

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Vinícius Rückert Roso

**CICLOS REAIS DE CONDUÇÃO VEICULAR EM SANTA MARIA E SEUS
IMPACTOS EM CONSUMO E EMISSÕES**

Santa Maria, RS
2016

Vinícius Rückert Roso

**CICLOS REAIS DE CONDUÇÃO VEICULAR EM SANTA MARIA E SEUS IMPACTOS
EM CONSUMO E EMISSÕES**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Área de Concentração em Mobilidade Sustentável, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia de Produção**.

ORIENTADOR: Prof. Mario Eduardo Santos Martins

Santa Maria, RS
2016

©2016

Todos os direitos autorais reservados a Vinícius Rückert Roso. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Fone (0xx) 51 8172 2233; End. Eletr.: vinicius.roso@outlook.com

Vinícius Rückert Roso

**CICLOS REAIS DE CONDUÇÃO VEICULAR EM SANTA MARIA E SEUS IMPACTOS
EM CONSUMO E EMISSÕES**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Área de Concentração em Mobilidade Sustentável, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia de Produção**.

Aprovado em 23 de março de 2016:

Mario Eduardo Santos Martins, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

José Fernando Schlosser, Dr. (UFSM)

Horácio Antônio Vielmo, Dr. (UFRGS)

Santa Maria, RS
2016

AGRADECIMENTOS

Direciono meus sinceros agradecimentos para as pessoas que apoiaram o desenvolvimento deste trabalho. Obrigado aos meus pais, Neiron e Vera, pelo amor e apoio em todos os momentos. Obrigado à Bruna, por estar sempre ao meu lado, incentivando à ingressar na pós-graduação. Aos integrantes e ex-integrantes do Grupo de Pesquisa em Motores, Combustíveis e Emissões (GPMOT) da Universidade Federal de Santa Maria, aos servidores e amigos, Joelson, Rafael e Lamarck, o meu agradecimento pelo apoio. Ao orientador e amigo, professor Mario Eduardo Santos Martins, o agradecimento pela ajuda e confiança na elaboração desta dissertação. Agradeço também à Metalúrgica Kirchhof LTDA pelo aporte financeiro e investimento na estrutura do Laboratório de Motores da UFSM.

RESUMO

CICLOS REAIS DE CONDUÇÃO VEICULAR EM SANTA MARIA E SEUS IMPACTOS EM CONSUMO E EMISSÕES

AUTOR: Vinícius Rückert Roso

ORIENTADOR: Mario Eduardo Santos Martins

Objetivando a melhoria na qualidade do ar urbano e o atendimento à legislação, a tecnologia veicular está em constante desenvolvimento. O foco está em técnicas para redução, tanto do consumo de combustível quanto de emissões de gases do efeito estufa. As tecnologias, entretanto, possuem diferentes impactos dependendo da cidade, das condições de tráfego e do planejamento, assim como demais fatores socioeconômicos e culturais que interfiram no modo de condução. Com isso, ciclos padrões de condução, como NEDC e FTP75, por exemplo, não representam com propriedade a condição atual de tráfego e estão sendo gradativamente substituídos pelos ciclos reais de condução. Esta dissertação objetiva analisar o impacto de ciclos reais no trânsito urbano da cidade de Santa Maria-RS, no âmbito de emissões e consumo de combustível. Dados de ciclos reais de condução foram coletados para meios de transporte motorizados e introduzidos em modelos computacionais, visando simular um veículo percorrendo o trajeto pré-estabelecido. Assim, avaliaram-se carros de passeio e ônibus urbanos em diferentes condições de tráfego. Em posse dos resultados foram realizadas as comparações com ciclos padrão existentes, onde verificaram-se subestimações de mais de 50% nas emissões por ciclos padrão frente à condições reais de tráfego intenso. A simulação de sistemas para a redução nas emissões de poluentes em motores Diesel, operando em condições reais, confirmou reduções de mais de 90% nas emissões de MP, CO e HC e de 40% nas emissões de NO_x .

Palavras-chave: Ciclo Urbano. Aquisição de dados. Simulação computacional. SCR. DPF. Transporte Urbano. Consumo de Combustível. Ciclo de Emissões.

ABSTRACT

REAL WORLD DRIVING CYCLE IN SANTA MARIA AND ITS IMPACTS ON CONSUMPTION AND EMISSIONS

AUTHOR: Vinícius Rückert Roso
ADVISOR: Mario Eduardo Santos Martins

In order to improve urban air quality and to meet legislation requirements, vehicular technology is constantly advancing. It focus on techniques that reduce both fuel consumption and emissions of greenhouse gases as well as harmful pollutant emissions. The technologies, however, have different impacts depending on the city, its traffic conditions and urban planning as well as other socio-economic and cultural factors that affect the driving stile. Thus, standard drive cycles such as NEDC, FTP75 or others may not represent properly the actual condition and are being progressively replaced by real-world driving cycles. This paper aims to analyze the impact of real driving conditions in the city of Santa Maria, in southern Brazil, in respect to emissions and fuel consumption. Data of real world driving cycles were collected for motorized transport and introduced into computational models to simulate vehicles traveling in predetermined route. Urban buses and passenger cars were evaluated in different traffic conditions. Underestimation of more than 50% in emissions were observed in heavy traffic conditions across the indicated in standard cycles. Simulation of techniques to reduce pollutant emissions in Diesel engines has confirmed more than 90% reductions in emissions of PM, CO, HC, and 40% of NO_x , operating under real conditions.

Keywords: Urban Cycles. Data acquisition. Computer simulation. SCR. DPF. Urban transport. Fuel consumption. Emission Cycles

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Padrão de etiqueta utilizada pelo PBE	17
Figura 2.2 – Ciclo FTP-72	18
Figura 2.3 – Ciclo FTP-75	19
Figura 2.4 – Ciclo HWFET	20
Figura 2.5 – Os 13 pontos do ciclo ESC	22
Figura 2.6 – Ciclo ETC	23
Figura 2.7 – Conversão de poluentes em catalisadores de oxidação Diesel	36
Figura 2.8 – Redução de NO_x em sistema SCR	37
Figura 2.9 – Representação de sistema SCR + DPF em motor Diesel automotivo	38
Figura 3.1 – Trajeto estabelecido para aquisição de dados com perfil de elevação	41
Figura 3.2 – Representação geral do modelo computacional de carro de passeio através do GT <i>Suite</i>	45
Figura 3.3 – Características de consumo de combustível e ar no <i>software</i> GT <i>Suite</i> ..	46
Figura 3.4 – Características de comportamento das emissões inseridas no <i>software</i> GT <i>Suite</i>	47
Figura 3.5 – Sucessivas quedas de pressão no DPF	49
Figura 3.6 – Representação geral do modelo computacional de ônibus urbano com sistema de pós tratamento através do <i>software</i> GT <i>Suite</i>	53
Figura 3.7 – Detalhamento do sistema de pós tratamento utilizado no modelo computacional de ônibus urbano através do <i>software</i> GT <i>Suite</i>	54
Figura 3.8 – Fluxo em um filtro de partículas <i>DPF</i>	55
Figura 4.1 – Comparação gráfica de um ciclo de condução coletado por diferentes métodos	58
Figura 4.2 – Emissões e consumo médios para ciclos reais obtidos por GPS e OBDII	60
Figura 4.3 – Exemplo de ciclo real médio obtido para carros de passeio às 12 horas .	62
Figura 4.4 – Exemplo de ciclo real cumulativo obtido para carros de passeio às 12 horas	63
Figura 4.5 – Ciclo real de condução na cidade de Santa Maria para veículos leves às 12 horas	64
Figura 4.6 – Ciclo real de condução na cidade de Santa Maria para veículos leves às 17 horas	65
Figura 4.7 – Ciclo real de condução na cidade de Santa Maria para ônibus urbano às 12 horas	66
Figura 4.8 – Ciclo real de condução na cidade de Santa Maria para ônibus urbano às 17 horas	67
Figura 4.9 – Desvios instantâneos de velocidade entre o ciclo (valores de entrada) e o modelo (valores simulados) para veículos de passeio	69
Figura 4.10 – Frequência das faixas de BMEP simuladas no GT-Suite em diferentes condições de tráfego e ciclo padrão FTP-75	70
Figura 4.11 – Consumo de combustível e emissões médias simuladas no GT-Suite para cada um dos ciclos avaliados com carro de passeio	71
Figura 4.12 – Desvios instantâneos de velocidade entre o ciclo (valores de entrada) e o modelo (valores simulados) para ônibus urbanos	74
Figura 4.13 – Frequência das faixas de BMEP simuladas no GT-Suite em diferentes condições de tráfego e ciclo padrão ETC	76

Figura 4.14 – Consumo de combustível e emissões médias em cada um dos ciclos avaliados para ônibus urbano	77
Figura 4.15 – Variações em consumo de combustível e emissões médias simuladas no GT-Suite para ônibus urbano com sistema de pós-tratamento	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Tabela dos 13 pontos - Ciclo ESC	21
Tabela 2.2 – Limites de emissões (em g/km) para veículos a gasolina com até 2610kg	25
Tabela 2.3 – Exigências do Proconve por etapas, em g/km, para veículos comerciais leves de até 1700kg	26
Tabela 3.1 – Dados de entrada nos modelos computacionais	52
Tabela 4.1 – Comparação entre os valores totais simulados	57
Tabela 4.2 – Resultados numéricos dos testes estatísticos	59
Tabela 4.3 – Características dos ciclos individuais para veículos de passeio	61
Tabela 4.4 – Características dos ciclos individuais para ônibus urbano	61
Tabela 4.5 – Percentuais de utilização de cada marcha nos ciclos de condução - Mo- delo Carro	68
Tabela 4.6 – Percentuais de utilização de cada marcha nos ciclos de condução - Mo- delo Ônibus	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>BMEP</i>	<i>Brake Mean Effective Pressure</i>
<i>CO</i>	Monóxido de Carbono
<i>CO₂</i>	Dióxido de Carbono
<i>DOC</i>	<i>Diesel Oxidation Catalyst</i>
<i>DPF</i>	<i>Diesel Particulate Filter</i>
<i>ECU</i>	Módulo de Controle Eletrônico do Veículo
<i>EEA</i>	<i>European Environment Agency</i>
<i>ELR</i>	<i>European Load Response</i>
<i>EPA</i>	<i>Environmental Protection Agency</i>
<i>ESC</i>	<i>European Stationary Cycle</i>
<i>ETC</i>	<i>Europe Transient Cycle</i>
<i>EU</i>	União Européia
<i>FTP</i>	<i>Federal Test Procedure</i>
<i>GEE</i>	Gases do efeito estufa
<i>GPS</i>	<i>Global Positioning System</i>
<i>HC</i>	Hidrocarbonetos não queimados
<i>HWFET</i>	<i>Highway Fuel Economy Test</i>
<i>IPCC</i>	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
λ	Relação ar/combustível (lambda)
<i>MAK</i>	<i>Maximale Arbeitsplatz Konzentration</i> (Concentração máxima tolerável de substâncias em um ambiente)
<i>MLE</i>	Estimativa por máxima verossimilhança
<i>MP</i>	Material Particulado
n_{hi}	Maior rotação para determinada potência
n_{lo}	Menor rotação para determinada potência
<i>NH₃</i>	Amônia
<i>NO_x</i>	Óxido de Nitrogênio

<i>OBD</i>	<i>On-Board Diagnostic</i>
<i>PBE</i>	Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular
<i>PBT</i>	Peso Bruto Total
<i>PIB</i>	Produto Interno Bruto
<i>Proconve</i>	Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores
<i>SCR</i>	Selective Catalytic Reduction
<i>SO₂</i>	Dióxido de Enxofre

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	13
1.1.1	Objetivo Geral	13
1.1.2	Objetivos Específicos	13
1.2	CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	CICLOS DE CONDUÇÃO VEICULAR E AS EMISSÕES	15
2.2	CICLOS PADRÃO DE CONDUÇÃO VEICULAR	16
2.2.1	<i>Federal Test Procedure - FTP</i>	18
2.2.2	<i>Highway Fuel Economy Test</i>	19
2.2.3	<i>R49</i>	20
2.2.4	<i>European Stationary Cycle</i>	20
2.2.5	<i>Europe Transient Cycle</i>	22
2.2.6	<i>Europe Load Response</i>	23
2.3	LEGISLAÇÃO EM TORNO DE EMISSÕES VEICULARES	23
2.3.1	Euro	24
2.3.2	Proconve	26
2.4	CICLOS REAIS DE CONDUÇÃO VEICULAR	26
2.5	TÉCNICAS PARA COLETA DE DADOS DE CONDUÇÃO VEICULAR	27
2.6	METODOLOGIA DE CONSTRUÇÃO DE CICLOS DE CONDUÇÃO	28
2.6.1	Ciclos de condução baseados em micro-viagens	29
2.6.2	Ciclos de condução baseados em segmentos	29
2.6.3	Ciclos de condução baseados em classificação padronizada	29
2.6.4	Ciclos de condução baseados em modais de ciclos	30
2.7	MODELOS COMPUTACIONAIS NA PREDIÇÃO DE EMISSÕES	30
2.8	GASES ORIUNDOS DA COMBUSTÃO E SEUS IMPACTOS AMBIENTAIS	31
2.8.1	Monóxido de carbono	32
2.8.2	Hidrocarbonetos não queimados	33
2.8.3	Óxido de Nitrogênio	33
2.8.4	Aldeídos	34
2.8.5	Compostos de enxofre	34
2.8.6	Material particulado	34
2.9	SISTEMAS UTILIZADOS NA REDUÇÃO DE EMISSÕES	35
2.9.1	<i>Diesel Oxidation Catalyst</i>	35
2.9.2	<i>Diesel Particulate Filter</i>	36
2.9.3	<i>Selective Catalytic Reduction</i>	37
2.9.4	<i>Catalisador de três vias</i>	39
3	METODOLOGIA	40
3.1	TRAJETO E METODOLOGIA PARA AQUISIÇÃO DE DADOS	40
3.1.1	Métodos de coleta de dados avaliados	41
3.1.1.1	<i>Global Positioning System - GPS</i>	42
3.1.1.2	<i>On-Board Diagnostic - OBD</i>	42
3.2	DADOS COLETADOS E CONSTRUÇÃO DOS CICLOS DE CONDUÇÃO	43
3.2.1	Ciclos de condução baseados em médias de velocidade	43
3.2.2	Ciclos de condução cumulativos	44

3.3	MODELOS COMPUTACIONAIS	44
3.3.1	Abordagem	47
3.3.2	Características	51
3.3.3	Tecnologias para redução de emissões	53
4	RESULTADOS	56
4.1	DETERMINAÇÃO DO MÉTODO DE COLETA DE DADOS	56
4.2	CICLOS REAIS INDIVIDUAIS	61
4.3	DESENVOLVIMENTO DOS CICLOS REAIS DE CONDUÇÃO	62
4.3.1	Ciclos reais de condução para carros de passeio em Santa Maria-RS .	63
4.3.2	Ciclos reais de condução para ônibus urbano em Santa Maria-RS	65
4.4	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA EMISSÕES E CONSUMO DE COM- BUSTÍVEL	67
4.4.1	Modelo representativo para carro de passeio	67
4.4.2	Modelo representativo para ônibus urbano	72
4.4.3	Impacto do uso de tecnologias para a redução de emissões em ciclos reais de condução	78
5	CONCLUSÕES	81
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83

1 INTRODUÇÃO

Com a insatisfação dos usuários do transporte público e a crescente adesão aos meios individuais de locomoção, os padrões de mobilidade na sociedade têm se alterado e incrementado custos em âmbitos sociais, econômicos e principalmente ambientais. Apesar da ênfase dada em termos políticos à preocupação com os gases de efeito estufa (GEE), por exemplo, ações que contribuam para a redução de emissões na mobilidade urbana não são de fato monitoradas.

Barczak (2012) destaca a contraposição existente entre as medidas tomadas para o planejamento de cidades e de mobilidade urbana quando cita que o modelo de espalhamento urbano (*urban sprawl*), adotado nos Estados Unidos, foi aderido pelo restante do mundo. Neste conceito, mesmo que desenvolvidas novas tecnologias em motores ou energias "limpas", o aumento das distâncias e de deslocamentos diários fatalmente impactará no aumento das emissões pelos veículos. Além disto, esta tendência favorece a utilização de meios de transporte individuais, uma vez que a baixa densidade populacional não torna economicamente viável o transporte coletivo. Assim, o custo financeiro para a redução das emissões por tonelada de CO_2 se apresenta drasticamente menor se comparado o planejamento urbano com o desenvolvimento de combustíveis alternativos.

Entre as principais medidas para reduções de impactos ambientais se destacam as medidas regulatórias que tenham por objetivo principal a determinação de normas, especificações e padrões, visando à restrição de atividades poluidoras. Com isso, ocorre a regulamentação do consumo de combustíveis, o estabelecimento de padrões e limites de emissão para combustíveis e veículos, o controle de estacionamentos, de tráfego, inspeções veiculares e estabelecimento de limites de velocidade (BARCZAK; DUARTE, 2012).

Kolke (2006) sugere que em situações em que o estabelecimento de padrões de emissão para todos os tipos de veículo seja de difícil implementação, principalmente devido aos elevados custos envolvidos, uma alternativa para melhorar a qualidade do ar seria a adesão de um programa de inspeção e manutenção veicular. No Brasil, desde 2009 o Inmetro coordena o Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBE) com o intuito de classificar os novos veículos comercializados. Através dele, as emissões oriundas da queima de combustível por veículos automotores são expressas alertando os consumidores para os impactos gerados por cada automóvel. Para que possam ser comparados, os valores tomados pelas montadoras de automóveis são obtidos de maneira padronizada. A padronização brasileira dos testes em veículos leves é regida pela NBR 6601, tomando como referência o ciclo de condução urbana americano, denominado Federal Test Procedure 75 (FTP-75). Entretanto, com a influência dos combustíveis, condições de pavimentação, trânsito, modo de dirigir, entre outros, as situações reais de uso levam ao afastamento das condições ideais expressas em um ciclo padrão.

A estimativa de emissões de poluentes e consumo de combustível em um ciclo de condução veicular real em meio urbano, utilizando diferentes meios de locomoção coletiva e individual, em diferentes horários de circulação, auxilia na conscientização dos usuários e no desenvolvimento de novas estratégias para o transporte urbano.

Em uma cidade conhecidamente universitária, medidas que resultem no aprimoramento da estrutura de transporte urbano público, como a adoção de faixas exclusivas para ônibus, priorização em semáforos e alteração da distância entre paradas, causam alterações diretas no perfil de condução dos veículos, impactando inevitavelmente no quadro de emissões de poluentes e consumo de combustível. De maneira independente, medidas diretas devem ser consideradas em benefício da sustentabilidade alertando o usuário para a influência das condições do veículo, qualidade do combustível e modo de condução.

O foco deste trabalho no transporte individual e coletivo na cidade de Santa Maria-RS, com a elaboração de ciclos reais de condução veicular, representando as condições impostas em diferentes horários e meios de transporte. Em posse das informações, são identificadas alternativas que beneficiam a mobilidade sustentável num cenário real de transporte urbano.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho está na avaliação de ciclos padrão de condução frente à ciclos reais de condução para a cidade de Santa Maria-RS, no que tange à consumo de combustível e emissões de gases.

1.1.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos elencam-se os seguintes pontos:

- Apresentar revisão bibliográfica com os métodos utilizados na aquisição de dados e formulação de ciclos de condução;
- Estabelecer através de comparações estatísticas, o método a ser empregado na aquisição de dados de condução veicular;
- Coletar dados reais de condução para diferentes meios de transporte;

- Apresentar ciclos de condução formulados através de diferentes métodos como o de médias e o cumulativo;
- Implementar em *software* comercial modelos computacionais representativos para carros de passeio e ônibus urbano;
- Simular e analisar resultados de modelos computacionais operando em diferentes ciclos;
- Avaliar via simulação computacional o desvio de sistemas de pós tratamento em condições reais de operação frente à condições padrão de homologação;

1.2 CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO

Como contribuição da presente pesquisa está a compreensão da realidade encontrada no tráfego urbano de Santa Maria-RS, possibilitando a tomada de decisões a fim de aperfeiçoar o fluxo de veículos e o transporte de pessoas, minimizando as emissões de poluentes e cooperando no bem estar social e desenvolvimento de um meio sustentável.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será abordado o embasamento teórico necessário à compreensão do tema pesquisado. Inicialmente, o item 2.1 aborda a influência do método de condução no acréscimo das emissões no setor de transporte. Também é realizada uma introdução ao assunto abordado no item 2.2, onde são descritos os ciclos padrão mundialmente utilizados na homologação de motores e veículos. As medidas normativas mais adotadas para o controle da poluição atmosférica por veículos automotores são apresentadas no item 2.3, demonstrando os valores toleráveis para cada uma das etapas no programa padrão europeu (Euro) e no programa brasileiro (Proconve). A partir do item 2.4 até o 2.6 é realizada a apresentação de ciclos reais, com suas divergências em relação aos ciclos padrão, tanto em termos construtivos quanto em termos de abrangência. Em função dos dados obtidos para consumo de combustível e emissões de gases serem oriundos de simulação computacional, o item 2.7 aborda as principais vantagens da adoção de tal metodologia. Finalizando o capítulo destinado à revisão bibliográfica, os itens 2.8 e 2.9 apresentam respectivamente os principais gases oriundos da queima de combustível por motores de combustão interna e as tecnologias empregadas na redução do impacto gerado por estes gases.

2.1 CICLOS DE CONDUÇÃO VEICULAR E AS EMISSÕES

Diversos autores, como Samuel (2002), relatam os fatores que tem influência expressiva na quantificação das emissões em veículos propelidos por motores à combustão. Em geral, significativa parcela destes fatores está ligada ao comportamento do motorista. A fase transitória, representada pela aceleração é uma das condições mais expressivas em termos de emissões em um ciclo, emitindo de 30% a 50% mais Material Particulado (MP) em motores Diesel, se comparado à fase de velocidade constante, ou *steady-state*. Já em carros de passeio, um modo de direção agressivo em 2% do tempo total de condução é capaz de elevar em 40% o total de emissões.

Na União Europeia, a homologação por testes de emissões é requerida por lei para todos os modelos de veículos leves e para os motores utilizados em veículos pesados. Não sendo um processo constante, o método que reproduz com maior fidelidade um ensaio de emissões é a submissão de um veículo em laboratório à condições padronizadas de operação. Procedimentos de coleta e análise dos poluentes são especificados na legislação, enquanto a coleta de dados é realizada com o veículo percorrendo, em ensaio dinamométrico, um ciclo de condução pré-definido. Em geral, os ciclos de condução são representados em termos de velocidade do veículo e tempo de operação (BARLOW et al.,

2009).

Com isso, a qualidade do ciclo de condução é um parâmetro essencial, uma vez que este deve abranger diversas condições de condução. Joumard et al. (2000) avaliou a influência de ciclos de condução na quantificação das emissões por veículos de passageiro, avaliando 36 ciclos de condução reais e padronizados, apontando para desvios de até 50% nas emissões com o uso de ciclos inadequados.

2.2 CICLOS PADRÃO DE CONDUÇÃO VEICULAR

De acordo com Nesamani (2011), um ciclo de condução veicular pode ser compreendido como as sequências de operação em um meio de transporte, incluindo as fases de marcha lenta, aceleração, desaceleração e velocidade cruzeiro. Para efeitos de homologação, certificação ou estimativa de emissões de poluentes, procedimentos de testes são padronizados de acordo com as normas de cada país. Segundo recomendações da norma SAE J2711, os chamados *drive cycles* também podem ser utilizados na determinação de consumo de combustível. Em geral, ciclos padrão de condução são utilizados em dinamômetros de rolo e simulam o comportamento do automóvel sob diversas condições de operação, relacionando a velocidade atingida com o tempo transcorrido.

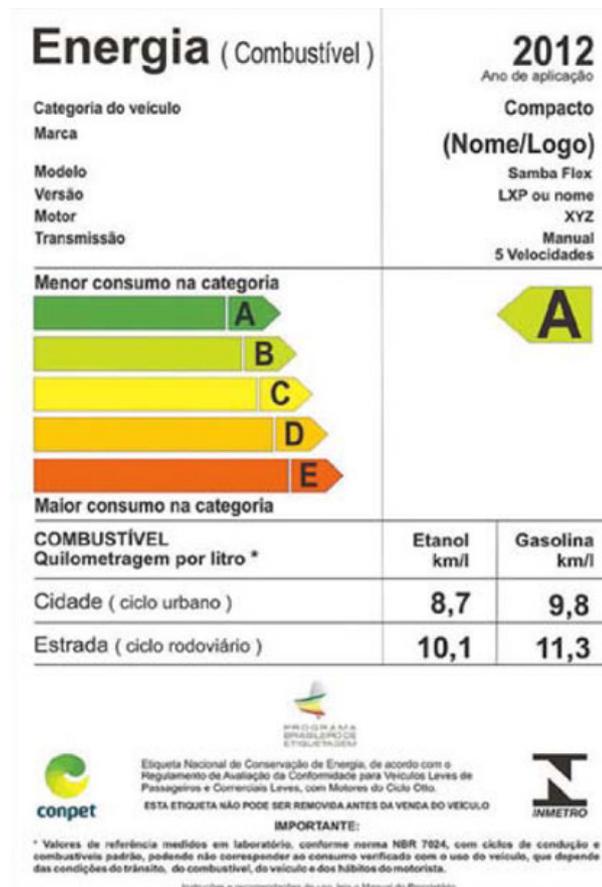
Majewski (2006) afirma que dependendo das variações de característica nas velocidades e cargas, os ciclos de condução podem ser subdivididos em *steady-state* e em *transient cycles*. Os primeiros representam modos de velocidades e cargas constantes. Os segundos correspondem às transições existentes, como aceleração, desaceleração e transições de carga. Em geral, as análises de emissões são realizadas para cada modo do teste e então calculadas através de médias ponderadas de todos os modos.

Segundo Maciel Filho (2013), é grande a diversidade de ciclos de condução desenvolvidos em vários países, e esta variação se dá uma vez que ocorre a reprodução das condições de tráfego local e características da rota percorrida. Barlow (2009) apresenta 256 ciclos padrões de condução, com diversas origens e finalidades. Estes conjuntos de dados representam situações específicas, como por exemplo, ciclos para vans de pequeno porte, vans de médio porte, vans de grande porte, ciclos onde são tomados dados de trânsito congestionado ou não congestionado, entre outras peculiaridades. Entretanto, alguns destes ciclos se destacam pela adoção de uso por diversos países, não somente pelo responsável por seu desenvolvimento.

O Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) conta com a participação voluntária de diversas montadoras que submetem seus veículos à testes para registros de consumo de combustível e emissões de poluentes. Este programa pode ser entendido como uma ferramenta de informação ao consumidor, que através da etiqueta (Figura 2.1) apresenta níveis de emissões e valores pontuais de consumo de combustível para os diversos mo-

delos. A regulamentação através da NBR 7024 prescreve o método para medição do consumo de combustível em veículos rodoviários automotores leves, com motores alternativos de combustão interna do ciclo Otto, através de ciclos de condução desenvolvidos em dinamômetro de chassis que simulam o uso do veículo na estrada. A simulação do trânsito urbano se dá de acordo com o ciclo expresso através da NBR 6601. As regulamentações brasileiras utilizam ciclos de condução padrões, se baseando a NBR 7024 em um ciclo igual ao *Highway Fuel Economy Test* (HWFET) e a NBR 6601 em um ciclo de condução igual ao *Federal Test Procedure* (FTP-75).

Figura 2.1 – Padrão de etiqueta utilizada pelo PBE



Fonte: INMETRO

Em se tratando de motores do ciclo Diesel que operem com óleo diesel, a NBR 15634 segue os ciclos *European Stationary Cycle*, *European Transient Cycle* e *European Load Response* a fim de determinar quantitativamente a presença de gases poluentes, material particulado e fumaça.

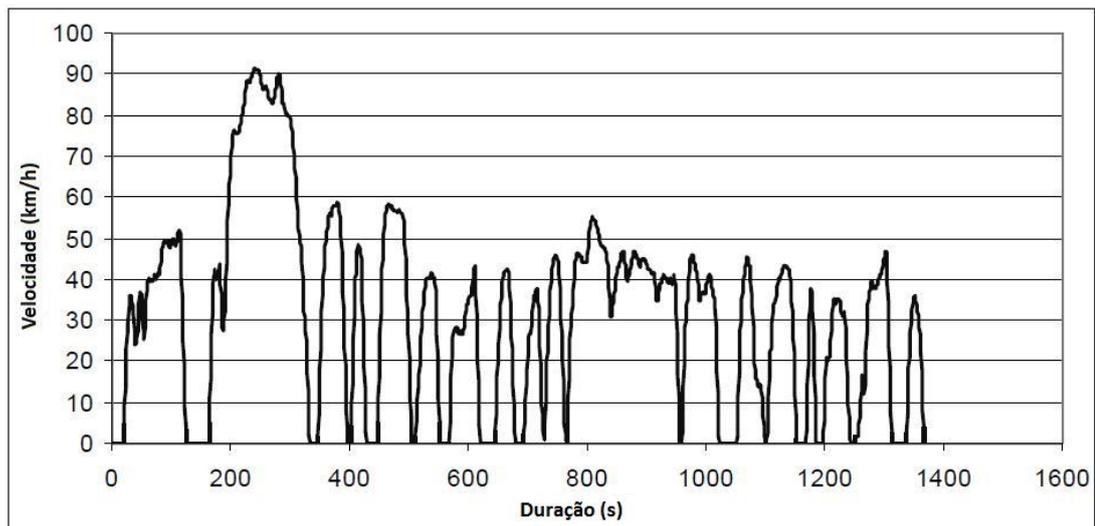
Os itens subsequentes abordarão ciclos padrões da legislação brasileira, tanto para homologação de veículos leves com motores ciclo Otto, quanto para veículos pesados utilizando óleo diesel como combustível.

2.2.1 Federal Test Procedure - FTP

Os ciclos FTP foram desenvolvidos nos Estados Unidos pela Agência de Proteção Ambiental (*Environmental Protection Agency – EPA*) com o intuito de medir as emissões de poluentes e o consumo de combustível nos veículos de passeio, excluindo veículos de grande porte.

Representando condições transientes de condução urbana, o FTP em geral é aplicado em dinamômetro de chassi. Representado pela Figura 2.2, o FTP-72 também era utilizado por outros países além dos Estados Unidos, como Suécia e Austrália, simulando um percurso de 12,00km, percorridos em 1369 segundos com uma velocidade média de 31,6 km/h. Entretanto, este padrão inicial consistia de apenas duas fases, representando condições de partida do veículo frio e posteriores transições de velocidade.

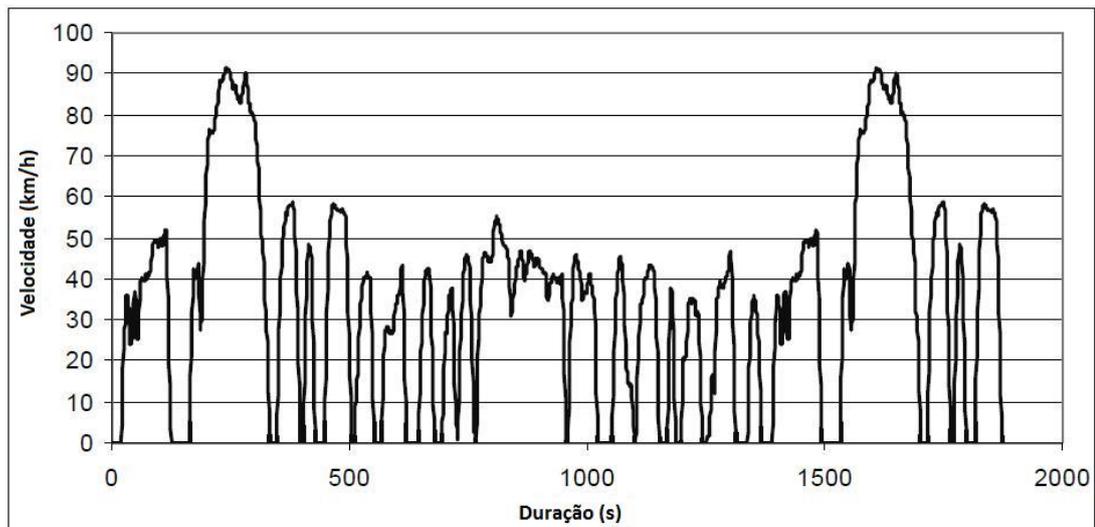
Figura 2.2 – Ciclo FTP-72



Fonte: Adaptado de Barlow (2009)

Com a adição de mais uma fase, o ciclo então chamado de FTP-75, passou a considerar também partidas à quente, onde o veículo permanecia em repouso por aproximadamente 10 minutos e posteriormente era religado para continuidade do teste. Assim, percorrendo basicamente as três fases de partida à frio, transição e partida à quente, os parâmetros básicos se alteraram para 17,77km de distância percorrida, 1874 segundos de duração e a velocidade média de 34,2 km/h (BARLOW et al., 2009), conforme a Figura 2.3. Atualmente, além dos Estados Unidos, países como Brasil e Austrália também utilizam o ciclo FTP-75. As emissões são coletadas em cada fase e analisadas individualmente, atribuindo diferentes fatores de peso para cada uma delas, sendo expressas em gramas por quilometro (MAJEWSKI; KHAIR, 2006).

Figura 2.3 – Ciclo FTP-75



Fonte: Adaptado de Barlow (2009)

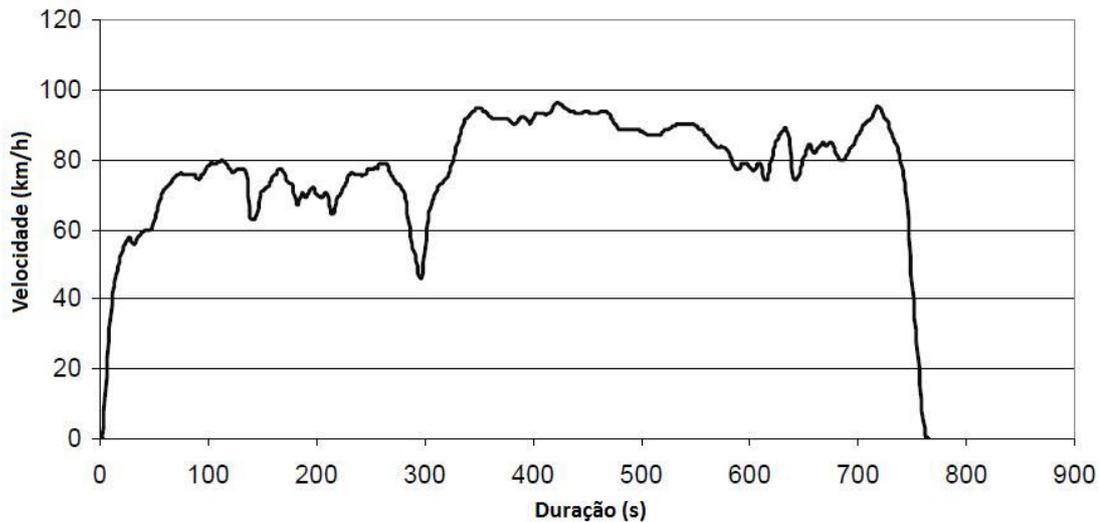
A fase transiente é observada entre o período de 505 a 1369 segundos, sendo precedida e sucedida das fases de partida a frio e a quente, respectivamente. Veículos de médio porte com peso entre 3855 e 8845 quilos e que não se enquadrem como veículos diesel de pequeno porte, também podem ser certificados em dinamômetros de bancada utilizando o ciclo FTP (WALLINGTON; LAMBERT; RUONA, 2013).

2.2.2 Highway Fuel Economy Test

Desenvolvido nos Estados Unidos pela EPA, o HWFET objetiva avaliar em dinamômetro o consumo de combustível por veículos leves. Como o ciclo FTP simula um percurso urbano, o HWFET é utilizado como complemento representando o tráfego em rodovias. O ciclo é representado pelo perfil da Figura 2.4, onde o teste é executado duas vezes, com no máximo 17 segundos entre as etapas, sendo a primeira para pré condicionamento e a segunda para aquisição dos dados de emissões.

Como características do ciclo, Barlow (2009) descreve a distância total de 16,5km, a duração de 764 segundos e a velocidade média de 77 km/h.

Figura 2.4 – Ciclo HWFET



Fonte: Adaptado de Barlow (2009)

2.2.3 R49

Desenvolvido pela *ECE Regulation*, o teste R49 é utilizado em testes de aprovação de emissões em motores pesados, em geral diesel. O ciclo é considerado *steady-state*, possuindo 13 pontos que simulam a operação do motor em rodovias. Desde a inserção das normativas da EURO III, a aplicação do ciclo R49 se restringiu a regulamentar procedimentos testes em países que ainda aceitam EURO II ou normas de emissões anteriores. No Brasil, a norma NBR14489(2000) instrui a aplicação do teste R49, apresentando variações de torque durante os 4680 segundos de duração.

2.2.4 European Stationary Cycle

Segundo o *Official Journal of the European Communities*, no ano de 2000 foi introduzido na União Europeia o ciclo teste ESC assim como o *European Transient Cycle* (ETC) e o *European Load Response* (ELR). O objetivo geral dos novos ciclos é de avaliar emissões em veículos pesados com motores Diesel. O Ciclo Estacionário Europeu (ESC) se baseia em 13 pontos, substituindo o R49, com alterações principalmente referentes às rotações e cargas impostas (NESAMANI; SUBRAMANIAN, 2011). Desde 1998, o ESC tem sido utilizado nos Estados Unidos também para complementar os testes realizados com o FTP.

Com o ciclo ESC, o motor é testado em dinamômetro seguindo a sequência de 13 pontos estabelecidos, conforme a Tabela 2.1 e a Figura 2.5. As condições impostas devem representar a duração exibida na tabela, onde a alteração da carga, referente ao ponto de

máximo BMEP, e a rotação devem ser estabilizadas nos primeiros 20 segundos posteriores a cada variação. As cargas e rotações impostas ao motor devem ser garantidos com uma variação máxima de $\pm 2\%$ e ± 50 rpm, respectivamente.

Tabela 2.1 – Tabela dos 13 pontos - Ciclo ESC

Ponto	Velocidade do Motor	Carga,%	Fator de Ponderação,%	Duração, minutos
1	Marcha Lenta	0	15	4
2	A	100	8	2
3	B	50	10	2
4	B	75	10	2
5	A	50	5	2
6	A	75	5	2
7	A	25	5	2
8	B	100	9	2
9	B	25	10	2
10	C	100	8	2
11	C	25	5	2
12	C	75	5	2
13	C	50	5	2

Fonte: Adaptado de Majewski (2006)

As rotações representadas na Tabela 2.1 por A, B e C consideram diferentes percentuais relativos às rotações máximas e mínimas. Segundo Majewski (2006), a rotação alta n_{hi} , é determinada se utilizando 70% da máxima potência declarada. Portanto, a rotação definida como n_{hi} é a maior rotação na qual este valor de potência é encontrado. Já a rotação baixa n_{lo} , é determinada com 50% da máxima potência declarada, sendo a n_{lo} a menor rotação em que se encontre esta potência. Com os valores de n_{lo} e n_{hi} , se calculam as rotações utilizadas para teste através das equações:

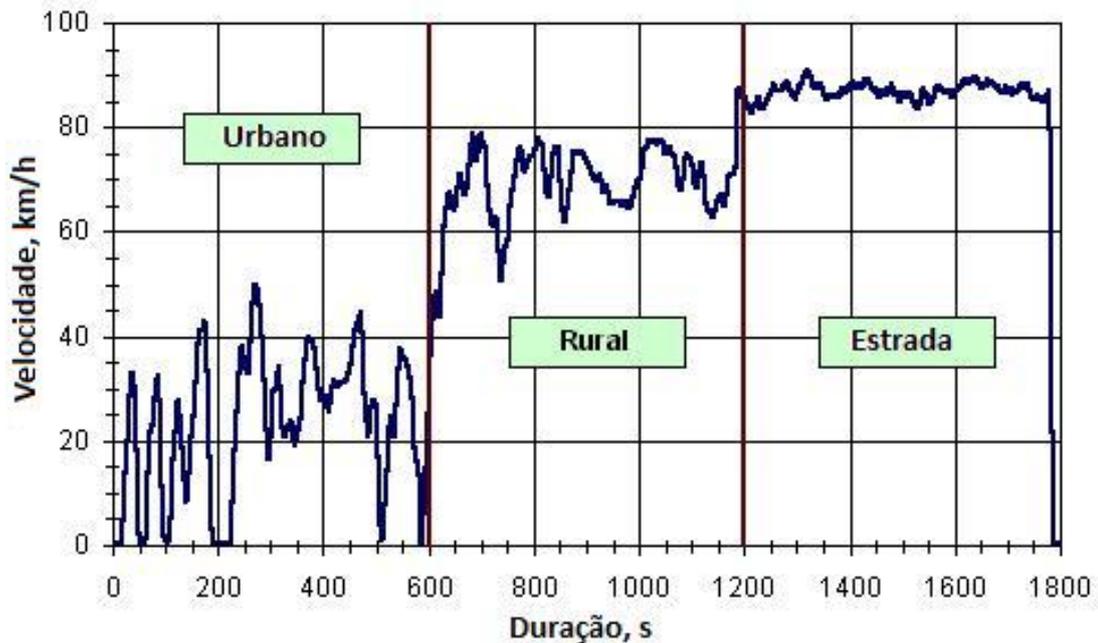
$$A = n_{lo} + 0,25(n_{hi} - n_{lo})$$

$$B = n_{lo} + 0,50(n_{hi} - n_{lo})$$

$$C = n_{lo} + 0,75(n_{hi} - n_{lo})$$

Fazendo uso das características de ensaio descritas no ESC, as elevadas temperaturas nos gases de escape obtidas em função dos elevados fatores de carga, representam condições semelhantes às obtidas em operações reais com elevadas cargas. Entretanto, testes estacionários possuem a grande limitação de não capturar condições transientes, que são responsáveis por significativa parcela de consumo de combustível, por exemplo.

Figura 2.6 – Ciclo ETC



Fonte: Adaptado de Dieselnets (2015)

2.2.6 Europe Load Response

O princípio básico do teste ELR está na determinação da opacidade da fumaça oriunda de motores diesel. O teste é dividido em 4 diferentes fases, onde o motor é submetido à variações de rotação e carga. Os parâmetros utilizados são os mesmos adotados no método ESC.

2.3 LEGISLAÇÃO EM TORNO DE EMISSÕES VEICULARES

A poluição atmosférica tem sido intensamente debatida em conferências internacionais de países desenvolvidos. Segundo Chang (2002), as alterações climáticas foram discutidas em 1991 no IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), onde se debateram soluções para a redução nas emissões do principal gás do efeito estufa, o dióxido de carbono.

Barczak (2012) afirma que desde 1970, a emissão de CO_2 no setor de transportes cresceu 120%, contra 65% no setor industrial. Assim, o uso de motores para queima de combustíveis fósseis na mobilidade urbana se torna uma das principais causas de emissões de gases de efeito estufa. Para reverter este cenário diversas medidas são tomadas, como as regulatórias que exercem comando e controle, determinando especificações, normas e padrões, com a finalidade de proibir ou restringir atividades potencialmente poluido-

ras.

Além dos benefícios ambientais, a necessidade de menores níveis de emissões de poluentes tem estimulado também o desenvolvimento tecnológico como através do estabelecimento de padrões de eficiência (*Fuel Efficiency Standards*) (LITMAN, 2008).

Alternativas se apresentam para contribuir com a redução das emissões, como por exemplo as restrições físicas, que impedem que veículos circulem em determinados horários e locais, como o exemplo do rodízio adotado nas cidades de São Paulo e Bogotá. Entretanto, como já observado, esta medida resulta em um efeito colateral que é a compra de um segundo veículo, permitindo assim que um deles sempre possa circular (BARCZAK; DUARTE, 2012). Uma das alternativas está na conscientização dos motoristas sobre como o seu comportamento afeta não só a qualidade do trânsito como também os níveis de emissões, podendo chegar a até 25% a redução de CO_2 se realizada a chamada condução ecológica (DALKMANN; BRANNIGAN, 2007).

O *Ecodriving*, ou condução ecológica, é descrita por Barczak (2012) como sendo um conjunto de estratégias que considera desde a manutenção periódica do veículo até a alteração do comportamento do condutor, considerando a manutenção de velocidades constantes, a eliminação de acelerações desnecessárias e a minimização de viagens curtas.

2.3.1 Euro

A União Europeia (EU) teve sua criação em meados dos anos 50, assumindo na atualidade uma população total de mais de 500 milhões de pessoas que geram aproximadamente 20% do PIB global (LANZIERI, 2009). Apesar do alto PIB per capita e elevados índices de desenvolvimento humano, esta progressão dos 28 países participantes contribui fortemente no nível de emissões de poluentes atmosféricos, sendo responsáveis por emitir aproximadamente 17% dos gases de efeito estufa produzidos globalmente (HOUGHTON, 2008).

O setor de transporte terrestre é responsável por 42% das emissões de NO_x nos 27 países constituintes da então União Europeia (constituída por 28 países após a adesão da Croácia, em 2013), segundo dados de 2009 da Agência Europeia do Meio Ambiente (EEA). O transporte também representa 24% das emissões dos gases de efeito estufa na EU, sendo o dióxido de carbono o gás com maior representatividade, em torno de 71% em 2008.

A fim de reduzir as consequências das emissões, a União Europeia estabelece diretrizes desde a década de 70 que impactam principalmente no setor de transportes, que detém 26% das emissões de CO da EU.

Na fase chamada pré-Euro, as primeiras diretrizes foram estabelecidas através da

medida 70/220/EEC, a qual previa uma aproximação nas legislações dos estados membros da comunidade europeia com intuito de tomar medidas em prol da redução na emissão de poluentes atmosféricos, principalmente as oriundas de motores de ignição por centelha. Esta diretriz trazia como anexo uma série de documentos para normatizar procedimentos de homologação e testes dos veículos.

Atualmente, a legislação em vigor na União Europeia, EC (2014), para controle de emissões regulamenta o monitoramento das emissões de óxido de nitrogênio (NOx), hidrocarbonetos (HC), monóxido de carbono (CO) e material particulado (MP), sendo abrangente para veículos leves e pesados, utilizando como ponto de corte o peso. Sucessivas legislações denominadas “Euro” entraram em vigor a partir de 1993, partindo da Euro I até as atuais Euro V e VI. As exigências destes padrões europeus de emissões para veículos leves e as respectivas datas de implantação estão expressas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Limites de emissões (em g/km) para veículos a gasolina com até 2610kg

Legislação	Implementação	CO	HC	NOx	HC+NOx	MP
Euro I	dez/92	2,72	-	-	0,97	-
Euro II	jan/97	2,2	-	-	0,5	-
Euro III	jan/00	2,3	0,2	0,15	-	-
Euro IV	jan/05	1	0,1	0,08	-	-
Euro V	set/09	1	0,1	0,06	-	0,005
Euro VI	ago/14	1	0,1	0,06	-	0,005

Fonte: Adaptado de NGK (2014)

A fim de incentivar a utilização de veículos movidos a combustíveis alternativos, se justifica o aumento da tolerância para as emissões de hidrocarbonetos e monóxidos de carbono. Na Tabela 2.2 é definido um limite de emissões de material particulado para motores a gasolina nas normas Euro V e VI. Isto se deve ao fato de que para atingir também aos limites de emissões de CO_2 alguns motores de injeção direta trabalham com combustão ultra pobre, o que acaba acarretando na formação de material particulado devido a cinética do processo de combustão. Em prol destes incentivos, se busca o atendimento de novos limites estabelecidos para emissões de óxidos de nitrogênio.

A partir da norma Euro VI, os fabricantes além de garantirem que seus veículos, quando novos, se enquadrem nas faixas de emissões descritas pela Tabela 2.2, devem atestar a durabilidade dos componentes responsáveis pelo controle do nível de emissões por no mínimo 160.000 quilômetros.

Segundo o relatório da European Commission (2006), a norma Euro VI dará prioridade para a redução das emissões de NOx dos veículos e vans movidos a diesel, a fim de se atingirem os objetivos europeus de qualidade do ar. O relatório prevê uma redução de 24% das emissões globais de NO_x somente nos veículos leves até 2020. Outro ponto é a

meta de redução de emissões de CO_2 , que prevê limite máximo de até 95 g/km na média da frota de veículos leves movidos a gasolina.

2.3.2 Proconve

Criado em 1986 pelo Conama (Conselho Nacional do Meio Ambiente), o Proconve é um programa brasileiro responsável por controlar o nível de poluentes emitidos por veículos novos. Desde a criação, essa redução é progressiva, sendo estabelecidos a cada fase novos padrões a serem atingidos pela indústria automotiva, estimulando o desenvolvimento de tecnologias inovadoras, como a adoção de catalisadores e injeção eletrônica.

Atualmente, em relação aos veículos pesados, o Brasil está na fase P7, em vigor em janeiro de 2012. Nesta fase, os limites de emissões toleráveis nos veículos brasileiros são equivalentes aos toleráveis em países europeus (quando na fase Euro V), em vigor para todos os veículos pesados desde outubro de 2009 até agosto de 2014. Para veículos pesados, as normas de emissões geralmente seguem precedentes europeus, tanto para limites quanto para ciclos de certificação. Já para os veículos leves com até 1700 kg, o Proconve está na fase P6, seguindo os limites descritos na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Exigências do Proconve por etapas, em g/km, para veículos comerciais leves de até 1700kg

Fase	Implementação	CO	HC	NOx	MP
P-4	jan/05	2,00	0,30	0,25	0,08
P-5	jan/09	2,00	0,30	0,12	0,05
P-6	jan/12	1,30	0,30	0,08	0,03

Fonte: Adaptado de Ibama (2011)

Antes da criação do programa, a emissão média de monóxido de carbono de um veículo era de 54g/km. Hoje essa emissão passou para 0,375 g/km. Mesmo com significativo aumento da frota brasileira de veículos automotores, esses resultados fizeram com que se tivessem condições de exercer um melhor controle sobre a poluição atmosférica, garantindo a qualidade do ar nas grandes cidades brasileiras (IBAMA, 2011).

2.4 CICLOS REAIS DE CONDUÇÃO VEICULAR

Hung (2007) afirma que os ciclos de condução veicular são desenvolvidos utilizando dados de condução em estradas e geralmente divididos de acordo com os tipos

de rota, de veículo, de duração e níveis de velocidade. Andre (2006) cita o forte consenso entre pesquisadores de que as características de condução em cada cidade são únicas, visto que cada uma possui condições diferentes, como por exemplo, de solo e topografia. Estudos são realizados para quantificar consumo de combustível e emissões em função do número de passageiros em ônibus urbanos, apontando para uma variável importante e desconsiderada em ciclos padrão de homologação (QIAN; LI; LI, 2016). Com isso, a utilização de ciclos de condução impróprios pode levar a resultados divergentes da realidade, onde podem ser subestimados fatores como aceleração e velocidades de cruzamento (LIN; NIEMEIER, 2002), fundamentais na totalidade dos ensaios. Como grande parte das aplicações se destina às homologações e demais questões com caráter de preservação ambiental, a criação de ciclos de condução reais para cada condição analisada seria uma condição benéfica aos órgãos fiscalizadores, ainda mais em tempos de discussões em prol da sustentabilidade.

A prática de desenvolvimento de ciclos de condução veiculares é conhecida por autores. Na literatura se encontram ciclos de condução veicular específicos para diversas cidades e meios de transporte, como por exemplo, Hong Kong (HUNG et al., 2007), Edinburgh (ESTEVES-BOOTH et al., 2001), Chennai (NESAMANI; SUBRAMANIAN, 2011) e São Paulo (FILHO, 2013).

Para monitorar a condução na cidade de Edinburgh, Inglaterra, Esteves-Booth (2001) adquiriu dados de tráfego utilizando um sistema de aquisição das variáveis do módulo de controle eletrônico do veículo (ECU). Deste modo, informações como temperatura do ambiente, temperatura do motor, posição de borboleta, velocidade e rotação do veículo eram capturadas e armazenadas a cada segundo, para serem posteriormente analisadas em computador.

Um método alternativo de coleta de informações foi utilizado por Nesamani (2011). Através de GPS, realizou a aquisição de dados de posicionamento, velocidade e aceleração no estudo de caso feito para o transporte coletivo da cidade de Chennai, na Índia.

2.5 TÉCNICAS PARA COLETA DE DADOS DE CONDUÇÃO VEICULAR

Segundo Andre (1996), no mínimo quatro métodos podem ser considerados na aquisição de dados de condução veicular. Três deles se baseiam na instrumentação de um veículo de teste a ser guiado em uma rota específica por motoristas profissionais ou não profissionais, ou então pelos proprietários dos veículos conduzindo em seus trajetos usuais. Embora haja a vantagem da aquisição de dados diretamente do veículo alvo, a condução através destes métodos tendem a divergir do comportamento normal, uma vez que os motoristas estão instruídos a participar de um ensaio. O quarto método é denominado *car chasing* e consiste em um motorista profissional conduzindo um veículo com

a devida instrumentação em acordo com o fluxo de um veículo alvo. Já em (1978), Kent afirmava que o método *car chasing* teria sido avaliado pelo Scott Research Laboratories, confirmando a representatividade dos dados adquiridos se comparado aos padrões de condução. Ou seja, esta “perseguição” realizada por um motorista profissional tende a minimizar as influências de comportamento dos condutores mediante a um ensaio, obtendo assim dados mais realistas de condução veicular. A técnica de coleta de dados por *car chasing* é adotada por autores em diversas pesquisas (KRUSE; HULS, 1973); (KENT; ALLEN; RULE, 1978); (TZENG; CHEN, 1998) ; (TONG; HUNG; CHEUNG, 1999); (LIN; NIEMEIER, 2003); (HUNG et al., 2005).

2.6 METODOLOGIA DE CONSTRUÇÃO DE CICLOS DE CONDUÇÃO

Além de fundamentais para homologação e certificação, o desenvolvimento de ciclos de condução que representem de maneira adequada as condições reais de condução de ônibus urbanos, por exemplo, é imprescindível para que as estimativas de emissões de poluentes sejam feitas próximas da realidade. De acordo com Majewski (2006), por ser um ciclo de condução um conjunto limitado de dados, é esperado que não se representem idealmente todas as condições de condução reais. Maciel Filho (2013) afirma que motores homologados em ciclos padronizados não têm necessariamente bom desempenho operando em situações reais, sendo isto especialmente verdadeiro para ônibus que trabalham em velocidades baixas e cargas médias.

Andre (2004) ressalta os pontos pelos quais transcorre o desenvolvimento de um ciclo de condução, iniciando pela aquisição de dados através de um veículo instrumentado. Este veículo percorre um trajeto usual, sendo os dados adquiridos representativos das condições de tráfego. Em sequência, os dados devem ser analisados e segmentados, se desenvolvendo assim ciclos que representem velocidades, tempos, trocas de marcha e condições de carga em acordo com a realidade.

Dai (2008) elenca quatro métodos distintos de formulação de um ciclo de condução, utilizados em acordo com a atividade de condução realizada: construção baseada em micro-viagens (micro-trips), por segmentos de viagens, baseada em padrões ou através de construção modal de ciclos. Apesar disto, autores como Liu et al.(2015) utilizam determinados ciclos padrão em função de apresentarem velocidades médias aproximadas com as condições reais, não sendo este o único parâmetro a ser avaliado.

2.6.1 Ciclos de condução baseados em micro-viagens

São definidos por Austin (1993) como a atividade de conduzir entre paradas adjacentes, incluindo os períodos de marcha lenta. Com este método, o ato de um veículo trafegar por um longo período em uma auto estrada é dividido em *micro-trips*. O ciclo de condução é desenvolvido então com o encadeamento dos dados coletados nestas *micro-trips*, com o objetivo de formar um ciclo fiel ao percorrido.

A maior limitação deste método está na não diferenciação das condições de condução, como o tipo de pista (tráfego urbano, auto estrada, etc.). Por exemplo, em condições onde o tráfego não for intenso, um veículo realiza poucas paradas e uma microviagem pode representar diferentes tipos de via.

2.6.2 Ciclos de condução baseados em segmentos

De acordo com Dai (2008), um ciclo de condução baseado em segmentos pode ser obtido ao se fracionar perfis de velocidade versus tempo. Para isto, podem se alterar os tipos de rodovia e as condições de tráfego ou então adicionarem-se paradas. Entretanto, qualquer atividade de condução pode ser estratificada para representar determinada condição de rodovia ou tráfego.

Ainda segundo o autor, assim como no método de construção de ciclos de condução baseado em micro-viagens, o método baseado em segmentos necessita conectar diferentes segmentos de percurso. Para isto, se realiza uma combinação lógica entre dados aleatórios, não necessitando que os segmentos terminem e iniciem exatamente na mesma velocidade, havendo, entretanto a necessidade de certa constancia de velocidade e aceleração nos primeiros segundos do encadeamento. A limitação deste método é que a estratificação dos dados os afasta de um comportamento real, tornando menos propício para a análise de emissões.

2.6.3 Ciclos de condução baseados em classificação padronizada

De acordo com Andre (1996), esta metodologia é aplicada no desenvolvimento dos ciclos europeus de condução. Nesta técnica, sequencias similares à micro-viagens são classificadas utilizando métodos estatísticos. Com isso, a aproximação utiliza sucessivas probabilidades para estimar à quais classes os dados pertençam, geralmente divididas de acordo com o tráfego, podendo ser congestionado, livre, urbano ou auto-estrada. Assim, os ciclos de condução são construídos conectando sequências aleatórias dos dados de tais classes, utilizando probabilidades e a sequência cronológica. Em geral, se analisa

uma gama de aproximadamente 20 variáveis que incluem duração, distâncias, velocidades, acelerações e demais quesitos que interfiram no modo de condução.

Dai (2008) ressalta dois aspectos como limitantes do método. Primeiramente, devido à construção do ciclo se basear em estimativas ele não se torna ideal para análise de emissões, uma vez que não determina um trajeto real de condução. Além disto, a classificação das sequencias se baseia em relações estatísticas entre distâncias, velocidades e acelerações, o que proporciona uma classificação da cinemática de condução, mas não necessariamente diferencia as emissões associadas a estas atividades.

2.6.4 Ciclos de condução baseados em modais de ciclos

Estudos demonstram que as emissões de gases em veículos estão relacionadas com o modo de operação dos mesmos. Como apresentado no método utilizado por Lin (2002) baseado em condições reais de condução, são as sequencias de aceleração, frenagem, cruzeiro e parada que realmente interferem nas emissões. Portanto, para estimativa de emissões se torna lógico a análise e réplica das atividades sobre perspectivas modais. Assim, se assume que determinado evento (aceleração, desaceleração, parada ou cruzeiro) ocorra dependendo somente do evento anterior.

Segundo Dai (2008), a construção de ciclos modais compreende quatro etapas. Inicialmente, fazendo uso do método de estimativa de máxima verossimilhança (MLE) em acordo com dados de aceleração, os dados reais de condução são fracionados em trechos de duração variada. Posteriormente, os segmentos são classificados de acordo com os diferentes modais, fazendo uso novamente do método MLE, desta vez considerando velocidades médias, máximas, mínimas e taxas de aceleração. Na terceira etapa é criada uma matriz de transição que contém as sucessões prováveis entre os diferentes modos. E na etapa final, o ciclo é concluído.

2.7 MODELOS COMPUTACIONAIS NA PREDIÇÃO DE EMISSÕES

A aplicação de simulações computacionais no desenvolvimento de projetos de engenharia, dentre eles motores de combustão interna já é consagrada. Blair (1996) destaca sua aplicação para a redução no tempo necessário para os testes finais, o que maximiza o tempo disponível para o desenvolvimento do motor.

Modelos computacionais mais complexos tem potencial de gerar predições mais precisas, já que consideram um maior número de variáveis. Entretanto, nem sempre todos os dados de entrada desejados estão disponíveis para a simulação, ou estão, porém com índices de fidelidade incertos fazendo com que simplificações sejam assumidas. Contudo,

Smit (2010) afirma que mesmo fazendo uso de aproximações, modelos complexos tendem a ser mais precisos que modelos simplificados, havendo um ponto ótimo entre a acuracidade dos dados de entrada e do modelo gerado. Por trás disto se apresenta a relação de custos existentes, ou seja, para o modelo computacional ser desenvolvido de maneira mais complexa, os custos de coletas de dados, verificação e simulação irão crescer desproporcionalmente.

É imprescindível que os modelos de emissões considerem fatores que afetam as emissões mesmo que em pequena proporção podendo, caso contrário, os resultados diferenciarem substancialmente. Barlow (2009) alerta para a aproximação mais comum, onde se considera que a emissão média de certo poluente por determinado tipo de veículo varia de acordo com a velocidade média durante o percurso. Funções que relacionam a velocidade média com as emissões são utilizadas como aproximação em inventários regionais e nacionais e também, em larga escala, para predição da poluição atmosférica local. Entretanto, são diversas as limitações de um modelo que considere velocidades médias para este tipo de análise, como por exemplo, a incapacidade de mensurar o comportamento das emissões em função das diversas faixas de operação do veículo.

Segundo Pacheco (2013), o uso de modelos computacionais para simular as condições de condução de um veículo tem sido representativo não somente para avaliação de emissões em veículos de rua, mas também para a otimização dos sistemas de transmissão principalmente em veículos de pista, fazendo com que melhores desempenhos sejam atingidos.

2.8 GASES ORIUNDOS DA COMBUSTÃO E SEUS IMPACTOS AMBIENTAIS

As emissões representam os poluentes emitidos pelo motor e em geral são expressas em gramas por hora ou gramas por kWh. Critérios podem ser adotados para avaliar a concentração, sendo indicada a quantidade presente por unidade de massa, geralmente representada em % do volume ou ppm de determinada substância no escapamento. Schäfer (1995) elenca como sendo os materiais descritos a seguir os principais gases oriundos da combustão. Também é apresentado o valor de MAK (*Maximale Arbeitsplatz Konzentration*) que define as concentrações máximas toleráveis das substâncias em um ambiente de trabalho em ppm ou mg/m^3 .

- Monóxido de carbono (CO): Gás incolor e inodoro, devido a sua facilidade de adesão à hemoglobina é capaz de causar asfixia mesmo em baixas concentrações. O valor de MAK é $33 mg/m^3$;
- Hidrocarbonetos não queimados (HC): Dependendo da composição, podem ter efeito narcótico e irritar a mucosa humana;

- Dióxido de nitrogênio (NO_2): Gás com odor característico e de coloração vermelha, em baixas concentrações é suficiente para causar irritação nas membranas mucosas, no pulmão e destruição de tecidos. O valor de MAK é $9 \text{ mg}/\text{m}^3$;
- Monóxido de nitrogênio (NO): Gás também com odor característico e que afeta diretamente no funcionamento do pulmão. É responsável pela oxidação do oxigênio e formação de NO_2 . O valor de MAK é $9 \text{ mg}/\text{m}^3$;
- Aldeídos: Componente com forte odor e efeito narcótico. Dependendo da composição, são considerados como causadores de câncer. Em geral, se pode adotar $0,6 \text{ mg}/\text{m}^3$ para o valor de MAK;
- Chumbo: Considerado um veneno celular, capaz de reduzir a absorção do oxigênio pelo sangue. O valor de MAK é $0,1 \text{ mg}/\text{m}^3$;
- Dióxido de enxofre: Causa irritação nas mucosas, e em contato com a água produz ácido sulfúrico. O valor de MAK é de $2 \text{ mg}/\text{m}^3$;
- Material particulado (MP): Emitidos por motores diesel, os materiais particulados podem se depositar nos pulmões e constituir riscos substanciais à saúde. São compostos por fuligem e podem ter a presença de carbono puro ou hidrocarbonetos depositados;
- Dióxido de carbono (CO_2): Não possuem nenhum efeito direto à saúde humana na concentração resultante da operação de um motor, entretanto contribui para a degradação do meio ambiente resultante das alterações climáticas (efeito estufa). Concentrações excessivas podem ser responsáveis por asfixia. O valor de MAK é $9 \text{ mg}/\text{m}^3$.

Os gases emitidos por um motor a combustão variam de acordo com o tipo de combustível queimado e o nível de emissões de acordo com operação deste motor. Assim, se torna necessária a análise distinta entre motores operando com óleo diesel e motores operando com gasolina.

2.8.1 Monóxido de carbono

A emissão de componentes como o CO é influenciada primeiramente pela relação ar/ combustível. Uma mistura considerada rica de combustível ($\lambda < 1$) resulta em altas concentrações de CO, não havendo oxigênio suficiente para oxidar todas as moléculas de carbono (SCHÄFER; BASSHUYSEN, 1995). Ou seja, o monóxido de carbono ocorre em

função de uma combustão incompleta onde o processo de oxidação não ocorre completamente, como por exemplo nos instantes de aceleração, onde muito combustível é injetado para uma quantidade reduzida de ar. Em função de motores Diesel operarem com porções significativas de ar, a formação de CO é mínima. Entretanto, se a turbulência ocorrida na câmara de combustão for mínima, as partículas de diesel não serão queimadas, resultando em excessos pontuais de combustível e resultando em CO (REŞITOĞLU; ALTINIŞIK; KESKIN, 2015). Assim, condições de mistura globalmente pobre, que apresentem excesso significativo de ar mas que não possuam homogeneidade no interior da câmara de combustão, também impulsionam as emissões de CO.

2.8.2 Hidrocarbonetos não queimados

Se a combustão em motores de ignição por centelha for considerada em condições ideais, apenas uma pequena quantia de HC irá ser emitida. Isto por que os hidrocarbonetos não queimados se originam das áreas onde a chama não se propaga. Em motores de ignição por centelha, diversas áreas na câmara de combustão como juntas de cabeçote, topo do pistão, espaço inter-anéis e velas podem ser consideradas áreas onde a queima não é perfeita. Entretanto, as emissões de HC só ocorrem se o calor trocado pelo gás e as paredes da vizinhança for tal que provoque a extinção da chama. Se a variação na massa de ar ou combustível tornar a mistura pobre a ponto de não ocorrer a ignição, uma quantidade significativa de HC será produzida.

2.8.3 Óxido de Nitrogênio

O transporte por rodovias, através de veículos movidos por motores de combustão interna, é o maior contribuidor para as emissões de NO_x mundiais, superando 40% das emissões totais (REŞITOĞLU; ALTINIŞIK; KESKIN, 2015). O nitrogênio oxida totalmente à um ligeiro excesso de ar e elevadas temperaturas. Portanto, a formação de NO_x se dá em locais onde ocorram picos de temperatura com correspondente excesso de ar. Parâmetros como carga à que o motor está submetido, lambda, ângulo de ignição e razão de compressão são diretamente influentes na formação de NO_x (MAJEWSKI; KHAIR, 2006). Estando os motores Diesel submetidos à grandes porções de ar (basicamente oxigênio e nitrogênio) em função dos seus princípios de operação, tornam-se propensos à elevada formação de NO_x , representando em torno de 85% do NO_x emitido por fontes móveis. Em temperaturas aproximadas de 1600°C após a combustão, o nitrogênio reage com o oxigênio, resultando em emissões de NO_x . Estas emissões estão relacionadas com a temperatura e a concentração de oxigênio durante a combustão. Com isso, se elevada a temperatura de

combustão em 100°C, as emissões de NO_x são triplicadas (REŞITOĞLU; ALTINIŞIK; KESKIN, 2015).

2.8.4 Aldeídos

São encontrados basicamente em motores do ciclo Otto, e podem ser considerados hidrocarbonetos com átomos extras de oxigênio. Em geral, são produzidos quando se utilizam combustíveis com elevados níveis de oxigênio, como os alcoóis.

2.8.5 Compostos de enxofre

A emissão de compostos de enxofre ocorre exclusivamente pelo enxofre contido no combustível. De acordo com a legislação Alemã, esta quantia deve ser inferior a 0,2% em termos de peso (SCHÄFER; BASSHUYSEN, 1995). Quando combinado com a água produzida durante o processo de combustão o SO_2 forma ácido sulfúrico. Os compostos de enxofre são os principais responsáveis pela chuva ácida.

2.8.6 Material particulado

Schäfer (1995) define como material particulado todos os componentes expelidos pelo escapamento, com exceção da água condensada, que se depositam em um definido filtro após serem dissolvidos com o ar a temperaturas inferiores a 51,7°C. A fuligem compõe o material particulado e sua formação se deve à deficiência de ar, o que ocorre em motores diesel em determinadas condições de operação. Por isso, as emissões de material particulado são da ordem de 6 a 10 vezes maiores em motores à diesel do que em motores à gasolina.

O processo de formação de material particulado depende de diversos fatores durante a combustão como a qualidade do combustível e do lubrificante, consumo de combustível, temperatura da combustão dos gases de escape (REŞITOĞLU; ALTINIŞIK; KESKIN, 2015). Pesquisadores observaram o impacto do material particulado no meio ambiente e na saúde humana, apontando para a contribuição em mortes prematuras, asma, câncer e complicações cardiovasculares (ENGLERT, 2004); (MICHAELS; KLEINMAN, 2000).

2.9 SISTEMAS UTILIZADOS NA REDUÇÃO DE EMISSÕES

Nenhum processo de combustão é completamente eficiente. Segundo Twigg (2001), os produtos gerados por motores de combustão interna abrangem compostos de água, dióxido de carbono, hidrocarbonetos não queimados, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, entre outros. Durante a combustão, a frente de chama tem temperatura extremamente elevada (próximo a 1600°C ou mais), estabelecendo o equilíbrio entre nitrogênio e oxigênio para a formação de monóxido de nitrogênio. Com o rápido resfriamento e exaustão dos gases da combustão, significantes níveis de NO e NO_x são expelidos na atmosfera.

Reconhecidamente as emissões veiculares são indesejadas e podem causar sérios problemas ambientais. Em geral, a adoção de sistemas de pós tratamento e controle eletrônico se tornaram as principais alternativas para a redução de emissões de gases, em especial para motores Diesel.

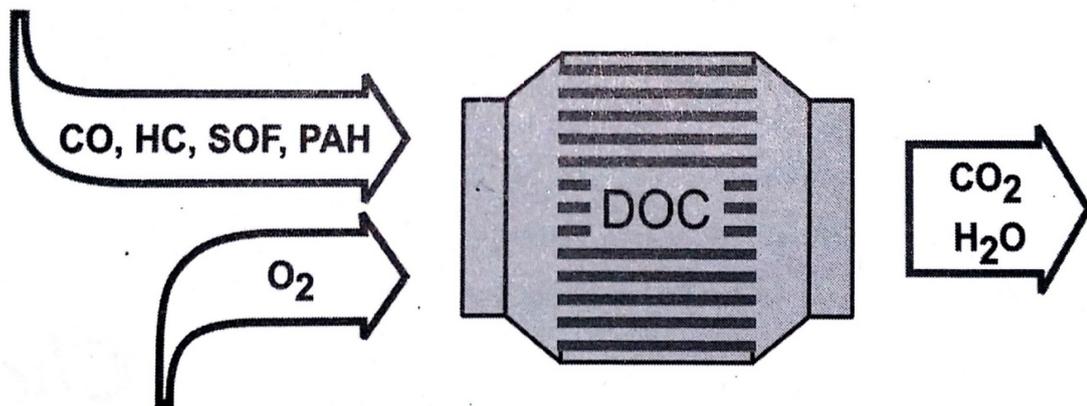
2.9.1 *Diesel Oxidation Catalyst*

Segundo Majewski (2006), os Catalisadores de Oxidação Diesel (DOC) representam os primeiros e um dos mais eficazes catalisadores para motores diesel, apresentando a robustez e durabilidade necessária para equiparem diversos veículos comerciais. O sistema promove uma série de reações de oxidação utilizando oxigênio, que é abundante na exaustão de motores diesel a qualquer condição de operação. Em geral, as reações são capazes de converter emissões de CO e HC em CO_2 e vapor d'água, como demonstrado pela Figura 2.7. O sistema também contribui em menor escala para a redução das emissões de determinadas classes de material particulado, como SOF (*Soluble Organic Fraction*) e PAH (*Polycyclic Aromatic Hydrocarbons*), além de proporcionar a redução no odor característico do diesel.

Desenvolvido na década de 70 para controle das emissões e odores em motores Diesel utilizados em minas subterrâneas, os catalisadores foram aprimorados nos anos 90 para o atendimento dos limites de emissões impostos pelas legislações veiculares, como a Euro 2. A composição e a metodologia de construção tem se alterado com o passar dos anos, garantindo menores níveis de emissões e maior vida útil do sistema. Geralmente o volume do catalisador é equivalente ao volume deslocado no motor. Na literatura são encontradas diversos modelos de catalisador, com variações especialmente no material utilizado para a oxidação. A patente da Engelhard (empresa pioneira na fabricação de catalisadores, adquirida pela BASF em 2006) aponta para o uso de um composto com 50% de óxido cérico (CeO_2) e 0,5 a 2g/ft³ de platina (*Pt*) (FARRAUTO, 1997). Em 2001 a patente fora aprimorada com o acréscimo de novos mineirais (YAVUZ et al., 2001). Outros pesquisadores publicaram e patentearam diferentes composições de catalisadores para

motores Diesel (WYATT et al., 1993); (HORIUCHI, 1991); (DOMESLE, 1992); (BECKMANN et al., 1992).

Figura 2.7 – Conversão de poluentes em catalisadores de oxidação Diesel



Fonte: Majewski (2006)

2.9.2 Diesel Particulate Filter

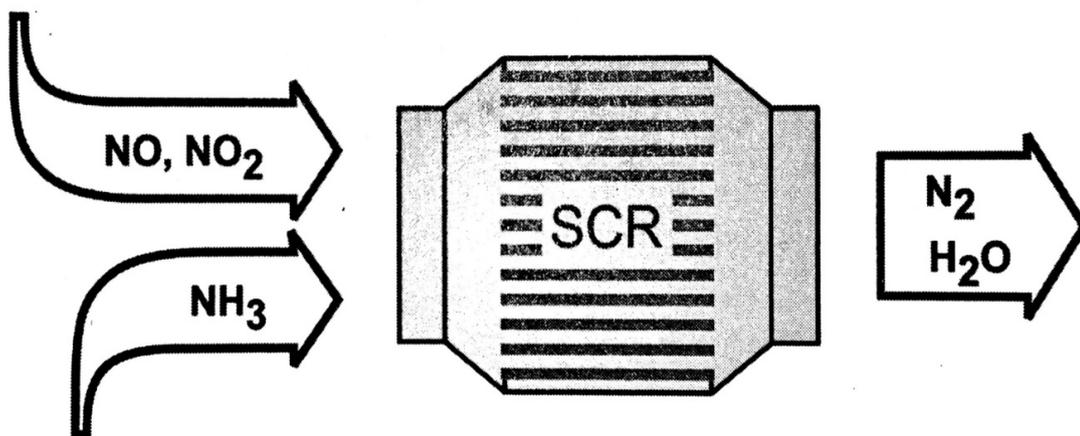
É tradicional a emissão de fuligem, ou "fumaça preta", em motores Diesel. Entretanto, os motores produzidos mais recentemente apresentam acentuada redução desta característica. Em geral, o processo de ignição por compressão envolve gotículas de combustível maiores do que a ignição quase homogênea em motores de ignição por centelha. A emissão destas partículas pode ser retida através de diferentes filtros de material particulado.

A temperatura nos gases de exaustão de motores Diesel são geralmente insuficientes para queimar o material particulado (MP) existente no *Diesel Particulate Filter* (DPF). Com isso, a saturação do filtro traz resultados negativos para o motor, como perda de potência, afetando a eficiência de outros componentes mecânicos. Para reduzir o acúmulo de material particulado, se utilizam queimadores e aquecedores elétricos, elevando a temperatura e iniciando a combustão do MP. Entretanto, segundo Twigg (2001), o material particulado em um DPF saturado inicia a queima com temperaturas extremamente altas, na ordem de 550°C, podendo comprometer a estrutura do filtro. O método mais eficaz para a remoção do material particulado é a adoção de sistemas responsáveis pela oxidação a temperaturas menores, em geral com o uso de dióxido de nitrogênio produzido através da oxidação catalítica do NO. Esta solução é muito utilizada em ônibus e caminhões, garantindo que hajam reações frequentes.

2.9.3 Selective Catalytic Reduction

A remoção do NO_x produzido através da queima incompleta do diesel também é um desafio para o atendimento das legislações. Segundo Twigg (2001), em condições ideais, a redução nas emissões de NO_x com o uso de catalisadores convencionais é inferior a 50% do produzido. Resitoglu *et al.* 2015 atribui ao diesel aproximadamente 85% do NO_x emitido por fontes móveis. O uso de sistemas de redução catalítica seletiva (SCR) é consagrado desde a década de 70 para uso em grandes plantas químicas e motores estacionários, sendo recentemente adotado em motores de ônibus e caminhões. Por ser tóxica e de difícil manipulação, a amônia utilizada em sistemas SCR geralmente era dissolvida em água, numa proporção de 27% de amônia para 73% de água em peso. Assim, o composto apresentava pressão de vaporização próximo a atmosférica em temperaturas normais, podendo ser mais facilmente manuseada e transportada. Entretanto, segundo Majewski (2006), o uso da amônia fora praticamente descartado. A uréia, $CO(NH_2)_2$, surge como uma alternativa à amônia, trazendo benefícios em toxicidade, custo, transporte e obtenção. Em grande parte das aplicações veiculares, a uréia é utilizada na forma líquida em conjunto com água desmineralizada processada (tipicamente 32,5% de uréia em água), formando então o ARLA 32. Patentes também já foram registradas para o uso de uréia sólida (EBERHARD; KREUTMAIR, 1994), mas a ideia não apresenta grande aceitação. Quando líquida, a solução é injetada no sistema de exaustão, e decomposta em amônia (NH_3) e dióxido de carbono (CO_2). Como mostrado na Figura 2.8, a amônia reage seletivamente como oxidante ao NO_x , tendo nitrogênio (N_2) como produto final.

Figura 2.8 – Redução de NO_x em sistema SCR



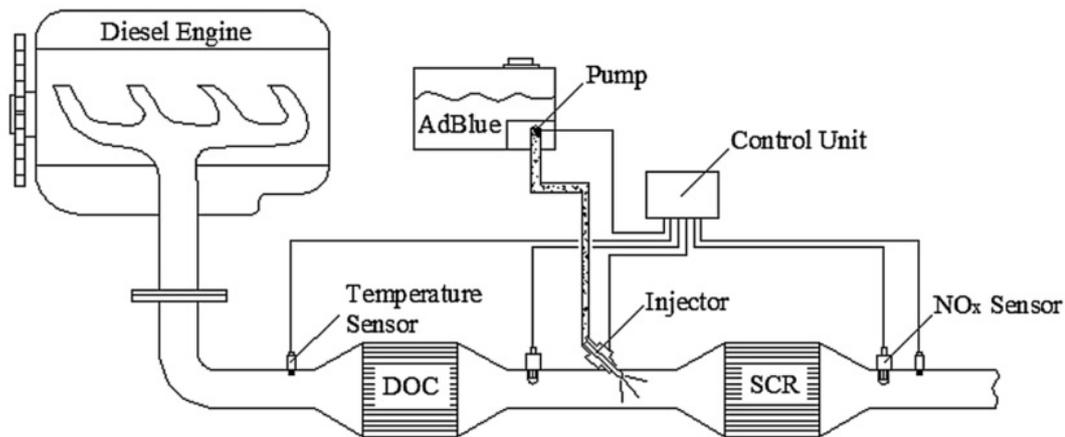
Fonte: Majewski (2006)

A precisão no controle da injeção de amônia deve ser rigorosa. Injeções insuficientes resultariam em baixas taxas de conversão de NO_x , enquanto injeções excessivas resultariam em níveis indesejáveis de amônia sendo lançados na atmosfera. A calibração de motores para baixas emissões de material particulado e NO_x resulta também em me-

nores consumos de combustível, na ordem de 3 a 5%, o que pode contribuir para custear o abastecimento de uréia utilizada (GEKAS et al., 2002).

Basicamente o sistema de pós-tratamento com SCR é configurado conforme exemplificado na Figura 2.9. Nos primeiros sistemas SCR desenvolvidos, a operação se realizava em malha aberta, com mapa de emissões de NO_x pré-programado, garantindo a injeção de uréia conforme a rotação e a carga (MAJEWSKI; KHAIR, 2006). Para aumentar a eficácia na redução das emissões de NO_x , além de reduzir o tempo necessário para calibração dos motores, sensores de resposta rápida para monitoramento do NO_x produzido instantaneamente pelo motor foram estudados por Song e Zhu em 2002. Em geral, as injeções de uréia ocorrem em temperaturas entre 200°C e 600°C, com máxima eficiência de conversão em 350°C. Injeções em temperaturas inferiores à 200°C podem contribuir para a formação de outros gases indesejados em função da decomposição da solução de uréia. A geometria ideal, o sistema de injeção, a solução de uréia, pressões de injeção e tempos corretos, ainda estão em estudos pelos pesquisadores (REŞİTOĞLU; ALTINIŞIK; KESKIN, 2015).

Figura 2.9 – Representação de sistema SCR + DPF em motor Diesel automotivo



Fonte: Resitoglu et al.(2015)

Entre os poréns da adoção do sistema SCR está justamente o seu custo de manutenção, em função da necessidade de recarga do composto a ser injetado e consequente disponibilidade deste em postos de abastecimento. No Brasil, a evolução do diesel combustível com a redução do percentual de enxofre, visa minimizar a presença do componente à qual os sistemas SCR possuem maior sensibilidade. Entretanto, segundo Majewski (2006), o SCR ainda é a única tecnologia em catalisadores capaz de reduzir as emissões de NO_x aos níveis requeridos pelas próximas exigências normativas, ganhando fortalecimento já para o atendimento à Euro V em 2008. Autores como Inomata et al. 2015, citam o uso de sistemas em conjunto, como SCR + DPF, importantes no aumento da eficiência de filtragem. Lee et al. 2015 comparam o tamanho e a concentração das partículas geradas

on-road por um veículo equipado com tecnologias para pós tratamento (DOC+DPF+SCR) com as emissões registradas em testes de laboratório em dinamômetro, apontando os sistemas como responsáveis pela redução na concentração e no tamanho das partícuclas emitidas (em especial de NO_x), nas diversas condições de operação avaliadas.

2.9.4 Catalisador de três vias

Em geral, os veículos de passeio atuais, principalmente os que utilizam motores à gasolina, possuem tratamento dos gases de escape por meio de catalisadores de três vias (Three Way Catalytic). A função destes catalisadores é converter através de reações químicas, poluentes como CO, NO_x e HC em compostos menos agressivos ao meio ambiente, como CO_2 , H_2O e N_2 . O controle da razão ar-combustível pela sonda lambda permite que o catalisador opere em suas melhores condições de conversão. Já motores modernos que operam com mistura pobre adotam alternativas, como catalisadores TWC parciais que convertem somente HC e CO, enquanto os óxidos de nitrogênio são convertidos em um catalisador específico (ALKEMADE; SCHUMANN, 2006).

3 METODOLOGIA

Este capítulo objetiva descrever os procedimentos que foram adotados no desenvolvimento do trabalho, tornando capaz a sua reprodução. Para isso, são apresentadas as etapas desde a definição do trajeto a ser monitorado até a quantificação das emissões por veículos de passeio e ônibus urbanos, transcorrendo pelos métodos de coleta de dados, dos veículos a serem monitorados, da construção dos ciclos, da quantificação das emissões e das alternativas que proporcionem melhoras ambientais.

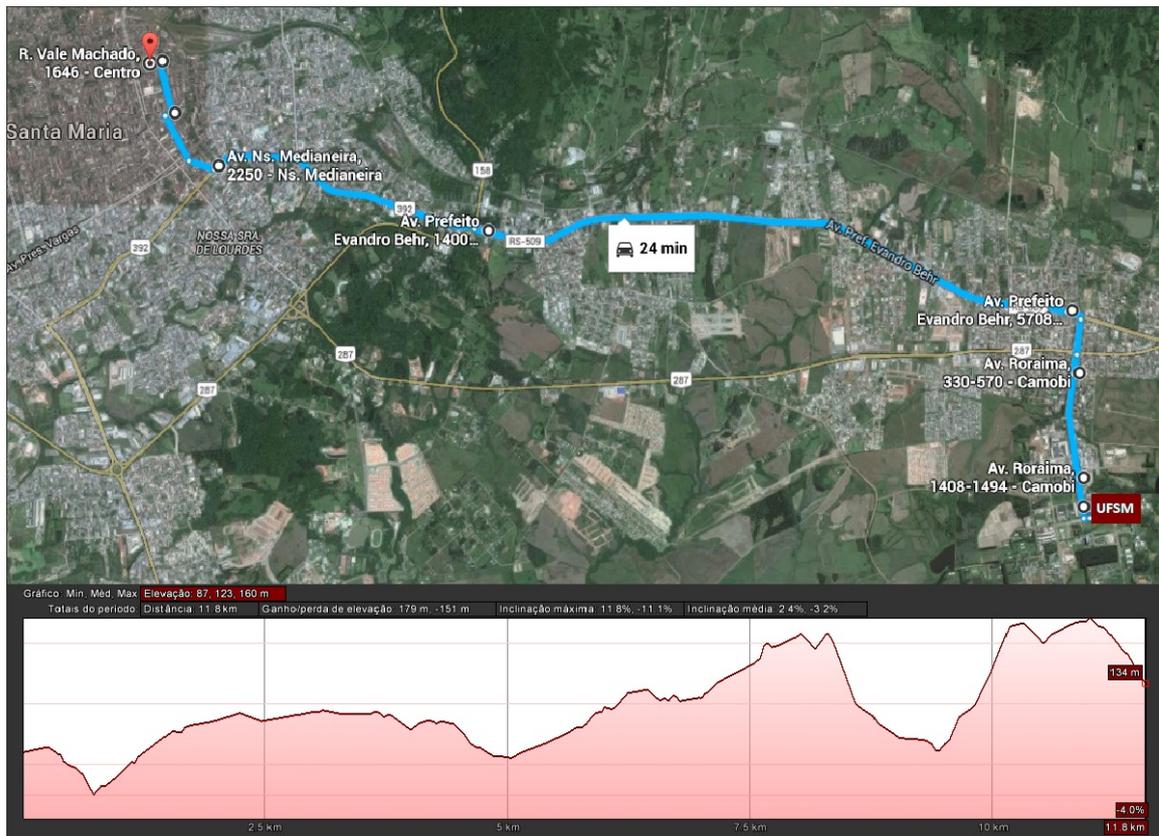
3.1 TRAJETO E METODOLOGIA PARA AQUISIÇÃO DE DADOS

O trajeto escolhido para a aquisição de dados corresponde a uma das linhas mais rotineiramente utilizada por estudantes que vão da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), no bairro Camobi, ao centro da cidade de Santa Maria. O trajeto, representado pela Figura 3.1, descreve a rota completa percorrida pelas empresas de ônibus que prestam este serviço diariamente. Desde seu ponto inicial, na parada de ônibus da UFSM, até o ponto final, na Rua Vale Machado são 12,0 km compostos de condições diversas de condução, como subidas, descidas, semáforos, tráfego urbano e tráfego rodoviário. Como determinante para escolha desta rota, está a quantidade de vezes que é disponibilizada diariamente pelas companhias de ônibus. Durante o ano letivo, são aproximadamente 139 linhas diárias percorrendo este trajeto (UFSM - Centro), o que corresponde a mais de 1600 km diários apenas em um sentido, desconsiderando o retorno.

Na Figura 3.1 também é apresentado as condições de relevo durante o trajeto, com ganho de 179 metros de altitude e perda de 151 metros, resultando em uma diferença de 28 metros entre a altitude inicial e a final.

Foram definidos horários distintos para a aquisição de dados, representando as diferentes condições de tráfego encontradas na cidade. A rota avaliada apresenta fluxo intenso de veículos às 17 horas, sendo às 12 horas considerada condição de tráfego livre. Com isso, estabeleceram-se os dois horários aos quais seriam realizadas as coletas de informação, permitindo a avaliação do impacto causado em diferentes condições de tráfego.

Figura 3.1 – Trajeto estabelecido para aquisição de dados com perfil de elevação



Fonte: Google Earth (2015)

3.1.1 Métodos de coleta de dados avaliados

Segundo Tong and Hung (2010), duas técnicas podem ser empregadas na aquisição de dados, conforme já descrito no item 2.5, a instrumentação *on-board* e o *car chasing*. Na primeira, há a necessidade de instrumentar cada veículo do qual se coletam os dados. Já no método *car chasing*, a necessidade de instrumentação ocorre somente no veículo de testes, realizando a coleta em “perseguição” ao veículo alvo, podendo ser um veículo leve ou de transporte coletivo. Entretanto, este veículo de testes também deve estar adequadamente equipado *on-board* para garantir a aquisição de dados.

Com o objetivo de definir o método a ser empregado na aquisição de dados, este item contempla a apresentação das alternativas citadas anteriormente, assim como aquisições preliminares de dados através dos métodos propostos, para formular a comparação entre os resultados. A coleta de dados foi realizada através de um veículo de pequeno porte, em condições ideais de alinhamento e operação.

3.1.1.1 *Global Positioning System - GPS*

O sistema global de posicionamento fornece informações de localização e tempo em quaisquer condições e para diversas finalidades. O conceito GPS se baseia no tempo, realizando o receptor, comunicação contínua com múltiplos satélites, a fim de fornecer a posição exata com o mínimo desvio do tempo real.

Kratzke (2012) aborda o uso de aplicativos em *smartphones* que promovem auxílio à prática de esportes, fornecendo informações sobre o percurso realizado e o desempenho do atleta. Embora com uma finalidade distinta, aplicativos que processem dados instantâneos de distância e velocidade podem também ser considerados para a confecção de ciclos de condução. Com isso, a utilização de GPS através de aplicativos em *smartphone* se torna um método simples para a aquisição de informações e deve ser considerado na coleta de dados para elaboração dos ciclos de condução.

Devido ao não atendimento das necessidades propostas, a utilização de aplicativos próprios para aquisição de dados de pista em competições automotivas foi descartada. A dificuldade é encontrada na exportação das informações adquiridas, como por exemplo para dados de velocidade e tempo. Com isso, se utiliza de um aplicativo destinado à prática de atividades físicas em geral, possuindo as informações de tempo e velocidade necessárias ao atendimento da proposta.

Para a aquisição de dados via *smartphone* se utilizou o aplicativo *Runtastic PRO*, desenvolvido pela *Runtastic GmbH*[®], que possui a facilidade de exportação dos dados como planilha eletrônica. Com a praticidade de gerar arquivos mais compactos, a aquisição de dados através deste método obteve uma taxa de amostragem aceitável, com aproximadamente uma coleta a cada três segundos de monitoramento.

Entretanto, a imprecisão de equipamentos de GPS convencionais pode chegar à aproximadamente 100 metros, o que compromete a aplicação para coleta de dados e especialmente para o cálculo de velocidades (BERNARDI; LANDIM, 2002). Para esta finalidade, equipamentos de posicionamento por ponto preciso reduzem consideravelmente os efeitos da refração, apresentando precisão da ordem de centímetros.

3.1.1.2 *On-Board Diagnostic - OBD*

Sistemas de diagnóstico *on-board* (OBD) foram introduzidos em grande parte dos veículos e pequenos caminhões. Desde os anos 1980, fabricantes japoneses, americanos e europeus introduziram os sistemas OBD como um meio eletrônico de controle e diagnóstico de problemas (KOLKE, 2006). No Brasil, a partir de 2010 se tornou obrigatório a existência do padrão de segunda geração, o OBD II.

A facilidade da interface através de um sistema OBD, permite que o monitoramento

seja realizado pelos próprios consumidores, com equipamentos extremamente baratos comunicados via *Bluetooth* ou *Wi-Fi* com computadores, *tablets* ou *smartphones*.

Entre os diversos parâmetros adquiridos via OBDII estão os fundamentais para a construção de um ciclo de condução veicular, a velocidade instantânea, o tempo e a distância percorrida. Assim, a aquisição dos dados provenientes da central eletrônica do veículo se torna um método a ser considerado na elaboração dos ciclos de condução.

Para a aquisição de dados via sistema OBDII, a interface foi realizada através de um scanner ELM327. A leitura e armazenamento dos dados em questão utiliza o aplicativo *DashCommand*, desenvolvido pela *Palmer Performance*[®], que age como um avançado computador *on-board*, fornecendo diversas informações disponibilizadas pela ECU entre outras calculadas através do aplicativo. O uso deste sistema possibilitou uma expressiva taxa de amostragem, gerando em média 20 coletas de dados por segundo, o que caracteriza um detalhamento bastante completo do trajeto percorrido.

3.2 DADOS COLETADOS E CONSTRUÇÃO DOS CICLOS DE CONDUÇÃO

As observações foram realizadas em três dias consecutivos, nos dois horários pré-estabelecidos para cada dia. Para carros de passeio, as coletas foram realizadas entre os dias 27 e 29 de abril. Para ônibus urbano, as coletas foram realizadas entre 23 e 25 de junho. Em ambas análises foram desconsiderados os finais de semana, por influenciarem diretamente nas condições de tráfego local.

A necessidade de avaliar condições reais de condução não poderia considerar isoladamente cada dia de coleta de dados. Para isso, uma análise fora realizada afim de determinar o método mais representativo para o agrupamento das informações e construção de ciclos de condução. As metodologias avaliadas objetivaram a formulação de quatro ciclos de condução, em função dos dois horários e dois meios de transporte analisados. A primeira metodologia considerou a realização de médias de velocidade em cada um dos dias, já a segunda metodologia considerou a construção de ciclos cumulativos.

3.2.1 Ciclos de condução baseados em médias de velocidade

Pela literatura, é reconhecido que a utilização de velocidades médias totais em ciclos de condução causa distorção em resultados, especialmente em análises de consumos de combustível e emissões de poluentes.

Entretanto, o método avaliado considerou as velocidades médias a cada 100 metros do percurso. Por exemplo, para o ciclo resultante, o primeiro valor de velocidade a ser considerado originava-se em função da média de velocidade nos primeiros 100 metros do

dia 1, dos primeiros 100 metros do dia 2 e dia 3. Destes três valores era realizada uma nova média, e esta por fim armazenada como o primeiro valor de velocidade para o ciclo médio.

Como ciclos de condução relacionam velocidades em função do tempo, o tempo considerado para cada 100 metros era referente a média entre os valores finais de cada 100 metros. Assim, o valor de tempo era obtido utilizando a média do tempo gasto no dia 1, dia 2 e dia 3 para percorrer os primeiros 100 metros, por exemplo.

O trajeto avaliado possui precisamente 11,8km, portanto, 118 médias de velocidade e tempo eram geradas, possibilitando assim, a formulação de um ciclo real médio de condução. Para aumentar a discretização dos dados, interpolações foram realizadas entre os 118 pontos, acrescentando até 1000 valores entre cada um deles, reduzindo assim a variação encontrada ponto-a-ponto nas velocidades.

3.2.2 Ciclos de condução cumulativos

A construção dos ciclos cumulativos é simplificada, uma vez que são considerados os ciclos obtidos individualmente em suas totalidades, não necessitando ajustes nos valores. Assim, o ciclo final é expresso pela sequência dos ciclos diários individuais, sendo um iniciado após o término do anterior. Além da vantagem construtiva, os ciclos cumulativos não suprimem os dados reais, visto que não é realizado qualquer tipo de média. Com isso, não são desprezadas quaisquer informações de variação de velocidade ou paradas, sendo traduzido o real comportamento instantâneo do veículo. Entretanto, em função da alta taxa de aquisição de amostras, os ciclos cumulativos acabam por somar significativos números de observações. Para a análise realizada em ônibus as 17 horas, o ciclo cumulativo resultante obteve aproximadamente 140000 pontos de velocidade e tempo. Com a finalidade de utilizar os ciclos em simulações computacionais, os cumulativos dependem de um significativo aumento no tempo de processamento.

Em função da maior representatividade do ciclo cumulativo, as análises de emissões e consumo de combustível, bem como os ciclos reais de condução para o trajeto analisado, consideram este método construtivo. Assim, nenhum dado coletado experimentalmente fora distorcido ou suprimido e as condições de condução representam a realidade.

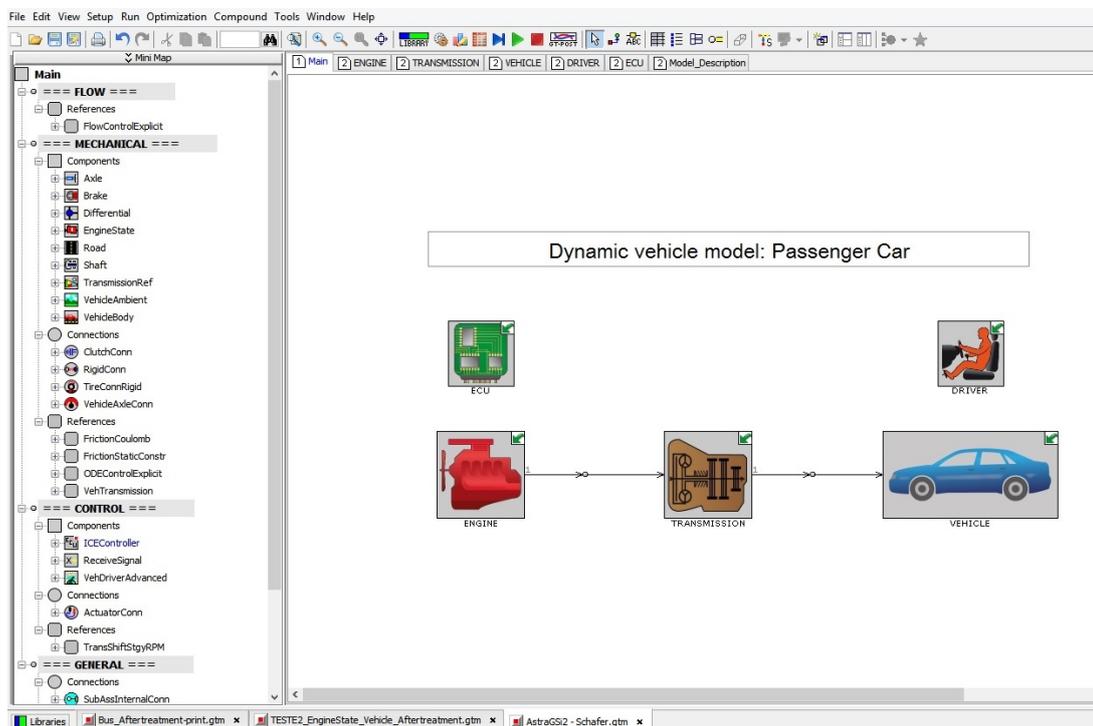
3.3 MODELOS COMPUTACIONAIS

Para a predição de emissões e de consumo de combustível, modelos computacionais foram desenvolvidos através do *software GT-Suite 7.5* da *Gamma Technologies*®. Uma das ferramentas disponíveis no *GT-Suite*, o *GT-Drive* permite a avaliação de dinâmica

veicular, possibilitando a configuração de modelos representativos de diferentes meios de transporte. Para isso, são consideradas as variáveis envolvidas no funcionamento do veículo real, como motor, transmissão, pneus, ambiente e características de condução. Assim, torna-se possível a introdução de um ciclo de condução que através do controle sobre posições de pedal de freio e de acelerador, faz com que o veículo acompanhe a velocidade indicada pelo ciclo de condução (GT-SUITE, 2015a). O pós processamento é realizado através das ferramentas GT-Post 7.5, possibilitando a visualização de resultados e geração de gráficos e tabelas.

O modelo é representado de forma *macro* pela Figura 3.2, onde são posicionados ícones que reproduzem os parâmetros de entrada da simulação. Na unidade *vehicle*, por exemplo, são inseridas características construtivas e mecânicas, como caixa de câmbio, diferencial, freios, pneus, eixos, estrutura e parâmetros aerodinâmicos. Em *driver* são inseridas as características de condução do veículo, como posição dos pedais, velocidade a ser seguida e instantes para troca de marcha. É neste componente que são inseridas as informações de um ciclo de condução, por exemplo.

Figura 3.2 – Representação geral do modelo computacional de carro de passeio através do GT Suite

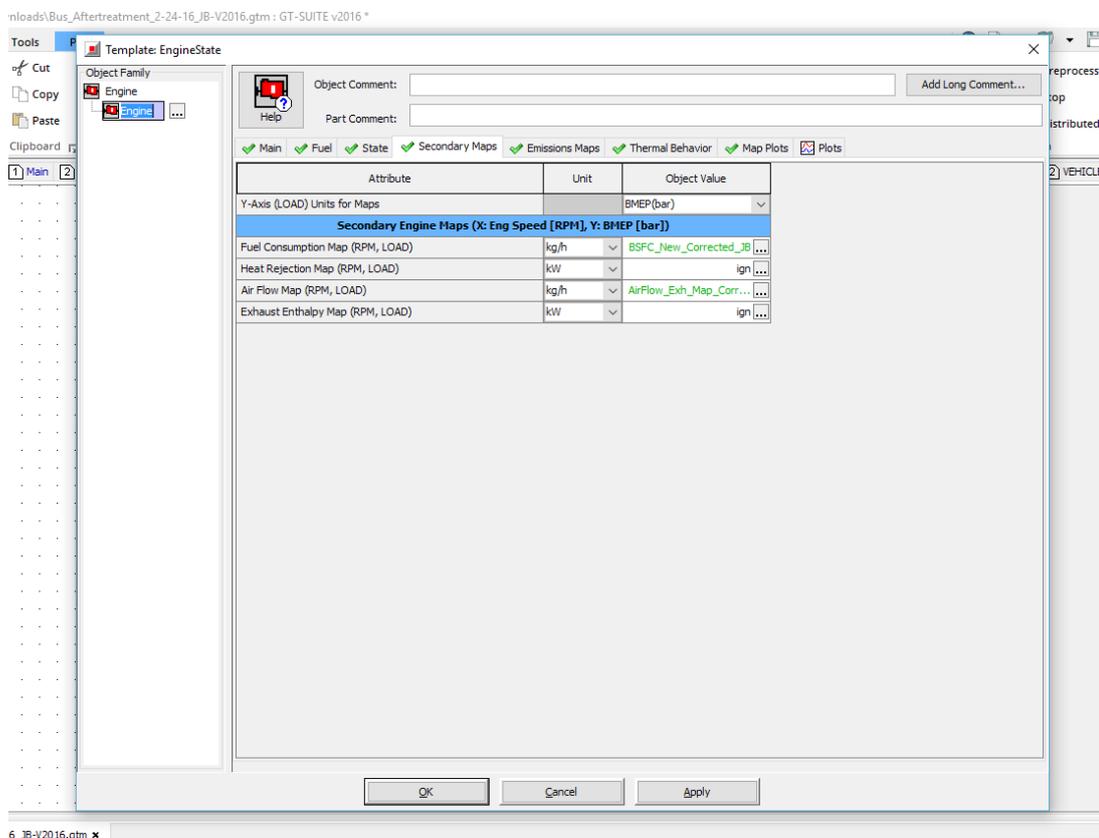


Fonte: O Autor (2016)

Mas é na unidade *engine* que são inseridos os parâmetros mais influentes para a análise realizada neste trabalho. Além de parâmetros como volume deslocado e características do combustível utilizado, são inseridas através de mapas as informações de potência, consumo e emissões. Em geral, estes mapas são compostos de informações em

três coordenadas, relacionando rotação do motor e posição do acelerador. A entrada de informações de desempenho pode ser expressa em função de BMEP, torque ou potência, em acordo com a unidade adotada. Relacionado aos mapas de desempenho, são inseridas informações de consumo de combustível, fluxo de ar e liberação de calor em função da rotação do motor e da carga admitida (Figura 3.3). De maneira similar ao assumido para o consumo de combustível, os mapas considerados para emissões também podem ser em função do BMEP. Individualmente, mapas de NO_x , CO , CO_2 , HC e *material particulado* permitem o cálculo instantâneo da taxa de emissões durante a simulação (Figura 3.4).

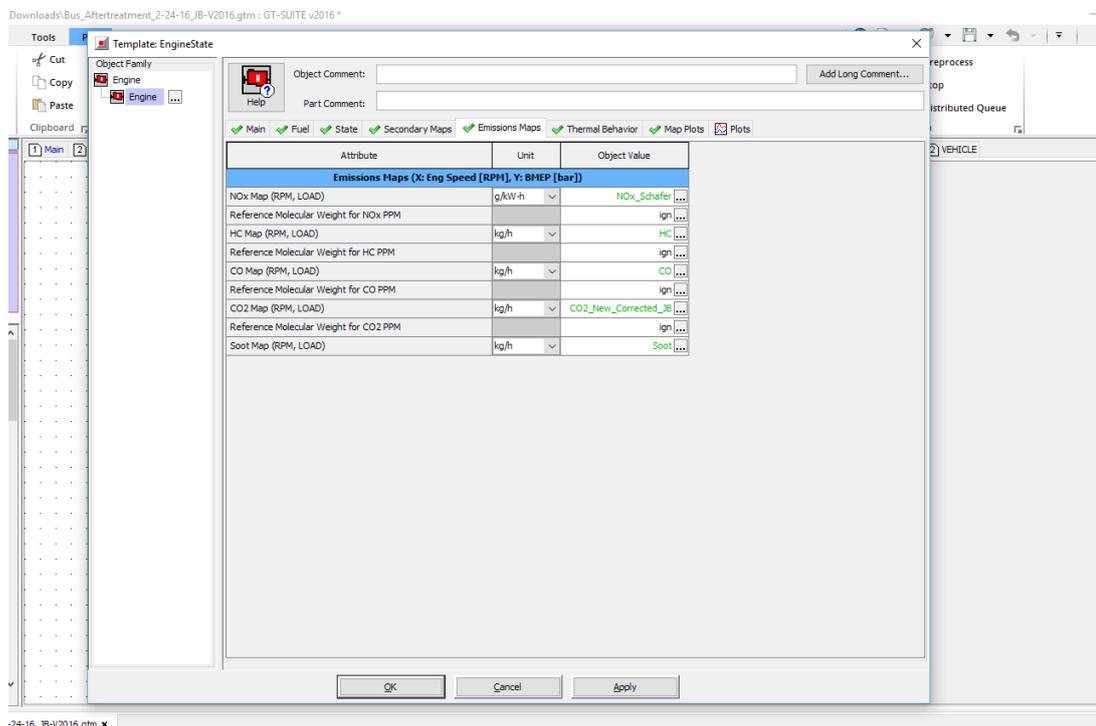
Figura 3.3 – Características de consumo de combustível e ar no *software* GT Suite



Fonte: O Autor (2016)

Em função da capacidade de personalização no *software*, é possível a simulação de diferentes veículos (como veículos de passeio ou caminhões) e diferentes tecnologias, como para controle de emissões, por exemplo. Assim, ao simples modelo representado pela Figura 3.2, podem ser agregadas variações e representados veículos com as mais diversas características. Para o acompanhamento das simulações, no GT-Post podem ser inseridos monitores instantâneos das variáveis desejadas, como emissões, consumo de combustível, velocidade do modelo e do ciclo, entre outras.

Figura 3.4 – Características de comportamento das emissões inseridas no *software* GT Suite



Fonte: O Autor (2016)

3.3.1 Abordagem

No modelo computacional utilizado, características construtivas e de operação do motor e do veículo são utilizadas como dados de entrada. Derivadas destas características resultam as informações dinâmicas, como velocidade e torque. Em acréscimo, mapas-base correlativos de torque, consumo de combustível, emissões e rejeição de calor também são utilizados na simulação.

Em análises dinâmicas no GT-Drive, as equações diferenciais de movimento do veículo e seus componentes são integradas no tempo, calculando transientes de velocidade e de torque no sistema. O torque do motor é dado em função das condições de operação e calculado através do mapa de BMEP previamente inserido. Também em função do BMEP, o modelo determina a posição constante ou transitória do acelerador. A resistência a rolagem é determinada através de coeficientes aerodinâmicos e da velocidade do veículo, sendo calculada linearmente em função da força que se opõe ao movimento.

A equação que representa o movimento do motor é dada através da relação,

$$\tau = [I_{eng}] \frac{d\omega_{eng}}{dt} \quad (3.1)$$

Onde o torque (*brake*) τ é obtido através da relação entre o momento de inércia do motor (I_{eng}) e a rotação (ω) no tempo t . Já o cálculo de movimento do veículo envolve um maior número de variáveis, como o torque necessário para vencer a inércia, avaliado na embreagem, a carga induzida em cada relação de transmissão e as forças externas, como gravidade e resistências aerodinâmicas e à rolagem.

Assim, o torque resultante para o movimento do veículo pode ser obtido pela expressão

$$\begin{aligned}
 \tau_{vehicle} = & \left[I_{trans1} + \frac{I_{trans2}}{R_t^2} + \frac{I_{dsh}}{R_t^2} + \frac{I_{axl}}{(R_d^2)(R_t^2)} + \frac{(M_{veh})(r_{whl}^2)}{(R_d^2)(R_t^2)} \right] \frac{d\omega_{drv}}{dt} \\
 & - \left[\frac{I_{trans2}}{R_t^3} + \frac{I_{dsh}}{R_t^3} + \frac{I_{axl}}{(R_d^2)(R_t^3)} + \frac{(M_{veh})(r_{whl}^2)}{(R_d^2)(R_t^3)} \right] \omega_{drv} \frac{dR_t}{dt} \\
 & + \left[\frac{F_{aer} + F_{rol} + F_{grd}}{R_d R_t} \right] r_{whl}
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

onde I_{trans1} e I_{trans2} representam os momentos de inércia na entrada e na saída do conjunto de transmissão, respectivamente. Os termos R_d e R_t representam as relações de transmissão final e para cada marcha. O momento de inércia do eixo de transmissão é dado por I_{dsh} , enquanto o referente ao número de rodas é dado por I_{axl} . O raio da roda é representado no termo r_{whl} e a massa do veículo em M_{veh} . Todos estes termos estão relacionados com a velocidade ω_{drv} do veículo no instante de tempo t . Esta primeira parte da equação representa o torque requerido para acelerar a inércia efetiva, avaliada diretamente no sistema de embreagem e de transmissão.

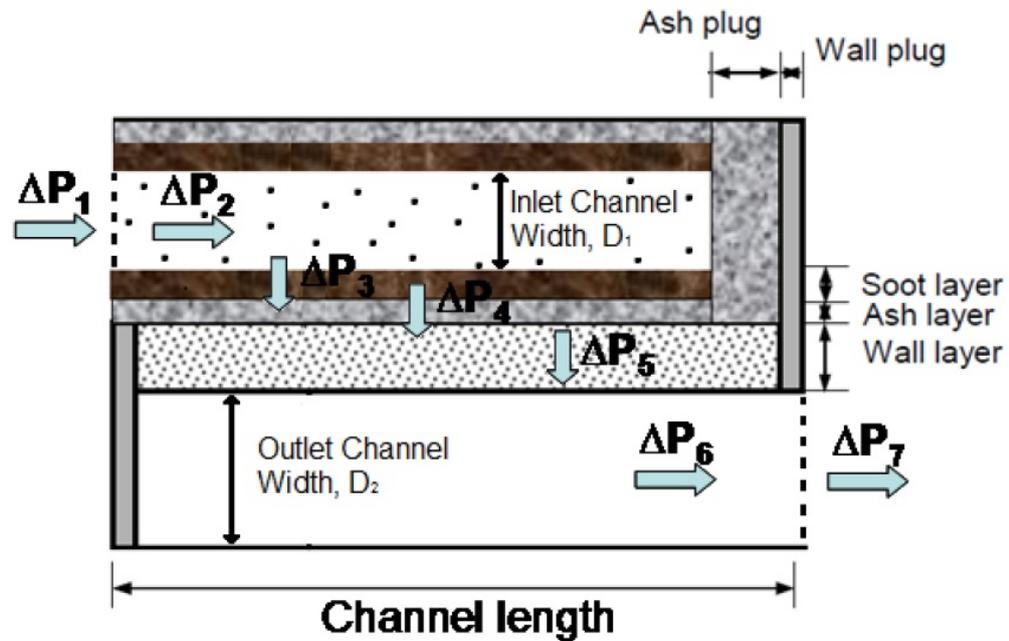
Na segunda parte da equação, os termos são relacionados à derivada temporal da relação de transmissão R_t , representando a carga induzida em função do transiente da relação de marchas. As forças externas são adicionadas na terceira parte da equação através dos termos F_{aer} (forças aerodinâmicas), F_{rol} (forças de resistência à rolagem) e F_{grd} (força gravitacional), sendo convertidas em torque através da relação estabelecida com o raio das rodas r_{whl} . Detalhes específicos da composição de cada uma das forças e demais equações relacionadas ao modelo computacional podem ser observados no manual do software GT-Suite (GT-SUITE, 2015a).

Os sistemas de pós tratamento são abordados em manual específico do *software* (GT-SUITE, 2015b). Nele são definidos os parâmetros necessários para a construção e calibração de diferentes sistemas, como os utilizados neste trabalho.

O modelo do filtro de partículas (DPF), por exemplo, apresenta fluxo através de "paredes", responsável por sucessivas quedas de pressão e conseqüente formação de cinzas, as quais devem ser removidas através do processo de regeneração para garantir a

eficiência do filtro. A determinação das quedas individuais e total de pressão é fundamental para a correta modelagem do sistema de regeneração. O modelo utilizado considerou diâmetro de entrada e saída iguais, ou seja, $D_1=D_2$. As quedas de pressão representadas por ΔP_1 e ΔP_7 representam as condições na conexão com o escapamento.

Figura 3.5 – Sucessivas quedas de pressão no DPF



$$\Delta P_{total} = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_4 + \Delta P_5 + \Delta P_6 + \Delta P_7$$

Fonte: GT-Suite (2015b)

Para estas condições, as quedas de pressão no filtro DPF podem ser expressas pelas equações:

$$\Delta P_1 = \frac{\xi_{contraction} \rho_{inlet} U_{inlet}^2}{2} \quad (3.3)$$

$$\Delta P_2 = \frac{\mu Q}{2V_{trap}} (D + W_{soot})^2 \frac{4FL^2}{3} \left(\frac{1}{(D - 2w_{wall})^4} \right) \quad (3.4)$$

$$\Delta P_3 = \frac{\mu U_{w,1} (D - 2w_{soot} - 2w_{ash})}{2k_{soot}} \ln \left(\frac{D}{D - 2w_{soot} - 2w_{ash}} \right) + \beta_{soot} \rho w_{soot} U_{w,1}^2 \quad (3.5)$$

$$\Delta P_4 = \frac{\mu_w U_{w,1}}{2k_{ash}} (D - 2w_{ash}) \ln \left(\frac{D}{D - 2w_{ash}} \right) + \beta_{ash} \rho w_{ash} U_{w,1-2}^2 \quad (3.6)$$

$$\Delta P_5 = \sum \left(\frac{\mu U_{w,2} w_{slab,i}}{k_{wall,i}} + \beta_{wall} \rho w_{slab,i} U_{w,2}^2 \right) \quad (3.7)$$

$$\Delta P_6 = \frac{\mu Q}{2V_{trap}}(D + W_{soot})^2 \frac{4FL^2}{3} \left(\frac{1}{D^4}\right) \quad (3.8)$$

$$\Delta P_7 = \frac{\xi_{expansion} \rho_{outlet} U_{outlet}^2}{2} \quad (3.9)$$

Onde ξ determina o coeficiente de contração ou expansão do gás com a queda de pressão, ρ a densidade do gás, U a velocidade do gás, μ a viscosidade do gás, Q o fluxo volumétrico, V o volume total do DPF, D a largura do canal, w as espessuras dos componentes, L o comprimento do canal, k a permeabilidade do material ou do particulado, β a constante de Forchheimer e i a discretização das paredes do filtro.

Para a modelagem do sistema de regeneração, o modelo unidimensional desenvolvido no *software* GT-Drive pode ser utilizado para o estudo de fluxos não uniformes ao longo dos canais do filtro durante o processo de regeneração. A solução envolve duas etapas. Inicialmente são realizados cálculos de fluxo nos canais de entrada e saída, baseado em condições *quasi-steady*. Assim, com as condições de fluxo obtidas (pressão, temperatura e velocidade), a massa de particulado depositada na superfície do filtro pode ser calculada. A análise de fluxo é governada pelas equações a seguir:

- Balanço de massa:

$$\frac{d(\rho_i u_i D_i^2)}{dz} = (-1)^i 4D_i \rho_{wi} u_{wi} \quad (3.10)$$

- Balanço de momento:

$$\frac{d(P_l + \rho_l u_l^2)}{dz} = \frac{-\alpha \mu_1 u_1}{D_1^2} \quad (3.11)$$

- Balanço de energia:

$$\rho_i u_i \frac{D_i}{4} C_{pg,i} \frac{dT_i}{dz} = h_{trans,i}(T_w - T_i) + (-1)^i \rho_{wi} u_{wi} (h_{wi} - h_i) \quad (3.12)$$

- Darcy's law para queda de pressão:

$$dp = \begin{cases} \frac{\mu_w}{k_p} u_w dx & \text{para } x \in (0, w) \\ \frac{\mu_w}{k_s} u_w dx & \text{para } x \in (w, w_s) \end{cases} .$$

Com isso, a análise uni-dimensional é governada por:

- Velocidade nas paredes:

$$\frac{du_x}{dx} = -\frac{2u_w}{D - 2w + 2x} \quad (3.14)$$

- Densidade:

$$\frac{d\rho_w}{dx} = \frac{\sum s_k W_k}{u_w} \quad (3.15)$$

- Fração mássica:

$$\frac{dY_k}{dx} = \frac{[W_k s_k - Y_k \sum s_{k,m} W_k]}{\rho_w u_w} \quad (3.16)$$

- Taxa de oxidação:

$$r_{soot} = \rho_{w1} u_{w1} (D - 2w) - \rho_{w2} u_{w2} D \quad (3.17)$$

- Taxa da transferência de calor na reação:

$$h_{rxn} = \rho_{w1} u_{w1} (D - 2w) - \rho_{w2} u_{w2} D h_{w2} \quad (3.18)$$

Com estas características do material particulado é possível fazer o dimensionamento do filtro e do sistema regenerativo. Demais sistemas de pós-tratamento podem ser desenvolvidos no *software* com as instruções fornecidas pelo manual de *Aftertreatment* (GT-SUITE, 2015b)

3.3.2 Características

Como a proposta do trabalho contempla a comparação entre meios de transporte individuais e coletivos, dois modelos computacionais foram elaborados. Um deles simula um veículo de passeio nacional, e o outro simula um ônibus urbano. As características adotadas para ambos assemelham a expressiva parcela dos veículos encontrados na cidade de Santa Maria. Limitações foram encontradas na definição das características específicas dos veículos, por não serem informações amplamente divulgadas e disponíveis, em especial para consumo de combustível e emissões específicas. Com isso, além de informações coletadas da literatura, através de livros e artigos, definições sugeridas pelo *software* também foram acatadas.

As características utilizadas nos modelos são descritas na Tabela 3.1. O carro de passageiro considerado representa um hatch nacional de médio porte, para cinco passageiros mas em tráfego somente com o motorista. Para o ônibus urbano, as características adotadas representam um veículo de dois eixos em carga máxima, com informações de emissões, consumo de combustível e coeficiente aerodinâmico extraídos da literatura (SCHÄFER; BASSHUYSEN, 1995) e (RAHMAN; BUTLER; EHSANI, 1999).

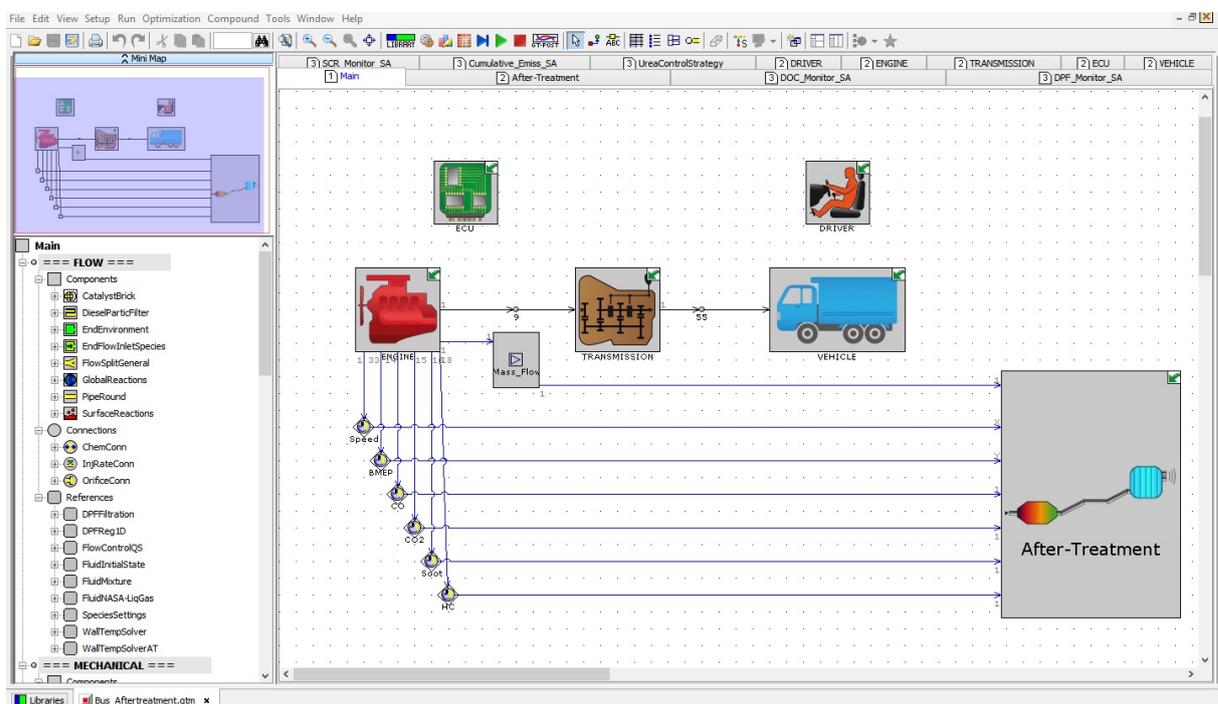
Tabela 3.1 – Dados de entrada nos modelos computacionais

	Carro de passeio	Ônibus urbano
<i>Vehicle (Veículo)</i>		
Pneus	205/55/16	275/80/22,5
Massa do veículo (<i>kg</i>)	1.275	10.000
Massa dos passageiros (<i>kg</i>)	80	3.500
Coeficiente aerodinâmico	0,29	0,45
Área frontal (<i>m</i> ²)	1,95	8,00
Distância entre-eixos (<i>m</i>)	2,614	5,25
Transmissão	Manual	Manual
Quantidade de eixos	2	2
<i>Engine (Motor)</i>		
Volume deslocado (<i>cm</i> ³)	1998	4000
Número de cilindros	4	4
Ciclo	Otto	Diesel
Densidade do comb. (<i>kg/m</i> ³)	720	852
Torque	19,2 <i>kgfm</i> a 4000 <i>rpm</i>	71,3 <i>kgfm</i> a 1400 <i>rpm</i>
Potência	100 <i>kW</i> a 5400 <i>rpm</i>	153 <i>kW</i> a 2200 <i>rpm</i>
Aspiração	Naturalmente aspirado	Turbo-alimentado
Poder calorífico do combustível (<i>MJ/kg</i>)	44,16	45,95
BMEP máximo (<i>bar</i>)	11,14 (a 3000 <i>rpm</i>)	15,2 (a 1800 <i>rpm</i>)
Consumo específico mín. de combustível (<i>g/kWh</i>)	243,0 (a 2000 <i>rpm</i>)	49,02 (a 1250 <i>rpm</i>)
Consumo específico máx. de combustível (<i>g/kWh</i>)	282,0 (a 3500 <i>rpm</i>)	104,57 (a 2500 <i>rpm</i>)
Emissão mín. NOx (<i>g/kWh</i>)	0,75 (a 3000 <i>rpm</i>)	0,12 (a 1000 <i>rpm</i>)
Emissão máx. NOx (<i>g/kWh</i>)	5,00 (a 2000 <i>rpm</i>)	1,98 (a 2400 <i>rpm</i>)
Emissão mín. HC (<i>g/kWh</i>)	0,20 (a 4000 <i>rpm</i>)	0,04 (a 1250 <i>rpm</i>)
Emissão máx. HC (<i>g/kWh</i>)	5,00 (a 2000 <i>rpm</i>)	0,12 (a 2250 <i>rpm</i>)
Emissão mín. CO (<i>g/kWh</i>)	5,00 (a 4000 <i>rpm</i>)	0,22 (a 2100 <i>rpm</i>)
Emissão máx. CO (<i>g/kWh</i>)	20,00 (a 2000 <i>rpm</i>)	0,39 (a 1250 <i>rpm</i>)
Emissão mín. MP (<i>g/kWh</i>)	–	0,005 (a 2000 <i>rpm</i>)
Emissão máx. MP (<i>g/kWh</i>)	–	0,023 (a 1000 <i>rpm</i>)
<i>Transmission (Transmissão)</i>		
Relação 1ª Marcha	3,73	6,70
Relação 2ª Marcha	1,96	3,81
Relação 3ª Marcha	1,32	2,29
Relação 4ª Marcha	0,95	1,48
Relação 5ª Marcha	0,76	1,00
Relação 6ª Marcha	–	0,73
Eficiência	0,97	0,97
Relação Final Diferencial	4,19	4,857
<i>Driver (Motorista)</i>		
Troca de Marcha (em <i>rpm</i>) 2	3500 (1 – 2) e 1200 (2 – 1)	2500 (1 – 2) e 1000 (2 – 1)
Troca de Marcha (em <i>rpm</i>) 3	3500 (2 – 3) e 1600 (3 – 2)	2500 (2 – 3) e 1000 (3 – 2)
Troca de Marcha (em <i>rpm</i>) 4	3000 (3 – 4) e 1600 (4 – 3)	2500 (3 – 4) e 1200 (4 – 3)
Troca de Marcha (em <i>rpm</i>) 5	3000 (4 – 5) e 1600 (5 – 4)	2500 (4 – 5) e 1400 (5 – 4)
Troca de Marcha (em <i>rpm</i>) 6	–	2500 (5 – 6) e 1000 (6 – 5)

3.3.3 Tecnologias para redução de emissões

O modelo representativo elaborado para o ônibus urbano foi aprimorado com a adição de sistema de pós tratamento de gases. Para isso, informações de emissões geradas pelo motor simulado, são induzidas ao fluxo em um sistema composto por três diferentes sistemas de atenuação de emissões. O modelo macro é representado pela Figura 3.6, demonstrando a ligação das informações de saída do motor à entrada do sistema de exaustão.

Figura 3.6 – Representação geral do modelo computacional de ônibus urbano com sistema de pós tratamento através do *software GT Suite*



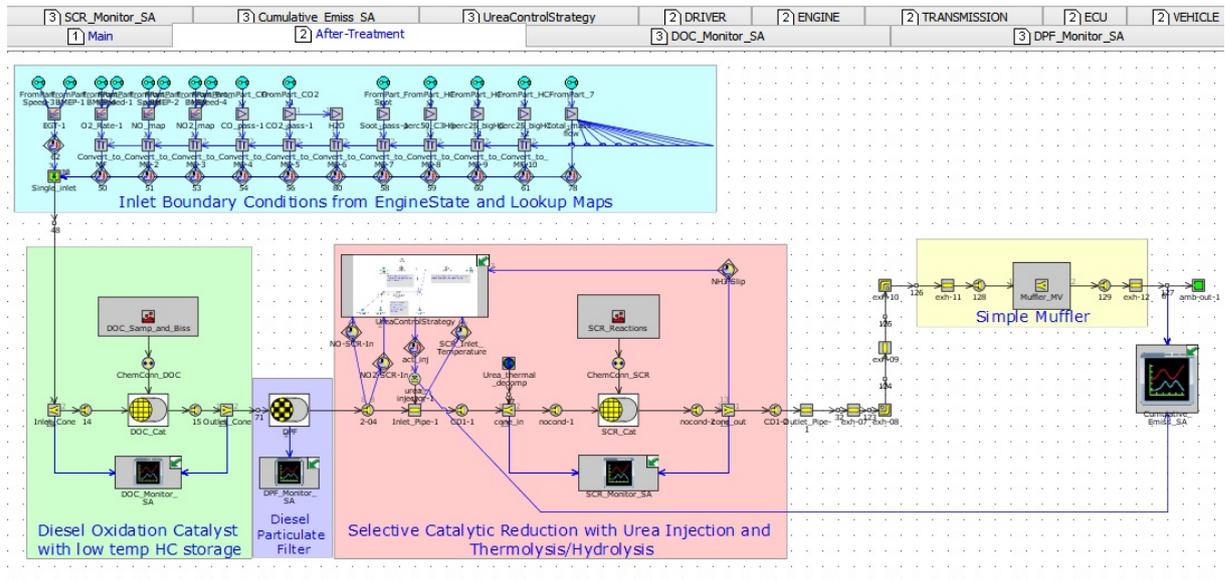
Fonte: O Autor (2016)

Detalhando o sistema de pós tratamento, a Figura 3.7 representa individualmente cada um dos sistemas utilizados. Em série, foram adotados o sistema DOC (*Diesel Oxidation Catalyst*), DPF (*Diesel Particulate Filter*) e SCR (*Selective Catalyst Reduction*).

O catalisador *DOC* utilizado apresenta geometria frontal quadrada, com área do substrato interno igual a 200cm^2 . A densidade considerada para o substrato, que representa o número de canais por unidade de área é igual a $62/\text{cm}^2$, com comprimento dos canais igual à 150mm . A reação química ocorre através do contato do gás com o metal utilizado no revestimento dos canais. Neste caso, o revestimento de alumina é suportado sobre um monolito cerâmico de cordierita, regulando as emissões de *CO*, *HC* e também *NOx* (CÓNSUL et al., 2004). A alumina e a cordierita diferem entre si em densidade e calor específico, de acordo com a temperatura dos gases de exaustão, sendo estes valores tam-

bém inseridos no modelo. A temperatura utilizada como inicial para a parede do catalisador é de $27C$.

Figura 3.7 – Detalhamento do sistema de pós tratamento utilizado no modelo computacional de ônibus urbano através do *software* GT Suite.

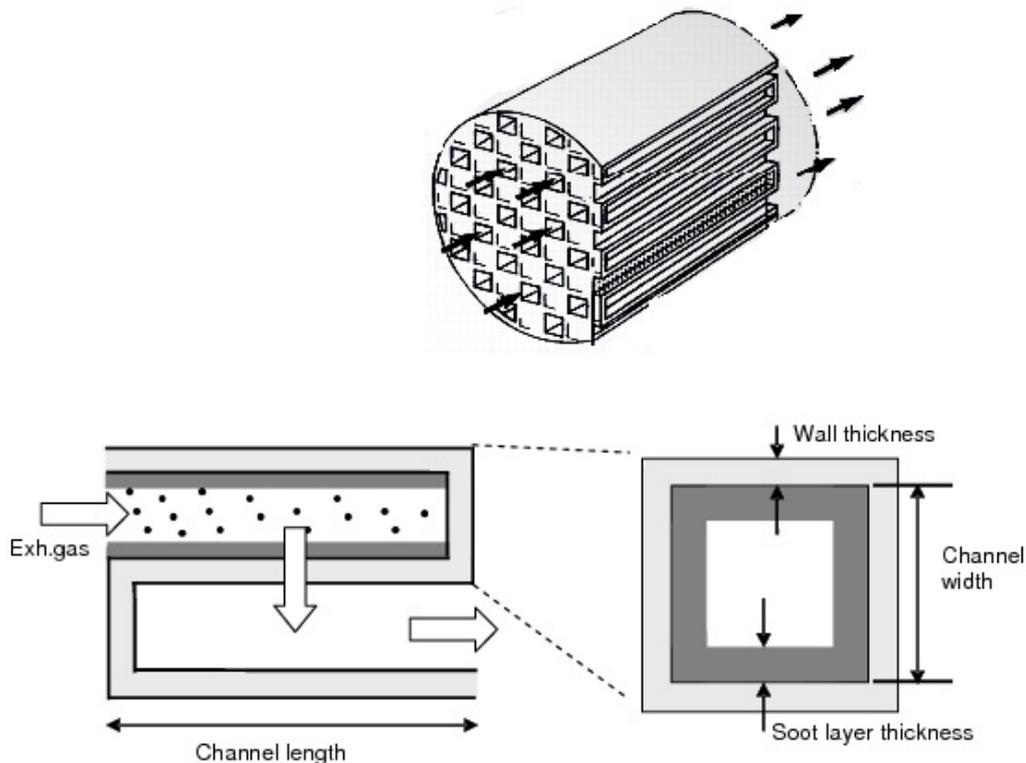


Fonte: O Autor (2016)

Na modelagem computacional, posterior ao catalisador, adicionou-se um filtro de partículas (DPF). O fluxo, geometria e composições são representados na Figura 3.8. A área frontal de filtragem é definida em função do diâmetro do filtro, considerado de $130mm$ para esta análise. A espessura da parede do substrato (*Wall thickness*) fora definida em $0,3556mm$. O comprimento dos canais (*Channel Length*) fora definido em $260mm$. A densidade definida para as células de entrada fora de $14,72/cm^2$. O material definido para o substrato é o mesmo utilizado no catalisador *DOC*, a cordierita. Para a permeabilidade do filtro foram assumidos diâmetros de $15\mu m$ no substrato e permeabilidade da ordem de $8e^{-7}mm$.

Em função do acúmulo de fuligem no substrato, é necessário que sejam realizados procedimentos para limpeza e reestabelecimento do potencial do filtro. O processo de regeneração pode ser realizado de diferentes maneiras, resultando basicamente na queima das partículas retidas no filtro. No modelo, fora ativada a redução passiva de fuligem por reação de NO_2 . Assim, com a elevação da temperatura dos gases de escape até o ponto de ativação da reação $C(s) + NO_2 \Rightarrow CO + NO$, as partículas retidas no filtro são queimadas e decompostas juntamente com o NO_2 existente na linha, em CO e NO .

Figura 3.8 – Fluxo em um filtro de partículas *DPF*



Fonte: MILLO; KHAIR (2008)

Após o *DOC* e o *DPF*, o sistema de redução catalítica seletiva (*SCR*) contribui para a redução nas emissões de óxidos de nitrogênio. No modelo utilizado, sensores identificam a quantidade de NO e NO_2 existente nos gases de escape oriundos do motor e não contidos pelos sistemas anteriores. O conhecimento do fluxo molar de NO_x é necessário para a determinação do fluxo da solução de uréia a ser injetada, considerando a relação de 1:1 de NH_3 para NO_x , em um composto de 32,5% de massa de uréia em 67,5% de água. O fluxo de massa da solução a ser injetada é de $1g/s$ com o fluido a temperatura ambiente. O monitoramento da temperatura garante que as injeções do composto de uréia não sejam realizadas em temperaturas inferiores à $200C$, o que resultaria em inadequada conversão de NH_3 e indesejada formação de outros gases. Após a injeção, o monitoramento da quantidade de amônia na linha garante que a concentração não ultrapasse o limiar de $15ppm$, atuando diretamente no injetor. A reação entre NH_3 e NO_x ocorre no catalisador *SCR*, formando nitrogênio (N_2).

O catalisador utilizado considera área frontal circular de $201cm^2$ e comprimento de $30,48cm$, com aproximadamente 62 capilares para cada cm^2 de área frontal. O material utilizado no substrado é a cerâmica cordierita, assim como no *DOC* e no *DPF*, mas com espessura de $0,1524mm$.

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através de aquisições experimentais e simulações computacionais. Consideram-se os ciclos reais de condução obtidos para o trajeto apontado no item 3.1, que liga a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) ao centro da cidade de Santa Maria-RS em dois horários de diferentes condições de tráfego: as 12 horas (tráfego livre) e as 17 horas (tráfego intenso) considerando carros de passeio e ônibus urbano. Através de simulações computacionais, são apontados valores representativos para emissões e consumo de combustível nas diferentes condições, além de alternativas para a redução de emissões.

4.1 DETERMINAÇÃO DO MÉTODO DE COLETA DE DADOS

Para a definição do método a ser empregado na coleta de dados, ciclos prévios de condução, não representativos, foram desenvolvidos utilizando as duas metodologias apresentadas no capítulo anterior, GPS e OBDII.

A coleta de dados foi realizada utilizando um veículo utilitário leve, percorrendo o trajeto sugerido no item 3.1 em dia e horário de tráfego livre. Com isso, os 11,8 km foram completados em 1050 segundos, resultando em 360 coletas de posicionamento pelo GPS e velocidade média do veículo de aproximadamente 38km/h. Através da central eletrônica do veículo, o mesmo trajeto foi monitorado resultando em 19890 coletas de informações gerais, apontando velocidade média próxima à 36km/h. A Figura 4.1 demonstra graficamente a disposição dos valores de velocidade coletados através dos dois métodos em relação ao tempo.

A variação entre os dados coletados pode ser justificada por dois principais fatores. Dentre eles a origem dos dados de velocidade, que no GPS depende do referenciamento através de satélites, enquanto através do sistema OBD, a velocidade coletada é a representada através do velocímetro. Outro fator ao qual pode ser atribuída uma variação entre os dados é a de possível fuga de sinal entre satélite e receptor no sistema GPS. Com isso, ao ser restabelecido o sinal, a tendência é que a velocidade seja tal que compense o período pelo qual não houve a transferência de informações.

Para a definição da metodologia de aquisição de dados, um modelo computacional genérico, não representativo de um veículo real, recebeu como dados de entrada os pontos tomados no ciclo real de condução obtido via GPS. Deste modelo foram extraídos valores de emissões de NO_x , CO , HC e consumo de combustível. Posteriormente, uma análise similar foi realizada onde, entretanto, fora introduzido o ciclo obtido via OBD. A Tabela 4.1 apresenta a comparação entre os valores totais de gases emitidos e combustível

consumido, através da simulação dos dois modelos. Devido a maior taxa de amostragem, a variação considerada na tabela relacionou os dados obtidos no primeiro modelo, que utiliza o ciclo de condução obtido via GPS com os obtidos no segundo modelo, simulado com ciclo via OBDII. Modelos computacionais mais elaborados e representativos são apresentados em item específico.

Tabela 4.1 – Comparação entre os valores totais simulados

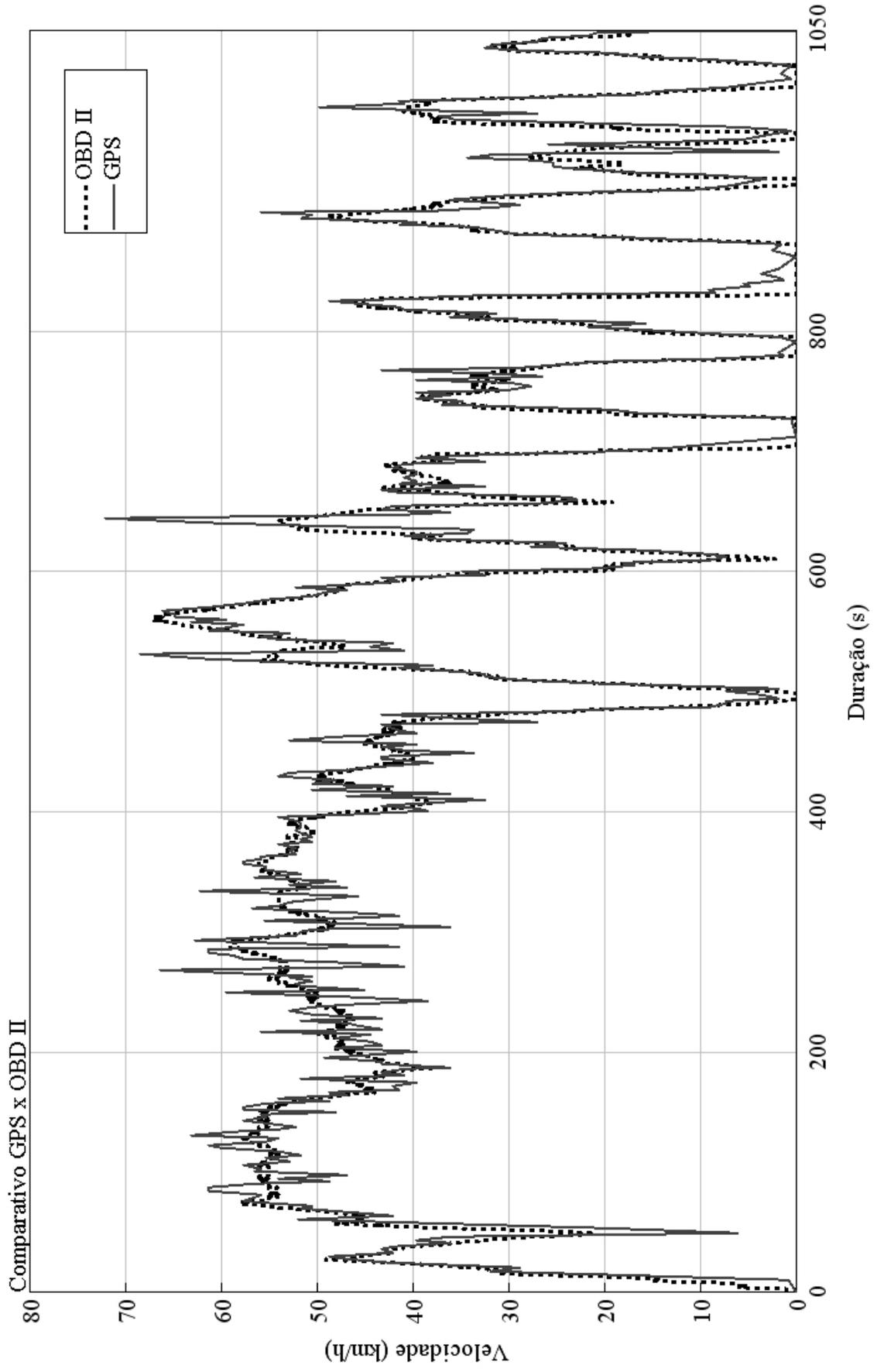
Parâmetro	OBD II	GPS	Variação (%)
Emissões de NO_x (g)	51,7	65,8	+ 27,2727
Emissões de CO (g)	167,5	140,6	- 16,0597
Emissões de HC (g)	8,4	7,2	- 14,2857
Consumo de combustível (L)	1,249	1,352	+ 8,2466

Fonte: O Autor (2016)

A maior discrepância é apontada nas emissões de NO_x , onde são emitidos 27,27% a mais de massa de gás no modelo desenvolvido utilizando o ciclo obtido via GPS. Em termos percentuais, os outros parâmetros apresentam variação considerável, porém menos expressiva. Como comparações pontuais de emissões e consumo de combustível, os gráficos representados através dos itens a,b,c e d da Figura 4.2, realizam a representação instantânea no decorrer do ciclo. Os dados possuem comportamento bastante semelhante, onde o offset apresentado entre os valores simulados nos dois modelos resulta nas informações dispostas na Tabela 4.1.

A realização da análise pela representação instantânea é particularmente útil ao se avaliar o consumo de combustível e emissões em uma simulação de veículo em velocidade transitória, onde se encontram diversas velocidades de funcionamento em estado estacionário durante a simulação.

Figura 4.1 – Comparação gráfica de um ciclo de condução coletado por diferentes métodos



Com isso, a fim de concluir sobre o método a ser utilizado na coleta de dados, fez-se uso de uma comparação estatística nos resultados obtidos pelos modelos computacionais e expressos na Figura 4.2. As análises abrangem as emissões instantâneas de NO_x , HC e CO e também o consumo instantâneo de combustível, todos em g/km.

Considerando o teste de Shapiro Wilk (ROYSTON, 1982), inicialmente foi realizado um teste de normalidade, com o objetivo de definir o método de comparação de média mais adequado aos dados. Como nenhuma variável apresentou comportamento normal, considerou-se o teste não paramétrico de Wilcoxon (WILCOXON, 1945). Os testes foram realizados através do *software* R (R Development Core Team, 2014). Na Tabela 4.2 encontram-se os resultados para os testes realizados, bem como os valores de média para as variáveis consideradas. Não se pode afirmar que em média as variáveis sejam iguais, pois nenhum dos testes aplicados foi significativo (p -valor $<0,0$) ao nível de 5% de confiança. Com isso, devido a maior discretização amostral dos dados obtidos via OBD, este método de coleta foi considerado mais representativo, servindo de base nas aquisições de dados.

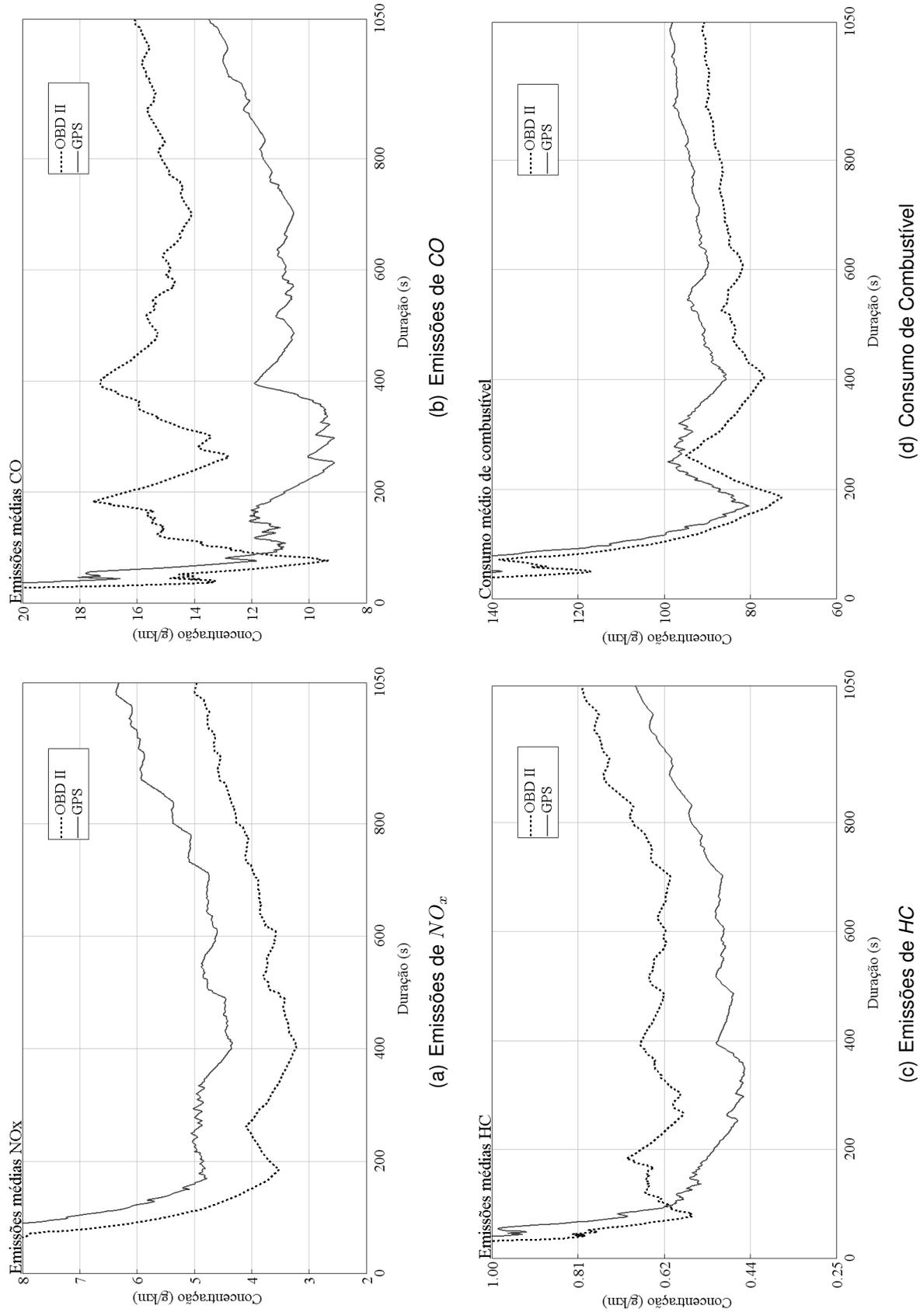
Tabela 4.2 – Resultados numéricos dos testes estatísticos

	NO_x		CO		HC		Combustível	
	GPS	OBD	GPS	OBD	GPS	OBD	GPS	OBD
Shapiro-Wilk								
p-valor	<0,00		<0,00		<0,00		<0,00	
Wilcoxon								
p-valor	<0,00		<0,00		<0,00		<0,00	
Médias								
	8,867	9,485	14,390	20,080	0,790	4,144	107,538	98,007

Fonte: O Autor (2016)

Em função da tecnologia OBDII não estar disponível em grande parte da frota de ônibus urbanos de Santa Maria, adotou-se a metodologia do *car-chasing* para a coleta de dados, utilizando um veículo de passeio (dotado de sistema OBDII) em “perseguição” ao coletivo alvo.

Figura 4.2 – Emissões e consumo médios para ciclos reais obtidos por GPS e OBDII



4.2 CICLOS REAIS INDIVIDUAIS

Conforme definido no item anterior, as coletas de dados de condução foram realizadas através da central eletrônica de um automóvel de passeio, sendo utilizada a metodologia do *car-chasing* para a aquisição de ciclos reais em ônibus urbanos. As Tabelas 4.3 e 4.4 representam os ciclos individuais coletados para carros de passeio e ônibus urbano, respectivamente, sendo posteriormente transformados em ciclos médios e cumulativos.

Tabela 4.3 – Características dos ciclos individuais para veículos de passeio

	12:00h			17:00h		
	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 1	Dia 2	Dia 3
Amostras	19654	17929	14497	25528	28526	23607
Velocidade Média (km/h)	34,73	29,67	37,53	21,70	18,78	23,06
Velocidade Máxima (km/h)	71	68	66	66	67	63
Duração (s)	1214,63	1403,69	1119,84	1939,01	2239,54	1834,55

Fonte: O Autor (2016)

Tabela 4.4 – Características dos ciclos individuais para ônibus urbano

	12:00h			17:00h		
	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 1	Dia 2	Dia 3
Amostras	25735	29472	28981	43681	35459	59728
Velocidade Média (km/h)	26,68	23,96	22,76	15,97	20,07	11,88
Velocidade Máxima (km/h)	55	62	72	59	65	50
Duração (s)	1573,25	1759,15	1838,34	2632,64	2127,6	3561,33

Fonte: O Autor (2016)

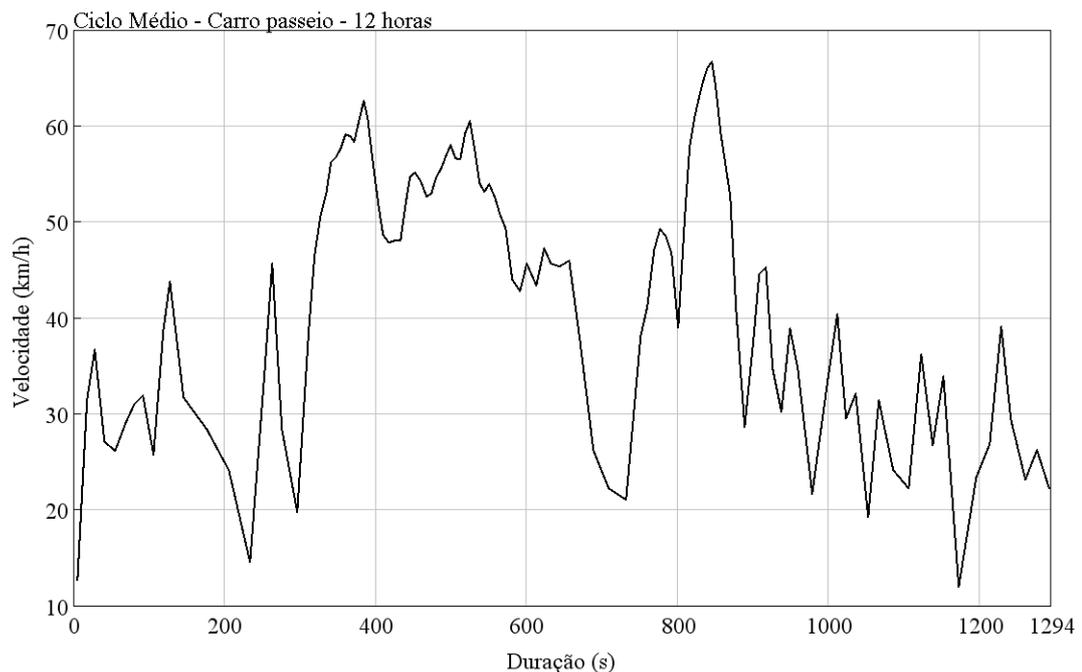
Em função do elevado número de informações coletadas por segundo, é significativo o número de observações na mesma velocidade, sendo entretanto, em um curto intervalo de tempo. Por exemplo, para o primeiro dia de coleta às 12 horas em carro de passeio, das 19654 amostras totais, apenas 488 apresentam acelerações e 766 apresentam desacelerações. Isto se deve em função da incerteza de medição ser da ordem de 1km/h , registrando somente valores unitários de velocidade. Como esperado, os dados coletados às 17h mostraram um fluxo mais intenso do que o encontrado às 12h, já que representa o horário de retorno dos servidores e alunos da UFSM ao centro de Santa Maria. Assim como as paradas para carga e descarga de passageiros, influenciaram diretamente na duração dos ciclos individuais coletados para ônibus urbano em comparação ao fluxo contínuo encontrado para veículos de passeio

4.3 DESENVOLVIMENTO DOS CICLOS REAIS DE CONDUÇÃO

O desenvolvimento de ciclos de condução reais para os casos analisados transcorreu através de duas metodologias. A primeira considera a construção de ciclos médios, com a adoção de velocidades médias obtidas em cada trecho. O segundo método contempla uma sequência de dados adquiridos, fazendo com que seja avaliada uma condição cumulativa dos dias observados. Entretanto, o item 3.2 justifica a adoção da metodologia mais representativa às condições reais para a realização das análises. Assim, as avaliações dos itens seqüentes tem como base o ciclo cumulativo de três dias de coleta, uma vez que no estudo de emissões e consumo de combustível serão considerados valores médios por quilômetro rodado.

A Figura 4.3 apresenta um ciclo médio com os dados dos três dias de coleta para carros de passeio às 12 horas, conforme os dados apontados na Tabela 4.3. Os 118 pontos resultantes apresentam velocidade média de $42,85\text{km/h}$ e duração de pouco menos de 1294 segundos.

Figura 4.3 – Exemplo de ciclo real médio obtido para carros de passeio às 12 horas



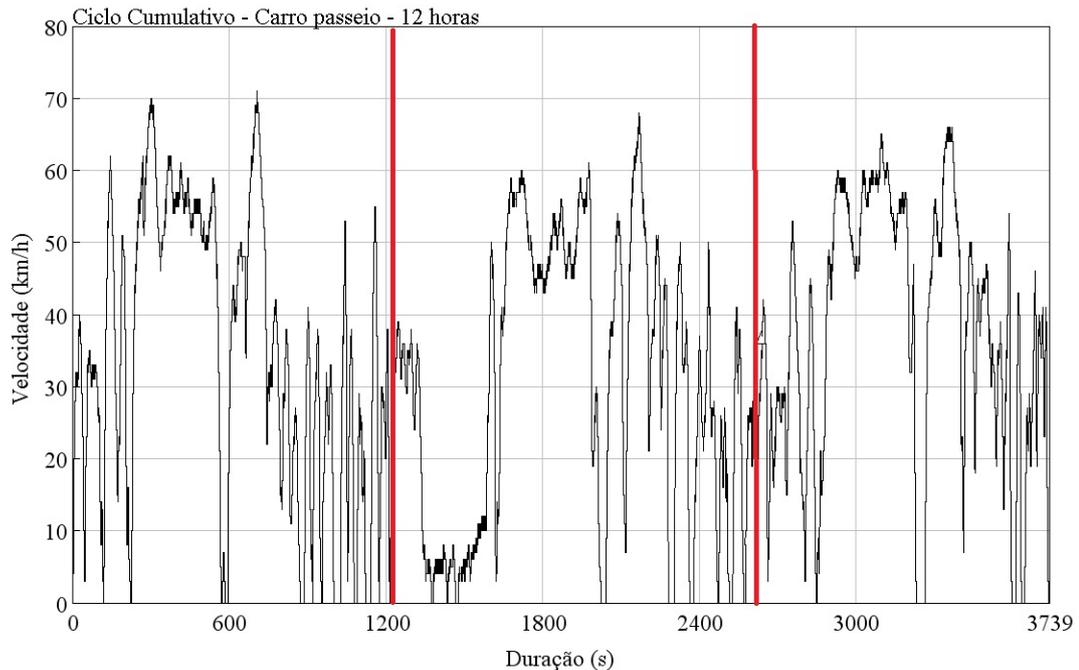
Fonte: O Autor (2016)

Apesar da possibilidade de construção e relativa representatividade, a supressão de dados com o uso de médias provoca distorções do comportamento nos veículos. Na Figura 4.3 observa-se que não existem paradas durante o trajeto, o que na verdade ocorre em todos os dias observados em função de semáforos e demais intersecções de vias. Se realizada a integração dos valores de velocidade com relação ao tempo para determinação

da distância, observa-se a divergência do valor real de $11,8\text{km}$.

A Figura 4.4 representa um ciclo cumulativo construído a partir dos mesmos dados utilizados na construção do ciclo médio da Figura 4.3. As divisões verticais representam a segmentação referente aos 3 dias de coleta. Ao final de mais de 52 mil pontos coletados, a velocidade média é de $33,77\text{km/h}$ e a duração de 3738,16 segundos.

Figura 4.4 – Exemplo de ciclo real cumulativo obtido para carros de passeio às 12 horas



Fonte: O Autor (2016)

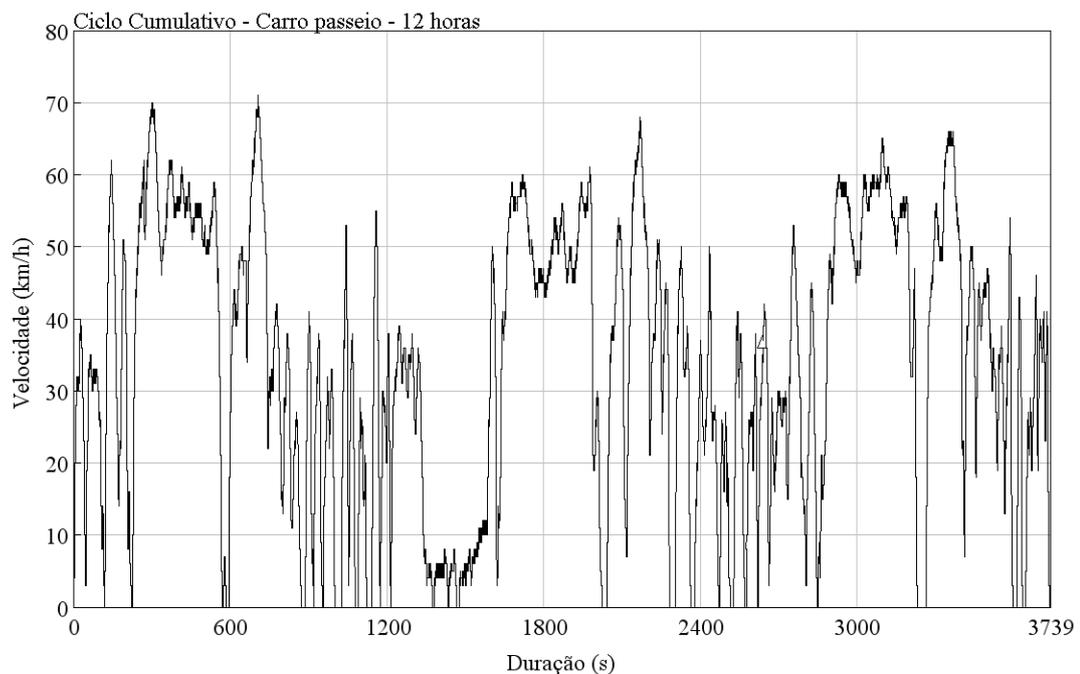
4.3.1 Ciclos reais de condução para carros de passeio em Santa Maria-RS

A construção dos ciclos estudados considerou três dias de coleta. Na avaliação para as 12 horas, o primeiro dia resultou em um ciclo real com duração de 1214 segundos, sendo de 1403s e 1119s a duração individual dos dias seguintes. Assim o ciclo cumulativo representa um percurso de $35,4\text{km}$ com duração de 3738,16 segundos. Já a análise realizada através de ciclo médio, resultou em duração de 1293,14. Conforme já mencionado no Capítulo 3, o uso de ciclos médios suprime as variações pontuais, o que causa distorção na avaliação da distância, se considerado o cálculo em função do tempo e distância. Assim, utilizando a velocidade média calculada para cada cem metros e o tempo gasto neste período, a distância calculada não corresponde aos exatos cem metros. Conforme representado na Figura 4.3, se utilizado o método das médias para construção de ciclos de condução, os dados adquiridos para carros de passeio às 12 horas contabilizariam um

percurso de $13,36\text{km}$, enquanto o percurso real possui $11,8\text{km}$. Para as 17 horas, a distância final calculada seria de $13,99\text{km}$. Esta diferença está associada à suavização dos valores de velocidade com a adoção de médias, não representando as variações bruscas de velocidade como acelerações e desacelerações. Como a distância simulada é gerada em função da velocidade no tempo, ocorrem as distorções apresentadas.

Na análise da Figura 4.5 nota-se a similaridade no comportamento entre os diferentes dias. Os picos de velocidade encontrados no primeiro dia entre aproximadamente 300 e 600 segundos são reproduzidos para os dias seguintes em 1600s a 2000s e 2800s a 3200s , respectivamente. Essa condição é observada em função do tráfego livre, que não obriga a desacelerações e paradas.

Figura 4.5 – Ciclo real de condução na cidade de Santa Maria para veículos leves às 12 horas



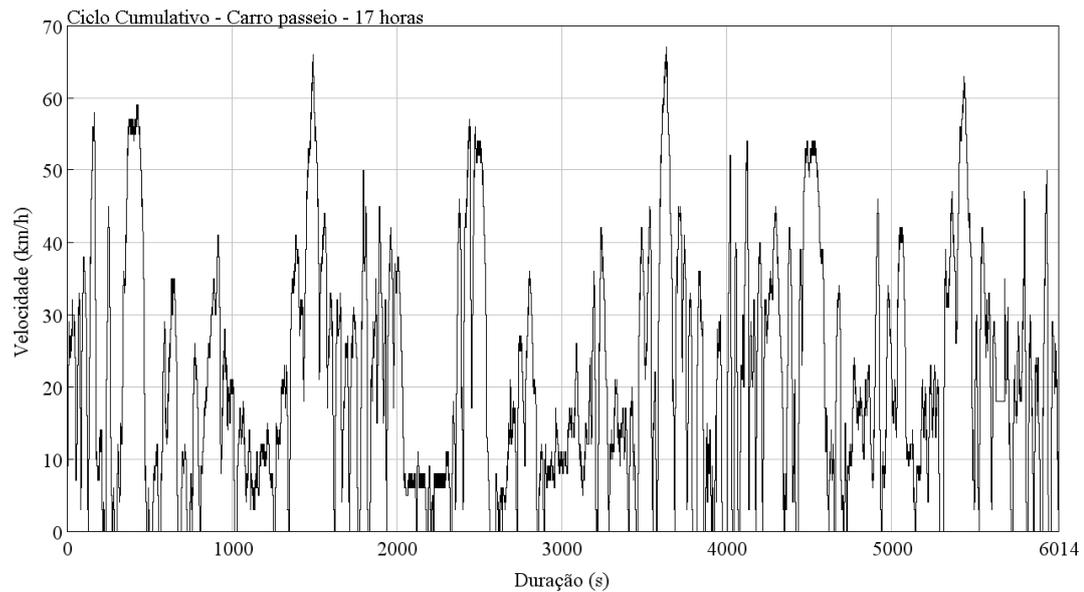
Fonte: O Autor (2016)

A reprodutividade de velocidades não é observada na condição de tráfego intenso, expressa pela Figura 4.6. Nesta análise, as durações de 1939s , 2239s e 1834s que resultaram em um ciclo cumulativo com $6013,09\text{s}$, produziram um ciclo médio de $2016,55$ segundos. A velocidade média real encontrada para o ciclo cumulativo das 17 horas fora de $21,04\text{km/h}$, sendo alterada para $30,75\text{km/h}$ no ciclo médio.

Assim, o ciclo real de condução considerado na Figura 4.5 apresenta velocidade média de $33,77\text{km/h}$ e velocidade máxima de 71km/h . Desconsiderando os valores consecutivos oriundos da elevada taxa amostral, praticamente 39% dos dados apresentam características de aceleração, enquanto 61% apresentam desacelerações. Já o ciclo ob-

servado na Figura 4.6 possui 61,74% de desacelerações e 38,25% de acelerações, com velocidade média de 21km/h e máxima de 67km/h . Portanto, apesar das diferentes durações e velocidades, os ciclos formulados para carros de passeio nos diferentes horários apresentam comportamentos semelhantes em termos de acelerações e desacelerações.

Figura 4.6 – Ciclo real de condução na cidade de Santa Maria para veículos leves às 17 horas



Fonte: O Autor (2016)

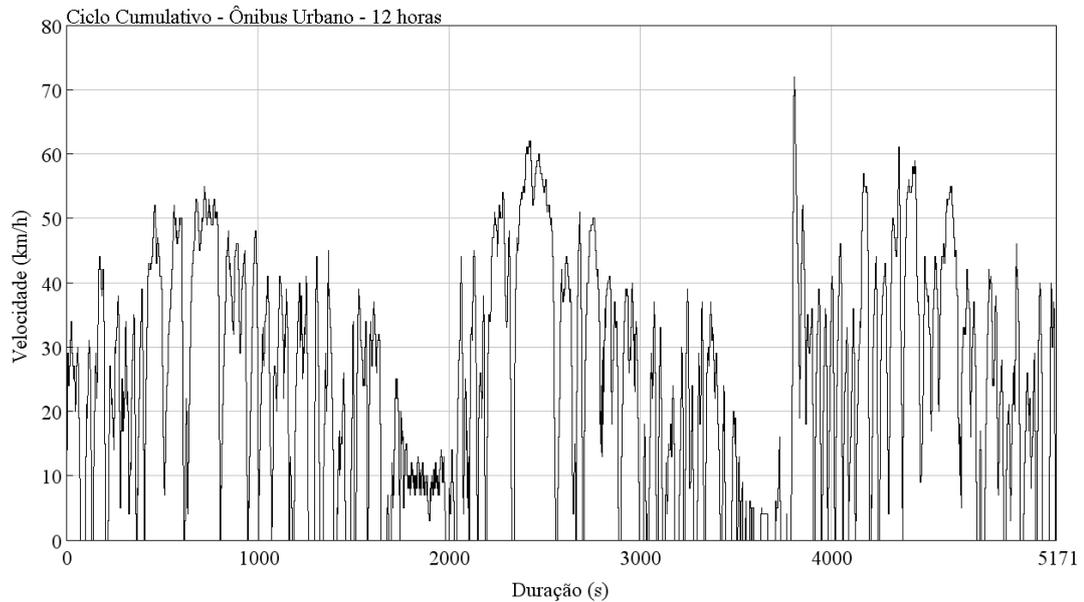
4.3.2 Ciclos reais de condução para ônibus urbano em Santa Maria-RS

Para os ciclos reais de condução envolvendo ônibus, a reprodutividade de perfis de velocidade não é observada. Este comportamento pode ser atribuído às diversas paradas existentes durante o trajeto, e ao número variável de passageiros que embarcam ou desembarcam nestas paradas, fazendo assim com que os tempos de parada também não sejam constantes ou reproduzidos. Na análise de ciclo médio para ônibus urbano, as distâncias finais calculadas seriam de $14,11\text{km}$ e $15,68\text{km}$ para as 12 e 17 horas, respectivamente, enquanto a distância real é de $11,8\text{km}$. O ciclo cumulativo considerado as 12 horas apresentou duração final de 5170,74 segundos, sendo de 1573,25s, 1759,15 e 1838,34s as durações individuais dos três dias de aquisição. Para as 17 horas, as durações individuais dos ciclos de 2632,64s, 2127,6s e 3561,33s resultaram em um ciclo cumulativo de 8321,58 segundos.

O ciclo representado na Figura 4.7 possui velocidade média de $24,38\text{km/h}$ e máxima de 72km/h . Desconsiderando os valores consecutivos oriundos da elevada taxa

amostral, o percentual de acelerações e desacelerações mostrou-se bastante próximo, sendo 50,80% de variações positivas de velocidade e 49,2% de variações negativas de velocidade.

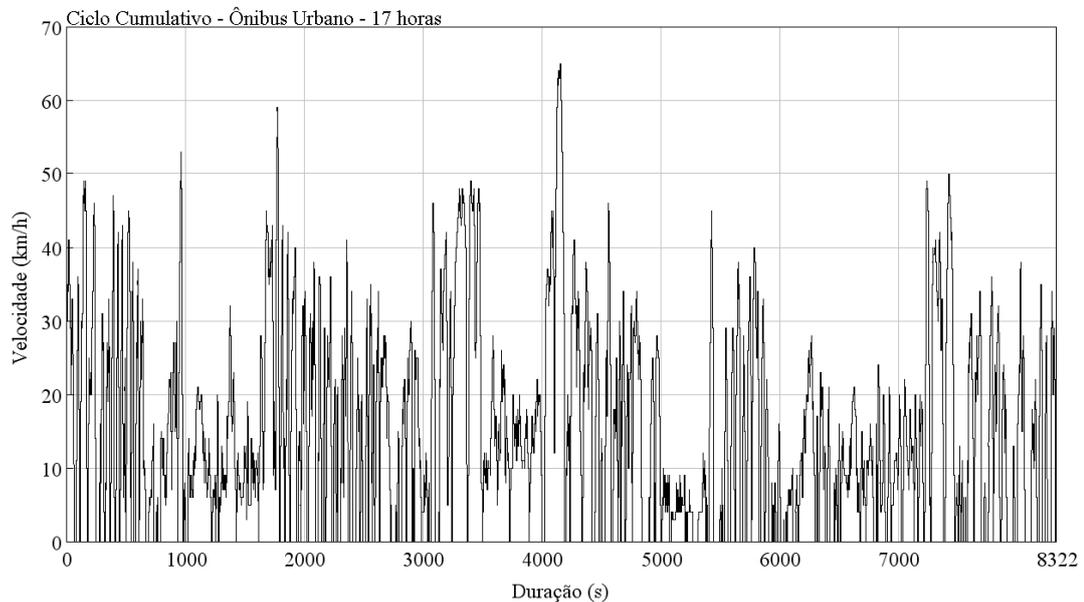
Figura 4.7 – Ciclo real de condução na cidade de Santa Maria para ônibus urbano às 12 horas



Fonte: O Autor (2016)

Para o ciclo real representado na Figura 4.8 o comportamento é bastante similar, com velocidade média de $17,55\text{ km/h}$, máxima de 65 km/h e acelerações e desacelerações em 50,86% e 49,14% do ciclo, respectivamente. Visto o extenso banco de dados, apesar das diferentes condições de tráfego, se pode afirmar que ambos os ciclos elaborados para ônibus urbano apresentam comportamento idêntico em percentuais de aceleração e desaceleração.

Figura 4.8 – Ciclo real de condução na cidade de Santa Maria para ônibus urbano às 17 horas



Fonte: O Autor (2016)

4.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA EMISSÕES E CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

A avaliação de emissões e consumo de combustível contemplou a análise em ciclos reais médios e cumulativos, além da comparação com ciclos padrão existentes e utilizados na homologação de veículos e motores. Para tal, modelos computacionais conforme representados no item 3.3 foram elaborados para carros de passeio e ônibus urbano, visando a representatividade destes meios de transporte no trânsito de Santa Maria-RS. As características dos veículos seguem o disposto na Tabela 3.1, conforme dados extraídos da literatura, livros técnicos e manuais.

4.4.1 Modelo representativo para carro de passeio

O modelo computacional desenvolvido para representar um veículo de passageiro considerou características de um *hatchback* nacional de médio porte, estimando $80kg$ como a massa de passageiros transportada. O modelo foi elaborado para avaliação do veículo em 5 diferentes ciclos de condução, sendo um deles o ciclo padrão de homologação FTP-75 e os outros quatro referentes aos ciclos reais desenvolvidos na cidade de Santa Maria.

Nos gráficos da Figura 4.9 representam-se os "erros de velocidade" entre os dados

de entrada (conforme o ciclo inserido) e os dados de saída (em função da capacidade do veículo modelado em acompanhar o ciclo no qual está sendo conduzido). Esses desvios ocorrem tanto em acelerações quanto em desacelerações. Em geral, suposições em variáveis de desempenho de motor, transmissão ou freios contribuem para estes valores. Apesar de aparentarem menores desvios médios em termos de velocidade, os Ciclos Médios apresentam números significativamente menores de dados, fazendo com que as variações tornem-se mais perceptíveis. Assim, o desvio médio em termos de velocidade é de $0,03\text{km/h}$ para a situação representada na Figura 4.9(a), de $0,05\text{km/h}$ para a situação representada na Figura 4.9(c), de $0,03\text{km/h}$ para a Figura 4.9(b) e de $0,027\text{km/h}$ para Figura 4.9(d). No ciclo FTP-75 também se verificam pequenas variações, estando a média em $0,07\text{km/h}$. Apesar de variações pontuais representativas (de até 6km/h) serem observadas nos ciclos cumulativos, estes não afetam o comportamento do modelo, uma vez que apresentam-se em situações isoladas, não causando distorções significativas nos resultados obtidos. Aliado a isto, o fato da coleta através da central eletrônica do veículo registrar somente valores unitários faz com que variações decimais ou centesimais, encontradas na simulação, possam corresponder aos valores reais desenvolvidos pelo veículo.

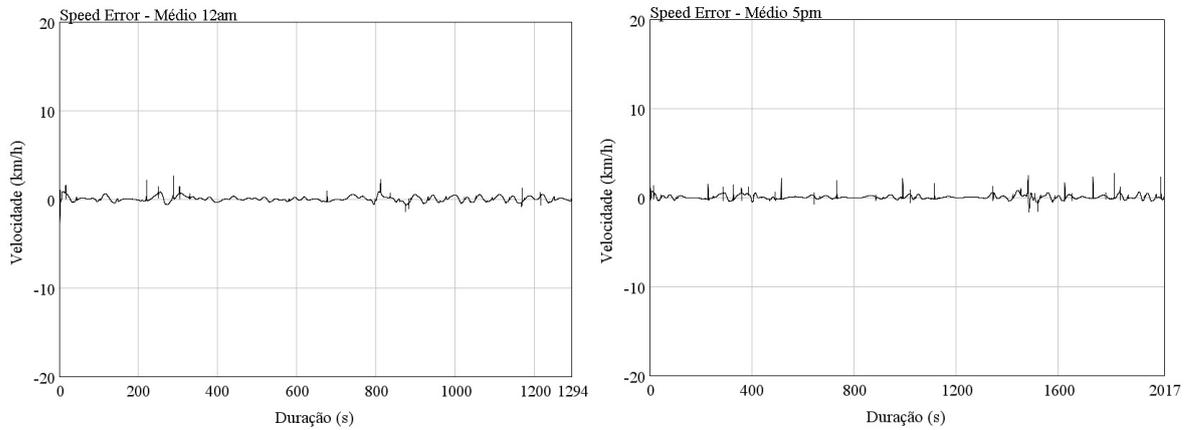
Com o modelo do veículo de passeio simulado nos cinco diferentes ciclos, a Tabela 4.5 representa o percentual do ciclo que é realizado em cada marcha. Através desta tabela é possível observar a diferença existente entre o ciclo padrão e os ciclos reais de condução. É preponderante o uso da segunda marcha em todos os ciclos considerados, divergindo apenas para o cumulativo das 17 horas, que em função do tráfego intenso, prevalece a utilização da primeira marcha. Nesta análise pode ser observada a distorção gerada em função da supressão dos dados em ciclos médios, que considera a segunda marcha como sendo a mais utilizada.

Tabela 4.5 – Percentuais de utilização de cada marcha nos ciclos de condução - Modelo Carro

Marcha	FTP-75	Médio SM 12h	Médio SM 17h	Cumulativo SM 12h	Cumulativo SM 17h
1 ^a	33,00	8,42	37,97	29,89	60,20
2 ^a	43,50	59,30	53,56	35,72	30,81
3 ^a	10,79	29,25	7,12	27,05	7,99
4 ^a	4,76	3,02	1,35	7,35	1,01
5 ^a	7,95	0,00	0,00	0,00	0,00

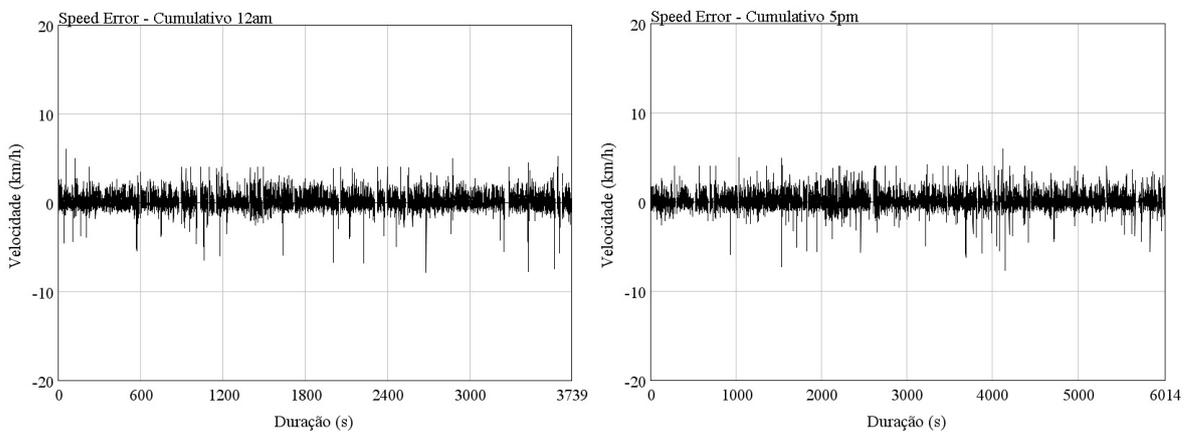
Fonte: O Autor (2016)

Figura 4.9 – Desvios instantâneos de velocidade entre o ciclo (valores de entrada) e o modelo (valores simulados) para veículos de passeio



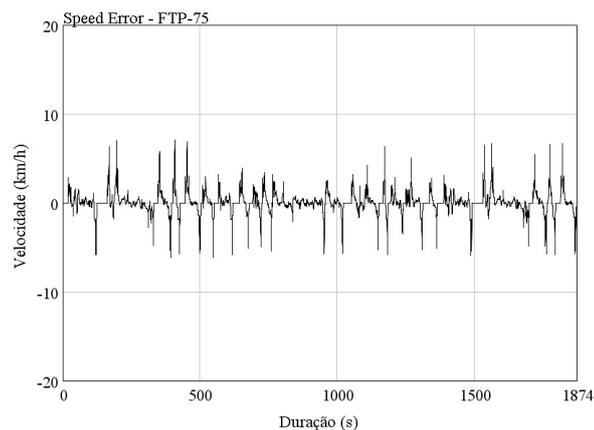
(a) Ciclo Médio Real Santa Maria - 12 horas

(b) Ciclo Médio Real Santa Maria - 17 horas



(c) Ciclo Cumulativo Real Santa Maria - 12 horas

(d) Ciclo Cumulativo Real Santa Maria - 17 horas



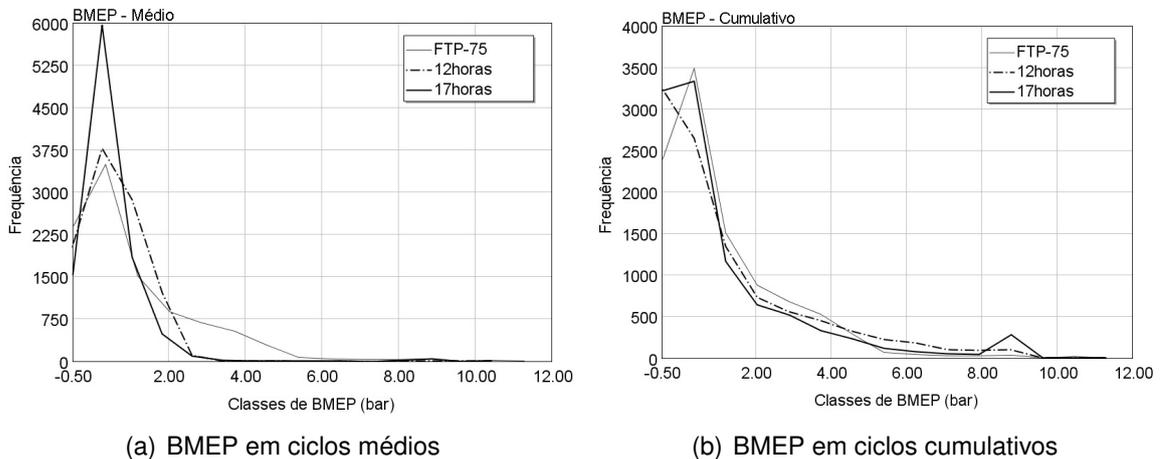
(e) Ciclo FTP - 75

Fonte: O Autor (2016)

Em concordância com os dados expressos na Tabela 4.5, os histogramas da Figura 4.10 apresentam as condições do motor em termos de BMEP para cada um dos ciclos. Por relacionar condições de torque e ser independente do volume deslocado pelo motor,

a avaliação de valores de pressão média efetiva de freio, ou BMEP, permite a comparação de diferentes motores submetidos à determinadas condições.

Figura 4.10 – Frequência das faixas de BMEP simuladas no GT-Suite em diferentes condições de tráfego e ciclo padrão FTP-75



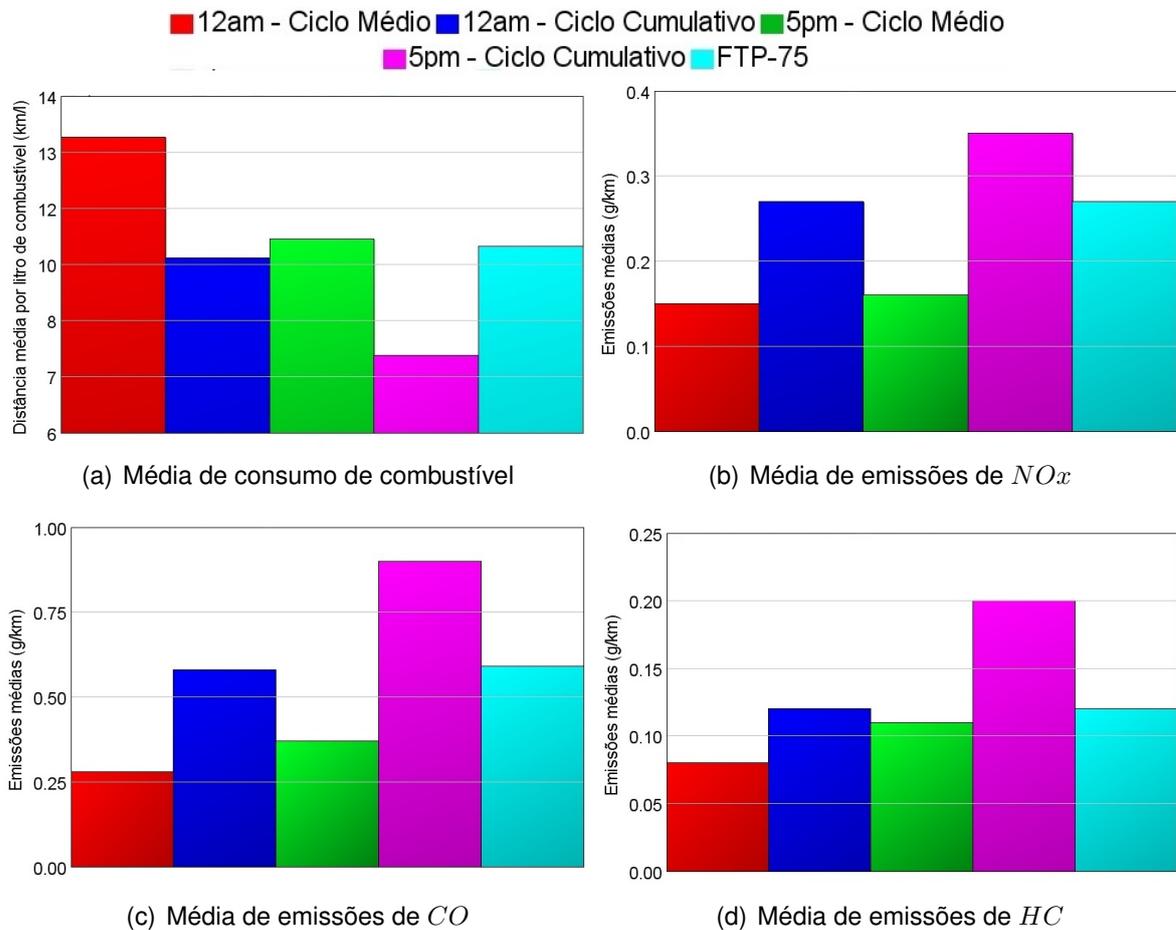
Fonte: O Autor (2016)

Na Figura 4.10(b) se observa a proximidade da curva obtida para o percurso do ciclo padrão estabelecido com os ciclos reais. Isto indica a representatividade que as condições de homologação têm sobre as condições reais de operação. É verificado que na maior parte das observações o motor encontra-se em baixas cargas, inferiores a 2bar . Nos ciclos cumulativos, mais de 72% dos dados estão nestas condições. Com esta expressividade, os ciclos padrão condizem com as situações encontradas nos ciclos reais, apontando para a necessidade de focar no controle de emissões em condições de baixas cargas.

No histograma de ciclos médios, Figura 4.10(a), também a maior parcela de observações é vista em baixas cargas, inferiores a $1,5\text{bar}$. Entretanto, a divergência é expressiva se relacionadas ao ciclo padrão FTP-75 sobretudo com a desconsideração de observações em cargas maiores, acima de 3bar , que apesar de não representarem grande parcela, devem ser consideradas. A observação das informações expressas na Figura 4.10 é fundamental especialmente no desenvolvimento de medidas de controle de emissões, redução de consumo de combustível ou aumento de desempenho. A eficácia destes será melhor observada se consideradas tais condições de BMEP durante o projeto.

A Figura 4.11 apresenta gráficos com os valores médios para consumo de combustível e emissões de gases nos cinco ciclos avaliados. A avaliação fora realizada em parâmetros médios em função das diferentes durações das condições observadas. A comparação é realizada com o ciclo FTP-75, utilizado na homologação de veículos leves no Brasil.

Figura 4.11 – Consumo de combustível e emissões médias simuladas no GT-Suite para cada um dos ciclos avaliados com carro de passeio



Fonte: O Autor (2016)

Na avaliação de distância percorrida com um litro de combustível, representada pela Figura 4.11(a), a utilização do ciclo padrão FTP-75 resulta em uma média de $10,48\text{km/l}$. A representação é bastante significativa para o resultado gerado na análise cumulativa das 12 horas, onde a média de distância por litro de combustível encontrada é de $10,18\text{km/l}$. Com isso, a utilização deste ciclo padrão apresenta uma variação inferior à 3% do obtido para dados reais. Entretanto, o consumo de combustível é subestimado para condições de maior tráfego, como o encontrado às 17 horas. Neste caso, a diferença supera os 27%. Já os ciclos médios apresentam a tendência de maior consumo de combustível em tráfegos mais intensos, entretanto, o *offset* dos dados apresenta distorções significativas em relação às condições reais.

A tendência de maiores consumos de combustível e maiores emissões de gases em condições de maior intensidade de tráfego é verificada em todas as representações da Figura 4.11. Para ambos horários analisados, os ciclos reais médios subestimam as emissões de NO_x , com valores até 55% menores do que os obtidos em ciclos reais cumulativos. O ciclo padrão FTP-75 infere com grande precisão as condições encontradas no

ciclo real cumulativo das 12 horas, subestimando em quase 30% as condições avaliadas às 17 horas.

Para as emissões de monóxido de carbono representadas na Figura 4.11(c), o horário de tráfego mais intenso apresenta um aumento superior à 50% nas emissões médias por quilometro percorrido se comparado às condições de tráfego livre. Também neste caso é verificada a precisão da predição do ciclo padrão frente às condições reais das 12 horas. A suavização das variações de velocidades em ciclos médios contribui para menores emissões de gases, em especial de CO, pois este apresenta comportamento sensível a rápidos transientes de carga.

As emissões de hidrocarbonetos não queimados apresentam-se em escala bastante reduzida, conforme representado na Figura 4.11(d), com valores máximos na ordem de $0,20g/km$ em condições de tráfego intenso. Apesar de novamente o ciclo padrão apresentar valores médios idênticos ao fornecido pelo ciclo real cumulativo das 12 horas, apresenta valores 40% inferiores ao ciclo real cumulativo das 17 horas.

Assim, com a avaliação dos gráficos apresentados na Figura 4.11 pode-se observar que os ciclos médios subestimam todas as condições de consumo de combustível e emissões de gases, não sendo representativos às condições reais de condução urbana. Em trajetos com menores variações de velocidade, como por exemplo os percorridos em rodovias, a tendência é que ciclos médios apresentem boas aproximações. Apesar do ciclo utilizado na homologação de veículos ser de grande representatividade para determinadas condições reais, o mesmo não pode ser generalizado para todas as condições de tráfego.

4.4.2 Modelo representativo para ônibus urbano

Para avaliação do transporte coletivo em Santa Maria, o levantamento dos modelos de ônibus existentes na frota urbana considerou a planilha de "*Cálculo Tarifário do Transporte Coletivo Urbano de Santa Maria*", de janeiro de 2014. Neste documento, elaborado pela Secretaria Municipal de Controle e Mobilidade Urbana, são relacionados 235 veículos, sendo 210 operantes e 21 reservas. Os dados apresentados na Tabela 3.1, e utilizados como entrada no modelo computacional, consideram representativa parcela dos veículos existentes na frota municipal. Em geral, os ônibus urbanos acomodam aproximadamente 45 ocupantes sentados, trafegando em grande parte do tempo com expressivo número de passageiros em pé. Para isso, a massa total de passageiros transportados considera 50 passageiros com média de $70kg$ cada.

De acordo com a Resolução *n*403 do CONAMA, a Fase P-7 do PROCONVE entra em vigor a partir de 01 de janeiro de 2012. Nesta fase, os ensaios de medição de CO, HC, NO_x e MP nos gases de escapamento de motores de veículos pesados devem ser realizados seguindo métodos e procedimentos estabelecidos. Para isto, são utilizados os

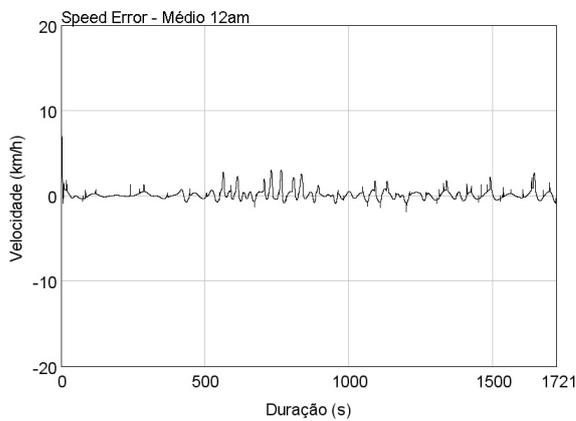
ciclos de Regime Constante (ESC), Europeu de Resposta em Carga (ELR) e de Regime Transiente (ETC), até a publicação de norma brasileira equivalente. Considerando estes aspectos, os ciclos reais desenvolvidos para ônibus urbanos foram comparados com o ciclo padrão ETC, o qual representa condução em vias urbanas, rurais e auto-estradas.

Os valores aqui abordados seguirão o apresentado para carros de passeio no item 4.4.1. Assim, a Figura 4.12 apresenta os desvios de velocidade existentes entre o ciclo e o desenvolvido pelo modelo computacional. Diferentemente do encontrado para veículos de passeio, o ciclo real de condução para ônibus urbano apresenta representativas oscilações de velocidade, em função de paradas abruptas e retomadas à velocidade de fluxo dos demais veículos. Com isso, o detalhamento do modelo computacional deve ser ainda mais rigoroso, afim de reproduzir as características encontradas em condições reais.

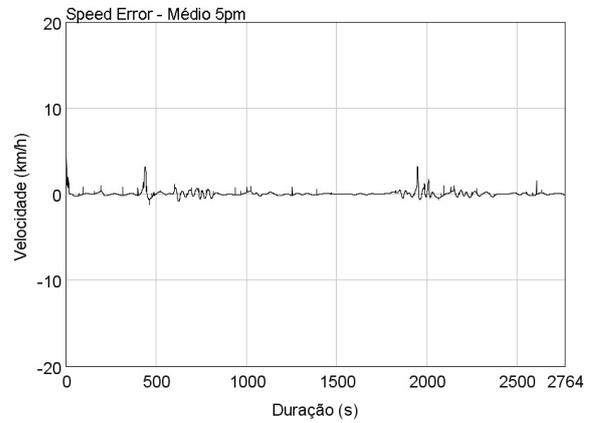
A similaridade entre as velocidades obtidas para os ciclos reais médios e as desenvolvidas pelos modelos computacionais fora favorecida com a interpolação dos 118 pontos iniciais. A interpolação com acréscimo de até 1000 valores entre cada um dos pontos iniciais colaborou para que não houvessem mudanças pontuais expressivas, habilitando que o modelo computacional acompanhasse a velocidade utilizada como dado de entrada. Se retirados estes pontos, os desvios de velocidade (representados nas Figuras 4.9 e 4.12) seriam muito mais expressivos, pois o modelo computacional não seria capaz de desenvolver as variações bruscas de velocidades encontradas ponto-a-ponto. Os picos de desvio de velocidade encontrados nos ciclos cumulativos, Figura 4.12(c) e 4.12(d), são observados em rápidas alterações de velocidade, quase que instantâneas, durante o período de rolagem. Em geral, pequenas desacelerações e acelerações, com duração inferior à $0,5s$ são desprezadas pelo modelo e responsáveis por estes pontos.

O desvio médio em termos de velocidade é de $0,14km/h$ para o modelo no ciclo médio das 12 horas, $0,06km/h$ no ciclo médio das 17 horas, e de $1,21km/h$ e $0,85km/h$ para os ciclos cumulativos das 12 e 17 horas, respectivamente. Apesar de serem significativamente maiores do que os encontrados para o modelo nos ciclos médios, divergências médias da ordem de $1km/h$ não apresentam impactos representativos em termos de avaliação de ciclos, uma vez que os dados coletados através do método OBDII são unitários, podendo então estas variações estarem dentro da faixa de velocidade medida. Essas divergências podem ser suavizadas com detalhamentos mais precisos do veículo alvo, como carga exata de passageiros e monitoramento dos instantes de troca de marcha. Para o ciclo padrão ETC, o desvio médio de velocidade do modelo fora de $0,14km/h$.

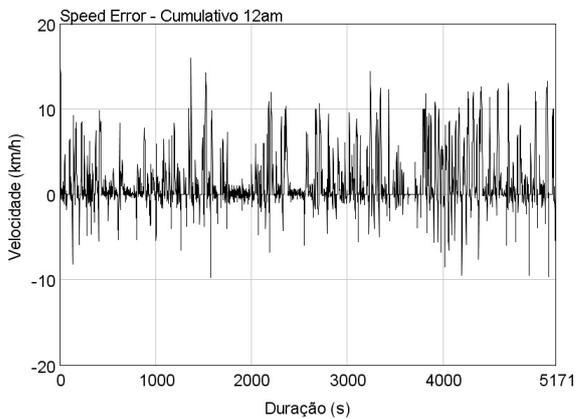
Figura 4.12 – Desvios instantâneos de velocidade entre o ciclo (valores de entrada) e o modelo (valores simulados) para ônibus urbanos



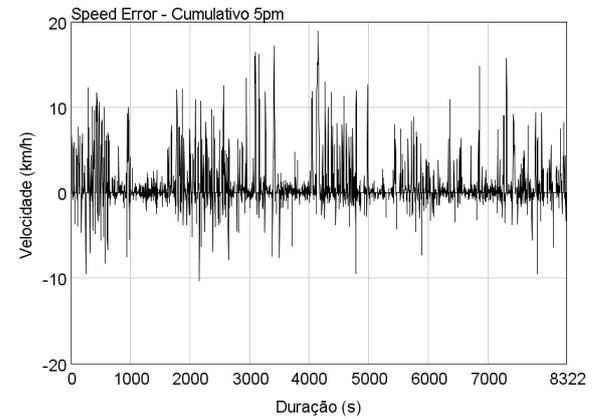
(a) Ciclo Médio Real Santa Maria - 12 horas



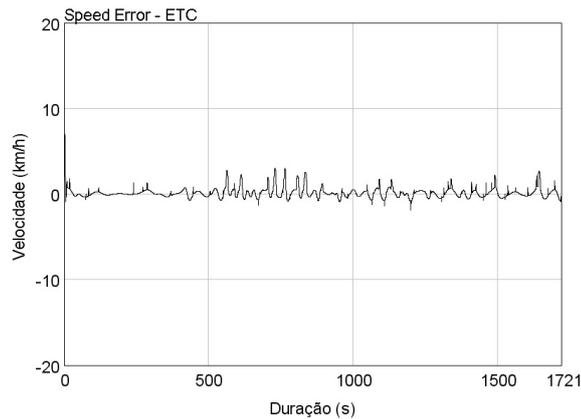
(b) Ciclo Médio Real Santa Maria - 17 horas



(c) Ciclo Cumulativo Real Santa Maria - 12 horas



(d) Ciclo Cumulativo Real Santa Maria - 17 horas



(e) Ciclo padrão ETC

Fonte: O Autor (2016)

Na Tabela 4.6, os ciclos reais médios e cumulativos são comparados ao ciclo padrão ETC em termos de permanência em marchas. Em função do ciclo padrão contemplar três diferentes condições (rural, urbano e rodoviário) de iguais durações, e no percurso rodo-

viário não apresentar reduções de velocidades que impliquem na alternância de marchas, o percentual de permanência em quinta marcha é representativo. Os ciclos cumulativos evidenciam as inúmeras paradas para embarque e desembarque de passageiros, com maiores percentuais para o uso da primeira marcha. Também em função das paradas, o veículo não desenvolve velocidades que justifiquem o uso de marchas mais altas, como quinta e sexta marchas. Na Tabela também é verificada a não representatividade dos ciclos médios, que apresentam altos percentuais em segunda e terceira marcha, o que não caracteriza com fidelidade as diversas condições de parada encontradas no percurso.

Tabela 4.6 – Percentuais de utilização de cada marcha nos ciclos de condução - Modelo Ônibus

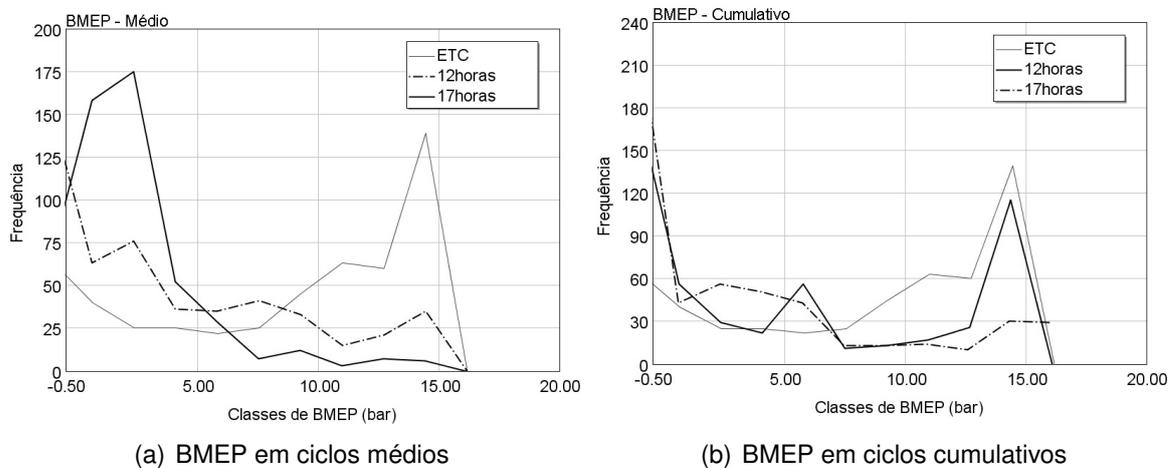
Marcha	ETC	Médio SM 12h	Médio SM 17h	Cumulativo SM 12h	Cumulativo SM 17h
1 ^a	10,81	9,63	11,09	36,50	54,24
2 ^a	3,73	16,90	46,89	13,69	22,32
3 ^a	19,06	48,33	37,94	29,09	18,45
4 ^a	5,70	25,15	4,09	20,72	4,80
5 ^a	60,71	0,00	0,00	0,00	0,18
6 ^a	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: O Autor (2016)

A Figura 4.13 apresenta o número de vezes em que se realiza observações em cada condição de BMEP. Embora a análise em carros de passeio apresente mais de 6000 observações em um caso, a avaliação para ônibus urbanos apresenta menores números de observações. Esta frequência parece contraditória, uma vez que em função dos ciclos mais extensos, as análises para ônibus urbanos apresentam maiores números de observações. Entretanto, justamente em função dos extensos ciclos simulados, o *software GT-Suite* filtra os resultados gerados, fazendo com que se realizem simulações mais enxutas, reduzindo tempos e custos computacionais.

Apesar da similaridade na tendência demonstrada pela Figura 4.10, onde os ciclos reais coletados para carros de passeio assemelham-se ao ciclo padrão FTP-75, a situação encontrada para ônibus urbano apresenta peculiaridades. Principalmente tratando-se de ciclos médios, Figura 4.13(a), os resultados reais apresentam picos em condições diferentes do utilizado no ciclo padrão ETC. Com o BMEP máximo do motor em 15,2bar, a simulação do veículo operando em ciclo padrão apresentou maiores números de observações em altas carga, sendo aproximadamente 40% das observações em cargas superiores à 12bar. Entretanto, mais de 57% do ciclo médio das 12 horas e 77% do ciclo médio das 17 horas é observado em BMEP de até 3bar. Condições de BMEP negativo caracterizam desacelerações com a ação de "freio motor". Com estas observações, o ciclo padrão ETC não torna-se representativo se avaliados os ciclos reais através de condições médias.

Figura 4.13 – Frequência das faixas de BMEP simuladas no GT-Suite em diferentes condições de tráfego e ciclo padrão ETC



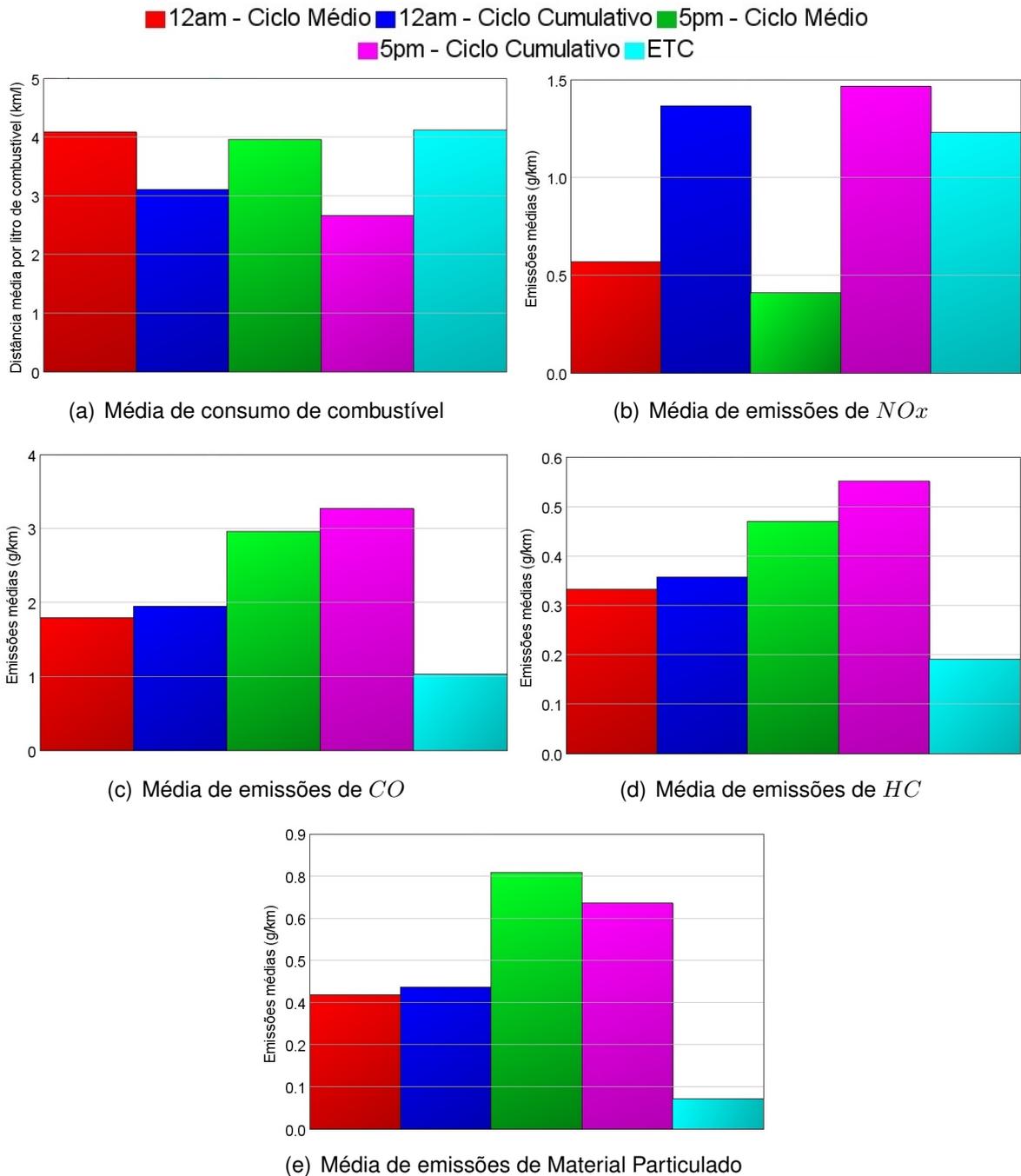
Fonte: O Autor (2016)

Na simulação com ciclos cumulativos observada através da Figura 4.13(b), as condições de tráfego leve avaliadas nas coletas das 12 horas apresentam comportamento de dados semelhante ao ciclo padrão ETC, com expressivo número de observações em altas faixas de BMEP. Já para as condições de tráfego intenso predominam valores reduzidos de BMEP, onde mais de 44% encontram-se em valores negativos e outros 40% em inferiores à 10bar. Com isso, o ciclo ETC não representa com fidelidade as condições reais de carga estudadas, tanto para análise média quanto cumulativa.

A Figura 4.14 apresenta o consumo de combustível e as emissões médias para ônibus urbano em cada um dos ciclos avaliados. Na Figura 4.14(a), o aumento no consumo de combustível em função da existência de tráfego intenso é observado tanto em ciclos médios quanto em cumulativos. Entretanto, enquanto no modelo para ciclo médio a distância percorrida com um litro de combustível é reduzida em pouco mais de 3%, o ciclo cumulativo apresenta redução de quase 15%. A predição realizada para o ciclo padrão ETC apresenta valores semelhantes aos obtidos para os ciclos médios, sendo superior em até 36% ao observado para os ciclos reais.

As emissões de óxidos de nitrogênio apresentados na Figura 4.14(b) possuem a mesma tendência do consumo de combustível, e quanto maior o consumo de combustível, é esperado que maior sejam as emissões de NO_x . Entretanto, é observado que a adoção de ciclos médios distorce a tendência esperada, apresentando maiores emissões de NO_x em situações de tráfego menos intenso. Por outro lado, o ciclo padrão ETC aponta para emissões de NO_x 16% inferiores ao encontrado na simulação de ciclos reais cumulativos às 17 horas e 10% inferiores para simulação do ciclo das 12 horas.

Figura 4.14 – Consumo de combustível e emissões médias em cada um dos ciclos avaliados para ônibus urbano



Fonte: O Autor (2016)

As emissões de monóxido de carbono também apresentam incremento em função do tráfego. É expressiva a subestimação de valores com a utilização de ciclos médios e ciclos padrões. Em condições reais (ciclos cumulativos), as emissões de CO são superiores em mais de 200% ao representado no ciclo padrão ETC. Mesmo com a já mencionada supressão de valores em ciclos reais médios, as emissões de CO apresentam-se significativamente superiores às obtidas no ciclo padrão.

Para as emissões de hidrocarbonetos não queimados, a variação existente entre os ciclos reais médios e cumulativos é pequena. Entretanto, assim como o representado pelas Figuras 4.12(b) e 4.12(c), o ciclo utilizado para homologação subestima as condições reais. Neste caso, as emissões em ciclos reais são até 180% maiores.

Assim como observado para as emissões de monóxido de carbono, as emissões de material particulado também são subestimadas em condições de teste padrão se comparadas às reais. Os ciclos reais médios e cumulativos possuem a mesma tendência: elevar o nível de emissões em função do tráfego. O acréscimo de emissões de MP em ciclos médios é de 90%, se comparado o valor obtido para as 17 horas ao valor obtido para as 12 horas. Para os ciclos cumulativos, este acréscimo é de quase 60%. A simulação no ciclo ETC apresenta valores até 7 vezes menores do que os encontrados nos ciclos reais cumulativos.

Estas análises apontam para a baixa representatividade de um ciclo padrão, que contempla vias urbanas, rurais e auto-estrada, às condições reais encontradas em cidades. As variações no número de paradas e velocidades desenvolvidas colabora para esta distorção.

4.4.3 Impacto do uso de tecnologias para a redução de emissões em ciclos reais de condução

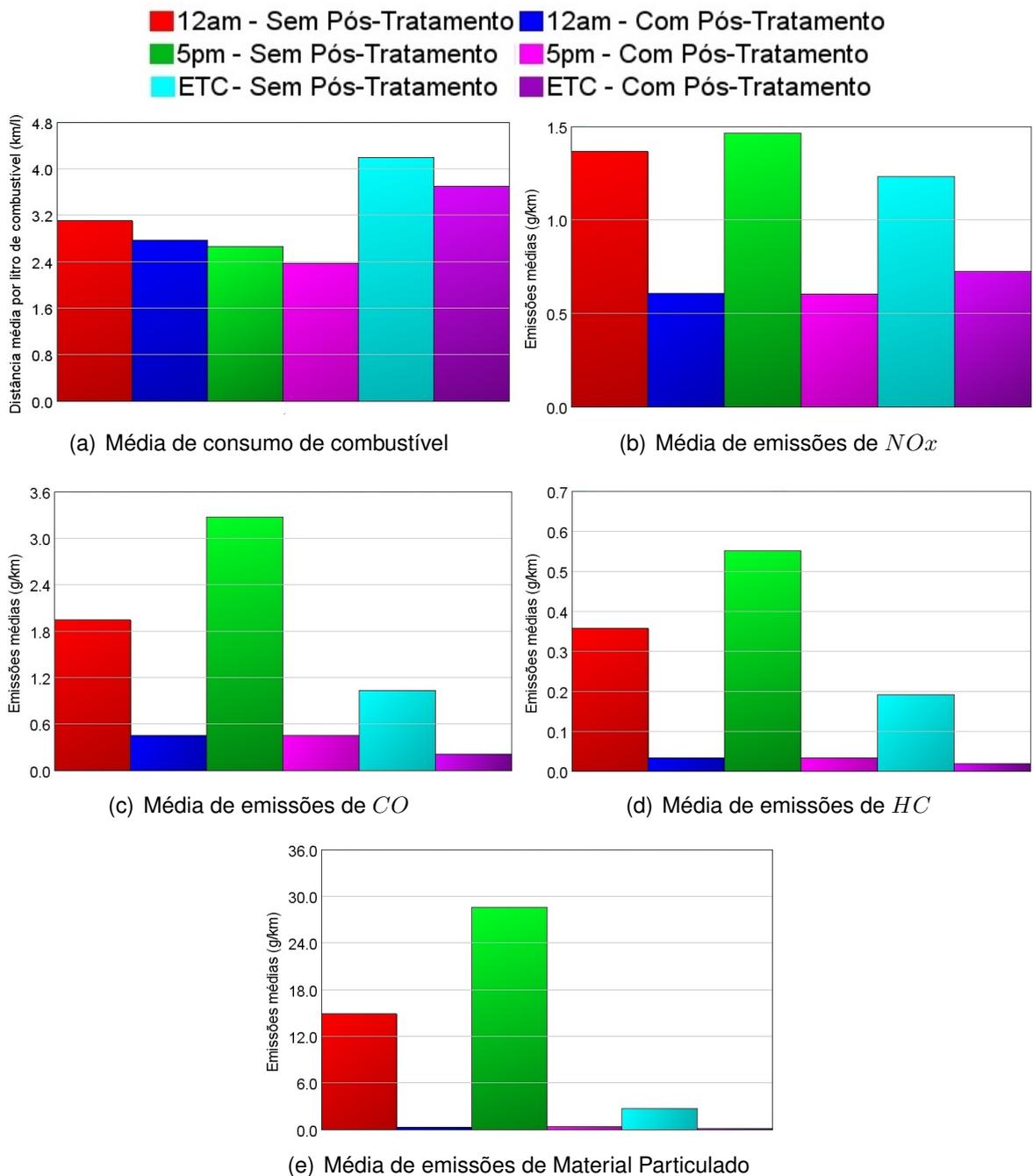
O sistema apresentado no item 3.3.3 contempla três dispositivos de pós tratamento operando em série. O conjunto, composto de catalisadores e filtro, colabora para a redução dos gases nocivos emitidos ao meio ambiente, fazendo com que o atendimento às exigências seja possível. Devido à representatividade dos ciclos reais cumulativos, estes foram utilizados na avaliação da eficácia dos sistemas de pós tratamento em comparação ao obtido para ciclos padrão de homologação como o ETC.

Todos os ciclos avaliados apresentaram significativas reduções nas emissões com a adoção dos sistemas de pós tratamento, conforme demonstrado na Figura 4.15. O ciclo desenvolvido para as 12 horas apresentou emissões médias de $1,37g/km$ de NO_x . Com o sistema de pós tratamento, as emissões passaram para $0,608g/km$, o que representa uma redução de mais de 55%. Para monóxidos de carbono e hidrocarbonetos não queimados as reduções foram ainda mais significativas, ficando em 76,58% para as emissões de CO e 90,76% para as de HC.

Para os ciclos reais desenvolvidos às 17 horas, a redução nos valores de emissões também é expressiva. As emissões de óxidos de nitrogênio apresentam taxa média igual à $1,465g/km$ quando utilizado o sistema de exaustão original, sem restrições que visem reduzir os poluentes lançados na atmosfera. Com a utilização do sistema apresentado, o valor fora reduzido para $0,60g/km$, o que representa uma redução de quase 60%. Para as

emissões de CO e HC a redução encontrada fora de 86,19% e 94,06%. Com estas análises é possível afirmar que a redução nas emissões de gases com a adoção de sistemas de pós tratamento como *DOC*, *SCR* e *DPF* é extremamente eficaz, com elevadas eficiências, independentemente das condições de tráfego serem livres ou intensas.

Figura 4.15 – Variações em consumo de combustível e emissões médias simuladas no GT-Suite para ônibus urbano com sistema de pós-tratamento



Fonte: O Autor (2016)

Como evidenciado nos gráficos das Figuras 4.15 e 4.14, as emissões reais são subestimadas com a utilização de ciclos padrão de condução. Entretanto, a contribuição

em termos de redução de emissões que o sistema de pós tratamento proporciona é similar ao obtido em condições reais. Para as emissões de NO_x a redução é de pouco mais de 40%, já para CO e HC, atingem valores próximos à 80% e 90%, respectivamente.

Com a configuração do sistema de pós tratamento utilizado, o maior percentual de redução encontra-se nas emissões de material particulado. De acordo com Fiebig (2014), as reduções com a adoção de filtros de particulado e processo de regeneração é superior à 90%, em alguns casos próximo à 100%. Assim como para os demais gases, a emissão em ciclo padrão é subestimada frente às condições reais de operação. Para os três casos analisados a redução superou os 90%, chegando a mais de 98% na condição de tráfego mais intenso.

Um dos poréns da adoção de sistemas de pós tratamento está no aumento do consumo de combustível. Este ocorre principalmente devido às restrições encontradas pelo fluxo dos gases de escape em filtros e catalisadores. Nos três ciclos avaliados, entre reais e padrão, o aumento do consumo de combustível encontrado está na ordem de 12%.

5 CONCLUSÕES

O objetivo geral de desenvolver ciclos reais de condução para avaliação de consumo de combustível e emissões de gases fora atingido, apontando para divergências expressivas em relação aos ciclos padrão. A utilização de ciclos médios nestas avaliações apresentou supressão de valores, uma vez que as médias de velocidade são calculadas a cada 100 metros percorridos. Com isso, variações instantâneas de velocidade, obtidas em função da alta taxa de amostragem, são suavizadas, e pontos médios são gerados. Apesar dos ciclos médios serem mais compactos, não podem ser considerados representativos às condições reais de condução. Assim, como a adoção de ciclos cumulativos não resulta na perda de informações, estes devem ser considerados em avaliações de tráfego principalmente ao referirem-se à comportamentos urbanos.

Modelos computacionais reduzem a necessidade de ensaios experimentais, contribuindo para a minimização dos custos do estudo. Entretanto, a dificuldade de obtenção de informações na literatura no que tange à emissões de gases em determinados motores, prejudica a precisão das inferências. Isto por que as informações de emissões utilizadas como entrada em modelos computacionais podem apresentar divergência aos valores reais dos motores modelados. Em acordo está o constante desenvolvimento e modernização dos motores, justamente em busca da redução de emissões e cumprimento das legislações vigentes. Portanto, tais informações encontradas em livros, não representam as últimas tecnologias em motores. Em geral, artigos e demais publicações "rápidas" não costumam representar tais resultados, até mesmo por contemplarem de segredos industriais. Em função dos mapas utilizados na predição de emissões serem oriundos da literatura, não se pode atestar suas representatividades, uma vez que foram desenvolvidos com base em motores similares aos avaliados, tanto para carros de passeio quanto para ônibus. Esta observação deve ser considerada na realização de comparativos entre emissões oriundas dos diferentes meios de transporte.

As avaliações computacionais foram realizadas utilizando cinco diferentes ciclos de condução: dois deles ciclos reais médios, outros dois ciclos reais cumulativos e outro como sendo o ciclo padrão utilizado na homologação de veículos e motores. Cabe salientar a sensibilidade do modelo computacional frente as variações existentes no ciclo, alterando significativamente os valores simulados em casos médios e cumulativos. Apesar de ciclos padrão serem fundamentais em comparações, não são representativos às condições reais de condução, tendo em vista as diferentes condições de tráfego e relevo que devem englobar. Com isso, para estudos pontuais ou predições em cidades e regiões, é imprescindível o desenvolvimento e adoção de ciclos reais de condução.

Para ônibus urbano, o ciclo padrão ETC não trouxe representatividade ao trajeto real avaliado, apresentando valores até 3 vezes menores para as emissões de HC frente

às condições reais e até 10 vezes para as emissões de MP. Já para os veículos de passeio, as condições obtidas através do padrão FTP-75 apresentaram-se muito condizentes com as obtidas no horário das 12 horas, tanto para consumo de combustível como para emissões de NO_x , CO e HC. Entretanto, no horário de tráfego mais intenso, o ciclo padrão subestimou em aproximadamente 50% as emissões de HC e em menores percentuais as emissões dos demais gases. Apesar dos benefícios trazidos pela adoção de sistemas de pós tratamento em ônibus urbano, como a redução em mais de 90% das emissões de material particulado, HC e CO, e até 40% de NO_x , o acréscimo no consumo de combustível é reflexo das restrições encontradas e necessidade de aumento no trabalho de bombeamento.

Para reduzir os impactos ambientais, ações como o uso do transporte coletivo ou compartilhado e a adoção de vias que possibilitem o desenvolvimento de velocidades constantes, contribui diretamente. Estas medidas são comprovadas nas análises realizadas em condições de tráfego menos intenso. A adoção de sistemas de pós tratamento, bem como de motores com maior eficiência e novas tecnologias, também contribui significativamente para a redução da taxa de emissões atual. Entretanto, determinados sistemas apresentam resultados diferentes se submetidos à condições padrão e à condições reais, fazendo com que a eficácia não seja conforme à homologada. Isto ressalta para a importância da avaliação de tais sistemas também em condições reais de condução.

Como sugestões para trabalhos futuros apontam-se os aspectos de maior dificuldade encontrados no decorrer deste trabalho, como a obtenção em dinamômetro de mapas de consumo de combustível e emissões de gases para carros de passeio e ônibus urbanos, além do incremento no número de coletas para a formulação do ciclos, podendo abranger dias específicos da semana ou mês.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALKEMADE, U. G.; SCHUMANN, B. Engines and exhaust after treatment systems for future automotive applications. **Solid State Ionics**, Elsevier, v. 177, n. 26, p. 2291–2296, 2006.

ANDRE, M. Driving cycle development: characterization of the methods. **SAE Technical Paper Series**, n. 961112, 1996.

_____. The artemis european driving cycles for measuring car pollutant emissions. **Science of the Total Environment**, p. 73–84, April 2004.

ANDRE, M. et al. Real-world european driving cycles, for measuring pollutant emissions from high and low powered cars. **Atmospheric Environment**, n. 40, p. 5944 – 5953, 2006.

AUSTIN, T. et al. Characterization of driving patterns and missions from light-duty vehicles in california. **California Air Resources Board**, 1993.

BARCZAK, R.; DUARTE, F. Impactos ambientais da mobilidade urbana: cinco categorias de medidas mitigadoras. **Brazilian Journal of Urban Management**, v. 4, n. 1, p. 13 – 32, 2012.

BARLOW, T. J. et al. **A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions**. [S.l.]: IHS, 2009.

BECKMANN, R. et al. **A new generation of diesel oxidation catalysts**. [S.l.], 1992.

BERNARDI, J. V. E.; LANDIM, P. M. B. Aplicação do sistema de posicionamento global (gps) na coleta de dados. **DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, Lab. Geomatémática, Texto Didático**, v. 10, n. 31, p. 2002, 2002.

BLAIR, G. P.; DROUIN, F. M. M. Relationship between discharge coefficients and accuracy of engine simulation. **SAE Technical Paper Series**, n. 962527, 1996.

CHANG, M. Seqüestro de carbono florestal: Oportunidades e riscos para o brasil. **Revista Paranaense de Desenvolvimento**, v. 102, p. 85–101, jan/jun 2002.

CÓNSUL, J. M. D. et al. Decomposição catalítica de óxidos de nitrogênio. **Química Nova**, SciELO Brasil, v. 27, n. 3, p. 432–440, 2004.

DAI, Z.; NIEMEIER, D.; EISINGER, D. Driving cycles: a new cycle-building method that better represents real-world emissions. **Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis**, 2008.

DALKMANN, H.; BRANNIGAN, C. Transport and climate change. module 5e. sustainable transport: A sourcebook for policy-makers in developing cities. **Deutsche Gesellschaft fuer Technische Zusammenarbeit (GTZ)**, 2007.

DIESELNET. **Emission Test Cycles**. 2015. Disponível em: <<http://www.dieselnet.com/standards/cycles/>>.

R. Domesle. **Catalyst for the purification of exhaust gases of Diesel engines and method of use**. 1992. 5157007.

J. Eberhard e J. Kreutmair. **Verfahren und Vorrichtung zur selectiven katalystischen reduktion von NOx in sauerstoffhaltigen Gasen.** 1994. EP 0615777.

ENGLERT, N. a. Fine particles and human health - a review of epidemiological studies. **Toxicology letters**, Elsevier, v. 149, n. 1, p. 235–242, 2004.

ESTEVEES-BOOTH, A. et al. The measurement of vehicular driving cycle within the city of edinburgh. **Transportation Research Part D**, v. 6, p. 209 – 220, 2001.

EUROPEAN COMISSION. **Impact Assessment for Euro 6 emission limits for light duty vehicles.** 2006.

EUROPEAN COMMISSION (EC). **EC - Proposal for a Regulation of the European Parliament and of The Council amending Regulations (EC) No 715/2007 and (EC) No 595/2009 as regards the reduction of pollutant emissions from road vehicles 2014.** 2014.

R. J. Farrauto. **Ceria-Alumina Oxidation Catalyst.** 1997. 5627124.

FIEBIG, M. et al. Particulate emissions from diesel engines: correlation between engine technology and emissions. **Journal of Occupational Medicine and Toxicology**, BioMed Central Ltd, v. 9, n. 6, 2014.

FILHO, F. F. M. **Construção de ciclos de condução para estimativa de emissões veiculares para ônibus urbanos.** 2013. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2013.

GEKAS, I. et al. Urea-scr catalyst system selection for fuel and pm optimized engines and a demonstration of a novel urea injection system. **SAE TRANSACTIONS**, AMERICAN TECHNICAL PUBLISHERS LTD, v. 111, n. 3, p. 666–672, 2002.

GIAKOUMIS, E. G.; ALAFOUZOS, A. I. Study of diesel engine performance and emissions during a transient cycle applying an engine mapping-based methodology. **Applied Energy**, n. 87, p. 1358 – 1365, 2010.

GOOGLE.EARTH. **Rota UFSM - Rua Vale Machado.** Santa Maria: [s.n.], novembro 2015.

GT-SUITE. **Engine Performance Application Manual.** 7.6. ed. [S.l.], 2015.

_____. **Exhaust Aftertreatment Application Manual.** 7.6. ed. [S.l.], 2015.

M. Horiuchi. **Exhaust Gas Purification Catalyst.** 1991. 5000929.

HOUGHTON, R. A. **Carbon Flux to the Atmosphere from Land-Use Changes: 1850-2005.** Tenn., U.S.A., 2008. Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge.

HUNG, W. T. et al. Comparison of driving characteristics in cities of pearl river delta, china. **Atmospheric Environment**, v. 39, p. 615 – 625, 2005.

_____. Development of a practical driving cycle construction methodology: A case study in hong kong. **Transportation Research Part D**, n. 12, p. 115 – 128, 2007.

IBAMA. **Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores - PRO-CONVE / PROMOT.** 3. ed. [S.l.], nov. 2011.

INOMATA, S. et al. 4-nitrophenol, 1-nitropyrene, and 9-nitroanthracene emissions in exhaust particles from diesel vehicles with different exhaust gas treatments. **Atmospheric Environment**, v. 110, p. 93–112, 2015.

JOUMARD, R. et al. Influence of driving cycles on unit emissions from passenger cars. **Atmospheric Environment**, v. 34, p. 4621–4628, January 2000.

KENT, J.; ALLEN, G.; RULE, G. A driving cycle for sydney. **Transportation Research**, n. 12, p. 147 – 152, 1978.

KHAIR, M. K.; MILLO, F. **Diesel Exhaust Aftertreatment 2000-2007**. [S.I.]: SAE International, 2008.

KOLKE, R. Inspection & maintenance and roadworthiness: sustainable transport: source-book for policy-makers in developing cities. **Module 4b. Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit GTZ**, 2006.

KRUSE, R.; HULS, T. Development for the federal urban driving cycle. **SAE Technical Paper Series**, n. 730553, 1973.

LANZIERI, G. Demographic estimates for 2009. Statistical Office of the European Union (Eurostat). December 2009.

LEE, S. H. et al. On-road chasing and laboratory measurement of exhaust particle emissions of diesel vehicles equipped with aftertreatment technologies (dpf,urea-scr). **International Journal of Automotive Technology**, v. 16, n. 4, p. 551–559, 2015.

LIN, J.; NIEMEIER, D. A. An exploratory analysis comparing a stochastic driving cycle to california's regulatory cycle. **Atmospheric Environment**, n. 36, p. 5759 – 5770, 2002.

_____. Regional driving characteristics, regional driving cycles. **Transportation Research Part D**, n. 8, p. 361–381, 2003.

LITMAN, T. **Mobility Management Strategies That Provide Economic, Social and Environmental Benefits**. Victoria Transport Policy Institute, December 2008.

LIU, H. et al. Voc from vehicular evaporation emissions: Status and control strategy. **Environmental Science & Technology**, v. 49, p. 14424–14431, November 2015.

MAJEWSKI, W. A.; KHAIR, M. K. **Diesel Emissions and Their Control**. [S.I.]: SAE International, 2006.

MICHAELS, R. A.; KLEINMAN, M. T. Incidence and apparent health significance of brief airborne particle excursions. **Aerosol Science & Technology**, Taylor & Francis, v. 32, n. 2, p. 93–105, 2000.

NBR 14489 - Motor diesel: Análise e determinação dos gases e do material particulado emitidos por motores do ciclo diesel, ciclo de 13 pontos. 2000.

NESAMANI, K.; SUBRAMANIAN, K. Development of a driving cycle for intra-city buses in chennai, india. **Atmospheric Environment**, v. 45, p. 5469–5476, 2011.

PACHECO, A. F.; MARTINS, M. E. S.; ZHAO, H. New european drive cycle (nedc) simulation of a passenger car with a hcci engine: Emissions and fuel consumption results. **Fuel**, n. 111, p. 733–739, 2013.

QIAN, Y.; LI, T.; LI, H. Improving urban bus emission and fuel consumption model by incorporating passenger load factor for real world driving. **Applied Energy**, v. 161, p. 101–111, 2016.

R Development Core Team. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria, 2014. ISBN 3-900051-07-0.

RAHMAN, Z.; BUTLER, K.; EHSANI, M. Design studies of a series hybrid heavy-duty transit bus using v-elph 2.01. In: IEEE. **Vehicular Technology Conference, 1999 IEEE 49th**. [S.l.], 1999. v. 3, p. 2268–2272.

REŞİTOĞLU, İ. A.; ALTINIŞIK, K.; KESKIN, A. The pollutant emissions from diesel-engine vehicles and exhaust aftertreatment systems. **Clean Technologies and Environmental Policy**, Springer, v. 17, n. 1, p. 15–27, 2015.

ROYSTON, P. An extension of shapiro and wilk's w test for normality to large samples. **Applied Statistics**, v. 31, p. 115–124, 1982.

SAMUEL, S.; AUSTIN, L.; MORREY, D. Automotive test drive cycles for emission measurement and real world emission levels a review. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D**, Journal of Automobile Engineering, v. 216, p. 555–564, 2002.

SCHÄFER, F.; BASSHUYSEN, R. van. **Reduced Emissions and Fuel Consumption in Automobile Engines**. [S.l.]: SAE International, 1995.

SMIT, R.; NTZIACHRISTOS, L.; G., B. P. Validation of road vehicle and traffic emission model - a review and meta-analysis. **Atmospheric Environment**, v. 44, n. 25, p. 2943–2953, August 2010.

SONG, Q.; ZHU, G. Model-based closed-loop control of urea scr exhaust aftertreatment system for diesel engine. **SAE paper**, v. 1, p. 287, 2002.

TECHNOLOGY, N. **EURO Standards**. september 2014. Disponível em: <<http://www.ngk.de/en/technology-in-detail/lambda-sensors/basic-exhaust-principles/euro-standards>>.

TONG, H. Y.; HUNG, W. T.; CHEUNG, C. S. Development of a driving cycle for hong kong. **Atmospheric Environment**, v. 33, p. 2323–2335, 1999.

TWIGG, M. V. Critical topics in exhaust gas aftertreatment. In: **Platinum Metals Review**. [S.l.]: Johnson Matthey Public Limited Company, 2001. v. 45, n. 4, p. 176–178.

TZENG, G.; CHEN, J. J. Developing a taipei motor driving cycle for emissions and fuel economy. **Transportation Research D3**, v. 1, p. 19–27, 1998.

URBANA, S. de Município de Controle e M. Cálculo tarifário do transporte coletivo urbano de santa maria. janeiro 2014.

WALLINGTON, T. J.; LAMBERT, C. K.; RUONA, W. C. Diesel vehicles and sustainable mobility in the u.s. **Energy Policy**, v. 54, p. 47–53, March 2013.

WILCOXON, F. Individual comparisons by ranking methods. **Biometrics Bulletin**, v. 1, n. 6, p. 80–83, dec 1945.

WYATT, M. et al. **The design of flow-through diesel oxidation catalysts**. [S.l.], 1993.

Bulent O Yavuz, Kenneth E Voss, Michel Deeba, John R Adomaitis e Robert J Farrauto. **Zeolite-containing oxidation catalyst and method of use.** jun. 19 2001. US Patent 6,248,684.