FRANCISCO FERNANDO MACIEL FILHO

**CONSTRUÇÃO DE CICLOS DE CONDUÇÃO PARA ESTIMATIVA DE
EMISSIONES VEICULARES PARA ÔNIBUS URBANOS**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de Mestre
em Ciências

São Paulo
2013

FRANCISCO FERNANDO MACIEL FILHO

**CONSTRUÇÃO DE CICLOS DE CONDUÇÃO PARA ESTIMATIVA DE
EMISSIONES VEICULARES PARA ÔNIBUS URBANOS**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de Mestre
em Ciências

Área de concentração:
Engenharia de Transportes

Orientador: Prof. Dr. Orlando Strambi

São Paulo
2013

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

São Paulo, 18 de dezembro de 2013.

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Maciel Filho, Francisco Fernando

Construção de ciclos de condução para estimativa de emissões veiculares para ônibus urbanos / F.F. Maciel Filho. – versão corr. -- São Paulo, 2013.

117 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1.Engenharia de transportes 2.Transportes (Planejamento; Operação) 3.Ciclos de condução 4.Estimativas de emissões I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho
à minha esposa Débora
e a meus pais e irmãos.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais pelo amor e incentivo contínuo à minha educação.

À minha esposa Débora pelo carinho, apoio e compreensão.

Aos colegas Athos Bernardes, pelo interesse e colaboração no desenvolvimento das complexas planilhas de aquisição e análise de dados, e Milton Shikishima, pela dedicação e empenho na instrumentação e acompanhamento do veículo de teste utilizado. Sem eles a realização desse trabalho não teria sido possível.

Ao Professor Dr. Orlando Strambi pela orientação e disponibilidade constantes.

À Mercedes-Benz do Brasil Ltda., nas pessoas do Dr. Daniel Spinelli, Marcos Argentino e Paschoal Federico Neto, por permitirem e apoiarem a realização deste trabalho.

Ao CNPq pelo apoio à pesquisa.

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho de pesquisa é desenvolver ciclos de condução para ônibus urbanos a partir de dados de campo, visando sua aplicação em metodologias de estimativa de emissões de poluentes. São apresentadas metodologias para a construção de ciclos de condução, com destaque para o procedimento que utiliza o conceito de VSP (*Vehicle Specific Power*), variável que apresenta forte correlação com emissões de poluentes. Assim, foram coletados dados da variação da velocidade ao longo do tempo em ônibus que realizam testes de durabilidade, percorrendo diariamente diferentes tipos de vias urbanas em um trajeto pré-determinado. Foram selecionados segmentos do trajeto que, agrupados, podem representar diferentes condições de operação para ônibus urbanos; em seguida, foram propostos ciclos de condução para estes segmentos escolhidos, nos períodos de “pico” e “fora do pico”. Foram estimadas as emissões dos principais poluentes para os ciclos de condução desenvolvidos. Os resultados mostram que as características das vias e as condições de tráfego desfavoráveis podem impactar diretamente na distribuição de VSP e, conseqüentemente, ocasionar emissões mais elevadas de poluentes.

Palavras-chave: ciclos de condução, ônibus urbanos, estimativa de emissões, VSP.

ABSTRACT

The main objective of this research is to develop driving cycles for urban buses from experimental data, with the purpose of estimating pollutant emissions. The study presents different methodologies for the construction of driving cycles, with emphasis on a procedure that uses the VSP concept (Vehicle Specific Power), a variable with high correlation to pollutant emissions. Data from speed variation were collected from a bus performing urban endurance tests, driving through many types of urban roads on a predefined route. Segments from the entire route were selected to represent different operating conditions for buses, during peak and off-peak periods, for which several driving cycles were developed. Pollutant emissions were estimated for these cycles. The results show that road characteristics and adverse traffic conditions can impact directly on VSP distribution and therefore lead to higher pollutant emissions.

Keywords: driving cycles, urban bus operation, emissions estimation, VSP.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação esquemática de uma instalação com dinamômetro de chassis para medição de emissões veiculares (Franco <i>et al.</i> , 2013).	23
Figura 2 - Ciclo de condução <i>Orange County</i> , SAE J2711 (SAE, 2002).	24
Figura 3 - Ciclo de condução <i>Manhattan</i> , SAE J2711 (SAE, 2002).	25
Figura 4 - Ciclo de condução UDDS, SAE J2711 (SAE, 2002).	26
Figura 5 - Perfis dos ciclos de condução <i>Manhattan</i> , <i>Orange County</i> e Expresso Tiradentes (IPT, 2007).	27
Figura 6 – Modos de teste ESC: (a) tabela de dados e (b) gráfico de carga por rotação do motor (ambos em %) (DIESELNET, 2012).	29
Figura 7 - ETC <i>European transient cycle</i> – Ciclo transiente europeu (DIESELNET, 2012).	30
Figura 8 – Consumo de combustível do motor em função da (a) aceleração e (b) VSP para ciclos FTP e HL07 (Jimenez-Palacios, 1999).	38
Figura 9 - Emissões de NOx na saída do motor em função da (a) aceleração e (b) VSP para ciclos FTP e HL07 (Jimenez-Palacios, 1999).	38
Figura 10 - Evolução das regulamentações de emissões para veículos pesados na Europa (Euro) e Estados Unidos (EPA) (Clark <i>et al.</i> , 2007).	43
Figura 11 - Módulos Racelogic (a) VBOX e (b) CAN02 utilizados para aquisição e gravação de dados no experimento (Racelogic, 2012a).	47
Figura 12 - Esquema de funcionamento dos equipamentos em conjunto (Racelogic, 2012b).	47

Figura 13 - Fluxograma do procedimento de aquisição de dados com os equipamentos VBOX e CAN02.	48
Figura 14 - Exemplo de planilha com dados adquiridos pelo GPS e salvos pelo <i>data logger</i> em 1Hz – em destaque tempo, coordenadas geográficas, velocidade GPS e elevação.	49
Figura 15 - Ônibus urbano modelo Mercedes-Benz OF1721 Euro5 utilizado no experimento. (a) Visão geral e (b) interior do veículo com exemplo de carga utilizada.	50
Figura 16 - Instalação dos equipamentos de medição no ônibus de testes. No detalhe do canto direito superior, posicionamento da antena na fase 01.....	51
Figura 17 - Distribuição de horas de testes por dia da semana na primeira fase do experimento.....	53
Figura 18 - Distribuição dos testes por motorista na primeira fase do experimento. .	54
Figura 19 - Desvio entre medidas de velocidade VCAN e VGPS.....	56
Figura 20 - Distribuição de VSP para as fontes de velocidade VCAN e VGPS.....	56
Figura 21 - Distribuição de VSP para o total de dados adquiridos na fase 1.	59
Figura 22 - Fluxograma para seleção de microviagens segundo Lai <i>et al</i> (2012).	62
Figura 23 - Ciclo de condução do trajeto completo na fase 1 (Ciclo 01) - considerando somente RMSE das microviagens.....	63
Figura 24 - Histograma da distribuição de VSP para o ciclo 01 e a amostra total de dados.	64
Figura 25 - Comparação de tempo parado x duração das microviagens classificadas em ordem crescente de RMSE – fase 1.....	65

Figura 26 - Faixas de percentual de tempo parado por microviagem - Amostra de dados da fase 1.....	66
Figura 27 - Fluxograma para seleção de microviagens considerando duração máxima 240s e proporção de tempo parado pré-definindo.	67
Figura 28 - Ciclo 02 formado por microviagens selecionadas pelo VSP e percentual de tempo parado - ordenadas por RMSE crescente.	67
Figura 29 - Comparativo de dist. de VSP para ciclo 02 e amostra total (Total).	69
Figura 30 - Distribuição de velocidade (a) e aceleração (b) para os ciclos 01, 02 e amostra total.....	71
Figura 31 - Trecho A - R. Antonio Doll de Moraes / Av.Conceição / Av. Engenheiro Armando de Arruda Pereira (Diadema / São Paulo) – Percorrida no sentido A-B.....	75
Figura 32 - Imagem do trecho A, na av. Eng. Armando de Arruda Pereira com corredor central de circulação exclusiva de ônibus (Google <i>Street View</i>).	76
Figura 33 - Distribuição de VSP para o tr. A nos horários de pico e fora de pico.....	77
Figura 34 - Ciclo de condução para o trecho A nos horários de pico.	78
Figura 35 - Ciclo de condução para o trecho A fora dos horários de pico.....	79
Figura 36 - Trecho B - Av. Prestes Maia / Av. do Taboão - (São Bernardo do Campo/Diadema) – Percorrida em ambos os sentidos.	80
Figura 37 - Imagem da Avenida do Taboão, em São Bernardo do Campo, parte do trecho B. Separação por “tartarugas” impede ultrapassagens pela contramão (Google <i>Street View</i>).	81
Figura 38 - Distribuição de VSP para o trecho B nos horários de pico e fora de pico.	82

Figura 39 - Ciclo de condução para o trecho B	83
Figura 40 - Trecho C - Av. do Cursino (São Paulo) – Percorrida somente no sentido A-B.	84
Figura 41 - Imagem da av. do Cursino, trecho C, em dois pontos distintos (Google <i>Street View</i>).....	84
Figura 42 - Distribuição de VSP para o tr. C nos horários de pico e fora de pico.....	85
Figura 43 - Ciclo de condução para o trecho C.	86
Figura 44 - Trecho D - Av. José Cabalero / R. Cel. Alfredo Flaquer / Av. Santos Dumont / R. Giovanni Battista Pirelli / Av. João Ramalho (Santo André) – Percorrida em ambas as direções A-B.	88
Figura 45 - Imagem do tr. D, Av. Giovanni Battista Pirelli (Google <i>Street View</i>).	89
Figura 46 - Distribuição de VSP para o tr. D nos horários de pico e fora de pico.....	90
Figura 47 - Ciclo de condução para o trecho D nos horários de pico.....	91
Figura 48 - Ciclo de condução para o trecho D fora dos horários de pico.....	92
Figura 49 - Trecho E - Av. Engenheiro Armando de Arruda Pereira / Av. Dr. Hugo Boelchi / Av. Jabaquara / R. Domingos de Moraes (São Paulo) – Percorrida somente no sentido A-B.....	93
Figura 50 - Imagem da Av. Jabaquara, que compõe o tr. E (Google <i>Street View</i>)....	94
Figura 51 - Distribuição de VSP para o tr. E nos horários de pico e fora de pico.....	95
Figura 52 - Ciclo de condução para o trecho E nos horários de pico.	96
Figura 53 - Ciclo de condução para o trecho E fora dos horários de pico.	97

Figura 54 - Amostras de fatores de emissões em g/h de NO _x (a), HC (b), MP2.5 (c) e CO (d) para os modos de operação do MOVES (Estados Unidos, 2009).....	104
Figura 55 - Estimativa de emissões para os ciclos de condução do trecho A, no pico e fora do pico.....	107
Figura 56 - Estimativa de emissões para os ciclos de condução do trecho D, no pico e fora do pico.....	108
Figura 57 - Estimativa de emissões para os ciclos de condução do trecho E, no pico e fora do pico.....	108
Figura 58 - Estimativa de emissões para os ciclos de condução dos períodos de pico, trechos E,A e D.....	109
Figura 59 - Estimativa de emissões para os ciclos de condução dos períodos fora do pico, trechos E,A e D.....	110
Figura 60 - Estimativa de emissões para os ciclos de condução dos tr. B e C.	110
Figura 61 – Comparativo de velocidade média e estimativa de emissões totais para os ciclos de condução desenvolvidos por trecho e período.	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características de ciclos de condução SAE J2711 x Expresso Tiradentes (IPT, 2007).	27
Tabela 2 - Fatores de emissão de poluentes principais em motores diesel por fase do PROCONVE, em g/kWh, (Brasil, 2011).....	44
Tabela 3 - Tempo médio de paradas - Comparativo do experimento e Lai <i>et al.</i> (2012).....	46
Tabela 4 - Resumo de dados adquiridos durante a fase 2 do experimento	55
Tabela 5 - Distribuições de VSP para velocidades adquiridas pelas fontes CAN e GPS.....	57
Tabela 6 - Valores utilizados no cálculo de VSP – baseados em Zhai <i>et al.</i> (2008).....	59
Tabela 7 - Distribuição VSP para a amostra total de dados da fase 1.	60
Tabela 8 - Resumo das microviagens utilizadas na construção do ciclo 01.....	63
Tabela 9 - Distribuição de tempo parado das microviagens do ciclo 02.....	68
Tabela 10 - Características das microviagens que compõe o ciclo 02.....	69
Tabela 11 - Resumo comparativo entre as distribuições de VSP para os ciclos 01, 02 e o total de dados adquiridos.	70
Tabela 12 - Resultados comparativos ciclos 01, 02 e Total.	70
Tabela 13 – Informações básicas das vias selecionadas para análise individual.	73
Tabela 14 – Distribuição das observações segundo os horários de pico e fora de pico nos trechos percorridos durante o experimento.....	74

Tabela 15 – Indicadores básicos das microviagens do trecho A para horários de pico e fora de pico.....	76
Tabela 16 – Distribuição das faixas de VSP para o trecho A nos horários de pico e fora de pico.....	77
Tabela 17 - Distribuição das faixas de VSP para os horários de pico no trecho A, na amostra total e no ciclo construído.....	78
Tabela 18 - Distribuição das faixas de VSP para os horários fora de pico no trecho A, na amostra total e no ciclo construído.....	79
Tabela 19 - Indicadores básicos das microviagens do trecho B para horários de pico e fora de pico.....	81
Tabela 20 - Distribuição das faixas de VSP para o trecho B, na amostra total e no ciclo construído.	83
Tabela 21 - Indicadores básicos das microviagens do trecho C para horários de pico e fora de pico.....	85
Tabela 22 - Distribuição das faixas de VSP para o trecho C nos horários de pico e fora de pico.....	86
Tabela 23 - Distribuição das faixas de VSP para o trecho C, na amostra total e no ciclo construído.	87
Tabela 24 - Indicadores básicos das microviagens do trecho D para horários de pico e fora de pico.....	89
Tabela 25 - Distribuição das faixas de VSP para os horários de pico no trecho D, na amostra total e no ciclo construído.....	91
Tabela 26 - Distribuição das faixas de VSP para os horários fora de pico no trecho D, na amostra total e no ciclo construído.....	92

Tabela 27 - Indicadores básicos das microviagens do trecho E para horários de pico e fora de pico.....	94
Tabela 28 - Distribuição das faixas de VSP para o trecho E nos horários de pico e fora de pico.....	95
Tabela 29 - Distribuição das faixas de VSP para os horários de pico no trecho E, na amostra total e no ciclo construído.....	96
Tabela 30 - Distribuição das faixas de VSP para os horários fora de pico no trecho E, na amostra total e no ciclo construído.....	97
Tabela 31 - Comparativo de resultados nos horários de pico para as amostras e ciclos.	99
Tabela 32 - Comparativo de resultados fora dos horários de pico para as amostras e ciclos.	100
Tabela 33 - Definição dos modos de operação do MOVES, adaptado de Estados Unidos (2009).....	102
Tabela 34 - Modos de operação identificados para os ciclos de condução dos trechos A-E.....	106

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação brasileira de normas técnicas
CO	Monóxido de carbono
ECU	<i>Electronic Central Unit</i>
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HC	Hidrocarboneto
HHD	<i>Heavy Heavy-Duty</i>
MHD	<i>Medium Heavy-Duty</i>
MOVES	<i>Motor Vehicle Emissions Simulator</i>
MP	Material particulado
NOx	Óxidos de nitrogênio
PROCONVE	Programa de controle da poluição do ar por veículos automotores
PBT	Peso bruto total
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
RHCO	Aldeídos
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
VSP	<i>Vehicle Specific Power</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	19
1.1	Objetivos	20
1.2	Estrutura da dissertação	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	Ciclos de condução.....	22
2.1.1	Ciclos SAE J2711, Ciclo IPT (Expresso Tiradentes) e ciclos de testes de motores	24
2.2	Metodologias de construção de ciclos de condução	31
2.2.1	Construção de ciclos baseada em microviagens (<i>micro-trips</i>)	31
2.2.2	Construção de ciclos baseada em segmentos	32
2.2.3	Construção de ciclos com classificação padronizada.....	33
2.2.4	Construção modal de ciclos	33
2.2.5	Construção de ciclos baseada na distribuição VSP	34
2.3	VSP – Vehicle Specific Power	37
2.4	Emissões veiculares em motores diesel	41
3	METODOLOGIA	45
3.1	Aquisição de dados: Descrição do experimento	45
3.1.1	Experimento Fase 1 – Antena posicionada no painel do veículo	52
3.1.2	Experimento Fase 2 – Antena posicionada no teto do veículo.....	54
4	ANÁLISE DE DADOS E CONSTRUÇÃO DE CICLOS DE CONDUÇÃO	58
4.1	Análise do trajeto completo e ciclo de condução 01	58
4.2	Construção e análise do ciclo de condução 02.....	65
4.3	Análise de VSP e construção de ciclos por trecho.....	73
4.3.1	Trecho A – Rua Antonio Doll de Moraes (Diadema), avenidas Conceição (São Paulo) e Eng. Armando de Arruda Pereira	75

4.3.2	Trecho B – Avenidas Prestes Maia (Diadema) e Taboão (São Bernardo do Campo)	80
4.3.3	Trecho C – Avenida do Cursino (São Paulo).....	84
4.3.4	Trecho D – Av. José Cabalero, R. Cel. Alfredo Flaquer, Av. Santos Dumont, R. Giovanni Battista Pirelli e Av. João Ramalho (Santo André)	88
4.3.5	Trecho E – Avenidas Eng. Armando de Arruda Pereira, Dr. Hugo Beolchi, Jabaquara e Rua Domingos de Moraes (São Paulo)	93
4.3.6	Síntese dos resultados – Construção dos ciclos de condução.....	98
5	ESTIMATIVA DE EMISSÕES	101
5.1	Estimativa de emissões para os ciclos de condução desenvolvidos.....	106
5.1.1	Comparação entre períodos de pico e fora de pico.....	107
5.1.2	Comparação entre trechos	109
6	CONCLUSÃO	112
6.1	Recomendações de trabalhos futuros.....	114
	REFERÊNCIAS.....	115

1 INTRODUÇÃO

Desenvolver ciclos de condução que representem de maneira adequada as condições reais de operação de ônibus urbanos é fundamental para que estimativas de emissões de poluentes próximas da realidade possam ser feitas.

Além disso, os ciclos de condução são essenciais para a certificação e homologação de veículos em emissões de poluentes e testes de consumo de combustível.

A estimativa de emissões, como problema de Engenharia de Transportes, é importante para avaliar os efeitos de diferentes condições de operação de ônibus sobre a poluição de uma região e auxiliar no desenvolvimento de estratégias de transporte público urbano.

Intervenções na infraestrutura de transporte, como a criação de faixas exclusivas e corredores de ônibus, priorização do tráfego dos ônibus em semáforos, alteração da distância entre paradas, entre outros, resultarão em alterações do perfil de condução dos veículos, o que, por fim, poderá ter impacto na emissão de poluentes.

Certamente, não apenas fatores oriundos da operação têm influência nas emissões, mas também aqueles diretamente ligados: (I) ao veículo, como tamanho, capacidade, motorização e tecnologia embarcada; (II) ao condutor, relativo à maneira de conduzir o veículo; (III) e também ao tipo e à qualidade do combustível utilizado.

Entretanto, o foco deste trabalho está nos fatores ligados à operação de transporte público, através do desenvolvimento de ciclos de condução para condições de operação específicas que deverão ser identificadas e apresentadas durante a análise da fase experimental.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é construir ciclos de condução de ônibus urbanos com motores a diesel a partir de dados da operação simulada por veículo em teste, visando sua aplicação em metodologias de estimativa de emissões de poluentes.

Os objetivos secundários são:

- Comparar fontes de aquisição de dados de velocidade para construção de ciclos de condução – Velocidade adquirida pela central eletrônica do veículo (CAN) e pelo receptor GPS;
- Verificar o resultado do método de seleção de microviagens e construção de ciclos de condução com base no conceito de VSP (*Vehicle Specif Power* – potência veicular específica);
- Comparar distribuições de VSP e ciclos de condução construídos para períodos de pico e fora de pico por trechos de vias com diferentes configurações;
- Estimar emissões para os ciclos de condução desenvolvidos e comparar o efeito de diferentes ciclos sobre a emissão de poluentes selecionados.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Na revisão bibliográfica, no capítulo 2, são apresentados os conceitos mais relevantes para o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa: ciclos de condução e metodologias para sua construção, apresentação do VSP (*Vehicle Specific Power*) e emissões veiculares.

O capítulo 3 apresenta a metodologia aplicada na aquisição dos dados do experimento com os equipamentos e demais recursos utilizados na sua execução. Além disso, são mostrados extratos dos dados adquiridos e a divisão do experimento em duas fases.

O quarto capítulo analisa os dados adquiridos pelo experimento e aplica um método de construção de ciclos de condução baseado na similaridade da distribuição de VSP, desenvolvendo dois ciclos iniciais a partir da amostra total de dados obtida. Em seguida, são apresentados os trechos selecionados do trajeto completo percorrido pelo veículo em teste, para a construção de ciclos de condução para os períodos de pico e fora do pico.

No capítulo 5, são realizadas estimativas de emissões de poluentes para NO_x (óxidos de nitrogênio), HC (hidrocarbonetos), MP (material particulado) e CO (monóxido de carbono), baseadas nas taxas de emissões coletadas pela EPA (*Environmental Protection Agency* - agência americana de proteção ambiental) para o desenvolvimento do *software* MOVES.

Por fim, as principais conclusões do trabalho e recomendações para desenvolvimentos futuros são apresentados no capítulo 6.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CICLOS DE CONDUÇÃO

Para Nesamani e Subramanian (2011) um ciclo de condução é uma sequência de condições de operação (marcha lenta, aceleração, desaceleração e cruzeiro), desenvolvida para representar um padrão típico de condução em uma região, sendo amplamente utilizado em estudos de emissões (Lai *et al.*, 2012).

Além de servirem de apoio para estimativas e medições de emissões, ciclos de condução também podem ser utilizados para medir consumo de combustível, conforme a recomendação da norma SAE J2711 (2002).

Diversos ciclos de condução têm sido desenvolvidos por instituições de vários países. Esses ciclos, segundo Andrei (2001), variam consideravelmente entre si, uma vez que buscam reproduzir comportamentos de condução específicos, influenciados pelas condições de tráfego local e por características da rota percorrida.

Há ciclos de condução mais comumente utilizados, como, por exemplo os ciclos *Manhattan* e *Orange County*, que têm uso difundido nos Estados Unidos e *Dutch Urban Bus* e *Braunschweig*, mais comuns na Europa (Clark *et al.*, 2007).

A duração dos ciclos de condução varia de um ou dois minutos até trinta minutos ou mais, apresentada normalmente de segundo a segundo, com duração limitada. Assim, visando reduzir custos de testes por veículo, esforços de desenvolvimento de ciclos de condução são desafiados a simular o comportamento real dos veículos (Dai *et al.*, 2008).

Para ensaios tanto de motores quanto de veículos são utilizados dinamômetros, equipamentos que simulam a potência resistiva imposta às rodas de um veículo, capazes de aplicar velocidade e carga controlada para fins de medição de um motor ou veículo em termos de torque, potência, simulação de movimento, entre outros.

Veículos de passeio e comerciais leves são comumente testados em dinamômetros de chassi (veículo completo), conforme Figura 1, enquanto veículos pesados têm somente seus motores testados em dinamômetros de motor, uma vez que esses motores são utilizados para diferentes aplicações (Majewski e Khair, 2006).

Figura 1 - Representação esquemática de uma instalação com dinamômetro de chassi para medição de emissões veiculares (Franco *et al.*, 2013).

Os métodos padronizados de certificação de veículos pesados para emissões são baseados somente em testes de motores (Clark *et al.*, 2007). Entretanto, este método tem diversas limitações. Primeiramente, testes de motores não contam com as características do veículo (peso, trem de força, estrutura da carroceria, layout do sistema de arrefecimento, etc.). Além disso, um teste de motor não é o ideal para a avaliação da utilização de um veículo.

Outro aspecto a ser considerado é que a remoção de um motor de um veículo é bastante trabalhosa e os modelos mais modernos estão atrelados a sistemas eletrônicos cada vez mais complexos oriundos do veículo completo e não somente do trem de força.

Ao se testar veículos completos em dinamômetros resolvem-se muitos dos problemas e ultrapassam-se as limitações citadas anteriormente. Adicionalmente, as medidas de emissões baseadas em veículos completos resultam em uma unidade específica de gramas por quilômetros (g/km) em vez de por quilowatt-hora (g/kWh), esta última mais difícil de relacionar com condições reais de operação (Clark *et al.*, 2007).

Apesar de não haver uma metodologia universal para ensaios em dinamômetros de chassis para veículos pesados, diversos laboratórios ao redor do mundo estão obtendo resultados de emissões para veículos pesados completos. Em geral, estes ensaios estão focados em novos tipos de veículos, como, por exemplo, veículos que utilizam novas tecnologias de redução de emissões de gases de escape, trens de força mais modernos e/ou o uso de combustíveis alternativos (Clark *et al.*, 2007).

Além disso, a *Society of Automotive Engineers* (SAE) publicou o documento SAE J2711 (*Recommended Practice for Measuring Fuel Economy and Emissions of Hybrid-Electric and Conventional Heavy-Duty Vehicles*, 2002), que lista as recomendações para medição de consumo de combustível e emissões em veículos comerciais pesados e propõe ciclos para estes fins.

2.1.1 Ciclos SAE J2711, Ciclo IPT (Expresso Tiradentes) e ciclos de testes de motores

O *Orange County Transit Cycle*, mostrado na Figura 2, é utilizado para representar a operação de ônibus em velocidades intermediárias (ex.: faixa de circulação exclusiva de ônibus). O ciclo *Orange County* é derivado dos dados coletados na operação real de ônibus urbanos em Orange County, Califórnia, e reflete uma grande variedade de acelerações, desacelerações e operações de cruzeiro. O ciclo *Orange County* tem uma velocidade média de 19,8 km/h e duração de 1908 s, percorrendo uma distância de 10,5 km (SAE, 2002).

Figura 2 - Ciclo de condução *Orange County*, SAE J2711 (SAE, 2002).

O *Manhattan Cycle* representa a operação de ônibus urbanos em baixas velocidades (trânsito compartilhado). Foi desenvolvido pela *West Virginia University* com dados obtidos na operação de ônibus na cidade de Nova Iorque. Este ciclo possui uma duração inferior ao *Orange County*, com 1089 s, velocidade média de 11km/h em um percurso de 3,32 km. Na Figura 3, o ciclo *Manhattan* (SAE, 2002).

Figura 3 - Ciclo de condução *Manhattan*, SAE J2711 (SAE, 2002).

Um terceiro ciclo apresentado é o UDDS (*Urban Dynamometer Driving Schedule* – programa de condução urbana em dinamômetro), na Figura 4, que representa o tráfego em altas velocidades para ônibus e também caminhões. Sua velocidade média é de aproximadamente 30,1 km/h em 1061 s em cerca de 8,9 km (SAE, 2002).

Figura 4 - Ciclo de condução UDDS, SAE J2711 (SAE, 2002).

Adicionalmente aos ciclos citados acima, no trabalho realizado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2007) é apresentado o ciclo do Expresso Tiradentes (corredor de circulação exclusiva de ônibus urbanos da cidade de São Paulo – BRT – *Bus Rapid Transit*), que representa o perfil de velocidade em função do tempo para um ônibus simulando a condição de operação planejada para este corredor, que à época da publicação do trabalho estava sendo concluído. Como esperado, este ciclo possui velocidade média superior aos ciclos *Manhattan* e *Orange County*, já que se trata de um corredor completamente separado do tráfego geral, sem semáforos ou outras paradas além das estações. A média de velocidade para este ciclo foi de 26,2 km/h em 1080 s com um percurso total de 7,86 km.

A Figura 5 apresenta um gráfico com as curvas sobrepostas dos ciclos de condução *Manhattan*, *Orange County* e Expresso Tiradentes, onde é possível verificar principalmente as diferenças na duração dos ciclos e nos padrões de variação de velocidade.

Figura 5 - Perfis dos ciclos de condução *Manhattan*, *Orange County* e Expresso Tiradentes (IPT, 2007).

A Tabela 1 mostra uma visão geral dos principais parâmetros que caracterizam os ciclos descritos anteriormente, *Manhattan*, *Orange County* e Expresso Tiradentes.

Tabela 1 - Características de ciclos de condução SAE J2711 x Expresso Tiradentes (IPT, 2007).

Grandeza	Unidade	SAE J2711		Expresso Tiradentes
		Manhattan x2	Orange County	
$V_{média}$	km/h	11,00	19,8	26,2
σ_v	km/h	11,80	16,6	15,8
$\sigma_v/V_{média}$	%	107%	84%	60%
$V_{máx}$	km/h	40,7	65,4	51,0
$A_{máx}$	m/s^2	1,8	1,8	1,5
$-A_{máx}$	m/s^2	-2,6	-2,3	-2,0
T_{total}	s	1089	1908	1080
T_{parado}	s	393	406	151
T_{parado}/T_{total}	%	36%	21%	14%
D_{total}	km	3,32	10,5	7,86
Nº paradas no ciclo		20	30	11*
Nº paradas/km		6,2	2,9	1,4*

* Na verdade, o expresso Tiradentes operava na época com somente seis paradas, o que implica em 0,8 parada/km. As paradas adicionais devem-se ao critério de simular uma parada adicional antes de cada ponto, supondo que os ônibus precisem aguardar seu antecessor liberar as plataformas

Nesta tabela são apresentadas as seguintes grandezas: velocidade média ($V_{média}$), desvio padrão de velocidade (σ_v), relação desvio padrão - velocidade média ($\sigma_v/V_{média}$), velocidade máxima ($V_{máx}$), aceleração máxima ($A_{máx}$), desaceleração máxima ($-A_{máx}$), tempo total de percurso (T_{total}), tempo total com o veículo parado (T_{parado}), distância total percorrida (D_{total}) e número de paradas. Para fazer a comparação das grandezas associadas à extensão do trajeto, foram definidas duas novas grandezas: fração de tempo parado e número de paradas por quilômetro.

Além dos ciclos de condução veicular, existem também os ciclos de testes de motores, utilizados convencionalmente para testes e homologação de emissões em motores pesados.

Ciclos de testes de emissões em motores são sequências de velocidade e de condições de carregamento executadas em um dinamômetro e podem ser divididos em estacionário ou transiente (Majewski e Khair, 2006).

Os ciclos estacionários, a exemplo dos ciclos de motores para dinamômetros ESC (*European Steady Cycle* – Ciclo estacionário europeu), consistem em uma sequência de modos definidos por diferentes condições de carregamento e velocidade do motor. Em conjunto com o ETC (*European Transient Cycle* – Ciclo transiente europeu) o ESC foi introduzido em 2000 na Europa para a certificação de motores pesados em emissões.

No ciclo ESC, o motor é testado em um dinamômetro de acordo com uma sequência de 13 modos estacionários, conforme Figura 6. O motor deve ser operado durante o tempo previsto em cada modo, completando as mudanças de velocidade e carga para o modo seguinte nos primeiros 20 segundos. A velocidade e torque especificados do motor devem ser garantidos com uma margem de ± 50 rpm e 2% respectivamente (Majewski e Khair, 2006).

As emissões são medidas para cada uma dessas condições, sendo que o resultado final é calculado como a média ponderada de todos os modos de teste. As emissões de material particulado são coletadas em um filtro durante os 13 modos de execução. Os resultados finais do teste de emissões são expressos em g/kWh.

Durante os testes de certificação de emissões, os profissionais envolvidos podem solicitar modos adicionais aleatórios dentro da área de controle do ciclo (expressa em verde na Figura 6). As emissões máximas nestes modos extras são determinadas através da interpolação dos limites para os modos de teste regulares (Majewski e Khair, 2006).

Figura 6 – Modos de teste ESC: (a) tabela de dados e (b) gráfico de carga por rotação do motor (ambos em %) (DIESELNET, 2012).

O ciclo transiente ETC, mostrado na Figura 7, considera, além das informações dos ciclos estacionários, mudanças no modo de operação ao capturar diferentes padrões de condução, tais como o urbano, o rural e o rodoviário (Nesamani e Subramanian, 2011).

Majewski e Khair (2006) descrevem detalhadamente cada trecho do ciclo ETC. A primeira parte representa a condução urbana com velocidade máxima de 50km/h com partidas e paradas frequentes e tempo maior de paradas. A segunda parte representa o trecho rural, contendo um segmento íngreme, com velocidade média de 72 km/h. A última parte é o trecho rodoviário com velocidade média de aproximadamente 88 km/h.

Este ciclo foi desenvolvido em duas variantes, uma para dinamômetros de chassi e outra para teste e homologação de motores (Majewski e Khair, 2006).

Figura 7 - ETC *European transient cycle* – Ciclo transiente europeu (DIESELNET, 2012).

Teoricamente, ciclos de testes de emissões em motores refletem alguns padrões de condução reais e os níveis de emissões associados, porém não é possível representar todas as condições de condução reais em um limitado conjunto de ciclos de teste (Majewski e Khair, 2006).

Para Clark *et al.* (2007), testar veículos utilizando ciclos de condução representativos tem importância crescente. Motores que funcionam bem em ciclos padronizados não têm necessariamente bom desempenho quando estão operando em situações reais. Isto é especialmente verdadeiro para as operações de ônibus que trabalham em baixas velocidades e cargas médias.

Além das velocidades máxima e média, aceleração e proporção de tempo parado, uma série de outros fatores são essenciais para o desenvolvimento de ciclos de condução tais como: a correlação entre velocidade e aceleração e as distribuições de velocidade e aceleração.

Desenvolver ciclos de condução específicos para as condições de tráfego locais é um requisito indispensável para possibilitar melhores estimativas de emissões e consumo de combustível (Nesamani e Subramanian, 2011).

2.2 METODOLOGIAS DE CONSTRUÇÃO DE CICLOS DE CONDUÇÃO

André (2004) expõe que, de uma forma geral, métodos de construção de ciclos de condução incluem tipicamente as seguintes etapas:

- 1 Coleta de dados reais de condução;
- 2 Segmentação dos dados de condução;
- 3 Construção dos ciclos;
- 4 Avaliação e seleção do ciclo final.

Uma revisão das principais metodologias de construção de ciclos de condução é apresentada por Dai *et al.* (2008), citando quatro metodologias distintas, sendo elas a construção de ciclos por microviagens, por segmentos de viagens, baseada em classificação de padrões e a construção modal de ciclos. Além destas, será apresentada a metodologia proposta por Lai *et al.* (2012) de utilização do VSP (*Vehicle Specific Power* – Potência veicular específica) na construção de ciclos de condução.

2.2.1 Construção de ciclos baseada em microviagens (*micro-trips*)

Para Austin *et al.* (1993), microviagens são definidas como toda a atividade de condução entre paradas sequenciais, incluindo o tempo de parada inicial ou final (espera) do veículo. Através da combinação entre diversas microviagens é possível construir ciclos de condução. Dados da condução são coletados e em seguida são divididos em microviagens que deverão ser selecionadas para formar o ciclo de condução com o objetivo de se aproximar da condução observada na prática.

Microviagens são normalmente selecionadas utilizando-se um de três métodos: (I) seleção aleatória, (II) método da melhoria incremental (Best incremental), que faz buscas adicionais e acresce ao ciclo as microviagens com características específicas, (III) e a terceira, uma combinação de ambas as metodologias (Austin *et al.*, 1993). Ciclos candidatos são avaliados utilizando parâmetros que tipicamente

incluem velocidades médias, máximas e mínimas, aceleração e desaceleração média e a distribuição de frequência de velocidade e aceleração (SAFD – *Speed-Acceleration Frequency Distribution*).

A maior limitação dos métodos baseados em microviagens é que estas não diferenciam os diversos tipos de condições de condução como o tipo de via ou seu nível de serviço (Dai *et al.*, 2008). Por exemplo, em uma condição de tráfego livre, um veículo para poucas vezes e uma única microviagem poderá representar diferentes tipos de via. Como resultado, reproduzir atividades de condução sob condições de tráfego específicas é difícil (André, 2004).

2.2.2 Construção de ciclos baseada em segmentos

O segmento de uma viagem é obtido dividindo os perfis de velocidade no tempo, utilizando alterações no tipo da via ou nível de serviço, além das paradas (Carlson e Austin, 1997). Desta forma, toda a condução do veículo poderá ser estratificada por tipo de via ou nível de serviço e, assim, os ciclos podem ser construídos para representar as condições de condução para tipos específicos de vias e condições de tráfego.

Da mesma maneira que o método baseado em microviagens, para a construção dos ciclos os segmentos de viagens são selecionados de forma aleatória, através do método da melhoria incremental ou pela combinação de ambos (Dai *et al.*, 2008). Entretanto, diferentemente das microviagens, os segmentos de viagens podem se iniciar e terminar em qualquer velocidade. Desta forma, a combinação dos segmentos requer restrições de velocidade e aceleração entre os pontos que conectam os segmentos anteriores e posteriores.

Para Dai *et al.* (2008), a construção de ciclos baseada em segmentos de viagens é limitada por ser desenvolvida estritamente sob a perspectiva da engenharia de transportes e, conseqüentemente, menos relacionada a emissões.

2.2.3 Construção de ciclos com classificação padronizada

Nesta proposta, sequências cinemáticas (similares às microviagens) são classificadas usando métodos estatísticos. Os ciclos de condução são construídos reconectando sequências cinemáticas selecionadas aleatoriamente. Este método vem sendo amplamente aplicado na construção dos ciclos de condução europeus (André *et al.*, 1995).

De acordo com André *et al.* (1995), na construção dos ciclos urbanos europeus as sequências cinemáticas são descritas por vinte variáveis, entre elas: duração, tempo de parada, distância percorrida e outras como a velocidade instantânea e aceleração. Para estas vinte variáveis que compõem as sequências cinemáticas foi aplicada a análise de componentes principais (PCA – *Principal Component Analysis*), seguida por análise de agrupamentos (*Cluster Analysis*). Quatro agrupamentos distintos foram identificados representando tráfegos urbanos livres e congestionados, tráfego não urbano e em rodovia.

Em seguida, cada viagem foi visualizada como a combinação das diversas sequências cinemáticas. Essa observação permitiu que fossem identificados três tipos de viagens: urbanas, rodoviárias e de autoestradas.

Para Dai *et al.* (2008), apesar de diferenciar as condições cinemáticas da condução, este método não necessariamente diferencia as emissões associadas a essas atividades.

2.2.4 Construção modal de ciclos

Lin e Niemeier (2002) apresentam um método de construção de ciclo de condução baseado em modos, onde a condução é vista como uma sequência de modos como aceleração, desaceleração, cruzeiro ou espera (parada). Estudos mostram que emissões de fontes móveis são relacionadas com a operação modal dos veículos, além da velocidade média. Admitindo que a probabilidade de um evento modal específico ocorrer depende somente do modo do evento anterior, as atividades de condução podem ser modeladas como uma cadeia de Markov (Barth *et al.*, 1996).

Para Lin e Niemeier (2002), a construção modal de ciclos é composta de quatro etapas. Na primeira, os dados da condução são divididos em trechos menores de diferentes durações a partir da aceleração. Em seguida, os trechos são agrupados em “caixas” de acordo com o modo.

O terceiro passo cria uma matriz de transição que contém as probabilidades de sucessões entre os diferentes modos. Em seguida o ciclo é construído como uma cadeia de Markov; para cada trecho adicionado, a próxima “caixa” modal é prevista de acordo com o modo do trecho atual e com a matriz de transição. A seleção de cada trecho em uma dada “caixa” também é feita com o método da melhoria incremental para a SAFD (Distribuição de frequência de velocidade e aceleração) e é necessário que a velocidade do início do trecho seja adequada à velocidade final do trecho anterior com uma diferença determinada (0,2 km/h no trabalho de Lin e Niemeier, 2002). A seleção dos trechos é repetida até que a distância desejada para o ciclo seja alcançada.

2.2.5 Construção de ciclos baseada na distribuição VSP

Esta metodologia, proposta por Lai *et al.* (2012), considera que a potência veicular específica (VSP – *vehicle specific power*) é um parâmetro apropriado para auxiliar na construção de ciclos de condução, pois demonstra a relação próxima entre emissões e o padrão de condução.

O VSP, proposto por Jimenez-Palacios (1999), é definido como o consumo de energia de um veículo por tonelada transportada, incluindo a massa própria do veículo. O VSP pode ser calculado a partir da velocidade e aceleração medidas segundo a segundo, das características da via e do veículo, sendo expresso em kW/t (quilowatt por tonelada). O conceito de VSP e sua relação com emissões serão apresentados no item 2.3.

No processo de estimativa de emissões o VSP é usualmente dividido em “caixas” (VSP *bins*), a cada uma das quais se associa uma taxa de emissão correspondente. A distribuição de VSP representa a proporção de tempo em cada “caixa” no tempo total de operação.

No estudo de Lai *et al.* (2012), a metodologia proposta para a construção de ciclos de condução inclui três etapas principais: identificar as microviagens válidas, selecionar as microviagens e construir os ciclos de condução. É basicamente uma adaptação da metodologia de microviagens, considerando o parâmetro VSP na seleção das microviagens válidas.

Em seguida é feita uma comparação entre as distribuições VSP de cada microviagem e o conjunto das microviagens que pertencem a um dado grupo de velocidade. Para avaliar a similaridade das microviagens foi utilizado o critério do erro quadrático médio (RMSE – *Root Mean Square Error*). Menores valores de RMSE mostram maior similaridade entre uma microviagem e a amostra total de dados, e sua formulação é mostrada na equação 1, abaixo:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=-30}^{i=30} (Bin_{mv,i} - Bin_{total,i})^2}{N-1}} \quad (1)$$

onde i é o identificador da “caixa” (Bin) de VSP entre -30 e 30kW/t, $Bin_{mv,i}$ é a proporção da “caixa” i na microviagem analisada (mv), e $Bin_{total,i}$ é a proporção da “caixa” i em todo o conjunto de dados (total), N é o número total de “caixas” de VSP, sendo normalmente de 21 (variação de -20 a 20kW/t, somente valores inteiros). Entretanto neste trabalho também será utilizada a faixa de VSP entre -30 e 30kW/t, pois pode representar maior proporção da amostra total de dados.

Lai *et al.* (2012) propõem a construção dos ciclos de condução em duas etapas: primeiro ordenam-se as microviagens segundo valores crescentes de RMSE e, em seguida, adicionam-se sequencialmente as microviagens a partir daquelas de menor valor de RMSE até que a duração pré-determinada para o ciclo seja atingida, aproximadamente 20 minutos no trabalho em questão.

Por fim, Lai *et al.* (2012) realizam uma análise comparativa das estimativas de emissões para os ciclos de condução propostos e ciclos de condução contidos no MOVES (*Motor Vehicle Emission Simulator* – Simulador de emissões de veículos a motor), sistema de modelagem de emissões de fontes móveis da agência de proteção ambiental dos Estados Unidos, EPA (*Environmental Protection Agency*).

Na média, as emissões resultantes dos ciclos de condução desenvolvidos no estudo de Lai *et al.* (2012) foram 5% inferiores àquelas baseadas nos ciclos padrão utilizados pelo MOVES. A comparação foi realizada para indicar os erros potenciais de se aplicar ciclos do MOVES diretamente, sem que exista uma calibração baseada nas informações locais de condução.

2.3 VSP – VEHICLE SPECIFIC POWER

O conceito de potência veicular específica (VSP – *Vehicle Specific Power*) apresentado por Jimenez-Palacios (1999) é definido como a taxa instantânea de potência para a massa do veículo. Este parâmetro é muito útil para análise de informações de dinamômetro de chassis e modelagem de emissões.

Para Jimenez-Palacios (1999), o VSP pode ser calculado com uma aproximação adequada a partir de medidas da velocidade, aceleração do veículo e inclinação da via, além de estimativas de resistência aerodinâmica e à rolagem do veículo.

A correlação das emissões de CO (monóxido de carbono), HC (hidrocarbonetos) e NOx (óxidos de nitrogênio) com o VSP é maior do que com outros vários parâmetros comumente utilizados como velocidade, aceleração, potência absoluta ou consumo de combustível. Ou seja, uma vez conhecido o VSP, os valores de velocidade e aceleração não fornecem informações adicionais relativas às emissões (Jimenez-Palacios, 1999).

O VSP é um parâmetro mais adequado do que velocidade ou aceleração por ser mais diretamente relacionado à carga no motor do veículo e, conseqüentemente, às emissões. Este fato pode ser ilustrado pelas Figuras 8 e 9, que mostram a variação de consumo de combustível (diretamente relacionado com emissões) e as emissões de NOx na saída do motor em função da aceleração e da potência específica para um dado veículo comercial leve. A correlação é maior com o VSP, mostrando uma clara tendência e menor dispersão nas medições experimentais realizadas por Jimenez-Palacios (1999).

Figura 8 – Consumo de combustível do motor em função da (a) aceleração e (b) VSP para ciclos FTP e HL07 (Jimenez-Palacios, 1999).

Figura 9 - Emissões de NOx na saída do motor em função da (a) aceleração e (b) VSP para ciclos FTP e HL07 (Jimenez-Palacios, 1999).

Duas das principais vantagens da utilização do VSP como uma variável de estudo de emissões segundo Jimenez-Palacios (1999) são:

- Ser diretamente mensurável. Nenhuma informação ou hipótese sobre qualquer parâmetro que não possa ser medido diretamente na operação é necessária para o cálculo do VSP em um nível de precisão aceitável.
- Identificar parte significativa da dependência das emissões em relação aos parâmetros de operação do motor, pois há relação direta com a taxa ar/combustível. Além disso, a definição de potência específica considera efeitos da resistência à rolagem, arrasto aerodinâmico e inclinação da via, que podem aumentar as emissões em até duas vezes.

Jimenez-Palacios (1999) define que a potência instantânea iguala-se ao produto da velocidade e uma aceleração equivalente, a qual inclui os efeitos citados no parágrafo anterior (inclinação da via e da resistência à rolagem), mais uma parcela do arrasto aerodinâmico, que é proporcional ao cubo da velocidade instantânea.

O conceito básico de VSP vem sendo aplicado amplamente em diversos estudos e em diferentes formas e tem se mostrado um parâmetro útil para estimar emissões. A agência de proteção ambiental dos Estados Unidos EPA (*Environmental Protection Agency*) desenvolve e dissemina esses conceitos no desenvolvimento dos ciclos de condução e para estimar emissões no MOVES (*Motor Vehicle Emission Simulator* – Simulador de emissões de veículos a motor) (Estados Unidos, 2009).

Apesar de o VSP não ter sido desenvolvido especificamente para a aplicação em veículos pesados, Zhai *et al.* (2008) propõem sua aplicação para desenvolver taxas de emissões médias de VSP para ônibus urbanos movidos a diesel.

Desta forma, partindo dos mesmos conceitos apresentados por Jimenez-Palacios (1999), Zhai *et al.* (2008) e Estados Unidos (2009) aplicam, para as variáveis da equação do VSP, valores típicos de ônibus urbanos a diesel, que também serão utilizados neste trabalho conforme a equação 2:

$$VSP = v \times (a + g \times \sin(\phi) + \psi) + \zeta \times v^3 \quad (2)$$

onde:

- VSP = Potência específica veicular (*Vehicle Specific Power*, kW/t);
- v = velocidade (m/s);
- a = aceleração do veículo (m/s²);
- g = aceleração da gravidade, 9,81m/s²;
- ϕ = inclinação da via (adimensional, em radianos);
- ψ = coeficiente de resistência à rolagem (adimensional);
- ζ = termo do coeficiente de arrasto (em m⁻¹).
 - $\zeta = \rho_a \times (C_D \times A / m)$

onde:

- ρ_a = Densidade do ar (em kg/m³);
- C_D = Coeficiente de arrasto (adimensional);
- A = Área frontal do veículo (em m²);
- m = Massa do veículo (em kg).

2.4 EMISSÕES VEICULARES EM MOTORES DIESEL

O motor diesel, como qualquer outro motor à combustão, converte energia química contida no combustível em energia mecânica. O combustível diesel é uma mistura de hidrocarbonetos que teoricamente produz somente dióxido de carbono (CO_2), vapor d'água (H_2O) e uma fração do ar aspirado não utilizado durante sua combustão. Com exceção do CO_2 , por ser gás do efeito estufa, os demais produtos da combustão do diesel não produzem efeitos nocivos ao ambiente (Majewski e Khair, 2006).

Para Tsolakis e Megaritis (2004), os percentuais dos principais reagentes (oxigênio e vapor d'água) nos gases de escape do motor dependem das condições de operação (por exemplo, taxa ar/combustível). Para o motor a diesel o efeito da taxa de ar e combustível (λ) na composição dos gases de escape pode ser visto na reação de combustão, mostrada na equação 3:

onde n é o número de átomos de carbono na molécula do combustível (Tsolakis e Megaritis, 2004).

Motores diesel operam convencionalmente sob condições de mistura pobre ($\lambda > 1$) e as emissões do motor sempre contêm oxigênio, como pode ser visto equação 3. Ao se aproximar de uma operação estequiométrica ($\lambda = 1$), o percentual de vapor d'água nos gases de escape aumenta, enquanto o oxigênio diminui (Tsolakis e Megaritis, 2004).

Na prática, as emissões de poluentes de escapamento decorrem da queima incompleta dos combustíveis ou lubrificantes pelo motor, compreendendo uma série de substâncias como monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), hidrocarbonetos (HC), aldeídos (RCHO), óxidos de nitrogênio (NO_x) e material particulado (MP) (Brasil, 2011).

Nos motores de combustão interna as emissões de poluentes mais problemáticas são a formação de material particulado e óxidos de nitrogênio. Os níveis de

emissões desses poluentes são os aspectos mais críticos para o cumprimento das resoluções mais recentes. O principal problema consiste na redução simultânea das emissões de MP e NOx pois as estratégias para reduzir um destes resulta imediatamente no aumento do outro (López *et al.*, 2008).

As emissões de um veículo automotor podem ocorrer pelo escapamento (emissões diretas) ou podem ser de natureza evaporativa do combustível, aparecendo durante o uso e o repouso do veículo. São influenciadas por vários fatores, dentre os quais pode-se destacar: tecnologia do motor, porte e tipo de uso do veículo, idade do veículo, projeto e materiais do sistema de alimentação de combustível, tipo e qualidade do combustível, condições de manutenção e condução, além de fatores meteorológicos (pressão e temperatura ambientes) (Brasil, 2011).

Além dos elementos citados acima, segundo Majewski e Khair (2006), as emissões dependem de fatores adicionais, tais como:

- Aceleração, para emissões de CO, HC e MP. Verificam-se emissões de MP de 30 a 50% maiores em operações transientes comparando com estacionárias.
- Velocidade e carga do veículo são reconhecidas como fatores críticos que influenciam emissões.
- Carregamentos auxiliares no motor, como ar condicionado, equipamentos de ventilação ou aquecimento, podem gerar emissões adicionais que não são consideradas para a maioria dos ciclos de testes.
- Fatores relacionados diretamente ao condutor que afetam emissões incluem a suavidade das acelerações e a velocidade constante. Estudos mostraram que uma condução agressiva que corresponda a apenas 2% do tempo pode produzir até 40% das emissões.
- Fatores relacionados às vias não são considerados para ciclos de testes para homologação, ou seja, em geral consideram-se vias planas.

Veículos pesados vêm obtendo reduções significativas nas emissões de poluentes, especialmente na Europa e América do Norte. Para alcançar requisitos cada vez mais restritivos, os fabricantes de veículos terão de implantar medidas de redução relativas ao motor e/ou tecnologias de pós-tratamento de gases de escape para controlar emissões. Como outra solução, os fabricantes podem optar pela queima de combustíveis alternativos tais como o gás natural (Clark *et al.*, 2007).

A Figura 10 mostra a evolução das regulamentações de emissões na Europa e nos Estados Unidos, que estão neste momento à frente da Europa no que diz respeito às regulamentações de emissões para veículos pesados, sendo que a regulamentação europeia Euro 6 deve ser implantada em duas fases em 2013 e 2014.

Figura 10 - Evolução das regulamentações de emissões para veículos pesados na Europa (Euro) e Estados Unidos (EPA) (Clark *et al.*, 2007).

Para o Brasil, a regulamentação de emissões de poluentes para veículos pesados, em vigor a partir de janeiro de 2012, P7, é equivalente à norma europeia Euro V. A evolução das fases do PROCONVE (Programa de Controle da Poluição por Veículos Automotores), para veículos pesados, pode ser verificada na Tabela 2. As emissões medidas em um motor são exibidas em termos de massa de poluente por unidade de trabalho, expressas em g/kWh (Brasil, 2011).

Tabela 2 - Fatores de emissão de poluentes principais em motores diesel por fase do PROCONVE, em g/kWh (Brasil, 2011).

Fase do PROCONVE	CO	NMHC	NOx	MP*
	Monóxido de Carbono	Hidrocarbonetos não-metano	Óxidos de Nitrogênio	Material Particulado
Pré-PROCONVE, P1 e P2 (1990-1993)	1,86	0,68	10,7	0,660
P3 (1994)	1,62	0,54	6,55	0,318
P4 (1998)	0,85	0,29	6,16	0,120
P5 (2003)	0,83	0,16	4,67	0,078
P7 (2012)	0,83	0,16	1,8	0,018

(*) Valor válido para teor de enxofre no diesel utilizado no ensaio de homologação

Por fim, espera-se que a combinação do conceito de VSP com um método de seleção de microviagens para a construção de ciclos de condução conforme a proposta apresentada por Lai *et al.* (2012) poderá conduzir a resultados mais representativos em termos de emissões. Portanto, essa será a metodologia aplicada na execução do experimento exposto nos próximos capítulos deste trabalho.

3 METODOLOGIA

O trabalho está dividido em quatro etapas básicas, sendo elas a aquisição e a análise de dados (principalmente a variação de velocidade no tempo), a construção dos ciclos de condução e por fim a estimativa das emissões para os ciclos desenvolvidos.

3.1 AQUISIÇÃO DE DADOS: DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

A primeira etapa, a aquisição de dados, foi realizada através de um experimento com um ônibus urbano, onde foram executadas medições de diversas variáveis relevantes para a construção de ciclos de condução e cálculo do VSP, principalmente posicionamento e velocidade, com auxílio de receptor GPS (*Global Positioning System* – Sistema de posicionamento global) e um *data logger*, equipamento eletrônico para gravação de dados adquiridos com GPS, para armazenar informações das rotas percorridas.

Os registros gravados foram pré-processados para verificar a existência de falhas na gravação, encontradas principalmente nos dados obtidos pelo receptor GPS, tais como arquivos corrompidos ou sem gravação, registros de posicionamento e velocidade inconsistentes (posição incompatível com o experimento, velocidades excessivas não passíveis de serem obtidas com o veículo de testes), entre outros.

A partir de um percurso completo preexistente, de aproximadamente 150 km, percorridos em um teste de durabilidade veicular urbana, foram selecionados segmentos do trajeto que pudessem representar diferentes condições de operação de ônibus urbanos na região metropolitana de São Paulo, incluindo vias dos municípios de Santo André, São Bernardo do Campo, São Caetano, Diadema e Mauá. O percurso completo é composto por vias de diferentes características geométricas e de operação, com velocidade máxima permitida de 60 km/h, sendo que cerca de 80% é percorrido em avenidas com limite acima de 50 km/h e o restante em vias com limite de velocidade inferior a esse valor.

Apesar de o trajeto completo do experimento ser composto também por vias dotadas de corredor de circulação exclusiva de ônibus, o veículo em teste não circulou nestes corredores por falta de autorização dos órgãos gestores, ficando sua circulação nestas vias restrita às faixas compartilhadas com os demais veículos, inclusive outros ônibus.

As vias percorridas durante o percurso completo são em sua maioria, aproximadamente 70%, ruas e avenidas com boa condição de pavimentação, enquanto o restante possui condições regulares ou com muitas imperfeições, mas não há vias sem pavimento.

O percurso total é composto por cerca de 340 paradas (aprox. 2,3 paradas por quilômetro) em pontos de ônibus. Durante cada parada o veículo abre e fecha as portas e volta a acelerar, sem que haja um tempo de espera para a simulação da movimentação dos passageiros, o que não é a condição real. Este fato distancia o experimento da realidade, porém em comparação com a literatura (Lai *et al.*, 2012 – em Pequim, China) o tempo médio de parada se aproxima muito dos valores medidos no experimento, conforme a Tabela 3.

Tabela 3 - Tempo médio de paradas - Comparativo do experimento e Lai *et al.* (2012).

Referência	Tempo médio parado s
Linhas regulares (experimento)	25,2
BRT (<i>Bus Rapid Transit</i> - Corredor de ônibus) (Lai <i>et al.</i> , 2012)	21,0
Linhas Expressas (Lai <i>et al.</i> , 2012)	25,0
Linhas Regulares (Lai <i>et al.</i> , 2012)	25,0

Zhai *et al.* (2008), Jimenez-Palácios (1999), entre outros, sugerem que para estimar emissões a medição de velocidade pode ser feita em intervalos de um segundo (1 Hz), o que é possível com diversos equipamentos disponíveis no mercado, sendo que alguns deles têm capacidade de gravação de dados de até 100 Hz. Para a

elaboração deste trabalho foi utilizada, portanto, a frequência usual de 1 Hz para a gravação dos dados.

Figura 11 - Módulos Racelogic (a) VBOX e (b) CAN02 utilizados para aquisição e gravação de dados no experimento (Racelogic, 2012a).

A Figura 11 mostra os equipamentos utilizados durante a realização dos testes: Racelogic VBOX VB2SX, que é um receptor de sinais GPS combinado com um *data logger* para gravação de dados em até 20Hz, em conjunto com o módulo Racelogic CAN02, que obtém dados diretamente da ECU (*Engine Central Unit* – central eletrônica do motor) via comunicação CAN (*Controller Area Network*), que é o protocolo de comunicação eletroeletrônica, e repassa os dados para gravação no cartão de memória inserido no VBOX. O esquema de funcionamento combinado dos equipamentos utilizados no experimento é ilustrado na Figura 12.

Figura 12 - Esquema de funcionamento dos equipamentos em conjunto (Racelogic, 2012b).

O conjunto de equipamentos VBOX e CAN02 adquire e salva os dados em arquivo com extensão específica (.VBO), que em seguida são convertidos em planilha excel, conforme o fluxo apresentado na Figura 13.

Figura 13 - Fluxograma do procedimento de aquisição de dados com os equipamentos VBOX e CAN02.

Exemplos dos dados adquiridos durante o experimento são mostrados na Figura 14, com destaque para as informações mais relevantes para o desenvolvimento de ciclos de condução como o tempo, as coordenadas geográficas e a velocidade instantânea adquirida pelo módulo eletrônico do veículo (VCAN ou velocidade CAN) e pelo receptor GPS (VGPS ou velocidade GPS), além da elevação e inclinação, importantes para o cálculo do VSP.

Além destas informações básicas para a construção dos ciclos adquiridas pelo receptor GPS, com auxílio do módulo CAN02 dados adicionais da central eletrônica do veículo foram registrados pelo *data logger*, como, por exemplo, rotação do motor, torque instantâneo, abertura de portas, informações da caixa de transmissão, entre outros.

	A	B	C	D	E	H	J	K	M	Q	R	S	T
1	Hora	Latitude	Longitude	Velocidade GPS	Elevação	Rotação motor	Hodômetro dia	Torque motor	Velocidade CAN	Dia	Mês	Relação câmbio	Stat_door
2				km/h	m	RPM	km	Nm	km/h				
156	101332	-23,62730733	-46,6192446	26,5	788,820	1883	38,4	280	26,7	30	10	2,7	1
157	101333	-23,62737283	-46,619244	26,3	788,820	1916	38,4	220	26,9	30	10	2,8	1
158	101334	-23,62743913	-46,6192427	26,8	788,830	1927	38,4	246	27,0	30	10	2,8	1
159	101335	-23,62750542	-46,6192399	26,6	788,820	1927	38,4	233	27,0	30	10	2,8	1
160	101336	-23,6275709	-46,6192343	26,3	788,780	1917	38,5	180	27,1	30	10	2,8	1
161	101337	-23,62763813	-46,6192236	27,7	788,820	1947	38,5	452	27,4	30	10	2,8	1
162	101338	-23,62770683	-46,6192073	28,4	788,830	2058	38,5	361	28,8	30	10	2,8	1
163	101339	-23,62777771	-46,619189	29,1	788,710	2075	38,5	319	29,1	30	10	2,8	1
164	101340	-23,62784807	-46,619171	29,2	788,400	1967	38,5	212	27,7	30	10	2,8	1
165	101341	-23,62791772	-46,6191523	28,5	788,300	2008	38,5	307	28,1	30	10	2,8	1
166	101342	-23,62798457	-46,6191304	27,6	788,290	2046	38,5	298	28,8	30	10	2,8	1
167	101343	-23,62804953	-46,6191059	27,5	788,440	2016	38,5	244	28,3	30	10	2,8	1
168	101344	-23,62811222	-46,6190795	26,7	788,800	1977	38,5	0	27,6	30	10	2,8	1
169	101345	-23,62817612	-46,6190531	27,8	789,080	1946	38,5	373	27,2	30	10	2,8	1
170	101346	-23,62823997	-46,6190273	26,9	789,330	1987	38,5	7	28,4	30	10	2,7	1
171	101347	-23,62830275	-46,6190022	26,7	789,570	1971	38,5	0	27,6	30	10	2,8	1
172	101348	-23,6283642	-46,6189784	26,0	789,710	1870	38,5	0	26,4	30	10	2,8	1
173	101349	-23,6284227	-46,618956	24,4	790,000	1805	38,6	0	25,6	30	10	2,8	1
174	101350	-23,62848115	-46,6189415	23,2	789,220	1700	38,6	0	23,7	30	10	2,8	1
175	101351	-23,62854007	-46,6189304	23,8	788,500	1621	38,6	0	22,6	30	10	2,8	1
176	101352	-23,62859887	-46,6189179	23,9	788,280	1642	38,6	324	22,6	30	10	2,8	1
177	101353	-23,62865342	-46,6189003	22,2	788,610	1639	38,6	0	23,0	30	10	40,5	1
178	101354	-23,62870738	-46,6188836	22,0	788,580	1529	38,6	0	21,6	30	10	40,5	1
179	101355	-23,62876068	-46,6188695	21,3	788,500	1409	38,6	0	19,8	30	10	40,5	1
180	101356	-23,62881283	-46,6188543	21,3	788,740	1392	38,6	442	19,7	30	10	40,5	1
181	101357	-23,62886553	-46,6188374	22,2	788,730	1497	38,6	330	20,5	30	10	40,5	1
182	101358	-23,62892143	-46,6188171	24,3	788,860	1652	38,6	780	23,0	30	10	40,5	1
183	101359	-23,62898505	-46,6187933	28,2	789,050	1896	38,6	780	26,3	30	10	2,8	1
184	101400	-23,62905565	-46,618766	30,7	789,120	2190	38,6	780	30,2	30	10	40,5	1
185	101401	-23,62912972	-46,6187361	32,2	789,410	1692	38,6	447	30,6	30	10	40,5	1
186	101402	-23,62920702	-46,6187066	33,2	789,290	1492	38,6	397	32,4	30	10	40,5	1
187	101403	-23,62928647	-46,6186768	34,0	789,100	1562	38,6	549	33,7	30	10	40,5	1
188	101404	-23,62936598	-46,6186431	34,4	789,340	1586	38,7	394	34,3	30	10	1,8	1
189	101405	-23,6294454	-46,61860458	35,2	789,890	1618	38,7	379	35,1	30	10	1,8	1
190	101406	-23,62952583	-46,61856063	36,6	790,430	1658	38,7	553	35,8	30	10	1,8	1
191	101407	-23,62960862	-46,61851202	38,2	790,940	1757	38,7	673	38,1	30	10	1,8	1
192	101408	-23,62969258	-46,61846170	38,6	791,430	1783	38,7	297	38,8	30	10	1,8	1

Figura 14 - Exemplo de planilha com dados adquiridos pelo GPS e salvos pelo *data logger* em 1Hz – em destaque tempo, coordenadas geográficas, velocidade GPS e elevação.

Com a possibilidade de obter informações diretamente da ECU do veículo, dados do comportamento do motor e veículo foram armazenados a cada instante na frequência estabelecida de 1Hz e, assim, puderam ser gravadas informações como a velocidade do veículo indicada no painel de instrumentos, que será tratada como VCAN ou velocidade CAN, que é uma informação menos suscetível a falhas do que a registrada pelo receptor GPS.

Para a realização do experimento proposto foi utilizado um ônibus urbano durante a execução de testes de durabilidade em um trajeto fixo descrito anteriormente, com as características a seguir:

- Modelo Mercedes-Benz OF1721 Euro5 com carroceria do tipo básico, conforme NBR15570 (ABNT, 2011), Figura 15(a);

- Motor MB OM924LA (Euro5 / Proconve P-7), 153kW (208cv), 780Nm, câmbio mecânico MB G-85 de 6 marchas sincronizadas;
- PBT (peso bruto total) de 17 toneladas;
- Capacidade para até 85 passageiros (a carga no veículo foi simulada com tanques de água e barris de areia, como mostra a Figura 15(b)).

(a)

(b)

Figura 15 - Ônibus urbano modelo Mercedes-Benz OF1721 Euro5 utilizado no experimento. (a) Visão geral e (b) interior do veículo com exemplo de carga utilizada.

Os equipamentos de medição e armazenamento de dados foram instalados de maneira que pudessem ser facilmente acessados, atrás do posto do motorista, como mostrado na Figura 16, sendo que na primeira fase a antena do receptor GPS ficou instalada sobre o painel de instrumentos (no detalhe da Figura 16) e na segunda fase foi instalada sobre o teto do veículo. O posicionamento da antena foi fator decisivo para a divisão do experimento em duas fases, pois foi verificado que a precisão da medida de velocidade adquirida do GPS foi diretamente afetada por essa razão.

Figura 16 - Instalação dos equipamentos de medição no ônibus de testes. No detalhe do canto direito superior, posicionamento da antena na fase 01.

O experimento foi dividido em duas fases. Na primeira e mais longa, foi considerado como registro de velocidade apenas os dados da ECU (velocidade VCAN), garantindo, assim, que os valores de velocidade utilizados possuam precisão mais controlada na maior parte dos testes (dependente apenas de características e comportamento do veículo como tamanho do pneu, perda de aderência, entre outros). Além disso, dessa maneira a medição independe de fatores externos que podem produzir falhas na recepção dos sinais GPS, como condições meteorológicas, devido à topografia ou “sombras” produzidas por regiões com muitos edifícios ou árvores.

Antes do início do experimento válido para este trabalho foram realizados testes com a antena posicionada sobre o painel de instrumentos, e os resultados preliminares apresentaram altos índices de correlação entre os valores da velocidade adquirida pelo receptor GPS (velocidade VGPS) e os valores de velocidade registrados pela central eletrônica do veículo (VCAN).

Desta forma, pela possibilidade do motorista observar o correto posicionamento da antena, pelo seu fácil acesso e visualização, decidiu-se manter durante todo o experimento o equipamento sobre o painel de instrumentos.

Entretanto, após o encerramento dos testes foram constatadas diversas incompatibilidades entre as medições de velocidade VGPS e VCAN o que tornou a velocidade adquirida pelo receptor GPS uma medida não confiável, tornando a VCAN a referência para todos os cálculos que envolvessem essa variável durante a primeira fase do experimento.

Porém, após essa constatação ficou decidido que seria realizada uma segunda fase do experimento com a antena posicionada sobre o teto do veículo, mas para isso, antes de cada “volta” no circuito completo o motorista deveria checar a posição e reforçar a fixação do equipamento.

A segunda fase do experimento foi definida como uma etapa de verificação, para comparar as fontes de medida de velocidade VGPS e VCAN e a influência destes valores no cálculo do VSP. Devido à disponibilidade do veículo de testes, a segunda fase foi realizada em apenas um dia.

3.1.1 Experimento Fase 1 – Antena posicionada no painel do veículo

A fase 1 do experimento foi realizada entre os dias 21/09 (sexta-feira) e 01/11/2012 (quinta-feira), apenas em dias úteis, de forma interrupta, de acordo com a disponibilidade do veículo e sem que houvesse prejuízo aos testes de durabilidade que estavam sendo executados.

Nesta fase foram coletados 17632 minutos (aprox. 294h) de dados considerados válidos, em 24 dias de testes, realizados por dois motoristas (A e B) operando em

horário definido e percurso fixo, sendo que a distribuição total de horas por dia da semana pode ser verificada na Figura 17. As horas apontadas no sábado referem-se à finalização de testes iniciados na sexta-feira anterior.

*Testes registrados no sábado são continuações dos iniciados na sexta-feira.

Figura 17 - Distribuição de horas de testes por dia da semana na primeira fase do experimento.

A realização dos testes foi dividida em dois turnos com um motorista cada, sendo que o primeiro, com motorista A, deveria ocorrer das 6:00 às 14:30 e o segundo, com motorista B, planejado para ocorrer das 15:00 às 23:30. Entretanto, como existiram influências externas que não puderam ser controladas, como tráfego por exemplo, esses horários serviram como referência e foram alterados de acordo com a necessidade. Na Figura 18, está o percentual de testes executado pelos motoristas A e B durante a primeira fase.

Figura 18 - Distribuição dos testes por motorista na primeira fase do experimento.

Os motoristas que participaram dos testes realizados por esse trabalho são treinados para percorrer o trajeto de forma padronizada. Por isso, a forma de conduzir o veículo pelos motoristas não teve influência considerável nos resultados das medições realizadas.

Por fim, a execução do experimento dependeu de grande quantidade de recursos, principalmente da disponibilidade do ônibus, equipamentos de medição, além de motoristas qualificados e mão de obra especializada para operação dos equipamentos que, em conjunto, restringiram a flexibilidade da realização das medições principalmente quanto aos trajetos escolhidos e aos horários desejados.

3.1.2 Experimento Fase 2 – Antena posicionada no teto do veículo

A segunda fase do experimento foi realizada em apenas um dia (13/02/2013) devido à restrita disponibilidade do veículo, que se envolveu em uma colisão e teve de ser retirado de circulação para manutenção, impossibilitando a continuação dos testes.

O objetivo da segunda fase foi verificar se a aquisição de dados apenas por equipamento receptor GPS (através da VGPS) poderia ser utilizada como uma forma mais simples e tão eficaz quanto adquirir dados diretamente da ECU (VCAN) de um veículo, que exige equipamentos e conhecimento mais específicos para este

fim (por exemplo, a conexão e sincronização dos módulos eletrônicos veiculares com os dispositivos VBOX), desde que garantida a alta qualidade de sinal para o receptor GPS.

Durante a segunda fase do experimento foram adquiridos 384 minutos (6 horas e 24 minutos, com pausas para descanso) de dados de deslocamento do ônibus em teste, com apenas um motorista, iniciando os testes às 17h03 e finalizando às 00h44.

A Tabela 4 mostra o resumo dos dados adquiridos durante as medições da fase 2 do experimento e os valores de velocidade média e desvio padrão para cada uma das fontes, GPS e CAN, com resultados muito semelhantes, mesmo sem filtrar picos de velocidade registrados indevidamente pelo GPS. A correlação entre as medidas de velocidade VGPS e VCAN foi calculada em 98,7%.

Tabela 4 - Resumo de dados adquiridos durante a fase 2 do experimento

Arquivo	Data	Hora (início)	VGPS km/h	VCAN km/h	Tempo total minutos
total_VBOX_005	13/02/2013	17:03	12,3 ± 15,6	12,4 ± 15,5	80
total_VBOX_006	13/02/2013	18:35	10,1 ± 12,0	10,1 ± 11,8	241
total_VBOX_007	13/02/2013	23:41	19,9 ± 15,1	19,9 ± 15,2	63
Total			12,1 ± 13,8	12,1 ± 13,7	384

Em seguida foram calculadas as divergências para as medidas de velocidade VGPS com base na velocidade VCAN. De forma resumida, em aproximadamente 88% das observações, as velocidades têm o mesmo valor em ambas as fontes utilizadas, o que pode ser visualizado na Figura 19.

Figura 19 - Desvio entre medidas de velocidade VCAN e VGPS

Desta forma, verifica-se que se a aquisição de dados for feita de forma controlada e com poucas falhas de sinal nas aquisições de velocidade do receptor GPS, a variação entre os valores de VGPS e VCAN deverá ser pequena.

Além das comparações de velocidade, para as medições realizadas na fase 2 foram calculados os valores de VSP e em seguida determinada a sua distribuição, resultando no gráfico apresentado na Figura 20.

Figura 20 - Distribuição de VSP para as fontes de velocidade VCAN e VGPS.

De acordo com a pequena diferença entre as medidas de velocidade, as distribuições de VSP calculadas a partir das diferentes fontes de velocidade VGPS e VCAN resultaram em valores muito semelhantes, conforme mostram a Figura 20 e a Tabela 5.

Tabela 5 - Distribuições de VSP para velocidades adquiridas pelas fontes CAN e GPS

Faixas de VSP kW/t	Distribuição	
	VCAN	VGPS
-20 a -11	0,6%	0,4%
-10 a -1	15,0%	14,3%
0	54,6%	55,4%
1 a 10	29,5%	29,5%
11 a 20	0,3%	0,4%

Sendo assim, verifica-se que experimentos que realizam medidas de velocidade registradas pelos mesmos equipamentos utilizados neste trabalho, podem ser executados tendo apenas a VGPS como fonte, podendo levar a obtenção de resultados semelhantes em termos de distribuição VSP quando comparados àqueles experimentos que utilizam a VCAN como fonte de medida de velocidade.

4 ANÁLISE DE DADOS E CONSTRUÇÃO DE CICLOS DE CONDUÇÃO

4.1 ANÁLISE DO TRAJETO COMPLETO E CICLO DE CONDUÇÃO 01

Concluída a fase experimental do trabalho, com o término dos testes com ônibus, passou-se para a etapa de preparação e análise dos dados obtidos empiricamente. Os dados foram compilados e tratados através de uma rotina específica em *software* de planilha eletrônica, para que pudessem ser verificados principalmente quanto à sua validade, se todas as informações coletadas (principalmente dados de posicionamento e velocidade) possuíam valores dentro das faixas esperadas.

A primeira etapa da análise agrupa todos os dados obtidos em uma única planilha eletrônica, onde são calculadas as acelerações, as inclinações das vias e os valores de VSP a cada segundo e a quebra das microviagens. Para o total de dados válidos obtidos, representando o percurso de testes completo, foi calculada a distribuição dos valores de VSP no tempo e, em seguida, fazendo uso da metodologia apresentada por Lai *et al.*(2012), foi proposto um ciclo de condução geral para este mesmo trajeto completo.

Para o cálculo do VSP, os valores das variáveis coeficiente de resistência à rolagem (ψ) e o termo do coeficiente de arrasto (ζ) – dependente da densidade do ar, coeficiente de arrasto, área frontal e massa do veículo – foram baseados nos valores do experimento realizado por Zhai *et al.*(2008), também com ônibus urbanos, mostrados na Tabela 6.

Os valores de velocidade foram medidos com os equipamentos descritos anteriormente no item 3.1 e a aceleração foi calculada com base na variação de velocidade registrada; foi também obtida a inclinação da via, calculada pela variação da altitude e deslocamento do veículo.

Por não contar com equipamento específico para este fim, a inclinação das vias percorridas foi calculada a partir da variação de altitude registrada pelo receptor

GPS, considerando os cinco segundos anteriores, sendo por fim convertida em radianos para aplicação na equação do VSP.

Tabela 6 - Valores utilizados no cálculo de VSP – baseados em Zhai *et al.* (2008).

Variável		Valor
Velocidade (medida)	v	em m/s
Aceleração (calculada)	a	em m/s^2
Gravidade	g	$9,81 m/s^2$
Inclinação da via (calculada)	ϕ	em radianos
Coeficiente de resistência à rolagem	ψ	0,092
Termo do Coeficiente de arrasto	ζ	$0,00021 m^{-1}$

Após processados, o total de dados válidos na primeira fase do experimento, de aproximadamente 294 horas, resultou em uma soma de 10308 microviagens com duração média de 103 segundos (para Lai *et al.*, 2012, duração média de 85 segundos), velocidade média de 15,3km/h e com a distribuição de VSP conforme mostra a Figura 21:

Figura 21 - Distribuição de VSP para o total de dados adquiridos na fase 1.

O cálculo dos valores de VSP para a amostra total de dados é importante para poder compará-los com os valores encontrados na análise isolada dos diversos tipos de vias individualmente, que serão apresentados posteriormente. Para a amostra total de dados a faixa de valores possíveis de VSP foi escolhida de -30 a 30kW/t por

representar 99,7% das microviagens adquiridas (de -20 a 20kW/t representa 99,5%). Para as distribuições de VSP dos trechos menores (segmentos da amostra total, selecionados a partir do trajeto completo, para representar diferentes condições de operação, no item 4.3), essa faixa será reduzida para -20 a 20kW/t, que em média representa 99,8% das microviagens, já que esses trechos não apresentam a mesma variação dos dados de distribuição de VSP como o trajeto completo. A partir deste ponto as faixas de VSP serão mostradas nos gráficos e tabelas de forma adimensional (unidade kW/t) para simplificar a apresentação.

A distribuição de VSP para a amostra total de dados da primeira fase resultou em um grande percentual de valores iguais a zero, 37%, o que representa o momento em que o veículo está com velocidades e acelerações muito baixas (aproximadamente iguais a zero) ou não está em movimento, o que de certa forma é esperado para a operação de um ônibus urbano.

A Tabela 7 mostra os valores utilizados na construção do gráfico da Figura 21, porém em grupos de 10 classes de VSP, com exceção do zero, mostrado isoladamente, para possibilitar uma análise mais precisa dos resultados de VSP.

Tabela 7 - Distribuição VSP para a amostra total de dados da fase 1.

Faixas VSP	Distribuição
-30 a -21	0,2%
-20 a -11	2,3%
-10 a -1	18,9%
0	37,0%
1 a 10	39,3%
11 a 20	2,3%
21 a 30	0,0%

Tanto na Figura 21 quanto na Tabela 7 é possível notar a tendência maior de aceleração ($VSP > 0$) do que de desaceleração ($VSP < 0$); o veículo permanece 21,4% do tempo desacelerando e 41,6% do tempo acelerando. Esta diferença, como será mostrado posteriormente, impacta diretamente nas emissões de poluentes, já que valores de VSP positivos resultarão em maiores emissões de poluentes e maior

consumo de combustível do que valores iguais ou menores que zero, como demonstrado por Jimenez-Palacios (1999) e ilustrados nas Figuras 8 e 9 do item 2.3.

Para a construção dos ciclos de condução foi utilizada a metodologia proposta por Lai *et al.* (2012), descrita no item 2.2.5, pois considera parâmetros relacionados a emissões através da utilização do VSP, onde cada microviagem tem seus valores de VSP comparados com a amostra total de microviagens para testar sua similaridade através do RMSE e assim são selecionadas para formar o ciclo de condução com a duração escolhida previamente, de 20 minutos neste estudo e usualmente encontrada na literatura (SAE, 2002).

Além disso, essa metodologia é aplicada em um estudo realizado com objetivos e em condições muito semelhantes aos propostos no presente trabalho, que é a construção de ciclos de condução para ônibus urbanos focada nas emissões de poluentes.

De forma resumida, a sequência utilizada para a seleção das microviagens para construção dos ciclos pode ser observada na Figura 22, baseada na proposta de Lai *et al.* (2012).

Figura 22 - Fluxograma para seleção de microviagens segundo Lai *et al* (2012).

O tempo total de aproximadamente 20 minutos (duração usual de ciclos de condução na literatura, Dai *et al.*, 2008) foi escolhido para a construção do ciclo de condução do experimento. Desta forma, agrupando todas as microviagens por ordem crescente de RMSE e usando somente esse critério, elaborou-se o ciclo de condução para o conjunto total de dados do trajeto completo, que pode ser visto na Figura 23.

O ciclo de condução é formado por microviagens inteiras com sua duração mais próxima possível dos 20 minutos inicialmente estipulados. Se ao adicionar uma nova microviagem ao ciclo esse tempo for superado, é feita uma avaliação para verificar qual condição resulta em uma duração mais próxima da meta, com ou sem esta última microviagem.

Figura 23 - Ciclo de condução do trajeto completo na fase 1 (Ciclo 01) - considerando somente RMSE das microviagens.

A partir do ciclo de condução construído na Figura 24 (ciclo 01), verificou-se que com auxílio dos valores de RMSE foram selecionadas microviagens com percentual de tempo parado muito próximos da média global, mas com duração maior do que a média, de aproximadamente 24,7% e 216 segundos respectivamente, sendo que os valores médios da primeira fase são de 24,6% (média ponderada) e 103 segundos.

A Tabela 8 mostra para ciclo 01 o resumo das características das microviagens selecionadas. A coluna “sequência” mostra em qual posição a microviagem foi classificada por valores de RMSE, em relação a toda a amostra de microviagens obtidas durante o experimento.

Tabela 8 - Resumo das microviagens utilizadas na construção do ciclo 01.

Sequência	Arquivo	Vel. Média km/h	Duração MV s	Tempo parado s	%	RMSE
1	VBOX_343_MV_54	27,1	388	101	26,0%	0,0051
2	VBOX_472_MV_33	16,3	219	40	18,3%	0,0056
3	VBOX_291_MV_34	16,4	162	38	23,5%	0,0059
4	VBOX_502_MV_123	18,6	182	45	24,7%	0,0061
5	VBOX_396_MV_27	18,4	114	31	27,2%	0,0062
6	VBOX_350_MV_34	17,5	230	66	28,7%	0,0063
Média		19,1	215,8	53,5		
Desvio Padrão		4,1	94,1	26,1		
Soma			1295	321	24,8%	

Como foram selecionadas microviagens com duração média aproximada de 216 segundos, o ciclo 01 foi formado por seis microviagens com tempo total pouco acima da meta estimada inicialmente (20 minutos), totalizando 1295 segundos (21 minutos e 35 segundos), pois as microviagens foram utilizadas integralmente (sem interrupções) na composição do ciclo de condução.

O gráfico da Figura 24 apresenta as distribuições de VSP para o ciclo 01 e para a amostra total de dados (Total), onde é possível verificar a grande semelhança entre os valores resultantes da seleção das microviagens através do método proposto por Lai *et al.* (2012). A correlação entre ambas as distribuições de VSP é de 99,87%.

Figura 24 - Histograma da distribuição de VSP para o ciclo 01 e a amostra total de dados.

A partir da construção do primeiro ciclo de condução, foi desenvolvido o gráfico da Figura 25, que ordena todas as microviagens obtidas por ordem crescente de RMSE e mostra a proporção de tempo parado correspondente à cada microviagem. Em geral, as microviagens com percentual de tempo parado mais próximos à média (aprox. 28%) tiveram os menores valores de RMSE.

Figura 25 - Comparação de tempo parado x duração das microviagens classificadas em ordem crescente de RMSE – fase 1.

Desta forma, o comparativo apresentado nas Figuras 24 e 25 reforça que a aplicação do método de Lai *et al.* (2012) neste trabalho é capaz de selecionar as microviagens mais semelhantes à amostra que se tem como referência (em termos de distribuição de VSP).

4.2 CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DO CICLO DE CONDUÇÃO 02

A metodologia proposta por Lai *et al.* (2012) foi combinada com a distribuição do percentual de tempo parado observado na amostra total, com o intuito de aumentar a semelhança das microviagens escolhidas para a construção do ciclo para este conjunto de dados.

O gráfico da Figura 26 mostra para o conjunto total de dados da fase 1 a distribuição de percentual de tempo parado medido por microviagem. Ou seja, neste gráfico está sendo mostrado o total de microviagens existentes para as faixas de percentual de tempo parado escolhidas: [0;25%], [25%;50%], [50%;75%] e [75%;100%].

Figura 26 - Faixas de percentual de tempo parado por microviagem - Amostra de dados da fase 1.

Desta forma, propõe-se adicionar ao método de seleção um critério que analisa e considera também a composição das microviagens com relação ao tempo parado, a partir da distribuição de tempo parado apresentada na Figura 26, buscando construir um ciclo de condução mais representativo da amostra total de dados.

Além disso, para o desenvolvimento do segundo ciclo de condução foi incluída uma restrição para a duração máxima das microviagens selecionadas, que foi limitada a no máximo 20% da duração pretendida para o ciclo final de 20 minutos (portanto, 240 segundos), e assim permitir maior quantidade de microviagens na formação do ciclo.

Para selecionar as microviagens para a composição deste ciclo 02, calculou-se o valor de RMSE para distribuição de VSP para cada microviagem, ordenando esse resultado de forma crescente. Em seguida foram procuradas microviagens com a duração máxima definida de 240 segundos e que tivessem distribuição de tempo parado dentro das faixas de percentual de tempo parado estabelecidas, somando suas durações até que atingissem o valor próximo à distribuição de tempo parado da amostra total. O algoritmo básico desta proposta de seleção de microviagens está mostrado na Figura 27.

Figura 27 - Fluxograma para seleção de microviagens considerando duração máxima 240s e proporção de tempo parado pré-definindo.

A partir das premissas descritas anteriormente, foi elaborado o segundo ciclo de condução da amostra total de dados (ciclo 02), mostrado na Figura 28.

Figura 28 - Ciclo 02 formado por microviagens selecionadas pelo VSP e percentual de tempo parado - ordenadas por RMSE crescente.

O ciclo 02 foi composto por 10 microviagens com velocidade média 14,5km/h, duração total de 1251 segundos e distribuição de tempo parado muito semelhante ao apresentado na Figura 26, resumido na coluna distribuição amostra total, conforme mostrado na Tabela 9.

Tabela 9 - Distribuição de tempo parado das microviagens do ciclo 02.

Faixas de percentual de tempo parado	Soma duração Microviagens	Distribuição ciclo 02	Distribuição Amostra Total
● 0 - 25% ●	720	58%	58%
○ 25% - 50% ●	327	26%	25%
○ 50% - 75% ●	142	11%	12%
○ 75% - 100% ●	62	5%	5%
Total	1251		

As características das microviagens selecionadas, bem como a ordem na qual elas estão apresentadas no ciclo são mostradas na Tabela 10.

Tabela 10 - Características das microviagens que compõe o ciclo 02.

Sequência	Arquivo	Vel. Média	Duração microviagem	Tempo parado		RMSE
		km/h	s	s	%	
2	VBOX_472MV_33	16,3	219	40	18,3%	0,0056
3	VBOX_291MV_34	16,4	162	38	23,5%	0,0059
4	VBOX_502MV_123	18,6	182	45	24,7%	0,0061
5	VBOX_396MV_27	18,4	114	31	27,2%	0,0062
8	VBOX_333MV_50	22,5	128	39	30,5%	0,0068
13	VBOX_336MV_160	13,4	85	27	31,8%	0,0070
17	VBOX_275MV_37	14,0	157	25	15,9%	0,0072
3801	VBOX_463MV_52	8,9	33	17	51,5%	0,0236
3997	VBOX_374MV_25	12,6	109	56	51,4%	0,0243
8785	VBOX_300MV_203	4,0	62	48	77,4%	0,0581
Média		14,5	125,1	36,6		
Desvio padrão		5,3	56,7	11,7		
Soma			1251	366	29,3%	

Com as restrições adicionais definidas para a seleção (tempo parado por microviagem e duração máxima das microviagens), foram escolhidas mais microviagens para formar o ciclo 02 em comparação com o ciclo 01.

Figura 29 - Comparativo de distribuição de VSP para ciclo 02 e amostra total (Total).

Entretanto, as microviagens selecionadas não foram necessariamente as mais semelhantes em relação à amostra total de dados, o que pode ser notado na coluna “sequência” da Tabela 10 (classificação de acordo com valores de RMSE) e que

também pode ser verificado na Figura 29, que compara a distribuição de VSP entre o total de dados e o ciclo 02, notadamente menos semelhante à distribuição de VSP do ciclo 01 e total, mostrada na Figura 24.

A Tabela 11 mostra um comparativo das distribuições de VSP dos ciclos 01 e 02, onde é possível verificar que a proposta de seleção de microviagens testada com o ciclo 02 mostra-se menos adequada, em termos de semelhança da distribuição de VSP, do que a metodologia apresentada por Lai *et al.* (2012).

Tabela 11 - Resumo comparativo entre as distribuições de VSP para os ciclos 01, 02 e o total de dados adquiridos.

Faixas de VSP	Distribuições			Comparativos	
	Ciclo 01	Ciclo 02	Total	$\Delta_{\text{ciclo 01 - total}}$	$\Delta_{\text{ciclo 02 - total}}$
-20 a -11	1,5%	1,8%	2,3%	-0,9%	-0,5%
-10 a -1	20,6%	18,5%	18,9%	1,7%	-0,4%
0	37,3%	41,4%	37,0%	0,3%	4,4%
1 a 10	38,1%	36,4%	39,3%	-1,2%	-2,9%
11 a 20	2,5%	1,7%	2,3%	0,2%	-0,6%

Em resumo, os ciclos de condução 01 e 02 são diferentes entre si e também diferem da amostra total de dados, conforme mostrado na Tabela 12. O método de seleção das microviagens impactou diretamente em indicadores importantes como a velocidade e duração média e também nos valores de tempo parado e duração média das microviagens escolhidas, o que consequentemente influencia os resultados de estimativas de emissões de poluentes.

Tabela 12 - Resultados comparativos ciclos 01, 02 e Total.

	Ciclo 01	Ciclo 02	Total
Vel.Média, km/h	19,2 ± 4,1	14,5 ± 5,3	15,3 ± 9,6
Duração total do ciclo, s	1295	1251	-
Tempo parado no ciclo, s	321	366	-
Percentual de tempo parado, %	24,8%	29,3%	24,6%
Duração média das microviagens, s	215,8	125,1	102,7
Nº de microviagens no ciclo	6	10	-

Apesar da maior diferença da velocidade média em relação à amostra total e do menor número de microviagens que compõem o ciclo 01, ao verificar a distribuição de velocidades (Figura 30(a)), este ciclo é mais semelhante ao total de observações nas velocidades baixas e intermediárias, que têm a maior frequência, enquanto o ciclo 02 é mais parecido nas altas velocidades. Já para a distribuição de acelerações ambos os ciclos são bastante semelhantes à amostra total de dados (Figura 30(b)).

(a)

(b)

Figura 30 - Distribuição de velocidade (a) e aceleração (b) para os ciclos 01, 02 e amostra total.

Além disso, o ciclo 01 consegue representar mais adequadamente a “compactação” do total de dados adquiridos em relação à distribuição de VSP conforme mostrado anteriormente.

Uma vez que a distribuição de VSP é uma das referências utilizadas para a aplicação de métodos de estimativa de emissões, valida-se que a metodologia utilizada para selecionar as microviagens proposta por Lai *et al.* (2012) consegue resultados semelhantes à amostra total de dados. Desta forma, para os trechos extraídos do trajeto completo de testes, que serão analisados no próximo capítulo, será aplicada esta metodologia.

4.3 ANÁLISE DE VSP E CONSTRUÇÃO DE CICLOS POR TRECHO

Após a análise dos resultados e construção de ciclos de condução para a amostra total de dados do experimento, foram selecionados trechos (que podem ser uma única via ou sequência de vias) que pudessem representar condições de operação e características geométricas diversas. A Tabela 13 mostra um resumo das informações básicas dos trechos selecionados para o estudo.

Tabela 13 – Informações básicas das vias selecionadas para análise individual.

Trecho	Vias	Características	Extensão km	Velocidade Máxima Permitida km/h	Velocidade média km/h	Duração Média Microviagem s	Tempo médio parado na microviagem s %	
A	R. Antonio Doll de Moraes / Av. Conceição / Av. Engenheiro Armando de Arruda Pereira (São Paulo)	Via de mão dupla com duas faixas de tráfego compartilhado em cada sentido separadas por corredor de circulação exclusiva de ônibus (veículo em testes não circulou pelo corredor).	4,9	60	16,1	80,4	12,6	15,7%
B	Av. Prestes Maia / Av. do Taboão - (São Bernardo do Campo/Diadema)	Via de mão dupla com duas faixas de tráfego compartilhado em cada sentido separadas por tachões ("tartarugas").	5,0	60	13,3	84,0	21,5	25,6%
C	Av. do Cursino (São Paulo)	Via de mão dupla com uma a duas faixas de tráfego compartilhado em cada sentido separadas por faixa.	6,8	60	15,6	87,7	15,8	18,0%
D	Av. José Cabalero / R. Cel. Alfredo Flaquer / Av. Santos Dumont / R. Giovanni Battista Pirelli / Av. João Ramalho (Santo André)	Via de mão dupla com três faixas de tráfego compartilhado em cada sentido separadas por faixa.	7,4	60	18,7	98,8	20,1	20,3%
E	Av. Engenheiro Armando de Arruda Pereira / Av. Dr. Hugo Boelchi / Av. Jabaquara / R. Domingos de Moraes (São Paulo)	Via de mão dupla com três a quatro faixas de tráfego compartilhado em cada sentido separadas por canteiro central	5,6	60	11,6	81,3	33,1	40,7%

Os trechos foram selecionados de forma que pudessem representar condições de operação diversas, com características geométricas distintas e com diferentes indicadores tais como extensão, velocidade média, tempo médio parado e duração média das microviagens.

O tráfego nas vias não foi medido ou avaliado diretamente, porém está sendo considerado indiretamente a partir dos indicadores citados e da avaliação dos trechos observados em períodos de pico (das 07 às 10h, pico da manhã – das 17 às 20h pico da tarde) e fora de pico de trânsito (demais horários). Todos os trechos selecionados para análise detalhada foram percorridos pelo ônibus do experimento

em ambas as condições de tráfego e seus percentuais podem ser verificados na Tabela 14.

Tabela 14 – Distribuição das observações segundo os horários de pico e fora de pico nos trechos percorridos durante o experimento.

Trecho	Pico	Fora Pico
A	40,3%	59,7%
B	36,4%	63,6%
C	34,3%	65,7%
D	73,3%	26,7%
E	44,8%	55,2%
Total	48,2%	51,8%

Conforme justificado anteriormente (item 3.1), não foi possível percorrer corredores exclusivos com o ônibus de testes e, desta forma, as vias que possuem tais corredores foram selecionadas para análise a fim de verificar o impacto destes na circulação dos ônibus nas faixas compartilhadas com os demais veículos.

Para a análise dos trechos selecionados foram calculados os valores de VSP e sua distribuição e elaborados ciclos de condução para que estes trechos possam ser comparados e por fim terem os valores de emissões de poluentes estimados.

4.3.1 Trecho A – Rua Antonio Doll de Moraes (Diadema), avenidas Conceição (São Paulo) e Eng. Armando de Arruda Pereira

O trecho A foi composto a partir do percurso formado pelas vias rua Antônio Doll de Moraes e avenidas Conceição e Engenheiro Armando de Arruda Pereira, sentido A-B da Figura 31, nos municípios de Diadema e São Paulo, totalizando 4,9km de extensão. Este trecho teve 30.215 segundos (aprox. 504 minutos, em 376 microviagens) de dados adquiridos durante o experimento.

Figura 31 - Trecho A - R. Antonio Doll de Moraes / Av. Conceição / Av. Engenheiro Armando de Arruda Pereira (Diadema / São Paulo) – Percorrida no sentido A-B.

A maior parte do trajeto é composta de vias de mão dupla com duas faixas de rolamento em cada sentido com separação por corredor de circulação exclusiva de ônibus, conforme detalhe no canto direito inferior da Figura 31 e Figura 32 a seguir.

Figura 32 - Imagem do trecho A, na av. Eng. Armando de Arruda Pereira com corredor central de circulação exclusiva de ônibus (Google Street View).

A execução do experimento neste trecho ocorreu em 40,3% do tempo nos horários de pico e os resultados dos principais indicadores de deslocamento para os horários de pico e fora de pico foram muito diferentes, porém coerentes com a expectativa. A Tabela 15 mostra o resumo de ambas as condições.

Tabela 15 – Indicadores básicos das microviagens do trecho A para horários de pico e fora de pico.

	Velocidade Média	Duração média microviagem	Tempo parado médio	
	km/h	s	s	%
Pico	13,0	61,1	13,2	21,6%
Fora Pico	19,6	102,0	12,0	11,8%
Total Pico e Fora pico	16,1	80,4	13,0	16,2%

Os dados obtidos durante o horário de pico mostram valores de velocidade média 34% inferiores àqueles registrados fora do pico, microviagens 40% mais curtas e maior tempo parado proporcionalmente. Esses resultados permitem concluir que, para esse trecho, há uma grande variação das condições de tráfego nos períodos do dia analisados.

Considerando que para o trecho A existem diferenças de tráfego que impactam de forma significativa principalmente nos resultados de velocidade média e duração das

microviagens, a distribuição de VSP para o trecho A foi feita de forma separada para os horários de pico e fora de pico, conforme a Figura 33.

Figura 33 - Distribuição de VSP para o trecho A nos horários de pico e fora de pico.

Os resultados mostrados no gráfico da distribuição de VSP da Figura 33 reforçam a grande diferença de tempo parado para as condições de pico e fora de pico, sendo que praticamente toda esta diferença está distribuída nos valores de VSP positivos (veículo acelerando) para o período fora de pico. Por outro lado, o tempo em que o veículo permanece desacelerando (VSP negativo) durante os períodos de pico e fora de pico são semelhantes, conforme resultados detalhados na Tabela 16.

Tabela 16 – Distribuição das faixas de VSP para o trecho A nos horários de pico e fora de pico.

Faixas de VSP	Pico	Fora Pico
-20 a -11	2%	4%
-10 a -1	19%	20%
0	40%	23%
1 a 10	37%	48%
11 a 20	2%	4%

Da mesma forma que a distribuição de VSP, as grandes diferenças observadas nos deslocamentos do veículo de testes nos períodos de pico e fora de pico considerados tornam mais adequado que seja construído um ciclo de condução para cada período.

4.3.1.1 Ciclos de condução para o trecho A

O ciclo de condução para o trecho A nos períodos de pico, mostrado na Figura 34, foi formado por 12 microviagens com duração média de 102 segundos, com aproximadamente 30,4% de tempo parado e velocidade média de $16,7 \pm 16,2$ km/h (coeficiente de variação, $cv = 0,97$).

Figura 34 - Ciclo de condução para o trecho A nos horários de pico.

A Tabela 17 mostra a comparação das faixas de VSP para o trecho A nos horários de pico, considerando a amostra total para este trecho e período, e o ciclo construído para essa condição, onde é possível verificar a semelhança dos resultados.

Tabela 17 - Distribuição das faixas de VSP para os horários de pico no trecho A, na amostra total e no ciclo construído.

Faixas de VSP	Total	Ciclo
-20 a 11	2,0%	1,2%
-10 a 1	18,8%	19,4%
0	39,9%	41,6%
1 a 10	36,8%	36,2%
11 a 20	2,2%	1,6%

Já para os horários fora de pico, o ciclo de condução mostrado na Figura 35, apresenta velocidade média foi $25,2 \pm 16,6\text{km/h}$ ($cv = 0,66$) e a duração média das microviagens foi de 247 segundos com 11,3% de tempo parado, com um total de cinco microviagens.

Figura 35 - Ciclo de condução para o trecho A fora dos horários de pico.

Para verificar a representatividade do ciclo em termos de VSP, a Tabela 18 abaixo compara as distribuições de VSP para a amostra de dados do trecho A fora do horário de pico e para o ciclo de condução construído para este trecho neste período.

Tabela 18 - Distribuição das faixas de VSP para os horários fora de pico no trecho A, na amostra total e no ciclo construído.

Faixas de VSP	Total	Ciclo
-20 a 11	4,1%	4,4%
-10 a 1	20,1%	19,6%
0	22,9%	21,6%
1 a 10	48,1%	50,1%
11 a 20	4,0%	3,7%

Com base nos dados gerais de deslocamento do trecho A para os horários de pico e fora de pico e nos ciclos de condução mostrados nas Figuras 34 e 35, verifica-se nos horários de pico a tendência de maior tempo parado e maior variabilidade da velocidade.

4.3.2 Trecho B – Avenidas Prestes Maia (Diadema) e Taboão (São Bernardo do Campo)

O trecho B foi formado pelo percurso entre os pontos A e B da Figura 35, percorrido nas avenidas Prestes Maia, em Diadema, e Taboão, em São Bernardo do Campo, com extensão de 5km. Durante o experimento o veículo de testes circulou em ambos os sentidos e armazenou dados de 58.611 segundos (aprox. 971 minutos, em 698 microviagens) de movimentação neste trecho.

Figura 36 - Trecho B - Av. Prestes Maia / Av. do Taboão - (São Bernardo do Campo/Diadema) – Percorrida em ambos os sentidos.

O trecho B tem em sua extensão a predominância de duas faixas de rolamento em cada sentido, separadas por tachões (conhecidos como “tartarugas”), mostrado na Figura 37, o que reduz a capacidade e, portanto, a velocidade da via.

Figura 37 - Imagem da Avenida do Taboão, em São Bernardo do Campo, parte do trecho B. Separação por “tartarugas” impede ultrapassagens pela contramão (Google Street View).

Em 36,4% do tempo o trecho B foi percorrido no horário de pico e, de forma geral, os indicadores de velocidade média e tempo parado não variaram consideravelmente durante os períodos do dia, apresentando um aumento de 7% na duração média das microviagens para os períodos fora do pico, indicando que, para esse trajeto, não existem grandes diferenças de tráfego durante os diversos períodos do dia. Os dados-resumo para os períodos nas condições de pico e fora de pico para o trecho B podem ser verificados na Tabela 19.

Tabela 19 - Indicadores básicos das microviagens do trecho B para horários de pico e fora de pico.

	Velocidade Média	Duração média microviagem	Tempo parado médio	
	km/h	s	s	%
Pico	13,3	80,3	20,7	25,8%
Fora Pico	13,4	86,2	22,0	25,5%
Total Pico e Fora pico	13,3	84,0	21,5	25,6%

Em concordância com as informações básicas fornecidas na tabela anterior, verifica-se através das distribuições de VSP para os períodos de pico e fora de pico, apresentadas na Figura 37, grande semelhança entre as duas condições.

Figura 38 - Distribuição de VSP para o trecho B nos horários de pico e fora de pico.

Considerando que a variação de tráfego nas condições de pico e fora de pico para o trecho B mapeado resulta em impacto reduzido para as distribuições de VSP e também nos indicadores gerais de deslocamento do veículo de testes, foi desenvolvido para este trecho somente um ciclo de condução que pudesse representar a variação de velocidade de forma confiável, seguindo a metodologia desenvolvida por Lai *et al.* (2012).

4.3.2.1 Ciclo de condução para o trecho B

O único ciclo desenvolvido para o trecho B, mostrado na Figura 39, foi composto por oito microviagens de duração média de 136 segundos, com média de 26,5% de tempo parado e velocidade média de $17,1 \pm 15,7\text{km/h}$ ($cv = 0,92$).

Figura 39 - Ciclo de condução para o trecho B

A Tabela 20 a seguir mostra a comparação das faixas de VSP para o trecho B, considerando a amostra total para este trecho e o ciclo construído para essa condição, onde é possível verificar a semelhança dos resultados.

Tabela 20 - Distribuição das faixas de VSP para o trecho B, na amostra total e no ciclo construído.

Faixas de VSP	Total	Ciclo
-20 a 11	2,6%	2,7%
-10 a 1	18,4%	18,0%
0	38,3%	38,3%
1 a 10	37,5%	39,1%
11 a 20	3,0%	2,0%

4.3.3 Trecho C – Avenida do Cursino (São Paulo)

A Figura 40 mostra o trajeto entre os pontos A e B, na avenida do Cursino (São Paulo), que compõe o trecho C do experimento. Este trecho foi percorrido somente no sentido A-B, que soma 6,8km de extensão. Para este trecho foram adquiridos 49.260s (821 minutos em 562 microviagens) de dados de deslocamento.

Figura 40 - Trecho C - Av. do Cursino (São Paulo) – Percorrida somente no sentido A-B.

A avenida do Cursino apresenta na maior parte de sua extensão duas faixas de rolamento em cada sentido sem separação física, Figura 41(a), porém alguns segmentos possuem canteiro central, como pode ser visto na Figura 41(b).

(a)

(b)

Figura 41 - Imagem da av. do Cursino, trecho C, em dois pontos distintos (Google Street View).

O trecho C foi percorrido fora do horário de pico na maior parte do tempo, 65,7%, porém os resultados das medições de velocidade do ônibus de testes em ambos os períodos (pico e fora de pico) não apresentaram grandes variações. A Tabela 21 a seguir mostra que, diferente do esperado, a velocidade média para o horário de pico, de 17,2km/h, é superior à registrada fora do pico em 15,1% e com variação da duração média de 10%.

Tabela 21 - Indicadores básicos das microviagens do trecho C para horários de pico e fora de pico.

	Velocidade Média	Duração média microviagem	Tempo parado médio	
	km/h	s	s	%
Pico	17,2	81,7	16,3	20,0%
Fora Pico	14,6	91,1	15,5	17,0%
Total Pico e Fora pico	15,6	87,7	15,8	18,0%

Desta forma, as distribuições de VSP para os horários de pico e fora de pico para o trecho C, mostradas na Figura 42, apresentam resultados semelhantes. Em cada caixa de VSP verificou-se pequenas diferenças, o que também pode ser verificado na Tabela 22.

Figura 42 - Distribuição de VSP para o trecho C nos horários de pico e fora de pico.

Assim, da mesma maneira que o trecho B, como ambos os horários não apresentaram grandes diferenças nos indicadores de deslocamento e VSP, conclui-se que para esse trecho não são verificadas grandes variações de condições de tráfego ao longo do dia e, desta forma, pode ser elaborado um único ciclo de condução para representar as variações de velocidade do percurso no tempo.

Tabela 22 - Distribuição das faixas de VSP para o trecho C nos horários de pico e fora de pico.

Faixas de VSP	Pico	Fora Pico
-20 a -11	3%	2%
-10 a -1	19%	21%
0	32%	32%
1 a 10	43%	44%
11 a 20	2%	2%

4.3.3.1 Ciclo de condução para o trecho C

Para o trecho C, na Figura 43, o ciclo de condução desenvolvido foi formado por nove microviagens de duração média de 123 segundos, em um total de 1109, com uma proporção de tempo parado de 21,1%. A velocidade média resultante neste ciclo de condução foi de $18,7 \pm 14,9\text{km/h}$ ($cv = 0,80$).

Figura 43 - Ciclo de condução para o trecho C.

Para verificar a representatividade do ciclo em termos de VSP, a Tabela 23 compara as distribuições de VSP para a amostra de dados do trecho C e para o ciclo de condução construído para este trecho.

Tabela 23 - Distribuição das faixas de VSP para o trecho C, na amostra total e no ciclo construído.

Faixas de VSP	Total	Ciclo
-20 a 11	2,4%	1,6%
-10 a 1	20,1%	22,5%
0	32,0%	31,0%
1 a 10	43,7%	43,5%
11 a 20	1,7%	1,4%

Figura 45 - Imagem do trecho D, Av. Giovanni Battista Pirelli (Google Street View).

O experimento no trecho D foi realizado predominantemente nos horários de pico, em aproximadamente 73% do total, e o resumo dos dados deste trajeto para os diferentes horários foram condizentes com a expectativa. Nos horários de pico a velocidade média foi 20% inferior, as microviagens foram 11,1% mais curtas e o tempo parado proporcionalmente 35% maior, em relação aos horários fora do pico. A Tabela 24 mostra o resumo dessas informações para os diferentes horários e para o total de dados adquiridos.

Tabela 24 - Indicadores básicos das microviagens do trecho D para horários de pico e fora de pico.

	Velocidade Média	Duração média microviagem	Tempo parado médio	
	km/h	s	s	%
Pico	17,6	95,8	21,0	21,9%
Fora Pico	21,9	107,8	17,5	16,2%
Total Pico e Fora pico	18,7	98,8	20,1	20,3%

Além dos dados apresentados anteriormente, que mostram as diferenças dos horários de pico e fora de pico, as distribuições de VSP para estes horários no trecho D, apresentada na Figura 46, também confirma o maior percentual de tempo parado para o horário de pico, já que os valores de VSP iguais a zero são de 34% e 26% respectivamente para pico e fora de pico.

Em ambas as condições – pico e fora de pico –, apesar do grande percentual de tempo parado, o veículo permanece a maior parte do tempo acelerando, ou seja, com valores de VSP maiores que zero (43% e 50% respectivamente). O percentual do tempo em que o veículo tem VSP menor que zero é muito semelhante para as duas situações (23% e 24%).

Figura 46 - Distribuição de VSP para o trecho D nos horários de pico e fora de pico.

Com a identificação de que os diferentes horários impactam consideravelmente nas condições de tráfego e consequentemente nos dados de deslocamento para o trecho D, a determinação de um ciclo de condução para cada período é mais adequada para este trajeto.

4.3.4.1 Ciclos de condução para o trecho D

A Figura 47 mostra o ciclo de condução para o trecho D nos períodos de pico. Este ciclo foi formado a partir de 13 microviagens de duração média de 99 segundos, com tempo parado médio de 26,2% e velocidade média de $22 \pm 19,8\text{km/h}$ ($cv = 0,90$).

Figura 47 - Ciclo de condução para o trecho D nos horários de pico.

A Tabela 25 a seguir mostra a comparação das faixas de VSP para o trecho D nos horários de pico, considerando a amostra total para este trecho e período, e o ciclo construído para essa condição, onde é possível verificar a semelhança dos resultados.

Tabela 25 - Distribuição das faixas de VSP para os horários de pico no trecho D, na amostra total e no ciclo construído.

Faixas de VSP	Total	Ciclo
-20 a 11	2,6%	2,4%
-10 a 1	19,6%	20,3%
0	34,3%	35,4%
1 a 10	40,7%	40,0%
11 a 20	2,6%	1,9%

Já para os períodos fora de pico, o ciclo de condução mostrado na Figura 48 foi composto por nove microviagens com duração média de 135 segundos e 14,7% de tempo parado médio. A velocidade média registrada para esse ciclo foi de $26,6 \pm 19,4$ km/h ($cv = 0,73$).

Figura 48 - Ciclo de condução para o trecho D fora dos horários de pico.

Conforme os dados comparativos entre ambos os ciclos, a condição de pico mostra maior variabilidade da velocidade.

Para verificar a representatividade do ciclo em termos de VSP, a Tabela 26 compara as distribuições de VSP para a amostra de dados do trecho D fora do horário de pico e para o ciclo de condução construído para este trecho neste período.

Tabela 26 - Distribuição das faixas de VSP para os horários fora de pico no trecho D, na amostra total e no ciclo construído.

Faixas de VSP	Total	Ciclo
-20 a 11	3,8%	5,4%
-10 a 1	19,9%	18,8%
0	26,3%	25,8%
1 a 10	46,0%	45,4%
11 a 20	3,6%	4,5%

4.3.5 Trecho E – Avenidas Eng. Armando de Arruda Pereira, Dr. Hugo

Beolchi, Jabaquara e Rua Domingos de Moraes (São Paulo)

A Figura 49 mostra o trecho E, percorrido somente no sentido A-B, que foi formado pelas avenidas Engenheiro Armando de Arruda Pereira, Dr. Hugo Beolchi, Jabaquara e rua Domingos de Moraes, em São Paulo. Para este trecho foram adquiridos 61.658 segundos de dados (aproximadamente 1028 minutos em 758 microviagens) durante o experimento com veículo de testes.

Figura 49 - Trecho E - Av. Engenheiro Armando de Arruda Pereira / Av. Dr. Hugo Beolchi / Av. Jabaquara / R. Domingos de Moraes (São Paulo) – Percorrida somente no sentido A-B.

O trajeto é praticamente uma grande avenida de 5,6km de extensão, porém com diversos nomes diferentes e que é formado em sua maioria por três e até quatro faixas de rolamento em cada sentido, com separação por canteiro central e velocidade máxima permitida de 60km/h. A Figura 50 mostra exemplo de via percorrida no trecho E.

Figura 50 - Imagem da Av. Jabaquara, que compõe o trecho E (Google Street View).

O trecho E foi percorrido nos horários de pico e fora de pico, que representaram 44,8% e 55,2% do total de dados adquiridos respectivamente. Este trecho foi o que apresentou maior diferença entre ambos os horários para os dados básicos de deslocamento e formação das microviagens, mostrando que o tráfego nas vias que compõem o trecho E é provavelmente o que possui a maior variação entre os horários do dia.

Para os horários de pico a velocidade média foi 34,3% inferior, as microviagens foram 18,5% mais curtas e observou-se proporcionalmente 37% a mais de tempo parado em relação aos horários fora do pico. Os dados básicos para essas comparações podem ser verificados na Tabela 27.

Tabela 27 - Indicadores básicos das microviagens do trecho E para horários de pico e fora de pico.

	Velocidade Média	Duração média microviagem	Tempo parado médio	
	km/h	s	s	%
Pico	9,2	73,0	34,9	47,8%
Fora Pico	14,0	89,6	31,2	34,8%
Total Pico e Fora pico	11,6	81,3	33,1	40,7%

A construção das distribuições de VSP para os horários pico e fora de pico, na Figura 51, mostra que, independente dos horários, o trecho E é o que possui a maior

concentração de valores de VSP iguais a zero em comparação com os demais trechos do experimento, conforme o comparativo resumido mostrado anteriormente na Tabela 13.

Figura 51 - Distribuição de VSP para o trecho E nos horários de pico e fora de pico.

Além disso, o impacto do tráfego do horário de pico na distribuição de VSP para o trecho E é o que se destaca mais, resultando em 61% do tempo valores iguais a zero em comparação aos 46% na condição fora de pico (redução de 25%). Para ambos os períodos o veículo passa tempo equivalente desacelerando ($VSP < 0$), porém nos horários fora de pico há maior concentração de VSP positivo, o que pode ser verificado na Tabela 28.

Tabela 28 - Distribuição das faixas de VSP para o trecho E nos horários de pico e fora de pico.

Faixas de VSP	Pico	Fora Pico
-20 a -11	1%	2%
-10 a -1	13%	17%
-	61%	46%
1 a 10	24%	34%
11 a 20	1%	1%

As diferenças observadas no deslocamento do veículo de testes para os horários de pico e fora de pico apresentados mostram que existem variações das condições de

tráfego muito importantes e que justificam a construção de dois ciclos de condução para o trecho E.

4.3.5.1 Ciclos de condução para o trecho E

O ciclo de condução para os horários de pico do trecho E, na Figura 52, foi desenvolvido a partir de dez microviagens com duração média de 118 segundos com 54,1% de proporção de tempo parado, o maior para todos os trechos e períodos analisados neste experimento. A velocidade média foi de $10,1 \pm 13,8$ km/h ($cv = 1,37$).

Figura 52 - Ciclo de condução para o trecho E nos horários de pico.

A Tabela 29 mostra a comparação das faixas de VSP para o trecho E nos horários de pico, considerando a amostra total para este trecho e período, e o ciclo construído para essa condição, onde é possível verificar a semelhança dos resultados.

Tabela 29 - Distribuição das faixas de VSP para os horários de pico no trecho E, na amostra total e no ciclo construído.

Faixas de VSP	Total	Ciclo
-20 a 11	1,0%	0,4%
-10 a 1	13,1%	14,7%
0	61,2%	62,2%
1 a 10	23,8%	21,8%
11 a 20	1,0%	0,8%

Para os horários fora de pico, o ciclo de condução mostrado na Figura 53 foi desenvolvido a partir de nove microviagens de duração média de 132 segundos e proporção de tempo parado de 35,5%. A velocidade média desenvolvida foi de $14,9 \pm 15,4\text{km/h}$ ($cv = 1,03$).

Figura 53 - Ciclo de condução para o trecho E fora dos horários de pico.

A Tabela 30 compara as distribuições de VSP para a amostra de dados do trecho E fora do horário de pico e para o ciclo de condução construído para este período e trecho.

Tabela 30 – Distribuição das faixas de VSP para os horários fora de pico no trecho E, na amostra total e no ciclo construído.

Faixas de VSP	Total	Ciclo
-20 a 11	1,7%	1,3%
-10 a 1	16,6%	18,0%
0	45,9%	46,9%
1 a 10	34,3%	32,6%
11 a 20	1,4%	1,3%

4.3.6 Síntese dos resultados – Construção dos ciclos de condução

Apesar da distribuição de VSP para todos os ciclos construídos serem sempre muito semelhantes às bases de cálculo, outros indicadores importantes são em sua maioria negligenciados pelo método de seleção e construção de ciclos de condução proposto por Lai *et al.* (2012) e aplicado neste trabalho.

Tal fato pode explicado pela seleção das microviagens ocorrer somente baseada na distribuição de VSP. Integrar a distribuição de velocidade e aceleração ao método pode contribuir para a ampliação da similaridade das microviagens em relação a outros indicadores do comportamento dinâmico do veículo.

Em geral, os valores de velocidade e duração média das microviagens selecionadas foram muito diferentes da referência, seja qual for o período ou o trecho analisado. Para os horários de pico, a velocidade média para os ciclos construídos foi de aproximadamente 20,1% maior do que a amostra total para o trecho e período, enquanto para duração das microviagens e proporção de tempo parado este aumento foi em média de 50,4% e 21,1% respectivamente. Os detalhes desta comparação podem ser verificados na Tabela 31.

Tabela 31 – Comparativo de resultados nos horários de pico para as amostras e ciclos.

Trecho	Configuração	Amostra de dados no pico			Ciclo de condução no pico		
		Velocidade média km/h	Duração média microviagem s	Tempo médio parado %	Velocidade média km/h	Duração média microviagem s	Tempo médio parado %
A		13,0	61,1	21,6%	16,7	102	30,4%
B*		13,3	80,3	25,8%	17,1	136	26,5%
C*		17,2	81,7	16,3%	18,7	123	21,1%
D		17,6	95,8	21,9%	22,0	99	26,2%
E		9,2	73,0	47,8%	10,1	118	54,1%

* Somente um ciclo de condução foi desenvolvido, independente do período, devido à semelhança dos resultados do pico e fora do pico

Para a condição fora dos horários de pico, a maior diferença entre a referência e os ciclos construídos também se deu na duração das microviagens, com divergência de 61,5% em média. Para a velocidade média, a diferença média em relação à amostra total foi de 22,4% enquanto que o resultado para o tempo médio parado foi o melhor obtido, com uma diferença em média igual a 8,7%, conforme a Tabela 32.

Tabela 32 – Comparativo de resultados fora dos horários de pico para as amostras e ciclos.

Trecho	Configuração	Amostra de dados fora do pico			Ciclo de condução fora do pico		
		Velocidade média km/h	Duração média microviagem s	Tempo médio parado %	Velocidade média km/h	Duração média microviagem s	Tempo médio parado %
A		19,6	102,0	11,8%	25,2	247	11,3%
B*		13,4	86,2	25,5%	17,1	136	26,5%
C*		14,6	91,1	17,0%	18,7	123	21,1%
D		21,9	107,8	16,2%	26,6	135	14,7%
E		14,0	89,6	34,8%	14,9	132	35,5%

* Somente um ciclo de condução foi desenvolvido, independente do período, devido à semelhança dos resultados do pico e fora do pico

Independente do trecho ou do período do dia, as diferenças encontradas nos indicadores pesquisados, resultantes da construção dos ciclos, não sugerem uma influência direta das características geométricas da via, apesar dos trechos D e E terem apresentado proporcionalmente as menores diferenças, provavelmente em função das condições de tráfego mais favoráveis.

Assim, verifica-se que ao priorizar estritamente a distribuição de VSP na escolha das microviagens o método utilizado resulta em valores divergentes para os demais indicadores do deslocamento. No entanto, se a construção de um ciclo de condução for motivada pela estimativa de emissões, os resultados obtidos serão adequados para este fim, uma vez que está mais correlacionada com o VSP do que com as demais variáveis.

5 ESTIMATIVA DE EMISSÕES

Com a conclusão da construção dos ciclos de condução e identificação das distribuições de VSP para os trechos selecionados, foi possível estimar as emissões de poluentes mais relevantes.

Na estimativa de emissões foram utilizados os fatores de emissões desenvolvidos para o MOVES (*Motor Vehicle Emission Simulator* – Simulador de emissões de veículos a motor), o sistema de modelagem de emissões de fontes móveis desenvolvido pela agência de proteção ambiental americana (EPA) que possui ampla aceitação no meio acadêmico e na prática profissional, e é a ferramenta oficial da EPA para estimativa de emissões nos Estados Unidos. No MOVES, cada caixa de VSP possui fatores de emissões padronizados para poluentes selecionados de diversos tipos de veículo, de acordo com a tecnologia de redução de emissões e ano de fabricação.

A base de dados para a elaboração das estimativas foi o relatório de desenvolvimento de taxas de emissões por veículos pesados para o simulador de emissões MOVES (*Development of Emission Rates for Heavy Duty Vehicles in the Motor Vehicle Emissions Simulator*, Estados Unidos, 2009). Esse relatório descreve detalhadamente os métodos para aquisição dos fatores de emissões para os principais poluentes produzidos por motores de veículos pesados utilizados no desenvolvimento do MOVES.

O documento mostra as classificações de veículos pesados incluídos no *software*, baseadas no peso bruto total (PBT), idade e ano-modelo e configuração veicular tais como caminhões MHD (*Medium heavy-duty* – veículo pesado-médio), HHD (*Heavy Heavy-Duty* – veículo pesado-pesado) e ônibus urbanos.

De acordo com a combinação desses fatores e das características do deslocamento do veículo, existem valores de emissões que foram originalmente medidos em equipamentos específicos e armazenados no *software* MOVES para a utilização na estimativa de emissões.

Segundo o procedimento adotado no MOVES, as variáveis velocidade, VSP e aceleração instantâneas combinadas formam o chamado modo de operação, ao qual estão associadas taxas de emissões de poluentes mais relevantes, de acordo com a classificação do veículo descrita anteriormente. Os modos de operação do MOVES estão apresentados na Tabela 33.

Tabela 33 - Definição dos modos de operação do MOVES, adaptado de Estados Unidos (2009).

Modo de operação	Descrição	VSP kW/t	Velocidade km/h	Aceleração m/s ²
0	Desacelerando / Freando			$a \leq -2$ ou (a_t, a_{t-1} e $a_{t-2} < 1$)
1	Parado / Marcha lenta		$v < 1$	
11	Locomoção sem esforço	$VSP < 0$	$0 \leq v < 40$	
12	Cruzeiro/Acelerando	$0 \leq VSP < 3$	$0 \leq v < 40$	
13	Cruzeiro/Acelerando	$3 \leq VSP < 6$	$0 \leq v < 40$	
14	Cruzeiro/Acelerando	$6 \leq VSP < 9$	$0 \leq v < 40$	
15	Cruzeiro/Acelerando	$9 \leq VSP < 12$	$0 \leq v < 40$	
16	Cruzeiro/Acelerando	$12 \leq VSP$	$0 \leq v < 40$	
21	Locomoção sem esforço	$VSP < 0$	$40 \leq v < 80$	
22	Cruzeiro/Acelerando	$0 \leq VSP < 3$	$40 \leq v < 80$	
23	Cruzeiro/Acelerando	$3 \leq VSP < 6$	$40 \leq v < 80$	
24	Cruzeiro/Acelerando	$6 \leq VSP < 9$	$40 \leq v < 80$	
25	Cruzeiro/Acelerando	$9 \leq VSP < 12$	$40 \leq v < 80$	
27	Cruzeiro/Acelerando	$12 \leq VSP < 18$	$40 \leq v < 80$	
28	Cruzeiro/Acelerando	$18 \leq VSP < 24$	$40 \leq v < 80$	
29	Cruzeiro/Acelerando	$24 \leq VSP < 30$	$40 \leq v < 80$	
30	Cruzeiro/Acelerando	$30 \leq VSP$	$40 \leq v < 80$	
33	Cruzeiro/Acelerando	$VSP < 6$	$80 \leq v$	
35	Cruzeiro/Acelerando	$6 \leq VSP < 12$	$80 \leq v$	
37	Cruzeiro/Acelerando	$12 \leq VSP < 18$	$80 \leq v$	
38	Cruzeiro/Acelerando	$18 \leq VSP < 24$	$80 \leq v$	
39	Cruzeiro/Acelerando	$24 \leq VSP < 30$	$80 \leq v$	
40	Cruzeiro/Acelerando	$30 \leq VSP$	$80 \leq v$	

O relatório da EPA apresenta para alguns tipos de veículos as taxas de emissões para os poluentes óxidos de nitrogênio (NO_x), material particulado com diâmetro médio menor que 2,5 micrones (MP2.5, soma de carbono elementar (EC) e orgânico(OC)), hidrocarbonetos (HC) e monóxido de carbono (CO). As estimativas de emissões foram realizadas com base nesses resultados.

Os resultados gráficos para as emissões apresentados na Figura 54 foram baseados em ensaios realizados com caminhões MHD, HHD e ônibus urbanos ano-modelo 2002 (padrão EPA'98 de controle de emissões, equivalente ao PROCONVE P5 ou Euro3), com idade entre 0 e 3 anos, com exceção dos valores de material particulado, que foram medidos somente nos veículos HHD de mesmo ano-modelo e idade. O relatório estabelece que para ônibus urbanos ano-modelo 2002, as emissões de material particulado devem ser consideradas como a metade das emissões oriundas de caminhões HHD.

(a)

(b)

Figura 54 - Amostras de fatores de emissões em g/h de NOx (a), HC (b), MP2.5 (c) e CO (d) para os modos de operação do MOVES (Estados Unidos, 2009).

(c)

(d)

Figura 53 (cont.) - Amostras de fatores de emissões em g/h de NO_x (a), HC (b), MP2.5 (c) e CO (d) para os modos de operação do MOVES (Estados Unidos, 2009).

Com base nos gráficos de emissões apresentados na Figura 54 e nos modos de operação identificados na Tabela 33, foram realizadas as estimativas de emissões para os ciclos de condução desenvolvidos para os trechos de A a E no item 4.3.

5.1 ESTIMATIVA DE EMISSÕES PARA OS CICLOS DE CONDUÇÃO DESENVOLVIDOS

Para possibilitar a estimativa de emissões, foram identificados os modos de operação correspondentes a cada segundo dos ciclos de condução desenvolvidos no item 4.3 conforme apresentado no documento publicado pela EPA (Estados Unidos, 2009). Os resultados podem ser visualizados na Tabela 34.

Tabela 34 - Modos de operação identificados para os ciclos de condução dos trechos A-E.

Modo de operação	Trecho A		Trecho B	Trecho C	Trecho D		Trecho E	
	Pico	Fora Pico			Pico	Fora Pico	Pico	Fora Pico
0	40	92	47	49	41	71	26	32
1	381	142	302	244	339	181	642	427
11	180	142	156	196	158	125	146	171
12	233	249	224	242	176	205	155	244
13	164	163	143	179	124	121	103	128
14	68	104	81	84	83	92	57	70
15	15	43	37	22	26	52	20	27
16	5	10	5	2	4	7	5	4
21	33	64	22	22	93	98	7	27
22	49	72	18	23	76	76	10	19
23	28	74	20	18	77	60	6	18
24	9	39	20	13	49	53	1	16
25	9	25	4	9	27	44	3	5
27	10	10	10	6	8	25	0	3
28	1	8	1	0	0	1	0	0
29	0	3	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0
33	0	0	0	0	0	0	0	0
35	0	0	0	0	0	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0	0	0
38	0	0	0	0	0	0	0	0
39	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0
	1225	1240	1090	1109	1281	1211	1181	1191

Os valores de emissões estão representados nos gráficos da Figura 54 (a-d) como uma taxa em g/h, porém, para a apresentação das estimativas para os ciclos de

condução desenvolvidos, os resultados foram convertidos para g/km, de acordo com a duração e a velocidade média dos ciclos.

5.1.1 Comparação entre períodos de pico e fora de pico

Para os ciclos de condução desenvolvidos para o trecho A, as emissões estimadas, mostradas na Figura 55, resultaram em valores superiores para todos os poluentes nos períodos de pico em comparação com os períodos fora do pico. O resultado estimado para HC foi o que obteve a maior diferença entre os períodos, de 36%, enquanto para os demais poluentes a diferença de pico e fora pico variou entre 13,4 e 18,2%.

Figura 55 - Estimativa de emissões para os ciclos de condução do trecho A, no pico e fora do pico.

A estimativa de emissões para os ciclos do trecho D resultou em maiores valores para os períodos de pico, de menor velocidade média e maior proporção de tempo parado, com destaque para a diferença na emissão de HC, como mostra a Figura 56.

Figura 56 - Estimativa de emissões para os ciclos de condução do trecho D, no pico e fora do pico.

Os ciclos de condução desenvolvidos para o trecho E nos períodos de pico e fora de pico resultaram também em emissões bem diferentes para ambas as situações. O ciclo para a condição fora de pico, com maiores valores de velocidade média e menor variabilidade e menor proporção de tempo parado, obteve um resultado bastante inferior para as emissões em comparação com o ciclo para os períodos de pico. As diferenças mais relevantes entre os dois ciclos foram estimadas para os poluentes NOx (-22,1%) e HC (-33%), conforme a Figura 57.

Figura 57 - Estimativa de emissões para os ciclos de condução do trecho E, no pico e fora do pico.

5.1.2 Comparação entre trechos

Para os períodos de pico, os resultados das estimativas de emissões foram, para todos os poluentes verificados, superiores no trecho E, conforme a Figura 58. A maior diferença em relação aos outros ciclos foram verificadas para NOx e HC, podendo indicar que a condição de tráfego pode ter maior impacto nas emissões desses poluentes.

Em média, o trecho E teve emissões 27,1% superiores em relação ao trecho A, e 39,7% em relação ao trecho D. Comparando apenas os trechos A e D, o primeiro teve emissões em média aproximadamente 18% superiores.

Figura 58 - Estimativa de emissões para os ciclos de condução dos períodos de pico, trechos E, A e D.

Para os trechos nos períodos fora de pico, as emissões estimadas para o trecho E permaneceram superiores, mas em menor proporção, em relação aos demais trechos comparados, conforme Figura 59. As emissões estimadas para o trecho E foram em média 26,7% superiores em comparação ao trecho A e 30% em relação ao trecho D. Entre os trechos A e D a diferença ficou em apenas 4,7%.

Figura 59 - Estimativa de emissões para os ciclos de condução dos períodos fora do pico, trechos E, A e D.

Os trechos B e C tiveram apenas um ciclo de condução desenvolvido cada. As estimativas de emissões para estes trechos foram agrupadas na Figura 60. O ciclo do trecho C, com maior velocidade média, menor coeficiente de variação e proporção de tempo parado resultou em valores mais reduzidos de emissões de poluentes, em média 7,75% inferiores àqueles estimados para o ciclo do trecho B.

Figura 60 - Estimativa de emissões para os ciclos de condução dos trechos B e C.

Comparando os valores totais das emissões estimadas (soma dos resultados para NO_x, HC, MP2.5 e CO) por trecho e período, com as velocidades médias, verifica-se a forte relação inversamente proporcional entre emissões e a velocidade média, considerando somente trechos de aplicação urbana de paradas constantes. A Figura 61 mostra esse comparativo (eixo vertical, das emissões, em ordem inversa).

Figura 61 – Comparativo de velocidade média e estimativa de emissões totais para os ciclos de condução desenvolvidos por trecho e período.

A partir dos resultados das estimativas apresentadas nesse capítulo é possível verificar que, invariavelmente, os ciclos de condução com menores velocidades médias e maiores coeficientes de variação, com maior proporção de tempo parado e VSP iguais a zero, resultam em valores mais elevados de emissões de poluentes.

6 CONCLUSÃO

O objetivo principal deste trabalho foi o de construir ciclos de condução que pudessem representar a operação de ônibus urbanos em diferentes tipos de vias e condições de operação, para a estimativa de emissões de poluentes. São raros os esforços semelhantes desenvolvidos no Brasil e o principal estudo realizado para o caso específico dos ônibus urbanos adotou um ciclo de condução que representa condições de operação muito particulares, por tratar-se de circulação em via exclusiva.

Os dados de variação de velocidade ao longo do tempo, necessários para a construção dos ciclos de condução, foram obtidos instrumentando-se um ônibus urbano em testes de durabilidade, que percorreu diversos tipos de vias em um trajeto pré-determinado.

O procedimento para a construção dos ciclos de condução seguiu a metodologia proposta por Lai *et al.* (2012), que se baseia na similaridade das distribuições de VSP – potência veicular específica – para selecionar microviagens que irão compor os ciclos.

Diversos ciclos de condução foram desenvolvidos, para o percurso completo (com base em aproximadamente 17.640 minutos de observações) e para trechos selecionados de vias, apresentando configurações e condições de tráfego distintas.

Durante o experimento foi possível comparar duas diferentes fontes de aquisição de dados de variação da velocidade: diretamente da central eletrônica do veículo (VCAN) ou através do receptor GPS (VGPS). Para os equipamentos utilizados neste estudo, não havendo interrupções do sinal de GPS, os resultados de velocidade e posteriormente da distribuição de VSP a partir da VGPS divergem pouco em relação aos calculados com base na VCAN, mais precisa.

Desta forma, na realização de experimentos onde se tem acesso aos dados armazenados na ECU do veículo, recomenda-se utilizar a VCAN por sua melhor precisão e menor susceptibilidade à falhas; entretanto, a VGPS pode levar a

obtenção de resultados com precisão semelhante se o equipamento receptor GPS mantiver boa qualidade de sinal durante a execução das medições de velocidade.

A construção dos diversos ciclos de condução permitiu verificar que a utilização do método de Lai *et al.* resulta em ciclos com distribuições de VSP bastante semelhantes às que caracterizam a amostra de dados dos quais foram extraídos.

Entretanto, ao privilegiar a distribuição de VSP, o método não reproduziu outros parâmetros que caracterizam os ciclos, tais como velocidade média, duração das microviagens e proporção de tempo parado, cujos resultados foram sistematicamente maiores do que os observados na amostra de dados do qual foram extraídos os ciclos correspondentes. Porém, este fato pode ser relevado se o objetivo da construção do ciclo for estimar emissões, já que esta possui maior correlação com o VSP do que com as demais variáveis.

A construção dos ciclos também permitiu verificar que as condições de tráfego têm importante influência na operação de ônibus urbanos e nas emissões. Em três dos cinco trechos analisados, os resultados de velocidade média, duração das microviagens, proporção de tempo parado e, particularmente, a distribuição de VSP, foram claramente distintos para os períodos de pico e fora do pico.

Foi verificado que trechos e períodos com mais interrupções no deslocamento (por exemplo, maior variabilidade da velocidade e proporção de tempo parado) tendem a resultar em emissões de poluentes mais elevadas. Além disso, verificou-se que, em condições de operação semelhantes, a emissão de poluentes varia de forma inversamente proporcional à velocidade média.

Com isso, é possível verificar a influência da operação nas emissões de poluentes e, assim, sugerir medidas que permitam que os ônibus urbanos circulem com maiores velocidades médias e menor variabilidade da velocidade (como a implantação de corredores e faixas de circulação exclusiva). Além do benefício de melhorar a eficiência e a qualidade do serviço de transporte público, tais modificações podem resultar na diminuição das emissões de poluentes, trazendo benefícios adicionais à sociedade.

6.1 RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Os resultados desta dissertação permitem identificar alguns temas que merecem atenção em pesquisas futuras, como os apresentados a seguir:

- do ponto de vista metodológico, é interessante considerar a proposição de métodos de seleção de microviagens que possam melhorar a semelhança entre os ciclos construídos e o conjunto completo de observações também quanto a outros parâmetros, além da distribuição de VSP, como a velocidade média e a proporção de tempo parado;
- para validar o método proposto, podem ser realizadas medições de emissões por ônibus urbanos em condições reais de operação; com esses dados, é possível verificar se as emissões estimadas a partir dos ciclos construídos aproxima-se das medidas em campo;
- quanto à aplicação do método, seria importante que experimento similar ao apresentado neste trabalho fosse conduzido com ônibus urbanos trafegando em faixas e corredores exclusivos, nos quais se espera condições de circulação mais favoráveis do ponto de vista das emissões; estes experimentos deveriam reproduzir também a operação de embarque e desembarque com mais fidelidade.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15570**: transporte - especificações técnicas para fabricação de veículos de características urbanas para transporte coletivo de passageiros. Rio de Janeiro, 2011. 62 p.

ANDREI, P. **Real World Heavy-Duty Vehicle Emissions Modeling**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Mecânica e Aeroespacial. Morgantown: The College of Engineering and Mineral Resources, West Virginia University, 2001.

AUSTIN, T.C.; DIGENOVA, F.J.; CARLSON, T.R.; JOY, R.W., GIANOLINI K.A. e LEE, J.M. **Characterization of Driving Patterns and Emissions from Light-Duty Vehicles in California**: The final report, Contract n°A932-185. Sacramento: California Air Resources Board, 1993.

ANDRÉ, M.; HICKMAN, A.; HASSEL, D.; JOURNARD, R. **Driving Cycles for Emissions Measurements under European Conditions**. SAE Technical Paper 950926. Warrendale: SAE Publications, 1995.

ANDRÉ, M. The ARTEMIS European Driving Cycles for Measuring Car Pollutant Emissions. **Science of The Total Environment**. N°73. Elsevier, p.334-335, 2004.

BARTH, M.; AN, F.; NORBECK, J.; ROSS, M.; Modal Emissions Modeling: A physical approach. **Transportation Research Record**. N° 1520. Washington D.C., p.81-88, 1996.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente – Secretaria de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental. **1º Inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários**: Relatório final. Brasília, 2011.

CARLSON, T. R. e AUSTIN, T. C. **Development of Speed Correction Cycles**. Sacramento: Sierra Research Inc., 1997.

CLARK, N.; ERKKILÄ, K.; NYLUND, N.; RIDEOUT, G. **Evaluation of Duty Cycles for Heavy-Duty Urban Vehicles. Final Report of IEA AMF Annex XXIX**. Espoo: VTT Tiedotteita, 2007.

DAI, Z.; NIEMEIER, D.; EISINGER, D. **Driving cycles: A new Cycle-Building Method that Better Represents Real World Emissions**. Davis: Department of Civil & Environmental Engineering, University of California, 2008.

DIESELNET. **Diesel Emissions Online**. Disponível em: <http://www.dieselnet.com>. Acesso em 05 mar. 2012.

ESTADOS UNIDOS. **Development of Emissions Rates for Heavy-Duty Vehicles in the Motor Vehicle Emissions Simulator (Draft MOVES2009)**. Washington D.C.: Environmental Protection Agency – Office of Transportation and Air Quality – Assessment and Standards Division, 2009.

FRANCO, V., KOUSOULIDOU, M., MUNTEAN, M., NTZIACHRISTOS, L., HAUSBERGER, S., PANAGIOTA, D. Road vehicle emission factors development: A review. **Atmospheric Environment**, 70, p.84-97, 2013.

GOOGLE STREET VIEW. Serviço gratuito de pesquisa e visualização de mapas e imagens de satélite da Terra. Disponível em: <http://maps.google.com.br>, acesso em 15 de março de 2013.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). **Relatório técnico nº 91.377-205**: Ensaio comparativos de ônibus urbanos. São Paulo, 2007.

JIMENEZ-PALACIOS, J.L. **Understanding and Quantifying Motor Vehicle Emissions with Vehicle Specific Power and TILDAS Remote Sensing**. Tese de doutorado. Departamento de Engenharia Mecânica. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1999.

LAI, J., YU, L., SONG, G., GUO, P., CHEN, X. Development of city-specific driving cycles for transit buses based on VSP distributions. **91th Transportation Research Board Annual Meeting**. Washington D.C., 2012.

LÓPEZ, M.L., JIMÉNEZ F., APARICIO, F., FLORES, N. On-road emissions from urban buses with SCR + urea and EGR + DPF systems using diesel and biodiesel. **Transportation Research Part D**, 14, p.1-5, 2009.

LIN, J., NIEMEIER, D.A. An Exploratory Analysis Comparing a Stochastic Driving Cycle to California's Regulatory Cycle. **Atmospheric Environment**, 36, p.5759-5770, 2002.

MAJEWSKI, W.A., KHAIR, M.K. **Diesel Emissions and Their Control**. Warrendale: SAE Publications, 2006.

NESAMANI, K.S., SUBRAMANIAN, K.P. Development of a driving cycle for intra-city buses in Chennai, India. **Atmospheric Environment**, 45, p.5469-5476, 2011.

RACELOGIC. **Vehicle CAN Bus Interface RLVBCAN02, Instruction Manual**. Disponível em <http://www.racelogic.co.uk>, 2012. Acesso em 14 jan. 2013.

_____. **VB2SX 20Hz GPS Data Logger User Guide**. Disponível em <http://www.racelogic.co.uk>, 2012. Acesso em 14 jan. 2013.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS (SAE). **SAE J2711, Recommended Practice for Measuring Fuel Economy and Emissions of Hybrid-electric and conventional Heavy-duty Vehicles**. Warrendale: SAE Publications, 2002

TSOLAKIS, A., MEGARITIS, A. Catalytic Exhaust Gas Fuel Reforming for Diesel Engines: Effects of Water Addition on Hydrogen Production and Fuel Conversion Efficiency. **International Journal of Hydrogen Energy**, 29, p1404-1419, 2004.

ZHAI, H., FREY, H.C., ROUPHAIL, N.M. A Vehicle-Specific Power Approach to Speed- and Facility-Specific Emissions Estimates for Diesel Transit Buses. **Environment Science Technology**, 42, p.7985-7991, 2008.