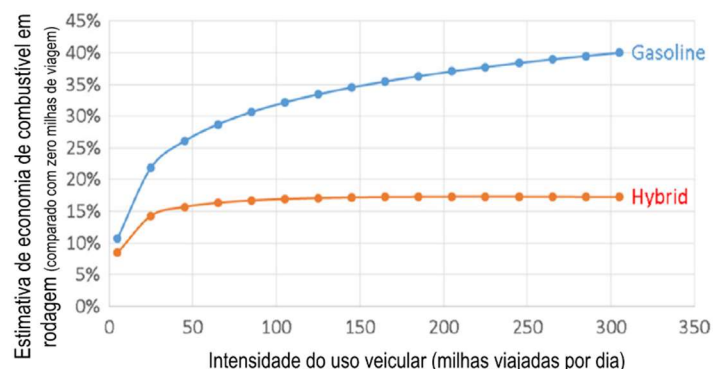
Os testes foram comparados com os ciclos de outras regiões como os EUA, Europa e Japão para identificar os padrões de acelerações e desacelerações. Se os padrões de condução dos veículos em Bogotá fossem ajustados para o estilo de condução das regiões comparadas, a redução de anual de combustível seria em torno de 85 milhões de galões. A correlação ( $r^2$ ) entre emissões de CO<sub>2</sub> e VSP apresenta o maior valor (0,81) quando comparada com a velocidade ou aceleração. A correlação dos poluentes CO, HC e NOx foi  $r^2$  acima de 0,90 para estes gases em relação ao VSP. Os veículos circularam metade do tempo no bin 11 (de 1,2 a 2,9 KW/ton) e a faixa mais ampla ficou entre os bins 8 e 15 (98% do tempo), o que indica um trânsito pesado com muitas paradas, em Bogotá. As emissões em rodagens acima do bin 11 ficam muito elevadas. Neste mesmo patamar ocorre alterações mais significativas em veículos maiores e sem dispositivos de controle de emissões, o que é sugerido pelos autores a necessidade da maior utilização destas tecnologias mais eficientes e treinamentos no padrão *eco-driving*, com incentivos à condução com baixas acelerações (RODRÍGUEZ et al., 2016).

Ehsani, Ahmadi e Fadai (2016) avaliaram o consumo de combustível e a eficiência do combustível por meio de simulação de diferentes tipos de veículos, diferentes tipos de vias, condições ambientais e eficiência no modo de condução. O objetivo foi aprimorar a modelagem da estimativa de consumo de combustível e emissões de CO<sub>2</sub>. O estudo utiliza o modelo mecânico e tem como diferencial, o uso das variáveis citadas. A abordagem deste modelo mecânico é o *bottom-up* e as variáveis são usadas em diferentes sistemas e analisa os diferentes combustíveis. O modelo mecânico matemático utiliza diversos fatores envolvidos no deslocamento do veículo que visa reproduzir o efeito dinâmico real. Dentre os fatores utilizados, foram considerados fatores como: peso do veículo, aceleração da gravidade, inclinação da via, correção da massa devido à aceleração rotacional inercial, taxa de aceleração, resistência ao rolamento e influência da temperatura, resistência ao rolamento pelo tipo de pavimento, densidade do ar, área frontal, velocidade do vento, força de arrasto, velocidade do veículo, raio do centro de gravidade, eficiência do motor e do combustível, entre outros fatores.

Estes parâmetros são a base de cálculo de consumo de energia que resulta em valores de MJ/km para cada tipo de veículo e respectivos combustíveis. Com base no consumo energético, é calculada a emissão de CO<sub>2</sub> para as mesmas variações de veículos e combustíveis. Na simulação de deslocamento dos veículos, três padrões de sistemas de cobrança de pedágio são simulados: pagamento sem parada, com parada e por meio de redução de velocidade. A emissão de carbono nestes três modelos resulta em menor emissão para o pagamento sem parada, seguido para o sistema com redução de velocidade, resultando em emissões de 15,26 e 19,15 acima no caso de pagamento eletrônico, respectivamente (EHSANI; AHMADI; FADAI, 2016).

Para identificar o consumo real dos usuários de veículos, Greene et al (2017) levantaram os dados de um site governamental, sobre o consumo de combustível com mais de 600.000 veículos cadastrados divididos em motores a gasolina ou veículo híbrido. Com esta ampla amostragem é possível calcular a variabilidade da frota, minimizando os efeitos do condutor individualmente. Existe uma relação estatisticamente significativa de consumo de combustível com milhas acumuladas e temperatura. Os usuários de veículos a gasolina, com trajeto diário mais longos têm menor consumo de combustível que é influenciado por trabalhar menos tempo com o motor na fase fria. Além disso, o trajeto diário longo está relacionado com a circulação em rodovias que requer menor consumo. O veículo híbrido apresenta pouca variação na economia de combustível acima de 50 milhas (Figura 12) em função não somente da maior eficiência da propulsão, mas também por desligar o sistema em marcha lenta e possuir freio regenerativo (GREENE et al., 2017).

Figura 12 – Estimativa de economia de combustível e distância do trajeto diário

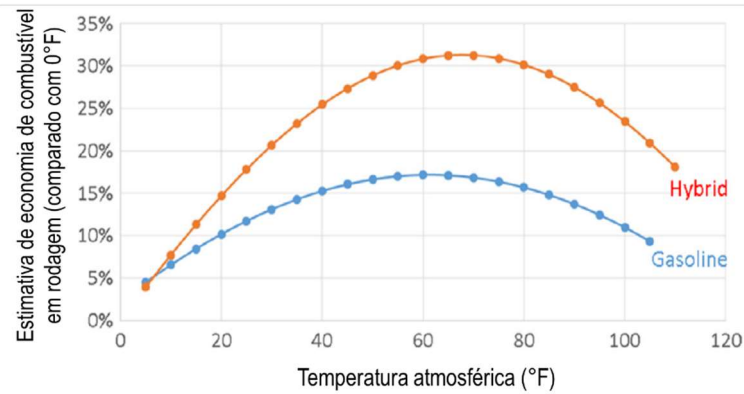


Fonte: (GREENE et al., 2017)

Os veículos apresentam melhor rendimento em temperaturas por volta de 15 a 20 °C (60 a 70 °F), e os veículos híbridos são mais afetados com a temperatura do que os veículos somente a combustão, conforme Figura 13. Nesta faixa de temperatura os híbridos melhoram o consumo

em 31,5%, enquanto aqueles a gasolina melhoraram em 17,4%. O aumento do consumo em temperaturas mais elevadas pode estar relacionado com o uso do AC (GREENE et al., 2017).

Figura 13 – Estimativa de economia de combustível e temperatura ambiente



Fonte: (GREENE et al., 2017)

Analisando a influência do comportamento dos condutores no consumo, Gallus et al. (2017) identificaram que as variações nos valores entre o mesmo estilo de condução são influenciadas pelas condições ambientais, variações no trânsito e pequenas variações na dinâmica da condução. Os valores de CO<sub>2</sub> e NOx ficam mais alterados no estilo mais agressivo de condução. Conforme a análise da influência no modo de condução sobre as emissões, os autores identificaram que o CO<sub>2</sub> aumentou em média um terço em relação à condução normal e o NOx chegou a triplicar. Os valores de CO e HC foram pouco influenciados pelo modo de condução, estes são mais afetados por condições ambientais e partida a frio (GALLUS et al., 2017).

Os programas de eficiência energética demandam ajuste estratégico das montadoras visando cumprir a meta corporativa. No caso da Coreia do Sul, pelo alto rigor do programa de eficiência energética existe a possibilidade de algumas deduções em caso de uso de inovações. O teste de aprovação para levantamento das emissões de CO<sub>2</sub> são os FTP-75 e HWFET. O valor da emissão de CO<sub>2</sub> (g/km) de veículos leves na Coreia do Sul resulta da ponderação de dois ciclos: 55% do ciclo urbano (FTP-75) e 45% do rodoviário (HWFET). Os resultados de dinamômetro apresentaram forte correlação com os valores previstos para os veículos avaliados no estudo de Oh et al. (2016). Sistemas como o que desliga o motor em marcha lenta (*start stop*), painel solar, sistema para aproveitamento do calor e geradores de alta eficiência, são tecnologias que permitem deduções de CO<sub>2</sub>. Apesar do uso de veículos movidos a gasolina e diesel nos testes, isso não foi levado em consideração nas análises das emissões de

CO<sub>2</sub> em função da relação direta com o peso do veículo. Conforme análise de Oh et al. (2016), os valores de eficiência para cada modelo demandam uma reorganização nos volumes de vendas de forma a cumprir a meta corporativa. No caso de redução do peso do veículo em 10% é estimada uma redução no consumo de até 5,6%. No caso do coeficiente de aerodinâmica, aplicando a mesma redução de 10% o valor de redução no consumo atinge no máximo 3,2%, portanto esta modificação é menos efetiva que a redução do peso. Se uma redução de 10% for aplicada na carga baixa do motor, a redução pode chegar a 5,2% e pode atingir até 6,5% caso seja incluído o sistema *start-stop*. Para o cumprimento das metas Sul Coreanas de eficiência energética em 2020, Oh et al. (2016) indicam que será necessário a combinação de mais de duas das melhorias citadas, incluindo o aumento do volume de veículos híbridos (OH et al., 2016).

Para Ehsani, Ahmadi e Fadaei (2016), o consumo de combustível sofre influência de fatores como: a eficiência do combustível, peso do veículo, padrão de condução e área frontal. Os autores identificaram que a redução em 10% no peso apresenta uma melhoria em 2,5% no consumo dos carros, motivo pelo qual as montadoras têm utilizado materiais mais leves. A área frontal sofre influência do vento, com efeito positivo ou negativo, dependendo se for frontal ou traseiro. A resistência ao rolamento apresenta baixa influência no consumo de combustível. A redução em 10% da resistência ao rolamento reflete em apenas 0,33% de economia de combustível. O padrão de condução tem forte efeito no consumo de combustível. A redução da aceleração em 10% resulta em uma economia de 8,81% no consumo de combustível. Outro fator com ampla influência no consumo de combustível é o efeito da massa na aceleração inercial rotacional e o fator de aceleração. A otimização em 10% destes fatores resulta em até 16,74% de economia de combustível. O tipo de revestimento da via também tem influência na eficiência. *Substituindo Portland Cement Concrete (PCC) por AsphaltConcrete (AC)*, o consumo é reduzido em 6,21%. O efeito mais relevante para o consumo é a inclinação da via, com aumento no consumo de combustível em 32,81% para um acréscimo de 10% na inclinação da via. O sistema de propulsão tem relevante participação na eficiência veicular. Melhorando a eficiência do motor em 10% resulta na redução de consumo de até 9,09%, o que justifica a melhoria das tecnologias da motorização veicular (EHSANI; AHMADI; FADAI, 2016).

O consumo de combustível tem apresentado redução nas últimas três décadas, e as tecnologias veiculares têm ampla participação neste resultado. Outras influências relevantes no consumo é o trânsito e o modo de condução que varia conforme as acelerações e padrão de rodagem realizada. Pesquisadores identificaram que o *eco-driving* representa redução no consumo por conduzir de forma mais integrada ao contexto do trânsito, como ajustar a velocidade antecipando uma parada mais adiante, o que permite reduzir o tempo em marcha



lenta, por exemplo. Além destes fatores, o consumo também é influenciado pela topografia (subidas), partida a frio, carga adicional no veículo, uso do ar condicionado e o nível de manutenção do veículo (GREENE et al., 2017). Estes conceitos serão mais bem detalhados na próxima seção.

### 2.4.3 Eficiência energética e consumo de combustível no Brasil

O Programa Nacional do Álcool (PROALCOOL) dos anos 1970 visava introduzir motores eficientes a etanol. As pesquisas se limitaram a resolver problemas tecnológicos relacionados ao uso deste combustível. O uso deste combustível foi fomentado com a introdução do veículo *flex-fuel*, porém esta tecnologia favorece a flexibilidade de escolha do combustível, mas não a eficiência energética. Como a taxa de compressão entre gasolina e etanol são diferentes, os motores *flex* não tem a máxima eficiência de cada combustível (MELO; JANNUZZI; SANTANA, 2018).

A relação energética entre os combustíveis oficiais do Brasil, E100 e E22, é 0,693 e nos experimentos de Olmos et al. (2018) foi identificada uma relação entre os combustíveis, usados nos testes, de 0,6818. Os testes envolveram os valores dos ensaios oficiais do Brasil, urbano e rodoviário, além dos ensaios dos EUA de alta velocidade (US 06), uso de ar condicionado (SC 03) e condução em baixa temperatura ( $-7^{\circ}\text{C}$ ). Para o teste RDE foi adicionado peso de 183 kg e teve duração de 93 minutos e totalizou 92 km de rodagem, seguindo a regulamentação europeia. As medições em rodagem foram feitas por meio de PEMS e coletadas as emissões de CO, CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>, e respectiva pressão e temperatura destes gases, além do uso de GPS e baterias para alimentar o equipamento. As emissões de HC e NMHC ocorrem na fase fria, e nos ensaios realizados por Olmos et al. (2018) estes gases não foram medidos. O cálculo de energia consumida (MJ/km) durante o teste RDE foi baseado nos dados de torque do motor, calculado pela ECU. O trabalho gerado pelo motor (MJ), portanto é a integral do torque e rotação, em cada regime de operação, pela distância percorrida. Estes parâmetros são medidos somente em condições de aceleração estável ou positiva. A eficiência, com cada combustível, é calculada por meio da integral entre o torque produzido pelo motor dividido pela energia do combustível (OLMOS et al., 2019).

Os ensaios de Melo et al. (2012) utilizaram gasolina E22 com adição de etanol entre 30% e 80%, além do etanol E100. Para o ensaio em bancada, calcularam a eficiência energética por meio da Equação 3 (Melo et al., 2012):

$$\eta = 100 \times \frac{P \times 3600}{LHV \times FC} \quad (3)$$

Sendo  $\eta$  a eficiência energética (%),  $P$  a potência em kW,  $LHV$  o poder calorífico mínimo (*lower heating values*) do combustível (MJ/kg) e  $FC$  o consumo de combustível em kg/h (MELO et al., 2012).

Para a medição do consumo específico de combustível,  $BSFC$  (g/kWh) é aplicada a Equação 4 (LI et al., 2017):

$$BSFC = \frac{M_A/AFR}{P} \quad (4)$$

Sendo  $M_A$  o fluxo de massa de ar admitido (g/h) e  $AFR$  a relação ar combustível. Para o cálculo da potência  $P$  (*brake power* - kW), aplica-se a Equação 5 (LI et al., 2017):

$$P = T \left( \frac{2\pi N}{60} \right) \times 10^{-3} \quad (5)$$

Sendo  $N$  a rotação por minuto e  $T$  o torque (N.m). A eficiência térmica  $BTE$  – (*brake thermal efficiency*), em %, é obtida por meio da Equação 6 (LI et al., 2017):

$$BTE = \left( \frac{3600}{BSFC \times LHV} \right) \times 100 \quad (6)$$

A identificação do trabalho gerado pelo motor ao longo de ensaios do veículo é feita por meio da carga do motor em relação à respectiva rotação. Olmos et al. (2018) calcularam a carga do motor por meio do ar por cilindro. As temperaturas do motor e catalisador são mais baixas nos ensaios WLTC comparado ao FTP-75, o que resulta em elevação nas emissões de NMHC e etanol não queimado. As emissões de CO<sub>2</sub> foram menores para o etanol em relação à gasolina em todos os ensaios, incluindo RDE. O consumo de combustível medido em diferentes ciclos apresentou melhor resultado para o etanol nos testes RDE em função de altas velocidades e cargas, faixas em que o etanol E100 apresenta melhor eficiência. Avaliando a energia consumida por distância (km) o etanol apresentou melhor desempenho que a gasolina (OLMOS et al., 2019).

Visando estimar o consumo de combustível no Brasil, Melo et al. (2018) realizaram um levantamento pelo método *bottom up* das vendas desde 1957 e projeção até 2035. Foram considerados somente os veículos subcompacto e compactos por representarem 63% da frota brasileira. O consumo dos veículos é baseado no PBEV que pondera 55% de uso urbano e 45% rodoviário. O combustível é baseado na média aritmética entre etanol hidratado E100 e gasolina E22 (gasolina com etanol anidro). A análise foi feita com os veículos das duas categorias, mais comercializados desde 2004. A redução nas emissões de CO<sub>2</sub> até 2035 pode atingir 62,1 Gg de CO<sub>2</sub> somando as duas categorias de veículos (subcompacto e compacto). Apesar desta perspectiva, a regulamentação brasileira precisa restringir mais o consumo energético dos veículos. A política mandatória de padrão de economia de combustível tem apresentado resultados favoráveis ao redor do mundo, com a difusão de tecnologias, renovação de frota com perspectivas para a melhoria ambiental (MELO; JANNUZZI; SANTANA, 2018).

## 2.5 ELEMENTOS COM PARTICIPAÇÃO E MONITORAMENTO DAS EMISSÕES VEICULARES

Este capítulo aborda os elementos que participam e influenciam as emissões na sua origem e formação. Serão abordados o injetor de combustível, os combustíveis e biocombustíveis e o sistema de monitoramento eletrônico de emissões OBD.

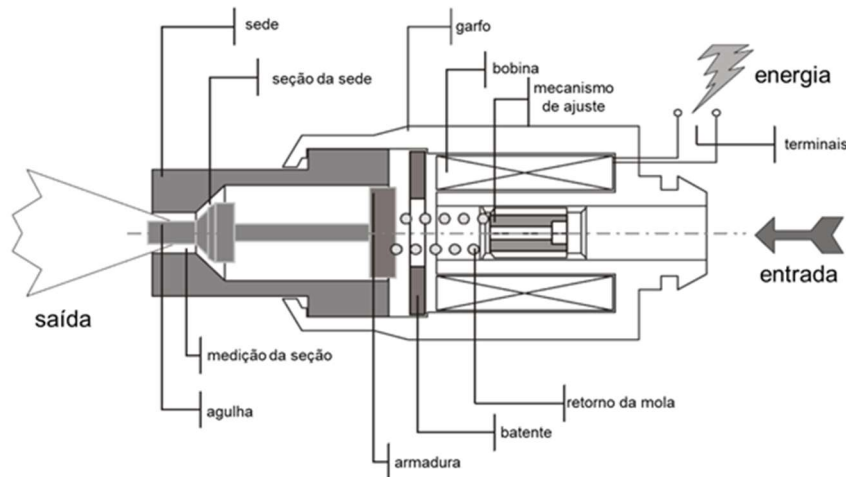
### 2.5.1 Injetor de combustível

Estudos sobre os eletro-injetores têm sido desenvolvidos no intuito de aprimorar o desempenho deste componente. Características da estrutura do injetor tem efeito sobre a combustão, por meio da atomização. As propriedades dos orifícios, o tipo de spray e abertura tem sido investigado em prol da identificação do melhor desempenho deste componente (HU; YANG; ZHOU, 2018).

O eletro injetor funciona por meio de pulso de comando o qual energiza a bobina que recua a agulha, de forma a liberar a passagem do combustível para o coletor de admissão em forma de gotículas. Ao final do pulso de comando a bobina desenergizada deixa a agulha sob o efeito da mola, conforme ilustrado pela Figura 14. Desta forma o combustível é dosado pelo pulso do injetor, mas outros fatores influenciam a medição da vazão do combustível em função da resposta dinâmica dos injetores. Durante a energização da bobina ocorre um retardo (*delay*)

na abertura que gera uma defasagem entre o início do pulso e o início da injeção do combustível, conhecido como *offset* (PASSARINI; NAKAJIMA, 2003).

Figura 14 – Estrutura do eletro injetor

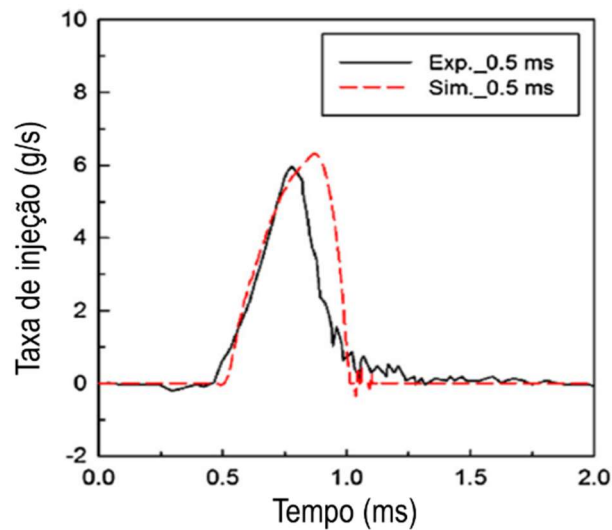


Fonte: (PASSARINI; NAKAJIMA, 2003)

O aumento na restrição das emissões e eficiência energética dos veículos tem demandado o aprimoramento dos componentes vitais dos motores, e o injetor de combustível tem uma participação significativa no desempenho energético. As características construtivas dos injetores influenciam as respostas de operação, e o padrão de spray contribui no processo de combustão. Fatores como pressão do combustível e geometria do injetor tem influência na propagação do spray, e as propriedades de cada combustível resulta em diferentes eficiências de vazão e queima. O tempo de injeção de combustível é identificado pelo spray de combustível, mas existe um atraso na abertura, que é o tempo entre a energização e o início da pulverização do combustível. Avaliando a combustão de diversos combustíveis, a gasolina apresenta o maior tempo para a ignição, em função menor número de cetano, quando comparado com o diesel e querosene (YU; YANG; ZHAO, 2017).

O eletro injetor apresenta elasticidade no funcionamento, de forma que a agulha quica algumas vezes antes de ter o fechamento completo no assento. Devido a este comportamento dinâmico, ocorreu a adição de uma pequena taxa de combustível no teste experimental, conforme pode ser identificado no fechamento do injetor da Figura 15. Esse efeito aumenta com a elevação da pressão em função da maior velocidade do fluxo de combustível, visto que o orifício tem a mesma área (HU; YANG; ZHOU, 2018).

Figura 15 – Comparação da taxa de injeção experimental e simulada, 30 MPa



Fonte: (HU; YANG; ZHOU, 2018)

O desempenho do eletro injetor deve ser ajustado para os diferentes tipos de combustíveis, em função das diferentes viscosidades. A análise como a resposta do injetor sob diferentes pressões de combustível, variação da temperatura do combustível, atrito viscoso e o movimento da agulha contribui para a identificação de ajustes na dinâmica do injetor. A influência da densidade do combustível sobre o tempo de abertura demandam mais investigações (HU; YANG; ZHOU, 2018)

Segundo experimento de Padala et al. (2013), o tempo entre o início de abertura do solenoide e a injeção do combustível ocorre em função da resistência da mola para o movimento da agulha. Os autores identificaram que intervalo entre o pulso do injetor e pulverização foi de 1,73 ms.

O aumento do coeficiente de elasticidade implica em retardo na abertura e fechamento da válvula, que também aumenta a velocidade do som no fluido. O aumento deste coeficiente indica uma rápida propagação da onda de pressão resultando em avanço na flutuação da pressão. Em sistema de baixa pressão, o coeficiente de elasticidade tem influência direta no retardo da abertura e fechamento da válvula (HU; YANG; ZHOU, 2018).

Algumas soluções têm sido estudadas e introduzidas como a, diminuição do tamanho das gotas de pulverização e a geometria do spray. As gotas podem ser melhoradas com o aumento da turbulência, obtido por meio do aumento da pressão de combustível e redução do diâmetro do orifício do injetor e aumento da quantidade (PADALA et al., 2013).

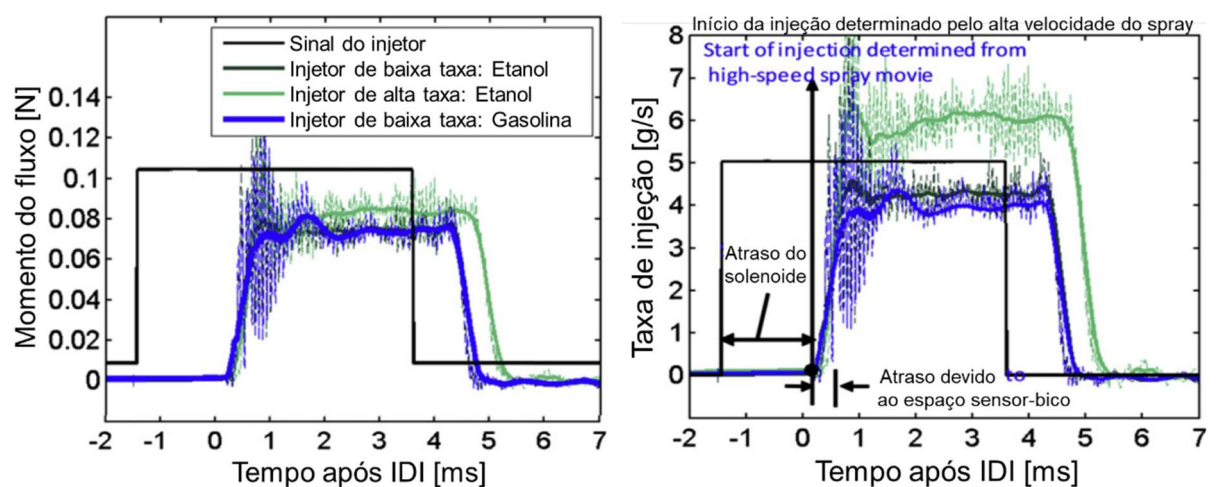
O coeficiente de elasticidade elevado indica que uma alta pressão é exigida para diminuir o volume de um fluido, e um fator de incompressibilidade elevado é obtido por meio

de um combustível com alto coeficiente de elasticidade. A incompressibilidade de combustível reflete na propagação da velocidade e amplitude da onda de pressão. A densidade afeta a resposta dinâmica do injetor, com impacto na resistência inercial e na velocidade de propagação da onda de pressão. A viscosidade está relacionada com a força de atrito, que impede o movimento da agulha. A perda de pressão tem relação direta com o atrito, densidade e velocidade do fluido (HU; YANG; ZHOU, 2018).

A maioria dos estudos sobre injetores avaliam a gasolina e o sistema de injeção direta de combustível. Padala et al. (2013) investigaram sobre injetores do sistema PFI com o uso do etanol. Utilizaram dois injetores, com diâmetros de furo diferentes e o tempo de injeção varia: curto, de 3 ms, e longo, com 8 ms. Foi utilizada uma câmera para o teste e feita a coleta de imagens. O teste foi feito em ambiente com temperatura controlada sob pressão atmosférica. Foi utilizada uma lâmpada estroboscópica (8 a 3  $\mu$ s) para congelar a imagem. As medições utilizaram captação por imagens para identificar o diâmetro e quantidade das gotículas e forma da pulverização. Para a medição da vazão foi utilizado um sensor de vazão com tecnologia piezoelétrico (*force sensor - Kistler type 9217A*) na saída do injetor (PADALA et al., 2013).

Na Figura 16 pode ser observado que o fluxo do injetor com alta taxa supera o injetor de baixa taxa, referenciado pelo início da injeção (IDI). Conforme análise de Padala et al. (2013), mesmo aplicando o mesmo pulso nos dois injetores (alta e baixa taxas), o injetor de alta taxa apresenta maior tempo de injeção. O motivo identificado foi que a agulha do injetor de alta taxa leva mais tempo para o retorno em função da maior resistência criada pela elevação do momento do fluxo dentro do injetor (PADALA et al., 2013).

Figura 16 – Dinâmica do momento e taxa do fluxo dos injetores

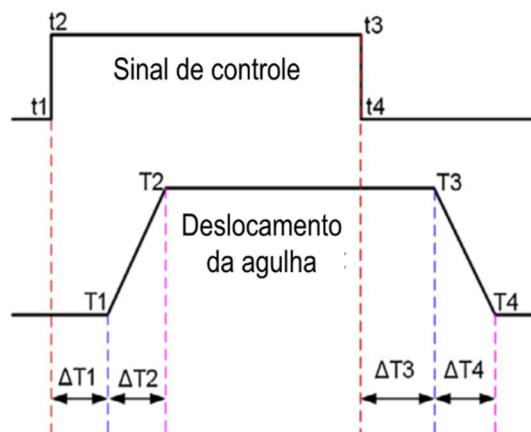


Fonte: (PADALA et al., 2013)

Observando o fluxo dos injetores avaliados no estudo, ocorre um retardo na abertura da agulha, em função da formação do campo eletromagnético, bem como um retardo no fechamento devido ao fluxo de combustível e resistência da mola (PADALA et al., 2013; PASSARINI; NAKAJIMA, 2003).

Outro fator que aumenta a resistência no movimento da agulha (abertura e fechamento) é a alta densidade do combustível, em função de elevar a inércia e diminuir a propagação da onda de pressão. Este atraso na propagação da onda de pressão resulta em retardo hidráulico, o que demanda aumento no tempo de abertura da válvula. A resposta dinâmica do injetor é estabelecida em função do retardo (*delay*) da abertura e fechamento e o tempo de comando deste, conforme detalhado na Figura 17. A defasagem entre o comando e o início da abertura é o  $\Delta T1$ , e o tempo da abertura da válvula ocorre entre T1 e T2. O atraso no fechamento é o  $\Delta T3$ , e o fechamento ocorre entre T3 e T4 (HU; YANG; ZHOU, 2018).

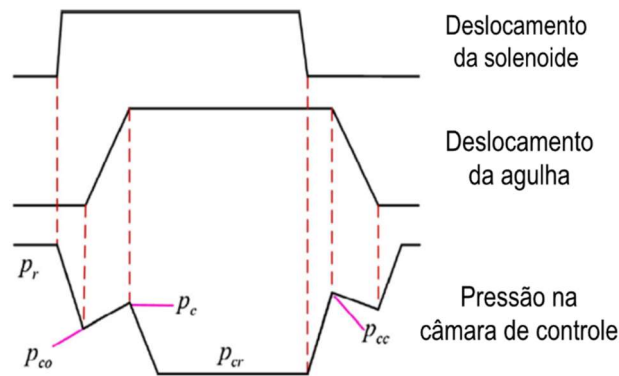
Figura 17 – Diagrama esquemático da resposta dinâmica do injetor



Fonte: (HU; YANG; ZHOU, 2018)

O momento do fluxo entre gasolina e etanol é o mesmo porque este independe da densidade do combustível, por outro lado, se fixar este parâmetro, o combustível com menor densidade apresenta menor taxa de injeção. A gasolina apresentou uma taxa aproximadamente 9% menor (PADALA et al., 2013). O tempo de abertura e fechamento do injetor tem relação direta com a diferença de pressão entre as câmaras de controle e acumulação. A Figura 18 apresenta um modelo teórico da flutuação da pressão na câmara de controle. Após a ativação da válvula, a pressão cai e tem ligeira elevação, e esta pressão crítica ( $P_{co}$ ) que estimula a abertura da válvula (HU; YANG; ZHOU, 2018).

Figura 18 – Variação da pressão da câmara de controle



Fonte: (HU; YANG; ZHOU, 2018)

Uma diferença de pressão menor demanda menor força para a abertura da agulha, o que leva a um movimento mais lento que resulta em maior tempo de abertura. Por outro lado, esta condição reduz o tempo de fechamento da válvula por diminuir a resistência na agulha. Os modelos unidimensionais (*One-dimensional models -1D*) tem sido aplicado em estudos sobre o desempenho do eletro injetor diante das variáveis presentes neste sistema, como pressão, temperatura, influência magnética e a não linearidade da válvula de agulha (HU; YANG; ZHOU, 2018).

Na comparação entre quantidade de gotículas, Padala et al. (2013) identificaram que o injetor de alta taxa apresenta maior quantidade em todas as fases da medição, entre 2 e 5 ms (variando de 1 em 1 ms). Conforme avança o tempo após o início da injeção, a quantidade aumenta independentemente do tipo de combustível e da taxa do injetor, em função da quebra das gotículas. Esta variação é similar entre gasolina e etanol. Comparando as gotículas destes dois combustíveis, o etanol apresenta maior quantidade. Os motivos observados foram a evaporação acelerada das gotículas de gasolina e a menor quebra das gotículas pesadas da gasolina. O etanol apresentou diâmetro médio menor das gotículas, em injetor de baixa taxa, o que reduz a probabilidade de quebra destas. Este fato ocorre em função do menor diâmetro dos orifícios do injetor e é uma característica que contribui com melhor atomização do combustível. A quebra das gotículas próximo à saída do injetor de baixa taxa ocorre com maior intensidade no etanol, o que explica o motivo do menor diâmetro das gotículas do etanol, comparado com a gasolina. Durante a fase transiente o diâmetro e a quantidade das gotículas mantêm-se estável na visualização do spray de combustível, porém, após o final da injeção a quantidade de gotículas diminui em função da evaporação, para ambos combustíveis. A influência do tempo de injeção tem menor efeito no spray do que o tipo de combustível. Conforme aumenta a distância do injetor, restam somente as gotas maiores, em função das menores terem evaporado.



A quantidade e diâmetro das gotículas são semelhantes na injeção longa e curta, para ambos os combustíveis (PADALA et al., 2013).

Para avaliar a influência do fluxo cruzado de ar do coletor sobre o spray de combustível do sistema PFI, Padala et al. (2013) inseriram um fluxo de ar a 12 m/s. O comportamento do spray sob estas condições não apresentou a variação esperada. Apesar do spray possuir velocidade superior (20 m/s), o momento da injeção é maior em função da maior densidade do combustível em relação ao ar. Ao final da injeção, as gotículas na entrada do fluxo cruzado, da esquerda para a direita, são menores que na saída em função de encerrar o momento da injeção. Isso demonstra interação das gotículas com o fluxo resultando em redução da densidade destas, devido a maior evaporação na entrada do fluxo. Esse fenômeno pode contribuir com a evaporação do etanol no sistema PFI. Ao final da injeção do combustível, a quantidade de gotículas tende a diminuir, também sob a influência da evaporação decorrente do fluxo cruzado. O efeito que leva a esta maior evaporação é devido a maior velocidade e pela quebra das gotículas, resultando em aumento na quantidade destas, mas com maior área de contato com o meio. Era esperada maior redução de gotículas para o etanol, porém o processo de evaporação, devido ao fluxo cruzado influencia o etanol e a gasolina de forma similar (PADALA et al., 2013).

### 2.5.2 Combustíveis

Historicamente o motor demanda uma fonte de energia para o funcionamento adequado. Com a maior restrição a emissões e melhor desempenho dos motores, a qualidade e propriedades dos combustíveis passaram a ter maior relevância. Mudanças como o número de octanas entre outros atributos dos combustíveis interferem no desempenho quanto a emissões de poluentes, eficiência energética, durabilidade do motor, entre outros fatores (LI et al., 2018; NASCIMENTO et al., 2017). As metas para redução de GEE vem fomentando o uso de tecnologias para ganho de eficiência energética como o turbo compressor com o downsizing, além de motores com elevada taxa de compressão. O uso de tecnologias híbridas esbarra no aumento de custo. O uso de combustíveis com maior octanagem permite a elevação da taxa de compressão e ajustes específicos no motor de forma a obter melhor rendimento. O conceito de octanagem sob demanda (*Octane-on-Demand*) avalia a sinergia entre as tecnologias de propulsão com octanagem dos combustíveis (MORGANTI et al., 2017).

Para o desenvolvimento de combustíveis e motores, a simulação por meio de programas permite otimizar testes por meio de variáveis e efeitos dos elementos envolvidos. Para o

desenvolvimento dos motores, normalmente é selecionado um combustível para a análise de desempenho. Na outra ponta, para o desenvolvimento de combustíveis é necessário ajustar as variáveis do motor e testar as diversas propriedades do combustível. A simulação de motores e combustíveis envolve a aplicação de conceitos complexos da termodinâmica, propriedades dos fluidos e combustão. Estes princípios ainda não possuem modelos totalmente resolvidos. Para viabilizar as análises de combustíveis e motores, diversos estudos têm utilizado conceitos da estatística, redes neurais e polinômios (NASCIMENTO et al., 2017).

O aumento no consumo de combustível afeta a disponibilidade de combustível fóssil, além da emissão de poluentes e GEE. Os biocombustíveis apresentam a vantagem de serem de fontes renováveis, e tem potencial para a redução das emissões e melhoria de eficiência. O metanol é produzido de produtos do petróleo, enquanto o etanol e butanol de fontes renováveis. O butanol tem maior densidade energética, mas apresenta menor eficiência no processo de fermentação do ABE (acetona-butanol-etanol). A produção do etanol rende de 10 a 30 vezes mais que o butanol. Para avaliar a influência destes combustíveis nas emissões Li et al. (2017) compararam o consumo entre a gasolina pura (G100) e gasolina com adição de álcoois. O butanol apresentou o menor BSFC em relação ao etanol e metanol, este último com a maior variação entre os três. A adição de álcoois também elevou a emissão de CO, e o butanol apresentou a menor variação, com aumento de 20% quando testado com o B60, e a mistura com etanol E60 elevou o CO em 88%. No caso de hidrocarbonetos não queimados (UHC) a situação se inverte para butanol e etanol. Em função da presença de oxigênio no combustível, a queima dos combustíveis com álcoois é melhor, resultando em menor emissão de UHC quando é usado butanol e etanol. No caso do metanol a emissão de UHC aumenta em função da maior relação estequiométrica (AFR). Por outro lado, a mistura mais rica do metanol resultou em menores emissões de NOx devido à retirada de calor da câmara pelo combustível. As menores emissões ocorreram com a adição de 30%, dos três álcoois, para os três poluentes avaliados (LI et al., 2017).

#### 2.5.2.1 Combustíveis renováveis

A ampliação do uso de derivados o petróleo tem efeito na degradação ambiental, incluindo o aquecimento global, devido ao aumento de consumo de combustíveis fósseis (EL-FAROUG et al., 2016). O uso de combustível fóssil leva para um futuro de escassez no fornecimento e o impacto ambiental gerado por seus efeitos tem fomentado a busca por combustíveis alternativos (ZHUANG; HONG, 2013). A mudança deste cenário tem ocorrido

por meio de pesquisas de novas fontes de energia, com preferência dos renováveis, como o caso do etanol produzido de fontes como o milho e cana de açúcar (EL-FAROUG et al., 2016). Um dos caminhos é o uso do etanol, com o benefício de ser renovável. Estudos sobre este combustível tem indicado os benefícios que pode proporcionar por meio de ganho no processo de combustão. Usado como aditivo, resulta em mistura com maior poder calorífico, melhora no calor específico, contribui na velocidade da combustão, permite aumento da taxa de compressão, por aumentar a octanagem que resulta em ganhos na eficiência térmica (ZHUANG; HONG, 2013).

O etanol tem sido utilizado como aditivo ou combustível alternativo de motores a ignição por centelha. Para ampliar o uso deste combustível, tem-se investido em processo de produção mais eficiente que reduza os custos. Durante o crescimento da planta existe a captura do CO<sub>2</sub>, o que reduz o impacto de GEE (EL-FAROUG et al., 2016). A adição de etanol na gasolina permite o ganho de octanagem sem sofrer com os efeitos das propriedades do combustível, como a densidade energética, e a partida a frio. Para o ganho de eficiência sob demanda, o uso de dois combustíveis deve ser dosado conforme o regime de uso. Para cargas intermediárias e baixas, o combustível fóssil responde bem com menor octanagem, devendo migrar para combustíveis como o etanol ou metanol em cargas elevadas, de forma evitar a detonação (MORGANTI et al., 2017).

Para ter os benefícios da gasolina com adição de etanol, o motor deve ter características que correspondam às necessidades deste combustível. Se o motor não for dimensionado para este combustível, como taxa de compressão para gasolina, o benefício se reverte em perdas. A adequação dos motores para operar com adição de etanol permite ganhos de eficiência termodinâmica por operar com maior taxa de compressão, em função do maior calor latente, o que reduz a temperatura da câmara (ZHUANG; HONG, 2013).

As variações de emissões de CO<sub>2</sub> para a produção do bioetanol está intimamente ligada ao processo produtivo e meios de transporte. Conforme a biomassa de cada tipo de bioetanol, maior é o consumo de energia. A adição de etanol de milho na gasolina tem a melhor relação com E10, em função deste ser um etanol com maior emissão de CO<sub>2</sub>. A emissão do poço à bomba (*well-to-pump* – WTP) do combustível aditivado com E30 de milho, equivale ao dobro do emitido com o etanol de cana de açúcar. Estes parâmetros não consideram os créditos biogênicos. Se levar em consideração estes parâmetros, o etanol da cana tem redução das emissões em 98,8% em função do uso da biomassa na geração de calor (ZHANG; SARATHY, 2016).

A primeira geração do bioetanol (1G) teve seu início no Brasil nos anos de 1970, em função da crise do petróleo. O PROALCOOL introduziu políticas para incentivo do uso do bioetanol da cana de açúcar, o que consolidou investimento em usinas e plantações para atender esta demanda. Este programa incentivou o uso do bioetanol por meio de subsídio como forma de substituir os derivados de petróleo. Atualmente o Brasil é o segundo maior produtor, atrás somente dos EUA. No ano de 2014, o etanol respondeu por quase um terço de toda energia para movimentar os veículos leves do Brasil (LOPES et al., 2016). O etanol é fornecido no mercado Brasileiro na forma hidratada, E100, que apresenta uma relação superior da relação entre hidrogênio e carbono comparado com a gasolina local, E22. Esta diferença resulta em ligeira redução do volume de CO<sub>2</sub> emitido quando comparado com a gasolina na mesma base energética de consumo, próximo de 1 gCO<sub>2</sub>/MJ (OLMOS et al., 2019).

A adição de etanol à gasolina foi introduzida nos EUA em 1978 e a dosagem evoluiu até o patamar atual de 10%. O uso de combustível renovável contribui com a segurança energética e com a melhoria das emissões. A adição à gasolina melhora a resistência à detonação, com ganho na eficiência energética. A octanagem média da gasolina nos EUA é de 91-92 RON (*research octane number*), na Europa a gasolina apresenta 95 RON, e o etanol tem 109 RON. O etanol apresenta uma das melhores opções entre os álcoois. Comparado ao butanol e outros, o etanol oferece melhor viabilidade econômica em termos de tecnologia, apresenta octanagem de 100 RON em mistura de 30% (E30). Esta característica permite aumento da taxa de compressão, com ganho de desempenho e uso de turbocompressor e redução do motor (ZHANG; SARATHY, 2016).

Como alternativa ao combustível fóssil, o etanol tem sido alvo de pesquisas em função de suas características como maior octanagem, maior velocidade de chama além de conter oxigênio na estrutura molecular, maior calor latente de vaporização, o que reduz a temperatura do ar, contribuindo para a eficiência volumétrica. Além destes elementos, a molécula adicional de oxigênio melhora a combustão com ganho na eficiência térmica em função da maior velocidade de chama, o que reduz a perda térmica na parede do cilindro (DENG et al., 2018). Estas características contribuem para a redução da detonação, permitindo aumentar a taxa de compressão e assim melhorar a eficiência energética (KIM; CHO; MIN, 2015). A maior octanagem e maior velocidade de chama também contribuem para menor emissão de CO<sub>2</sub> (OLMOS et al., 2019). Maior adição de etanol melhora a aplicação de turbocompressor e redução do motor (*engine downsizing*) com redução do consumo de combustível e emissões de CO<sub>2</sub>, o que viabiliza o etanol como aditivo. A gasolina com maior resistência à detonação permite o aumento da taxa de compressão com consequente ganho de eficiência termodinâmica

do motor. O aumento da octanagem permite ganho de eficiência em motores aspirados e turbo (ZHANG; SARATHY, 2016).

O consumo específico é maior em baixas rotações em função da menor temperatura nesta faixa, reduzindo com o aumento da rotação devido à maior utilização da energia com a melhora da combustão. Com o aumento do volume de etanol hidratado o consumo específico aumenta em função de demandar mais combustível para gerar a mesma potência (DENG et al., 2018). O etanol normalmente apresenta queima mais limpa que os combustíveis fósseis (EL-FAROUG et al., 2016). Adicionando etanol à gasolina resulta em aumento da octanagem que permite o aumento da taxa de compressão dos motores, resultando em aumento da eficiência energética. Esta mistura permite ganho de eficiência em carga parcial e contribui para o efeito de refrigeração que resulta em redução no consumo de combustível e melhoria das emissões (ZHANG; SARATHY, 2016).

Por outro lado, o etanol possui menor poder calorífico, o que aumenta o consumo específico (BSFC) e reduz a autonomia dos veículos. Outro ponto é o alto calor latente de vaporização e ponto de ebulição que dificulta a partida a frio (EL-FAROUG et al., 2016) e para reduzir estes efeitos, a mistura do etanol à gasolina permite obter características que atendam melhor a utilização, mas requer ajustes nos motores (KIM; CHO; MIN, 2015).

Para obter o etanol anidro é necessário reduzir para menos de 1% de água. Esta redução tem como penalidade o consumo elevado de energia devido ao processo de destilação e desidratação que representam mais de um terço da energia de produção (EL-FAROUG et al., 2016). Como o etanol é uma substância hidrofílica, este se dissolve facilmente na água. A desvantagem é que a conversão do etanol hidratado para o anidro exige consumo de energia. O etanol hidratado tem 95,6% de álcool após a fermentação e destilação. A desidratação para o patamar de 99,5% resulta no etanol anidro que pode demandar 50% da energia do processo produtivo (DENG et al., 2018). O etanol é um combustível renovável que pode ser adicionado à gasolina a taxas de 10% (E10) e aplicações com até 85% (E85) em motores *flex-fuel*. Por operar em maior compressão, o etanol permite a melhoria da eficiência energética, com consequente redução das emissões de poluentes, apesar de menor poder calorífico (PADALA et al., 2013). O calor de vaporização do etanol é o calor para a mudança de fase, o qual é três vezes maior que na gasolina. Os estudos indicam que o ganho no efeito de refrigeração é significativo a partir de 40% de etanol na gasolina (ZHANG; SARATHY, 2016).

A eficiência da queima do combustível está diretamente relacionada com as propriedades física e química que variam entre o etanol hidratado, anidro e a gasolina. O etanol hidratado tem maior ponto de fulgor e temperatura de autoignição, o que facilita o transporte e

armazenamento. Também proporciona melhor eficiência volumétrica devido ao maior calor latente de evaporação que resulta na redução da temperatura no coletor de admissão. O etanol hidratado demanda menor quantidade de ar para uma combustão completa. A temperatura de chama adiabática do etanol hidratado é menor por apresentar baixa relação atômica C/H. Este combustível pode ser usado em motores com maior taxa de compressão por apresentar maior octanagem. A eficiência térmica do etanol hidratado é melhor que a gasolina e o etanol anidro em função da maior velocidade laminar de chama que acelera a combustão e atenua a temperatura de câmara reduzindo a possibilidade de detonação (EL-FAROUG et al., 2016).

Aumentar a participação do etanol no mercado oferece ganho ambiental em função do uso de um combustível renovável, por outro lado, o ciclo de produção demanda o uso de energia que gera aumento nas emissões de GEE. A razão desse aumento é a elevada participação de combustíveis fósseis no processo produtivo e de transporte de bioetanol. Para a redução neste impacto, algumas mudanças podem contribuir, como o uso de biocombustíveis, aumento no uso de energia elétrica limpa, de fontes solar e eólica, e até mesmo o uso de meio de transporte elétrico (LOPES et al., 2016).

A gasolina é composta por uma cadeia de hidrocarbonetos e elementos originários do petróleo, como o enxofre orgânico. A cadeia com alto carbono compõe a parte pesada da gasolina que tende a resultar em ponto de ebulição mais elevado, enquanto os elementos mais leves apresentam menor ponto de ebulição, comparados com o etanol. O etanol possui maiores densidade, tensão superficial e pontos de fulgor que a gasolina (PADALA et al., 2013). A mistura de etanol com a gasolina é imiscível com a água. A água pode ser dissolvida na gasolina, mas assim que ocorre a saturação pode ocorrer a separação de fase com o etanol. A solubilidade varia conforme propriedades dos combustíveis, pressão de aplicação e temperatura. O aumento da estabilidade da mistura gasolina, etanol e água pode ser obtido por meio de aditivos, emulsificadores ou solventes (EL-FAROUG et al., 2016).

O calor latente da vaporização do etanol hidratado pode baixar a temperatura na admissão, com melhora na eficiência volumétrica, permitindo ganho em potência e torque do motor. O ganho varia conforme a calibração da unidade de controle, que é ajustada para cada combustível, bem como as características construtivas do motor. Se forem utilizados diferentes combustíveis sem modificações no motor e na calibração, pouco será obtido de melhora com o uso de diferentes combustíveis (DENG et al., 2018).

A água presente no etanol pode acelerar o pico de pressão com o aumento do avanço da ignição que aumenta a potência e torque de saída. Maior quantidade de água apresenta redução na velocidade de queima laminar devido a diluição e efeitos químicos da água. Até uma

proporção de 30% de água no etanol, o desempenho ainda se mantém relativamente estável quanto ao funcionamento incluindo as taxas de combustão. O volume de 30% também contribui para ganho em potência, torque e eficiência térmica. O aumento da água pode levar a uma contração do volume e retardar o pico de pressão, além de poder degradar a combustão devido à queda na velocidade de chama. Apesar de uma série de estudos a respeito do desempenho do motor com maior proporção de água no etanol, ainda existe a necessidade de mais pesquisa nesta área. Alguns tópicos são indicados para estes estudos, como sistema duplo de injeção de combustível, aplicação com turbocompressor, além do desempenho e consumo dos motores (EL-FAROUG et al., 2016)

#### *2.5.2.1.1 Emissões e eficiência com o uso de etanol*

Diversos estudos avaliaram o desempenho de motores com uso combinado de etanol. Testes realizados com aditivação de etanol demonstram ganho na eficiência térmica e redução de consumo. Alguns experimentos utilizaram sistema duplo de injeção de combustível, utilizando injeção indireta para gasolina e dosando o etanol por meio do sistema de injeção direta. Os resultados demonstraram que o aumento na pressão média efetiva melhora a eficiência que resultam e menor emissão. Motores para operar com etanol puro (E100) utilizam maior taxa de compressão e apresentam maior torque, parte em função da fração molar do gás queimado. Visando investigar os benefícios do etanol no consumo e desempenho, Zhuang e Hong (2013) utilizaram um motor monocilíndrico em dinamômetro de bancada, com sistema duplo de injeção de combustível e sonda lambda de banda larga. Ambos injetores controlados pela unidade de controle, o sistema de injeção direta foi alimentado por etanol e de injeção indireta (PFI) por gasolina. O injetor, da injeção direta, foi instalado entre a válvula de admissão e a vela, no intuito de manter mistura mais rica na região da vela. Foram aplicados dois níveis de cargas, baixa e média, e rotação entre 3500 rpm e 5000 rpm. A injeção direta do etanol ocorre a 300° APMS para homogeneizar a mistura. A taxa energética entre os combustíveis (*ethanol/gasoline energy ratio* - EER) foi definida por meio da taxa de energia de aquecimento. Esta taxa relaciona a energia de aquecimento do etanol com a combinação dos dois combustíveis, a qual variou de zero a 60% (ZHUANG; HONG, 2013).

Apesar dos benefícios do uso do etanol, algumas preocupações devem ser consideradas, como as emissões de aldeídos, maior calor latente de vaporização e menor pressão de vaporização. Esta característica dificulta o funcionamento do motor na fase fria, regime em que ocorre condensação nas paredes internas do motor que inclui: válvulas, cilindro e coletor

(PADALA et al., 2013). De forma similar, a eficiência térmica é menor em baixa rotação devido principalmente à perda térmica na parede do cilindro. Em rotações mais elevadas, quanto maior a dosagem do etanol na gasolina, melhor é a eficiência térmica. A presença do radical hidroxila (-OH) melhora a velocidade de propagação de chama que resulta em melhor combustão. A presença do oxigênio no combustível tem influência nesse ganho (DENG et al., 2018).

O motor operando em torque mais elevado apresenta pressão média no cilindro mais elevada quanto maior a proporção de etanol que resulta em maior duração da combustão. Este efeito é proveniente da maior octanagem do etanol que permite adiantar a ignição. Por outro lado, o consumo específico aumenta conforme a proporção de etanol se eleva. Este resultado é devido ao menor poder calorífico do etanol. A maior eficiência energética ocorre com o etanol anidro (E100) e a segunda melhor condição com a adição de 30% de etanol à gasolina (MELO et al., 2012). Conforme estudo de Zhang, Sarathy (2016), a adição de 32% de etanol resulta em gasolina com 105 RON e apresentou a menor emissão WTW. O ganho com a eficiência térmica supera a emissão de CO<sub>2</sub> no processo produtivo. A emissão da bomba à roda (*Pump-to-Wheel* – PTW) reduz com o aumento na adição de etanol, em função do ganho de eficiência na carga parcial. Para combustíveis com RON 95 e 97, a maior redução de CO<sub>2</sub> WTW ocorre quanto maior for a adição de etanol. O motivo ocorre em função do processo produtivo de aditivo para o aumento da octanagem emitem mais CO<sub>2</sub> que o etanol (ZHANG; SARATHY, 2016).

A pressão média específica aumenta com o EER (maior proporção de etanol), em função do alto calor latente do etanol, aumenta a velocidade de combustão. A eficiência volumétrica também aumenta com o EER em função do arrefecimento da injeção indireta e da maior massa de etanol para manter a estequiometria. Por outro lado, o aumento da taxa de etanol aumenta o consumo total de combustível, em função da mistura estequiométrica mais rica para o etanol. Em função da diferença energética entre os combustíveis, as medições de rendimento devem se basear em consumo energético específico (*brake specific energy consumption* - BSEC). O BSEC resulta da soma das taxas de aquecimento dos combustíveis (HE), produto dos valores mínimos de energia de aquecimento dos combustíveis (LHV) pela taxa do fluxo da massa dos combustíveis. O BSEC diminui com o aumento do EER, o que representa menor necessidade de energia para a mesma potência, quando aumentada a quantidade de etanol na mistura. Com o aumento da taxa de etanol (EER) de zero até 60% a pressão no cilindro aumenta possivelmente pelo aumento de eficiência volumétrica, efeito do molar multiplicador e maior velocidade de combustão do etanol. A eficiência térmica do motor aumenta com o aumento da taxa de etanol que poderia resultar em: elevação da velocidade laminar da chama, queda na



temperatura de chama do etanol e maior efeito de refrigeração do etanol (ZHUANG; HONG, 2013).

Diversos estudos que avaliaram motores com o uso de etanol, também demonstraram o uso de etanol com a gasolina, em motores *flex*. A gasolina com a adição de etanol apresenta emissões de NO<sub>x</sub> mais elevada em algumas faixas de uso, mas reduz o CO e HC, com efeito semelhante ao usar somente o etanol hidratado, mas neste caso com redução do NO<sub>x</sub>. Outro estudo que adicionaram etanol hidratado, na faixa de 10% a 20% na gasolina, indicaram ganhos na eficiência térmica e redução nas emissões de CO, HC, NO<sub>x</sub> e CO<sub>2</sub> (DENG et al., 2018). A adição de etanol reduz as emissões de CO em função de conter molécula adicional de oxigênio, o que contribui para a oxidação da mistura. Com o avanço da ignição, o THC praticamente não se alterou, mas o NO<sub>x</sub> aumentou. O motivo deste aumento é a antecipação da ignição, com consequente aumento de temperatura, o que eleva o NO<sub>x</sub>. A emissão de particulado apresentou redução com o uso de etanol (KIM; CHO; MIN, 2015).

A emissão de NO<sub>x</sub> apresenta fenômeno inverso, com o uso somente do etanol, pelo motivo de que a presença do oxigênio no combustível aumenta a velocidade de chama, o que resulta em maior pressão no cilindro, com consequente aumento de temperatura. A emissão de CO reduz com o aumento da rotação, bem como adicionando mais etanol hidratado no combustível. A presença do oxigênio no etanol permite homogeneizar a mistura resultando em otimização da combustão de forma a melhorar a conversão de CO em CO<sub>2</sub>, reduzindo a emissão de CO. Outro fator é a propagação de chama que é beneficiada pelo radical hidroxila e decomposição da água, melhorando a combustão e a oxidação do CO, motivo da redução da emissão no escapamento. O HC tem valor mais elevado em baixa rotação e reduzindo com a elevação da rotação devido ao aumento da temperatura da câmara que resulta em oxidação do HC. De forma análoga, a presença de oxigênio no etanol e a evaporação da mistura mais rica contribuem com a combustão que reduz a emissão de HC. Em rotação elevada, o radical proveniente da água promove oxidação do HC de forma similar, mesmo quando se varia o volume de etanol (DENG et al., 2018).

Conforme análise de El-Faroug et al. (2016), o uso de etanol hidratado tende a reduzir as emissões de poluentes como NO<sub>x</sub> e CO. As emissões de HC podem variar em função de alguns fatores, com o nível de homogeneidade, a geometria da câmara de combustão e a queda de temperatura da chama influenciam os níveis de HC. Em misturas muito pobres, e atraso na ignição podem levar à combustão incompleta, que eleva a emissão de HC. A presença de água no combustível contribui para a redução de picos de temperatura na combustão que tende a baixar a formação de NO<sub>x</sub>, mas aumenta a formação de HC. Por outro lado, este efeito pode

baixar a temperatura do sistema de exaustão, o que afeta o desempenho do catalisador. A presença de oxigênio no etanol promove ganhos na eficiência de combustão, com redução principalmente no CO e HC, mesmo antes do catalisador (EL-FAROUG et al., 2016).

As emissões de NO aumentam com a elevação da taxa de etanol até 24,3% em função da melhoria da combustão e consequente aumento de temperatura na câmara, conforme estudo de Zhuang e Hong (2013). Após esta taxa a emissão de NO apresenta redução contínua em função do maior calor latente do etanol e maior quantidade de moléculas tri atômicas, aumentando a capacidade de aquecimento do gás, o que reduz a temperatura do gás da combustão. Apesar do etanol conter átomo de oxigênio, o que melhora o processo de oxidação, os valores de CO e HC aumentaram. Um dos motivos para esse efeito seria a redução da temperatura da câmara, o que compromete o processo de combustão (ZHUANG; HONG, 2013).

Diversos estudos que avaliaram o desempenho do etanol hidratado em comparação à gasolina pura ou com adição de etanol anidro, demonstraram algumas contribuições e vantagens acerca deste combustível. Os benefícios identificados com o uso do etanol hidratado é o ganho na eficiência volumétrica, devido à redução de temperatura no coletor de admissão, apresenta maior potência e torque de saída em altas rotações, com provável influência da mistura mais rica, maior octanagem, além do maior avanço da ignição que também permite atingir pressão mais elevada no cilindro. A pressão efetiva é maior com o etanol hidratado devido a melhoria no processo de mistura entre ar e combustível e combustão mais efetiva em altas rotações, além da maior presença de radicais de O, H e OH pela dissociação da água, que contribui para o processo de combustão. O pico de pressão é influenciado pelo avanço de ignição. O etanol hidratado adicionado à gasolina contribui para o aumento da eficiência de combustão, pressão no cilindro, velocidade de chama e diminui o tempo de combustão, com ligeiro aumento em potência, torque e eficiência térmica (EL-FAROUG et al., 2016).

A desvantagem do uso deste combustível é o maior consumo específico devido ao menor poder de calorífico que a gasolina. Outro efeito negativo deste combustível é a formação de aldeídos, que são compostos orgânicos que deflagram reações na atmosfera. A presença de grupo funcional de hidroxilas (OH) no etanol resultam na formação de aldeídos provenientes da combustão incompleta e reações da água. Os produtos da combustão resultam principalmente em formaldeído (HCHO) e acetaldeídos (CH<sub>3</sub>CHO) no estado hidratado. As emissões variam conforme regime do motor e estequiometria. Quanto maior a porção de água no etanol, maior é a formação de formaldeído e acetaldeídos, com provável influência da perda de calor para a vaporização da água que leva a uma combustão incompleta em função

temperatura de chama adiabática. Esses elementos têm potencial para a formação de ozônio (EL-FAROUG et al., 2016).

#### 2.5.2.1.2 Emissão de carbono no ciclo produtivo do etanol

Desde a revolução industrial, nos anos 1700, o nível de emissões e concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera só tem crescido. A redução nas emissões de CO<sub>2</sub> tem como objetivo a diminuição deste gás na atmosfera para restabelecer os padrões ambientais do planeta. Os automóveis têm uma ampla responsabilidade nestas emissões, o que fomenta o desenvolvimento e introdução de tecnologias que reduzam o consumo de combustível. Os biocombustíveis têm papel importante na redução no impacto ambiental, em função tanto das emissões geradas diretamente no processo de combustão assim como na redução durante o processo de produção destes combustíveis (EHSANI; AHMADI; FADAI, 2016). O bioetanol pode ser produzido a partir da destilação do caldo da cana de açúcar e tem o bagaço como resíduo. Essa biomassa tem sido utilizada como fonte de calor para a geração de energia elétrica, para uso da usina e em alguns casos a venda do excedente. Como forma de aumentar a produtividade do etanol são usadas tecnologias para a produção do bioetanol lignocelulósico, conhecido como de segunda geração (2G). A produção desta geração de etanol pode usar o bagaço e as folhas, que antes eram queimados. A produção ainda é pouco competitiva no Brasil em função do custo para a conversão de lignocelulose em açúcar fermentável (LOPES et al., 2016).

Para a análise de emissões WTT de GEE, Morganti et al. (2017) analisaram as emissões decorrentes da mudança no uso do solo (*land use change* - LUC) e emissões biogênica de GEE. A gasolina e o metanol são derivados do petróleo e o bioetanol do milho e da cana de açúcar. As emissões de GEE é baseada em CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2e</sub>), que incluem o CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O. As emissões de GEE da biomassa não é considerado em função do abatimento do CO<sub>2</sub> emitido do carbono biogênico absorvido. A emissão TTW de GEE é resultado do balanço de massa medido durante o ciclo de teste, com valores em grama de CO<sub>2</sub> por quilometro (g CO<sub>2</sub>/km) (MORGANTI et al., 2017).

Visando analisar as variáveis envolvidas no ciclo de vida de produção do etanol, Lopes et al. (2016) simularam cenários com processo produtivo convencional e mais eficiente (plantio e colheita). O bioetanol 1G e 2G, também são confrontados, em função da diferença de produtividade entre estes. As dosagens de hidrólise enzimática (EH) do bioetanol 2G foi escalonada em quatro níveis para avaliar a viabilidade econômica. Para todos os cenários são considerados tanto a produção do bioetanol anidro como o hidratado. Para estimar o impacto

ambiental do Potencial de Aquecimento Global referente ao CO<sub>2</sub>, o modelo *Input-Output* (IO) leva em consideração a emissão de GEE envolvido no processo. Os fatores de emissões levam em consideração os gases de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O, em relação ao processo industrial, manejo agrícola, energia, formas de uso da água e emissões (involuntárias) fugitivas (LOPES et al., 2016)

Utilizando a análise WTW, as duas etapas envolvidas devem ser evidenciadas. O ganho nas tecnologias embarcadas faz parte das emissões primárias TTW de GEE, enquanto as emissões WTT são as emissões secundárias de GEE, as quais incluem o processo de extração, refino e transporte. A análise de impacto de GEE do poço à roda depende da localidade e eficiência da produção do combustível. Introduzindo etanol em diferentes proporções na gasolina, permite ganho de eficiência no motor em algumas combinações, mas podem ter resultado negativo dependendo do impacto no ciclo produtivo. Os estudos apontam que um nível entre 20 e 30% de etanol na gasolina (E20 – E30) permite as maiores reduções de GEE do poço a roda (MORGANTI et al., 2017).

O crédito biogênico do WTP inclui o processo produtivo, o qual varia conforme cada localidade. A produção de etanol do milho tem maior emissão da biomassa que da cana de açúcar. A produção de etanol da cana de açúcar tem 9.5 g/MJ de emissão de CO<sub>2</sub> por conteúdo de energia. No caso da gasolina este valor varia de 8.5–12.5 g/MJ. Como o etanol apresenta maior consumo que a gasolina, sua adição aumenta a emissão WTP, e no estudo de Zhang, Sarathy (2016), o limite de ganho no WTW é do E32. O aumento de etanol leva a maior aumento no WTP do que a redução do PTW, em função da queda de eficiência do motor em adição elevada de etanol. Aumentando a dosagem de etanol de E32 para E38 com combustível RON 105, a emissão de CO<sub>2</sub> no WTP aumenta em 5,7% em função do processo produtivo. Em compensação, e eficiência PTW aumenta em 3,9%, resultando em redução de 0,2% nas emissões. A dosagem de etanol de cana de açúcar para a redução da emissão do ciclo de CO<sub>2</sub> é de 32% na gasolina. Nesta concentração a emissão de CO<sub>2</sub> é 7,1% menor comparado à gasolina padrão (E10). A melhor condição de aditivação do etanol de milho na gasolina é 10%, porém com aumento de 8,8% nas emissões (ZHANG; SARATHY, 2016).

Os estudos de emissões de GEE do poço a roda com diferentes proporções de etanol na gasolina permite avaliar a eficiência das emissões primárias, mas com o mesmo tipo de motorização. Avaliando as emissões WTW de GEE no ciclo US06, a parcela WTT equivale em média a 17% das emissões. Esse valor pode variar dependendo da origem da matéria-prima do combustível. Os combustíveis E10 e E30 proveniente do milho tem maior emissão WTW de GEE que a mesma composição vinda da cana de açúcar. O etanol da cana de açúcar também se

beneficia da menor emissão de uso do solo que o mesmo combustível proveniente do milho. A redução de emissões WTW da gasolina E30 do etanol de cana é 18% em relação ao do milho. O metanol tem mais emissões que o etanol em função da origem fóssil. Para o aproveitamento do aumento da octanagem, os motores precisam ajustar os mapas para compatibilizar eficiência térmica com a densidade energética do combustível. As emissões com base no conceito octanagem sob demanda rendem até 10% de economia com a gasolina E30 (MORGANTI et al., 2017).

Os caminhões para o transporte de cana são de maior capacidade de carga e maior eficiência, portanto consomem menos combustível e óleo lubrificante. Uma diferença relevante entre os combustíveis das duas gerações é o volume de produto químico utilizado. A quantidade de trabalhadores e a emissão de GEE, em função do consumo de energia, aumenta à medida que aumenta o uso de enzimas (produto químico). A combinação de 1G + 2G demanda menor volume de cana de açúcar para produzir o mesmo volume de bioetanol 1G. Em função desta redução, ocorre também menor demanda de mão de obra, por reduzir as atividades agrícola e industrial. A matéria prima produção do bioetanol 2G pode ser armazenada, o que possibilita a produção desta na entre safras da cana de açúcar. Os insumos utilizados na produção do etanol 2G tende a reduzir de médio a longo prazo, conforme o aprimoramento tecnológico e ganho de escala forem evoluindo. Como forma de reduzir as emissões de GEE no processo de produção do bioetanol, algumas melhorias podem contribuir para otimização de recursos (LOPES et al., 2016).

#### *2.5.2.1.3 Nível de ruído de veículos abastecidos com etanol*

O amplo uso dos automóveis nas regiões metropolitanas tem afetado a qualidade de vida não somente em função dos poluentes, mas também pelo ruído emitido. A poluição sonora afeta a saúde humana não somente quanto ao aparelho auditivo, mas distúrbios mentais, com comprometimento na qualidade do sono. O processo de combustão gera o ruído que resulta no barulho expelido pelo escapamento. Para avaliar as emissões e nível de ruído, resultante da combustão de gasolina pura (E0), etanol hidratado a 5% com adição de 10% e 20% na gasolina (E10W e E20W), Deng et al. (2018) utilizaram um veículo 1.5L em dinamômetro, com medições por meio de analisador de gases de passagem e medidor de consumo de combustível. O alto calor latente de vaporização causado pela água do combustível apresenta retardo na ignição, com redução da temperatura de câmara, quando o motor opera em baixa velocidade. A combustão contendo etanol hidratado apresenta expansão tanto da reação química quanto da

evaporação da água, o que aumentou o fluxo de gás no escapamento, com consequente aumento de ruído no escapamento (DENG et al., 2018).

### 2.5.3 Conversor catalítico

As emissões que ocorrem no motor passam pelo catalisador que modifica a combinação molecular dos componentes emitidos. Portanto, as medições de emissões realizadas em ensaios são feitas após o catalisador e, desta forma, esta seção aborda os conceitos envolvidos com o sistema de conversão catalítica.

O controle de poluentes veicular é uma preocupação há mais de meio século e diversas localidades passaram a controlar os limites. O estado da Califórnia deu os primeiros passos no início dos anos de 1960, a Europa introduziu as primeiras regulamentações nos anos de 1970 e desde esta época muitos países adotaram restrições aos limites de poluentes. Para redução das emissões de poluente como o CO, NO<sub>x</sub> e C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>, os conversores catalíticos têm sido instalados no sistema de exaustão dos veículos (GASSER; RYBICKI; WOLLNER, 2014). O processo de conversão dos gases de escapamento, NO<sub>x</sub>, HC e CO, ocorrem por meio do catalisador de três vias (*three-way catalyst – TWC*) que necessita de mistura estequiométrica para melhorar o processo, nos motores a gasolina. Desta forma o sensor de oxigênio antes do catalisador informa a relação ar combustível (MOOS, 2010).

Para o pleno funcionamento é necessário atingir uma temperatura mínima, mas abaixo de um limite, para evitar a degradação deste. Com sistemas de gerenciamento do motor, tem sido possível controlar a mistura dos motores que normalmente operam com mistura rica na fase fria. Nesta condição o catalisador ainda está abaixo da temperatura de trabalho e pode ser usado para reação exotérmica por meio do combustível não queimado. Desta forma, quanto mais rapidamente a temperatura de trabalho seja atingida, menor o volume de combustível não queimado no escapamento (GASSER; RYBICKI; WOLLNER, 2014). A capacidade de conversão do catalisador é afetada ao longo do tempo por envelhecimento causado por fatores químico ou térmico. A absorção de impurezas reduz a capacidade de conversão que é afetada pela presença de fosfato de alumínio (AlPO<sub>4</sub>) na superfície de troca (*washcoat*). Diversos componentes podem afetar o desempenho do catalisador, mas o P, Pb e S levam ao envelhecimento (ALMEIDA; NAKAMURA; SODRÉ, 2014).

Os sensores de escapamento usados em escala são o sensor lambda binária de zircônio e o sensor de NO<sub>x</sub>. A verificação do catalisador tem sido feita de forma indireta para identificar a eficiência de conversão e outros efeitos sobre este componente. Outros métodos têm sido

pesquisados para a medição direta, por meio de monitoramento da impedância do revestimento do catalisador (MOOS, 2010). Existem poucos estudos sobre a modelagem matemática de gases de escapamento. Os modelos utilizados aplicaram como base a temperatura, as reações químicas, a computação de ondas sonoras e também as propriedades mecânicas, como o atrito dos gases nos tubos de escapamento (GASSER; RYBICKI; WOLLNER, 2014).

O catalisador opera aquecido, mas temperaturas elevadas podem reduzir a capacidade de armazenar oxigênio (*oxygen storage capacity* - OSC) e redução da eficiência. A desativação do catalisador pode ser causada por contaminação de enxofre ou fuligem. Outro fator que pode comprometer a eficiência nestas condições é a interação entre os metais nobres e óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ). Os óxidos de zircônio e cério podem perder as propriedades de conversão caso a temperatura supere os 1050 °C. Na fase de aquecimento (*light-off*) a redução do óxido de nitrogênio (NO) tem melhor conversão em catalisadores de platina-paládio-cério. A conversão do CO ocorre a partir de 350 °C (ALMEIDA; NAKAMURA; SODRÉ, 2014).

Para avaliar o fluxo de gases não queimados, Gasser et al. (2014) desenvolveram modelo matemático considerando a dinâmica dos gases e a temperatura no processo de conversão. A temperatura do catalisador é uma variável não conhecida, de forma que a evolução térmica é determinada por meio de equações. A temperatura do catalisador é analisada nos 60 segundos após a partida do motor. A primeira iteração, com elevado controle, identificou que o combustível não deve ser utilizado para o aquecimento do catalisador, em função do elevado custo. Desta forma a mistura deve trabalhar na estequiometria para mitigar gases não queimados no escapamento (GASSER; RYBICKI; WOLLNER, 2014).

O etanol é utilizado na frota Brasileira, com participação de mais de 90% da produção nacional de veículos. Para avaliar o desempenho do envelhecimento de catalisadores com motores abastecido com etanol, Almeida, Nakamura e Sodré (2014) realizaram testes em dinamômetro para a análise de degradação e capacidade de conversão. O veículo foi abastecido com etanol (E100) e gasolina com etanol (E22) e rodou mais de 30000 km. O catalisador do veículo tem na composição paládio e ródio. A condução em dinamômetro, conforme ciclo Americano FTP-75, foi feita por meio de automação do acelerador e das trocas de marchas, no intuito de assegurar o correto padrão para o teste. Foram utilizados três catalisadores, mas em diferentes condições. O primeiro foi testado com gasolina E22, os segundo e terceiro com etanol, mas esse último com o ponto de ignição atrasado. Essa variação no ponto foi feita para aumentar a temperatura dos gases de combustão de maneira a obter a mesma temperatura do primeiro catalisador. A temperatura e tempo de preparo seguiu as normas de testes em laboratório. As emissões foram medidas durante todo o teste, de forma a quantificar as

concentrações de CO, HC, NMHC (não metano) e NOx. A comparação de envelhecimento foi feita com referência a um catalisador novo em relação aos envelhecidos. Isso gerou um fator de deterioração (*deterioration factor* -DF) que comparou as concentrações de CO, HC e NOx. As tecnologias dos analisadores variam conforme o componente emitido. Para CO e CO<sub>2</sub> foi utilizado infravermelho não dispersivo, o NOx por meio de detector quimioluminescente e o metano e HC por chama ionizada (ALMEIDA; NAKAMURA; SODRÉ, 2014).

A temperatura média do catalisador com gasolina E22 é 810°C, enquanto com etanol é 746°C. O mapa para cada combustível tem diferença na ignição, mais adiantada para o E100 por possuir maior capacidade contra detonação. Com maior velocidade de chama do etanol e ignição mais adiantada, os produtos da combustão, quando liberados para o escapamento, ficam reduzidos. Atrasando o ponto com E100, a temperatura média no catalisador sobe para 844°C como resultado da maior temperatura na exaustão, levando o catalisador a operar na temperatura de envelhecimento em 80% do tempo. O catalisador do teste com etanol em condições normais apresentou o menor envelhecimento. O maior envelhecimento até 10000 km foi com o motor a etanol com o avanço atrasado, porém após os 20000 km, o motor com gasolina E22 apresentou maior degradação na conversão de NOx e CO. O NMHC foi mais afetado pela temperatura, independentemente do tipo de combustível (ALMEIDA; NAKAMURA; SODRÉ, 2014).

A capacidade de armazenar oxigênio (OSC) é obtida por comparação dos sensores de oxigênio um e dois, antes e pós catalisador. O envelhecimento é identificado por meio da redução do retardo da resposta do sensor de oxigênio pós catalisadores, o que indica a perda de capacidade de armazenamento de oxigênio. O intervalo de retenção e liberação do oxigênio da superfície do catalisador representa o retardo que ocorre devido às reações de oxidação e redução do cério. Caso esse intervalo seja quase nulo, o catalisador perdeu a capacidade de armazenamento (ALMEIDA; NAKAMURA; SODRÉ, 2014). Para absorver a flutuação da mistura, o revestimento do catalisador contém grande quantidade de zircônia e cério para armazenamento do oxigênio. Com a temperatura dos gases são feitos dois estados de oxidação do óxido de cério. A capacidade de armazenamento de oxigênio tem relação direta com a quantidade de cério presente (MOOS, 2010).

Os testes em catalisador demonstraram que o envelhecimento é afetado principalmente pela temperatura de trabalho, de forma que quanto maior a temperatura de trabalho, mais acelerada é a degradação do conversor catalítico. Desta forma, a maior redução de superfície de OSC foi no catalisador que operou com temperatura mais elevada, o que representa a perda de capacidade de retenção de oxigênio, o que limita as capacidades de oxidação e redução. Assim, a área específica de conversão catalítica está relacionada com a eficiência de conversão,



de forma que quanto maior a área, maior a capacidade de conversão (ALMEIDA; NAKAMURA; SODRÉ, 2014). Desta forma, esta seção abordou os principais efeitos no modo de conversão dos catalisadores, bem como as condições que levam a uma degradação precoce ou indesejável. A presença deste componente realiza tamanha contribuição, no controle de poluentes, que o catalisador recebeu o monitoramento eletrônico OBD II por meio do segundo sensor de oxigênio para identificar o nível de eficiência deste sob as estratégias de emissões do sistema OBD.

#### **2.5.4 Sistema de monitoramento eletrônico de emissões OBD II**

O sistema de diagnóstico a bordo (*On-board diagnostics* – OBD) monitora o desempenho dos componentes relacionados a emissões e ativa a lâmpada indicadora no painel caso identifique alguma anomalia. Este sistema teve sua primeira aplicação nos Estados Unidos e posteriormente foi introduzido em diversos mercados como Europa, China Índia e Brasil (YANG et al., 2016).

Presente nos automóveis da atualidade, o sistema de diagnóstico a bordo OBD II (*On-Board-Diagnostics 2*) possui conector de diagnóstico padrão que serve como porta de comunicação com os dados da unidade de controle do motor. Este conector pode utilizar comunicação por meio de cabo ou sem fio (*Bluetooth*) para transmitir as informações dos componentes monitorados para um equipamento de diagnóstico ou aplicativo de celular. Esta interface permite a leitura em tempo real tanto de componentes do gerenciamento eletrônico relacionados com as emissões como informa os códigos de falhas armazenados na memória (BRÖRING et al., 2015). Recentemente foi disponibilizada a versão OBD III que utiliza a comunicação sem fio para transmitir dados de emissões e consumo (YANG et al., 2016).

O sistema de diagnóstico de bordo aplicado aos veículos Brasileiros foi publicado pela Resolução 354 de 2004 do CONAMA, que estabeleceu a introdução do OBDBr-1 para início em 2007 e OBDBr-2 em 2010 (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2004). As especificações e critérios para o OBDBr-2 foi publicado pela Instrução Normativa 24 de 2009 do IBAMA, estabelecendo as diretrizes desta fase do sistema OBD Brasileiro, referenciado a norma ISO 15031, partes 3, 4, 5 e 6. A fase 3 do OBDBr será introduzida em 2022, simultâneo ao PROCONVE L-7, conforme Resolução 492 de 2018 do CONAMA (CONAMA, 2018). Para esta fase as normas ISO 15031, partes 1 a 7, e ISO 15765, parte 4, devem ser respeitadas e aplicadas.

## 2.6 TECNOLOGIAS PARA MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A regulamentação de eficiência energética adotada por diversos países contribui não somente para a redução do consumo de combustível e GEE. Os padrões estabelecidos levam ao fomento da redução do tamanho e peso dos veículos, uso de tecnologias mais eficientes, como o veículo elétrico, conscientização do público, por meio de programas de etiquetagem, e regras para coibir a introdução de tecnologias menos eficientes. Os padrões de eficiência regidos por instrumento mandatório têm apresentado melhores resultados. O nível de consumo energético de alguns mercados tem a meta após 2020. Em 2021, mercados como da comunidade europeia, limitará a frota em 1,23 MJ/km, Coréia do Sul em 1,3 MJ/km e a China em 1,6 MJ/km, e em 2025 os EUA e Canadá em 1,3 MJ/km (MELO; JANNUZZI; SANTANA, 2018). A necessidade de redução do consumo de combustível e redução de GEE tem sido uma preocupação da política automotiva, montadoras e consumidores. A redução do custo pelo ganho da escala pode contribuir com a difusão destas tecnologias, mas a informação sobre o desempenho destas é vital para subsidiar as escolhas do público (GREENE et al., 2017).

A atuação da regulamentação para a redução das emissões GEE tem fomentado a introdução de diversas tecnologias para a melhoria da eficiência energética (LI et al., 2018). Soluções tecnológicas como a injeção direta de combustível (SALIBA et al., 2017), turbocompressor (SIMMONS et al., 2015), redução dos motores, o *downsizing* (POSADA; FAÇANHA, 2015), comando de válvulas variável (VVT) (GÖLCÜ et al., 2005) têm sido introduzidas na motorização. Além destas, outras tecnologias como a redução do peso dos veículos (SIMMONS et al., 2015), as transmissões com maior número de velocidades (KIM; LOHSE-BUSCH; vacca, 2014) e direção com assistência elétrica (NRC, 2015) foram introduzidas nos veículos.

As tecnologias para o aumento da eficiência energética englobam desde veículos híbridos, que podem chegar a até 40% de melhoria, a tecnologias da motores e transmissões com até 15% de melhoria na eficiência. No caso do Brasil, tecnologias como o VVT, CVT e outras para a redução do consumo energético estão disponíveis somente em alguns segmentos de veículos (MELO; JANNUZZI; SANTANA, 2018).

### 2.6.1 Tecnologias do motor com influência no consumo de combustível

A injeção direta deposita o combustível diretamente na câmara de combustão, com resultado na redução do consumo de combustível (WANG et al., 2018). Esta tecnologia também

permite o aumento na taxa de compressão, melhora a partida a frio, diminui a temperatura da câmara e aumenta o limite de detonação (SONG; AN, 2015). O combustível é injetado a alta pressão na câmara de combustão com melhor controle da quantidade, redução do tempo de injeção e sem depositar combustível nas paredes. A DFI tem taxas de vaporização de combustível maiores e como consequência reduz o consumo de combustível, melhora a combustão com destaque em motores com turbo compressor (Zhu et al., 2016). O DFI tem demonstrado maior eficiência que a injeção indireta (SALIBA et al., 2017) além da menor emissão de CO a 30°C que o motor MPI (ZHU et al., 2016).

A participação de veículos com GDI tem crescido no mercado europeu, em função do ganho de economia de combustível de 3 a 14,5% em relação ao PFI. Por outro lado, o GDI aumenta a emissão particulado ultrafino, o que tem demandado o uso de filtro de particulado para motores a gasolina (GPF) para reduzir a massa emitida (DRISCOLL et al., 2018). O sistema de injeção direta de combustível apresenta melhor eficiência no desempenho do motor, mas tem maiores emissões de PM que o sistema PFI. O PFI é o sistema que mais tem sido usado ao longo do tempo e a aditivação de combustível pode contribuir com os ganhos em emissões. Os pontos críticos deste sistema é maior emissão de CO e HC em função da mistura mais rica que o DFI e combustão incompleta na fase fria, o que compromete o consumo (LEE et al., 2018).

O sistema de injeção PFI deposita combustível na válvula de admissão (POSADA; FAÇANHA, 2015) e libera HC para o escapamento no cruzamento de válvulas, por outro lado demonstra melhor desempenho em baixas cargas e rotações. Na fase fria o DFI reduz a presença de combustível nas paredes frias em função da melhor atomização (SONG; AN, 2015). A combinação destes sistemas pode proporcionar o melhor desempenho no sistema de alimentação em cada regime do motor, de forma a aproveitar o melhor de cada um nos respectivos regimes de funcionamento.

O petróleo supre mais de 80% da fonte primária de energia. Desta forma mais de 90% das emissões de CO<sub>2</sub> é gerada na combustão de combustível fóssil (IEA, 2015). O etanol tem o papel de reduzir estas pressões ambientais na geração de energia (IODICE et al., 2016). Este combustível tem sido produzido em mercados como os EUA, UE e Brasil. O uso do etanol como aditivo na gasolina tem o efeito redutor das emissões de CO, HC e NO<sub>x</sub> em motores com injeção indireta PFI (MUÑOZ et al., 2016). Este combustível pode ser usado tanto como aditivo na gasolina como na forma pura, hidratado. Os veículos *flex-fuel* no Brasil permitem o uso de ambos em qualquer proporção (BASTIN; SZKLO; ROSA, 2010).

Para a redução das emissões e consumo, os motores foram otimizados por meio do *downsizing* combinado com o turbocompressor (SIMMONS et al., 2015) que mantém a potência, melhora o torque e reduz o consumo de combustível e as emissões de CO<sub>2</sub>. Os motores aspirados estão recebendo o turbocompressor, o qual tem ampliado a participação nas duas últimas décadas (FENELEY; PESIRIDIS; MAHMOUDZADEH, 2017). Este sistema permite o ganho de potência mesmo mantendo ou reduzindo a capacidade volumétrica. O motivo é por utilizar a energia dos gases de escapamento para girar a turbina e na outra ponta do eixo aumentar a densidade do ar admitido (CHARITPOULOS et al., 2018; ZHANG; ZHANG; WANG, 2017). Analisando as tecnologias e o consumo, Greene et al. (2017) identificaram que os modelos com turbo compressor foram ligeiramente superiores aos aspirados. Os veículos com motor a turbo compressor representam pouco mais de 5% da amostra analisada e equipam principalmente veículos maiores, como SUV e médios nos EUA (GREENE et al., 2017).

O *downsizing* é a redução dos motores por meio do menor deslocamento volumétrico e/ou número de cilindros (POSADA; FAÇANHA, 2015). O retardo da pressurização do turbocompressor em regime de baixa rotação do motor tem sido atenuado por meio de compressor elétrico que funciona em paralelo ao turbocompressor (NRC, 2015). O turbocompressor permite a redução dos motores por forçar a entrada de mistura nos cilindros, com ganhos em carga parcial e plena carga. Em baixa carga apresenta baixa eficiência, o que tem sido compensado pelo *downsizing* do motor. Estudos avaliaram o efeito do *downsizing*, com redução de consumo próximo de 30% após redução do deslocamento volumétrico em 50% e utilização de turbocompressor, em motores abaixo de 1.0L (ZHANG; SARATHY, 2016).

As perdas no bombeamento tem influência significativa no consumo na faixa de carga parcial devido à queda de pressão em função da borboleta (LI et al., 2018). A abertura e fechamento das válvulas opera em sincronismo entre virabrequim e comando de válvulas para controle do fluxo de gases no motor. Para a reduzir estas perdas no motor é necessário variar o tempo de abertura das válvulas para cada regime do motor (XIE; SONG; HE, 2014), contribuindo na melhoria da eficiência energética (ATASHKARI et al., 2007). O sistema de comando de válvulas variável é uma das formas de diminuir estas perdas por manter a relação estequiométrica nas diversas faixas de operação. O processo ocorre por ajustar o fluxo de admissão que viabiliza a entrada do volume efetivo do cilindro por meio da alteração dos tempos das válvulas de admissão para ajustar a carga do motor (LI et al., 2018).

## 2.6.2 Influências da transmissão e acessórios no consumo de combustível

As transmissões têm papel fundamental na entrega da potência para as rodas do veículo, o que contribui para melhor desempenho energético dos veículos. Apesar de menor perda de energia dentre as transmissões, a transmissão manual não oferece o mesmo nível de conforto na condução se comparada aos modelos com câmbios automáticos (VACCA et al., 2017). Uma das transmissões com crescente aumento no mercado é a transmissão continuamente variável (*continuously variable transmission* - CVT) (SIMMONS et al., 2015). Ela faz a mudança contínua de velocidade sem patamares em cada troca de marcha, diferentemente das transmissões manual e automática (SEELAN, 2015). A redução de consumo de combustível do CVT está relacionada ao ajuste com o motor, e sua eficiência pode atingir de 70 a 95%. O CVT deve ser ajustado ao funcionamento do motor para maximizar o desempenho, o que pode ser obtido por meio da estequiometria, no controle da faixa transiente ou no controle da relação de transmissão. O motor precisa ser ajustado para cada condição de rodagem com a transmissão para melhorar o desempenho, com redução de consumo e emissões (TANG et al., 2018). O sistema opera com regulador centrífugo que permite uma transição suave de mudança de velocidades em função da saída de torque constante (WURM et al., 2016). O aquecimento proveniente da cinta que transmite o torque entre duas polias é uma das perdas que ocorre na CVT (WURM et al., 2016) em função da variação contínua da relação para cada regime de funcionamento. Esta transferência pode ser feita por meio de cinta ou de corrente, e o escorregamento na transmissão de torque resulta em perdas (WURM et al., 2017). Por outro lado, acelerar o aquecimento da transmissão na fase fria reduz o atrito nesta etapa, conferindo economia de combustível (PARK et al., 2013).

As transmissões automatizadas usam como base a transmissão manual, mas a redução de torque nas trocas de velocidade é um efeito desfavorável. As transmissões com dupla embreagem oferecem maior eficiência se comparada à transmissão automática, mas apresenta aquecimento em veículos com alto desempenho. Nas versões com embreagem úmida tem o inconveniente de vibrações da embreagem e pequenos escorregamentos. A arquitetura da transmissão define o padrão de eficiência, em função das perdas que são influenciadas por componente funcionais como rolamentos, atrito dos vedadores, sincronizados, bomba de óleo e pôr fim a relação de marchas (VACCA et al., 2017).

O aumento do número de velocidades tem conferido redução do consumo de combustível e ganho de desempenho nas transmissões automáticas. Além da melhor eficiência oferece maior conforto ao dirigir. O consumo está relacionado com o estilo de condução, com

melhor eficiência no uso rodoviário, por demandar pouca alternância de velocidade. No caso do uso urbano as faixas transientes são frequentes, o que afeta o consumo. O ganho de desempenho energético nestas condições pode ser obtido por meio do aumento de número de velocidades. As novas gerações de transmissões aumentaram o número de velocidades, sem aumentar o tamanho. Este efeito pode ser obtido por meio de troca múltipla de velocidades combinado com uma sequência otimizada. Transmissão automática com oito velocidades, atingem ganho de eficiência de 6% em relação aos modelos de seis velocidades (DONG et al., 2017). Comparando a transmissão manual, Greene et al. (2017) identificou melhor desempenho que as automáticas até 6 velocidades.

As transmissões podem contribuir com a redução de consumo por meio da variação das relações de marcha de forma a permitir que o motor opere em condições favoráveis de eficiência. Apesar de o aumento de velocidades reduzir a rotação e conseqüentemente o atrito, esta mudança pode comprometer a dirigibilidade, no caso de TM. Na simulação de Triantafyllopoulos et al. (2017), foram aplicadas três condições: alongar as machas em 10%, aumentar o número de marchas e inserir marcha intermediária. Nesta terceira condição o NEDC apresenta o pior desempenho em função das trocas de marchas definidas no ciclo. Na análise dos autores foi identificado que a melhoria na transmissão pode contribuir em até 1% na eficiência (TRIANTAFYLLOPOULOS et al., 2017).

Além do sistema de transmissão, os acessórios, como o sistema de ar condicionado e direção assistida, consomem energia do motor. Estes sistemas têm consumo independente da velocidade do veículo. O sistema para assistência hidráulico de direção é o mais tradicional e é composto por um bomba acionada por meio de correia na polia do virabrequim do motor (WI et al., 2009), consumindo energia em função de perdas parasitas. Os sistemas de assistência por meio de um atuador elétrico reduzem este efeito e a direção elétrica e eletro hidráulica (EHPS) atuam por meio de motor elétrico. No caso da EHPS o motor elétrico aciona o sistema hidráulico. Estas duas tecnologias tem efeito na economia de combustível quando comparados ao sistema hidráulico (NRC, 2015).

O uso de materiais mais leves e substituição de componentes de dimensões reduzidas (Simmons et al., 2015) contribuem para a redução de carga sobre o veículo, o que apresenta uma redução entre 6% e 7% para uma redução de 10% na massa de veículos de passageiros (NRC, 2015; PLOTKIN, 2009). Esta redução tem sido acompanhada da redução do tamanho dos veículos dentro da categoria combinada com a redução dos motores (PALENCIA; ARAKI; SHIGA, 2016). A estrutura do veículo tem grandes oportunidades de redução do consumo energético. O uso de alumínio, ligas e materiais compostos permitem a redução do peso, sem

comprometer a segurança. Os pneus com baixa resistência podem contribuir com redução da resistência ao rolamento, e a melhoria na aerodinâmica veicular pode ter ganhos por meio de mudanças no assoalho, arcos das rodas e retrovisores (TRIANTAFYLLOPOULOS et al., 2017).

### 2.6.3 Eletrificação do sistema de propulsão

O crescimento das populações em regiões urbanas tem aumentado a demanda pelo uso de energia. A facilidade de acesso ao transporte individual vem ampliando o tamanho da frota em todo o planeta. Esta realidade demanda o uso de fontes de energia, e entre elas os combustíveis fósseis que tem impacto nas emissões de CO<sub>2</sub> (MUNEER et al., 2015). A demanda crescente por energia e a pressão ambiental em função da degradação tem direcionado os esforços na busca por sistemas mais eficientes e com menor emissão para a atmosfera. A análise de cenários sobre a previsão da matriz energética é usualmente baseada nas emissões de CO<sub>2</sub>, de forma a projetar medidas para mitigar as emissões e a redução do consumo de energia (YAN; CROOKES, 2010).

A estreita relação entre densidade demográfica e crescimento de frota veicular tem demandado de governantes o planejamento para a redução do uso de veículo pessoal, fomentando o uso de transporte público associado ao aumento dos custos do transporte individual. A opção pelo veículo elétrico deve levar em consideração o rastro de CO<sub>2</sub> para a obtenção da energia, uma vez que, dois terços da energia gerada globalmente são alimentadas por combustíveis fósseis (MUNEER et al., 2015). Uma das formas de reduzir as emissões de GEE do setor de transporte é por meio da migração da frota para veículos elétricos *plug-in* (VEP) que inclui o híbrido e o puramente elétrico (AMBROSE; KENDALL, 2016).

Este cenário tem demandado investimento em fontes limpas de geração de energia como a solar, eólica e mesmo hidroelétrica, esta última com o menor impacto na emissão de CO<sub>2</sub>. Com a combinação de emissões de CO<sub>2</sub> e poluentes nas cidades e a baixa eficiência dos motores a combustão interna, as vendas de veículos eletrificados, elétrico híbrido e *plug-in*, têm sido potencializadas por incentivos governamentais em diversos países. Esta condição tem fomentado as vendas de veículos elétricos de forma mais acelerada do que o previsto, mesmo com algumas limitações como a baixa autonomia. Historicamente, o primeiro carro elétrico foi construído nos anos de 1830 na Escócia (MUNEER et al., 2015).

A bateria preferida é a íon-lítio que apresenta maior densidade energética, menor tempo de carga. O ciclo de vida da bateria tem relevante impacto ambiental, com variações conforme

o material utilizado na bateria que além do lítio pode conter o fosfato, cobalto, manganês e níquel, entre outros. A degradação das baterias precisam ser melhor estudadas, e no armazenamento foi identificadas variações na durabilidade em função da temperatura e tipos de carga (AMBROSE; KENDALL, 2016). Os veículos elétricos ainda têm como barreiras a menor autonomia, em função de baterias de baixa densidade, necessidade de pontos especiais de abastecimento e maior custo de aquisição com menos opções de modelos no mercado. Estes fatores demandam investimentos tanto na tecnologia dos componentes como em infraestrutura. O incentivo para a aquisição de um veículo elétrico a bateria (VEB) tem ocorrido por meio de redução tributária, circulação em faixas exclusivas, isenção em estacionamento e pontos de recarga (PALENCIA; ARAKI; SHIGA, 2016).

O motor elétrico é um dos componentes com foco pelos pesquisadores que buscam tecnologias mais eficientes. Para aumentar a autonomia, além dos motores mais eficientes, a possibilidade de carga dos veículos *plug-in* (VEHP) permite que o veículo rode somente com o motor elétrico. Para atingir emissão zero as tecnologias do VEB e do veículo a célula de combustível (VCC) ainda têm algumas barreiras para uma produção em larga escala (SABRI; DANAPALASINGAM; RAHMAT, 2016). Os veículos movidos a célula de hidrogênio apresentam similaridade no processo de abastecimento e autonomia semelhantes àqueles com motor a combustão interna. A tecnologia de célula de hidrogênio ainda necessita de melhorias, além de uma análise mais profunda sobre o ciclo de vida dos componentes e o impacto ambiental gerado (SIMONS; BAUER, 2015).

O VCC ainda está em fase de otimização tecnológica e ainda tem indicação para uso em transporte público. O VEB depende de baterias com maior densidade energética que em geral são mais pesadas e caras, o que resulta em maior consumo. O tempo de carga ainda exige um tempo elevado e para a máxima autonomia é necessário atingir a plena carga. Para suprir os veículos em circulação existe também a demanda por pontos de recarga. Além do aspecto técnico, os componentes precisam de ganho em escala para a redução de custo. Desta forma o VEH oferece ao mercado melhor autonomia, baixa emissão, com a possibilidade de rodar com emissão zero em situações específicas e de abastecer com combustível líquido (SABRI; DANAPALASINGAM; RAHMAT, 2016). A limitação da baixa autonomia tem contribuído para o desenvolvimento de estações com carga mais rápida, que resultou em dispositivos que levam uma hora para carregar a bateria, uma grande evolução sobre as 9,5 h de tecnologias anteriores. A previsão que a frota europeia necessite de 15% de ampliação no fornecimento de energia para atender uma frota totalmente eletrificada (MUNEER et al., 2015).



O maior crescimento em emissões no setor de transporte nos próximos anos é esperado em alguns países em desenvolvimento em função de muitos não disporem de combustíveis renováveis, más condições da pavimentação das rodovias, envelhecimento da frota e regulamentação menos restritiva. Estes mercados também são sensíveis a qualquer aumento no valor do veículo, o que dificulta a difusão de veículos eletrificados. Por outro lado, a taxa de crescimento de novas tecnologias é mais acelerada em função da base de referência ser baixa (PALENCIA; ARAKI; SHIGA, 2016).

O veículo híbrido apresenta vantagens sobre o veículo elétrico em função da maior autonomia e otimização dos componentes. As novas gerações de VEH combinam o uso de motores a combustão interna mais eficientes operando em regime de melhor desempenho energético, além de contarem com sistema de regeneração de energia por meio do freio. O maior desafio no desenvolvimento atual destes veículos é o gerenciamento de energia entre combustível e bateria. As restrições destas opções é o tamanho reduzido das baterias e o limite restritivo das emissões (SABRI; DANAPALASINGAM; RAHMAT, 2016).

A combinação de dois motores é monitorada pelo sistema OBD, uma vez que os componentes elétricos podem afetar as emissões também. Quanto maior o nível de hibridização maior será a quantidade de monitores OBD. Conforme requerido pela Agência Ambiental da Califórnia (CARB), os componentes elétricos são monitorados por meio de critério e condições de funcionamento avaliados pelo fabricante que também define como estes funcionam. Para os ensaios oficiais são utilizados ciclos padronizados, mas o padrão de medição RDE abre possibilidade para diversas condições de uso. No caso do veículo híbrido é monitorado o nível da bateria, a qual varia conforme a capacidade. O motor a combustão alimenta a energia do sistema elétrico ou pode tracionar o veículo, desta forma, problemas no sistema elétrico demandará maior uso do motor a combustão. Um fator que pode afetar o sistema elétrico é a temperatura de operação, o que reduz o desempenho de entrada e saída de energia no sistema, aumentando a demanda do motor a combustão. Identificada falha no sistema elétrico a LIM do sistema OBD deve indicar tal situação. Para um balanceamento entre o desempenho das células da bateria é utilizado um sistema de balanceamento por meio de interruptores entre as células. O aquecimento de catalisador nestes veículos é feito por meio da bateria, portanto, uma falha no armazenamento de energia afeta as emissões do motor a combustão (RAJAN et al., 2018).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Conforme apontado nos estudos sobre a diferença entre consumo de combustível oficial e *real-world*, o Quadro 2 consolida os recursos que subsidiaram os métodos utilizados em alguns estudos, como forma de contribuir na identificação de recursos e da metodologia para esta pesquisa em relação a medição de emissões e consumo de combustível em rodagem.

Quadro 2 – Recursos utilizados nas metodologias dos estudos pesquisados

Recurso	Atributos	Autores
PEMS	Sistema portátil de medição das emissões durante os testes de rodagem	(KOUSOULIDOU et al., 2013); (WANG et al., 2008); (DUARTE; GONÇALVES; FARIAS, 2016); (DUARTE et al., 2015); (ZHANG et al., 2014)
GPS	Medição via GPS de: velocidade, aceleração, posicionamento e inclinação do veículo em teste de rodagem	(KOUSOULIDOU et al., 2013); (DUARTE; GONÇALVES; FARIAS, 2016); (DUARTE et al., 2015); (ZHANG et al., 2014)
Parâmetros de operação do veículo	Aquisição de dados via OBD II sobre as condições de rodagem do veículo	(IODICE et al., 2016); (DUARTE; GONÇALVES; FARIAS, 2016); (DUARTE et al., 2015)
Estação climática	Aquisição das condições climáticas durante os testes de rodagem	(KOUSOULIDOU et al., 2013)
Método VSP	Construção de modelo com parâmetros de rodagem para estimativa de valores de consumo e emissões por simulação	(WANG et al., 2008); (DUARTE; GONÇALVES; FARIAS, 2016); (DUARTE et al., 2015); (ZHANG et al., 2014)
Programas de simulação	Programas de simulação de inventário de emissões e consumo recebem parâmetros de testes <i>real-world</i> refinar base de dados	(KOUSOULIDOU et al., 2013); (WANG et al., 2008); (FONTARAS et al., 2014); (ZHANG et al., 2014)
Dinamômetro de chassi	Equipamento para simular rodagem veicular em laboratório para medição de emissões	(IODICE et al., 2016); (KOUSOULIDOU et al., 2013); (FONTARAS et al., 2014); (DUARTE; GONÇALVES; FARIAS, 2016)

Fonte: Autor

### 3.1 CICLO DE ENSAIO EM REGIME CONSTANTE (ESC – CICLO EUROPEU EM REGIME CONSTANTE) E RESPOSTA EM CARGA (ELR – CICLO EUROPEU DE RESPOSTA EM CARGA)

Conforme a NBR 15634, o ciclo de ensaio ESC e ELR são aplicados para a medição das emissões em dinamômetro de bancada para motores, ciclo Diesel, podendo ser também para etanol. Os valores de rotação de ensaio são baseados na rotação de potência máxima, por se tratar de medição de poluentes, e não de consumo.

Para os ensaios são utilizadas como base as rotações inferiores ( $n_{lo}$ ) e superior ( $n_{hi}$ ) para determinar as rotações A, B e C.

A rotação inferior  $n_{lo}$  equivale a 50% da rotação de potência máxima.

A rotação superior  $n_{hi}$  equivale a 70% da rotação de potência máxima.

Para a realização dos ensaios são combinadas três rotações, calculadas com base nas rotações alta e baixa. No ciclo ESC é realizado ensaio com 13 modos em regime constante.

As Rotações ABC são as rotações de ensaio ESC e ELR e são escalonadas as Equações 7, 8 e 9:

$$\text{Rotação A} = n_{lo} + 25\% (n_{hi} - n_{lo}) \quad (7)$$

$$\text{Rotação B} = n_{lo} + 50\% (n_{hi} - n_{lo}) \quad (8)$$

$$\text{Rotação C} = n_{lo} + 75\% (n_{hi} - n_{lo}) \quad (9)$$

É realizada a medição dos poluentes: NO<sub>x</sub>, CO, HC e MP, com valor final sendo a média ponderada dos 13 modos.

Durante os ensaios são registrados os parâmetros do motor: rotação, torque, temperatura, umidade e restrição do ar de admissão, temperatura e contrapressão de exaustão, fluxo de combustível, fluxo do gás de exaustão, temperatura do ar, temperatura do combustível (ABNT, 2012b).

Para este estudo foi avaliado o uso deste ciclo como referência para desenvolver um método de ensaio de forma a adequar os instrumentos de ensaio com as medições necessárias para a primeira fase deste estudo. Avaliando o padrão deste ciclo para motores Diesel, foi decidido pela utilização de outro método, com base na rotação de torque máximo. Os motivos são em função da rotação deste ensaio ser baseada na rotação de potência máxima, o que resulta em todos os valores acima da faixa de torque. Para aplicar as três rotações deste método no veículo de ensaio, seriam os seguintes valores de rotação: 2887 rpm, 3150 rpm e 3412 rpm. Comparando com o valor de torque do veículo, todas as rotações ficariam acima da faixa de

torque máximo, que ocorre a 2500 rpm, e nenhuma delas seria abaixo da rotação de torque máximo.

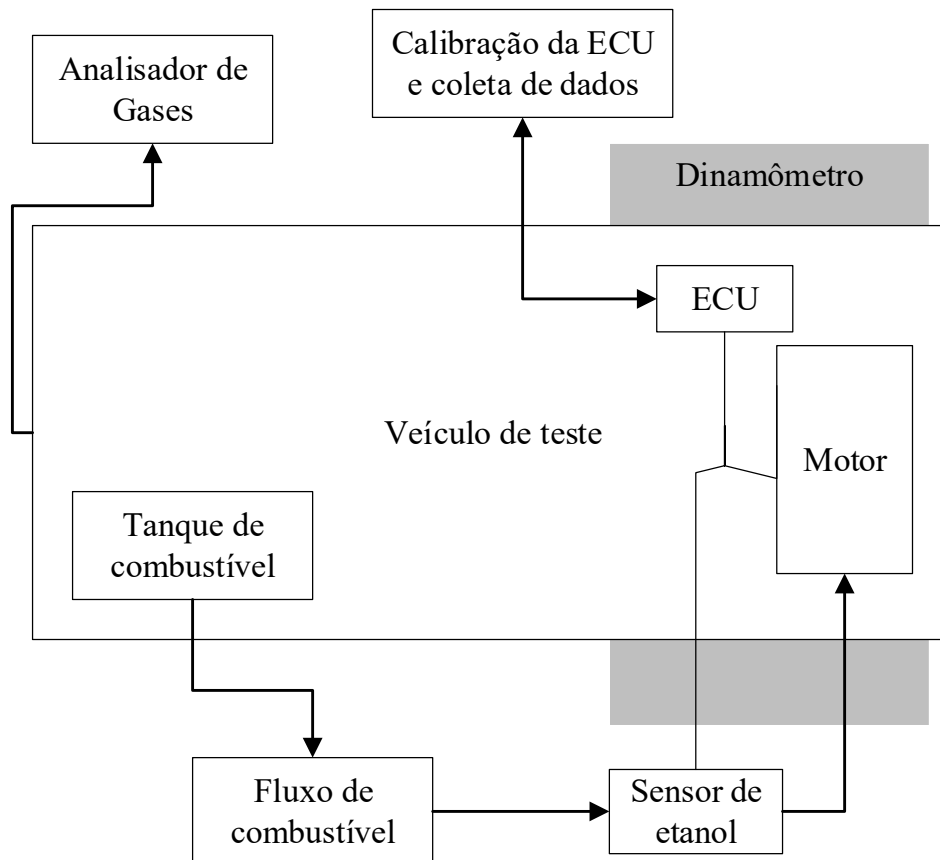
### 3.2 CICLO DE ENSAIO EM REGIME CONSTANTE COM BASE NA ROTAÇÃO DE TORQUE MÁXIMO

Para atingir o objetivo deste estudo, a primeira etapa foi levantar o consumo de combustível com base nos dados da unidade de controle do motor e efetuar as medições das emissões de CO<sub>2</sub>, CO e HC, para compor o volume de carbono emitido. O veículo de teste é um Gol ano 2008/2009, com motor aspirado 1.6 *flex-fuel*. O motor tem quatro cilindros, duas válvulas por cilindro, possui somente o sensor de oxigênio antes do catalisador e a transmissão é manual com 5 velocidades. A aquisição de dados do tempo de injeção de combustível, e demais parâmetros, foi feita pelo grupo de eletrônica automotiva (Engenharia Elétrica da EPUSP), com a unidade de controle de motor (ECU) com acesso aos dados de operação do motor em tempo real. Esta unidade foi utilizada neste estudo em substituição à unidade de controle original do veículo. O modelo da unidade eletrônica de gerenciamento é *FlexECU* do fabricante Etas/Bosch que utiliza a plataforma de programação *Advanced Simulation and Control Engineering Tool* (ASCET), específico para este tipo de aplicação (ETAS, 2020). A interface para as modificações dos mapas de calibração é o *Integrated Calibration and Application Tool* (INCA) que também permite fazer a gravação dos dados de funcionamento do motor. Esta função será utilizada neste estudo para viabilizar a aquisição de dados durante os ensaios realizados com o veículo de teste. A identificação do combustível é feita por meio do sensor de etanol, ao invés de usar o sensor de oxigênio. O ensaio com rotação estabilizada foi feito no dinamômetro de chassi no laboratório automotivo do IEE (Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo).

Estes ensaios foram para realizar testes de emissões, no laboratório do IEE, com o uso do analisador de gases da Napro, PC-Multigás (NAPRO, 2020), e o dinamômetro de chassi também da Napro, Dino 3000. A medição de consumo foi feita por meio de medidor de fluxo de massa do combustível Siemens SITRANS F C MASS 2100 DI 3-15 (SIEMENS, 2020), com acuraria  $\leq 0,1\%$  (de taxa) e vazão máxima de 250 kg/h. Em paralelo foram coletados os parâmetros da unidade de controle do motor: tempo de injeção, rotação do motor, temperatura do motor, temperatura do combustível, velocidade do veículo, pressão e temperatura do coletor de admissão, avanço de ignição e tensão de bateria.

O veículo foi testado com gasolina (teor de etanol identificado pelo sensor) e etanol hidratado E100, ambos adquiridos no mercado, portanto podem variar em relação ao padrão utilizado em ensaios oficiais. O veículo e os dispositivos de medições foram instalados no veículo que estava ancorado no dinamômetro de chassi, de carga variável, conforme Figura 19.

Figura 19 – Diagrama com as instalações no veículo de teste



Fonte: autor

O analisador de gases utiliza a mesma tecnologia dos equipamentos usados em oficina mecânica e inspeção veicular, o qual faz a leitura dos gases sem diluição e coleta uma amostra da emissão instantânea de escapamento. Este tipo de analisador é mais utilizado para medições sem carga, portanto as informações foram indicadas nos resultados, mas não foram utilizadas para cálculos em função do padrão tecnológico deste instrumento. As medições de escapamento foram feitas após o catalisador, de forma a medir os gases convertido emitidos para a atmosfera. Os laboratórios de ensaios de emissões utilizam equipamentos para análise dos gases por meio de diluição, e coletam os gases de todo o ensaio para o cálculo da massa de cada gás emitido por quilometro rodado.

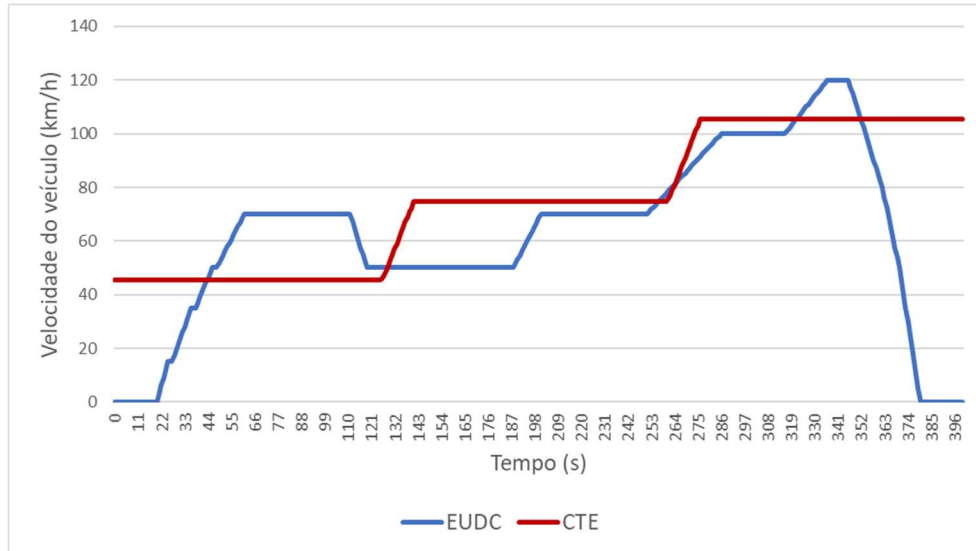
Apesar de o dinamômetro utilizado ter tecnologia equivalente aos modelos usados em laboratórios de emissões, a tecnologia do analisador de gases demandou ajustes no ciclo de ensaio. Como o analisador de gases utilizado não mede a vazão dos gases do escapamento, o teste foi feito em rotações fixas, baseadas no valor de torque máximo do motor do veículo, por se tratar de medição de consumo de combustível. A rotação fixa permite medir a porcentagem, ou ppm, das emissões em cada um dos regimes estabelecidos neste estudo. A rotação de máximo torque do motor é 2500 rpm, portanto os ensaios foram baseados neste valor. Para levantar os parâmetros de consumo de combustível e emissões foram utilizadas mais duas rotações além daquela de torque máximo, 2500 rpm +/- 1000 rpm: 1500 rpm e 3500 rpm. O ensaio foi realizado em uma marcha somente, a quarta velocidade, de forma a variar os parâmetros do motor linearmente com a velocidade de roda. Estas três velocidades operaram com três condições de cargas aplicadas no dinamômetro: 0%, 10% e 20%. Estas porcentagens são selecionadas diretamente no dinamômetro. Não foram inseridos os dados de fatores de ajuste que simulam a resistência de rodagem dos veículos,  $f_0$ ,  $f_1$  e  $f_2$ , em função de se tratar de um ciclo ajustado para avaliar o desempenho dos injetores, sem o intuito de medir o volume de emissões. Para que este ciclo de ensaio seja identificado de forma simples neste estudo, este será chamado de ciclo de torque estabilizado (CTE). Esta nomenclatura foi desenvolvida para este estudo, este padrão construído com base em informações de ciclos de dinamômetro de bancada.

As três rotações de ensaio resultam em velocidades de aproximadamente: 45,3 km/h, 74,7 km/h e 105,3 km/h. Para um ajuste de velocidade mais preciso, a rotação do motor em cada ensaio foi controlada pela unidade de controle do motor via posição de borboleta. Foram desenvolvidas nove estratégias na unidade de controle para o ajuste das rotações para cada uma das cargas e combustíveis. O condutor do veículo efetuou a aceleração, frenagem, troca de marchas e controle do veículo e a unidade do motor controlou a rotação. A medição dos gases foi feita durante dois minutos, mas somente após a estabilização dos parâmetros monitorados pelo ensaio. Os dados de medição de consumo, tempo de injeção de mais parâmetros do motor foram adquiridos durante todos os ensaios, no período de dois minutos com regime estabilizado em cada um dos modos CTE.

Os valores de velocidade obtidos neste método de ensaio apresentam algumas semelhanças ao ensaio em dinamômetro da Comunidade Europeia. O segmento de ensaio do ciclo de condução extra urbano (*Extra Urban Driving Cycle* - EUDC) fica após o ciclo urbano, no ciclo europeu NEDC. Esta faixa de rodagem simula condições de velocidades elevadas e condução mais agressiva (MAHLIA; TOHNO; TEZUKA, 2012). Conforme a Figura 20 pode

ser observado que as velocidades do teste desenvolvido para esta fase do estudo se assemelham com os patamares de velocidades predominantes do ciclo EUDC.

Figura 20 – Comparação entre os ciclos EUDC e CTE



Fonte: Autor

### 3.2.1 Cálculo do consumo de combustível por meio do CTE

O levantamento do consumo foi feito com base no tempo de injeção e vazão da massa de combustível levantado durante o ciclo de ensaio de torque estabilizado. A aquisição do tempo de injeção foi por meio da unidade de controle (Elétrica da EPUSP), com comunicação via PC. O combustível consumido foi registrado de forma sincronizada por meio da vazão da massa de combustível. Desta forma, o cálculo do fator do combustível injetado é baseado na razão entre vazão instantânea dividido pelo tempo total de abertura do injetor por segundo. Para assegurar o sincronismo entre os componentes, os parâmetros foram ajustados para a mesma base de tempo, conforme Equação 10:

$$Fi = \frac{Vc \times 1000 \times 60 \times 1000}{\rho_f \times 3600 \times T_{inj} \times ROT \times 2,0} \quad (10)$$

Onde:

$Fi$ : Fluxo do injetor [ml/s]

$Vc$ : massa de combustível consumida [kg/h]

$1000$ : fator de ajuste da vazão em gramas [g]

$60$ : fator de ajuste da rotação para segundos [rps]

$1000$ : fator de ajuste do tempo de injeção [s]

$\rho_f$ : densidade do combustível [g/cm<sup>3</sup>]

$3600$ : fator de ajuste da vazão em segundos [s]

$T_{inj}$ : tempo de injeção de combustível [ms]

$ROT$ : rotação do motor [rpm]

$2,0$ : quantidade de pulsos de injetor em um giro do motor

A Equação 10 tem como objetivo calcular o valor da vazão do injetor para cada milissegundo de abertura do injetor. O intuito é de utilizar o fator de injeção calculado como forma de identificar o consumo de combustível, com base no tempo de injeção. Este parâmetro passa a ser identificado neste estudo como taxa de vazão do injetor.

### 3.2.2. Método para a medição de consumo com base no tempo de injeção de combustível

Para a medição do consumo de combustível com base no pulso do injetor, foram efetuadas algumas avaliações para chegar ao método proposto. Para verificar o comportamento dinâmico dos injetores do motor foi utilizado o método baseado no CTE e a medição da vazão do combustível por meio de instrumento de medição da vazão da massa consumida. Este teste permitiu monitorar a resposta de consumo a uma taxa de 10 Hz de forma a visualizar o comportamento de vazão do injetor com base no pulso de abertura da agulha.

A análise será descrita na seção 4.1 e permitirá identificar o passo a passo da construção do monitoramento do comportamento do injetor durante o funcionamento do motor. Esta medição favoreceu a identificação da resposta do injetor diante de diferentes regimes de funcionamento do motor, no entanto a resposta do injetor apresenta algumas variantes em função da dinâmica envolvida no processo. O sincronismo entre pulso do injetor e a medição do instrumento de vazão de combustível possuem taxas de resposta diferente o que dificulta o sincronismo perfeito entre os dois. Este comportamento gerou oscilações no resultado dos cálculos entre os pontos da amostragem. Desta forma, a medição permitiu chegar ao valor de vazão média por segundo, a qual é compatível com o valor estático do injetor, mas com pequenas oscilações em função deste sincronismo. Além das oscilações entre as amostras, o instrumento de medição operou com baixa vazão, demandando a aplicação de fatores de correção, mesmo assim apresentou variações entre os regimes utilizados durante o ensaio.



Apesar destas variações, o método aplicado neste estudo trouxe como contribuição a identificação da resposta do injetor diante das variações do fluxo do ar no coletor de admissão. Assim, foi desenvolvido o fator de correção do tempo de injeção com base no cálculo do *speed density* (SD), resultando em um fator dinâmico para a correção do tempo de injeção de combustível.

Sendo assim, a medição do consumo de combustível foi realizada com base na curva do injetor levantada na dissertação da Engenharia Elétrica da EPUSP (MAGGIO, 2019), que resultou nas Equações 11 e 12 para o cálculo da massa injetada, para gasolina e etanol:

$$m(t_{inj})_{E30} = 3,113 \times t_{inj} - 2,129 \quad (11)$$

$$m(t_{inj})_{E100} = 3,180 \times t_{inj} - 2,071 \quad (12)$$

Sendo  $t_{inj}$  o tempo de injeção [ms] e  $m$  a massa injetada de combustível [ $10^{-6}$  kg]. Os valores intermediários do teor de etanol são interpolados.

Este modelo tem como vantagem, em relação ao método dinâmico deste estudo, a identificação do valor do combustível injetado, com as correções do *offset* de abertura e o retardo no fechamento, de forma empírica, reproduzindo a resposta estática do eletro injetor. Este levantamento foi feito em bancada, com combustível E30, variando o pulso por meio de circuito auxiliar de potência. O combustível injetado foi armazenado em frasco e a massa pesada, com variações de pulsos entre 1,5 ms a 30 ms (MAGGIO, 2019).

Para o cálculo do *speed density* é necessário o valor do rendimento volumétrico. Os valores variam conforme o regime do motor e os dados para este parâmetro são baseados nos levantamentos feitos por (MAGGIO, 2019), tanto para etanol como para gasolina.

Sendo assim, a medição do consumo de combustível foi realizada por meio da combinação dos métodos estático e dinâmico para compor da forma mais representativa a vazão real do injetor de combustível. O cálculo de vazão foi feito por meio da Equação 10 da massa do injetor, corrigido pelo fator *SD* que foi considerado o valor inverso do *speed density* ( $1/SD$ ), em função da relação inversa entre eles. Depois o resultado obtido foi convertido para um fator percentual. Desta forma, a Equação 13 que representa o cálculo deste fator é composta da seguinte forma:

$$F_{SD} = 1 + \left[ \left( \frac{1}{SD} \right) \times 0,5 \right] \quad (13)$$

O valor obtido neste cálculo é então aplicado na correção do tempo de injeção de combustível das Equações 11 e 12. Em testes posteriores a este, o cálculo foi analisado para

identificar se o fator está adequado. O motivo desta verificação é pelo fato de que o fator de correção atual pode chegar a 6% à 7%, valores relativamente elevados para correções em função da menor resistência da injeção de combustível, portanto será avaliado se o valor de 0,5 será mantido ou deverá ser ajustado.

Após os ensaios em laboratório e RDE, os valores de consumo por meio da largura do pulso do injetor foram analisados e o fator dinâmico para o ajuste da vazão do injetor foi revisado. A variação da atmosfera dentro do coletor de admissão é a base desse fator que correlaciona com a velocidade e pressão do ar. O fator segue a razão inversa da relação com a pressão do coletor  $P_a$  [kPa] e a rotação do motor por segundo  $RPS$ . O cálculo do Fator Dinâmico ( $F_D$ ) final deste estudo está descrito na Equação 14:

$$F_D = 1 + \left[ \left( \frac{1}{P_a} \right) \times \left( \frac{1}{RPS} \right) \times 100 \right] \quad (14)$$

O combustível consumido é registrado em gramas por segundo, o qual é o produto do fluxo do injetor  $m_{EX}$  pelo fator dinâmico (FD), conforme a Equação 15. O fluxo de massa de combustível  $F_m$  [g/s] é gerada a cada segundo.

$$F_m = m_{EX} \times F_D \quad (15)$$

### 3.2.2.1 Medição do volume de cada combustível e teor de água

A identificação de cada combustível é vital para este estudo uma vez que um dos objetivos é separar o combustível fóssil daquele renovável. O veículo de teste utilizado conta com um sensor de etanol da Continental *Brazilian Flex Fuel Sensor* (Br-FFS). A tecnologia do sensor identifica o volume de etanol total do combustível analisado, que pode ser a combinação de etanol anidro com o hidratado, uma vez que os veículos brasileiros são predominantemente *flex-fuel* (CONTINENTAL, 2014). A maioria dos veículos comercializados no Brasil identificam a concentração do combustível em uso com base na informação da sonda de oxigênio antes do catalisador. Por meio da concentração de oxigênio resultante da queima é identificada a estequiometria que indica qual combustível está no tanque. Após o abastecimento a unidade de controle irá monitorar a sonda para identificar o combustível em uso, o que demanda um tempo de rodagem para fechar o ciclo. Neste estudo, o veículo de teste utiliza um sensor de etanol, o qual identifica o teor de etanol logo que passa por este dispositivo, portanto a identificação é imediata. Esta tecnologia é encontrada atualmente em veículos com turbocompressor.

Os combustíveis comercializados no Brasil, para veículos com motor com ignição por centelha *flex-fuel*, são a gasolina E22 e o etanol E100. O etanol hidratado contém água em teor de até 4,9% em volume (MELO et al., 2012) e a gasolina E22 pode conter de 20% a 25% de etanol anidro, porém, desde março de 2015 passou a conter 27% de etanol anidro. Somente a gasolina premium teve o teor mantido em 25% (BRASIL, 2015). O veículo *flex* pode ser abastecido com gasolina ou etanol em qualquer proporção, o que resulta em teores variados de acordo com a combinação dos consecutivos abastecimentos. Com base nestas informações, foi utilizado como referência de composição dos combustíveis o manual da Continental, para ajustar o teor de cada um destes para a realidade que se encontra nos postos Brasileiros (CONTINENTAL, 2014). Para este estudo foi considerado o teor de 27% de etanol anidro para a gasolina. Os três componentes considerados na distribuição são: gasolina, etanol e água.

Como a medição deste sensor de etanol se baseia no volume de combustível e neste estudo o cálculo será da massa, existe a necessidade de corrigir a massa com base na relação entre as densidades dos fluidos. A massa de cada elemento do combustível deve ser corrigida conforme a Equação 16:

$$F_{Cij} = \frac{D_{Ei}}{D_{Fj}} \quad (16)$$

Onde  $F_{Cij}$  é a correção do fluido,  $D_{Ei}$  é a densidade do elemento do combustível e  $D_{Fj}$  é a densidade do combustível. O fator deve ser calculado para cada combustível  $j$ , gasolina e etanol, usados nos testes e os três elementos  $i$ : gasolina, etanol e água.

### 3.3. MATERIAIS E MÉTODOS PARA A ENSAIOS COM FASE TRANSIENTE

Após a análise do comportamento da vazão do injetor, a investigação teórica sobre os métodos de medições de consumo de combustível e respectivas tecnologias envolvidas, esta seção tem o intuito de apresentar os recursos utilizados e os métodos aplicados, de forma desenvolver os elementos apresentados no objetivo.

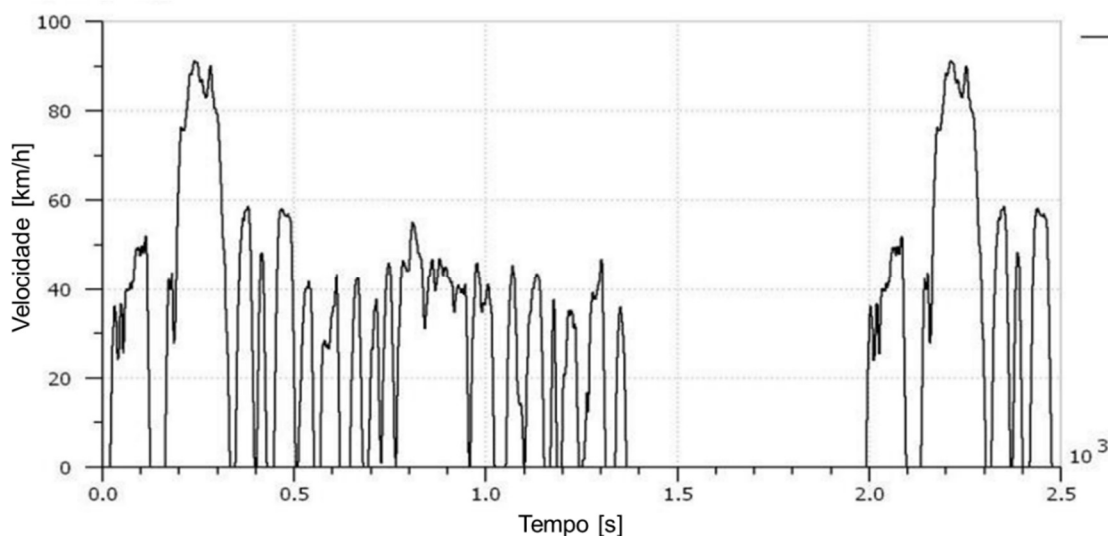
#### 3.3.1 Ciclos de ensaio FTP-75, HWFET e *real-world*

A validação do método de consumo de combustível por tempo de injeção foi feita por meio de ensaios em dinamômetro com base nos ciclos urbano FTP-75, conforme a Normativa

Brasileira NBR 6601 (2012), e de rodovia HWFET, conforme NBR 7024 (2017). Ambos seguem o padrão (Figura 3) utilizado pela agência ambiental dos Estados Unidos, EPA, e o cálculo de consumo utiliza os parâmetros destes dois ciclos (OH et al., 2014). O ciclo norte americano foi escolhido por ser o padrão de ensaio oficial no Brasil, assim permite comparar os resultados deste estudo com os parâmetros oficiais. O ciclo urbano FTP-75 é composto por três modos de condução: partida a frio, transiente e partida a quente. A duração deste ciclo é de 1874 s e são percorridos 17,77 km (KIM; KIM; OH, 2016).

O ciclo urbano descrito pela NBR 6601 é composto de três fases. A primeira é a transitória a frio que deve concluir aos 505 s do ciclo, seguida da fase estabilizada. Este primeiro bloco do ensaio deve totalizar distância aproximada de 12,1km. Ao completar estas duas etapas o veículo fica desligado por 10 minutos e segue para a terceira fase que é igual a primeira, mas com partida a quente (ABNT, 2012a). A Figura 21 ilustra o ciclo urbano conforme a norma brasileira (BRAVO; MEIRELLES, 2015).

Figura 21 – Ciclo urbano FTP-75 – Brasil



Fonte: Adaptado de (BRAVO; MEIRELLES, 2015)

O ensaio em dinamômetro foi realizado no laboratório de emissões da CETESB em São Bernardo do Campo, utilizando o veículo de teste com a unidade de controle programável e o combustível conforme adquirido do mercado E100 e E22. Para assegurar estes ensaios foi utilizado um outro veículo do mesmo modelo, com as mesmas características de fabricação, incluindo a mesma motorização. A gasolina do tanque do veículo foi verificada pelo sensor e identificada a concentração de etanol. Para medir as concentrações de NO e NOx foi utilizado o detector quimioluminescente (*chemiluminescent detector* - CLD), o THC por meio do

detector por ionização de chama (*flame ionization detector* - FID) e infravermelho não dispersivo (*nondispersive infrared* - NDIR) para CO e CO<sub>2</sub>.

Para avaliar o consumo, cada um dos ciclos de ensaio teve um método de medição (laboratório e rodagem), em função das características dos instrumentos. Para o ensaio de rodagem *real-world*, foram feitos testes que demandam a utilização de alguns instrumentos para a realização das medições de emissões e consumo de combustível em rodagem, por meio de: sistema portátil de medição das emissões em rodagem (PEMS) com a integração dos dados de emissões e repetição do ciclo de rodagem, conforme rota previamente definida por aplicativo de navegador. A medição de consumo foi baseada por balanço de carbono. Adicionalmente foi avaliada a emissão e consumo pelo método VSP. O veículo realizou ensaio de rodagem em ruas e estradas, com gasolina e depois com etanol. O instrumento para o ensaio RDE foi um PEMS Horiba modelo OBS-ONE-GS22 (HORIBA, 2020). Este equipamento utiliza métodos similares aos do laboratório: detector quimioluminescente (CLD) para NO e NO<sub>x</sub>, detector por ionização de chama (FID) para o THC e infravermelho não dispersivo (NDIR) para CO e CO<sub>2</sub>, com medição úmida. Para a chama do FID é utilizado ar sintético, composto por 79% de N<sub>2</sub> e 21% de O<sub>2</sub> e o combustível, composto por 40% de hidrogênio e 60% de hélio.

O PEMS foi correlacionado no laboratório, comparando durante o ensaio FTP-75 para verificar se atende as tolerâncias permitidas, conforme apêndice 3 do regulamento (EU) 2016/427 da Comissão. A tolerância admitida para estes gases tem os seguintes limites:  $\pm 15\%$  para o THC,  $\pm 15\%$  para CO e  $\pm 10\%$  para CO<sub>2</sub>. Os valores em mg/km não serão usados em função da diferença de método de cálculo entre os instrumentos. A comparação foi feita pelo ciclo FTP-75 com gasolina no início e após as medições RDE, novo ensaio com o mesmo ciclo, mas usando etanol. Os valores do laboratório se aplicam tanto para a correlação dos instrumentos quanto para estabelecer os limites para a curva característica de CO<sub>2</sub> do veículo para avaliar a dinâmica dos ensaios RDE. Foram considerados os gases que compõem o balanço de carbono, para verificação do consumo de combustível, desta forma o NO<sub>x</sub> não foi considerado nesta análise.

Os ensaios foram desenvolvidos conforme o procedimento RDE proposto para o mercado Brasileiro, baseado nas regulamentações europeias 2016/427, 2016/646, 2017/1154 e 2018/1832 (COMMISSION, 2016a, 2016b, 2017, 2018), mas com algumas modificações para se adaptar à realidade Brasileira. A rodagem é composta pelos circuitos urbano e rural, sem o rodoviário, com distribuição de 60% a 70% para o urbano e o restante para o rural. As faixas de velocidades seguem o padrão europeu que limita a 60 km/h o ciclo urbano e até 90 km/h para o rural. O teste deve ter duração entre 60 e 120 minutos, a temperatura ambiente entre

15°C e 35°C é considerada moderada e a altitude deve ficar abaixo de 1000m em relação ao nível do mar. Para compor as curvas de referências de CO<sub>2</sub> são utilizadas as informações do ciclo FTP-75 em função deste ser o ciclo oficial para homologação de veículos leves.

Os valores de posicionamento foram utilizados para o cálculo pelo método VSP, o qual necessita destas informações para os cálculos de velocidade, aceleração e inclinação (por meio da altitude). A aquisição dos dados foi a uma taxa de 1 Hz pelo PEMS, de forma a assegurar a identificação das variações dinâmicas do veículo. Esses dados fazem parte do cálculo de potência instantânea para posterior comparação entre os métodos: VSP e balanço de carbono.

Desta forma, os ensaios em dinamômetro e em rodagem têm em comum a medição do consumo de combustível por meio do balanço de carbono, direto e indireto (CO e HC).

### 3.3.2 Modelos para cálculo dos parâmetros levantados em ciclo de laboratório

O levantamento do consumo foi feito com base no tempo de injeção armazenado durante os ciclos de ensaio FTP-75, HWFET e *real-world* com o veículo de teste. A aquisição deste parâmetro foi feita por meio da unidade de controle (da Engenharia Elétrica da EPUSP) com comunicação via computador portátil. A unidade de controle faz o registro do carbono emitido, como teste do fator de GEE emitido.

Para levantar o consumo em g/s, com base no ciclo de ensaio FTP-75, deve ser aplicada a Equação 17 (adaptada de DUARTE et al., 2015).

$$FC_{FTP-75} = \frac{Ci \times d \times \rho_{comb} \times 1000}{t} \quad (17)$$

Onde:

$FC_{FTP-75}$ : consumo no ciclo FTP-75 [g/s]

$Ci$ : consumo do tempo de injeção [l/km]

$\rho_{comb}$ : densidade do combustível [g/cm<sup>3</sup>]

$d$ : distância percorrido no ciclo FTP-75 [km]

$1000$ : ajuste de unidade de litro para mililitro

$t$ : tempo de duração do ciclo FTP-75 [s]

A distância percorrida e o tempo são referentes ao ciclo de ensaio FTP-75 e  $\rho_{comb}$  é a densidade do combustível [g/cm<sup>3</sup>] (DUARTE et al., 2015).

O cálculo do consumo de combustível urbano deve ser feito por meio da ponderação entre as emissões das fases transitória com partida a frio, estabilizada e transitória com partida a quente. O cálculo é feito conforme a Equação 18 (ABNT, 2017):

$$C_{URB} = 0,43 \cdot \left( \frac{C_I D_I + C_{II} D_{II}}{D_I + D_{II}} \right) + 0,57 \cdot \left( \frac{C_{III} D_{III} + C_{II} D_{II}}{D_{III} + D_{II}} \right) \quad (18)$$

O valor de  $C_{URB}$  representa o consumo de combustível urbano ponderado, expresso em [L/100km];  $C_I$ ,  $C_{II}$  e  $C_{III}$  são os consumos de combustível nas fases transitória com partida a frio, estabilizada e transitória com partida a quente, respectivamente, expressos em [L/100 km]; e  $D_I$ ,  $D_{II}$  e  $D_{III}$  são as distâncias percorrida durante as três fases, respectivamente, expressas em [km] (ABNT, 2017).

Para calcular o consumo energético, tanto para cidade como para estrada, deve ser feito o cálculo conforme a Equação 19 (ABNT, 2017):

$$CE_{U,E} = \delta_{U,E} / A_{U,E} \quad (19)$$

O consumo energético (MJ/km) resulta da relação entre a densidade energética  $\delta$  (MJ/L) pela autonomia  $A$  (km/L).

O consumo energético combinado deve ponderar os consumos energético urbano e de estrada em 55% e 45%, respectivamente. A densidade energética para gasolina E22 deve ser utilizado o valor de 28,99 MJ/L e para etanol hidratado 20,09 MJ/L (ABNT, 2017).

A medição do consumo de combustível pelo método de balanço de carbono, conforme ABNT NBR 7024 (versão: maio 2017), é calculado com base no carbono das emissões, somando as massas de: THC, CO e CO<sub>2</sub>, medidos nos ciclos de condução urbano e de estrada. O cálculo é feito conforme a Equação 20, adaptada da ABNT NBR 7024 (ABNT, 2017):

$$C = \frac{(0,8656 \times m_{THC}) + (0,4288 \times m_{CO}) + (0,2729 \times m_{CO_2})}{FF} \times 100 \quad (20)$$

Onde:

$C$  : consumo de combustível a cada 100 km [L/100 km]

$m_{THC}$  : massa de THC emitida [g/km]

$m_{CO}$  : massa de CO emitida [g/km]

$m_{CO_2}$  : massa de CO<sub>2</sub> emitida [g/km]

$FF$ : fração do combustível

Para esta equação deve ser considerado valor zero para a porcentagem de água do etanol anidro e valor zero para gasolina durante os ensaios com uso de etanol hidratado (ABNT, 2017).

Em função dos cálculos de consumo se basearem na massa do combustível, a Equação 22 foi desmembrada para contemplar as densidades dos combustíveis. No denominador da referida equação foi alterado para a relação da porcentagem dos combustíveis em relação a densidade, conforme Equação 21:

$$FF = \frac{(6,4487 \times \%V_{GAS}) + (4,1102 \times \%V_{ETOH})}{D} \quad (21)$$

Sendo  $\%V_{GAS}$  a porcentagem de gasolina, em volume a 20°,  $\%V_{ETOH}$  a porcentagem do etanol, em volume a 20°, descontada a porcentagem de água e  $D$  a densidade do combustível [g/L] (ABNT, 2017).

Para partir de uma mesma base de cálculo para ambos o laboratório e PEMS, o balanço de carbono foi feito neste estudo para cada um dos ensaios usando os mesmos valores de combustíveis. Para realizar os testes com diferentes combustíveis a densidade do combustível foi baseada nos valores da Resolução 764/2018 da ANP, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Os valores foram tabulados e distribuídos conforme a parcela de cada um da composição dos combustíveis utilizados nos testes. A densidade para o etanol anidro é de 791.5 kg/m<sup>3</sup> e para a gasolina pura E0 é 758 kg/m<sup>3</sup> (ANP, 2018). Para a água foi considerado 998.2 kg/m<sup>3</sup> a 20°C. Todos os cálculos foram baseados nestes valores a 20°C, independente da temperatura do combustível. Como os cálculos foram feitos entre as densidades dos combustíveis e fluidos ao mesmo tempo a equação foi simplificada, desconsiderando a temperatura.

O cálculo de consumo de combustível por meio do método gravimétrico, no intuito de aferir o consumo, é feito por meio da Equação 22 (NBR 7024, 2017), em litro a cada 100 km.

$$C_{grv} = \frac{M}{D \times d} \times 100 \quad (22)$$

Onde:

$C_{grv}$  : consumo de combustível a cada 100 km [L/100 km]



$M$ : massa do combustível consumido [g]

$D$ : distância efetiva percorrida [km]

$d$ : massa específica do combustível [kg/m<sup>3</sup>], a 20°C

### 3.3.3 Modelos para cálculo dos parâmetros levantados em ciclo *real-world*

Os dados coletados em rodagem aplicados à metodologia VSP, passam a ter as informações de emissões e eficiência do veículo. Esta metodologia leva em conta dados da dinâmica veicular, de forma a estimar a relação potência por massa.

O método VSP tem algumas limitações, como: não utiliza a rotação do motor e apresenta valores agrupados de um módulo de rodagem. Para estimar o consumo de combustível (EPA MOVES) com base no valor VSP de um módulo, deve ser aplicada a Equação 23 (DUARTE; GONÇALVES; FARIAS, 2016; WANG et al., 2008):

$$FC = \sum_{i=1}^I FT_i \times t_i \quad (23)$$

Onde:

$FC$ : Consumo total de combustível em um ciclo de condução [L];

$i$ : velocidade média do módulo VSP

$I$ : número de módulo de velocidade VSP

$FT_i$ : taxa de consumo energético de um módulo VSP  $i$  para um veículo [L/s];

$t_i$ : tempo gasto em um módulo VSP  $I$  para um ciclo de condução [s].

A taxa de emissão média dos valores compilados do PEMS é calculada por meio da Equação 24 (ZHANG et al., 2014).

$$\overline{ER}_{i,j} = \frac{1}{T_i} \sum_{t=1}^{T_i} ER_{i,j,t} \quad (24)$$

Onde  $\overline{ER}_{i,j}$  (g/s) é a taxa média do poluente  $j$ , por um modo/ciclo de operação  $i$ , e  $T_i$  é o número de dados segundo a segundo durante o ciclo de ensaio  $i$ . O  $ER_{i,j,t}$  (g/s) é a taxa de emissão instantânea do poluente  $j$ , no ciclo  $i$  no segundo  $t$  (ZHANG et al., 2014).

Considerando a queima completa do combustível, e em função da correlação direta entre consumo de combustível e emissões de CO<sub>2</sub>, o valor emitido no escapamento de CO<sub>2</sub> pode ser calculado por meio da Equação 25 (OH et al., 2014).

$$E_{CO_2} = R_{CO_2,comb} \times FC \times \left( \frac{M_{CO_2}}{M_C} \right) \quad (25)$$

Onde:

$E_{CO_2}$ : taxa de emissão de CO<sub>2</sub> (kg/h)

$R_{CO_2,comb}$ : taxa média de carbono no combustível (%)

$FC$ : taxa do consumo médio de combustível (kg/h)

$M_{CO_2}$ : média da massa atômica relativa de CO<sub>2</sub> (44)

$M_C$ : média da massa atômica relativa de carbono (12)

A taxa média do carbono é 0,86 e a massa atômica relativa é conhecida, e pode variar em função da composição final, conforme o combustível é produzido. Para a gasolina pura (Coréia do Sul) este valor fica na faixa de 0,85 a 0,88. (OH et al., 2014).

Foi identificado um valor de referência da porcentagem de carbono em peso, com valor de 84% para gasolina e 52% para etanol anidro, informação publicada em 1983 (FILHO, 1983).

Para o cálculo das emissões do modelo IVE, o método VSP é aplicado para calcular a potência instantânea por unidade de massa, que depende dos parâmetros de condução como velocidade e aceleração. Para cada tecnologia de veículo são classificados 20 modos VSP e aplicado o estresse de motor (ES) que representa os diversos padrões de condução. O ES possui três diferentes modos, também para cada tecnologia, o que resulta em 60 padrões de condução. Seguindo o método VSP, o cálculo ES é feito conforme a Equação 26 (CHANG et al., 2013):

$$ES = \frac{RPM}{1000} + 0,08 \left( \frac{ton}{kW} \right) \cdot P \quad (26)$$

O parâmetro  $P$  é a carga média veicular dos 20 segundos finais, e é calculado conforme a Equação 27 a seguir (CHANG et al., 2013):

$$P = \frac{1}{20} \sum_{t-19}^t VSP_t \quad (27)$$

O método de medição de consumo por meio dos parâmetros VSP proposto por Duarte et al. (2015) estabelece uma relação entre o consumo medido e os dados dinâmicos de rodagem. O consumo do veículo varia conforme a faixa de VSP, desta forma os valores são divididos em quatro faixas para representar os diferentes regimes de rodagem. A faixa do VSP menor que -10 W/kg tem valores constantes e representam o veículo em desaceleração ou descida, gerando um valor constante. Na faixa entre -10 W/kg e +10 W/kg foi adotada uma equação simplificada de segunda ordem, porém o VSP zero é tratado à parte. Na faixa acima de 10 W/kg é representada por uma reta crescente. Desta forma a Equação 28 tem a seguinte composição (DUARTE et al., 2015):

$$\begin{aligned}
 Fuel = & \sum_{VSP=-11}^{-21} f \times t_{VSP} + \sum_{VSP=-10}^{-1} (aVSP^2 + bVSP + c) \times t_{VSP} + \delta(aVSP^2 + bVSP + c) \times t_{VSP=0} \\
 & + \sum_{VSP=1}^{10} (aVSP^2 + bVSP + c) \times t_{VSP} + \sum_{VSP=11}^{31} (mVSP + d) \times t_{VSP}
 \end{aligned} \quad (28)$$

Sendo  $\delta$  o consumo de combustível com o motor em marcha lenta e as variáveis  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $m$  e  $f$  são determinadas por meio do conjunto de equações e os dados de consumo do veículo (DUARTE et al., 2015). Os valores dos parâmetros da Equação 32 serão calibrados e apresentados no capítulo 4.

Para o ajuste da fase fria, foi adotado um fator de correção sobre a Equação 29, que é calculado conforme Equação 33:

$$fator_{temp} = \frac{(T - 130)^2}{4000} \quad (29)$$

Onde  $fator_{temp}$  é o valor adimensional para a correção do consumo de combustível com o motor frio e  $T$  a temperatura do motor ( $^{\circ}\text{C}$ ). Este fator é aplicado até o valor mínimo de um, portanto acima de  $66,7^{\circ}\text{C}$  o fator é igual a um.

A escolha pelo modelo VSP tem como objetivo utilizar uma metodologia de medição de consumo e emissões já testada em outros estudos de forma a parrear com os dados do novo método de medição, por meio do tempo de injeção de combustível. Este pareamento visa identificar alguma limitação no novo método, pois este ainda não foi identificado em outros estudos.

Todos os cálculos foram realizados para cada combustível. O intuito é de identificar o balanço de emissões baseado na proporção de etanol e gasolina do combustível em uso, de forma a quantificar as emissões referentes ao combustível fóssil e renovável. O volume da vazão de cada combustível com base em fonte renovável ou fóssil deve ser identificado em função do inventário de carbono.

O etanol hidratado contém entre 4% e 5% de água (destilação azeótropo), dependendo do país (EL-FAROUG et al., 2016). No Brasil esse valor varia dentro desta faixa, de 4,0% até 4,9% (MELO et al., 2012). O cálculo de balanço de etanol anidro, gasolina pura e água será descrito no capítulo 4.

### 3.3.4 Precisão da medição de consumo *onboard*

A precisão adotada neste estudo para o consumo de combustível calculada pela unidade de controle, registro *onboard*, seguirá a regulamentação europeia que limita o desvio para mais ou para menos 5% em relação ao ciclo oficial em laboratório (KÖCK, 2019). Os valores devem ser armazenados no Dispositivo de Monitoramento de Consumo de Energia e/ou Combustível On-Board (*On-board Fuel and/or Energy Consumption Monitoring Device - OBFCM device*). A precisão da medição deve seguir o padrão da Equação 30 (COMMISSION, 2018).

$$A = \left[ \left( \frac{FC_{ref} - FC_{ECU}}{FC_{ref}} \right) \times 100 \right] \quad (30)$$

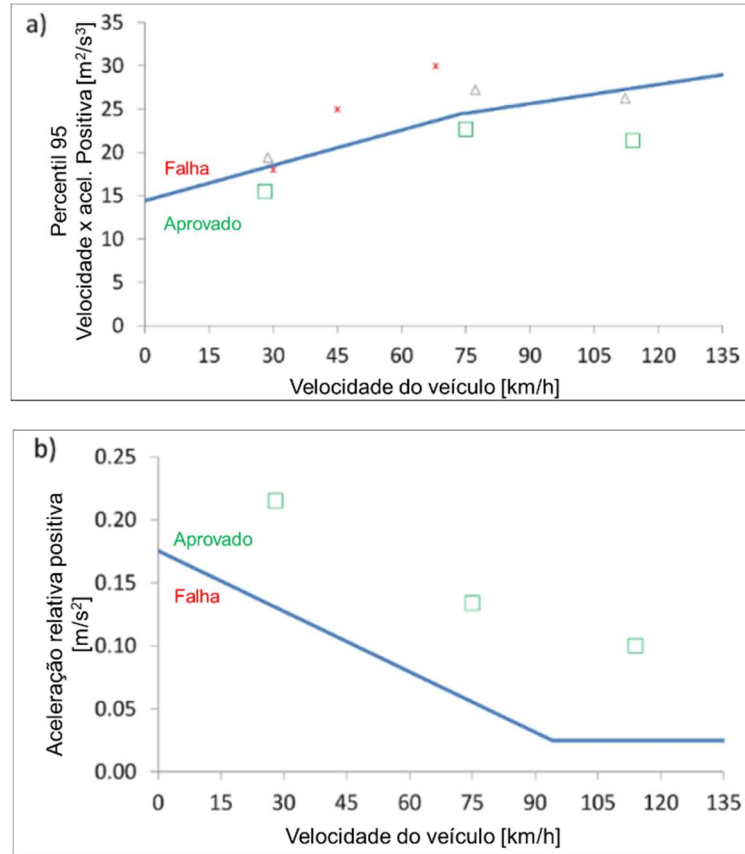
O valor base para esta medição da precisão do método deste estudo é o ensaio em laboratório. Para os ensaios em condução o PEMS será a referência de precisão do consumo medido *onboard*. Os valores de consumo do laboratório e do PEMS seguirão o cálculo do balanço de carbono.

### 3.3.5 Avaliação da dinâmica do percurso em *real driving emissions*

Os fabricantes de PEMS normalmente oferecem programas para o cálculo dos testes, mas também existem programas gratuitos para esta finalidade. Para aplicar o método RDE estabelecido pela comunidade europeia, Giechaskiel et al. (2016) realizaram um teste completo, com maior detalhamento nos procedimentos de preparação do veículo e execução do teste e usaram o programa de análise EMROAD, que é gratuito. Deve ser avaliada se a aceleração

positiva relativa e o percentil 95 da velocidade com a aceleração estão dentro dos limites, conforme Figuras 22 a e b (GIECHASKIEL et al., 2016).

Figura 26 – Índices de verificação do excesso ou falta da dinâmica de condução



Fonte: (GIECHASKIEL et al., 2016)

Os cálculos para cada um dos três trajetos devem ser feitos por meio da Equação 31 para a média ponderada das emissões específicas das distâncias ponderadas das janelas de velocidade das três categorias de condução (COMMISSION, 2016a):

$$M_{gas,d,k} = \frac{\sum(w_j M_{gas,d,j})}{\sum w_j} \quad k = u, r, m \quad (31)$$

O fator de ponderação para cada uma das janelas é definido pela Equação 32 (COMMISSION, 2016a):

$$M_{CO2,d,cc}(\bar{v}_j) \cdot \left(1 + \frac{tol_1}{100}\right) \leq M_{CO2,d,j} \leq M_{CO2,d,cc}(\bar{v}_j) \cdot \left(1 + \frac{tol_2}{100}\right) \quad (32)$$

Sendo:

$$w_j = k_{11}h_j + k_{12}$$

Para a Equação 33:

$$M_{CO_2,d,cc}(\bar{v}_j) \cdot \left(1 - \frac{tol_2}{100}\right) \leq M_{CO_2,d,j} \leq M_{CO_2,d,cc}(\bar{v}_j) \cdot \left(1 + \frac{tol_1}{100}\right) \quad (34)$$

Sendo:

$$w_j = k_{21}h_j + k_{22}$$

Desta forma o cálculo de  $h_j$  é feito conforme Equação 35:

$$h_j = 100 \cdot \frac{M_{CO_2,d,j} - M_{CO_2,d,cc}(\bar{v}_j)}{M_{CO_2,d,cc}(\bar{v}_j)} \quad (35)$$

Sendo  $h_j$  a distância das janelas  $j$  relativa a curva característica de CO<sub>2</sub> [%],  $M_{w,d,j}$  a emissão dependente da distância para cada componente do gás na janela  $j$  [g/km],  $v_j$  é a velocidade real do veículo [km/h],  $w_j$  é o fator de ponderação da janela  $j$ ,  $k_{ii}$  é o coeficiente da função de pesagem,  $f_{u/r/m}$  é o fator de ponderação de cada circuito,  $tol_{1/2}$  tolerância primária/secundária para a curva característica das emissões de CO<sub>2</sub> do veículo [%] e  $m_{gás}$  a massa do gás [g/s].

Conforme o procedimento do Regulamento da Comissão 2018/1832, deve ser aplicado somente o cálculo com base no método da janela móvel de cálculo das médias, para cada um dos trajetos urbano, rural e rodoviário. Anteriormente era também realizado o cálculo pelo grupo de potência e depois os métodos eram comparados. O método da janela móvel é feito com a subdivisão do ensaio, o qual é verificado se atendeu os limites permitidos de forma a ter o trecho validado. O objetivo deste método é verificar a dinâmica total do percurso por meio de comparação de emissões de CO<sub>2</sub> com trechos de referência obtidos por meio do ensaio WLTP. Os parâmetros dos cálculos consideram emissões de CO<sub>2</sub> para velocidades igual ou superior a 1 km/h, mesmo que não tenha ocorrido emissões (COMMISSION, 2018).

Obtendo os valores das janelas para cada um dos trajetos, deve-se proceder com o cálculo da emissão referente a todo o trajeto, por meio da Equação 36 (COMMISSION, 2018):

$$M_{gas,d,t} = 1000 \cdot \frac{f_u \times M_{gas,d,u} + f_r \times M_{gas,d,r} + f_m \times M_{gas,d,m}}{(f_u + f_r + f_m)} \quad (36)$$

Os fatores aplicados para cada um dos trajetos são: 0,34; 0,33; e 0,33; respectivamente.

O valor das médias ponderadas das emissões no trajeto urbano é calculado com base nas emissões conforme a distância e deve ser feito conforme a Equação 37 (COMMISSION, 2016b):

$$M_{w,gas,d,U} = 1000 \cdot \frac{\bar{m}_{gas,U} \times 3600}{\bar{v}} \quad (37)$$

Para o percurso total, usar a Equação 38:

$$M_{w,gas,d} = 1000 \cdot \frac{\bar{m}_{gas} \times 3600}{\bar{v}} \quad (38)$$

O valor de  $M_w$  representa o resultado das médias ponderadas de CO e NOx do percurso urbano e total [mg/km].

Conforme o segundo pacote da Regulação da Comissão 2016/646 (COMMISSION, 2016b), o cálculo dos dados dinâmicos coletados como a aceleração positiva relativa (RPA) depende do valor da velocidade, com precisão de 0,1%, acima de 3 km/h com amostragem de 1 Hz. Para acelerações com resolução menor que 0,01 m/s<sup>2</sup> deve ser aplicado o filtro de *Hanning* T4253H e para valores acima de  $r_{máx}$  o percurso é inválido. A aceleração deve ser calculada pela Equação 39:

$$a_i = \frac{(v_{i+1} - v_{i-1})}{2 \cdot 3,6}, i = 1 a N_t \quad (39)$$

O valor de aceleração [m/s<sup>2</sup>] no intervalo de tempo  $i$ . O produto da velocidade com a aceleração é resultado da Equação 40 (COMMISSION, 2016b):

$$(v \cdot a)_i = \frac{v_i \cdot a_i}{3,6}, i = 1 a N_t \quad (40)$$

Sendo que o resultado do produto no intervalo  $i$  expresso em [m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup> ou W/kg]. A distância  $d_i$  [m] por amostra é calculada pela Equação 41 (COMMISSION, 2016b):

$$d_i = \frac{v_i}{3,6}, i = 1 a N_t \quad (41)$$

A velocidade real do veículo é expressa em km/h por intervalo de tempo  $i$ , conforme o número de amostras  $N$ .

Os resultados dos cálculos de velocidade,  $v.a$  e distância devem ser ordenados de forma crescente com base na velocidade, para cada um dos três trajetos ( $u$ ,  $r$  e  $e$ ). Em cada classe de velocidade devem conter 150 amostras de aceleração ( $a_i$ ) maiores que  $0,1 \text{ m/s}^2$ . Cada classe de velocidade deve ser calculada a velocidade média  $v_k$  conforme a Equação 42 (COMMISSION, 2016b):

$$\bar{v}_k = \frac{(\sum_i v_{i,k})}{N_k}, i = 1 a N_k, k = u, r, m \quad (42)$$

Sendo  $N_k$  o total de amostras em cada um dos três trajetos ( $u$ ,  $r$  e  $m$ ).

Os valores do percentil 95, do produto de velocidade e aceleração positiva devem ser ordenados em ordem crescente para os conjuntos iguais ou maiores que  $0,1 \text{ m/s}^2$  e assim determinar as amostras  $M_k$ . O valor mais baixo é o percentil  $1/M_k$ , seguido pelo  $2/M_k$  e sucessivamente até o  $M_k/M_k$  que equivale a 100%. O valor de  $j/M_k$  igual a 95% equivale ao percentil 95%. O cálculo de aceleração positiva relativa por classe de velocidade é feito com base na Equação 43 (COMMISSION, 2016b):

$$RPA_k = \frac{\sum_j (\Delta t \cdot (v \cdot a_{pos})_{j,k})}{\sum_i d_{i,k}}, j = 1 a M_k, i = 1 a N_k, k = u, r, m \quad (43)$$

Sendo os valores de  $RPA_k$  para cada um dos três trajetos expresso em  $[\text{m/s}^2$  ou  $\text{kw/kg*km}]$ . O valor de  $M_k$  refere-se as amostras com aceleração positiva e  $N_k$  amostragem total, ambas para os três trajetos (COMMISSION, 2016b).

Estes valores devem ser avaliados quanto à validade conforme os critérios apresentados no Quadro 3. Para as comparações a seguir que obtiverem estas relações, o percurso deve ser invalidado, para veículos com potência/peso abaixo de  $44 \text{ W/kg}$  (COMMISSION, 2018).

Quadro 3 – Critérios para validação do percurso

Classe de velocidade $V_k$	Invalidar o percurso se
menor ou igual a $74,6 \text{ km/h}$	$(v \cdot a_{pos})_k[95] > (0,136 \cdot V_k + 14,44)$
Maior que $74,6 \text{ km/h}$	$(v \cdot a_{pos})_k[95] > (-0,097 \cdot V_k + 31,635)$
menor ou igual a $94,05 \text{ km/h}$	$RPA_k < (-0,0016 \cdot V_k + 0,1755)$
Maior que $94,05 \text{ km/h}$	$RPA_k < 0,025$

Fonte: (COMMISSION, 2018)



Para obter o valor de cota positiva acumulada durante o percurso, os dados de altitude do GPS, velocidade instantânea a cada segundo e o tempo decorrido do teste devem ser registrados. A primeira validação deve ser feita por comparação entre as altitudes do GPS e mapa, não podendo superar 40 m, caso contrário considerar o valor do mapa. Caso a variação entre dois pontos de altitude supere o valor do produto da velocidade em m/s (dividido por 3,6) e o seno de 45°, o valor da altitude atual ( $h_t$ ) e anterior ( $h_{t-1}$ ) devem ser igualadas (COMMISSION, 2016b).

Para o cálculo da cota positiva deve ser feito o levantamento de cada distância por meio da divisão da velocidade em km/h dividida por 3,6 e o resultado é a somatória das distâncias. A altitude interpolada de cada ponto intermediário deve ser calculada conforme a Equação 44 (COMMISSION, 2016b):

$$h_{int}(d) = h_{corr}(0) + \frac{h_{corr}(1) - h_{corr}(0)}{d_1 - d_0} \cdot (d - d_0) \quad (44)$$

Sendo  $h_{int}(d)$  a altitude [m] interpolada em função do  $d$ , as altitudes corrigidas 0 é valor antes do ponto intermediário e 1 após este ponto. A distância  $d$  em metros representa o trajeto até o ponto intermediário, e os valores 0 e 1 os locais anterior e posterior ao ponto intermediário. Os dados obtidos em cada ponto intermediário devem passar por processo de alisamento/suavizado por meio de duas etapas. Na primeira deve ser calculada a inclinação do trecho com valor em m/m, em seguida somando este resultado com a altitude interpolada, valor em metro em relação ao nível do mar (COMMISSION, 2016b).

### 3.4 DENSIDADE DOS COMBUSTÍVEIS E EMISSÃO DE CARBONO

A disponibilidade de dois combustíveis para os motores a ignição por centelha apresenta dois níveis de emissões e densidade energética que devem ser consideradas nas análises. A gasolina pura não é comercializada para o público geral, somente para aplicações específicas na área automobilística para uso tanto dos fabricantes quanto dos órgãos certificadores e institutos. A gasolina sem aditivos possui uma densidade de 0,758 kg/L e produz 3088 gramas de CO<sub>2</sub> por kg de gasolina. O etanol apresenta densidade de 0,800 kg/L (com 5% de água) e produz 1913 gramas de CO<sub>2</sub> por kg de combustível (ANP, 2018). A densidade energética da

gasolina E22 é de 28,99 MJ/L e do etanol 20,09 MJ/L, resultando em uma relação energética de 0,69 (MDIC-INMETRO, 2011).

Desta forma, o cálculo de emissão de carbono deste estudo será baseado nestes valores apresentados. A unidade de controle realiza o cálculo da massa de combustível injetado no motor e faz a conversão do carbono conforme os valores de cada combustível. Apesar de ambos os combustíveis emitirem CO<sub>2</sub> em quantidades próximas, o registro dos valores de gases intermediários emitido contabiliza como carbono fóssil e carbono não fóssil. O carbono emitido pelo etanol é, portanto, registrado como renovável, mas não é considerado o fator de carbono fóssil envolvido no processo de produção. A massa de água também será identificada pelo método deste estudo. Os resultados deste estudo seguem o conceito de consumo de energia do tanque à roda (TTW), conforme padrão de homologação local e internacional.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos neste estudo serão apresentados e discutidos, neste capítulo, concomitantemente de forma a agrupar os temas envolvidos em cada análise.

### 4.1 COLETA DE DADOS E INSTALAÇÕES UTILIZADAS PARA OS TESTE CTE

O ensaio foi realizado na sala de dinamômetro do IEE, localizado no campus da USP com o veículo de teste ancorado no dinamômetro de chassi, conforme Figura 23. O laboratório não possui climatização, portanto realizado à temperatura ambiente. Os testes foram realizados no mês de novembro de 2018.

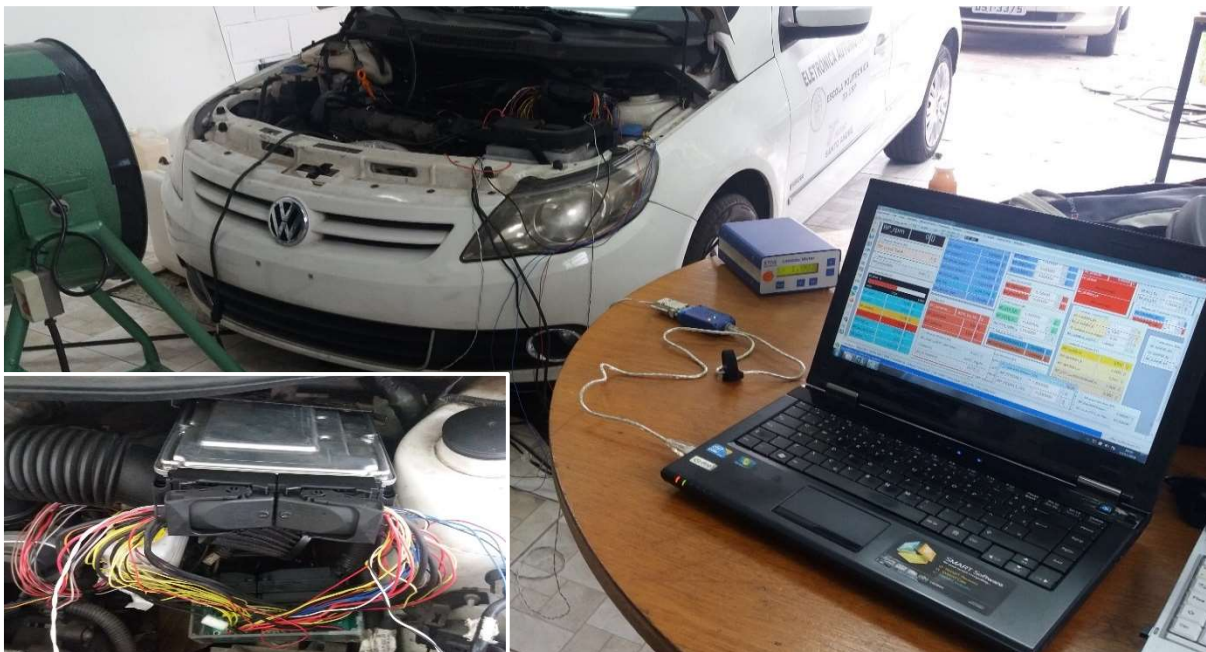
Figura 23 – Veículo de teste no dinamômetro



Fonte:autor

O motor foi controlado pela unidade de gerenciamento com os dados programáveis de forma a ajustar os parâmetros de acelerador para o controle das velocidades do ensaio (Figura 24). Durante o ensaio, os dados da ECU foram armazenados em arquivo formato ASCII, compatível com o formato Excel. Estes dados foram posteriormente tabulados e serão apresentados nas seções posteriores deste capítulo.

Figura 24 – Unidade de controle e programa de calibração e aquisição dos dados



Fonte: autor

O analisador de gases foi utilizado durante todo o ensaio, mas em função de não acumular o volume emitido foi considerado somente o valor ao final da rotação estabilizada (Figura 20). No dinamômetro foram inseridas cargas para simular diferentes condições de rotação com impacto no consumo de combustível, conforme Figura 25.

Figura 25 – Analisador de gases (esquerda) e controle de carga do dinamômetro (direita)



Fonte: autor

O medidor de fluxo de massa do combustível foi instalado na parede (destaque em vermelho) para assegurar estabilidade, bem como ficar isolado da vibração do veículo, conforme Figura 26. Em função do princípio de medição deste dispositivo foi necessário ter estes cuidados para assegurar o funcionamento adequado durante as medições.

Figura 26 – Medidor da massa de combustível



Fonte: autor

O levantamento de dados em rotação estabilizada facilita a análise em função de minimizar os efeitos causados pela defasagem entre sensores, atuadores e medições externas. Durante as verificações da base de dados, o alinhamento entre os parâmetros foi observado por meio de pequenas oscilações nos parâmetros, de forma a alinhar as informações do tempo de injeção com a vazão do combustível. A finalidade deste alinhamento foi minimizar ruídos nos cálculos. A rotação estável reduziu este efeito e permitiu a análise com os diversos parâmetros estabilizados.

#### 4.1.1 Valores de emissões

Durante os ensaios, as emissões foram registradas ao final de cada ciclo de rotação estabilizada, semelhante ao procedimento aplicado na inspeção veicular (Resolução 418/2009). Em função da análise nesta etapa ser baseada no combustível consumido, os valores foram registrados, mas não fazem parte dos cálculos. Além dos gases com carbono na composição, os

valores de NOx foram registrados a título de informação. A Tabela 1 *a* e *b* apresenta os valores medidos durante os ensaios.

Tabela 1 – Emissões em rotações estabilizadas

(a) E100

Emissões Rotação/Carga	CO (%)			CO <sub>2</sub> (%)			HC (ppm)			NOx (ppm)		
	0%	10%	20%	0%	10%	20%	0%	10%	20%	0%	10%	20%
1500	0,01	0,00	0,62	15,20	15,00	14,60	1,00	0,00	22,00	0,00	0,00	4,00
2500	0,01	0,00	0,50	15,20	15,00	14,70	1,00	0,00	16,00	0,00	134,00	4,00
3500	0,03	0,00	0,51	15,20	15,00	14,70	1,00	0,00	13,00	0,00	34,00	2,00

(b) E36

Emissões Rotação/Carga	CO (%)			CO <sub>2</sub> (%)			HC (ppm)			NOx (ppm)		
	0%	10%	20%	0%	10%	20%	0%	10%	20%	0%	10%	20%
1500	0,00	0,01	0,00	15,00	14,90	14,90	1,00	4,00	1,00	0,00	0,00	0,00
2500	0,01	0,00	0,00	14,90	15,00	14,90	1,00	6,00	0,00	0,00	0,00	540,00
3500	0,01	0,00	0,00	14,90	14,90	14,90	2,00	6,00	0,00	0,00	256,00	290,00

Fonte: autor

Na final fase deste estudo, as medições foram realizadas por meio de instrumentos que permitem o cálculo da massa dos gases emitidos, como por exemplo, o PEMS.

#### 4.1.2 Consumo de combustível baseado no tempo de injeção

Nesta etapa do estudo o foco foi a análise do comportamento do tempo de injeção e consumo baseado em regime estável do motor. A fase transiente não faz parte do ciclo CTE, mas ela está presente na amostragem e contribuiu para identificar o comportamento durante a aceleração do motor, fator importante para a próxima análise deste estudo.

Para a verificação do eletro injetor do veículo de teste é necessário considerar o tempo de abertura efetivo do componente. O *driver* da unidade de comando dispara o tempo de abertura do injetor que precisa no primeiro momento energizar a bobina e deslocar a agulha vencer a inércia da mola e o fluxo de combustível. Para calcular o tempo demandado para esta magnetização, conhecido como tempo de *offset*, deve ser considerada a indutância da bobina e a resistência do injetor e o tempo é a relação entre dois parâmetros. O veículo testado teve o tempo calculado com base na Equação 45 a seguir:

$$T_{mag} = \frac{12,496 \text{ mH}}{12,1 \Omega} \sim 1 \text{ ms} \quad (45)$$

O tempo de magnetização calculado  $T_{mag}$  é de aproximadamente um milissegundo. Transcorrido este tempo existe um *delay* para a efetiva injeção de combustível, que totaliza um tempo de 1,2 ms.

Apesar do cálculo do retardo para a abertura, para esta fase do estudo este valor foi desconsiderado no intuito de simplificar a análise. Outro motivo é a falta de um método para identificar o retardo no fechamento da agulha. De forma a simplificar a análise, neste momento foi considerado que os dois retardos apresentem valores similares, anulando um ao outro.

#### **4.1.3 Análise da base de dados de consumo de combustível com base no ensaio CTE**

Para a avaliação do consumo de combustível, foi feito o levantamento da densidade de cada combustível para ajustar o volume consumido. A medição foi feita no laboratório do IPT por meio de densímetro e a gasolina apresentou densidade de 0,767 kg/l a 23,6 °C e o etanol 0,804 kg/l a 23,5 °C. Estes valores foram utilizados nos cálculos de consumo. O combustível utilizado era gasolina com concentração de 30% (E30) e no processo de troca de combustíveis do tanque ocorreu uma contaminação de etanol, por esse motivo o valor resultante foi E36.

Os dados coletados compreendem os parâmetros do gerenciamento da unidade de controle do motor, incluindo a concentração de etanol, e a vazão de combustível durante os ensaios no dinamômetro.

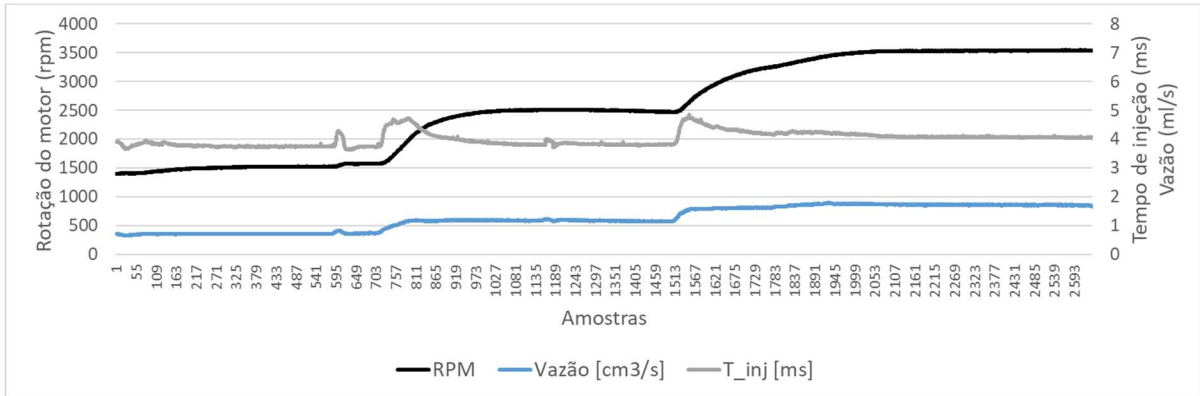
Para identificar o vazão do injetor do veículo de teste, os dados coletados durante as medições em dinamômetro foram calculados com base na Equação 10. Os parâmetros utilizados foram: tempo de injeção, rotação do motor e vazão de combustível. O combustível consumido foi convertido para g/cm<sup>3</sup>, conforme descrito anteriormente. Os parâmetros foram armazenados a uma taxa de 10 Hz e o cálculo foi feito para cada amostra, compondo assim uma curva com o valor de vazão do injetor.

O tempo de injeção e vazão do combustível apresentam defasagem em função dos instrumentos terem respostas diferentes. Para minimizar as defasagens, cada uma das seis bases de dados (3 com etanol e 3 com gasolina) foi feito um alinhamento entre a vazão de combustível com os demais parâmetros. A forma para identificar o sincronismo entre as bases foram usados alguns picos ocorridos durante a medição. Outro fator identificado é a resolução de cada instrumento. Os picos identificados no tempo de injeção não eram tão agudos no medidor de vazão. Os valores da vazão apresentavam um aumento em algumas amostras, aos invés de um pico, o que indica o limite de precisão do instrumento.

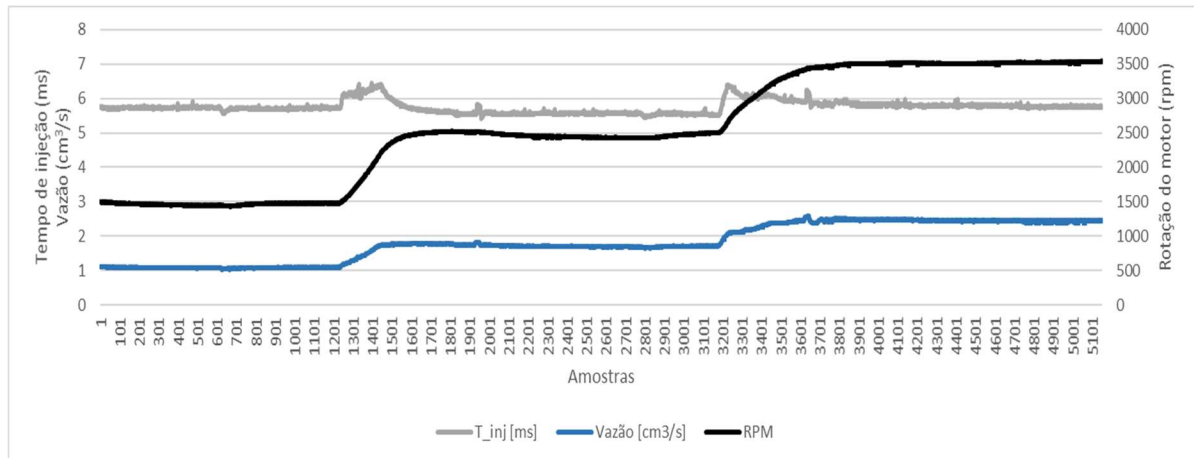


Como exemplo, as Figuras 27 a e b apresentam os parâmetros básicos para o cálculo do fator de consumo do injetor que engloba: tempo de injeção, rotação do motor e vazão de combustível, ambos com 10% de carga do dinamômetro (C-10%).

Figura 27 – Vazão de combustível, tempo de injeção e rotação do motor  
(a) E36, C-10%



(b) E100, C-10%



Fonte: Autor

O valor do medidor de vazão de combustível teve o valor ajustado para litros por hora (x40/3,9), convertido em seguida para grama por segundo (1000/3600) e por fim ajustado para a densidade do respectivo combustível. Para o etanol hidratado foi utilizado o valor de 0,804 g/cm<sup>3</sup> e para a gasolina E36, 0,767 g/cm<sup>3</sup>.

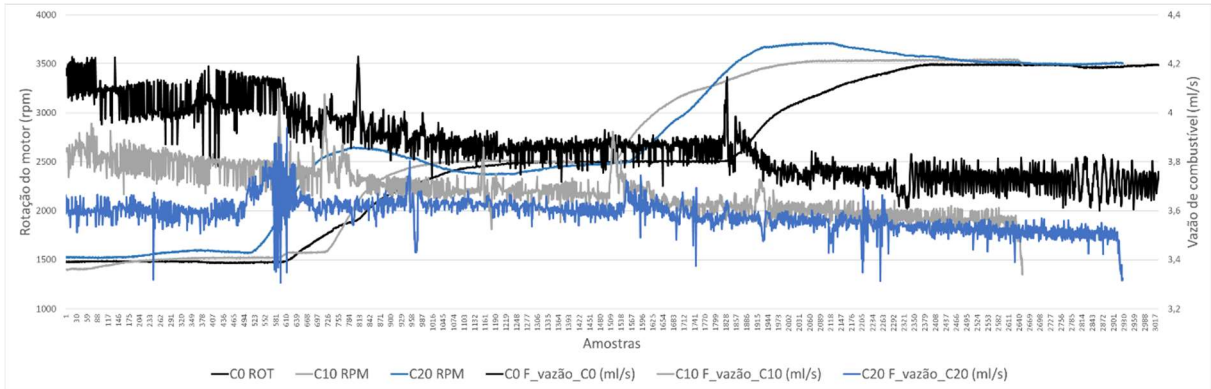
Utilizando a base de dados de cada combustível, o fator de vazão do injetor foi calculado por meio da Equação 10, descrita na seção 3.2.1. Os valores da taxa de vazão do injetor de combustível apresentam variações entre cada uma das rotações e para cada nível de carga. Visando apresentar este comportamento identificado, as Figuras 28 a e b contém os valores de



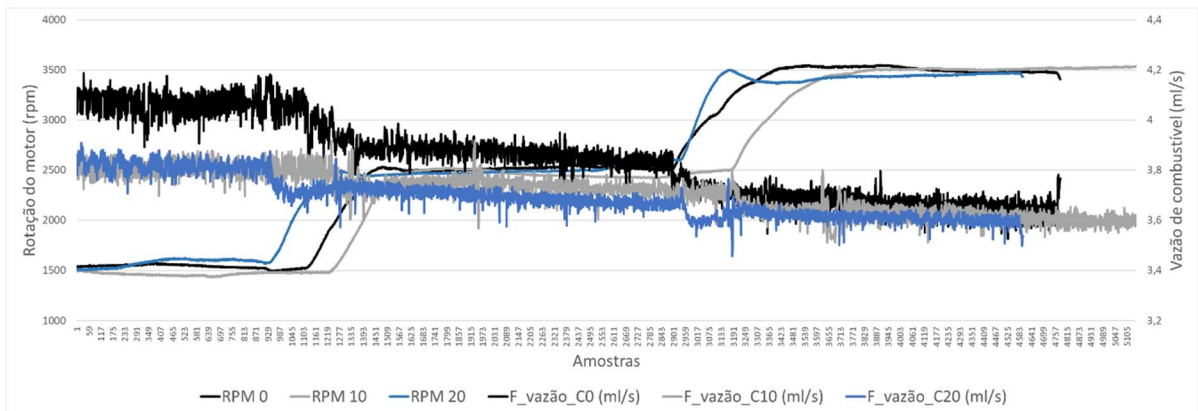
taxa de vazão do injetor e rotação, em cada uma das três condições de carga, para gasolina E36 e etanol, respectivamente.

Figura 28 – Fator de vazão de combustível (ml/s) e rotação

(a) E36, C-0%; C-10%; C-20%



(b) E100, C-0%; C-10%; C-20%

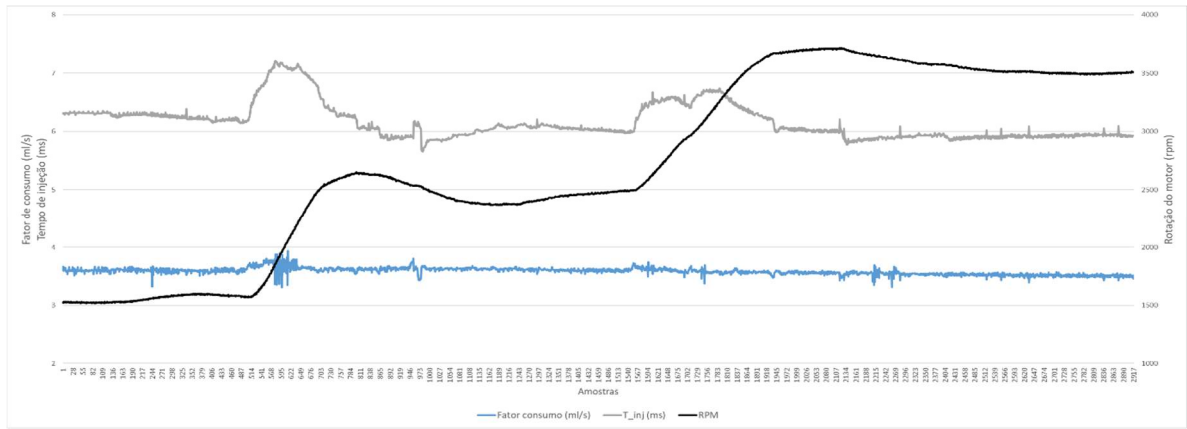


Fonte: Autor

Conforme o valor de rotação e carga do motor, o valor de vazão do injetor apresentou algumas variações. Analisando estas variações, os efeitos que podem influenciar no comportamento do injetor estão relacionados com a pressão e a velocidade do ar.

Comparando os parâmetros envolvidos no cálculo de vazão do injetor (fator de consumo) foi identificado influência da rotação nos resultados. Descontando o retardo na abertura do injetor, o comportamento de resposta do injetor pouco variou. Comparando as curvas dos três parâmetros: tempo de injeção, rotação e vazão de combustível, foi identificado correlação direta entre a curva de rotação e a resposta de vazão do injetor, conforme Figuras 29.

Figura 29 – Comparação entre parâmetros de consumo de combustível e rotação- E36, C-20%



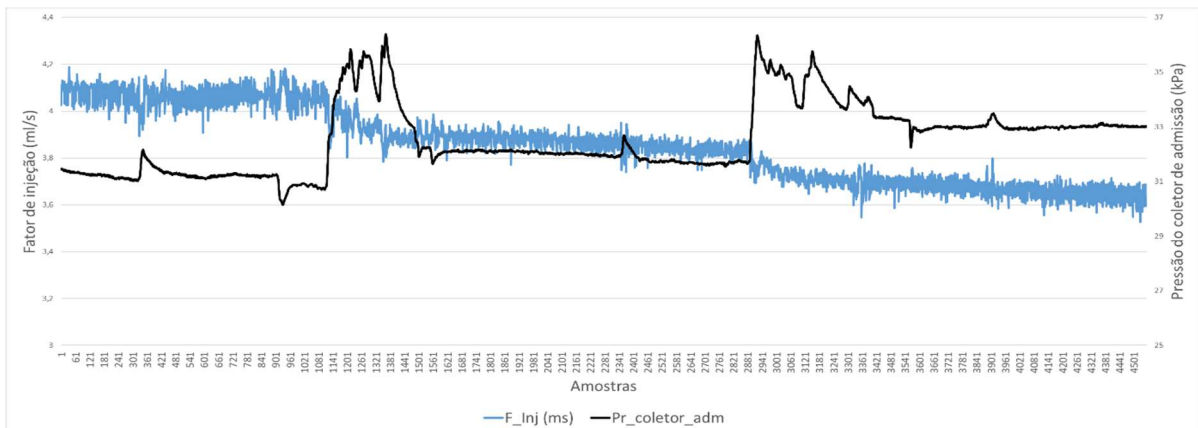
Fonte: Autor

As variações que ocorrem na vazão do injetor em cada regime podem ter alguns fatores que exercem influência sobre o desempenho dinâmico deste componente. Podemos indicar como potencial fator o sincronismo entre o medidor de vazão, que opera em paralelo aos demais componentes da unidade de controle, como o injetor, rotação, TPS, pressão do coletor e outros. Outro fator é a precisão de cada componente, mais especificamente entre o medidor de vazão e injetor de combustível.

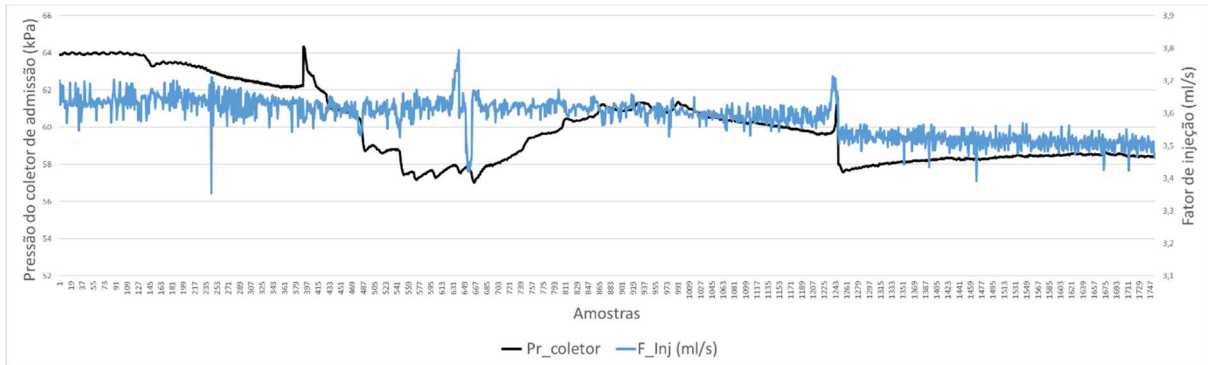
Para avaliar a influência da pressão do coletor de admissão na vazão do injetor (HU; YANG; ZHOU, 2018), foram comparados o fator de consumo do injetor com a pressão de coletor. Observando as curvas com o motor sem carga, elas apresentam uma tendência inversamente proporcional, conforme Figura 30 *a*. No entanto, ao ampliar a análise para o ensaio com 20% de carga a tendência não se mantém, conforme Figura *b*.

Figura 30 – Relação entre fator de consumo e pressão no coletor de admissão

(a) E100; C-0%



(b) E36, C-20%



Fonte: Autor

A variação do fator de injeção poderia estar relacionado diretamente com a pressão do coletor em função da variação da diferença entre as pressões de combustível e do coletor, mas esse efeito não se confirmou quando analisada a condição com 20% de carga. A variação da pressão no coletor pode ter influência no resultado da vazão do injetor e será melhor investigada nas seções 4.1.4 e 4.1.5.

#### 4.1.4 Análise dos parâmetros por meio da média dos valores da base de dados

Para facilitar o manuseio dos dados no intuito de identificar comportamentos entre os parâmetros analisados, foi criada uma tabela com o valor médio de cada parâmetro. Para cada um dos nove patamares de operação do motor foram selecionados os dados de funcionamento estabilizado em cada rotação. Este procedimento foi feito para cada um dos combustíveis. Os parâmetros de referência para o corte dos dados foi o pedal do acelerador e em segunda ordem a rotação. O objetivo desta tabela é acelerar o processo de análise dos dados com as nove condições de regime do veículo simultaneamente. Desta forma é possível analisar a influência de cada parâmetro dos dados de forma mais dinâmica e facilitar a comparação entre os nove padrões de ensaio. A Tabela 2 traz exemplos de valores médios de cada parâmetro utilizado na análise, conforme os ensaios com gasolina E36.

Tabela 2 – Valor médio dos parâmetros analisados – E36

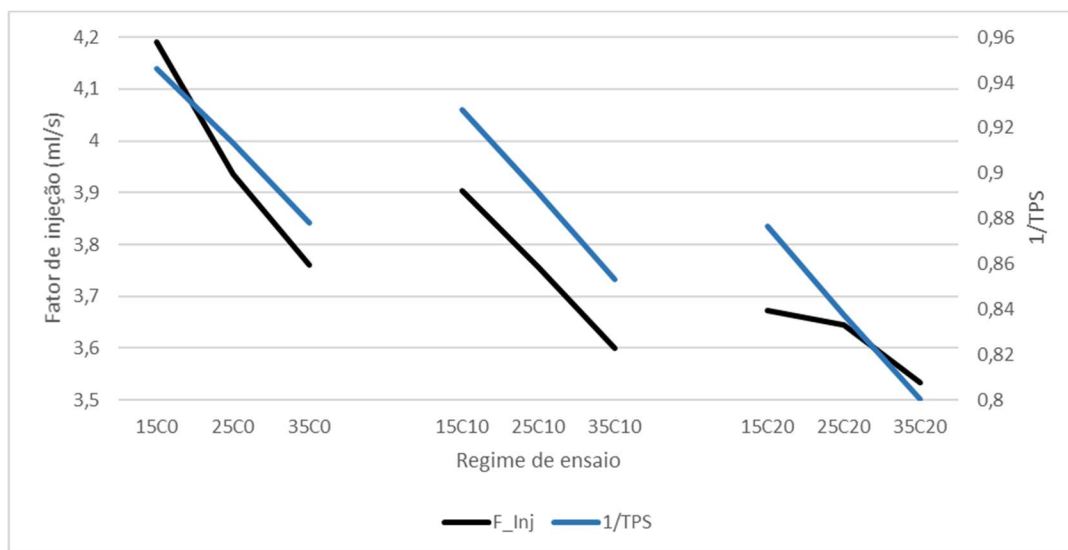
Regime	T_inj	T_comb [C]	Vazão (ml/s)	T_mot [C]	Pedal [%]	TPS [%]	Pressão [kPa]	Fator inj. [ml/s]
15C0	2,91150	34,33	0,5837360	86,78	18,40	5,394	28,201	4,06600359
25C0	3,02991	35,08	0,9730257	91,14	26,20	8,679	28,323	3,85815172
35C0	3,32540	35,58	1,4375651	85,98	32,19	12,193	31,656	3,72364921
15C10	3,74808	37,08	0,7194241	85,48	23,24	7,188	37,486	3,78729621
25C10	3,82587	37,14	1,1725720	95,24	30,05	10,860	37,409	3,68128090
35C10	4,07125	38,23	1,7140848	86,43	35,98	14,709	39,714	3,57167977
15C20	6,28138	37,67	1,1679132	84,71	29,60	12,335	63,231	3,59833838
25C20	6,03833	38,48	1,8088973	94,64	35,75	16,231	59,807	3,61780594
35C20	5,92013	42,35	2,4373498	91,41	40,80	19,979	58,299	3,51577586

Fonte: Autor

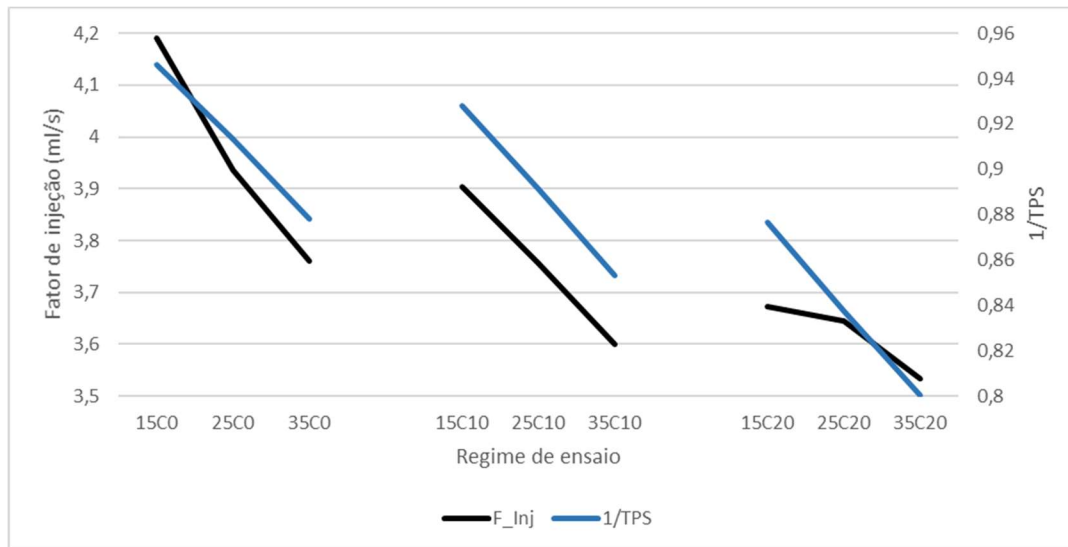
Utilizando os valores médios de cada parâmetro, foram realizadas análises para identificar a correlação entre eles. O valor da taxa de vazão do injetor é o objetivo principal desta fase do estudo em função de caracterizar o consumo do veículo. Desta forma, a análise utiliza este fator para identificar os fenômenos com influência no fator de vazão do injetor. Após a comparação com alguns parâmetros foi identificado uma correlação inversamente proporcional com a posição da borboleta (TPS). As Figuras 31 *a* e *b* trazem a comparação entre a vazão do injetor e o TPS, para etanol e gasolina E36, respectivamente. A unidade da posição da borboleta é em porcentagem.

Figura 31 – Comparação entre fator de consumo do injetor e o inverso do TPS

(a) E100



(b) E36



Fonte: autor

#### 4.1.5 Análise de fatores com influência na vazão do injetor

Após a verificação com os valores médios, os dados da fase transiente foram retirados da amostra visando identificar um comportamento durante os ensaios com as três rotações estabilizadas, variando as cargas. O primeiro aspecto avaliado nesta etapa foi a precisão do instrumento de medição. Após levantar o erro em cada faixa de vazão, os valores atingidos durante os ensaios no laboratório operaram em níveis onde o erro é maior em função de estarem no limite inferior da escala. O instrumento apresenta precisão de 0,1% na faixa entre 100% (250 kg/h) até 5% da vazão, que representa 12,5 kg/h. A faixa de vazão dos ensaios ficou entre 1,7 kg/h até 10 kg/h, portanto para todas as medições foram aplicadas as correções dos erros. A Equação 46 foi extraída do manual do instrumento utilizado para as medições de vazão de combustível.

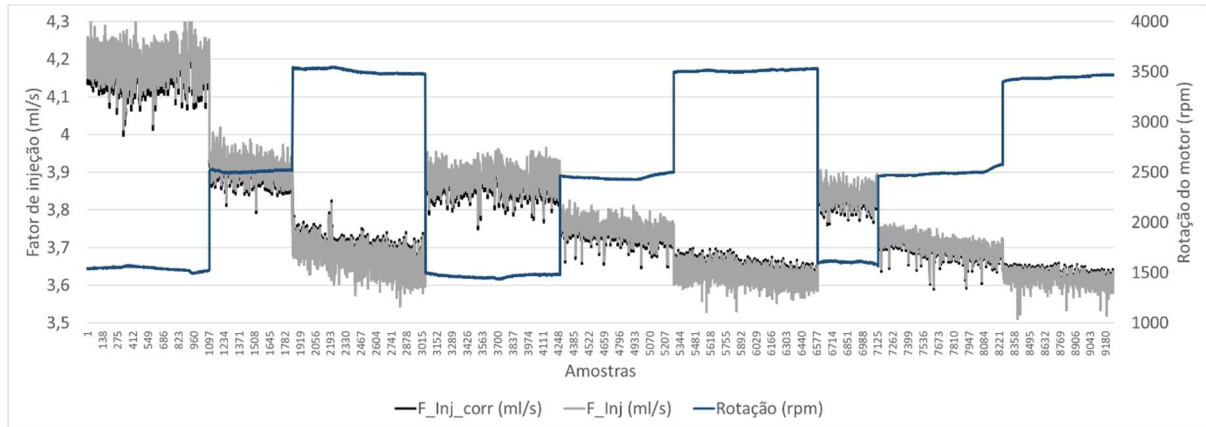
$$E = \pm \sqrt{(0,10)^2 + \left(\frac{z \times 100}{qm}\right)^2} \quad (46)$$

O valor calculado  $E$  é o erro em porcentagem (%), o fator  $z$  é o ponto zero do erro que para o instrumento utilizado é 0,01 (kg/h) e  $qm$  é o fluxo de massa medido (kg/h).

A variação de erro pode ser para mais ou para menos e como não é possível identificar para que lado ocorreu a variação, foi adotado o sinal que melhor ajustasse as curvas. Desta forma, para as medições com 1500 rpm e 2500 rpm foram corrigidas para menos e nos ensaios

a 3500 rpm, para mais. A Figura 32, dos ensaios com etanol, contém as curvas com e sem o fator de correção, sendo o valor com correção o F\_Inj\_corr.

A Figura 32 - Curvas com e sem o fator de correção do instrumento e escala de rotação - E100



Fonte: Autor

Logo a seguir, a análise visa identificar o comportamento dos parâmetros do motor que tenham correlação com a velocidade e pressão do ar de admissão. Assim foi investigado um modelo da vazão de ar admitido. O estudo de (STOTSKY; KOLMANOVSKY, 2002) apresenta um modelo para o cálculo de vazão pelo conceito *speed-density*, conforme a Equação 47:

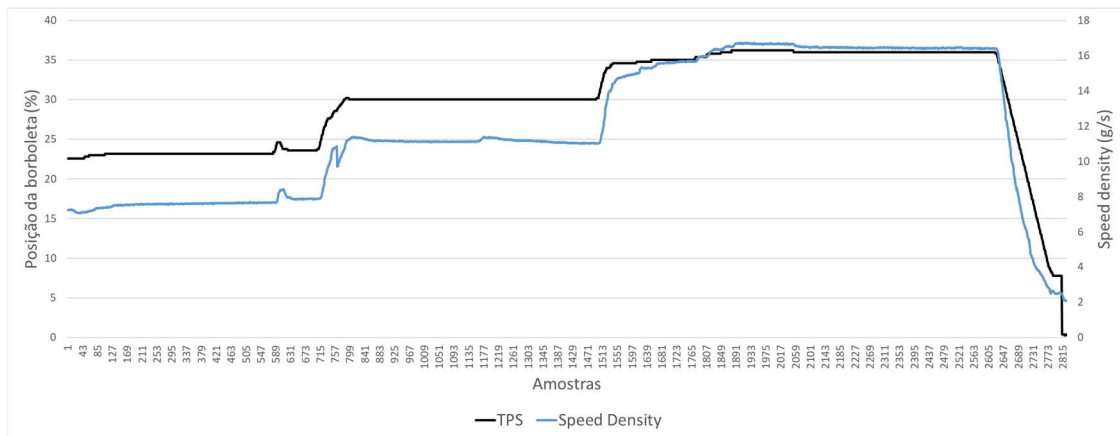
$$W_{cil} = \frac{\eta_v \times n_e \times V_d \times p}{2 \times R \times T} \quad (47)$$

Sendo  $W_{cil}$  a média do fluxo nos cilindros [g/s],  $\eta_v$  é a eficiência volumétrica,  $n_e$  é a rotação do motor [rps], a constante 2 é ajuste para motor quatro cilindros,  $V_d$  é o deslocamento volumétrico [m<sup>3</sup>],  $P$  é a pressão absoluta no coletor [Pa],  $R$  é Reynolds, constante do gás [0,287 Pa.m<sup>3</sup>/g.k] (TREVISAN, 1988) e  $T$  é a temperatura do ar de admissão [k].

O fator que deve ser observado com atenção é a eficiência volumétrica. Este parâmetro usualmente é levantado em dinamômetro de bancada que opera em regimes estáveis e com temperatura controlada. Tecnologias como o VVT podem também interferir neste cálculo, mas não faz parte dos dispositivos do veículo de teste deste estudo. O cálculo do fluxo por meio da borboleta (TPS) oferece melhor resolução em regime estável, porém fica limitado o desempenho na condição transiente, faixa em que as oscilações de fluxo no coletor de admissão é melhor identificado pelos sensores de pressão e temperatura para o cálculo de vazão do ar (STOTSKY; KOLMANOVSKY, 2002). O rendimento volumétrico foi baseado em dados experimentais levantados pelo departamento de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica. Os parâmetros fazem parte do item 3.3 dos resultados da dissertação (MAGGIO, 2019).

Para verificar a correlação da equação *speed density* (SD), com a base de dados levantados, foi feito um comparativo usando o ensaio com gasolina E36, carga de 10%. Comparando os valores calculados com o valor da posição da borboleta (TPS) foi identificado uma relação direta, conforme demonstrado na Figura 33. Apesar do TPS apresentar valores comparáveis com a taxa de vazão do injetor, este parâmetro não pode ser aplicado para a próxima fase do experimento em função de envolver teste em rotação. Durante a condução do veículo o motor opera com expressiva frequência em modo transiente, na qual o TPS não responde com a mesma proporcionalidade.

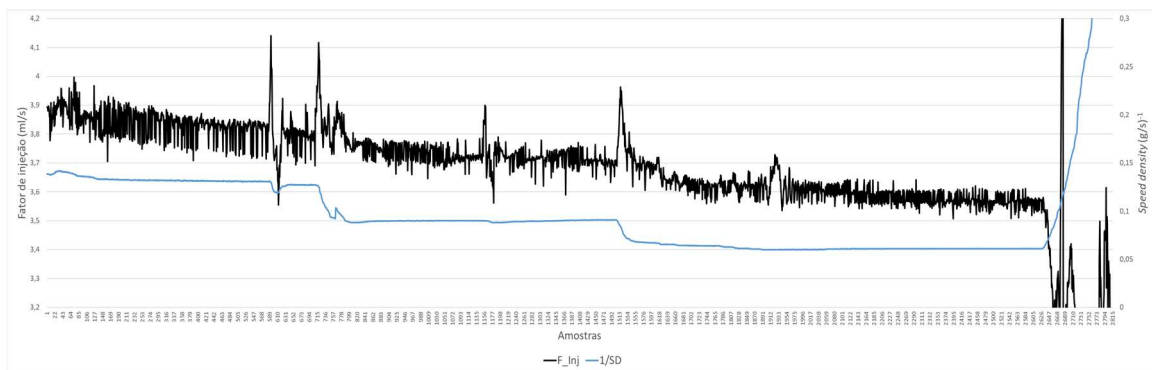
Figura 33 – Comparação entre *speed density* do injetor e TPS – E36, C-10%



Fonte: Autor

Comparando com os valores dos ensaios com gasolina entre fator do injetor de combustível com o valor inverso do *speed density* (1/SD), pode ser observada tendência semelhante ao TPS na Figura 34.

Figura 34 – Comparação entre fator de vazão do injetor e o inverso do *speed density*, E36, 10%

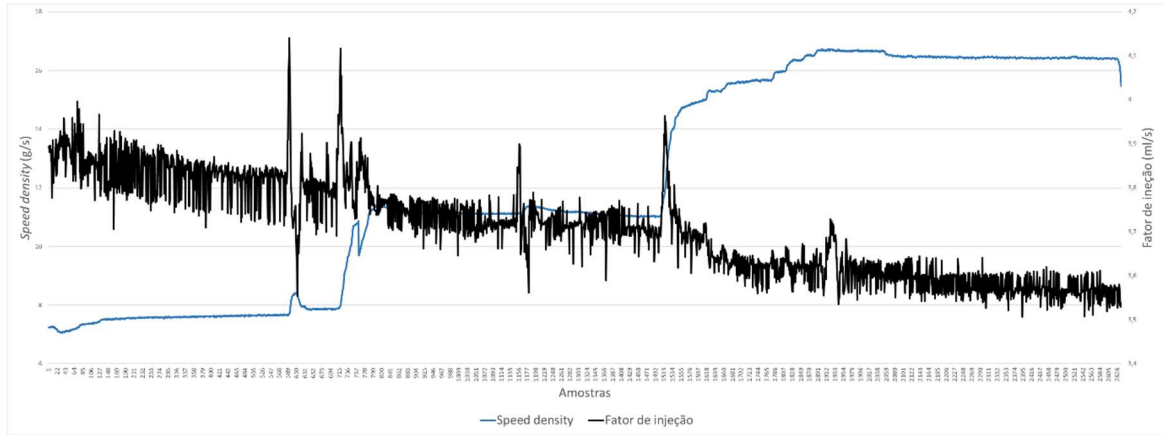


Fonte: autor



Para uma visualização da relação direta entre os valores apresentados na Figura 38, a Figura 35 apresenta o comparativo entre o fator do injetor e o *speed density*, para o regime com 10% de carga usando gasolina E36.

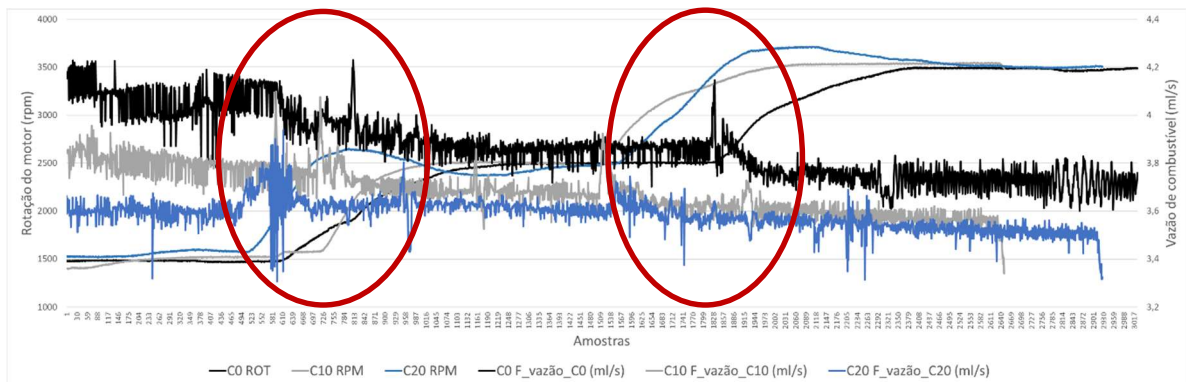
Figura 35 – Comparação entre fator de vazão do injetor e *speed density* – E36, C-10%



Fonte: autor

Com base nas avaliações utilizando os valores médios e a base completa com gasolina, a 10% de carga, o próximo passo foi fazer o cálculo para toda a base de dados. Utilizando os valores estabilizados nos nove ensaios, com os dois combustíveis, foram geradas as curvas utilizando os valores de SD como fator de correção do tempo de injeção. Nesta fase foram retirados os valores das fases transientes. O motivo em retirar os valores transientes é pelo fato que o sincronismo entre os instrumentos apresentam variações amplas pela diferença de taxa de atualização de cada meio de medição. Apesar dos parâmetros de ambos instrumentos, unidade de controle e do medidor da massa de combustível, serem armazenados a uma taxa de 10 Hz, pode ser observado nos trechos transientes da Figura 36 em destaque as variações da taxa de vazão dos injetores.

Figura 36 – Variações do fator de vazão do injetor em fase transiente – E36



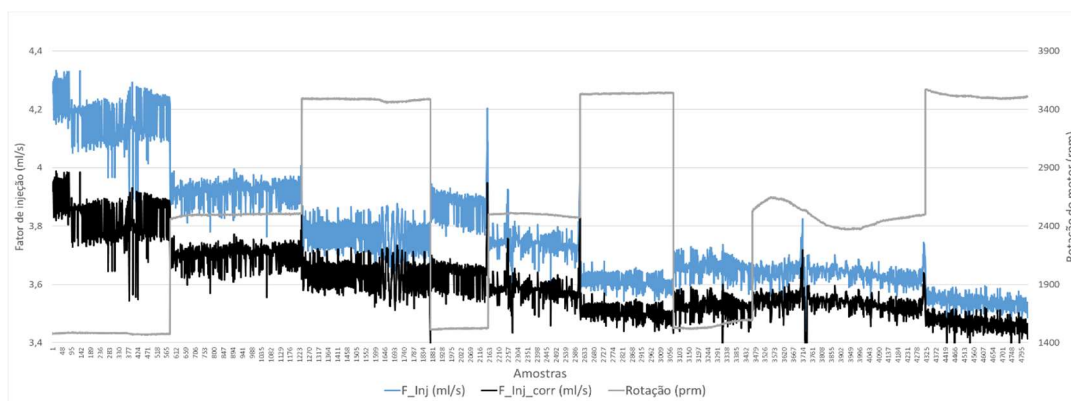
Fonte: autor



O motivo em utilizar um fator para a correção do fator de injeção de combustível é pelo fato dos valores levantados indicarem variação da vazão do injetor em diferentes cargas e rotações. Esse fenômeno levou à investigação dos motivos pela qual a vazão é afetada. Com base nesta observação foi utilizado um fator baseado no efeito SD que leva em consideração as variáveis: a temperatura do ar, pressão do coletor e velocidade do motor, os quais afetam a velocidade do ar no coletor de admissão. Assim, este parâmetro tem o objetivo de corrigir pequenas variações na vazão do injetor em função da oscilação de vazão do fluxo do ar no coletor de admissão. Isso indica que a pressão do combustível se mantém, mas a pressão na qual o combustível é injetado varia.

Com base nestas explicações sobre as diferenças de pressão entre combustível e coletor de admissão, a Figura 37 apresenta os valores originais e os valores corrigidos com base no fator do *speed density* para os ensaios com gasolina.

Figura 37 – Comparação entre taxa de vazão do injetor com e sem o fator de correção com base no valor do *speed density* – E36

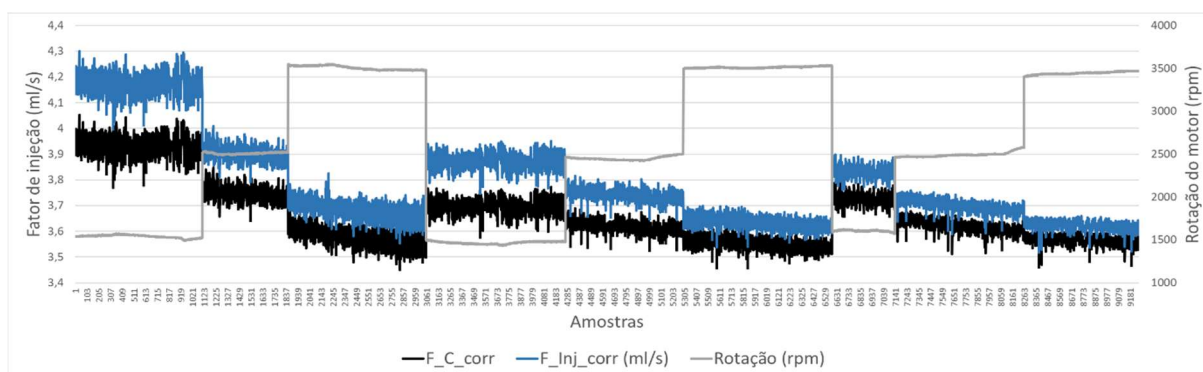


Fonte: autor

A vazão corrigida para a medição sem carga a 1500 rpm (o primeiro bloco da curva da Figura 41) apresenta o maior desvio. Uma das explicações é a baixa vazão (1,7 kg/h), o que representa o regime na condição mais crítica dentre as amostras.

O motivo de aplicar um fator de correção tem o intuito de representar da melhor forma a condição real de vazão do injetor e assim aprimorar a relação entre o valor lido do injetor e a vazão efetiva de combustível consumida. Desta forma é possível corrigir o tempo de injeção para o cálculo de consumo de combustível. A Figura 38 apresenta os mesmos parâmetros para os ensaios com etanol.

Figura 38 – Comparação entre taxa de vazão do injetor com e sem o fator de correção com base no valor do *speed density* – E100



Fonte: Autor

Mesmo aplicando os fatores de correção com base no SD, ainda são identificadas variações nos fatores de vazão nos diferentes regimes do motor. Um fator não totalmente esclarecido é a precisão do instrumento de medição de vazão de combustível. Mesmo aplicando as correções com base na equação do manual do instrumento, ainda existem dúvidas sobre oscilações decorrentes da instalação deste instrumento que podem incorrer em incertezas nas medições.

Após a construção das curvas foi feita a análise do fator de injeção médio comparando os resultados de etanol e gasolina. A média foi feita para cada um dos nove regimes de ensaio para cada combustível. O objetivo de utilizar somente a média de cada regime pelo fato que as amostras em cada regime varia de tamanho, o que teria um viés para as amostras maiores.

Tirando a média dos nove dos ensaios com etanol foi identificada o valor de 3,69 ml/s, porém o resultado com este combustível apresentou as maiores variações entre os regimes com menores vazões. Se forem retiradas as amostras a 1500 rpm e a primeira a 2500 rpm, a média resultante foi de 3,63 ml/s. Analisando em seguida o mesmo para o ensaio com gasolina, a média geral foi de 3,63 ml/s e retirando as duas primeiras amostras do ensaio sem carga (1500 rpm e 2500 rpm) o valor foi de 3,58 ml/s. Como os cálculos de consumo foram corrigidos pelo peso específico de cada combustível, o esperado é que o valor de vazão por segundo do injetor seja o mesmo para ambos os casos. Desta forma, o valor de 3,63 ml/s foi o fator de injeção de combustível identificado, porém a análise final demandou a validação destes dados obtidos.

O primeiro passo foi utilizar todas as amostras do fator do injetor, incluindo as fases transientes. Foram agrupados os dados do ciclo CTE para gasolina e etanol e ambas analisadas da mesma forma. A Tabela 3 apresenta os valores consolidados de média, desvio padrão e a faixa entre mais ou menos um desvio padrão.

Tabela 3 – Média, desvio padrão e amostras fora da faixa

Combustível	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	Acima	Abaixo	Total
E36	3,7689	0,1927	3,5762	3,9616	16,00%	14,90%	30,90%
E93	3,75373	0,15585	3,59788	3,90958	12,00%	10,40%	22,40%

Fonte: Autor

Observando a média com a fase transiente o valor teve uma elevação. Separando as amostras que ficaram fora da faixa de mais ou menos um desvio padrão, a parcela para etanol supera em um quinto e quase um terço para a gasolina. Com base nestes resultados, um novo método de medição do consumo por meio da largura do pulso do injetor foi investigado e aplicado neste estudo. Os resultados deste novo método serão apresentados a partir da seção 4.2. Entre os principais motivos observados para esta ampla variação temos: a falta do valor de offset e retardo no fechamento do injetor (PASSARINI; NAKAJIMA, 2003); o instrumento de medição da vazão do combustível trabalhou no limite da escala; e a amostragem em 10 Hz dificulta o sincronismo entre os instrumentos (ECU e medidor de vazão), por possuírem métodos diferentes de medições.

#### 4.2 – MEDIÇÃO DE CONSUMO PELO GRAVIMÉTRICO NO CICLO CTE

Com base nos resultados e análises realizados nos testes de consumo pelo ciclo CTE, o modelo matemático de consumo com base na vazão da massa do injetor (MAGGIO, 2019) foi inserido na programação da unidade de controle. Além destes modelos, o fator baseado no valor do SD também faz parte do cálculo e é apresentado como consumo dinâmico. O valor de consumo sem este fator também é armazenado no intuito de analisar o desempenho deste parâmetro de correção da vazão do injetor. Além do método baseado no pulso do injetor, outro também foi experimentado. O outro método compõem o consumo com base no fluxo de ar do coletor de admissão, por meio de um novo sensor que foi instalado no veículo de teste, identificado como MAF (*mass air flow*). O cálculo consiste no uso dos dados da massa do ar com a relação estequiométrica de forma a compor a massa de combustível demandada. Os três métodos são considerados nos ensaios realizados neste estudo de forma identificar os prós e contras de cada e propor melhor forma de monitorar o volume de combustível consumido pelo motor. O ensaio foi realizado no laboratório automotivo do IEE, com o uso do veículo de teste, com a unidade de controle programável (EPUSP – Engenharia Elétrica) e tanque de combustível externo com balança (ABNT, 2017), conforme Figura 39.

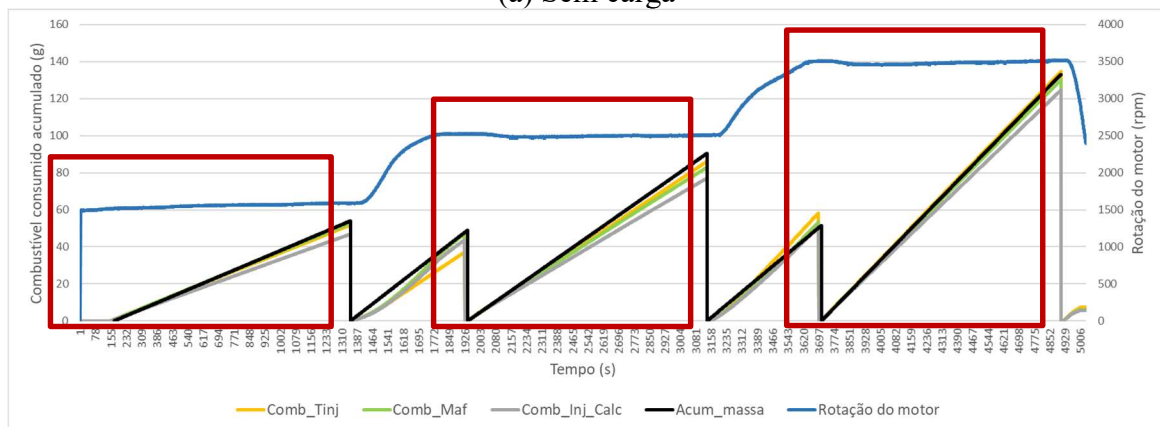
Figura 39 - Medição de consumo pelo método gravimétrico

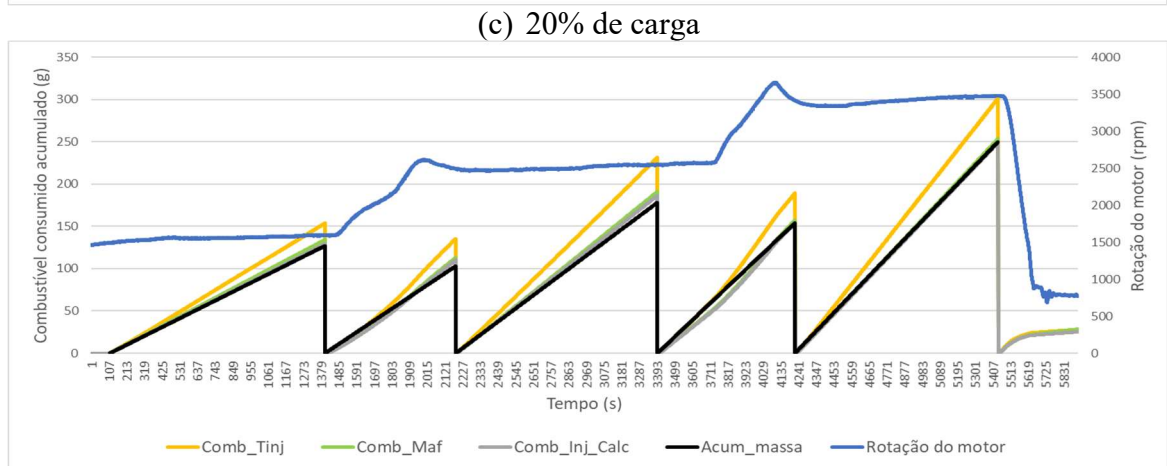
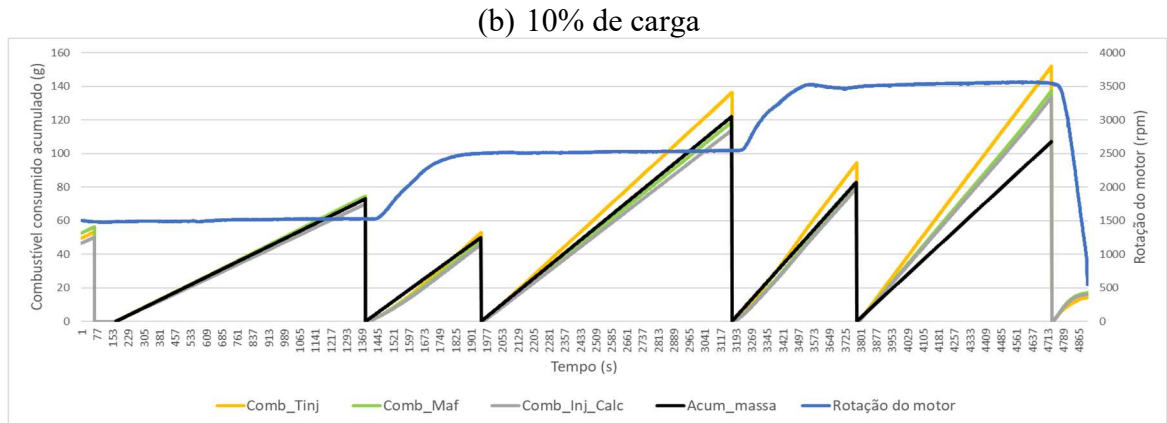


Fonte: Autor

O teste foi realizado com gasolina E30 sem carga no dinamômetro, nas três rotações. Logo em seguida o teste foi repetido com carga de 10% e 20%, conforme Figuras 44 *a*, *b* e *c*. A Figura 40 apresenta a rotação e o consumo acumulado em gramas, com base no ensaio CTE que possui três patamares estabilizados: primeiro, terceiro e quinto trechos, conforme destaque em vermelho. O segundo e quarto trechos são os intervalos de transição de rotação. O ensaio com 20% de carga (Figura *c*) foi feito com atraso no ponto em 3° em todas as rotações para evitar detonação. Este efeito corrobora com o estudo de Melo et al. (2012).

Figura 40 – Consumo de combustível acumulado pelo método gravimétrico - E30  
(a) Sem carga





Fonte: Autor

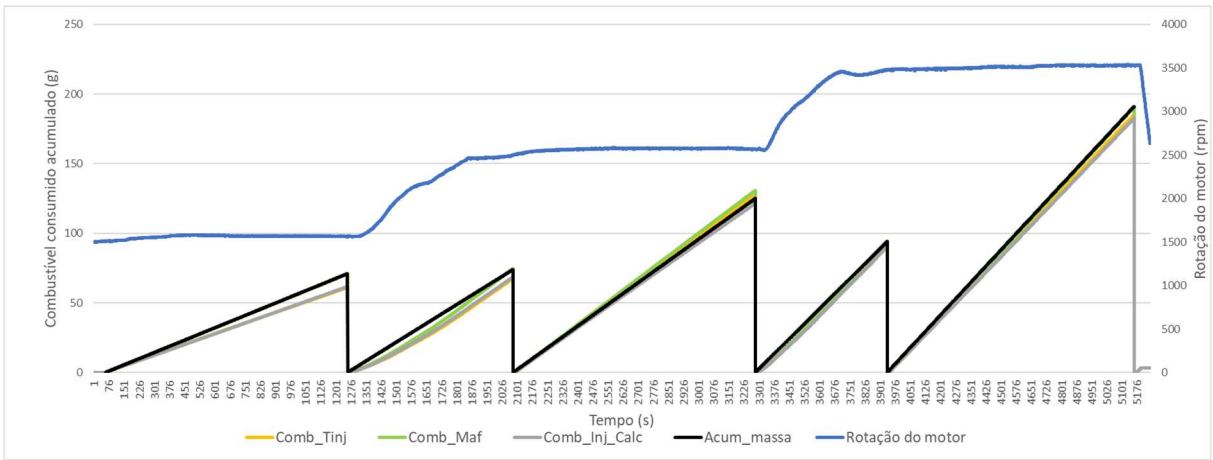
Nota: ao visualizar as três Figuras observar que a escala de consumo da Figura c é maior em função do maior consumo com 20% de carga.

O terceiro trecho estabilizado, da Figura 40 b apresentou valor com defasagem mais acentuada entre a massa de combustível comparado com todos os métodos em função de desalinhamento de sincronismo durante a medição. A interrupção ocorreu antes do tempo e a verificação da balança ficou defasada com o monitoramento da unidade de controle.

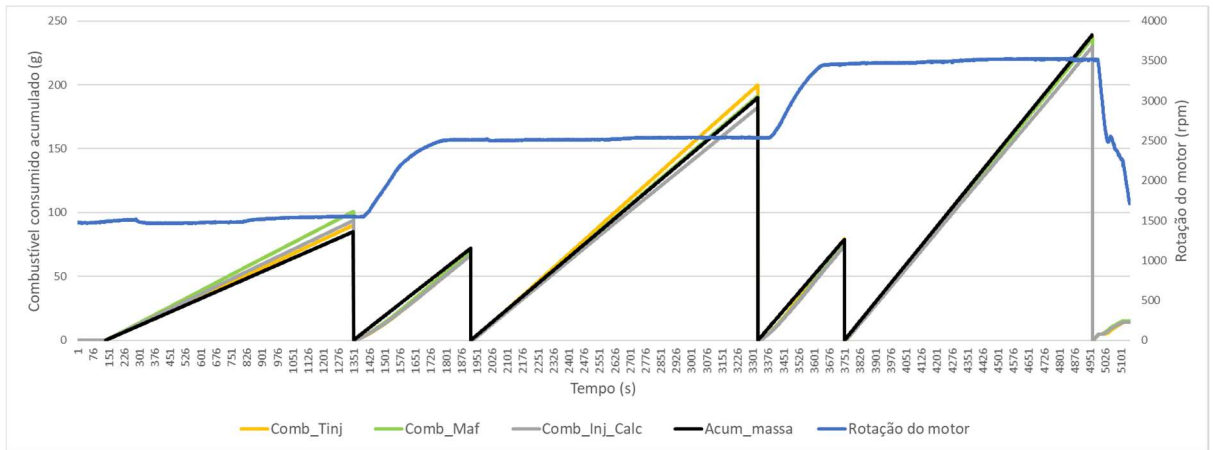
Após o teste com gasolina foi realizado o ensaio com etanol, seguindo o mesmo padrão. As Figuras 41 a, b e c apresentam o resultado do consumo de combustível acumulado, em gramas, conforme as três condições de carga. O teor de etanol variou entre 92% e 93%.

Figura 41 – Consumo de combustível acumulado pelo método gravimétrico – etanol E92

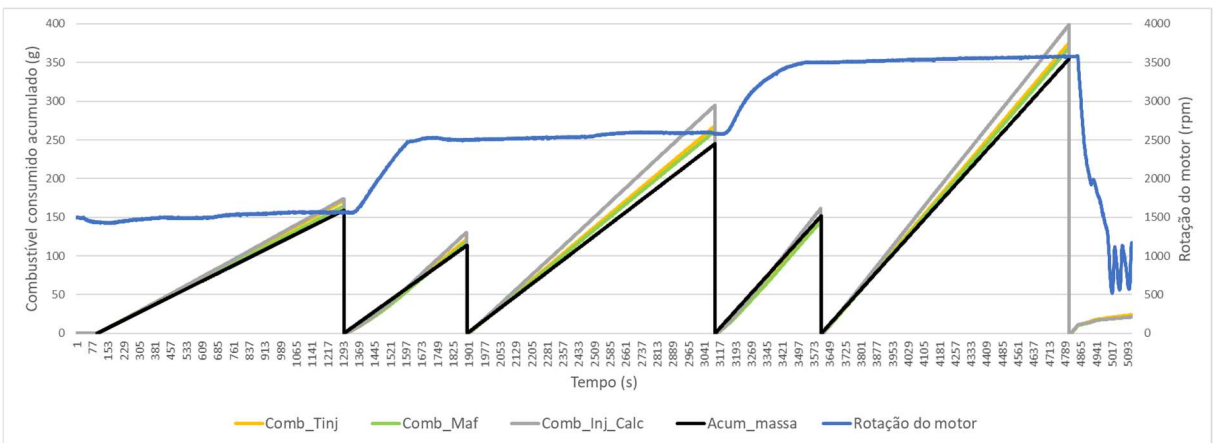
(a) Sem carga



(b) 10% de carga



(c) 20% de carga



Fonte: Autor

Nota: ao visualizar as três Figuras observar que a escala de consumo da Figura c é maior em função do maior consumo com 20% de carga.

Os valores dos gráficos das Figuras 40 e 41 apresentam sobreposições em alguns trechos. Para melhor identificação da precisão destes ensaios, os valores de pico (final) de cada trecho com a rotação estabilizada é apresentado nas Tabelas 4, a para gasolina e b para etanol. A porcentagem representa o desvio de consumo em relação ao método gravimétrico, valor da última coluna da tabela.

Tabela 4 – Valor de consumo de combustível acumulado em cada trecho e o total geral

(a) E30

RPM	Acumulado MAF		Acumulado injetor		Acumulado calculado		Massa comb(g)
	gramas	%	gramas	%	gramas	%	
1500	51,84	-3,99%	46,86	-13,21%	52,83	-2,16%	54,00
2500	86,17	-5,31%	77,11	-15,26%	82,92	-8,88%	91,00
3500	134,58	1,19%	124,52	-6,38%	129,95	-2,30%	133,00
<i>T0</i>	<i>272,59</i>	<i>-1,94%</i>	<i>248,49</i>	<i>-10,61%</i>	<i>265,70</i>	<i>-4,42%</i>	<i>278,00</i>
1500	73,62	0,85%	69,98	-4,13%	74,62	2,22%	73,00
2500	136,26	11,69%	113,91	-6,63%	118,72	-2,69%	122,00
3500	151,70	41,78%	133,60	24,86%	137,31	<b>28,33%</b>	107,00
<i>T10</i>	<i>361,59</i>	<i>19,73%</i>	<i>317,49</i>	<i>5,13%</i>	<i>330,64</i>	<i>9,48%</i>	<i>302,00</i>
1500	153,67	21,00%	129,20	1,73%	134,01	5,52%	127,00
2500	231,36	29,98%	186,39	4,71%	190,86	7,22%	178,00
3500	301,45	20,58%	249,09	-0,36%	253,51	1,40%	250,00
<i>T20</i>	<i>686,48</i>	<i>23,69%</i>	<i>564,69</i>	<i>1,75%</i>	<i>578,37</i>	<i>4,21%</i>	<i>555,00</i>
<b>Total</b>	<b>1320,66</b>	<b>16,36%</b>	<b>1130,67</b>	<b>-0,38%</b>	<b>1174,72</b>	<b>3,50%</b>	<b>1135,00</b>

(b)E92

RPM	Acumulado MAF		Acumulado injetor		Acumulado calculado		Massa comb. (g)
	gramas	%	gramas	%	gramas	%	
1500	61,12	-13,92%	61,73	-13,06%	70,95	-0,07%	71,00
2500	127,96	2,37%	121,53	-2,77%	130,80	4,64%	125,00
3500	185,17	-3,05%	182,71	-4,34%	190,63	-0,19%	191,00
<i>T0</i>	<i>374,25</i>	<i>-3,29%</i>	<i>365,98</i>	<i>-5,43%</i>	<i>392,39</i>	<i>1,39%</i>	<i>387,00</i>
1500	90,09	5,99%	93,73	10,27%	100,84	<b>18,64%</b>	85,00
2500	199,85	5,18%	182,48	-3,96%	191,47	0,77%	190,00
3500	237,73	-0,53%	229,78	-3,86%	236,57	-1,02%	239,00
<i>T10</i>	<i>527,67</i>	<i>2,66%</i>	<i>505,99</i>	<i>-1,56%</i>	<i>528,89</i>	<i>2,90%</i>	<i>514,00</i>
1500	171,43	7,82%	174,16	9,53%	164,70	3,59%	159,00
2500	268,25	9,49%	294,87	20,36%	261,80	6,86%	245,00
3500	375,44	5,76%	399,09	12,42%	368,98	3,94%	355,00
<i>T20</i>	<i>815,12</i>	<i>7,39%</i>	<i>868,12</i>	<i>14,38%</i>	<i>795,48</i>	<i>4,81%</i>	<i>759,00</i>
<b>Total</b>	<b>1717,04</b>	<b>3,44%</b>	<b>1740,08</b>	<b>4,82%</b>	<b>1716,75</b>	<b>3,42%</b>	<b>1660,00</b>

Fonte: Autor

As Tabelas 4 apresentaram somente a fase estabilizada. Visando englobar toda a amostragem do ensaio, as Tabelas 5 apresentam as fases transientes, incluindo as fases transiente 1 (TR1) e 2 (TR2), bem como a somatória de cada método para todo o ensaio. O valor em porcentagem representa o desvio de consumo de cada método em relação à massa de combustível da medição gravimétrica, última coluna da tabela. O total geral (TG) representa a massa total das fases transiente e respectivos desvios.

Tabela 5 – Valor de consumo de combustível acumulado na faixa transiente e o total geral

(a) E30

Faixa	Acumulado MAF		Acumulado injetor		Acumulado calculado		Massa comb.(g)
	gramas	Desv. %	gramas	Desv. %	gramas	Desv. %	
TR1-C0	37,09	-22,31%	43,71	-8,45%	47,00	-1,57%	47,75
TR2-C0	58,24	15,81%	51,04	1,50%	53,42	6,23%	50,29
TR1-C10	52,76	5,51%	45,86	-8,28%	47,99	-4,02%	50,00
TR2-C10	94,18	13,47%	79,44	-4,29%	81,68	-1,59%	83,00
TR1-C20	135,25	31,31%	110,11	6,91%	112,94	9,65%	103,00
TR2-C20	189,08	22,78%	154,15	0,10%	157,17	2,06%	154,00
<b>Total</b>	<b>566,60</b>	<b>16,10%</b>	<b>484,32</b>	<b>-0,76%</b>	<b>500,19</b>	<b>2,49%</b>	<b>488,03</b>
TG	1887,26	<b>16,28%</b>	1614,98	<b>-0,50%</b>	1674,91	<b>3,20%</b>	1623,03

(b) E92

Faixa	Acumulado MAF		Acumulado injetor		Acumulado calculado		Massa comb.(g)
	gramas	Desv. %	gramas	Desv. %	gramas	Desv. %	
TR1-C0	67,69	-8,53%	68,71	-7,15%	74,59	0,79%	74,00
TR2-C0	92,89	-1,18%	90,28	-3,96%	94,51	0,54%	94,00
TR1-C10	69,79	-3,07%	66,55	-7,56%	69,96	-2,83%	72,00
TR2-C10	79,15	0,19%	73,81	-6,57%	76,11	-3,66%	79,00
TR1-C20	130,28	15,05%	118,14	4,33%	121,32	7,14%	113,24
TR2-C20	161,34	6,76%	144,71	-4,24%	147,40	-2,46%	151,11
<b>Total</b>	<b>601,14</b>	<b>3,05%</b>	<b>562,20</b>	<b>-3,62%</b>	<b>583,88</b>	<b>0,09%</b>	<b>583,35</b>
TG	2318,18	<b>3,34%</b>	2302,29	<b>2,63%</b>	2300,63	<b>2,55%</b>	2243,35

Fonte: autor

Analisando os desvios apresentados, o método que considera somente o tempo de injeção apresentou o menor desvio global, seguido do método com ajuste dinâmica da vazão (CD). Porém, ao verificar os desvios, o método com o parâmetro do injetor resulta em menor desvio acumulado, mas apresenta maiores variações em relação ao valor da massa. O método com correção dinâmica (CD) tem valor superior para gasolina e inferior para o etanol. Retirando o valor com maior desvio na medição com gasolina, o total geral para o método pelo injetor



apresenta desvio de -2,29%, enquanto o método do CD somente 1,42%. No ensaio com etanol E92 o método de CD apresentou o melhor resultado e mesmo retirando o outlier dos demais métodos este permanece com o menor desvio global.

Para verificar as variações ocorridas nos trechos estabilizados e transiente de cada um dos métodos, com os dois combustíveis, foi calculado o desvio padrão para identificar qual método teve menor desvio, conforme Tabela 6.

Tabela 6 – Desvio padrão das porcentagens de cada método – E30 e E92

Regime	Acumulado MAF		Acumulado injetor		Acumulado calculado	
	E30	E92	E30	E92	E30	E92
Estabilizado	16,40%	7,21%	11,88%	10,75%	10,59%	6,05%
Transiente	18,55%	8,27%	6,04%	4,44%	5,25%	3,98%

Fonte: Autor

Verificando o desvio padrão, todos os métodos apresentaram valores elevados, acima do valor médio. O menor desvio padrão foi identificado no consumo com base no valor dinâmico (CD) do injetor.

Com base nestes resultados ainda não é possível concluir claramente o melhor método, o que demanda nova análise após o ensaio com o ciclo FTP-75 e HWFET, pois nesta condição de ensaio predomina o modo transiente, regime mais relevante na composição do consumo veicular. Com base nestes resultados será feita nova análise sobre o motivo dos desvios no método CD para verificar quais correções podem melhorar a resposta deste método.

O objetivo deste ensaio com o ciclo CTE e medição de consumo pelo método gravimétrico teve como intuito verificar o desempenho do consumo medido pela unidade de controle. O intuito em medir o desvio do consumo calculado pela unidade de controle do motor com o valor medido da massa do combustível é para verificar o quanto os métodos *onboard* estão divergentes do valor real. O valor esperado neste estudo está baseado nos valores de desvio apresentados pela regulamentação europeia que permite variações de 3% no ciclo de dinamômetro e 5% em relação ao instrumento de aferição de consumo (KÖCK, 2019).

Este método teve como limitação a instalação do conjunto balança e tanque dentro do veículo. Este conjunto pode ficar dentro do veículo para medição com variações de rotação, mas sem movimentar as rodas. Com a utilização do dinamômetro ocorrem vibrações na balança, o que dificulta a visualização e conseqüentemente a precisão do ensaio, com maior instabilidade em rotações mais baixas.

### 4.3 – MEDIÇÃO DE CONSUMO PELO MÉTODO GRAVIMÉTRICO E VAZÃO DE COMBUSTÍVEL NO CICLO FTP-75

Após as verificações realizadas nos ensaios com o ciclo estabilizado CTE, iniciou-se uma série de medições utilizando o ciclo FTP-75, conforme norme NBR-6601, porém com o motor aquecido em função de limitação no funcionamento a frio do veículo de teste. Outra limitação foi o fator de resistência ao rolamento do dinamômetro utilizado seguir padrão diferente ao aplicado em laboratório de emissões, portanto não foram aplicados fatores de correção no dinamômetro.

#### 4.3.1 – Medição de emissões e consumo *onboard* e *offboard*

Os ensaios nesta fase deste estudo utilizaram tanque externo com balança para medição da massa de combustível consumida e também foi instalado o medidor de vazão de combustível na linha de alimentação, como medição *offboard*, conforme Figura 42.

Figura 42 – Medição de consumo de combustível e emissões no ciclo FTP-75 aquecido



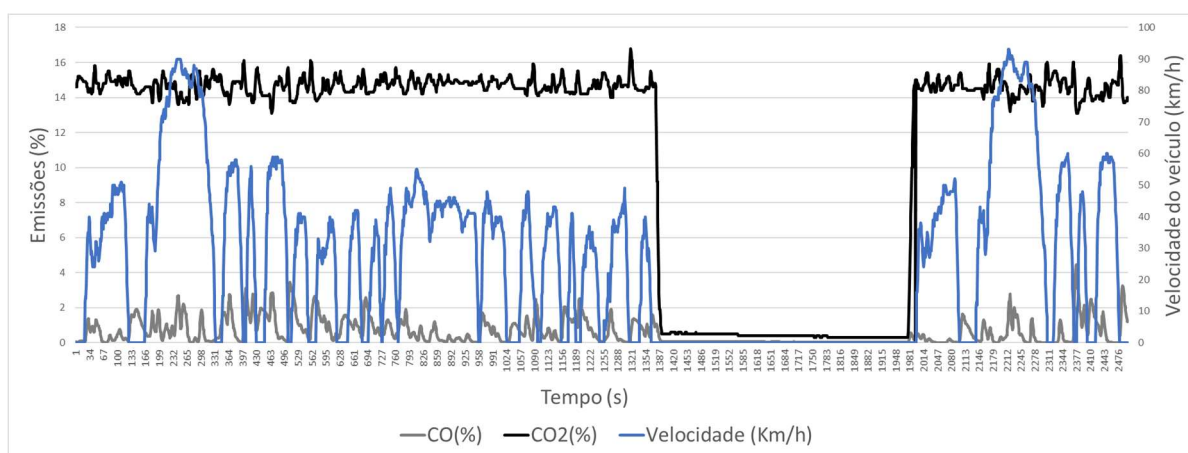
Fonte: Autor

O intuito de utilizar o medidor de vazão de combustível e a balança simultaneamente foi verificar a precisão e desvios de cada instrumento de medição. Durante os primeiros ensaios pelo ciclo CTE, somente o medidor de vazão foi utilizado e algumas variações no volume em cada regime foram identificadas, em função do instrumento operar no limite da escala. Como a vazão de combustível dos ensaios situa-se na faixa mínima do instrumento, os desvios são mais significativos. Mesmo com as correções recomendadas pelo fabricante do dispositivo, os valores apresentaram variações que divergiram dos demais métodos de medições. Desta forma a medição da massa do combustível permite nesta fase avaliar o consumo de combustível por dois instrumentos. Mesmo utilizando dois dispositivos para medir o combustível consumido, cada um destes apresentou algumas variações que serão discutidas ao longo da apresentação dos resultados obtidos.

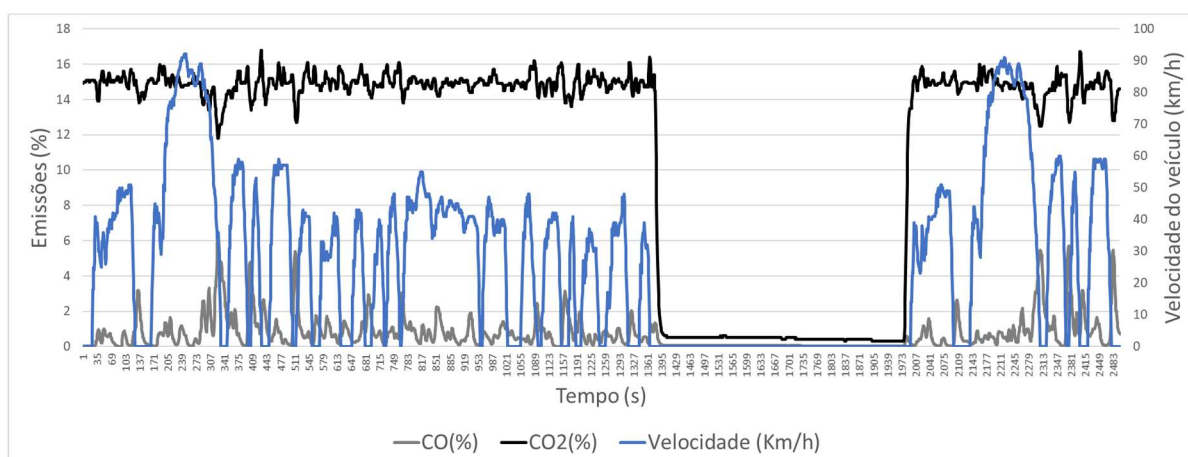
O ensaio foi feito no dinamômetro do IEE e a medição com gasolina foi gravada a cada segundo. A temperatura ambiente durante o ensaio ficou na faixa de 23°C e a pressão atmosférica em 965 mbar. Estes valores foram registrados, mas não aplicados em função do método de medição do analisador de gases de escapamento que mede somente a concentração dos gases, em porcentagem. A massa dos gases não é medida pelo analisador, somente uma amostra é coletada para a medição da concentração dos gases presente nas emissões do escapamento. Os valores de CO e CO<sub>2</sub> em porcentagem são registrados a cada segundo pelo equipamento durante o ciclo FTP-75, conforme Figura 43 a e b, para gasolina e etanol, respectivamente.

Figura 43 – Emissões de CO e CO<sub>2</sub> em porcentagem – combustíveis E29 e E95

(a) E29



(b) E95



Fonte: Autor

Algumas observações podem ser feitas em cada uma das medições. No ensaio com gasolina, pode ser verificado que em todas as acelerações o valor de CO aumentou, o que indica o enriquecimento (ÍLHAK et al., 2020) que ocorre neste regime. Outro ponto foi o aumento de CO com o veículo em marcha lenta, o que pode indicar uma redução na temperatura do catalisador (IODICE et al., 2016). O valor de CO<sub>2</sub> permaneceu na faixa esperada e o balanço de carbono se apresenta na forma de elavação do CO e redução do CO<sub>2</sub> e vice-versa. O valor médio de CO<sub>2</sub> com o motor ligado foi de 14,65% com desvio padrão de 0,52% e a média do CO foi de 0,77% com desvio padrão de 0,74%.

No ensaio com etanol o comportamento da resposta de CO e CO<sub>2</sub> foi semelhante ao identificado com gasolina, com destaque para a redução no CO, e aumento de CO<sub>2</sub>, mais acentuado em desacelerações. Este comportamento pode ser interpretado como queda na temperatura do catalisador (GASSER; RYBICKI; WOLLNER, 2014) em função do corte (*cut-off*) do combustível neste regime, além da redução da temperatura média do catalisador com etanol (ALMEIDA; NAKAMURA; SODRÉ, 2014). A média e desvio padrão do CO<sub>2</sub> com etanol foi, respectivamente, 14,85% e 0,60% e para o CO foi de 0,92% e 1,0%. O desvio padrão em ambos gases foi mais elevado com etanol, o que pode indicar a queda de temperatura na câmara e catalisador em alguns regimes (ZHUANG; HONG, 2013) em função do maior calor latente de vaporização e também com a queda de rotação ocorre redução na eficiência térmica devido à perda térmica na parede do cilindro (DENG et al., 2018). A concentração de HC e NOx foram medidas e registradas, mas não foram apresentadas nesta fase deste estudo. O valor

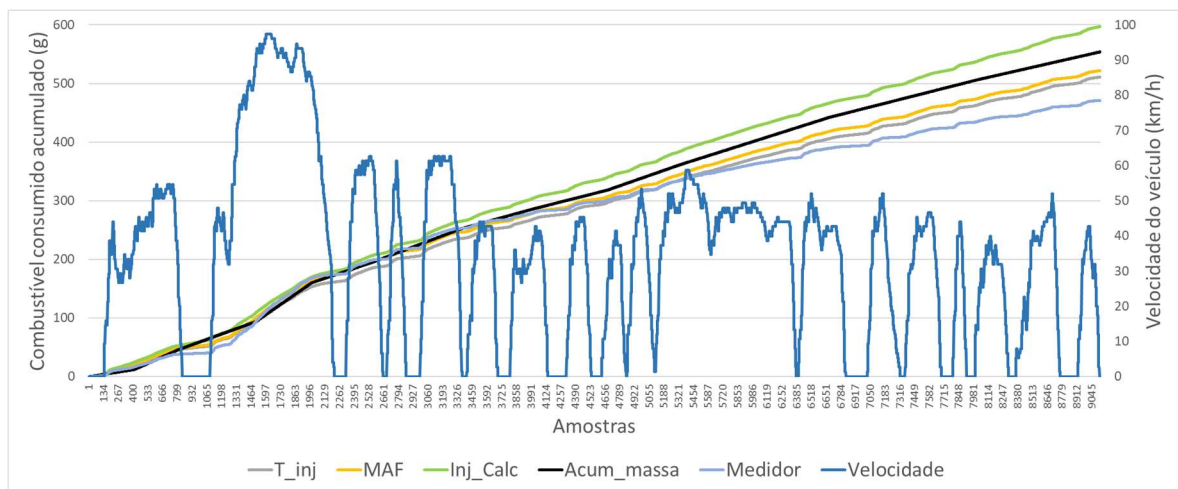
de HC faz parte dos gases com teor de carbono, mas como a medição foi somente de concentração, escala em ppm, este não foi abordado neste momento.

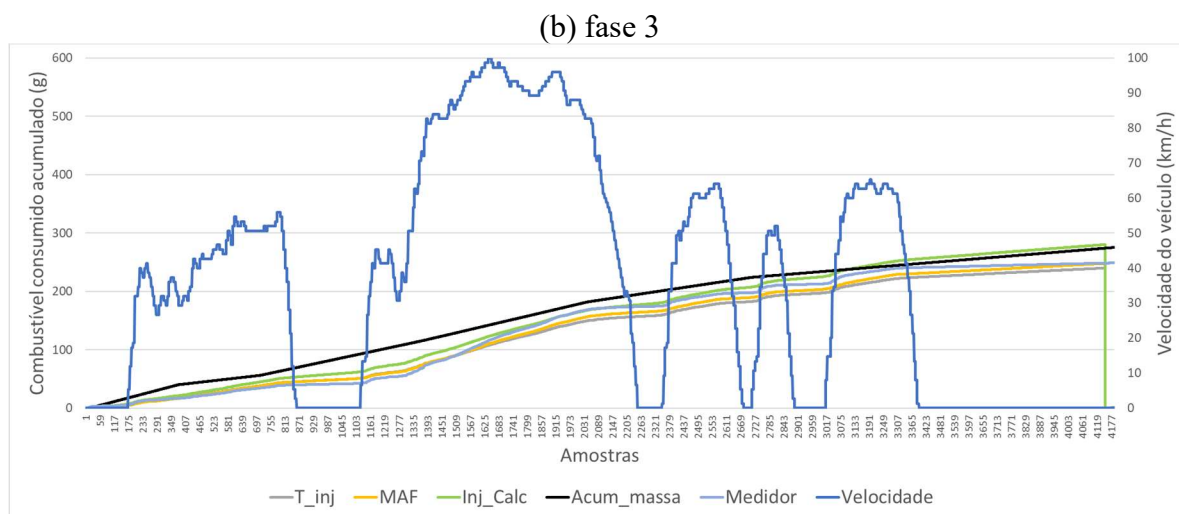
O consumo de combustível foi realizado concomitante às medições das emissões. A aquisição dos dados da unidade de controle e medidor de vazão de combustível foi feita a uma frequência de 10 Hz. Isso permite construir curvas para verificar o comportamento de consumo de cada método. Os valores de massa de combustível foram calculados conforme a variação apresentada pela balança, mas sem ligação eletrônica para medição. Os valores foram registrados visualmente em alguns momentos durante a medição, portanto, nos resultados gráficos que serão apresentados são segmentos de retas e não curvas construídas. A medição feita a cada intervalo teve como intuito verificar se em alguma fase da medição alguma limitação de cada método ficaria em evidência.

Os dados coletados durante as medições foram registrados em dois arquivos: um com as fases 1 e 2 e outro com a fase 3. Como citado anteriormente, a fase 1 foi feita com o motor a quente, equivalendo ao ensaio da fase 3. O objetivo foi rodar o ciclo completo do FTP-75 para a realização de análises do consumo, independente da limitação de funcionamento a frio do veículo de teste. As Figuras 44 *a* e *b* apresentam os resultados dos ensaios com gasolina E29 com valores em gramas.

Figura 44 – Medição de consumo de combustível com E29 no ciclo FTP-75 aquecido

(a) fases 1 e 2





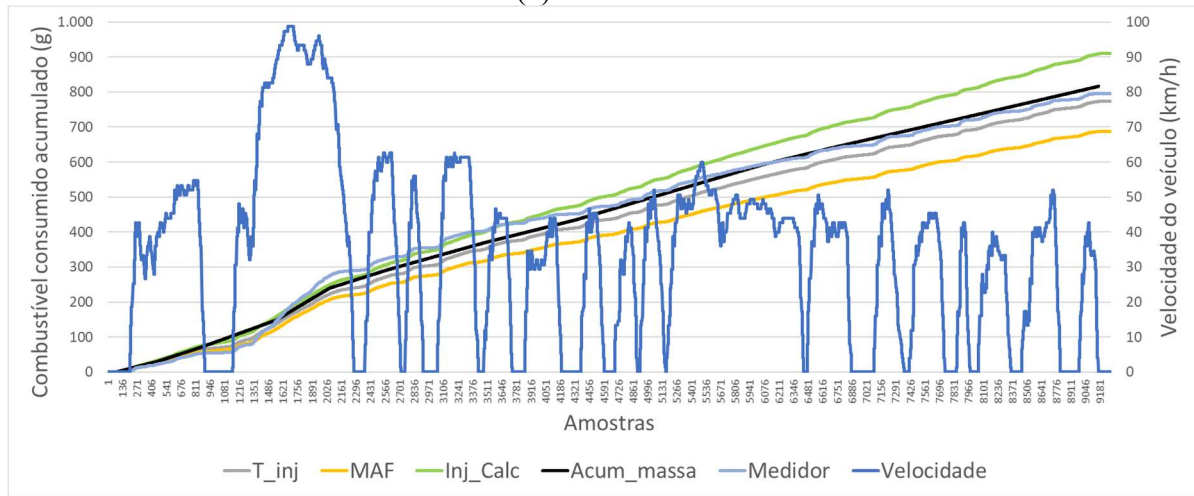
Fonte: Autor

A massa de combustível foi integrada à base de dados por meio de distribuição do valor medido no intervalo proporcional ao tempo, resultando em segmentos de retas. Nas medições durante as fases 1 e 2 os valores apresentaram maior estabilidade entre os métodos de medição do consumo, porém a massa de combustível apresentou resultado superior ao medido pelo instrumento de vazão. Na medição da fase 3 a massa apresentou maior desvio no início da coleta, o que pode indicar o enchimento da tubulação após a partida a quente. O valor ficou aproximadamente 25 gramas acima do esperado, mesmo utilizando o valor registrado ao desligar o motor. Se fosse aplicado o valor lido ao ligar o motor o desvio seria ainda maior. De forma a respeitar os dados coletados durante o ensaio, foi utilizado o valor registrado ao desligar o veículo e nenhuma correção foi aplicada. Desta forma é possível analisar o método de ensaio e pontos a serem melhorados. Na Figura 48 *a* pode ser observado que o volume medido pelo instrumento ficou abaixo da massa de combustível registrada, bem como abaixo de todos os métodos de registro a bordo. No ensaio com gasolina o volume de combustível é menor que o etanol, portanto o instrumento opera na extremidade inferior da faixa de medição. Esta condição pode afetar a precisão do valor medido durante este ensaio.

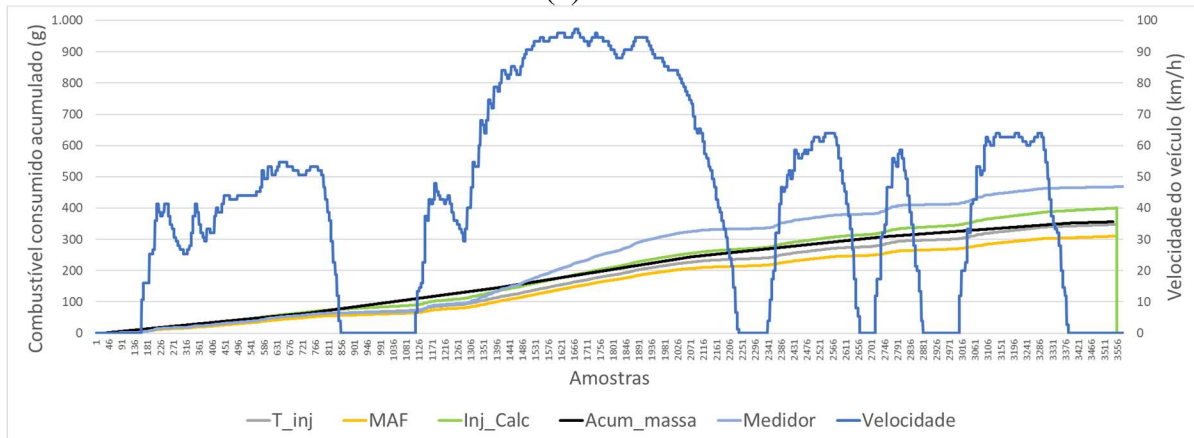
A medição com etanol E95 seguiu o mesmo padrão de ensaio, incluindo a divisão dos resultados em dois arquivos, conforme apresentado anteriormente. As Figuras 45 *a* e *b* apresentam os valores de consumo com etanol durante o ensaio FTP-75 com motor aquecido.



Figura 45 – Medição de consumo de combustível com E95 no ciclo FTP-75 aquecido  
(a) fases 1 e 2



(b) fase 3



Fonte: Autor

O resultado das fases 1 e 2 apresentou valores próximos entre os dois métodos de medição de massa de combustível, porém na fase 3 a medição de vazão apresentou desvio significativo em relação aos demais valores. Esse tipo de variação gera dúvidas sobre a precisão do instrumento, principalmente por apresentar comportamentos diferentes entre as fases 1 e 3, ambas com o motor aquecido (total ou parcial) e seguem o mesmo ciclo.

Após as medições com os dois combustíveis, divididos nos dois blocos de aquisição de dados, foram identificados comportamentos e situações nas medições que demandam atenção. O uso da balança tem como limitação a medição visual dos parâmetros e o não sincronismo dos dados. Este método também não pode ser usado em rodagem, pois demandaria mudanças significativas no procedimento. O medidor de fluxo de combustível tem a vantagem de sincronizar os dados com os demais parâmetros, mas o uso no limite da faixa de medição gera dúvidas sobre a precisão que resulta nas medições.

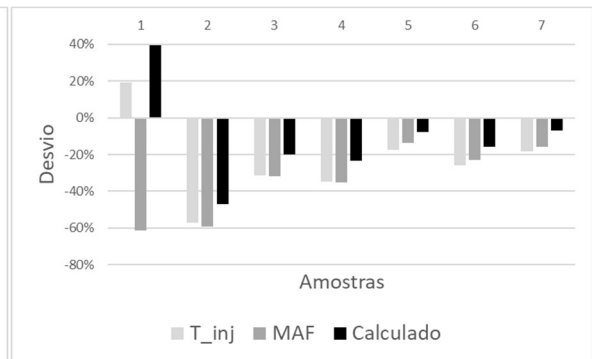
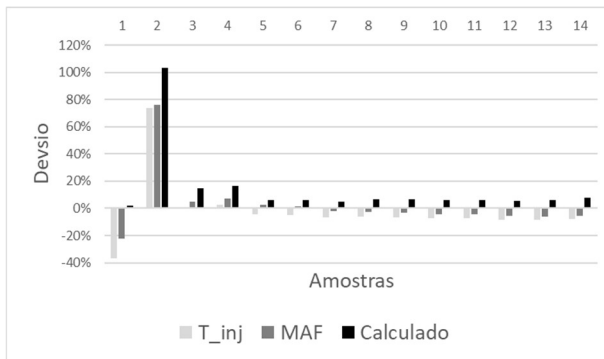
Para verificar a exatidão dos métodos de registro de consumo a bordo nos próximos ciclos de medições, seja o FTP-75 ou RDE, seria recomendado um dispositivo para a medição do consumo que possa ser usado em rodagem e que tenha sincronismo com os dados da unidade de controle. Além deste dispositivo, a disponibilidade dos dados de balanço de carbono com uma frequência de 1 Hz também permitiria a verificação do desempenho de consumo.

As Figuras 44 e 45 apresentadas com o consumo permite uma observação visual dos valores de consumo de cada método, mas falta uma análise com os desvios dos resultados identificados. Mesmo com alguns desvios na medição da massa de combustível com a balança, gravimétrico, os valores deste método foi escolhido como referência por apresentar maior estabilidade durante as medições. Como os valores registrados da balança foram feitos em alguns intervalos, estes pontos de medições serão utilizados para a comparação dos desvios dos ensaios apresentados anteriormente nesta seção. As Figuras 46 *a* e *b* trazem os desvios (%) de consumo de cada um dos três métodos em relação ao gravimétrico com gasolina. As figuras *c* e *d* se tratam dos valores com etanol. Os números apresentados em cada um deles refere-se aos pontos de medições registrados durante o ensaio de consumo.

Figura 46 – Desvios do consumo de combustível em relação ao método gravimétrico

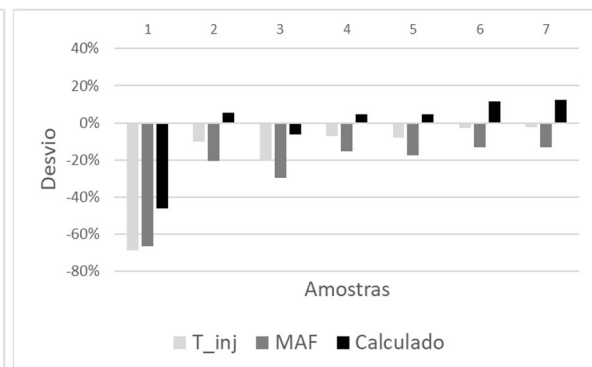
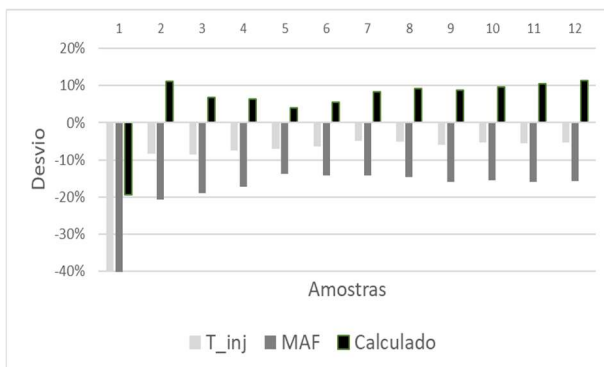
(a) Fases 1 e 2 – E29

(b) Fase 3 – E29



(c) Fases 1 e 2 – E95

(d) Fase 3 – E95



Fonte: Autor



Observando os desvios de cada bloco de ensaio, em ambos os combustíveis, os maiores desvios ocorrem no início das medições, o que remete a uma reavaliação nos procedimentos efetuados nos testes de consumo. A primeira questão é sobre a pressurização da linha de combustível no início de cada ciclo de teste. O primeiro ensaio foi com gasolina e houve uma preocupação de preencher a linha de combustível e estabilizar o medidor de vazão. Verificando os quatro conjuntos de medições, o primeiro ensaio apresentou os menores desvios, apesar de elevada variação no início do ensaio. Outra observação a respeito dos desvios foi a ampla variação do método gravimétrico na fase 3 com gasolina, o que reforça as oscilações em função do preenchimento da linha de combustível. Com etanol o comportamento ocorreu de forma mais evidente nas fases 1 e 2 e mais estável na fase 3, resultando em variações opostas ao ensaio com gasolina. Existe a necessidade de mais análises trecho a trecho para identificar o comportamento isolado de cada um, uma vez que a medição é cumulativa. Como o maior desvio ocorre no início, mesmo com maior precisão nas etapas posteriores, o valor final terá influência da medição inicial.

Os desvios apresentados são baseados em cada intervalo e o valor é cumulativo. Para verificar o desvio total de um ciclo FTP-75 aquecido, as Tabelas 7 a e b apresentam os desvios do consumo total de cada bloco de ensaio, com cada combustível, bem como a média e desvio padrão. Como a fase inicial apresenta as maiores variações, foram retirados as duas primeiras medições e calculada a média e o desvio padrão, nas Tabelas 7 c e d.

Tabela 7 – Variações no consumo para o ensaio completo e sem duas amostras

(a) E29

	T_inj	MAF	Calculado
FTP-75 E29	-11,28%	-9,17%	2,88%
Média	-9,21%	-9,82%	5,58%
DesvPad	25,14%	27,40%	28,30%

(b) E95

	T_inj	MAF	Calculado
FTP-75 E95	-4,44%	-14,96%	11,63%
Média	-12,58%	-21,02%	3,07%
DesvPad	17,06%	13,48%	14,01%

(c) E29

	T_inj	MAF	Calculado
Média	-11,35%	-8,17%	1,15%
DesvPad	10,71%	12,18%	11,66%

(d) E95

	T_inj	MAF	Calculado
Média	-6,85%	-16,33%	7,13%
DesvPad	4,13%	4,03%	4,61%

Fonte: Autor

Analisando os valores pode ser observada as diferenças nos desvios de um combustível para o outro, considerando cada um dos métodos. Isso resulta em função de vazão do injetor estar relacionada com a densidade do combustível (HU; YANG; ZHOU, 2018). Analisando os

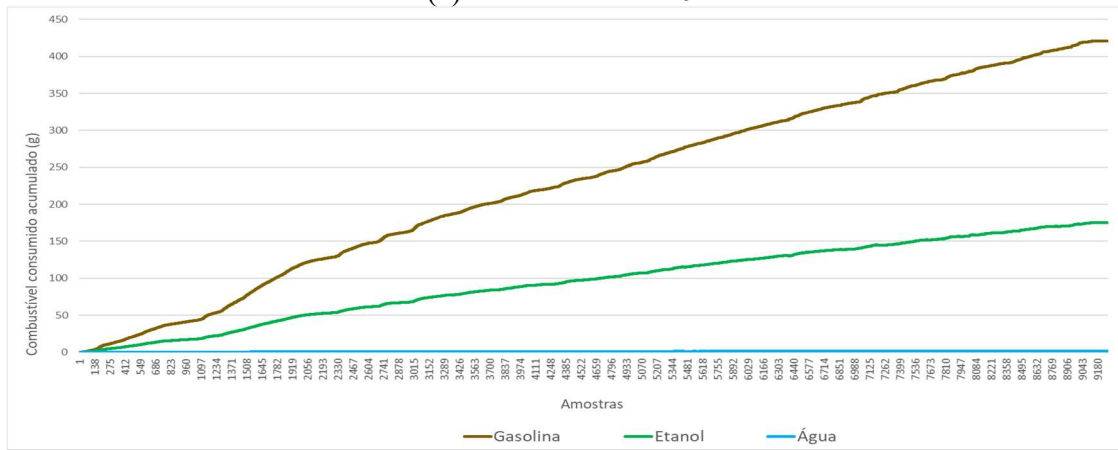
valores identificados, o método de consumo dinâmico (CD) apresenta a menor variação com gasolina, não se mantendo com o etanol. O Método de consumo estático (CE) apresenta comportamento oposto. Isso demanda que o fator de ajuste do consumo dinâmico seja revisto, uma vez que o consumo dinâmico usa como base o estático, portanto existe indicativos do valor real estar entre os dois.

4.3.1.1 – Consumo dinâmico e distribuição da fração de cada elemento dos combustíveis

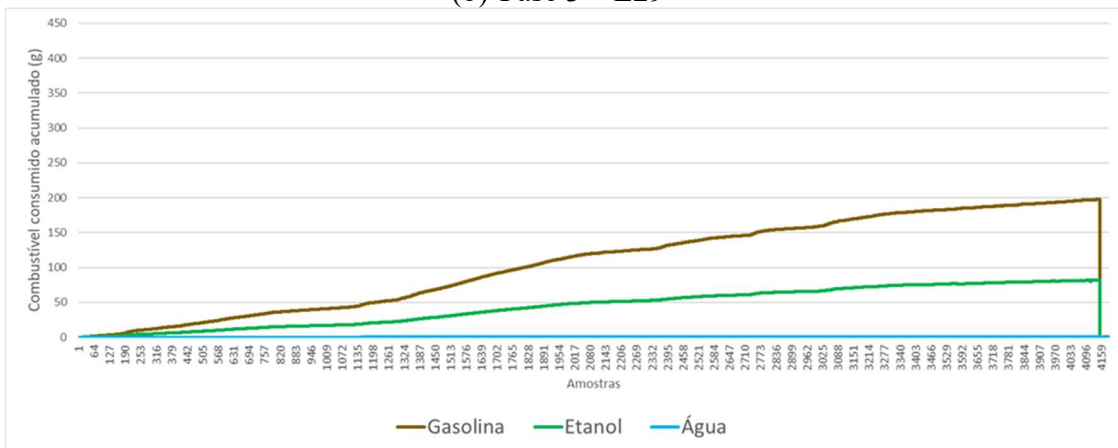
As medições realizadas nestes ensaios tiveram os primeiros registros do consumo dinâmico com as parcelas de cada elemento para avaliação da composição dos combustíveis: gasolina, etanol e água. Desta forma, com os parâmetros registrados na ECU é possível verificar a distribuição de cada elemento do combustível durante a medição de consumo *onboard*. As Figuras 47 de *a* até *d* apresentam a distribuição de cada componente do combustível nas três fases dos ciclos realizados com cada combustível.

Figura 47 – Distribuição dos componentes do combustível na medição de consumo *onboard* pelo método de consumo dinâmico

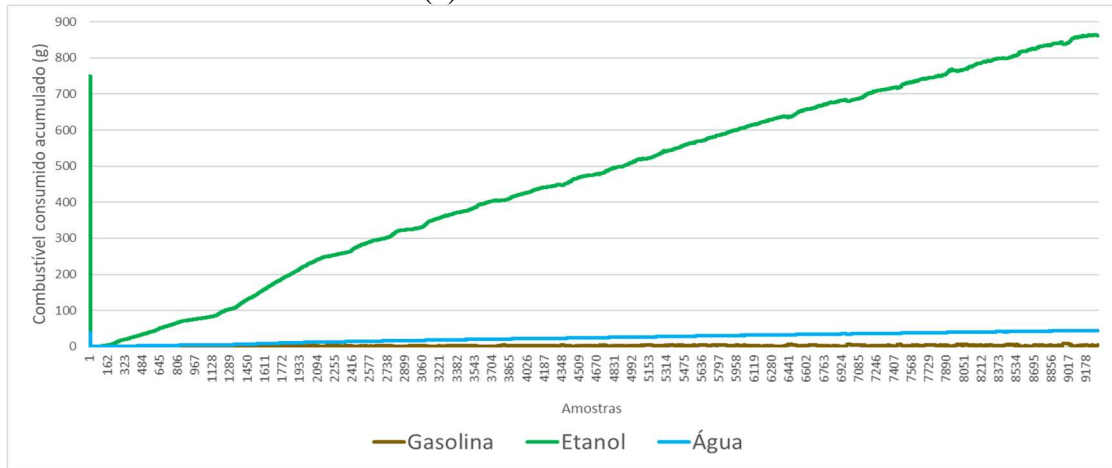
(a) Fases 1 e 2 – E29



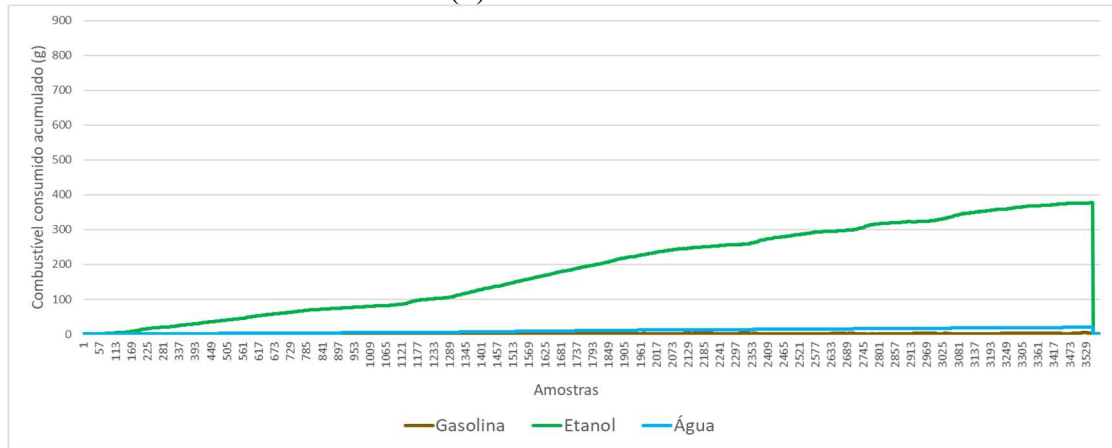
(b) Fase 3 – E29



(c) Fases 1 e 2 – E95



(d) Fase 3 – E95



Fonte: Autor

No ensaio com etanol hidratado foi identificado um valor residual no inventário de gasolina. Para a próxima fase dos ensaios será feita uma revisão na fórmula da fração dos elementos do combustível para minimizar este efeito. A presença de fração mais elevada de água pode ser interpretada como gasolina em função da tecnologia do sensor identificar somente o etanol. As parcelas de gasolina e água são calculadas com base no valor de etanol.

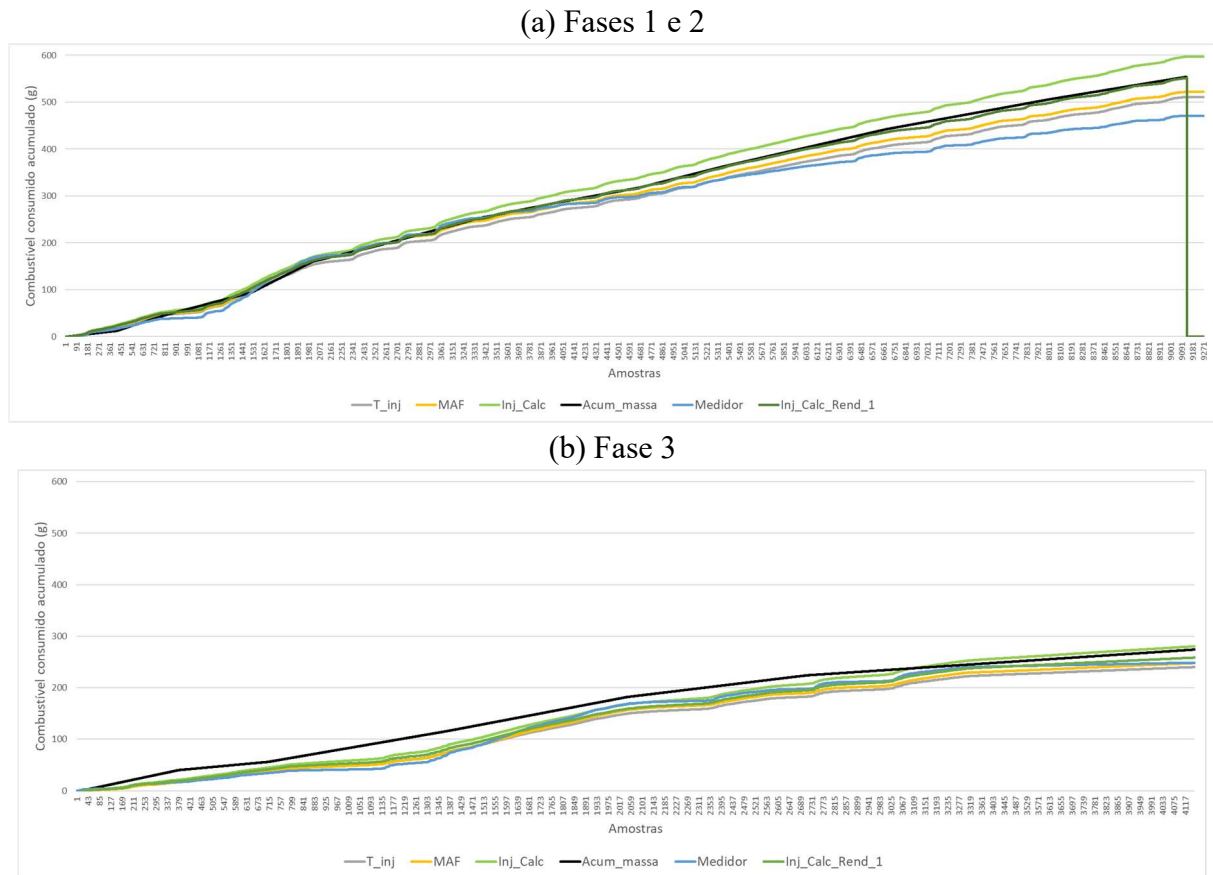
A separação de cada elemento tem o intuito de separar o tipo de carbono para o inventário *onboard*. As emissões de fonte fóssil serão apresentadas como emissão do veículo, a somatória proveniente de fonte renovável será registrada e também apresentada no cálculo de CO<sub>2</sub> por quilometro rodado. Desta forma a massa de combustível fóssil e renovável serão apresentadas separadas.

### 4.3.2 – Ajuste dos parâmetros e fatores aplicados no cálculo de consumo de combustível

Os ensaios com o ciclo FTP-75 aquecido resultou em uma base de dados de consumo de combustível que permite analisar o comportamento da vazão do combustível nos diferentes regimes do motor. Como este ensaio conta com grande parte do regime em condição transiente, os dados adquiridos foram analisados para verificar a acurácia do método de medição de consumo. O valor da massa de combustível foi utilizado como referência, de forma a avaliar a precisão do instrumento de medição de vazão de combustível. Em alguns trechos da medição o valor do medidor de vazão apresentou desvio acentuado, saindo da tendência na qual a medição estava evoluindo. Em função destas variações em alguns trechos, o teste gravimétrico foi a base desta análise. Os parâmetros do primeiro ensaio com gasolina E29 foram refeitos de forma a recompor o cálculo de consumo dinâmico e cada um dos elementos que fazem parte da Equação 47, bem como o desempenho com os fatores da Equação 13. Verificando o comportamento da curva de consumo, o rendimento volumétrico apresentou influência no resultado de forma relevante. Este fator é multiplicado ao final do cálculo, portanto, tem ampla influência no cálculo do consumo dinâmico. Retirando o efeito deste parâmetro, isto é, igualando o rendimento volumétrico a um (1), o resultado do CD se mostrou mais preciso que os valores anteriores.

O valor acumulado do desvio total se mostrou maior com rendimento volumétrico igual a 1, porém, os desvios por fase apresentam grande proximidade com um dos métodos de medição do combustível. O desvio subiu de 2,88% para -4,57% com rendimento 1, porém o desvio padrão foram menores. Outro ponto observado foi que separando as fases 1 e 2 da fase 3, houve redução do desvio em cada um dos métodos: -0,50% nas fases 1 e 2 em relação ao método gravimétrico e -0,70% na fase 3 em relação ao medidor de vazão. Como os ensaios são feitos em sequência, pode ter ocorrido uma variação da tomada de valores dos instrumentos entre as fases 2 e 3. As Figuras 48 *a* e *b* apresentam os valores acumulados de consumo (gramas) de gasolina E29 nas fases 1 e 2 e na fase 3, respectivamente. O parâmetro ‘Accumul\_rend\_1’ é o novo cálculo com o rendimento volumétrico com valor 1.

Figura 48 – Comparação de consumo de combustível com E29 no ciclo FTP-75 aquecido



Fonte: autor

Observando a Figura 52 b, pode ser verificado no início da medição a variação do método gravimétrico, conforme demonstrado anteriormente na Figura 45 b. Desta forma a medição de consumo calculado pelo método dinâmico terá como valor de rendimento volumétrico 1 na Equação 47.

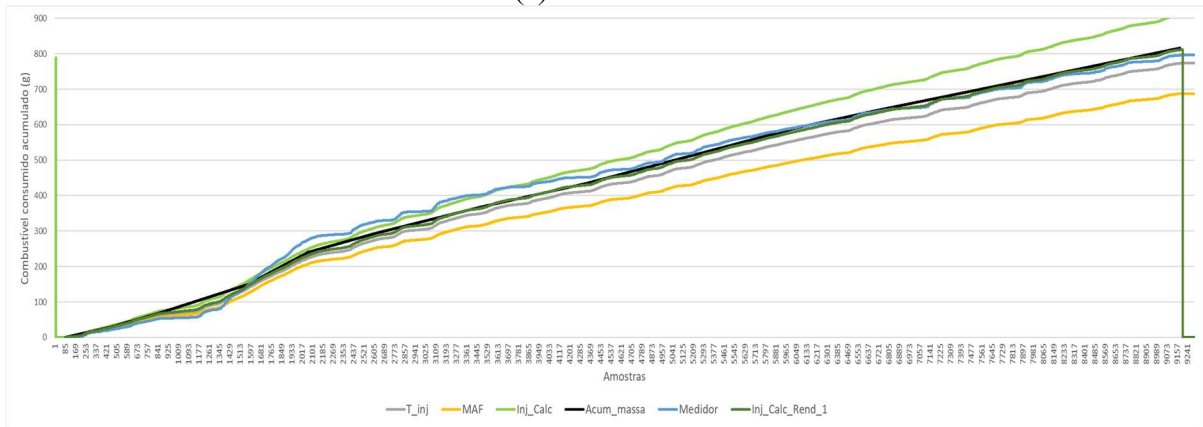
No caso do etanol os instrumentos apresentaram variações diferentes aos da gasolina, portanto a análise para consolidação dos fatores aplicados nas duas equações apresentaram correção em dois fatores. Da mesma forma que nos ensaios a gasolina, o rendimento volumétrico para etanol deve seguir também o valor neutro, igual a 1. Além desta alteração, após as análises foi identificado que um fator aplicado na Equação 13 também demandou correção. Após o cálculo do inverso do *SD* o resultado é multiplicado por 0,5, porém após analisar o desempenho com etanol, este valor foi alterado para 0,3, compondo a Equação 48 para etanol. Desta forma a equação para etanol deve seguir os seguintes fatores:

$$F_{SD} = 1 + \left[ \left( \frac{1}{SD} \right) \times 0,3 \right] \quad (48)$$

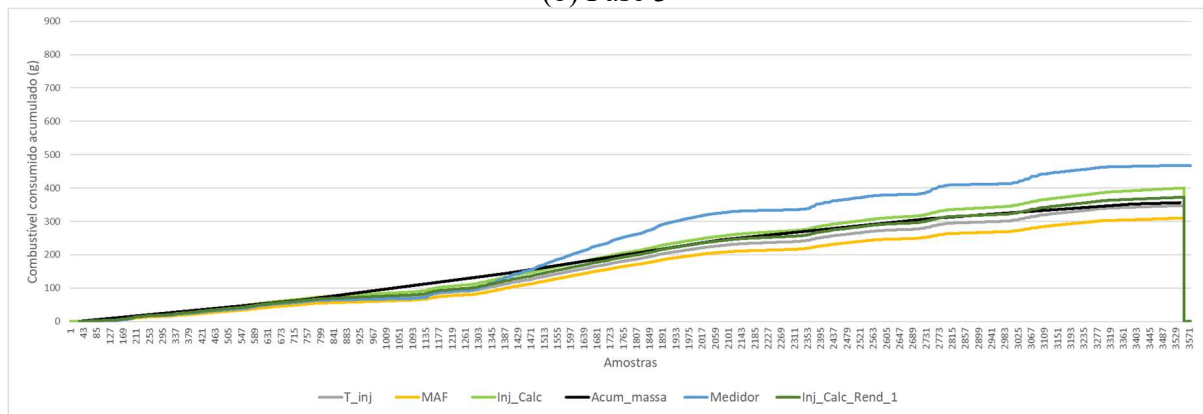
Como o cálculo do consumo de combustível é aplicado em um veículo *flex*, este fator deve interpolar entre 0,3 com etanol E95 até 0,5 para gasolina E27. O intuito do valor da gasolina E27 é para atender a faixa de mercado (BRASIL, 2015) que na prática inicia com 27% de etanol anidro, variando conforme o abastecimento com etanol hidratado no mesmo tanque, até atingir o teor de etanol hidratado puro E95.

Os valores analisados para etanol hidratado foram, portanto, com o rendimento volumétrico 1 e fator SD 0,3. As Figuras 49 a e b trazem os resultado de consumo acumulado em gramas. Da mesma forma, o parâmetro ‘Accumul\_rend\_1’ é o novo cálculo com o rendimento volumétrico com valor 1.

Figura 49 – Comparação de consumo de combustível com E95 no ciclo FTP-75 aquecido  
(a) Fases 1 e 2



(b) Fase 3



Fonte: autor

No caso do etanol o desvio de consumo caiu de 11,63%, com rendimento volumétrico variável, para 0,08% com o rendimento volumétrico igual a 1. A média e desvio padrão aumentaram em relação ao cálculo anterior, porém, ao retirar as duas primeiras amostras, ambos tiveram uma queda significativa. Este comparativo segue o padrão apresentado na Tabela 7.

A distância percorrida em cada ensaio foi de 17764,17 m para gasolina e 17718,61 m para o etanol hidratado.

#### 4.3.3 – Cálculo das emissões de carbono conforme ensaios FTP-75 aquecido

Os valores de CO<sub>2</sub> emitido por massa de combustível consumido foi apresentado na seção 3.4 deste estudo, mas para combustão completa. O valor de etanol dos ensaios realizados tem o padrão esperado para este combustível, mas o teor de etanol da gasolina usada nos ensaios diverge do padrão. O teor de etanol esperado nos postos de combustíveis do Brasil fica em torno de 27% (BRASIL, 2015). Conforme registrado pelo sensor de etanol, o valor da gasolina utilizada foi de 29%. Desta forma, valor de CO<sub>2</sub> gasolina E29 será a combinação da proporção de gasolina pura com 29% de etanol anidro. Sendo assim, temos:

$$\text{CO}_2 \text{ E29} = (0,71 \times 3088) + (0,29 \times 1913) = 2747 \text{ gCO}_2/\text{kg}$$

O valor consumido de gasolina E29 durante o ensaio foi de 790 g de etanol. Multiplicando pelo teor de carbono e dividindo pela distância percorrida em km durante o ensaio é possível identificar o valor de CO<sub>2</sub> emitido por km. Este cálculo teve o intuito de verificar o valor de consumo de combustível registrado pela unidade de controle e o quanto resultou na emissão por quilometro rodado. Algumas limitações devem ser apontadas como: o ensaio FTP-75 foi feito com o motor a quente, por este motivo não houve a ponderação entre os valores entre as fases 1 e 2 (0,43) e as fases 2 e 3 (0,57). Outro fator não aplicado foi a carga do dinamômetro, por este apresentar unidade de carga diferente ao padrão utilizado:  $f_0$  e  $f_2$ . O local do ensaio não é climatizado e a temperatura ambiente ficou em torno de 23°C.

Estes ensaios tiveram o intuito de avaliar os métodos de medição de consumo, bem como, verificar o desempenho do veículo de teste no ciclo FTP-75. Como resultado das emissões de carbono destes ensaios, para combustão completa, os seguintes valores foram identificados:

- Gasolina E29 – 122,22 g CO<sub>2</sub>/km (70,9% de carbono fóssil)
- Etanol E95 (hidratado) – 126,64 g CO<sub>2</sub>/km (100% renovável)

Os valores de carbono estão compostos por fontes fóssil e não fóssil, porém estes teores serão apresentados separados. Neste ensaio os valores já foram registrados de forma separada, conforme Figuras 51, mas não foram apresentados nesta seção em função do objetivo desta análise ser a verificação do desvio de cada método de medição de consumo total de combustível.

Os resultados não foram comparados com o valor de homologação do veículo em função dos seguintes aspectos que alteram o desempenho do consumo final: a falta da carga no

dinamômetro tende a aumentar o consumo; a realização de somente o ciclo urbano, com peso de 55% (GREENE et al., 2017), tende a aumentar o consumo; e por fim, o ensaio com o motor aquecido que tende a reduzir o consumo, alteração que culminou na retirada da ponderação entre as três fases do ciclo FTP-75, o que também altera o cálculo de consumo. Por estes motivos era esperado divergência no consumo, além da unidade de controle do veículo de teste ter uma calibração acadêmica, com o intuito de desempenhar o funcionamento do motor. Nesta fase deste projeto a unidade de controle não tem a calibração para atender as emissões.

#### 4.4 – MEDIÇÃO DE CONSUMO PELO BALANÇO DE CARBONO NOS CICLO FTP-75, HWFET E RDE

Esta seção apresenta os resultados e análises do levantamento feito em laboratório e com o PEMS. Serão apresentados os resultados de cada etapa e os comparativos entre os instrumentos de medição das emissões com os dados da unidade de controle. Os ensaios foram realizados no laboratório de emissões da CETESB em São Bernardo do Campo, conforme Figura 50.

Figura 50 – Veículo no laboratório para medir de emissões e correlacionar com o PEMS



Fonte: autor

##### 4.4.1 – Correlação entre os instrumentos de medição no ciclo FTP-75

O ensaio do veículo de teste foi iniciado com o ciclo FTP-75 para correlacionar os dados do PEMS com o laboratório de emissões. A medição foi feita com o veículo abastecido com gasolina com 28% de etanol. A Tabela 8 apresenta a relação entre o valor total de CO, CO<sub>2</sub> e



THC entre o PEMS e o laboratório, conforme ciclo FTP-75. O valor emitido de NOx não foi apresentado por não fazer parte do cálculo do balanço de carbono.

Tabela 8 – Correlação entre PEMS e laboratório no ciclo FTP-75

PEMS/FTP-75	CO	CO <sub>2</sub>	HC
E28	1,035	1,098	1,024

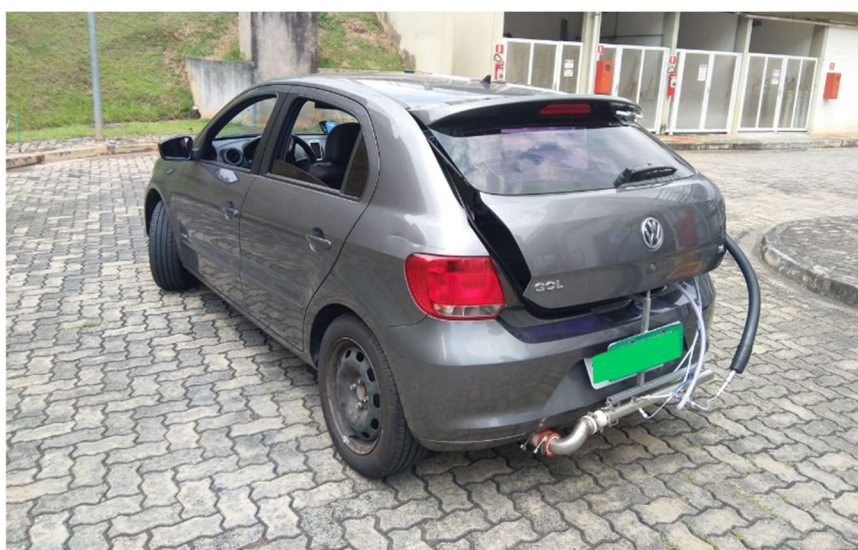
Fonte: Autor

Conforme valores da tabela, os três gases apresentaram variações dentro dos limites que é de 10% para CO<sub>2</sub> e 15% para os demais gases (COMMISSION, 2016a). Desta forma o PEMS estava habilitado para a realização das medições em rodagem. O etanol hidratado apresentou uma concentração de 92% de etanol na composição, restando 5% de água e 3% de gasolina, em volume.

#### 4.4.2. Rotas de condução em *real-world*

Os ensaios em rodagem foram realizados em dias úteis, seguindo rotas similares para cada um dos combustíveis, gasolina E28 e etanol E92. O veículo utilizado tem o peso em ordem de marcha de 944 kg e carga útil de até 440 kg, portanto a carga máxima permitida no ensaio é 1340 kg: 944 kg mais 396 kg, 90% da carga útil. O veículo abastecido, com a instalação do PEMS, baterias e reservatórios dos gases, totalizou o peso de 1220 kg. O motorista e carona somaram 120 kg o que totaliza 1340 kg, limite máximo permitido para o ensaio. O trajeto iniciou no laboratório de emissões, conforme Figura 51 e finalizou o circuito rural na Rodovia Anchieta.

Figura 51 – Veículo instrumentado para a medição de emissões em rodagem com o PEMS



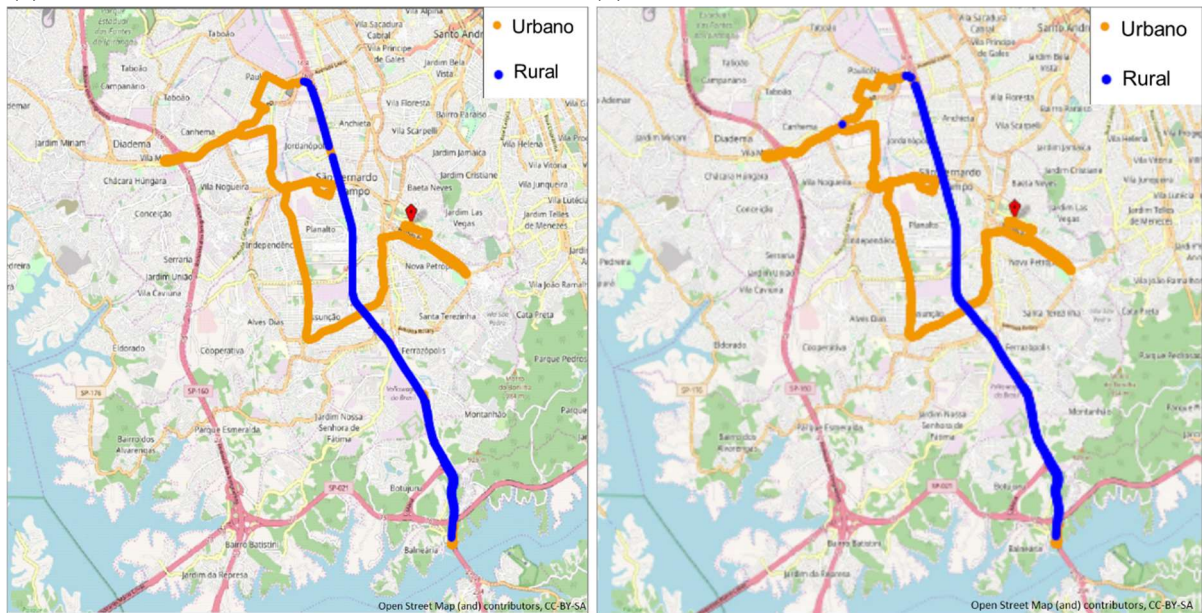
Fonte: autor

Os ensaios iniciaram no meio da manhã com partida a frio, e ocorreram em dias da semana (COMMISSION, 2016a). Os trajetos são semelhantes e são apresentados nos mapas da Figura 52 a e b.

Figura 52 – Mapas das rotas dos ensaios em rodagem

(a) E28

(b) E92



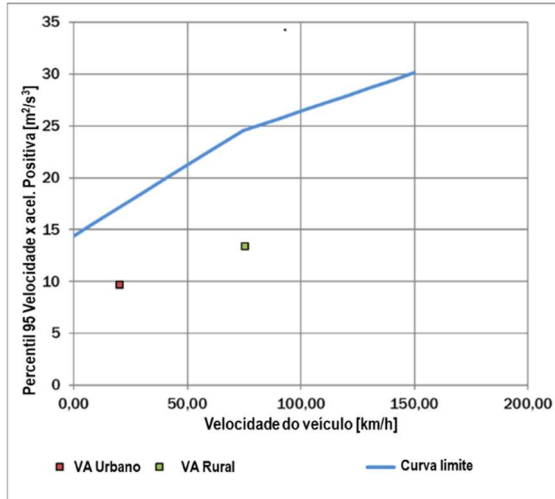
Fonte: Autor, adaptado do relatório do Horiba OBS-ONE

#### 4.4.3. Avaliação da dinâmica do teste de rodagem

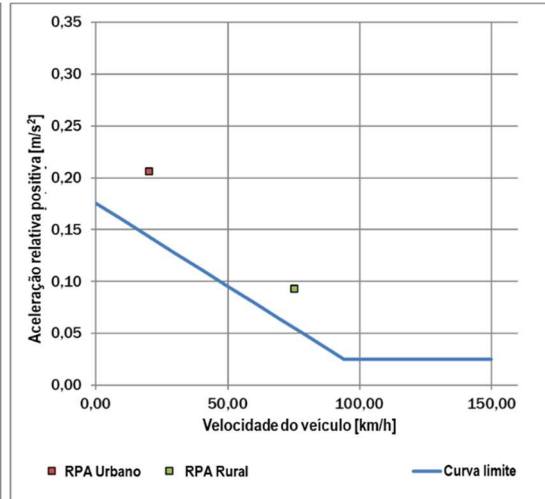
A avaliação da dinâmica dos testes de rodagem foi feita por meio do programa EMROAD versão 6.03 (CIRCABC, 2019), desenvolvido pela *Joint Research Centre (JRC)*. Os cálculos envolvem o percentil 95 que é o produto da aceleração positiva (maior que  $0,1 \text{ m/s}^2$ ) pela velocidade do veículo ( $v \cdot a_{\text{pos}}[95]$ ) e RPA. Os resultados para E28 e E92 são apresentados nas Figuras 53 a, b, c e d, respectivamente. O circuito rodoviário não faz parte do teste RDE deste estudo, por esse motivo não está presente nas Figuras.

Figura 53 – Valores do Percentil 95 Velocidade\* Acel. e RPA – E28 e E92

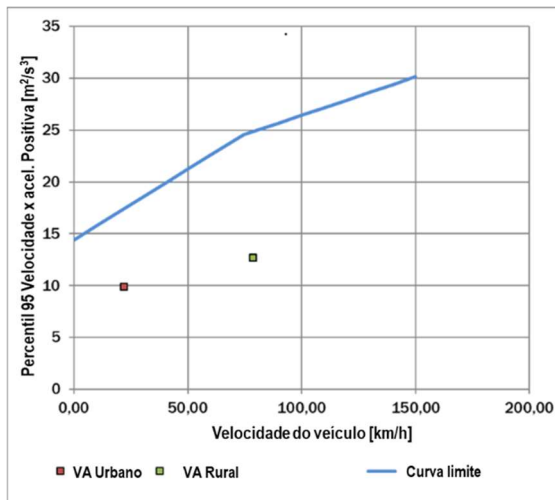
(a) E28



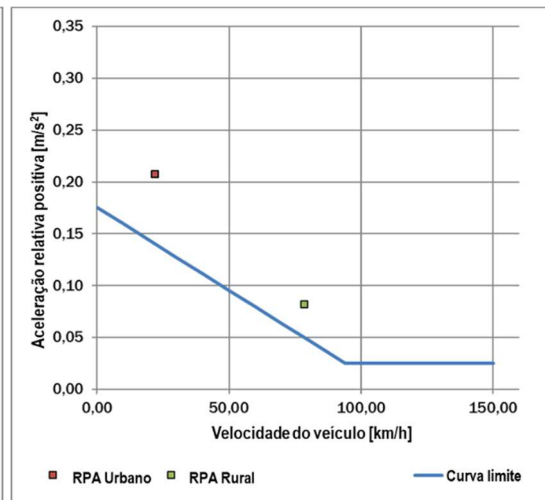
(b) E28



(c) E92



(d) E92



Fonte: autor, extraído do EMROAD v.6.03

Conforme os resultados da dinâmica das viagens de teste apresentados nas Figuras 53, a velocidade e aceleração estão dentro do padrão estabelecidos pela regulamentação europeia. Baseado nestes resultados, os dados coletados em rodagem podem ser utilizados na verificação do consumo de combustível. As distâncias do trajeto rural com ambos combustíveis ficaram abaixo do mínimo, que é de 16 km. O teste com E28 concluiu com 15 km e com E92 15,5 km. Estes valores ligeiramente abaixo do mínimo permitido representam um erro de 2% no circuito total, sem impacto significativo para os resultados. Como estes testes foram realizados com intuito acadêmico, os dados serão usados para a verificação do consumo de combustível proposto neste estudo. Os resultados da dinâmica dos ensaios RDE foram consolidados no EMROAD e estão resumidos no Quadro 4.

Quadro 4 – Resumo da dinâmica veicular nos testes em rodagem

Atributo	Unidade	Urbano E28	Rural E28	Urbano E92	Rural E92
Duração	s	4985	719	4616	713
Distância	km	27.8	15.0	28.2	15.5
Parcela da distância	%	64.9	35.1	64.5	35.5
Perc.95 v*A.pos	m2/s3	9.69	13.40	9.89	12.70
RPA	m/s2	0.21	0.09	0.21	0.08
Velocidade média	km/h	20.0	75.2	21.9	78.5
Tempo parado – Urb.	%	27.5		24.0	
Umidade média	%	41.6	49.0	44.3	57.0
Temperatura média	°C	28.8	27.7	30.5	27.7
Ganho positivo acumulado	m/100km	585.7	745.8 (total)	579.2	732.5 (total)
Diferença Altitude início-fim (Abs)	m	10.40 (total)		3.9 (total)	

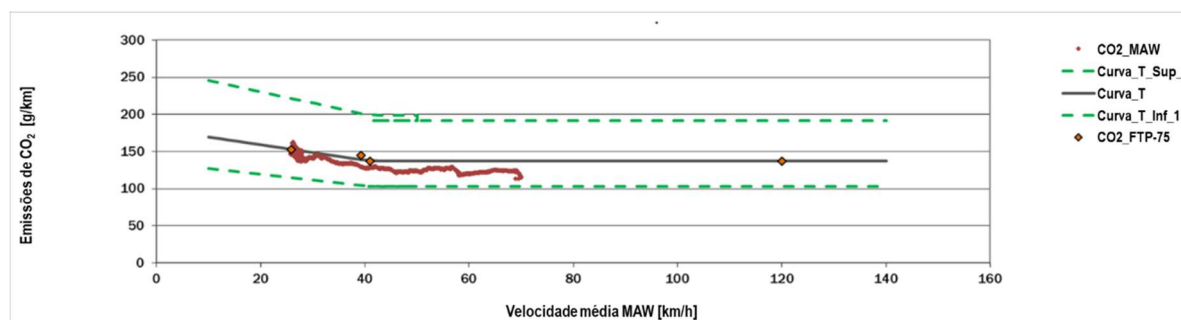
Fonte: Autor, extraído do EMROAD v.6.03

#### 4.4.4. Curva característica de CO<sub>2</sub> do veículo

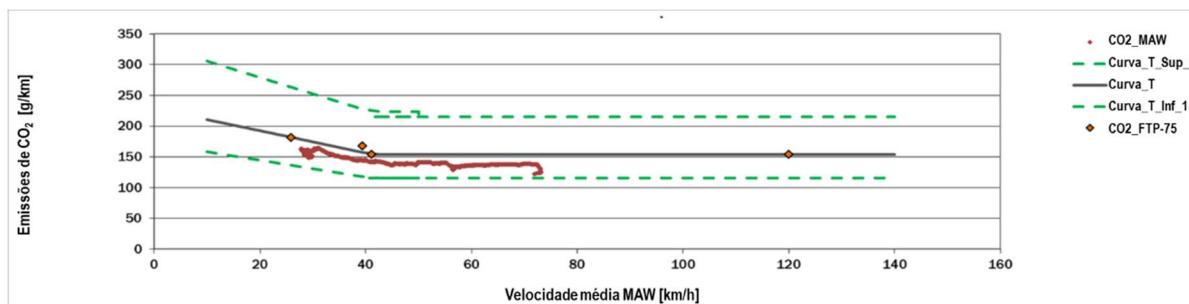
Para a dinâmica do veículo durante os testes de rodagem, os limites de emissões de CO<sub>2</sub> são calculados com base na velocidade do veículo. Apesar dos testes não terem a finalidade de homologação, os dados usados neste estudo devem ser verificados em relação as janelas de médias móveis de massa de CO<sub>2</sub> (*moving averaging windows - MAW*) emitido entre o laboratório e rodagem real. Como o ciclo oficial no Brasil é o FTP-75, as fases 2 e 3 irão compor a relação de emissão específica de CO<sub>2</sub>. As Figuras 54 a e b apresentam os resultados referentes à curva característica de CO<sub>2</sub> do veículo gerados no EMROAD.

Figura 54 - Curva característica de CO<sub>2</sub> do veículo nos ciclos urbano e rural

(a) E28



(b) E92



Fonte: Autor, extraído do EMROAD v.6.03

Conforme o resultado das janelas móveis com as emissões de CO<sub>2</sub> da dinâmica do percurso (COMMISSION, 2018), os ciclos de rodagem realizados para este estudo estão dentro dos padrões estabelecidos.

#### 4.4.5. Consumo de combustível no ciclo de ensaio em laboratório

Os valores apresentados sobre o consumo do veículo nesta seção trazem somente o método escolhido para este estudo, que é baseado na largura do pulso do injetor e a correção pelo fator dinâmico. O valor estático foi analisado, mas não foi apresentado e o método do fluxo da massa de ar (MAF) também não foi apresentado. Este último valor não faz parte do método deste estudo e pode ser proposto como estudo futuro. O método da massa de ar tem uma boa correlação com o consumo, mas os valores medidos apresentaram variações significativas entre os ensaios, o que comprometeu a precisão dos resultados por este método. Uma das inferências sobre estas variações é o desvio do instrumento, além de não ter sido analisado em detalhes o efeito de cada parâmetro do cálculo por não ser o foco deste estudo. Logo, desta seção em diante os valores apresentados serão dos instrumentos de referência, Laboratório e PEMS, em relação ao consumo dinâmico do injetor. A identificação da medição será pela ECU que indica o valor gravado na memória.

O primeiro ensaio no laboratório foi no ciclo FTP-75 para correlacionar estes valores com o PEMS, conforme Tabela 9. Os dados da massa de combustível registrada na ECU e medida pelo PEMS foram comparados com o consumo de combustível calculado no laboratório. Para usar a mesma referência para os combustíveis, o balanço de carbono foi calculado usando os mesmos parâmetros para o PEMS e para o laboratório. A base de dados do PEMS e da ECU foram sincronizadas conforme os valores da velocidade do veículo e rotação

do motor. Na Tabela 9 são apresentados os valores do combustível consumido e os respectivos desvios referenciados ao laboratório, medidos durante o ensaio FTP-75, para ambos os combustíveis.

Tabela 9 – Desvio do consumo de combustível no ciclo FTP-75 com E28 e E92

Instrumento	Combustível [g]	Consumo [g/km]	Desvio
<b>FTP-75 - E28</b>	1303,22	73,38	Referência
PEMS - E28	1413,35	79,58	-8,45%
ECU - E28	1351,68	76,11	-3,72%
<b>FTP-75 - E92</b>	1823,42	102,88	Referência
PEMS - E92	1976,61	111,52	-8,40%
ECU - E92	1834,18	103,49	-0,59%

Fonte: Autor

Os ensaios com o ciclo HWFET também foram realizados no laboratório com o PEMS para verificar a correlação do consumo de combustível em condições de rodovia. Estas medições serão comparadas com os valores em rodagem na seção 4.4.8. Na Tabela 10 são comparados os valores do combustível consumido no laboratório e os desvios do PEMS e ECU com ambos combustíveis.

Tabela 10 – Desvio do consumo de combustível no ciclo HWFET com E28 e E92

Instrumento	Combustível [g]	Consumo [g/km]	Desvio
<b>HWFET - E28</b>	766,65	46,44	Referência
PEMS - E28	806,43	48,85	-5,19%
ECU - E28	725,07	43,92	5,42%
<b>HWFET - E92</b>	1124,25	67,18	Referência
PEMS - E92	1164,57	69,64	-3,59%
ECU - E92	1110,44	67,26	1,23%

Fonte: Autor

Conforme precisão da ECU observada nos ensaios em laboratório, o ensaio HWFET com E28 foi o único a apresentar valor acima do limite de 5%, conforme a regulamentação do dispositivo OBFCEM (OLMOS et al., 2019). O valor está fora da faixa e positivo, enquanto a maioria dos demais valores são negativos e estão dentro do limite estabelecido. Avaliando os dados adquiridos pela ECU, as informações foram adequadamente registradas, mas os valores apresentaram divergência durante este ensaio.

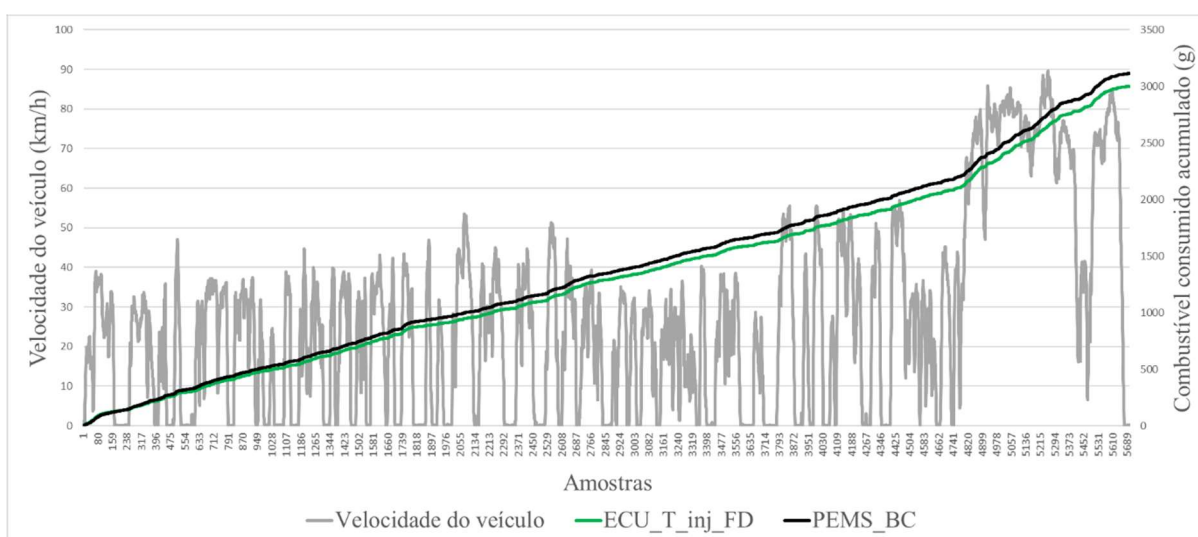


#### 4.4.6. Consumo de combustível em teste de condução real

O primeiro teste RDE foi realizado no período da manhã e o PEMS usou o balanço de carbono para comparar o consumo com a unidade de controle. A densidade utilizada para a gasolina E28 foi de 767,4 g/L.

Os valores registrados nos testes RDE foram gravados a cada segundo pelo PEMS e ECU. Os valores de consumo de combustível armazenados durante a rota de condução são apresentados na Figura 55 com a velocidade do veículo durante o ciclo desenvolvido nas ruas.

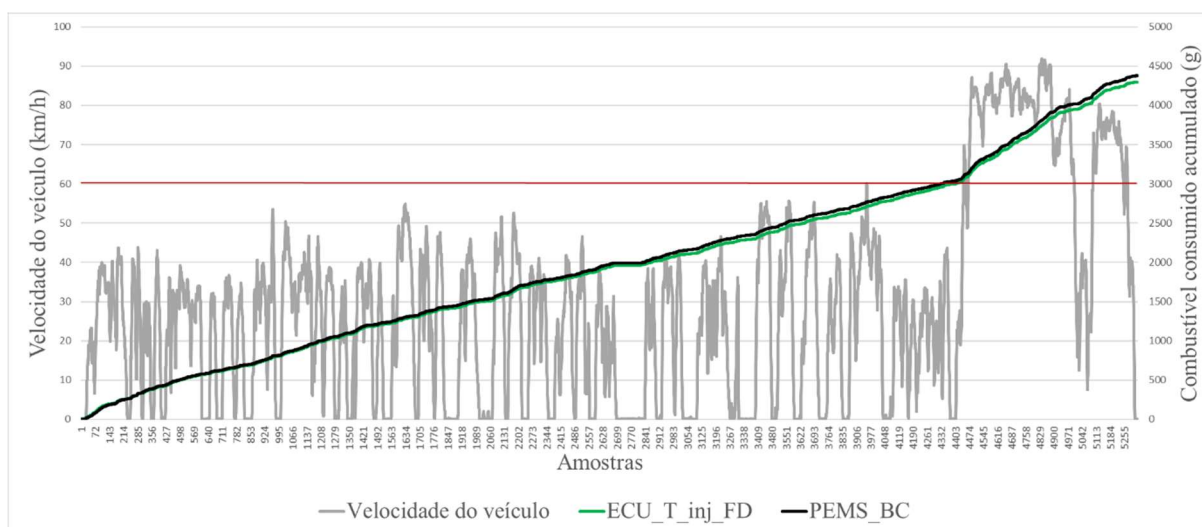
Figura 55 – Consumo de combustível em teste de condução em rodagem real com E28



Fonte: Autor

O consumo de combustível registrado na unidade de controle apresentou uma divergência de 3,67% comparado ao PEMS. O registro a cada segundo é acumulado durante os testes de condução. A linha a 60 km/h visa destacar o ponto de mudança entre os circuitos urbano e rural. No dia seguinte foi feito ensaio com etanol, com concentração média de 92% de etanol, conforme o sensor de combustível. O ensaio começou também no período da manhã com partida a frio a 26,7°C de temperatura local. A Figura 56 apresenta o desempenho do consumo de combustível usando etanol.

Figura 56 – Consumo de combustível em teste de condução em rodagem real com E92



Fonte: Autor

A divergência de consumo de combustível entre ECU e PEMS foi de 1,83%. Durante a condução com etanol o veículo apresentou uma falha na linha de combustível e o teste foi interrompido no meio do ciclo urbano. O veículo permaneceu parado por 154 segundos, mas o PEMS manteve a medição durante este intervalo. Este é o motivo do valor de consumo de combustível acumulado apresentar um trecho plano no meio do gráfico. O valor inicial no retorno dos instrumentos foi divergente entre ECU e PEMS, mas os dados adquiridos foram mantidos. A densidade usada para o etanol E92 foi de 800.8 g/L. A composição para o cálculo foi de 92% de etanol, 3% de gasolina e 5% de água, em volume. A precisão da ECU também ficou abaixo dos 5% e o PEMS apresentou comportamento semelhante ao teste com gasolina.

Os parâmetros de consumo tanto nos ensaios em laboratório como em rodagem apresentaram variações entre um e outro em relação ao desvio em relação ao padrão de referência. O cálculo de consumo foi baseado na composição do valor de combustível, pelo balanço de carbono, conforme a emissão de escapamento, além do uso de fatores relacionados ao peso molecular e densidade do combustível. Para este estudo não foi utilizado um medidor de consumo nestes ensaios com o PEMS e laboratório, portanto vale indicar que este método pode ter pequenas variações no resultado em função destes fatores citados (KÖCK, 2019).

Conforme em regulamentação europeia sobre o dispositivo OBFCM, o desvio de mais ou menos 5% é comparado ao ciclo de ensaio em laboratório, conforme regulamentação da Comunidade Europeia 2018/1832. Neste estudo também foi apresentado a divergência do consumo em relação ao teste em RDE, o qual apresentou desvio abaixo de 5% tanto com E28

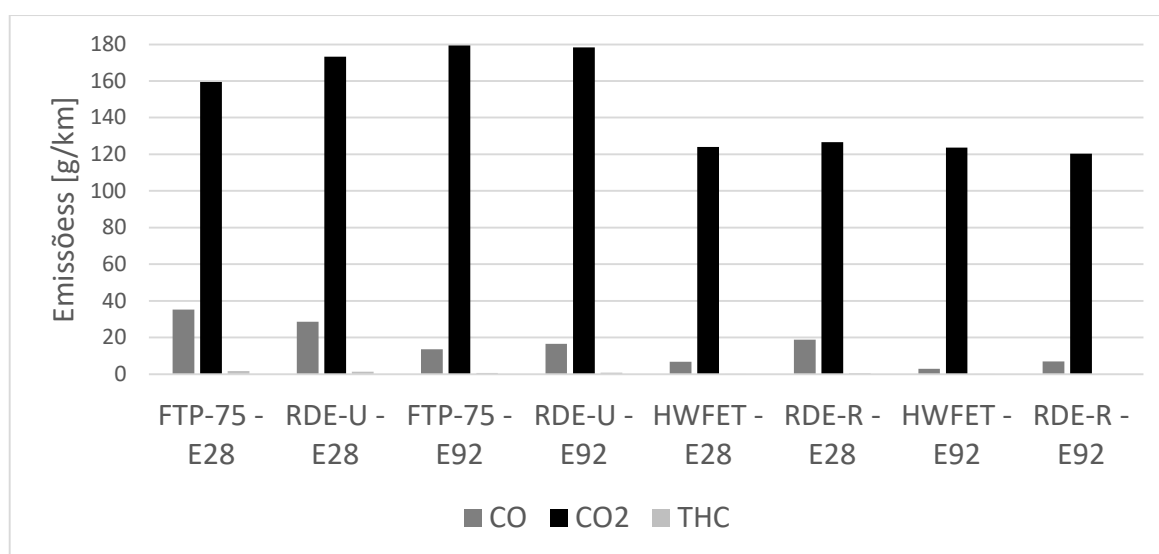


como com E92. Desta forma, o modelo proposto atendeu o ensaio em laboratório e em rodagem RDE.

#### 4.4.7. Avaliação das emissões de escapamento

O veículo usado nos testes tem a calibração da unidade de controle do motor com propósito acadêmico, a qual teve o propósito da dirigibilidade do veículo neste momento, portanto, não foi calibrado para atender aos limites de emissões estabelecidos na legislação, conforme o PROCONVE. No primeiro teste no dinamômetro com E28 foi identificado elevado teor de CO nas emissões, o que indica uma combustão incompleta. A Figura 57 apresenta os valores de emissões para os três gases do balanço de carbono: CO, CO<sub>2</sub> e THC. Os testes RDE estão divididos em urbano (U) e rural (R) e as emissões referentes a cada combustível.

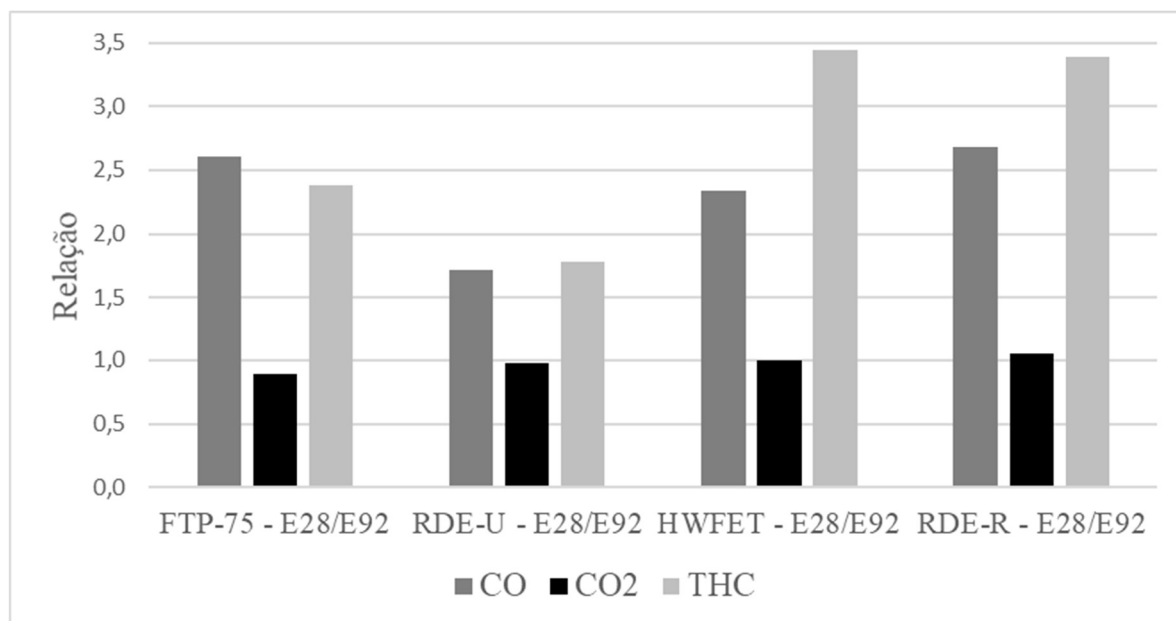
Figures 57 – Emissões veiculares em cada ciclo - E28 e E92



Fonte: autor

A quantidade de CO durante o ciclo FTP-75 com gasolina apresentou o valor mais elevado e os três maiores valores foram com este combustível, indicando melhor combustão quando alimentado com etanol. Visando identificar o desempenho entre E28 e E92, a Figura 58 apresenta a relação de emissões entre os combustíveis em cada ciclo.

Figura 58 – Relação entre E28 e E92 em cada ciclo



Fonte: autor

Durante todos os ciclos as emissões dos poluentes medidos, CO e THC, foram mais alto com gasolina. A relação de CO foi em média 2,34, o que indica pior combustão com a gasolina, mas também foi incompleta com etanol. A principal razão para essa divergência significativa não é somente em função do combustível, mas devido aos mapas de calibração para cada combustível. As emissões de THC com E92 foram menores em maiores velocidades em função do aumento de temperatura no cilindro, o que contribui para melhor combustão (SAKTHIVEL; SUBRAMANIAN; MATHAI, 2020), conforme valores elevados da relação de THC nos ensaios HWFET e RDE-R. Por outro lado, a menor diferença de THC nos ensaios FTP-75 e RDE-U indicam elevação da emissão deste gás com etanol durante a fase frio. Emissões de CO foram mais elevados com E28 devido a mistura rica (ÍLHAK et al., 2020) da calibração da ECU, representada pelo valor acima de um em todos os ciclos. Como o valor de CO<sub>2</sub> é muito superior aos demais gases, a relação é próximo de um, porém a média é maior para o etanol, indicando melhor combustão com etanol (OLMOS et al., 2019). Os testes com maiores velocidade, HWFET e RDE-R, apresentaram valores menores de CO<sub>2</sub> com E92 como resultado da maior octanagem do combustível, o que aumenta a eficiência (YUAN et al., 2019), conforme relações maiores que um nestes ensaios.

#### 4.4.8. Análise dos dados de consumo de combustível

A calibração da ECU teve proposta acadêmica, por esta razão a relação entre os dois combustíveis divergem quando comparados com a densidade energética. O etanol, hidratado tem 24,8 MJ/kg e a gasolina E22 38,92 MJ/kg (MDIC-INMETRO, 2011). Como os combustíveis usados neste estudo têm taxas diferentes de gasolina e etanol, a densidade energética calculada tem aproximadamente 37,67 MJ/kg para a gasolina E28 e 25,35 MJ/kg para o etanol E92. A relação entre os combustíveis oficiais, por unidade de massa, é 0,6362, porém a relação entre os combustíveis usados neste estudo é 0,6729. Durante os testes de condução foi registrado na ECU o consumo de 70,11 g/km para E28 e 98,31 g/km para E92. A relação do consumo entre os testes com gasolina e etanol foi de 0,7131, o que representa melhor desempenho com o etanol. A calibração para etanol apresentou menor emissão de CO comparado com as emissões com gasolina, embora ambos apresentaram valores muito acima do valor encontrado em uma calibração para um veículo homologado em relação ao CO. A Tabela 11 apresenta os valores de consumo de combustível em cada ciclo, considerando o FTP-75, HWFET, RDE-Urbano e RDE-Rural. Também é apresentada a relação entre os ensaios em laboratório e RDE, bem como entre E28 e E92. Uma avaliação sobre as médias e desvio padrão será apresentada para a validação dos testes.

Tabela 11 – Consumo de combustível e relação entre ciclos e combustíveis

Ciclo	Consumo [g/km]	Relação Lab/RDE	Relação E28/E92
FTP-75 - E28	76,108	<b>0,940</b>	<b>0,735</b>
RDE-U - E28	80,998		<b>0,713</b>
FTP-75 - E92	103,486	<b>0,910</b>	
RDE-U - E92	113,659		
HWFET - E28	43,917	0,878	0,653
RDE-R - E28	49,993		<b>0,709</b>
HWFET - E92	67,258	<b>0,954</b>	
RDE-R - E92	70,479		

Fonte: autor

Avaliando os valores da relação entre o laboratório e RDE, a média foi 0,921 e o desvio padrão de 0,0335. Conforme a faixa de variabilidade, a relação entre HWFET e RDE-U com E28 ficou fora da faixa. Verificando a relação entre E28 e E92, a média foi de 0,703 e o desvio padrão de 0,0350. A relação entre HWFET E28 e E92 ficou fora da faixa. Isso corrobora com a divergência acima de 5% para o ensaio HWFET com E28, conforme Tabela 10. Os valores

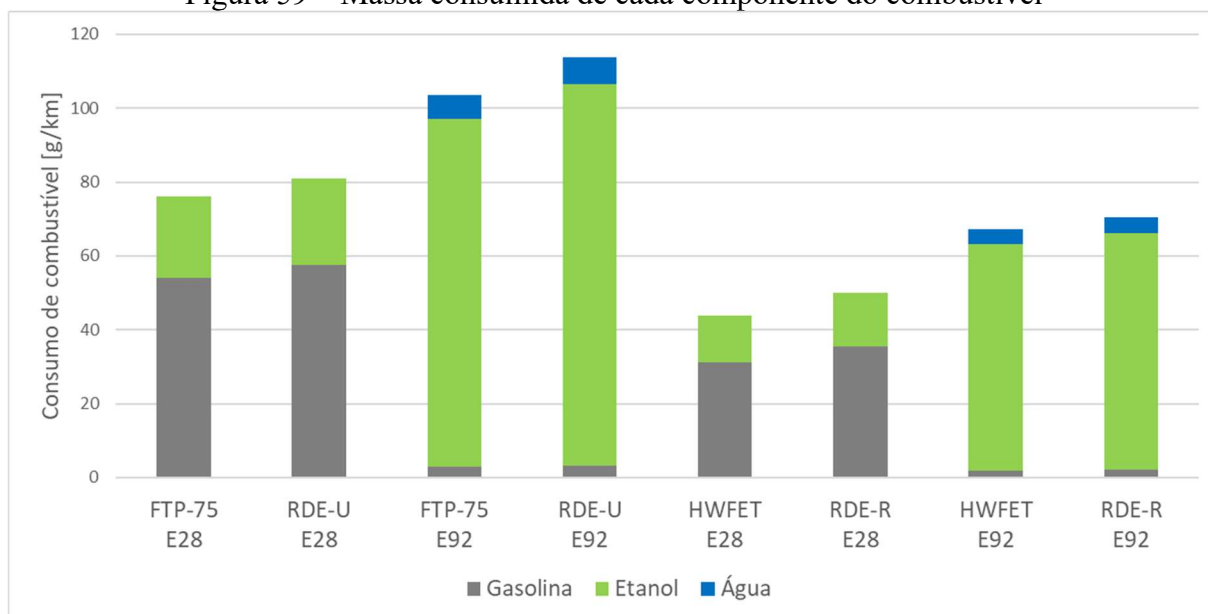
dentro da faixa então em negrito e fora da faixa em itálico. O uso da relação entre os ensaios contribui para minimizar os efeitos da calibração da unidade de controle entre os combustíveis. Da mesma forma, as relações entre dinamômetro e rodagem servem para reduzir o efeito entre os fatores que envolvem os critérios de cada ciclo.

Nos valores apresentados do ciclo FTP-75 não foram ponderadas as 3 fases. Fazendo a ponderação o consumo foi de 77,06 g E28/km e 103,38 g E92/km. Avaliando a correlação entre ciclo urbano e rural e entre os combustíveis, o valor entre E28 e E92 foi de 0,745, ligeiramente acima do limite de 0,743. O desvio no valor de consumo da ECU com E28 no ciclo FTP-75 é o segundo maior de todos os ensaios. O motivo da não ponderação entre as fases é pelo fato que o objetivo deste estudo é a verificação do desempenho do consumo de combustível com o veículo em funcionamento, não tem o intuito de gerar dados para compor o consumo conforme a regulamentação. O único ponto que poderia apresentar algum desvio, em função desta não ponderação, é a relação entre ciclo FTP-75 e RDE-U. O tempo de aquecimento é o mesmo para os dois, porém, a duração do circuito RDE é maior.

#### **4.4.9. Separação dos componentes do combustível**

Os principais componentes do combustível são calculados conforme a informação do sensor de etanol. Baseado na informação deste sensor, foi identificada uma quantidade de 28% de etanol na gasolina e 92% no ensaio com etanol, restando água e gasolina. Usando estes valores foram calculadas as proporções de gasolina e água. Na gasolina E28 o teor de água não é significativo, desta forma a divisão será somente entre os dois combustíveis. Para ambos combustíveis foi aplicada a Equação 16 (relação entre as densidades) para corrigir a massa de cada elemento conforme as densidades. Aplicando esta equação para o E28, a parcela de gasolina é de 71,12% e etanol 28,88% em relação à massa. Para o E92 as parcelas foram: 2,84% para gasolina, 90,93% para etanol e 6,23% de água. O consumo de combustível, em massa, por quilometro armazenado na ECU é apresentado na Figura 59, conforme o conceito do dispositivo OBFCM.

Figura 59 – Massa consumida de cada componente do combustível



Fonte: autor

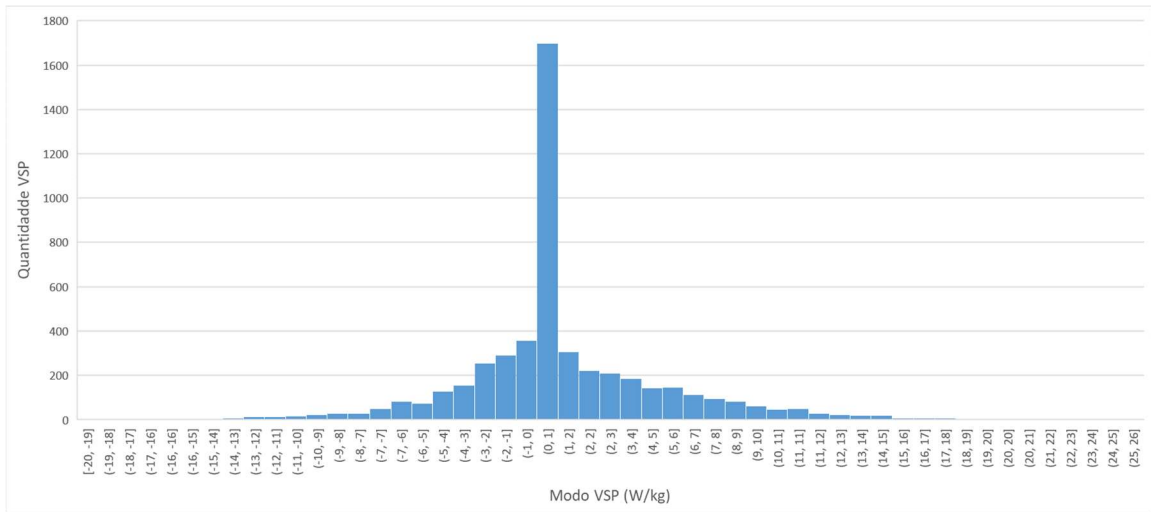
Estes valores são os combustíveis consumidos durante o uso do veículo, mas separados por fóssil e renovável. Este estudo apresentou o processo de monitoramento e armazenamento dos dados de consumo de combustível e o tipo de CO<sub>2</sub> será apresentado na seção 4.6. O consumo durante o ensaio RDE-U com E28, por exemplo, foi de 57,60g/km de gasolina de um total de 81,0 g/km. O mesmo ciclo com E92 teve somente 3,22 g/km de gasolina, 7,08 g/km de água e 103,34 g/km de etanol. A disponibilidade do etanol hidratado no Brasil permitiu os testes usando diferentes combinações de combustível fóssil e renovável.

#### 4.5 – CONSUMO DE COMBUSTÍVEL POR MEIO DO MÉTODO VSP

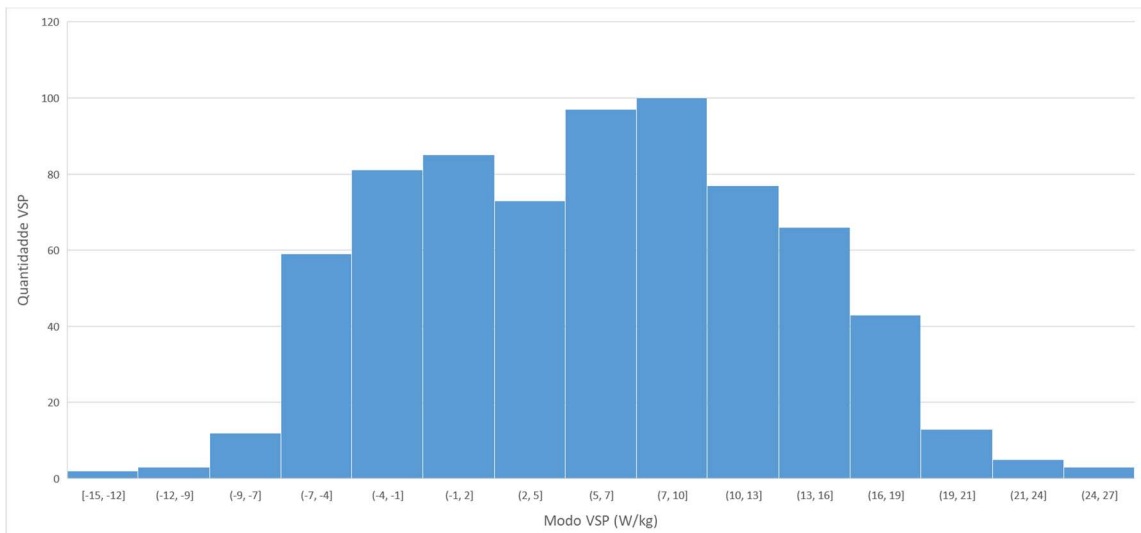
Conforme proposto no capítulo 3 deste estudo, o VSP foi utilizado para comparar com o consumo de combustível obtido por meio da largura do pulso do injetor. O primeiro passo foi o cálculo do VSP, conforme a Equação 2, dos dois ensaios RDE. A Figura 60 apresenta os modos VSP no circuito completo com gasolina E28, circuito urbano, rural e total, a, b e c, respectivamente.

Figura 60 – Distribuição dos modos VSP no circuito RDE com E28

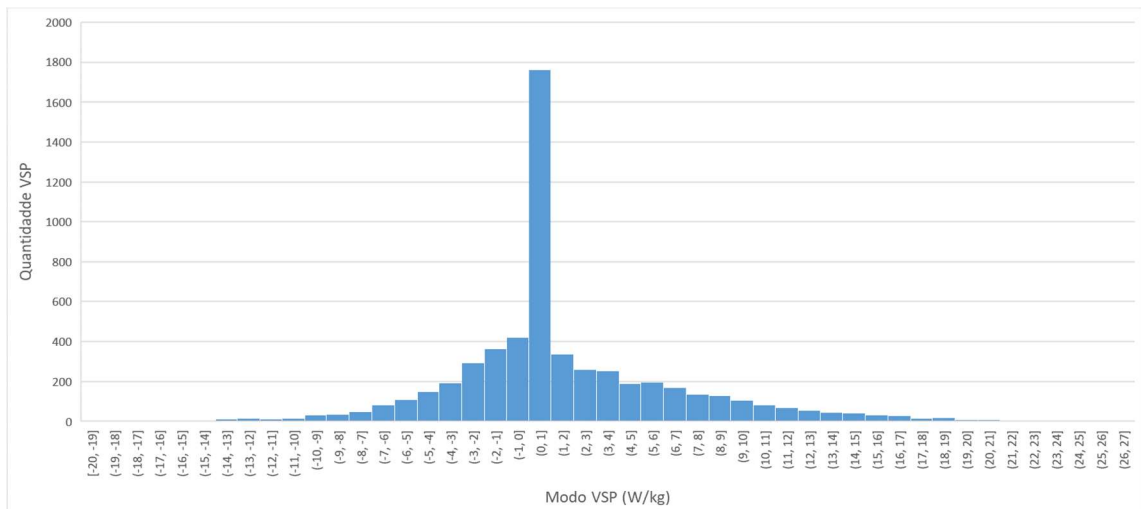
(a) Urbano



(b) Rural



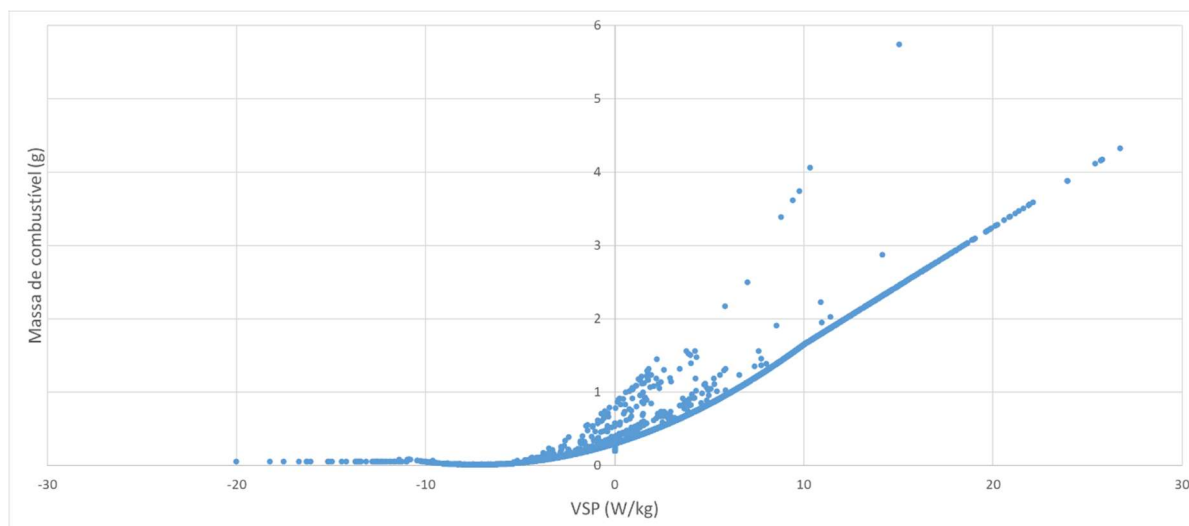
(c) Circuito completo



Fonte: Autor

Após calcular o valor VSP, a Equação 28 foi utilizada para converter os valores de VSP para a massa de combustível e a Equação 29 para ajustar a correção em função da temperatura. O cálculo da curva de consumo é dividido em três segmentos, além do VSP zero. A equação e os dados iniciais foram baseados no estudo de (DUARTE et al., 2015), porém estes foram calibrados para o veículo usado nos testes deste estudo, que segue a regulamentação Brasileira, com o uso do combustível local que possui etanol na composição. Desta forma os valores foram ajustados para identificar a máxima linearidade entre as três curvas de consumo e o valor identificado no ensaio RDE alinhou os três segmentos. Estes fatores serão apresentados mais adiante, nesta seção, para cada combustível. Os valores de VSP para troca das curvas ocorreram nas faixas: abaixo de -10; entre -10 e 10; acima de 10; e zero (DUARTE et al., 2015). A curva de massa consumida em relação ao valor VSP ajustada para o ensaio deste estudo é apresentada na Figura 61. Os pontos fora da curva principal representam a massa de combustível com o motor frio. O fator de correção em função da temperatura apresenta valores igual ou maior que 1, portanto, valores abaixo de 1 no cálculo são igualados a 1 para não haver distorção do consumo com o motor aquecido.

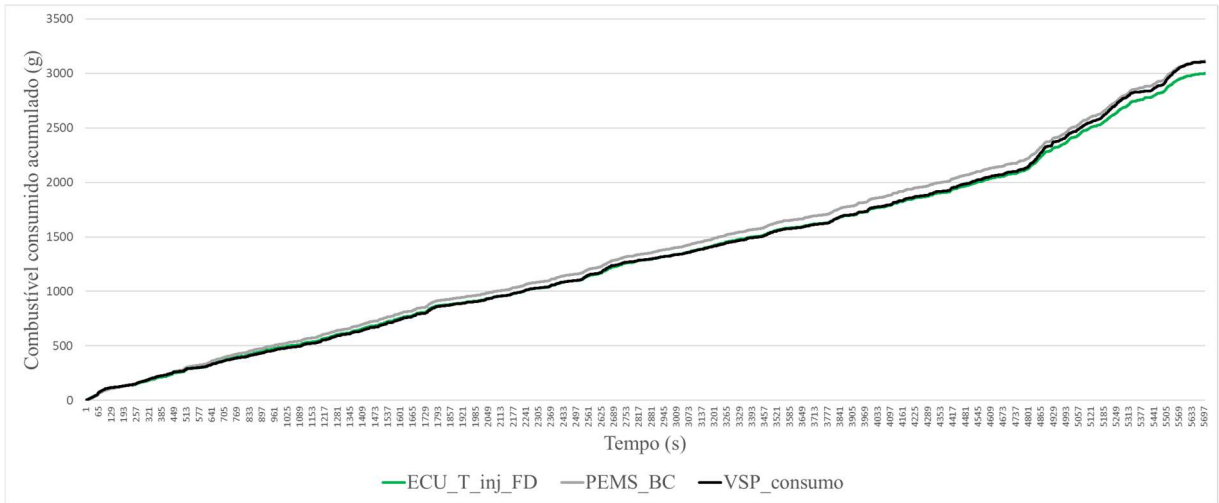
Figura 61 – Massa de combustível por modo VSP com E28



Fonte: Autor

Ajustado os fatores de consumo do VSP, os parâmetros de consumo estão ordenados conforme o circuito RDE. A Figura 62 apresenta o consumo acumulado no PEMS e os valores calculados pela ECU e VSP durante o trajeto urbano e rural com E28.

Figura 62 – Consumo de combustível acumulado pelo PEMS, ECU e VSP – E28



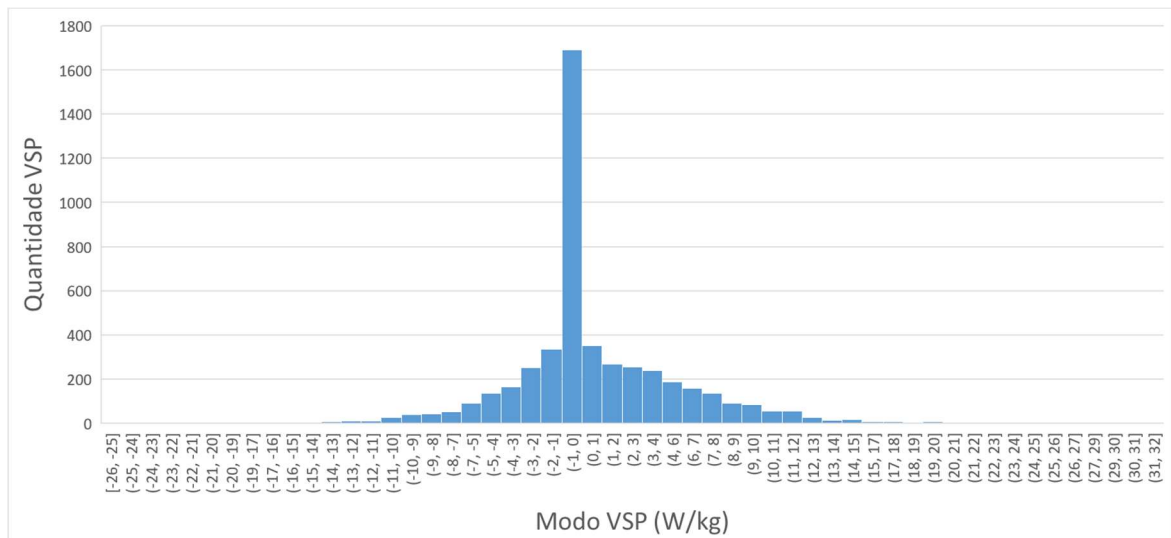
Fonte: Autor

O desvio do consumo acumulado VSP em relação ao PEMS, no circuito RDE com E28, foi de 1,65%. Apesar de menor divergência comparado com a ECU, como pode ser observado na Figura 66, no trecho rural o valor VSP apresentou inclinação acima dos demais métodos. Comparando o coeficiente de correlação do VSP com o PEMS foi de 0,811, enquanto a ECU teve um coeficiente de 0,842 em relação ao PEMS.

Analisando os parâmetros do teste em rodagem com etanol, temos na Figura 63 os modos VSP no ensaio com combustível E92, separados em circuito urbano, rural e total, a, b e c, respectivamente.

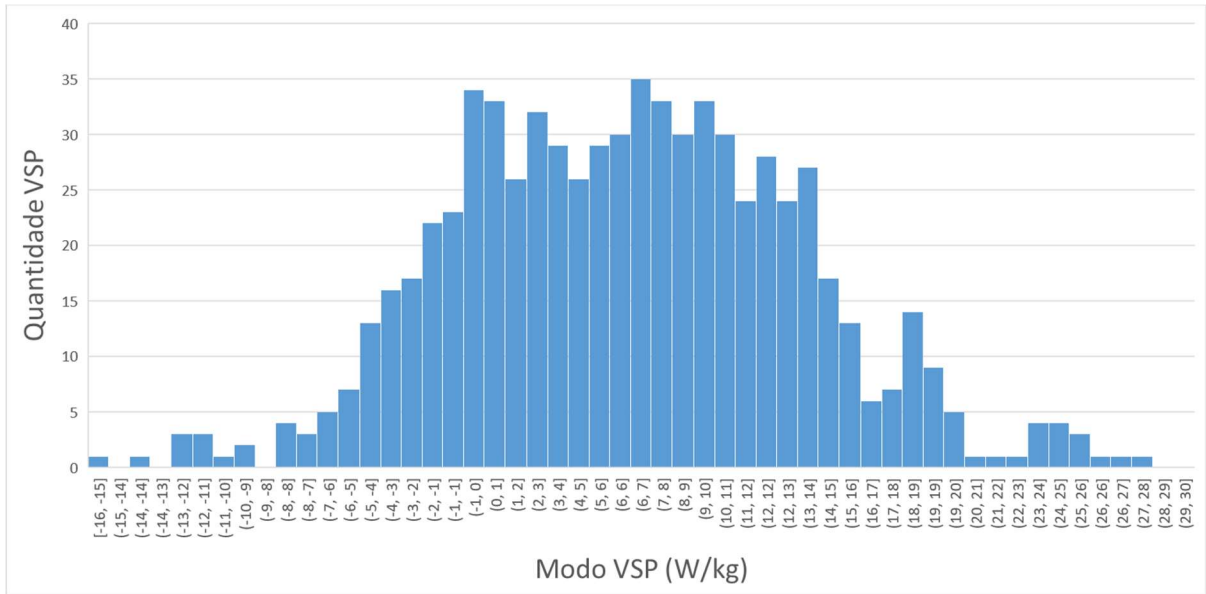
Figura 63 – Distribuição dos modos VSP no circuito RDE com E92

(a) Urbano

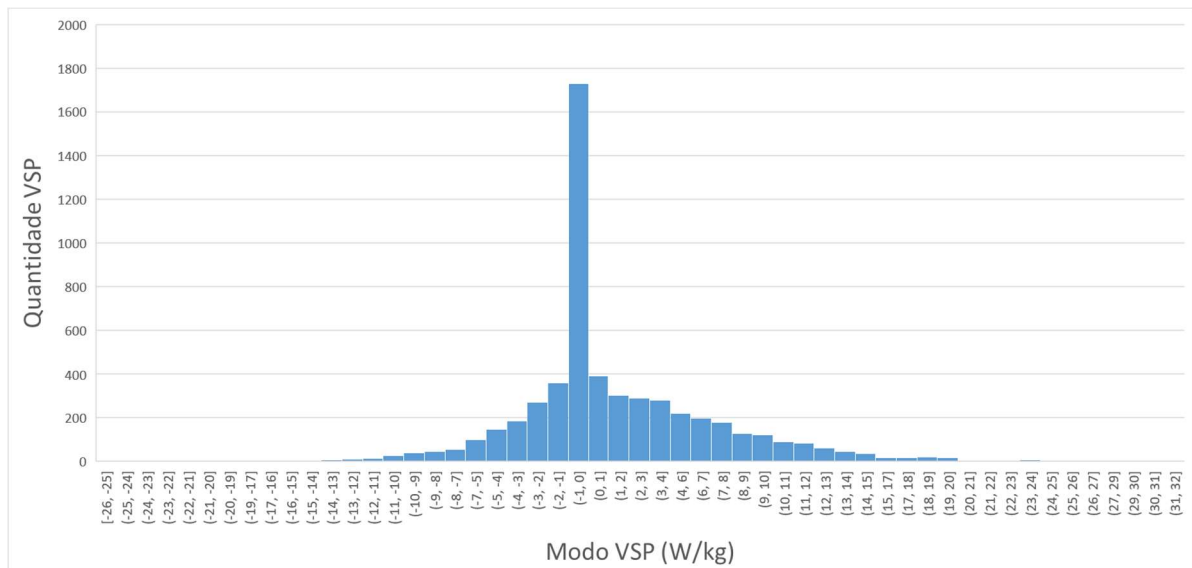




(b) rural



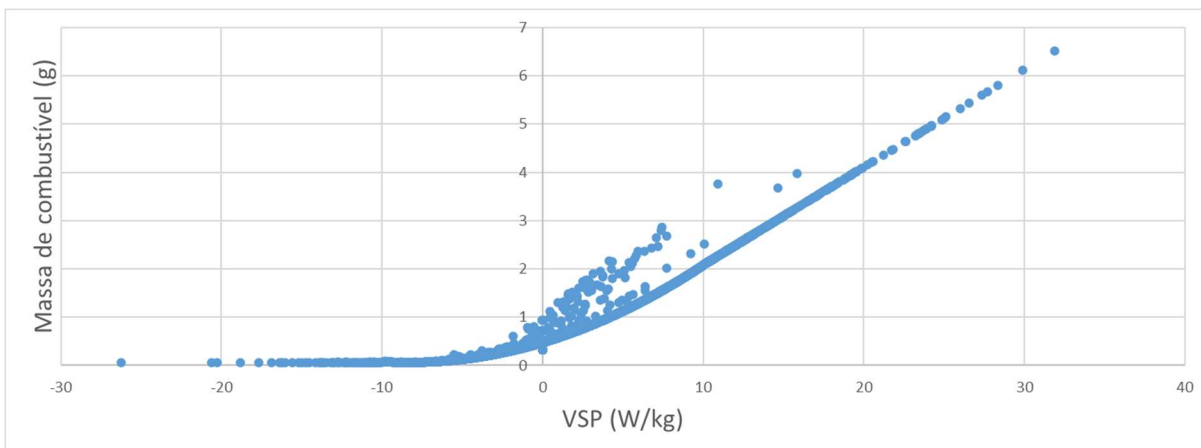
(c) Circuito completo



Fonte: Autor

A curva de massa de E92 consumida com base no modo VSP ajustada para o ensaio deste estudo é apresentada na Figura 64. Assim como na análise anterior, os pontos fora da curva principal representam a massa de combustível com o motor frio e o fator de correção em função da temperatura é igual ou maior que 1.

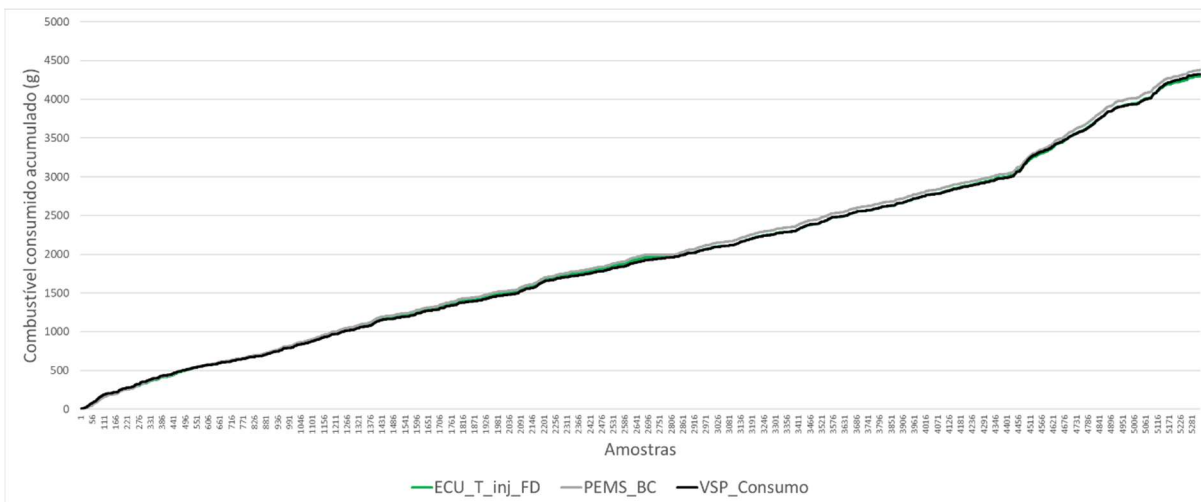
Figura 64 – Massa de combustível por modo VSP com E92



Fonte: Autor

A Figura 65 apresenta o consumo no PEMS e os valores calculados pela ECU e VSP, acumulados conforme sequência do ensaio RDE que engloba as rotas urbana e rural.

Figura 65 – Consumo de combustível acumulado pelo PEMS, ECU e VSP – E92



Fonte: Autor

O desvio do consumo acumulado VSP em relação ao PEMS, no circuito RDE com E92, foi de 1,21%. Apesar de menor divergência comparado com a ECU, como pode ser observado na Figura 69, no trecho rural o valor VSP apresentou elevação acima dos demais métodos. Comparando o coeficiente de correlação do VSP com o PEMS foi de 0,858, enquanto a ECU teve um coeficiente de 0,886 em relação ao PEMS.

A calibração das curvas VSP foram feitas a partir de ajustes dos parâmetros da equação VSP. Os valores foram calibrados para o melhor ajuste entre as três curvas e o posteriormente consumo foi avaliado. Estão valores estão consolidados no Tabela 12.

Tabela 12 – Valores das variáveis do cálculo de consumo VSP por combustível

Variáveis	a	b	c	d	f	m	$\delta$
E28	0,0055	0,08	0,300	0,05	0,05	0,160	0,664
E92	0,0060	0,10	0,475	0,05	0,05	0,203	0,664

Fonte: autor, baseado em (DUARTE et al., 2015)

O valor de  $\delta$  varia entre veículo com ou sem *start stop*. O veículo usado neste estudo não era equipado com esta tecnologia, caso contrário usaria o valor de 0,330 para esta variável (DUARTE et al., 2015).

O objetivo deste estudo é o inventário *onboard* de consumo de combustível. O método VSP apresenta bom desempenho no monitoramento de consumo, mas para aplicação em monitoramento de consumo demandaria um sensor de inclinação para identificar a topografia da via, o qual gera custo para a sua aplicação embarcada. O consumo baseado no tempo de injeção de combustível utiliza sensores existentes, portanto, sem custo adicional para peças, somente o software para a realização dos cálculos. A aplicação do cálculo de consumo por meio do VSP também demandaria uma interpolação das variáveis da equação VSP entre etanol e gasolina.

#### 4.6 – EMISSÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO NO ESCAPAMENTO

Apesar da correlação do CO entre os instrumentos apresentar valor dentro do tolerado, o valor emitido no ensaio com gasolina superou em mais de 17 vezes o limite para homologação na fase 5 do PROCONVE (CONAMA, 2002). Com etanol este valor foi menor, mesmo assim superou o limite em mais de cinco vezes. Os valores de HC e THC ficaram próximos ao padrão de emissão para este tipo de motorização, portanto somente o CO será objeto de análise nesta seção. Desta forma, se faz necessária uma análise da proporção teórica em função da combustão incompleta apresentada pelo veículo de teste durante os ensaios FTP-75, com E28 e E92. O esquema geral da combustão incompleta com gasolina está composto conforme Equação 49:



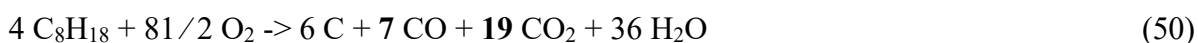
O carbono elementar representa a emissão de fuligem, que nesta proporção foi feito pelo balanceamento, uma vez que as emissões de particulado não foi medida por não fazer parte do método deste estudo. Para calcular as emissões de GEE são usados valores da composição química dos combustíveis e as emissões esperadas. Como as emissões do veículo de teste apresentaram combustão incompleta, os valores foram acima do usual para o padrão

tecnológico do motor usado, de forma que a análise química das emissões precisou ser ajustada para avaliar o teor de GEE emitido. O valor total emitido de CO somou 601,5 gramas, com gasolina E28, enquanto o CO<sub>2</sub> somou 2569,1 gramas nas três fases do ciclo FTP-75. Dividindo estes valores com a massa molecular de CO, 28 g/mol, e CO<sub>2</sub>, 44 g/mol, chegamos aos valores de 21,5 mol de CO e 58,4 mol de CO<sub>2</sub>. Logo, a relação entre CO<sub>2</sub> e CO é de 2,72, que nas condições identificadas no ensaio, a cada mol de CO gerado temos 2,72 mol de CO<sub>2</sub>. Para atingir o balanceamento da reação foi feito o ajuste por meio de números inteiros, nas seguintes proporções:

1 mol de CO -> 2,72 mol de CO<sub>2</sub>

7 mol de CO -> 19 mol de CO<sub>2</sub>

Essa relação resultou no balanço químico da combustão com as seguintes proporções apresentadas na Equação 50:



Com base nas massas moleculares de cada componente temos as seguintes massas, respectivamente:

456g + 1296g -> 72g + 196g + 836g + 648g

De acordo com a massa encontrada de cada componente, o caminho inverso é feito com base na massa de CO, com a seguinte relação:

601,5 g de CO x 836 g de CO<sub>2</sub> = 2565 g de CO<sub>2</sub>

196 g de CO

O valor medido foi de 2569,1 g contra 2565 g com base no cálculo, o qual não tinha o valor de medição de fuligem, portanto podendo ser um dos motivos desta variação. Fazendo a relação dos valores de C e CO<sub>2</sub> com quatro (4) vezes o combustível resulta em um fator de emissão de massa de CO<sub>2</sub> de 1,991. Este valor é o resultado da seguinte relação:

72 g de C + 836 g de CO<sub>2</sub> = 1,991 g de CO<sub>2</sub> por grama de combustível consumido

456 g de C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>

O esquema geral da combustão incompleta para a medição com etanol E92 está composto conforme Equação 51:



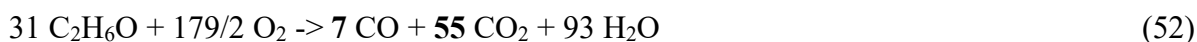
Nesta combustão foi considerado que não ocorreu a emissão de fuligem, assim o carbono simples não está presente no cálculo. Seguindo com a mesma análise para o etanol, o volume de CO emitido no laboratório somou 237,1 gramas, enquanto o CO<sub>2</sub> somou 2929,6 gramas nas três fases do ciclo FTP-75. Dividindo estes valores com a massa molecular de CO, 28 g/mol, e CO<sub>2</sub>, 44 g/mol, chegamos aos valores de 8,47 mol de CO e 66,58 mol de CO<sub>2</sub>. Logo,

a relação entre CO<sub>2</sub> e CO é de 7,86, que nas condições identificadas no ensaio, a cada mol de CO gerado temos 7,86 mol de CO<sub>2</sub>. Para atingir o balanceamento da reação foi feito o ajuste por meio de números inteiros, nas seguintes proporções:

1 mol de CO -> 7,86 mol de CO<sub>2</sub>

7 mol de CO -> 55 mol de CO<sub>2</sub>

Neste ensaio o balanço químico da combustão apresentou as seguintes proporções apresentadas na Equação 52:



Com base nas massas moleculares de cada componente temos as seguintes massas, respectivamente:

1426g + 2864g -> 196g + 2420g + 1674g

De acordo com a massa encontra de cada componente, o caminho inverso é feito com base na massa de CO, com a seguinte relação:

237,15 g de CO x 2420 g de CO<sub>2</sub> = 2928 g de CO<sub>2</sub>

196 g de CO

O valor medido foi de 2929,6 g contra 2928 g com base no cálculo, o qual considera as emissões sem a presença de fuligem, porém o combustível com teor de 92% de etanol no combustível com 3% de gasolina, o que pode ser um dos motivos desta pequena variação.

Com base no mesmo conceito, a relação entre CO<sub>2</sub> e o combustível tem um fator da massa de CO<sub>2</sub> 1,697. Este valor é o resultado da seguinte relação:

2420 g de CO<sub>2</sub> = 1,697 g de CO<sub>2</sub> por grama de etanol consumido

1426 g de C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O

Foram feitas as proporções para cada um dos combustíveis, considerando a parcela de cada elemento. Para a gasolina a proporção em massa é de 71% da gasolina e 29% para etanol, o que resulta em um fator de massa para CO<sub>2</sub> 1,9059. Para o etanol a composição em massa é de 3% para gasolina e 91% para etanol, ficando de fora os 6% da água. Esta relação resulta em um fator para a massa de CO<sub>2</sub> de 1,6040. Estes fatores foram aplicados na massa de combustível da ECU para se chegar ao valor de emissão de CO<sub>2</sub>. Os valores de referência foram as emissões de CO<sub>2</sub> medidas em laboratório. Os valores de inventário de CO<sub>2</sub> emitido com cada um dos combustíveis são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Inventário de CO<sub>2</sub> da ECU para combustão incompleta

Combustível	LAB	ECU		
	CO2 medido[g]	Combust. [g]	Invent. CO2 [g]	Diverg. [%]
E28	2569,1	1351,68	2576,19	-0,28%
E92	2929,6	1834,18	2942,13	-0,39%

Fonte: autor

Este cálculo se aplica para motores que apresentam a combustão incompleta. A identificação desta irregularidade da combustão não foi o objeto deste estudo, mas leva em consideração que este tipo de problema altera os valores dos elementos emitidos no escapamento do veículo. Como proposta para outros estudos, sugere-se a identificação desta variação por meio da eficiência medida entre as sondas de oxigênio, antes e após o catalisador. Também poderia combinar com o uso de sonda de banda larga.

Nos ensaios RDE a massa de CO também foi acima do valor esperado para o padrão tecnológico do veículo de teste. Visando apresentar os valores de CO<sub>2</sub> emitido dos ensaios em rodagem e laboratório será considerado nesta análise o motor com a combustão completa, o que considera o valor de CO<sub>2</sub> predominante e os componentes restantes de CO e THC com níveis proporcionalmente muito inferiores ao dióxido de carbono. O resultado em gCO<sub>2</sub>/km está baseado na massa de combustível consumida. O teor de CO em relação ao valor de CO<sub>2</sub> não será considerado nesta abordagem em função de se tratar de uma análise de consumo de combustível e respectiva emissão de CO<sub>2</sub>. Os valores de CO<sub>2</sub> por grama de cada combustível estão na seção 3.4.4. A massa consumida de cada combustível foi multiplicada pela massa de CO<sub>2</sub> do combustível puro, portanto, gasolina pura e etanol anidro, conforme valores apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Emissão de CO<sub>2</sub> por combustível em diversos ciclos – combustão completa

Ciclo	Emissão de CO <sub>2</sub> [g/km]		
	Gasolina	Etanol	Total
FTP-75 E28	167,13	42,05	209,18
RDE-U E28	177,87	44,75	222,62
FTP-75 E92	9,07	180,01	189,09
RDE-U E92	9,97	197,71	207,67
HWFET E28	96,44	24,26	120,71
RDE-R E28	109,78	27,62	137,41
HWFET E92	5,90	117,00	122,89
RDE-R E92	6,18	122,60	128,78

Fonte: autor

Os valores de consumo para o ciclo FTP-75 não ponderaram as 3 fases em função de comparar com o ciclo RDE, que tem fase única e iniciou também com partida a frio.

#### 4.7 – PADRONIZAÇÃO PARA MEDIÇÃO ONBOARD DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

Devido às divergências identificadas ao longo das últimas décadas entre consumo de combustível oficial e o real, com tendência de continuar o aumento dessas diferenças, a regulamentação tem atuado no sentido de monitorar estas variações. Foi estabelecido pela norma *Society of Automotive Engineers* (SAE) um padrão para disponibilizar a informação de vazão de combustível, conforme descrito na norma dos EUA SAE J1979DA, com endereçamento para o envio de dados via comunicação OBD. A comunidade europeia também regulamentou o conceito de medição de consumo também visando monitorar o valor real de consumo dos veículos, por meio do dispositivo OBFCM (DORNOFF, 2019). O monitoramento do consumo de combustível em condição de rodagem permitirá a comparação com os valores identificados nos ensaios de homologação. Estes parâmetros servem para acompanhar o desempenho real dos veículos e identificar algum desvio no consumo que demande ajustes.

Estas informações são acessadas por meio de comunicação OBDII, para uso de fabricantes e órgãos de controle de emissões para o mapeamento da situação real do consumo de combustível. As informações estão no anexo G da referida norma, e tratam dos dados de operação do veículo sobre o combustível consumido (L) e a distância (km), os quais são enviados por bit, de forma a compor o volume consumido e a distância total (SAE, 2017).

Para acesso aos dados armazenados na ECU dos veículos poderiam seguir duas possibilidades: inspeção veicular ou OBD III. A primeira depende da implementação nacional da inspeção veicular, conforme resolução 716 de 2017 do CONTRAN (CONTRAN, 2017), porém ainda não iniciada. A introdução do monitoramento via OBD III demandaria o ajuste da regulamentação para a coleta de dados dos veículos sem caracterizar rastreamento. Isso poderia ser feito por meio de pórticos instalados nas vias e rodovias e coletados conforme o período de licenciamento do veículo.

#### 4.8 - CONSIDERAÇÕES SOBRE OS MÉTODOS DE CONSUMO E EMISSÕES

Os métodos utilizados para a medição de consumo e emissões apresentam vantagens e limitações de acordo com os parâmetros que podem ser levantados com cada um destes. Conforme testes realizados por Zhang et al., (2014) foi identificada divergência entre os valores de consumo de combustível em rodagem pelo método VSP e o ensaio oficial, o que pode levar a maior dificuldade para a tomada de decisão dos legisladores. Uma das propostas é o uso do ciclo WTLP que deve reduzir esta divergência (ZHANG et al., 2014), mas para Duarte, Gonçalves e Farias (2016) os resultados do ciclo WTLP demandam melhorias em algumas faixas do ensaio visando detectar melhor algumas tecnologias, resultando em prós e contras em relação ao NEDC. A metodologia VSP que prevê o impacto de consumo energético *on-board*, permite complementar os ensaios de laboratório e assim reduzir a diferença para a condição *real-world* de rodagem (DUARTE et al., 2015). Por outro lado, os valores de CO<sub>2</sub> consolidados em medições de rodagem sem ciclo padrão, pelo método VSP, apresentam variações nos resultados, apontando o efeito da realização de medições sem um ciclo bem definido. Os valores obtidos de medições oficiais, conforme ciclo NEDC, evidenciam a linearidade dos resultados em função de seguir um ciclo padronizado (DUARTE; GONÇALVES; FARIAS, 2016). No modelo VSP desenvolvido por Wang et al. (2008), o menor consumo de combustível ficou entre 50 e 70 km/h, mas com elevação significativa em condições de aceleração. O comparativo realizado por Silva et al. (2006), entre os valores dos programas de simulação e as medições em rodagem, apresentou boa correlação nos valores de consumo de combustível e emissões de CO<sub>2</sub>, mas demonstrou limitação para os poluentes CO, HC e NO<sub>x</sub>.

Os estudos sobre consumo e emissões fazem ensaios com o motor geralmente aquecido, porém o consumo e emissões são elevados na fase fria. Este efeito ocorre principalmente em função da combustão parcial, devido a condensação de combustível em superfícies frias do motor, pela ineficiência do catalisador abaixo de 300°C e devido ao aumento do atrito durante o aquecimento dos lubrificantes (LEE; PARK; LEE, 2014; PARK et al., 2013). A adição de etanol à gasolina melhora as emissões durante a fase fria do motor, e a avaliação final destes experimentos aponta a melhoria mais significativa com o combustível G20 (20% de etanol), por melhorar a combustão em função do oxigênio adicional, além da volatilidade contribuir na vaporização do combustível durante esta fase, reduzindo ambos, CO e HC na fase fria (IODICE et al., 2016)

Diante de diversas análises em métodos e modelos para quantificar o consumo de combustível e as emissões dos automóveis, algumas limitações foram identificadas. Por



exemplo, quando comparados os valores do COPERT com PEMS, algumas divergências devem ser destacadas. O uso de somente um veículo pode gerar divergência dos valores de consumo de combustível além da ausência de padrão tecnológico veicular na base de dados do programa. Além desse fator, a classificação de tamanho de motores deste programa pode ficar distorcida pelo efeito de *downsizing* dos motores atuais. Para refletir melhor o padrão de desvio do COPERT, existe a necessidade ensaios em grande quantidade de veículos com o mesmo padrão tecnológico (KOUSOULIDOU et al., 2013), como forma de propor correções nos parâmetros dos programas (FONTARAS et al., 2014).

O método VSP apresenta algumas limitações, em função de alguns regimes que podem afetar a precisão dos resultados, como: a precisão em acelerações curtas e teste em subidas, variações elevadas da velocidade média, condições climáticas, a composição química do combustível, o uso de ar condicionado e por fim, o estado de conservação dos veículos usados no estudo (ZHANG et al., 2014).

Diante das limitações nos métodos para a medição de consumo de combustível e respectivas emissões apontado por outros estudos, o método apresentado neste estudo oferece uma forma de medição que assegura o inventário do combustível consumido, sem o investimento em componentes ou sensores no veículo. O conceito apresentado neste estudo identificou a necessidade de melhorias nos fatores de correção da vazão do injetor na fase fria e em condições de carga mais elevada. O objetivo proposto foi atingido e abre caminho para mais investigações nesta linha de pesquisa para que o inventário de combustível e, por consequência o CO<sub>2</sub> emitido, seja monitorado de uma forma mais ostensiva. Desta forma as políticas públicas terão subsídios para a tomada de decisão e melhor direcionamento dos recursos nas áreas que demandarem melhoria nas tecnologias e métodos aplicados nos automóveis no sentido de reduzirem o impacto ambiental.

Os valores identificados pela medição deste método e modelo de acesso aos dados de consumo permitirá identificar os diferentes níveis de eficiência energética dos veículos em condições reais. Estes valores permitem analisar a eficiência de cada tecnologia (SALVO JR; ALMEIDA, 2019), que afeta o consumo de combustível, bem como efeitos do comportamento dos condutores sobre o desempenho energético do veículo (RODRÍGUEZ et al., 2016; SENTOFF; AULTMAN-HALL; HOLMÉN, 2015). Além destes fatores, sobre o comportamento dos condutores e efeito das tecnologias, os parâmetros de homologação poderão ser comparados para identificar o comportamento do veículo fora do laboratório.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nas últimas décadas diversos estudos e desenvolvimentos foram realizados no sentido de reduzir o impacto ambiental em relação às emissões GEE. Neste estudo foi realizada uma série de testes sobre o consumo de combustível com base na largura do pulso do injetor. A primeira fase ocorreu antes da qualificação, por meio de ensaios com a rotação estabilizada. A variação da rotação em torno do torque máximo demonstrou a resposta de eficiência em diferentes condições. A medição em rotação estabilizada permitiu verificar o comportamento do motor dentro de cada regime de forma a mapear a resposta de consumo. O primeiro cálculo realizado foi o valor da taxa de vazão para cada combustível de forma a identificar o parâmetro de consumo do injetor do veículo testado, em volume por segundo (ml/s). Com base nos resultados obtidos foram identificadas variações de vazão em cada regime. Para facilitar a análise dos dados foi feita uma tabela com os valores médios dos parâmetros em cada um dos nove regimes utilizados nos ensaios. Esta condição permitiu simular cálculos e combinações de parâmetros para facilitar o entendimento de relação entre os fatores envolvidos no fenômeno estudado.

Como a vazão do injetor apresentou variações em função da rotação e pressão do coletor de admissão foi investigado um modelo que considerasse estes parâmetros e outros relacionados com a variação da densidade do ar no coletor de admissão. O modelo apresentado utilizou os parâmetros de pressão do coletor e rotação do motor. Com base nos resultados deste cálculo foi aplicado um fator de correção, inversamente proporcional, de forma a compensar as variações do fluxo e pressão do ar no coletor de admissão. Estas medições permitiram ajustar o comportamento dinâmico do injetor e assim compatibilizar com variações que ocorrem no motor. Com base nestas verificações foi utilizado o parâmetro de vazão do injetor do veículo de teste e adicionado o fator dinâmico da vazão do injetor, em função das variações que ocorrem no coletor de admissão.

Em uma fase intermediária deste estudo, novos testes foram realizados para a aferição do método estabelecido na primeira fase, mas com o registro realizado pela unidade de controle de teste usado nos ensaios. Foram feitas verificações com rotação estabilizada e medições de consumo pelos métodos gravimétrico e de vazão de combustível. Desta forma, foi identificada a necessidade do cálculo dinâmico com base no *speed density*, porém sem o rendimento volumétrico. Além deste ajuste, o fator de correção do coeficiente SD foi alterado para etanol de 0,5 para 0,3. Estas melhorias foram identificadas por meio de ensaios FTP-75 com o motor aquecido, com o intuito de aferir o modelo de cálculo de consumo, bem como o desempenho

geral do método em um ciclo FTP-75. Estas medições serviram como refinamento para os ensaios finais, com instrumentos em laboratório e conforme padrão internacional.

As medições efetuadas nas fases inicial e intermediária deste estudo utilizaram um instrumento para a medição da vazão de combustível, porém, este operou no limite inferior da escala de medição. Para melhorar a precisão da medição de consumo, a fórmula do injetor do veículo do teste aplicada foi baseada em outro estudo. Assim, o consumo de combustível utilizou o cálculo da vazão do injetor e um fator de correção em função da variação da densidade dos fluidos no coletor de admissão. O valor identificado pelos instrumentos de medição do combustível consumido ficou na faixa intermediária entre os métodos de cálculo de consumo estático e dinâmico.

Os testes finais contaram com instrumentos de maior precisão, como o laboratório de emissões e o sistema portátil de medição das emissões, PEMS, os quais permitiram a verificação do método e a execução de ajustes nestes. Uma nova equação para a dinâmica do injetor foi desenvolvida e assim o modelo proposto neste estudo atendeu na maioria dos ensaios o limite definido pela legislação europeia, conforme padrões estabelecidos para o dispositivo OBFCM. Os resultados identificados nas medições em laboratório e com o uso do PEMS indicaram o nível de precisão deste estudo e as variações entre os ensaios realizados.

Relacionando os resultados entre medições no laboratório e em rodagem apresentou uma taxa média de 0,921, indicando baixa diferença entre os valores em rodagem e dinamômetro. Os principais motivos da baixa diferença foi a baixa inclinação das vias percorridas, ar condicionado desligado e baixo limite de velocidade no circuito urbano. Relacionando os dois combustíveis, a média foi de 0,703 que indica melhor combustão e desempenho para o etanol E92, em função da relação ficar acima da proporção energética dos combustíveis, que é de 0,673. Somente o ensaio HWFET com E28 apresentou desvio acima de 5% e, conseqüentemente, a relação este ensaio ficou fora da faixa do desvio padrão tanto entre ensaios quanto entre combustíveis. O método aplicado neste estudo permite ajustar o modelo matemático do veículo analisado para que o consumo de combustível aproxime ao máximo do valor real. Assim como foi ajustado o modelo matemático entre os ensaios com os instrumentos disponíveis e para a fase final com os instrumentos de alta precisão, esse ciclo de evolução pode ocorrer em uma nova avaliação de consumo de combustível.

O modelo proposto neste estudo demonstrou a funcionalidade de um monitoramento do consumo de combustível e respectivas emissões de CO<sub>2</sub> provenientes de combustíveis fósil e etanol. Como recomendação de política pública, o método de gravação dos dados de consumo e separação por tipo de combustível deveria fazer parte das informações da unidade de controle

do motor dos veículos. Estes dados devem ser disponibilizados por meio do protocolo padrão, OBDBr, de forma a viabilizar o acesso a estas informações. O método deve ser baseado na norma SAE J1979DA, a qual estabelece endereço de comunicação para transmitir os dados de consumo de combustível e distância percorrida.

Em 2019 iniciou a produção no Brasil do veículo da Toyota Corolla híbrido *flex-fuel*. Combina a motorização elétrica com o motor *flex*. O conceito proposto neste estudo poderia ser aplicado em veículo híbrido, mas o método desenvolvido é para o motor a combustão interna, o sistema elétrico não é objeto deste estudo. O intuito do monitoramento do consumo de combustível e emissões de CO<sub>2</sub> visa oferecer a disponibilidade desta informação como instrumento de transição da motorização SI para a eletrificação da frota de veículos. Desta forma este conceito pode ser aplicado em todos veículo com motor a combustão interna.

## 6 CONCLUSÕES

Conforme as emissões coletadas nos ensaios em laboratório e com o PEMS, o veículo apresentou valores elevados de poluentes, indicando combustão incompleta em função da calibração acadêmica da ECU utilizada nos testes. O valor de CO com E28 ficou em média 2,34 vezes acima das emissões com E92 que indica mistura rica com gasolina, confirmando as diferenças de consumo entre os combustíveis. A emissão de THC demonstrou a mesma tendência, mas com melhor desempenho para o etanol nos ensaios com alta velocidade. Nos mesmos ciclos o CO<sub>2</sub> com etanol foi melhor, por ter maior octanagem que resultou em desempenho superior em regimes com rotações mais elevadas do motor.

A informação de consumo armazenada na unidade de controle realizada neste estudo indicou as quantidades de massa de cada elemento do combustível. Por exemplo, no ensaio FTP-75 com gasolina E28, a massa de gasolina foi de 54,80 g/km do total de 77,06 g/km. No ensaio RDE-R com o mesmo combustível, o consumo foi de 49,99 g/km, sendo 35,56 g/km de gasolina e o restante foi combustível renovável. O uso do sensor de etanol permitiu separar cada elemento do combustível medido para indicar a parcela referente a água, a massa de combustível fóssil e a parcela de combustível renovável.

A análise do consumo de combustível por meio do método VSP indicou menor desvio do consumo e uma boa correlação com as medições com o PEMS. Como neste método são usados somente os dados de rotação, a fase fria precisou ser complementada. Foi adicionado um fator para corrigir o consumo em temperaturas abaixo de 66,7 °C. Sem este fator a curva de consumo apresenta um paralelismo ao consumo real, por este motivo foi adicionado no cálculo de consumo. Com esta correção, o método VSP apresentou desvio abaixo dos 5%, portanto atenderia os limites exigidos pela regulamentação europeia. Apesar da melhor precisão apresentada nos testes realizados, este método necessitaria de instrumentos no veículo para atender o cálculo VSP, o que representaria custo para o veículo.

Como análise final deste estudo, o método de monitoramento de consumo de combustível e respectivas emissões de CO<sub>2</sub> foi realizado conforme proposto. A vazão de combustível baseada na largura do pulso do injetor, e corrigido pelos parâmetros da dinâmica do coletor de admissão, adequaram a massa de combustível para uma condição mais representativa da realidade. Apesar de um dos ciclos de validação apresentar o desvio acima do limite de 5%, HWFET com E28, o método demonstrou uma estruturação que permite calibrar os valores monitorados ECU de maneira a se ajustar as diversas plataformas de veículos, bem como para diferentes motores. Desta forma, o dispositivo proposto neste estudo foi consolidado,

o qual registra na ECU a massa de cada tipo de combustível consumido ao longo da vida do veículo, com os respectivos valores de CO<sub>2</sub>, fóssil e renovável, emitidos para a atmosfera.

Como recomendação de política pública, este monitoramento deveria fazer parte da regulamentação Brasileira para OBDBr. Desta forma os dados ficariam armazenados e poderiam ser acessados no momento de uma eventual inspeção veicular ou com o uso do conceito OBD III, por meio de acesso remoto. Essa condição permitiria a geração de dados de consumo real, bem como das emissões de CO<sub>2</sub>, de forma a identificar o comportamento dos veículos em rodagem. Abriria uma nova modalidade para inventário, com maior precisão por monitorar o comportamento real do veículo e respectivo padrão tecnológico. Também contempla os valores da fase fria do motor, condições de marcha lenta, freio motor, dentre outros. Todos estes regimes monitorados permitiriam aumento significativo na precisão do inventário. O uso de um sensor de etanol aumenta a precisão de monitoramento da concentração de etanol, além da rápida identificação de troca de combustível.

Uma limitação do método fica por conta de o sensor de combustível identificar somente o etanol. Caso o combustível tenha mais água, o cálculo final irá considerar o carbono para a gasolina. Em função desta característica destes dispositivos, teria como proposta de trabalho futuro o desenvolvimento de um sensor que identifique ao menos dois elementos da composição do combustível Brasileiro. Outra limitação na medição do consumo foi pelo fato da unidade de controle não ter uma calibração voltada para a redução das emissões, o que dificultou a conversão do valor do combustível consumido em CO<sub>2</sub> emitido para a atmosfera. Este ajuste também pode ser objeto de um estudo futuro, aplicando a calibração das emissões em ciclo RDE, além de atender os limites estabelecidos conforme ciclos dinamométrico urbano e rodoviário.

A variação do valor de CO detectada poderia ser, em menor grau, algum problema no veículo que elevasse as emissões de gases tóxicos. Estas variações podem acontecer com um veículo em uso e poderia ser objetivo de estudo futuro, de forma a utilizar sensores existentes que identifiquem este comportamento. Para este tipo de estudo seria recomendado um veículo com o segundo sensor de oxigênio, pós catalisador, de forma a identificar a saturação do catalisador em função da elevação das emissões. Também seria recomendado o uso de sonda de banda larga para monitorar as emissões em faixas mais distantes da estequiometria.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. **NBR 6601 - Light duty road vehicles e determination of hydrocarbons, carbon monoxide, oxides of nitrogen, carbon dioxide and particulate matter in the exhaust gas.** ABNT - Brazilian Association of Technical Standards, 2012a.
- ABNT. **NBR 15634 - Road vehicles - Analysis and evaluation of exhaust gas according to ETC, ESC and ELR cycles** ABNT - Brazilian Association of Technical Standards, 2012b.
- ABNT. **NBR 7024 - Light duty road vehicles – Fuel consumption determination - Test method** ABNT - Brazilian Association of Technical Standards, 2017.
- ABNT. **NBR 10312 - Light duty road vehicles — Road load measurement and dynamometer simulation using coastdown techniques** Rio de Janeiro ABNT - Brazilian Association of Technical Standards, 2019.
- AKDAG, S.; HAKAN, Y. Toward a sustainable mitigation approach of energy efficiency to greenhouse gas emissions in the European countries. **Heliyon**, v. 6, n. October 2019, 2020.
- ALMEIDA, P. R. DE; NAKAMURA, A. L.; SODRÉ, J. R. Evaluation of catalytic converter aging for vehicle operation with ethanol. v. 71, p. 335–341, 2014.
- AMBARWATI, L. et al. The influence of integrated space-transport development strategies on air pollution in urban areas. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 44, p. 134–146, 2016.
- AMBROSE, H.; KENDALL, A. Effects of battery chemistry and performance on the life cycle greenhouse gas intensity of electric mobility. **Transportation Research Part D**, v. 47, p. 182–194, 2016.
- ANFAVEA. **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira**. São Paulo: [s.n.].
- ANP. **Resolution 764** Brazil National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels, , 2018.
- ATASHKARI, K. et al. Modelling and multi-objective optimization of a variable valve-timing spark-ignition engine using polynomial neural networks and evolutionary algorithms. **Energy Conversion and Management**, v. 48, n. 3, p. 1029–1041, 2007.
- BASTIN, C.; SZKLO, A.; ROSA, L. P. Diffusion of new automotive technologies for improving energy efficiency in Brazil ' s light vehicle fleet. **Energy Policy**, v. 38, n. 7, p. 3586–3597, 2010.
- BISHOP, J. D. K. et al. Engine maps of fuel use and emissions from transient driving cycles. **Applied Energy**, v. 183, p. 202–217, 2016.
- BOROUJENI, B. Y.; FREY, H. C. Road grade quantification based on global positioning system data obtained from real-world vehicle fuel use and emissions measurements. **Atmospheric Environment**, v. 85, p. 179–186, 2014.
- BOZEK, J. W. **Formation and Control of Combustion Pollutants From Gasoline-Fueled Spark-Ignition Motor Vehicle Engines**. Disponível em:  
 <<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/9100S4W0.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=1991+Thru+1994&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5Czyfiles%5CIndexData%5C91thru94%5Ctxt%5C00000025%5C9100S4W0.txt&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%7C->

&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=hpfr&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results page&MaximumPages=1&ZyEntry=1&SeekPage=x&ZyPURL>. Acesso em: 11 fev. 2020.

BRASIL, G. DO. **Governo estabelece adição de 27% de etanol na gasolina**. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/economia-e-emprego/2015/03/adicao-de-27-de-etanol-na-gasolina-e-estabelecida-pelo-governo>>. Acesso em: 6 jun. 2019.

BRAVO, D. M.; MEIRELLES, P. S. **An evaluation study on the use of an auxiliary electric powertrain in conventional vehicles : improvements in fuel consumption and acceleration performance**. ABCM International Congress of Mechanical Engineering December. **Anais...**Rio de Janeiro: 2015

BROATCH, A. et al. Definition of wind blowers for vehicles testing at chassis-dyno facilities using a CFD approach. **Transportation Research Part D**, v. 55, p. 99–112, 2017.

BRÖRING, A. et al. enviroCar : A Citizen Science Platform for Analyzing and Mapping Crowd-Sourced Car Sensor Data. **Transactions in GIS**, v. 19, n. 3, p. 362–376, 2015.

CASA CIVIL. **Decreto Nº 7.819, de 3 de outubro de 2012**. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/Decreto/D7819.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/Decreto/D7819.htm)>. Acesso em: 15 ago. 2015.

CHANG, X. et al. Estimating real-time traffic carbon dioxide emissions based on intelligent transportation system technologies. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 14, n. 1, p. 469–479, 2013.

CHARITOPOULOS, A. G. et al. Design Optimization of an Automotive Turbocharger Thrust Bearing Using a CFD-Based THD Computational Approach †. **Lubricants**, v. 6, p. 1–21, 2018.

CHOI, W.; HO, H. Well-to-wheel greenhouse gas emissions of battery electric vehicles in countries dependent on the import of fuels through maritime transportation : A South Korean case study. **Applied Energy**, v. 230, n. August, p. 135–147, 2018.

CHRISTENSEN, T. B.; WELLS, P.; CIPCIGAN, L. Can innovative business models overcome resistance to electric vehicles ? Better Place and battery electric cars in Denmark. **Energy Policy**, v. 48, p. 498–505, 2012.

CIRCABC. **Library/RDE-LDV**. Disponível em: <[https://circabc.europa.eu/webdav/CircaBC/GROW/wltp/Library/RDE-LDV/rde-ldv\\_reference](https://circabc.europa.eu/webdav/CircaBC/GROW/wltp/Library/RDE-LDV/rde-ldv_reference)>. Acesso em: 22 jul. 2019.

COMMISSION, E. **Regulation 2016/427 - Emissions from light passenger and commercial vehicles - Euro 6**Commission Regulation, 2016a.

COMMISSION, E. **Regulation 2016/646 - Emissions from light passenger and commercial vehicles - Euro 6**Commission Regulation, 2016b.

COMMISSION, E. **Regulation 2017/1154 - Type-approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on access to vehicle repair and maintenance information**Commission Regulation, 2017.

COMMISSION, E. **Regulation 2018/1832 - the purpose of improving the emission type approval tests and procedures for light passenger and commercial vehicles, including those for in-service conformity and real-driving emissions and introducing devices for monitoring the co**Commission Regulation, 2018.



CONAMA. **RESOLUÇÃO CONAMA 315**BrasilCONAMA, , 2002.

CONAMA. **Resolução 492 - Estabelece as Fases PROCONVE L7 e PROCONVE L8 de exigências do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE para veículos automotores leves novos de uso rodoviário**Brazil, 2018.

Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=742>>. Acesso em: 17 jan. 2020.

CONTINENTAL. **BRAZILIAN FLEX FUEL SENSOR (Br-FFS) SPECIFICATION**Auburn HillsContinental, 2014.

CONTRAN. **Estabelece a forma e as condições de implantação e operação do Programa de Inspeção Técnica Veicular**, 2017.

DENG, X. et al. Case Studies in Thermal Engineering Exhaust noise , performance and emission characteristics of spark ignition engine fuelled with pure gasoline and hydrous ethanol gasoline blends. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 12, n. February, p. 55–63, 2018.

DONATEO, T.; GIOVINAZZI, M. Buiding a cycle for Real Driving Emissions. **Energy Procedia**, v. 126, p. 891–898, 2017.

DONG, P. et al. Design and analysis of a novel multi-speed automatic transmission with four degrees-of-freedom. **Mechanism and Machine Theory**, v. 108, n. November 2016, p. 83–96, 2017.

DORNOFF, J. **ONE GOAL , MULTIPLE PATHWAYS : ON-BOARD FUEL CONSUMPTION METER DATA TO THE EUROPEAN COMMISSION**. [s.l: s.n.].

Disponível em:

<[https://theicct.org/sites/default/files/publications/OBFCM\\_data\\_transfer\\_20191022.pdf](https://theicct.org/sites/default/files/publications/OBFCM_data_transfer_20191022.pdf)>.

Acesso em: 05 nov. 2019.

DUARTE, G. O. et al. Establishing bonds between vehicle certification data and real-world vehicle fuel consumption - A Vehicle Specific Power approach. **Energy Conversion and Management**, v. 92, p. 251–265, 2015.

DUARTE, G. O.; GONÇALVES, G. A.; FARIAS, T. L. Analysis of fuel consumption and pollutant emissions of regulated and alternative driving cycles based on real-world measurements. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 44, p. 43–54, 2016.

EHSANI, M.; AHMADI, A.; FADAI, D. Modeling of vehicle fuel consumption and carbon dioxide emission in road transport. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 1638–1648, 2016.

EL-FAROUG, M. O. et al. Spark Ignition Engine Combustion , Performance and Emission Products from Hydrous Ethanol and Its. **Energies**, v. 9, n. 984, p. 24, 2016.

ETAS. **ASCET- Advanced Simulation and Control Engineering Tool**. Disponível em: <<https://www.etas.com/en/products/ascet-developer.php>>. Acesso em: 12 mar. 2020.

FENELEY, A. J.; PESIRIDIS, A.; MAHMOUDZADEH, A. Variable Geometry Turbocharger Technologies for Exhaust Energy Recovery and Boosting - A Review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 71, n. October 2016, p. 959–975, 2017.

FILHO, P. P. **Os Motores de Combustão Interna**. Belo Horizonte: [s.n.].

FONTARAS, G. et al. Development and review of Euro 5 passenger car emission factors based on experimental results over various driving cycles. **Science of the Total**

**Environment**, v. 468–469, n. 2014, p. 1034–1042, 2014.

FONTARAS, G.; ZACHAROF, N.-G.; CIUFFO, B. Fuel consumption and CO<sub>2</sub> emissions from passenger cars in Europe - Laboratory versus real-world emissions I. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 60, p. 97–131, 2017.

FRANCO, V. et al. Road vehicle emission factors development: A review. **Atmospheric Environment**, v. 70, p. 84–97, 2013.

GALLUS, J. et al. Impact of driving style and road grade on gaseous exhaust emissions of passenger vehicles measured by a Portable Emission Measurement System ( PEMS ). **Transportation Research Part D**, v. 52, n. 2, p. 215–226, 2017.

GASSER, I.; RYBICKI, M.; WOLLNER, W. Optimal control of the temperature in a catalytic converter. **Computers and Mathematics with Applications**, v. 67, n. 8, p. 1521–1544, 2014.

GIECHASKIEL, B. et al. Implementation of Portable Emissions Measurement Systems ( PEMS ) for the Real-driving Emissions ( RDE ) Regulation in Europe. n. December, p. 1–14, 2016.

GÖLCÜ, M. et al. Artificial neural-network based modeling of variable valve-timing in a spark-ignition engine. **Applied Energy**, v. 81, n. 2, p. 187–197, 2005.

GREENE, D. L. et al. How does on-road fuel economy vary with vehicle cumulative mileage and daily use ? **Transportation Research Part D**, v. 55, p. 142–161, 2017.

HO, S.; WONG, Y.; CHANG, V. W. Developing Singapore Driving Cycle for passenger cars to estimate fuel consumption and vehicular emissions. **Atmospheric Environment**, v. 97, p. 353–362, 2014.

HORIBA. **OBS-ONE-GS22**. Disponível em: <<https://www.horiba.com/br/automotive-test-systems/products/emission-measurement-systems/on-board-systems/details/obs-one-gs-unit-23645/>>. Acesso em: 12 mar. 2020.

HU, N.; YANG, J.; ZHOU, P. Sensitivity analysis of the dynamic response of an electronic fuel injector regarding fuel properties and operating conditions. **Applied Thermal Engineering**, v. 129, p. 709–724, 2018.

ICCT. **Light-Duty Vehicle Efficiency Standards Brazil. Factsheet**. [s.l: s.n.]. 2015.

ICCT. **CO<sub>2</sub> EMISSION STANDARDS FOR PASSENGER CARS AND LIGHT-COMMERCIAL VEHICLES IN THE EUROPEAN UNION**. [s.l: s.n.]. 2019.

IEA. **Energy Climate and Change: World Energy Outlook Special Report**. Paris: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2015SpecialReportonEnergyandClimateChange.pdf>>. Acesso em: 05 dez. 2015.

IEA. **Tracking Transport**. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/tracking-transport-2019>>. Acesso em: 25 abr. 2020.

İLHAK, M. İ. et al. Experimental study on an SI engine fueled by gasoline , ethanol and acetylene at partial loads. **Fuel**, v. 261, 2020.

IODICE, P. et al. Effect of ethanol – gasoline blends on CO and HC emissions in last generation SI engines within the cold-start transient : An experimental investigation. **Applied Energy**, v. 179, p. 182–190, 2016.

KIM, J.; KIM, K.; OH, S. An assessment of the ultra-lean combustion direct-injection LPG

(liquefied petroleum gas) engine for passenger-car applications under the FTP-75 mode. **Fuel Processing Technology**, v. 154, p. 219–226, 2016.

KIM, N.; CHO, S.; MIN, K. A study on the combustion and emission characteristics of an SI engine under full load conditions with ethanol port injection and gasoline direct injection. **Fuel**, v. 158, n. 2015, p. 725–732, 2015.

KIM, N.; LOHSE-BUSCH, H.; ROUSSEAU, A. Development of a model of the dual clutch transmission in autonomie and validation with dynamometer test data. **International Journal of Automotive Technology**, v. 15, n. 2, p. 263–271, 2014.

KÖCK, K. Real-World Fuel Consumption Measurement as the Base for the Compliance to Future CO<sub>2</sub> Regulations. **SAE Technical Papers**, p. 1–9, 2019.

KOUSOULIDOU, M. et al. Use of portable emissions measurement system ( PEMS ) for the development and validation of passenger car emission factors q. **Atmospheric Environment**, v. 64, p. 329–338, 2013.

LEE, Y. K.; PARK, J. I.; LEE, J. H. Analysis of the effect of cold start on fuel economy of gasoline automatic transmission vehicle. **International Journal of ...**, v. 15, n. 5, p. 709–714, 2014.

LI, Q. et al. Comparative study on the pumping losses between continuous variable valve lift (CVVL) engine and variable valve timing (VVT) engine. **Applied Thermal Engineering**, v. 137, n. August 2017, p. 710–720, 2018.

LI, Y. et al. Experimental comparative study on combustion , performance and emissions characteristics of methanol , ethanol and butanol in a spark ignition engine. v. 115, p. 53–63, 2017.

LIU, Y.; CIRILLO, C. Evaluating policies to reduce greenhouse gas emissions from private transportation. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 44, p. 219–233, 2016.

LOPES, A. et al. Economic-energy-environment analysis of prospective sugarcane bioethanol production in Brazil. **Applied Energy**, v. 181, p. 514–526, 2016.

MAGGIO, A. V. O. **Simulação hardware in the loop de um motor de combustão Flex**. [s.l.] Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2019.

MAHLIA, T. M. I.; TOHNO, S.; TEZUKA, T. A review on fuel economy test procedure for automobiles: Implementation possibilities in Malaysia and lessons for other countries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 6, p. 4029–4046, 2012.

MDIC-INMETRO. **Portaria 377, de 29 de setembro de 2011. Regulamento de Avaliação da Conformidade para Etiquetagem de Veículos Leves de Passageiros e Comerciais Leves com Motores de Ciclo Otto**. Brazil MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR; INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA, , 2011. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001739.pdf>>. Acesso em: 03 jun. 2016.

MDIC. **Portaria 74, de 26 de março de 2015. Regulamentação complementar do INOVARAUTO**. Brazil Ministry of Industry, Foreign Trade and Services, 2015. Disponível em: <<http://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=30/03/2015&jornal=1&pagina=130&totalArquivos=340>>. Acesso em: 27 set. 2018.

- MDIC. **Rota 2030 - Mobilidade e Logística**. Disponível em: <<http://www.mdic.gov.br/index.php/competitividade-industrial/setor-automotivo/rota2030>>. Acesso em: 25 abr. 2020.
- MELO, C. A. DE; JANNUZZI, G. D. M.; SANTANA, P. H. D. M. Why should Brazil to implement mandatory fuel economy standards for the light vehicle fleet? **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 1166–1174, 2018.
- MELO, T. C. C. DE et al. Hydrous ethanol – gasoline blends – Combustion and emission investigations on a Flex-Fuel engine. **Fuel**, v. 97, p. 796–804, 2012.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. CONAMA RESOLUÇÃO Nº 354, DE 13 DE DEZEMBRO DE 2004. **Resolução 354**, v. 2004, 2004.
- MOOS, R. Catalysts as Sensors—A Promising Novel Approach in Automotive Exhaust Gas Aftertreatment. v. 10, p. 6773–6787, 2010.
- MORGANTI, K. et al. Synergistic engine-fuel technologies for light-duty vehicles : Fuel economy and Greenhouse Gas Emissions. **Applied Energy**, v. 208, n. September, p. 1538–1561, 2017.
- MUNEER, T. et al. Energetic , environmental and economic performance of electric vehicles : Experimental evaluation. **Transportation Research Part D**, v. 35, p. 40–61, 2015.
- MUÑOZ, M. et al. Bioethanol Blending Reduces Nanoparticle, PAH, and Alkyl- and Nitro-PAH Emissions and the Genotoxic Potential of Exhaust from a Gasoline Direct Injection Flex-Fuel Vehicle. **Environmental science & technology**, v. 50, n. October, p. 11853–11861, 2016.
- NAPRO. **Analísadores de gases PC-Multigás**. Disponível em: <<http://www.napro.com.br/analísadores.html>>. Acesso em: 12 mar. 2020.
- NASCIMENTO, R. et al. Estimating gasoline performance in internal combustion engines with simulation metamodels. v. 193, p. 230–240, 2017.
- NOGUEIRA, L. A. H.; HOLLANDA, J. B. DE. **Reverendo a paridade entre etanol hidratado e gasolina em veículos flexíveis**. Disponível em: <[http://www.inee.org.br/down\\_loads/eficiencia/Paridade\\_EHE25\\_INEE.pdf](http://www.inee.org.br/down_loads/eficiencia/Paridade_EHE25_INEE.pdf)>. Acesso em: 24 abr. 2020.
- NRC. **Cost, Effectiveness and Deployment of Fuel Economy Technologies for Light-Duty Vehicles**. Washington, DC: THE NATIONAL ACADEMIES PRESS, 2015.
- OH, C.; CHA, G. IMPACT OF FUEL, INJECTION TYPE AND AFTER-TREATMENT SYSTEM ON PARTICULATE EMISSIONS OF LIGHT-DUTY VEHICLES USING DIFFERENT FUELS ON FTP-75 AND HWFET TEST CYCLES. **International Journal of Automotive Technology**, v. 16, n. 6, p. 895–901, 2015.
- OH, Y. et al. Modeling effects of vehicle specifications on fuel economy based on engine fuel consumption map and vehicle dynamics. **TRANSPORTATION RESEARCH PART D**, v. 32, n. 2014, p. 287–302, 2014.
- OH, Y. et al. Development strategies to satisfy corporate average CO<sub>2</sub> emission regulations of light duty vehicles (LDVs) in Korea. **Energy Policy**, v. 98, p. 121–132, 2016a.
- OH, Y. et al. Development strategies to satisfy corporate average CO<sub>2</sub> emission regulations of light duty vehicles ( LDVs ) in Korea. **Energy Policy**, v. 98, p. 121–132, 2016b.
- OLMOS, A. et al. Emissions, fuel economy and energy consumption of a flex fuel vehicle in

different driving cycles. **SAE Technical Paper Series**, v. 1, 2019.

PADALA, S. et al. Imaging diagnostics of ethanol port fuel injection sprays for automobile engine applications. **Applied Thermal Engineering**, v. 52, n. 1, p. 24–37, 2013.

PALENCIA, J. C. G.; ARAKI, M.; SHIGA, S. Energy , environmental and economic impact of mini-sized and zero-emission vehicle diffusion on a light-duty vehicle fleet. **Applied Energy**, v. 181, p. 96–109, 2016.

PARK, M. et al. Study on the improvement in continuously variable transmission efficiency with a thermal management system. **Applied Thermal Engineering**, v. 61, p. 11–19, 2013.

PASSARINI, L.; NAKAJIMA, P. Development of a high-speed solenoid valve: an investigation of the importance of the armature mass on the dynamic response. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. XXV, n. 4, p. 329–335, 2003.

PATHAK, S. K. et al. Real world vehicle emissions : Their correlation with driving parameters. **Transportation Research Part D**, v. 44, p. 157–176, 2016.

PAVLOVIC, J. et al. How much difference in type-approval CO<sub>2</sub>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**, v. 111, n. February, p. 136–147, 2018.

PETROBRAS/CONPET. **Petrobras aprimora versão do aplicativo gratuito do CONPET com consumo de combustível de automóveis**. Disponível em: <[http://www.conpet.gov.br/portal/conpet/pt\\_br/noticia/petrobras-aprimora-versao-do-aplicativo-gratuito-do-conpet-com-consumo-de-combustivel-de-automoveis.shtml](http://www.conpet.gov.br/portal/conpet/pt_br/noticia/petrobras-aprimora-versao-do-aplicativo-gratuito-do-conpet-com-consumo-de-combustivel-de-automoveis.shtml)>. Acesso em: 7 jun. 2016.

PLOTKIN, S. E. Examining fuel economy and carbon standards for light vehicles. **Energy Policy**, v. 37, n. 10, p. 3843–3853, 2009.

POSADA, F.; FAÇANHA, C. **Brazil Passenger Vehicle Market Statistics - International comparative assessment of technology adoption and energy consumption ICCT - International Council on Clean Transportation**. Washington DC: [s.n.]. Disponível em: <[http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/Brazil PV Market Statistics Report.pdf](http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/Brazil_PV_Market_Statistics_Report.pdf)>. Acesso em: 04 de jan. de 2016.

POURESMAEILI, M. A.; AGHAYAN, I.; TAGHIZADEH, S. A. Development of Mashhad driving cycle for passenger car to model vehicle exhaust emissions calibrated using on-board measurements. **Sustainable Cities and Society**, v. 36, n. September 2017, p. 12–20, 2018.

PUJADAS, M.; DOMÍNGUEZ-SÁEZ, A.; DE LA FUENTE, J. Real-driving emissions of circulating Spanish car fleet in 2015 using RSD Technology. **Science of the Total Environment**, v. 576, p. 193–209, 2017.

RAJAN, R. S. et al. On Board Diagnostics (OBD) for Multi Topology Hybrid Electric Powertrain Architectures. **SAE Technical Papers**, p. 1–13, 2018.

RODRÍGUEZ, R. A. et al. Influence of driving patterns on vehicle emissions : A case study for Latin American cities. v. 43, p. 192–206, 2016.

SABRI, M. F. M.; DANAPALASINGAM, K. A.; RAHMAT, M. F. A review on hybrid electric vehicles architecture and energy management strategies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 1433–1442, 2016.

SAE. **SAE J1979DA - E/E Diagnostic Test Modes**. SAE, 2017.

- SAKTHIVEL, P.; SUBRAMANIAN, K. A.; MATHAI, R. Experimental study on unregulated emission characteristics of a two-wheeler with ethanol-gasoline blends ( E0 to E50 ). **Fuel**, v. 262, n. 116504, 2020.
- SALIBA, G. et al. Comparison of Gasoline Direct-Injection ( GDI ) and Port Fuel Injection ( PFI ) Vehicle Emissions : Emission Certification Standards , Cold-Start , Secondary Organic Aerosol Formation Potential , and Potential Climate Impacts. **Environmental science & technology**, v. 51, p. 6542–6552, 2017.
- SALVO JR, O. DE; ALMEIDA, F. G. V. DE. Influence of technologies on energy efficiency results of official Brazilian tests of vehicle energy consumption. **Applied Energy**, v. 241, n. May, p. 98–112, 2019.
- SEEG. **EMISSÕES POR SETOR - Energia**. Disponível em: <<http://plataforma.seeg.eco.br/sectors/energia>>. Acesso em: 25 abr. 2020.
- SEELAN, V. Analysis , Design and Application of Continuously Variable Transmission ( CVT ). **Int. Journal of Engineering Research and Applications**, v. 5, n. 3, p. 99–105, 2015.
- SENTOFF, K. M.; AULTMAN-HALL, L.; HOLMÉN, B. A. Implications of driving style and road grade for accurate vehicle activity data and emissions estimates. **TRANSPORTATION RESEARCH PART D**, v. 35, p. 175–188, 2015.
- SIEMENS. **SITRANS FC MASS 2100 DI 3-15**. Disponível em: <<https://new.siemens.com/global/en/products/automation/process-instrumentation/flow-measurement/coriolis/sitrans-f-c-mass-2100-di-3-15.html>>. Acesso em: 12 mar. 2020.
- SILVA, C. M. et al. Evaluation of numerical models for simulation of real-world hot-stabilized fuel consumption and emissions of gasoline light-duty vehicles. **Transportation Research Part D**, v. 11, p. 377–385, 2006.
- SIMMONS, R. A. et al. A benefit-cost assessment of new vehicle technologies and fuel economy in the U.S. market. **Applied Energy**, v. 157, p. 940–952, 2015.
- SIMONS, A.; BAUER, C. A life-cycle perspective on automotive fuel cells q. **Applied Energy**, v. 157, p. 884–896, 2015.
- SONG, C.; AN, Z. **Study on Compound Injection Technology in Gasoline Engines**. International Conference on Logistics Engineering, Management and Computer Science. **Anais...Atlantis Press**, 2015
- STOTSKY, A.; KOLMANOVSKY, I. Application of input estimation techniques to charge estimation and control in automotive engines. v. 10, p. 1371–1383, 2002.
- SUAREZ-BERTOIA, R. et al. Impact of ethanol containing gasoline blends on emissions from a flex-fuel vehicle tested over the Worldwide Harmonized Light duty Test Cycle ( WLTC ). **FUEL**, v. 143, p. 173–182, 2015.
- TANG, T. et al. A fuel-optimal driving strategy for a single vehicle with CVT. **Physica A**, v. 505, p. 114–123, 2018.
- TIETGE, U. et al. **Real-world fuel consumption of popular European passenger car models**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <[http://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT\\_Real-worldFC-EUcars\\_28122015.pdf](http://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_Real-worldFC-EUcars_28122015.pdf)>. Acesso em: 03 mai. 2016.
- TIETGE, U. et al. From laboratory to road : Modeling the divergence between official and real-world fuel consumption and CO<sub>2</sub> emission values in the German passenger car market for the years 2001 – 2014. **Energy Policy**, v. 103, n. May 2016, p. 212–222, 2017.

- TREVISAN, W. **Manual Termo-Técnico**. São Paulo: [s.n.].
- TRIANAFYLLOPOULOS, G. et al. Potential of energy efficiency technologies in reducing vehicle consumption under type approval and real world conditions. **Energy**, v. 140, p. 365–373, 2017.
- TSIAKMAKIS, S. et al. A simulation-based methodology for quantifying European passenger car fleet CO<sub>2</sub> emissions. **Applied Energy**, v. 199, p. 447–465, 2017.
- UE, R. C. **REGULAMENTO (UE) 2016/646 das emissões de veículos leves de passageiros e comerciais (Euro 6)** EUJournal Oficial da União Europeia, , 2016.
- VACCA, F. et al. On the energy efficiency of dual clutch transmissions and automated manual transmissions. **Energies**, v. 10, p. 1–22, 2017.
- WANG, H. et al. Modelling of the fuel consumption for passenger cars regarding driving characteristics. **Transportation Research Part D**, v. 13, n. 7, p. 479–482, 2008.
- WANG, Y. et al. Experimental comparative study on combustion and particle emission of n-butanol and gasoline adopting different injection approaches in a spark engine equipped with dual-injection system. **Fuel**, v. 211, n. September 2017, p. 837–849, 2018.
- WI, H. S. et al. Effects of FTP-75 mode vehicle fuel economy improvement due to types of power steering system. **International Journal of Automotive Technology**, v. 10, n. 6, p. 771–776, 2009.
- WURM, J. et al. Novel CFD approach for the thermal analysis of a continuous variable transmission (CVT). **Applied Thermal Engineering**, v. 103, p. 159–168, 2016.
- WURM, J. et al. Advanced heat transfer analysis of continuously variable transmissions (CVT). **Applied Thermal Engineering**, v. 114, p. 545–553, 2017.
- WYATT, D. W.; LI, H.; TATE, J. E. The impact of road grade on carbon dioxide ( CO<sub>2</sub> ) emission of a passenger vehicle in real-world driving. **Transportation Research Part D**, v. 32, p. 160–170, 2014.
- XIE, H.; SONG, K.; HE, Y. A hybrid disturbance rejection control solution for variable valve timing system of gasoline engines. **ISA Transactions**, v. 53, p. 889–898, 2014.
- YAN, X.; CROOKES, R. J. Energy demand and emissions from road transportation vehicles in China. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 36, n. 6, p. 651–676, 2010.
- YANG, L. et al. Evaluating real-world CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emissions for public transit buses using a remote wireless on-board diagnostic ( OBD ) approach \*. v. 218, n. X, p. 453–462, 2016.
- YU, W.; YANG, W.; ZHAO, F. Investigation of internal nozzle flow , spray and combustion characteristics fueled with diesel , gasoline and wide distillation fuel ( WDF ) based on a piezoelectric injector and a direct injection compression ignition engine. **Applied Thermal Engineering**, v. 114, p. 905–920, 2017.
- YUAN, W. et al. Comparison of real-world vehicle fuel use and tailpipe emissions for gasoline-ethanol fuel blends. **Fuel**, v. 249, n. November 2018, p. 352–364, 2019.
- ZHANG, B.; SARATHY, S. M. Lifecycle optimized ethanol-gasoline blends for turbocharged engines. **Applied Energy**, v. 181, p. 38–53, 2016.
- ZHANG, H.; ZHANG, H.; WANG, Z. Effect on Vehicle Turbocharger Exhaust Gas Energy Utilization for the Performance of Centrifugal. **Energies**, 2017.

ZHANG, K.; FREY, H. C. Road grade estimation for on-road vehicle emissions using light detection and ranging data. **J. Air & Waste Manage. Assoc.**, v. 56, p. 777–788, 2006.

ZHANG, S. et al. Real-world fuel consumption and CO<sub>2</sub> (carbon dioxide) emissions by driving conditions for light-duty passenger vehicles in China. **Energy**, v. 69, p. 247–257, 2014a.

ZHANG, S. et al. Real-world fuel consumption and CO<sub>2</sub> emissions of urban public buses in Beijing. **Applied Energy**, v. 113, p. 1645–1655, 2014b.

ZHANG, S. et al. Real-world fuel consumption and CO<sub>2</sub> (carbon dioxide) emissions by driving conditions for light-duty passenger vehicles in China. **Energy**, v. 69, p. 247–257, 2014c.

ZHANG, S. et al. Modeling real-world fuel consumption and carbon dioxide emissions with high resolution for light-duty passenger vehicles in a traffic populated city. v. 113, p. 461–471, 2016.

ZHU, R. et al. Tailpipe emissions from gasoline direct injection ( GDI ) and port fuel injection ( PFI ) vehicles at both low and high ambient temperatures \*. **Environmental Pollution**, v. 216, p. 223–234, 2016.

ZHUANG, Y.; HONG, G. Primary investigation to leveraging effect of using ethanol fuel on reducing gasoline fuel consumption. **Fuel**, v. 105, p. 425–431, 2013.