LEONARDO DE OLIVEIRA COSTA

**Desenvolvimento de ciclos de teste para banco de provas representativos da
condução de ônibus urbanos da cidade de São Paulo**

São Paulo

2018

LEONARDO DE OLIVEIRA COSTA

**Desenvolvimento de ciclos de teste para banco de provas representativos da
condução de ônibus urbanos da cidade de São Paulo**

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

São Paulo
2018

LEONARDO DE OLIVEIRA COSTA

**Desenvolvimento de ciclos de teste para banco de provas representativos da
condução de ônibus urbanos da cidade de São Paulo**

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

Área de Concentração:
Engenharia Automotiva

Orientador: Prof. Dr. Francisco Emilio
Baccaro Nigro

São Paulo
2018

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

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

de Oliveira Costa, Leonardo

Desenvolvimento de ciclos de teste para banco de provas representativos da condução de ônibus urbanos da cidade de São Paulo / L. de Oliveira Costa -- versão corr. -- São Paulo, 2018.
111 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Centro de Engenharia Automotiva.

1. Engenharia automotiva 2. Ciclos de condução 3. Ciclos de teste de emissões 4. Ônibus urbanos I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Centro de Engenharia Automotiva II. t.

AGRADECIMENTOS

Assim como as demais conquistas da vida, este trabalho não resultou apenas de um esforço pessoal e isolado. Assim, devo mencionar aqueles que muito contribuíram para esta conquista e que tenho muito a agradecer.

Inicio agradecendo a Deus, por presentear-me com todas suas benesses e por todas as bênçãos que me proporcionou, sendo que uma delas é a conclusão deste curso.

Aos professores da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, destacando a dedicação e exigência durante todo o curso. Especialmente a meu orientador, pelo apoio, atenção e compartilhamento de seu imenso conhecimento, sempre acreditando nos resultados deste trabalho.

Aos profissionais doutores, participantes da banca examinadora, pelos quais tenho profunda admiração profissional, por toda sua competência e contribuição para o desenvolvimento da engenharia no país.

A todos os colegas da IAV do Brasil pelo companheirismo e contribuição para o desenvolvimento deste trabalho. Em especial a meus superiores, que sempre acreditaram em minhas capacidades e me apoiaram em todos os desafios profissionais.

Aos colegas do IPT, MAN, Volvo e Mercedes que muito contribuíram fornecendo informações e compartilhando seus conhecimentos e experiências, sempre com muita disposição e profissionalismo.

A SPTTrans, SPUrbanuss e empresas operadoras participantes (Santa Brígida, Campo Belo, Norte Buss e Movebuss), por todo o apoio e disponibilização de dados, recursos, veículos e profissionais, sem os quais este trabalho nunca haveria se concretizado.

Sobretudo sou grato aos meus pais, Francisco e Vanda, pelo apoio, preocupação e torcida pela conclusão de mais esta etapa, assim como de todas as já concluídas. Sempre foram minha inspiração na vida.

E especialmente a Juliana, minha esposa, pelo companheirismo e compreensão que foram absolutamente vitais para que este trabalho pudesse ser realizado. Seu amor incondicional foi uma das principais motivações para que eu chegasse até aqui e esta trajetória teria sido muito mais árdua sem sua presença ao meu lado.

Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá.

(Ayrton Senna da Silva)

RESUMO

Em vigência desde Janeiro de 2012, a regulamentação Proconve P7 para veículos comerciais pesados exige que a demonstração de emissões de poluentes do motor seja realizada no ciclo de teste transiente europeu (ETC), desenvolvido de acordo com perfil de condução tipicamente europeu e assim pouco representativo de diversas situações de tráfego no Brasil. Especialmente quanto a aplicações de ônibus urbanos, altamente dinâmicas e submetidas a perfis de baixa velocidade e média carga, não é possível correlacionar plenamente o funcionamento do motor e seus sistemas de controle de emissões baseando-se apenas neste ciclo. Com essa motivação, o principal objetivo deste estudo é desenvolver ciclos de teste compactos para banco de provas de chassis e de motores que representem as condições reais de condução de ônibus urbanos da cidade de São Paulo. Estes ciclos de teste específicos possibilitam avaliações mais precisas não apenas das emissões de poluentes, mas também do consumo de combustível, além de proporcionarem melhor compreensão do real desempenho de motores e novas tecnologias dos sistemas de propulsão usados em frotas de ônibus urbanos no Brasil. A metodologia aplicada para construção dos ciclos utiliza o conceito de potência específica veicular (VSP), variável que apresenta alta correlação com emissões de poluentes e consumo de combustível e é calculada a partir de dados coletados em condições reais de condução de ônibus (velocidade, aceleração e inclinação das vias). A seleção dos veículos e linhas para realização das aquisições de dados considera tanto as especificações de trem-de-força e de chassis disponíveis na frota, como também os índices operacionais e a topografia dos trajetos como métodos para determinação de linhas com perfil operacional mais representativo. Como resultado do estudo foram propostos cinco ciclos de teste, um para cada tipo de ônibus selecionado (miniônibus, midiônibus, básico, padron e articulado), e as análises comparativas com o ciclo ETC quanto ao comportamento do motor mostram claramente a falta de representatividade do ciclo europeu adotado pela regulamentação brasileira.

Palavras-Chave: Ciclos de condução. Ciclos de teste de emissões. Ônibus urbanos. VSP.

ABSTRACT

Since January 2012, the Proconve P7 regulation is mandatory for heavy duty commercial vehicles requiring that the demonstration of pollutant gases emissions must be carried out by submitting the engine to the European transient test cycle (ETC), which has been developed according to European driving patterns and therefore is not representative of several driving situations in Brazil. Particularly for driving patterns of urban buses, which are highly dynamic with low vehicle speed and medium load profiles, it is not possible to fully correlate the operating conditions of the engine and its emission control systems based only on this test cycle. With this motivation, the main objective of this study is to develop compact test cycles for use in both chassis and engine test benches that represent the actual driving pattern of transit buses in São Paulo city. These specific test cycles may allow more accurate assessment of pollutant gases emissions and fuel consumption, as well as provide a better understanding concerning the real performance of engines and new propulsion technologies used in urban bus fleets in Brazil. The methodology used for construction of the cycles is based on the concept of vehicle specific power (VSP), a variable that is highly correlated with pollutant emissions and fuel consumption and is calculated from data collected under real-world driving conditions (vehicle speed, acceleration and road grade). The selection of the buses and routes for the on-board data collection considers the specifications of powertrain and chassis that are available in the bus fleet of São Paulo's public transportation system, operational indexes and route topography as a method for determining the bus routes with a more representative operational pattern. As the result of this study five test cycles were proposed, one for each bus type (minibus, midibus, basic, padron and articulated), and an analysis of the engine's operating behavior in comparison to the ETC cycle clearly shows the lack of representativeness of the European cycle adopted by the Brazilian regulation.

Keywords: Driving cycles. Emission test cycles. Urban transit buses. VSP.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	– Ciclo Transiente Europeu (ETC)	30
Figura 2	– Ciclo Transiente de condução FIGE.....	31
Figura 3	– Ciclo Transiente Harmonizado Mundialmente (WHTC).....	32
Figura 4	– Ciclo Transiente Veicular harmonizado mundialmente (WTVC)..	33
Figura 5	– Exemplos de ciclo de condução de ônibus urbanos. (a) Orange County (Califórnia, EUA), (b) Manhattan (Nova Iorque, EUA) e (c) Braunschweig (Alemanha).....	35
Figura 6	– Ilustração das 8 áreas do sistema municipal de transporte da cidade de São Paulo.....	38
Figura 7	– Estimativa de distribuição da demanda de passageiros em dia útil.....	40
Figura 8	– Demonstrativo da frota do sistema por fases do Proconve.....	42
Figura 9	– Demonstrativo da frota Proconve P7 do sistema.....	42
Figura 10	– (a) Consumo de combustível e (b) Emissões de NOx do motor em função de aceleração do veículo e potência específica veicular.....	45
Figura 11	– Exemplo da análise estatística da velocidade operacional média para as linhas da configuração Miniônibus/Subsistema Local.....	51
Figura 12	– Exemplo de análise topográfica para linha “121G10 - PQ NOVO MUNDO/METRO TUCURUVI”, sentido “Bairro-Centro”	55
Figura 13	– Tabulação dos dados obtidos através do software Google Earth para as linhas pré-selecionadas. (a) Miniônibus, subsistema Local, (b) Midiônibus, subsistema Local, (c) Básico, subsistema Estrutural, (d) Padron, subsistema Estrutural e (e) Articulado, subsistema Estrutural.....	56
Figura 14	– Trajeto e perfil topográfico das linhas selecionadas para aquisição de dados. (a) Miniônibus – Local – Linha: 9789, (b) Midiônibus – Local – Linha: 4029, (c) Básico – Estrutural – Linha: 8004, (d) Padron – Estrutural – Linha: 8686 e (e) Articulado – Estrutural – Linha: 6500.....	58

Figura 15	– Veículos disponibilizados para aquisição de dados. (a) Miniônibus – Mascarello Micro Gran S3 – Volksbus 9.160 OD, (b) Midiônibus – Caio Apache VIP – Mercedes OF-1519, (c) Básico – Caio Apache VIP – Mercedes OF-1721, (d) Padron – Caio Millennium – Volvo B290R e (e) Articulado – Caio BRT Millennium – Mercedes O-500UDA 3736.....	63
Figura 16	– Ilustração dos equipamentos de aquisição de dados utilizados nos testes.....	65
Figura 17	– Foto da instalação dos equipamentos de aquisição de dados em um dos veículos.....	65
Figura 18	– Fluxograma de tratamento dos dados coletados, integração das planilhas e cálculo de VSP.....	68
Figura 19	– Exemplo da planilha final com dados GPS e CAN integrados e valores de VSP e aceleração por VSP calculados.....	73
Figura 20	– Fluxograma do processo de construção dos ciclos.....	74
Figura 21	– Exemplo de análise da distribuição de tempo parado para a amostra total de dados do Miniônibus em horário de pico.....	75
Figura 22	– Exemplo de análise da distribuição de VSP para a amostra total de dados filtrados “em movimento” do Miniônibus em horário de pico.....	76
Figura 23	– Exemplo da planilha de cálculos de RMSE para análise dos dados do Miniônibus em horário de pico.....	76
Figura 24	– Exemplo da planilha de seleção de microviagens para construção de ciclo do Miniônibus em horário de pico.....	77
Figura 25	– Representação gráfica das rotações N_{hi} , N_{lo} e N_{ref}	79
Figura 26	– Representação gráfica do ciclo de condução proposto em perfil de velocidade do veículo.....	82
Figura 27	– Representação gráfica do ciclo de teste para banco de provas de motores proposto em perfil de torque e rotação do motor normalizados.....	82
Figura 28	– Gráfico da distribuição de VSP para comparação entre a medição total e o ciclo de condução proposto.....	83

Figura 29	– Histograma da distribuição de tempo de parada para comparação entre a medição total e o ciclo de condução proposto.....	83
Figura 30	– Mapeamento da porcentagem de tempo de operação em função de velocidade e aceleração do veículo para comparação entre a medição total e o ciclo de condução proposto.....	84
Figura 31	– Mapeamento da porcentagem de tempo de operação em função de torque e rotação do motor normalizados para comparação entre o ciclo ETC e o ciclo de teste proposto.....	84
Figura 32	– Representação gráfica do ciclo de condução proposto em perfil de velocidade do veículo.....	86
Figura 33	– Representação gráfica do ciclo de teste para banco de provas de motores proposto em perfil de torque e rotação do motor normalizados.....	86
Figura 34	– Gráfico da distribuição de VSP para comparação entre a medição total e o ciclo de condução proposto.....	87
Figura 35	– Histograma da distribuição de tempo de parada para comparação entre a medição total e o ciclo de condução proposto.....	87
Figura 36	– Mapeamento da porcentagem de tempo de operação em função de velocidade e aceleração do veículo para comparação entre a medição total e o ciclo de condução proposto.....	88
Figura 37	– Mapeamento da porcentagem de tempo de operação em função de torque e rotação do motor normalizados para comparação entre o ciclo ETC e o ciclo de teste proposto.....	88
Figura 38	– Representação gráfica do ciclo de condução proposto em perfil de velocidade do veículo.....	90
Figura 39	– Representação gráfica do ciclo de teste para banco de provas de motores proposto em perfil de torque e rotação do motor normalizados.....	90
Figura 40	– Gráfico da distribuição de VSP para comparação entre a medição total e o ciclo de condução proposto.....	91

Figura 41	– Histograma da distribuição de tempo de parada para comparação entre a medição total e o ciclo de condução proposto.....	91
Figura 42	– Mapeamento da porcentagem de tempo de operação em função de velocidade e aceleração do veículo para comparação entre a medição total e o ciclo de condução proposto.....	92
Figura 43	– Mapeamento da porcentagem de tempo de operação em função de torque e rotação do motor normalizados para comparação entre o ciclo ETC e o ciclo de teste proposto.....	92
Figura 44	– Representação gráfica do ciclo de condução proposto em perfil de velocidade do veículo.....	94
Figura 45	– Representação gráfica do ciclo de teste para banco de provas de motores proposto em perfil de torque e rotação do motor normalizados.....	94
Figura 46	– Gráfico da distribuição de VSP para comparação entre a medição total e o ciclo de condução proposto.....	95
Figura 47	– Histograma da distribuição de tempo de parada para comparação entre a medição total e o ciclo de condução proposto.....	95
Figura 48	– Mapeamento da porcentagem de tempo de operação em função de velocidade e aceleração do veículo para comparação entre a medição total e o ciclo de condução proposto.....	96
Figura 49	– Mapeamento da porcentagem de tempo de operação em função de torque e rotação do motor normalizados para comparação entre o ciclo ETC e o ciclo de teste proposto.....	96
Figura 50	– Representação gráfica do ciclo de condução proposto em perfil de velocidade do veículo.....	98
Figura 51	– Representação gráfica do ciclo de teste para banco de provas de motores proposto em perfil de torque e rotação do motor normalizados.....	98
Figura 52	– Gráfico da distribuição de VSP para comparação entre a medição total e o ciclo de condução proposto.....	99

Figura 53	– Histograma da distribuição de tempo de parada para comparação entre a medição total e o ciclo de condução proposto.....	99
Figura 54	– Mapeamento da porcentagem de tempo de operação em função de velocidade e aceleração do veículo para comparação entre a medição total e o ciclo de condução proposto.....	100
Figura 55	– Mapeamento da porcentagem de tempo de operação em função de torque e rotação do motor normalizados para comparação entre o ciclo ETC e o ciclo de teste proposto.....	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Limites de emissões de poluentes de acordo com a regulamentação e o ciclo de teste.....	28
Tabela 2	– Comparação de parâmetros operacionais entre os diversos ciclos de condução.....	36
Tabela 3	– Tipos de veículo disponíveis na cidade de São Paulo.....	41
Tabela 4	– Valores médios, máximos e mínimos da faixa de seleção dos índices operacionais para pré-seleção das linhas. (a) IPK, PVD e PDM, (b) Velocidade média e Extensão da linha.....	52
Tabela 5	– Linhas pré-selecionadas como mais representativas para: (a) Subsistema Local com Miniônibus, (b) subsistema Local com Midiônibus, (c) subsistema Estrutural com ônibus Básico, (d) subsistema Estrutural com ônibus Padron e (e) subsistema Estrutural com ônibus Articulado.....	52
Tabela 6	– Linhas efetivamente selecionadas para a aquisição de dados.....	58
Tabela 7	– Especificações técnicas dos veículos selecionados para aquisição de dados.....	62
Tabela 8	– Registro das informações coletadas durante a realização das aquisições de dados.....	67
Tabela 9	– Registro dos dados utilizados para cálculo do termo do coeficiente de arrasto para cada veículo testado.....	72
Tabela 10	– Registro dos dados utilizados para cálculo da rotação de referência para cada veículo testado.....	79
Tabela 11	– Relação peso-potência de cada veículo testado.....	81
Tabela 12	– Tabulação dos valores dos principais parâmetros operacionais do ciclo FIGE ETC, da medição total e do ciclo de condução proposto para Miniônibus.....	83
Tabela 13	– Tabulação dos valores dos principais parâmetros operacionais do ciclo FIGE ETC, da medição total e do ciclo de condução proposto para Midiônibus.....	87

Tabela 14	–	Tabulação dos valores dos principais parâmetros operacionais do ciclo FIGE ETC, da medição total e do ciclo de condução proposto para ônibus Básico.....	91
Tabela 15	–	Tabulação dos valores dos principais parâmetros operacionais do ciclo FIGE ETC, da medição total e do ciclo de condução proposto para ônibus Padron.....	95
Tabela 16	–	Tabulação dos valores dos principais parâmetros operacionais do ciclo FIGE ETC, da medição total e do ciclo de condução proposto para ônibus Articulado.....	99

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	<i>Anti-lock Braking System</i>
Arla32	Agente Redutor Líquido Aquoso
CAN	<i>Controller Area Network</i>
CMTC	Companhia Municipal de Transportes Coletivos
CO	Monóxido de Carbono
CO₂	Dióxido de Carbono
CPTM	Companhia Paulista de Trens Metropolitanos
CRT	<i>Continuously Regenerating Trap</i>
DOC	<i>Diesel Oxidation Catalyst</i>
DPF	<i>Diesel Particulate Filter</i>
ECU	<i>Electronic Control Unit</i>
EGR	<i>Exhaust Gas Recirculation</i>
ELR	<i>European Load Response</i>
EMTU	Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de São Paulo
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
ESC	<i>European Stationary Cycle</i>
ETC	<i>European Transient Cycle</i>
FIGE	<i>Forschungsinstitut Geräusche und Erschütterungen</i>
FTP	<i>Federal Test Procedure</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GTR	<i>Global Technical Regulation</i>
HC	Hidrocarbonetos
Ibama	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IPK	Índice de Passageiros transportados por Quilômetro Operacional
ISC	<i>In Service Conformity</i>
Metro	Companhia do Metropolitano
MOVES	<i>Motor Vehicle Emission Simulator</i>
MP	Material Particulado
MV	Microviagem

NH₃	Amônia
N_{hi}	Rotação superior – rotação mais elevada do motor onde ocorre 70% da potência máxima
N_{lo}	Rotação inferior – menor rotação do motor onde ocorre 50% da potência máxima
N_{ref}	Rotação de referência para cálculo de normalização da rotação do motor em ciclo de teste transiente
NO	Óxido Nítrico
NO_x	Óxidos de Nitrogênio
NO₂	Dióxido de Nitrogênio
NP	Número de partículas
OBD	<i>On Board Diagnosis</i>
PBT	Peso Bruto Total
PDM	Percurso Operacional Diário Médio por Veículo
PEMS	<i>Portable Emission Measurement System</i>
Proconve	Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores
PVD	Índice de Passageiros transportados por Veículo por Dia
RDE	<i>Real Driving Emission</i>
RMSE	<i>Root Mean Squared Error</i>
RSP	Partículas Suspensas Respiráveis
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SCR	<i>Selective Catalytic Reduction</i>
SPTrans	São Paulo Transporte
TCU	<i>Transmission Control Unit</i>
UN/ECE	<i>United Nations Economic Commission for Europe</i>
VSP	<i>Vehicle Specific Power</i>
WHDC	<i>World Harmonized Driving Cycle</i>
WHSC	<i>World Harmonized Stationary Cycle</i>
WHTC	<i>World Harmonized Transient Cycle</i>
WTVC	<i>World Transient Vehicle Cycle</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	OBJETIVOS	21
1.2	JUSTIFICATIVA	22
1.3	OBJETO DE ESTUDO	23
1.4	METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO	24
2	CENÁRIO ATUAL	26
2.1	REGULAMENTAÇÕES E CICLOS DE TESTE DE EMISSÕES DE POLUENTES	26
2.1.1	Ciclos de teste para banco de provas de motores diesel pesados	28
2.1.2	Ciclos de condução para ônibus urbanos	34
2.2	O TRANSPORTE COLETIVO NA CIDADE DE SÃO PAULO	37
2.2.1	Sistema municipal de transporte por ônibus	37
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	43
3.1	METODOLOGIAS PARA CONSTRUÇÃO DE CICLOS DE CONDUÇÃO	43
3.2	CONSTRUÇÃO DE CICLOS BASEADA EM DISTRIBUIÇÃO VSP	44
4	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	48
4.1	DETERMINAÇÃO DE PERFIL OPERACIONAL MÉDIO POR TIPO DE VEÍCULO	48
4.1.1	Análise estatística dos índices operacionais	48
4.1.2	Análise topográfica	54
4.1.3	Seleção das linhas para aquisição de dados	58
4.2	INSTRUMENTAÇÃO E AQUISIÇÃO DE DADOS EM VEÍCULO	60
4.3	TRATAMENTO DOS DADOS E CÁLCULO DE VSP	68
4.3.1	Tratamento dos dados	68
4.3.2	Cálculo de VSP	70
4.4	CONSTRUÇÃO DOS CICLOS	73
4.4.1	Construção dos ciclos de condução	74
4.4.2	Construção dos ciclos de teste para banco de provas de motores	78
5	RESULTADOS E ANÁLISES	80

5.1	CICLO PROPOSTO PARA MINIÔNIBUS	82
5.1.1	Análises do ciclo de condução	83
5.1.2	Análises do ciclo de teste para banco de provas de motores.....	84
5.2	CICLO PROPOSTO PARA MUDIÔNIBUS	86
5.2.1	Análises do ciclo de condução	87
5.2.2	Análises do ciclo de teste para banco de provas de motores.....	88
5.3	CICLO PROPOSTO PARA ÔNIBUS BÁSICO	90
5.3.1	Análises do ciclo de condução	91
5.3.2	Análises do ciclo de teste para banco de provas de motores.....	92
5.4	CICLO PROPOSTO PARA ÔNIBUS PADRON	94
5.4.1	Análises do ciclo de condução	95
5.4.2	Análises do ciclo de teste para banco de provas de motores.....	96
5.5	CICLO PROPOSTO PARA ÔNIBUS ARTICULADO.....	98
5.5.1	Análises do ciclo de condução	99
5.5.2	Análises do ciclo de teste para banco de provas de motores.....	100
5.6	ANÁLISE CRÍTICA FINAL.....	102
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	105
6.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	106
	REFERÊNCIAS.....	108

1 INTRODUÇÃO

A preocupação crescente com os impactos negativos ao meio ambiente e ao bem-estar social devido às emissões de gases poluentes provenientes de veículos automotores tem levado à implementação de regulamentações de emissões cada vez mais restritas. No caso de veículos comerciais pesados (caminhões e ônibus) que utilizam prioritariamente motores ciclo diesel, está em vigor no Brasil desde o início de 2012 (IBAMA, 2011) a fase P7 do Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores (Proconve) baseada na regulamentação europeia Euro V, nivelando provisoriamente as exigências de redução de poluentes às já vigentes nos mercados mais desenvolvidos do mundo, principalmente para redução de óxidos de nitrogênio (NOx) e material particulado (MP).

Neste cenário, as tecnologias de pós-tratamento dos gases de escape despontaram como uma forma de mitigar a emissão de certos poluentes, sem necessariamente favorecer a formação de outros poluentes. Segundo Arrègle et al. (2009), o principal desafio de motores diesel está na dificuldade de reduzir as emissões de material particulado e NOx ao mesmo tempo, pois as estratégias para a redução de um provoca um aumento no outro. Assim, atualmente duas soluções podem ser adotadas: a Redução Catalítica Seletiva (*Selective Catalytic Reduction* - SCR) e a Recirculação de Gases de Exaustão (*Exhaust Gas Recirculation* - EGR).

Além disso, a regulamentação Proconve P7 também introduziu o sistema embarcado de monitoramento de emissões (OBD) e o novo ciclo transiente para certificação, o Ciclo Transiente Europeu (ETC), para demonstração de emissões de poluentes submetendo o motor a condições de operação mais próximas às reais em veículo, adicionalmente aos ciclos já estabelecidos anteriormente: Ciclo Estacionário Europeu (ESC) e Ciclo de Resposta à Carga (ELR).

Em Janeiro de 2013 (COMISSÃO EUROPEIA, 2011) entrou em vigor na Europa a regulamentação Euro VI, provável base para implementação da próxima fase do Proconve (P8), restringindo ainda mais os limites de poluentes e exigindo assim a implementação de novas tecnologias para controle de emissões como filtro de particulado (DPF) e catalisador de oxidação (DOC) em conjunto com as tecnologias de redução de NOx já citadas. Além da redução drástica dos limites de poluentes foram implementados também novos ciclos de certificação (ciclos de teste

harmonizados mundialmente - WHDC), sistema de monitoramento de emissões mais robusto e conformidade de emissões em serviço (denominado em inglês ISC – *In-Service Conformity*). Este último requisito especificamente trouxe um novo desafio para o segmento, com maiores exigências quanto a durabilidade do sistema de controle de emissões e a demonstração de emissões em condições reais de operação do veículo (denominado em inglês RDE – *Real Driving Emission*).

Com a rápida evolução tecnológica dos equipamentos portáteis de medição de emissões (abreviado em inglês como PEMS – *Portable Emission Measurement System*), tornou-se uma das principais pautas dentro da indústria automotiva a mensuração do real ganho ambiental com a evolução das regulamentações de emissões. Em outras palavras, o quão eficaz são essas novas tecnologias de controle de emissões e quais são os níveis de emissão de poluentes dos veículos quando em condições reais de condução.

Porém, devido à dificuldade de se implementar um ciclo específico de teste de emissões em condição real de operação para o segmento de veículos comerciais pesados, principalmente por conta da complexidade e variedade de configurações dos sistemas de trem-de-força (*powertrain*) deste tipo de veículo, toda a certificação de emissões ainda é realizada em banco de provas de motores. E a implementação dos ciclos harmonizados mundialmente foi uma medida adotada justamente para reduzir a diferença já conhecida de funcionamento dos sistemas de controle de emissões em banco de provas de motores (onde as condições de contorno são precisamente controladas) e em operação real no veículo.

Os ciclos atualmente em vigor no Brasil para certificação de motores conforme a regulamentação Proconve P7 (ETC, ESC e ELR) foram desenvolvidos segundo perfis de rodagem tipicamente europeus. Neste caso pode-se imaginar que a diferença mencionada quanto ao funcionamento do sistema de controle de emissões (banco de provas versus veículo) seja ainda maior. Assim surgem as dúvidas de quão representativos são tais ciclos para certificação dos motores no Brasil e quão eficazes são os sistemas de controle de emissões em condições reais de operação, considerando as particularidades das aplicações no mercado brasileiro.

Especialmente quanto a aplicações de ônibus urbanos, altamente dinâmicas e submetidas a perfis de baixa velocidade (devido ao alto índice de trânsito nas grandes

idades) e média carga (devido à alta demanda de passageiros), não é possível correlacionar plenamente o funcionamento do motor e seus sistemas de controle de emissões baseando-se apenas no ciclo ETC e não há um ciclo específico para realizar essa correlação. Soma-se a isso o grande desafio para implementação da regulamentação Proconve P8, que incluirá a correlação entre o ciclo WHTC (ciclo transiente harmonizado) e as exigências dos ensaios de conformidade em serviço, garantindo o atendimento aos limites de emissões e o funcionamento robusto dos sistemas de controle de emissões.

Dessa forma, observa-se uma oportunidade de desenvolvimento de ciclos de condução específicos de acordo com perfis de operação de ônibus tipicamente urbanos, os quais possam ser utilizados para análise de emissões e consumo. Neste contexto, a cidade de São Paulo com uma frota de pouco menos de 15.000 ônibus em circulação para transporte público coletivo (SPTRANS, 2017), pode ser considerada representativa como base para desenvolvimento de tais ciclos.

Assim, este estudo é orientado pelo seguinte problema de pesquisa: Como representar as condições reais de condução de ônibus urbanos na cidade de São Paulo em ciclos de teste pré-definidos (velocidade do veículo, torque e rotação em função do tempo) que possam ser configurados tanto em banco de provas de chassis como em banco de provas de motores para verificação de emissões de poluentes e consumo de combustível?

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste estudo é desenvolver ciclos de teste compactos para banco de provas de chassis (perfil de velocidade em função do tempo) e de motores (perfil de torque e rotação do motor em função do tempo) que representem as características mais significativas das condições reais de condução de ônibus urbanos da cidade de São Paulo possibilitando avaliações diversas como emissões de poluentes e consumo de combustível.

Devido às distintas características técnicas das carrocerias (dimensões externas e capacidade de carga de passageiros) e dos sistemas de trem-de-força (volume, torque e potência do motor, relação de marchas e tipo de acionamento da transmissão) verifica-se a necessidade de desenvolvimento de ciclos exclusivos para cada

categoria de ônibus, de forma a representar o mais fielmente possível a operação de cada veículo.

Os objetivos específicos são:

- Analisar os principais índices operacionais monitorados pela SPTrans para pré-seleção das linhas de ônibus urbanos mais representativas para a cidade de São Paulo;
- Identificar os dados topográficos das rotas mais relevantes para seleção das linhas a serem monitoradas;
- Instrumentar veículos das linhas selecionadas e coletar dados em operação real;
- Verificar a consistência dos dados coletados e realizar a análise da distribuição de Potência Específica Veicular (VSP);
- Construir os ciclos de teste: com perfil de velocidade em função do tempo e perfil de rotação e torque normalizados em função do tempo.

1.2 JUSTIFICATIVA

Como resultado deste estudo são desenvolvidos ciclos de teste para banco de provas de chassis e de motores diesel pesados, representando condições de condução típicas de ônibus urbanos da cidade de São Paulo. Tais ciclos podem proporcionar condições para uma melhor avaliação de funcionamento de motores aplicados a ônibus urbanos no Brasil quanto às emissões de poluentes e consumo de combustível.

Dessa forma, disponibiliza-se às montadoras e empresas do segmento informações relevantes para auxílio a um processo mais acelerado de desenvolvimento e adaptação dos motores, sistemas de controle de emissões e seus componentes às condições reais de operação no mercado nacional, de forma a garantir uma maior confiabilidade e robustez de funcionamento, assim como a adequada redução das emissões de poluentes. Junta-se a isso a possibilidade destes ciclos poderem ser utilizados como ferramentas para levantamento de inventário de emissões tanto por parte das fabricantes como pelas autoridades reguladoras, de forma a realmente garantir a evolução da qualidade do ar.

O desenvolvimento deste projeto foi viável graças à disponibilização normatizada dos principais parâmetros de funcionamento do motor por barramentos de comunicação veicular entre módulos eletrônicos como ECU (Unidade de Controle Eletrônico do Motor), ABS (Sistema de Frenagem Antitravamento) e TCU (Unidade de Controle Eletrônico de Transmissão Automática). Assim, foi possível se coletar tais dados dos veículos em operação real.

Por fim, é possível se identificar a relevância deste estudo para contribuir no desenvolvimento da engenharia automotiva brasileira, considerando o potencial do mercado automotivo nacional como o 7º maior do mundo no ano de 2015 (AUTOMOTIVE BUSINESS, 2016) e que as principais agências de regulação e controle de poluentes dos principais mercados já desenvolvem pesquisas similares e possuem seus respectivos ciclos de emissões e metodologias estabelecidos há longo tempo.

1.3 OBJETO DE ESTUDO

O objeto deste estudo é o ciclo de teste, desenvolvido para banco de provas de chassis (perfil de velocidade em função do tempo) e de motores (perfil de torque e rotação normalizados em função do tempo), representando as condições de condução reais de ônibus urbanos operando em linhas específicas da cidade de São Paulo, baseado em dados coletados em veículo.

Ciclos de condução consistem em séries de dados padronizados utilizados em testes e medições realizados em banco de provas (dinamômetro), garantindo a repetibilidade e a comparabilidade dos mesmos. Tais testes são realizados geralmente com o intuito de avaliar características de motores como emissão de poluentes e consumo de combustível, simulando as condições reais de operação do veículo.

As séries de dados de um ciclo de teste podem especificar condições de operação tipicamente veiculares com dados de velocidade em função do tempo (método utilizado em ciclos de teste de veículos de passeio), como também condições de operação do motor que representem a sua operação em veículo com dados de torque e rotação em função do tempo. Este último método é aplicado aos ciclos de teste de motores para veículos comerciais pesados.

1.4 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO

A pesquisa tem uma abordagem predominantemente quantitativa, natureza aplicada e objetivo explicativo, visando o desenvolvimento de uma solução (ciclo de teste específico) para o problema levantado (falta de correlação da operação do motor em banco de provas e em veículo).

O método utilizado no desenvolvimento da pesquisa é o experimental, utilizando equipamento para aquisição de dados embarcado conectado ao barramento de comunicação dos veículos (barramento CAN – *Controller Area Network*) e para registro de dados de posicionamento GPS (para levantamento de elevação e inclinação das vias), com posterior análise de consistência e tratamento dos dados, buscando uma relação causal entre os parâmetros do motor e do veículo relacionados a emissões de poluentes e consumo de combustível quando operando em banco de provas ou em condições reais de condução no veículo.

As variáveis que impactam diretamente no funcionamento do motor e do veículo (intervenientes) são monitoradas e eventualmente utilizadas como método de invalidação dos dados coletados. São elas as diversas condições de contorno dos testes como temperatura ambiente (ar de admissão do motor), pressão atmosférica, topografia do trajeto, trânsito, modo de condução do motorista e carga do veículo. Tais condições são de extrema relevância pois podem influenciar os dados coletados, assim devem ser, de certa forma, observadas e controladas.

As variáveis de operação do veículo e do motor diretamente relacionadas a emissões de poluentes e consumo de combustível (variáveis dependentes) são tratadas de acordo com metodologias já desenvolvidas em pesquisas anteriores e manipuladas para o desenvolvimento do ciclo como série de dados em função do tempo. São elas: velocidade e aceleração do veículo, inclinação da via, torque e rotação do motor.

As atividades realizadas neste estudo para se atingir o objetivo são:

1. Levantamento e tabulação dos dados dos principais índices operacionais de todas as linhas:
 - a. Índice de passageiros transportados por quilômetro operacional (IPK);
 - b. Índice de passageiros transportados por veículo por dia (PVD);
 - c. Percurso operacional diário médio por veículo (PDM);

- d. Velocidade operacional média;
 - e. Extensão operacional das linhas.
2. Análise estatística dos dados segmentados em “Tipo de veículo / Subsistema operacional”, devido às distintas características operacionais dos subsistemas e, principalmente, às distintas características técnicas dos veículos (carroceria, chassi, motor e transmissão) com o objetivo de determinar um perfil operacional médio e pré-selecionar as 10 linhas mais representativas para cada categoria de veículo do sistema de transporte:
 - a. Miniônibus, subsistema Local;
 - b. Midiônibus, subsistema Local;
 - c. Ônibus básico, subsistema Estrutural;
 - d. Ônibus padron, subsistema Estrutural;
 - e. Ônibus articulado, subsistema Estrutural.
 3. Levantamento dos dados topográficos dos trajetos percorridos por cada linha pré-selecionada, com o objetivo de eliminar linhas com severidade comparativamente muito alta ou muito baixa e realizar a seleção final das 5 linhas a serem efetivamente monitoradas (uma para cada tipo de veículo);
 4. Instrumentação dos veículos e realização das aquisições de dados em condições reais de condução de acordo com premissas estabelecidas, em cada uma das linhas selecionadas e em viagens completas (ida e volta, sentidos Bairro-Centro e Centro-Bairro) nos horários de pico e entrepicos;
 5. Tratamento dos dados, cálculo de potência específica veicular (VSP) e sua distribuição e ordenação crescente das microviagens baseada no menor erro quadrático médio (RMSE) da distribuição de VSP;
 6. Construção dos ciclos para cada tipo de veículo, de acordo com a metodologia pré-estabelecida, considerando a distribuição das viagens do sistema de transporte nos horários de pico e entrepicos:
 - a. Ciclos de condução com perfil de velocidade em função do tempo;
 - b. Ciclos de teste para banco de provas de motores com perfil de rotação e torque normalizados em função do tempo.
 7. Análise e discussão dos ciclos propostos.

2 CENÁRIO ATUAL

2.1 REGULAMENTAÇÕES E CICLOS DE TESTE DE EMISSÕES DE POLUENTES

Como resultado da combustão de um motor, o Monóxido de Carbono (CO), os Hidrocarbonetos (HC), os Óxidos de Nitrogênio (NOx) e o Material Particulado (MP) são os principais gases poluentes presentes nos gases de exaustão. Dentre esses, os mais preocupantes em relação à motores do ciclo diesel são o NOx e o Material Particulado, recebendo assim atenção especial conforme avançam tanto as regulamentações quanto as tecnologias para controle de emissões (ARRÊGLE, 2009).

Segundo estudo da SVMA (2011), o NOx, presente em suas principais formas como Óxido Nítrico (NO) e Dióxido de Nitrogênio (NO₂), é o principal agente causador da chuva ácida e da névoa fotoquímica comumente observada nos céus das grandes regiões metropolitanas principalmente em dias quentes e secos. Além disso, é também um dos precursores fundamentais para formação de ozônio atmosférico, que é um poluente crítico na região metropolitana de São Paulo, sendo nesta região os veículos diesel a sua maior fonte. Dentre os efeitos danosos à saúde humana estão: desconforto respiratório, diminuição da resistência a infecções e alterações celulares.

O Material Particulado (MP) é composto por pequenas matérias sólidas em forma de fuligem que reagem com o ar atmosférico e acabam suspensos na atmosfera. São também conhecidos como partículas suspensas respiráveis (RSP) com diâmetro de até 10 micrômetros. Dentre os efeitos danosos à saúde humana estão: agravamento de quadros alérgicos de asma e bronquite, irritação de nariz e garganta por poeiras mais grossas, propagação de infecções gripais, agravamento de casos de doenças respiratórias ou do coração por poeiras mais finas (partículas inaláveis) que chegam aos alvéolos e aumento da possibilidade de câncer (SVMA, 2011).

Dessa forma as regulamentações de emissões em todo o mundo estão se tornando cada vez mais rigorosas para licenciamento de novos veículos diesel pesados, a fim de garantir a melhoria da qualidade do ar.

No Brasil, desde janeiro de 2012 (IBAMA, 2011) está em vigor a fase P7 do programa Proconve, baseada na regulamentação europeia Euro V, substituindo a fase anterior

P5 (similar à fase Euro III), que dentre as principais exigências implementou reduções nos limites de emissões de NOx (de 5,00 g/kWh para 2,00 g/kWh, redução de 60%) e de material particulado (de 0,10 g/kWh para 0,03 g/kWh, redução de 70%). Tais requisitos demandaram a implementação de novas tecnologias nos motores (por exemplo nos sistemas de admissão de ar e injeção eletrônica), destacando-se os novos sistemas de controle de emissões SCR e EGR, nunca antes utilizados em veículos comerciais pesados nacionais, principalmente para redução de emissões de NOx.

O Sistema SCR possui alta eficiência na conversão de NOx. A redução é realizada diretamente nos gases de escape, através de uma reação catalítica entre o NOx e o NH₃ (amônia), resultando basicamente em nitrogênio e vapor de água. O NH₃ é obtido pelo processo de termólise do líquido reagente Arla32 (Agente Redutor Líquido Aquoso) que ocorre no momento de sua dosagem no escapamento (antes do catalisador), realizada pelo próprio sistema de controle.

O sistema EGR reduz a formação de NOx diretamente na câmara de combustão através da recirculação dos gases de exaustão do motor já resfriados para o coletor de admissão, substituindo parte do oxigênio puro por gases inertes e, conseqüentemente, reduzindo a temperatura da combustão.

A próxima fase do programa Proconve para veículos diesel pesados (P8) já está em discussão, utilizando a regulamentação Euro VI como base e com implementação prevista para 2023 (IBAMA, 2017). Em vigor na Europa desde janeiro de 2013 (COMISSÃO EUROPEIA, 2011) a desafiadora fase Euro VI implementou reduções ainda mais drásticas aos limites de emissões, incluindo o requisito de número máximo de partículas (NP), além dos requisitos de conformidade de emissões em serviço (ISC) exigindo que as emissões sejam certificadas em condições reais de operação do veículo (RDE) e monitoradas durante toda a vida útil do veículo. Assim foram implementadas novas tecnologias de pós-tratamento de gases de escape adicionais ao SCR e ao EGR, como o DOC e o DPF, para atendimento aos novos requisitos.

O DOC é um catalisador de oxidação que, no caso de motores diesel com tecnologia Euro VI, tem três funções principais (DIESELNET, 2017):

1. Auxiliar estratégias periódicas de regeneração ativa do filtro DPF (estratégia de gerenciamento térmico dos gases de escape) através da oxidação de

hidrocarbonetos resultantes de injeções acionadas tardiamente de forma intencional pela ECU em certas condições, assim elevando a temperatura dos gases;

2. Possibilitar mais frequentemente a regeneração passiva do filtro DPF, através do efeito CRT (*Continuously Regenerating Trap*), aumentando a concentração de NO₂ nos gases de escape e assim oxidando parte do carbono armazenado no filtro;
3. Otimizar a eficiência do catalisador SCR, principalmente em baixas temperaturas, aumentando a concentração de NO₂ nos gases de escape e assim habilitando as reações rápidas do SCR.

O filtro DPF tem como principal função realizar a captura do material particulado, através de mecanismos de filtragem. Como o material fica armazenado no filtro, a realização de uma regeneração térmica periódica é necessária para oxidação do carbono. Como descrito anteriormente, este processo pode ser facilitado com a utilização do DOC (DIESELNET, 2017).

A tabela 1 sumariza os limites de emissões de poluentes exigidos por ambas as regulamentações (Proconve P7 e Euro VI), de acordo com o ciclo de teste de demonstração (a serem descritos posteriormente). A tabela também mostra a diferença percentual entre os limites de ambas as regulamentações.

Tabela 1 – Limites de emissões de poluentes de acordo com a regulamentação e o ciclo de teste

	Proconve P7 / Euro V		Euro VI		Diferença [%]	
	ESC/ELR	ETC	WHSC	WHTC	Estacionário	Transiente
CO [mg/kWh]	1500	4000	1500	4000	0,0	0,0
HC [mg/kWh]	460	550	130	160	-71,7	-70,9
NOx [mg/kWh]	2000	2000	400	460	-80,0	-77,0
NH3 [ppm]	25	25	10	10	-60,0	-60,0
MP [mg/kWh]	20	30	10	10	-50,0	-66,7
Fumaça [m ⁻¹]	0,5	-	-	-	-	-
NP [-]	-	-	8,0 x 10 ¹¹	6,0 x 10 ¹¹	-	-

Fonte: Adaptado de DIESELNET (2017)

2.1.1 Ciclos de teste para banco de provas de motores diesel pesados

Para demonstração da conformidade às exigências das regulamentações de emissões perante agentes certificadores atestando assim o desempenho dos sistemas de controle de emissões, o motor deve ser submetido a ciclos de teste pré-

estabelecidos em banco de provas. No caso de veículos diesel pesados, devido às características veiculares e diversidade dos sistemas de trem-de-força, tais teste são realizados em banco de provas de motores.

Ciclos de testes para banco de provas de motores são sequências de condições de velocidade e carga do motor executadas em um dinamômetro e podem ser categorizados em estacionários ou transientes (MAJEWSKI e KHAIR, 2006).

Os ciclos estabelecidos para demonstração de emissões de poluentes conforme a regulamentação Proconve P7 são os mesmos utilizados na regulamentação Euro V (ABNT, 2012):

- Ciclo Estacionário Europeu (ESC): constituído por uma sequência de 13 modos de operação em condição estacionária. O motor é submetido por um determinado tempo (4 min em marcha-lenta e 2 min para os outros modos) a condições de carga (tolerância de 2%) e rotação (tolerância de 50rpm). As emissões são medidas após estabilização do motor, dentro da tolerância de tempo (20s), e o cálculo final é ponderado de acordo com o fator peso de cada modo;
- Ciclo de Resposta à Carga (ELR): constituído por uma sequência de 3 modos de aceleração em carga, para 3 rotações diferentes, onde a fumaça (opacidade dos gases de escape) é medida no momento de aumento da carga. O valor final é ponderado de acordo com o fator peso para cada rotação;
- Ciclo Transiente Europeu (ETC): constituído por uma série de 1800 dados de carga e rotação a uma frequência de 1Hz, a qual o motor é submetido de forma a padronizar um perfil de operação. As vazões dos gases poluentes são medidas do início ao fim do teste, e o valor total acumulado é ponderado ao final em função do trabalho exercido pelo motor no ciclo total.

O ciclo ETC é considerado o principal ciclo implementado na regulamentação Euro V por submeter o motor a condições de operação dinâmicas veiculares. Foi desenvolvido pelo instituto FIGE (*Forschungsinstitut Geräusche und Erschütterungen*) em Aachen (Alemanha), baseado em medições de dados em ciclo real de veículos comerciais pesados conforme relatório “FIGE 104 05 316” de Janeiro de 1994 (DIESELNET, 2017). A figura 1 mostra graficamente os perfis de rotação e torque normalizados do motor no ciclo ETC, ou seja, porcentagem de rotação e torque em

função dos valores encontrados na curva de plena carga do motor para determinação do valores-alvo de rotação e torque a serem configurados no banco de provas.

Diferentes condições de condução são representadas em 3 partes do ciclo ETC, incluindo os trechos urbano, suburbano e rodovia. A duração total do ciclo é de 1800s, cada trecho com uma duração de 600s (MAJEWSKI e KHAIR, 2006):

- Primeira parte: representa o trecho urbano com velocidade máxima de 50 km/h, situações frequentes de parada, partida e marcha-lenta;
- Segunda parte: representa o trecho suburbano com um segmento inicial de aceleração acentuada. A velocidade média é de 72 km/h;
- Terceira parte: representa o trecho de rodovia com velocidade média de 88 km/h.

O desenvolvimento do ciclo ETC feito pelo instituto FIGE foi originalmente baseado em um ciclo para banco de provas de chassis (ciclo de condução com perfil de velocidade em função do tempo) que nunca foi regulamentado (MAJEWSKI e KHAIR, 2006), mostrado graficamente na figura 2 em perfil de velocidade do veículo.

Figura 2 – Ciclo Transiente de condução FIGE

Fonte: BARLOW et al. (2009)

Os ciclos para demonstração de emissões de poluentes conforme a regulamentação Euro VI foram estabelecidos de acordo com as diretrizes das regulamentações técnicas globais (GTRs) desenvolvidas pela Comissão Econômica Europeia das Nações Unidas (UN/ECE) com intuito de criar ciclos padrões mundiais (WHDC – Ciclos de teste harmonizados mundialmente) (STEVEN, 2001):

- Ciclo Estacionário Harmonizado (WHSC): assim como o ciclo ESC, também é constituído por 13 modos de operação estacionária, atualizados para melhor representação das condições reais de operação, com rampas de 20s para mudança entre modos e tempos específicos de estabilização. Porém, diferentemente de como é realizada no ciclo ESC, a medição das vazões dos gases poluentes neste novo ciclo é realizada de forma contínua, do início ao fim do ciclo (incluindo as rampas);
- Ciclo Transiente Harmonizado (WHTC): assim como o ciclo ETC, também é constituído por uma série de 1800 dados de carga e rotação a uma frequência de 1Hz, a qual o motor é submetido de forma a padronizar um perfil de operação. As vazões dos gases poluentes continuam a ser medidas do início ao fim do teste, e o valor total acumulado sendo ponderado ao final em função do trabalho exercido pelo motor no ciclo total.

Segundo Steven (2001), no novo ciclo transiente WHTC o motor exerce trabalho menor em comparação ao ciclo ETC dessa forma submetendo o sistema de controle de emissões a condições mais críticas de operação.

Também foi implementado o requisito de partida a frio para medição de emissões no ciclo WHTC, iniciando o teste com as temperaturas do óleo lubrificante, do líquido de arrefecimento e do sistema de pós-tratamento entre 20°C e 30°C. Para determinação do resultado final de emissões é realizada então a ponderação entre os resultados deste ciclo de partida a frio (utilizando um fator-peso de 1/7) e os resultados do ciclo de partida a quente, com motor já pré-condicionado (utilizando um fator-peso de 6/7).

A figura 3 mostra graficamente os perfis de rotação e torque normalizados do motor no ciclo WHTC.

O ciclo WHTC foi desenvolvido a partir do ciclo transiente veicular (WTV), baseado em dados coletados de 65 veículos comerciais pesados em condições reais de condução na Austrália, Europa, Japão e Estados Unidos. O WTV consiste em uma série de microviagens selecionadas a partir dessa base de dados e que representam estatisticamente suas diversas características operacionais como velocidade média, tempo de parada médio, número de paradas por quilômetro, potência positiva média do motor e aceleração positiva média (STEVEN, 2001). Um modelo matemático do sistema de trem-de-força foi criado para derivar, a partir dos dados de velocidade e potência normalizada do motor do ciclo WTV, os dados de rotação e carga do ciclo WHTC.

A duração do ciclo WTVC é de 1800s (mesma duração do WHTC), incluindo a representação de condução em trechos urbano, suburbano e rodoviário (DIESELNET, 2017):

- Primeira parte (900s) representa o trecho urbano com velocidade média de 21,3km/h e máxima velocidade de 66,2km/h, incluindo situações frequentes de parada, partida e marcha-lenta;
- Segunda parte (481s) representa o trecho suburbano com velocidade média de 43,6km/h e máxima velocidade de 75,9 km/h;
- Terceira parte (419s) representa o trecho de rodovia com velocidade média de 76,7km/h e máxima velocidade de 87,8km/h.

A figura 4 mostra graficamente o ciclo WTVC em perfil de velocidade do veículo em função do tempo.

Fonte: DIESELNET (2017)

Como mostrado, os ciclos de teste para banco de provas de motores são baseados em ciclos de condução que representam diversas condições de operação do veículo. O desenvolvimento dos ciclos ETC e WHTC foram baseados em uma gama abrangente de veículos comerciais pesados (vans, caminhões e ônibus), condições de tráfego e perfis de condução: o ciclo ETC representando as características

européias e o WHTC abordando condições de condução típicas na Austrália, Europa, Japão e Estados Unidos.

Porém por conta de sua abordagem tão abrangente, estes ciclos apresentam-se pouco representativos para análise de emissões de poluentes e consumo de combustível para aplicações específicas, como no caso de ônibus urbanos.

2.1.2 Ciclos de condução para ônibus urbanos

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., 2013).

De acordo com Majewski (2006), por ser o ciclo de condução um conjunto limitado de dados, é esperado que não se representem idealmente todas as possíveis condições de condução. Além disso, para Maciel Filho (2013) motores homologados em ciclos padronizados não apresentam necessariamente desempenho comparável em condições reais de condução, sendo este caso especialmente verdadeiro para ônibus urbanos que trabalham em velocidades baixas e cargas médias, portanto a importância de se desenvolver ciclos mais representativos dependendo do objetivo específico do estudo.

Neste sentido, para avaliação de emissões de poluentes e consumo de combustível de ônibus urbanos, internacionalmente foram desenvolvidos diversos ciclos representativos (SAE, 2002; NESAMANI e SUBRAMANIAN, 2011; WI et al., 2009). Destacam-se dentre estes ciclos para ônibus urbanos:

- O *Orange County Bus Cycle*: derivado de dados coletados na operação real de ônibus urbanos em Orange County, Califórnia, este ciclo reflete uma grande variedade de acelerações, desacelerações e operações de cruzeiro e representa a operação de ônibus em velocidades intermediárias (por exemplo, faixa de circulação exclusiva de ônibus);
- O *Manhattan Bus Cycle*: desenvolvido pela West Virginia University a partir de dados coletados em operação de ônibus na cidade de Nova Iorque, representando a operação de ônibus urbanos em baixas velocidades (trânsito compartilhado);

- O *Braunschweig Bus Driving Cycle*: desenvolvido pela Universidade Técnica de Braunschweig a partir de dados coletados em ônibus da cidade de Braunschweig (Alemanha) com intuito de avaliar emissões de poluentes de ônibus urbanos na Alemanha.

A figura 5 mostra graficamente os ciclos de ônibus urbanos mencionados.

Figura 5 – Exemplos de ciclo de condução de ônibus urbanos. (a) Orange County (Califórnia, EUA), (b) Manhattan (Nova Iorque, EUA) e (c) Braunschweig (Alemanha)

(a)

(b)

Fonte: BARLOW et al. (2009)

A tabela 2 mostra a comparação dos parâmetros operacionais para cada um dos ciclos apresentados, indicando as características específicas de suas aplicações.

Tabela 2 – Comparação de parâmetros operacionais entre os diversos ciclos de condução

Parâmetro	FIGE ETC	WTVC	Orange County	Manhattan	Braunschweig
Tempo Total [s]	1800	1800	1909	1089	1740
Nº Total de MVs [-]	6	12	31	20	25
Tempo Médio por MV [s]	300,0	150,0	61,6	54,5	69,6
Velocidade Máxima [km/h]	90,8	87,8	64,8	39,1	58,2
Velocidade Média [km/h]	59,0	40,1	19,9	11,0	22,6
Percurso [km]	29,5	20,0	10,5	3,3	10,9
Porcentagem de Tempo Parado [%]	6,7	12,9	16,6	27,1	16,6
Distância Média entre Paradas [m]	4910	1660	329,0	158,7	419,2

Fonte: Adaptado de BARLOW et al. (2009)

Em geral os principais ciclos de condução desenvolvidos para ônibus urbanos apresentam velocidades médias e máximas muito mais baixas e situações de parada muito mais frequentes em comparação aos ciclos WTVC e FIGE ETC. Verifica-se a melhora desses aspectos na implementação do ciclo de condução WTVC (a partir do qual foi derivado o ciclo WHTC), porém ainda não representativo da operação de ônibus urbanos.

2.2 O TRANSPORTE COLETIVO NA CIDADE DE SÃO PAULO

Para atender à demanda diária dos mais de 12 milhões de habitantes da cidade de São Paulo e demais habitantes da região metropolitana, todo o gerenciamento e planejamento do sistema de transporte público por ônibus é efetuado pela empresa São Paulo Transporte S.A. (SPTRANS, 2017). SPTrans é a denominação adotada em 8 de março de 1995 para a empresa municipal autárquica sucessora da Companhia Municipal de Transportes Coletivos (CMTC). O sistema é efetivamente operado por empresas e cooperativas privadas, constituindo 16 consórcios.

Além dos coletivos rodoviários, a cidade de São Paulo é servida por uma rede de transportes sobre trilhos, administrada e operada pela Companhia do Metropolitano (Metro) e pela Companhia Paulista de Trens Metropolitanos (CPTM), controladas pelo Governo Estadual. Para ligar São Paulo às demais regiões da cidade, um sistema metropolitano de ônibus, sob responsabilidade da Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de São Paulo (EMTU), também subordinado ao Governo Estadual, oferece uma extensa rede de linhas operadas por empresas privadas, um corredor intermunicipal em faixa segregada com linhas-tronco de ônibus a diesel e trólebus, além de um serviço rodoviário especial atendendo ao Aeroporto Internacional de Guarulhos.

2.2.1 Sistema municipal de transporte por ônibus

O sistema municipal de transporte por ônibus da cidade de São Paulo é composto por uma rede integrada, criada pela Secretaria Municipal de Transportes em conjunto com a SPTrans, a qual executa todo o gerenciamento e planejamento, incluindo ordens de serviço de operação, definição de trajetos, horários de operação e frota necessária para cada linha.

Com o intuito de facilitar seu gerenciamento, o atual modelo do transporte público municipal em São Paulo divide a cidade em nove áreas diferentes, sendo que para oito delas (1 - Noroeste, 2 - Norte, 3 - Nordeste, 4 - Leste, 5 - Sudeste, 6 - Sul, 7 - Sudoeste e 8 - Oeste) foram estabelecidos lotes para a distribuição das empresas e cooperativas que prestam os serviços de transporte por ônibus. A área 9 é a região central da cidade, que não possui lotes específicos, de forma que não há nenhuma empresa ou cooperativa que atue especificamente nestes limites, assim as linhas que

operam apenas dentro dos limites da área 9 são de responsabilidade de empresas das áreas 1 a 8, ficando normalmente a cargo da empresa responsável da área mais próxima do ponto considerado como o inicial da linha. A figura 6 ilustra as áreas e suas respectivas cores, sendo que os veículos seguem esse mesmo padrão de cores, de acordo com o “Manual de identidade visual”.

Figura 6 – Ilustração das 8 áreas do sistema municipal de transporte da cidade de São Paulo

Fonte: SPTRANS (2017)

Todas as áreas são servidas por dois subsistemas: Estrutural e Local. No subsistema Estrutural, as linhas são operadas por veículos de médio e grande porte (articulado, biarticulado, padron e básico) utilizando corredores e viários principais e são destinadas a atender altas demandas, integrando diversas regiões às áreas centrais da cidade de forma a complementar o sistema sobre trilhos. É a espinha dorsal do transporte coletivo. Os atuais consórcios e empresas responsáveis pelo subsistema estrutural de cada área são:

- Área 1 – Zona Noroeste (verde claro): Consórcio Bandeirante de Transporte (empresas: Santa Brígida e Gato Preto);
- Área 2 – Zona Norte (azul escuro): Consórcio Sambaíba Transportes Urbanos (empresa: Sambaíba);
- Área 3 – Zona Nordeste (amarelo): Consórcio Plus (empresas: VIP e Expandir);

- Área 4 – Zona Leste (vermelho): Consórcio Leste (Empresas: Ambiental e Express);
- Área 5 – Zona Sudeste (verde escuro): Consórcio Via Sul Transportes Urbanos (empresa: Via Sul);
- Área 6 – Zona Sul (azul claro): Consórcio Unisul (empresas: Cidade Dutra, Mobibrasil e Tupi);
- Área 7 – Zona Sudoeste (vinho): Consórcio Sete (empresas: VIP, Transkuba, Campo Belo e Gatusa);
- Área 8 – Zona Oeste (laranja): Consórcio Sudoeste de Transporte (empresas: Transpass e Gato Preto).

O subsistema Local alimenta a malha do subsistema Estrutural e atende aos deslocamentos internos nos subcentros com linhas operadas por ônibus comuns e de menor porte, como mini e midiônibus. Os atuais consórcios e empresas responsáveis pelo subsistema Local de cada área são:

- Área 1.0 – Zona Noroeste (verde claro): Consórcio Transnoroeste (empresas: Norte Buss e Spencer);
- Área 2.0 – Zona Norte (azul escuro): Consórcio Transnoroeste (empresas: Norte Buss e Spencer);
- Área 3.0 – Zona Nordeste (amarelo): Transunião Transportes (empresa: Transunião);
- Área 3.1 – Zona Nordeste (amarelo): Qualibus Qualidade em Transportes (empresa: Allibus);
- Área 4.0 – Zona Leste (vermelho): Pêssego Transportes (empresa: Pêssego);
- Área 4.1 – Zona Leste (vermelho): Allianz Transportes (empresa: Allibus);
- Área 5.0 – Zona Sudeste (verde escuro): Move SP Soluções em Mobilidade Urbana e Imperial Transportes Urbanos (empresas: Movebuss e Imperial);
- Área 6.0 – Zona Sul (azul claro): Transwolff Transportes e Turismo (empresa: Transwolff);
- Área 6.1 – Zona Sul (azul claro): A2 Transportes (empresa: A2 Transportes);
- Área 7.0 – Zona Sudoeste (vinho): Transwolff Transportes e Turismo (empresa: Transwolff);
- Área 8.0 – Zona Oeste (laranja): Auto Viação Transcap (empresa: Transcap);

- Área 8.1 – Zona Oeste (laranja): Alfa Rodobus (empresa: Alfa Rodobus).

Segundo informa o “Relatório de detalhamento do reajuste da tarifa” disponibilizado em Dezembro de 2016 (SPTRANS, 2017), o custo mensal do sistema de transporte da cidade de São Paulo no ano de 2016 foi de R\$679,1 milhões, distribuídos em 1.377 linhas (860 linhas no subsistema Estrutural e 517 linhas no subsistema Local) que transportaram durante todo o ano um total de 2.914.845.087 de passageiros (sendo 1.671.060.989 no subsistema Estrutural e 1.243.784.098 no subsistema Local), uma média mensal de 243.337.369 e média em dia útil de 9.648.286.

Em apresentação da nova rede de ônibus (SPTRANS, 2017) é apresentado um estudo da distribuição média da demanda de passageiros pelo horário de um dia útil pela qual é baseado o planejamento de viagens da rede (figura 7). Verifica-se que 58% das viagens ocorrem dentro do período total de pico (total de 8 horas diárias, compreendidas das 04:30 às 08:30 e das 16:00 às 20:00). Para o atendimento adequado nestes horários, é adicionada à rede regular (rede entrepicos funcional das 04:00 às 00:00) a rede de reforço de pico, com frota e linhas exclusivas. Complementar às redes entrepicos e à rede de reforço de pico, é disponibilizada a rede da Madrugada, funcional das 00:00 às 04:00 que corresponde a apenas 1% das viagens.

A SPTrans (2017) também divulgou a frota total do sistema, contendo 14.703 veículos (13.741 veículos na frota operacional programada mais 962 veículos na frota de reserva técnica), destes 1.592 possuindo sistema de ar-condicionado. Aproximadamente 60% dos veículos operam no subsistema estrutural e 40% no subsistema local. Cada veículo percorre em média 6.180 quilômetros por mês.

Os veículos são divididos por tipo de veículo (identificado principalmente pela carroceria), cada um com características individuais de capacidade de passageiros, sistema de trem-de-força (*powertrain*) e chassi. A tabela 3 mostra cada um dos tipos de veículo disponíveis na frota, suas respectivas capacidades de carga (quantidade máxima de passageiros), a porcentagem de veículos de cada tipo em relação à frota total e a porcentagem de veículos de uma mesma categoria equipados com sistema de ar-condicionado.

Tabela 3 – Tipos de veículo disponíveis na cidade de São Paulo

Tipo de Veículo	Ilustração	Capacidade de Passageiros	% da Frota	% c/ Ar Cond.
Miniônibus		41	24,72	5,66
Midiônibus		54	11,14	13,37
Básico		75	20,49	9,93
Padron		84	24,71	9,18
Padron 15m		102	1,40	14,78
Articulado		115	9,27	2,53
Articulado 23m		171	6,83	48,99
Biarticulado		194	1,44	0,00

Fonte: Adaptado de SPTRANS (2017)

A idade média da frota divulgada (SPTRANS, 2017) varia de acordo com o subsistema: Estrutural de 5 anos e 8 meses e Local de 5 anos. Como a idade máxima dos veículos é por volta de 10 anos, verifica-se que todos os veículos atendem às regulamentações de emissões Proconve P5 (similar à Euro III) e Proconve P7 (similar à Euro V). A figura 8 mostra a porcentagem de veículos que atendem a cada regulamentação.

Figura 8 – Demonstrativo da frota do sistema por fases do Proconve

Fonte: Adaptado de SPTRANS (2017)

O foco deste estudo é analisar o comportamento da operação real de veículos equipados com tecnologias de trem-de-força mais atuais (de acordo com a regulamentação Proconve P7) que representam os veículos fabricados a partir de Janeiro de 2012, identificados no “Relatório de detalhamento do reajuste da tarifa” (SPTRANS, 2017) por ano-modelo a partir de 2013. A figura 9 ilustra a quantidade de veículos de cada uma das categorias de chassi e as respectivas porcentagens de participação relativa à frota Proconve P7.

Figura 9 – Demonstrativo da frota Proconve P7 do sistema

Fonte: Adaptado de SPTRANS (2017)

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 METODOLOGIAS PARA CONSTRUÇÃO DE CICLOS DE CONDUÇÃO

Além de fundamentais para homologação e certificação de veículos, os ciclos de condução que representem de maneira adequada as condições reais de condução são imprescindíveis para que os resultados das estimativas de emissões de poluentes e consumo de combustível sejam os mais representativos possíveis (ROSO, 2016).

De uma forma geral, André (2004) destaca as principais etapas sequenciais do processo de desenvolvimento de ciclos de condução, adotadas também neste estudo.

1. Coleta de dados de condução em condições reais;
2. Tratamento e segmentação dos dados coletados;
3. Construção do ciclo de acordo com metodologia específica;
4. Avaliação e seleção do ciclo final.

Dai et al. (2008) elencam algumas das principais metodologias aplicadas à construção de ciclos utilizando-se dados coletados em condições reais de condução:

- Construção baseada em microviagens (*microtrips*): microviagens são definidas como toda a atividade de condução entre paradas sequenciais, incluindo tempo de parada inicial ou final. Para compor o ciclo, combinam-se microviagens, selecionando-as aleatoriamente ou utilizando método que busca uma melhoria incremental baseada em algum indicador de similaridade com um ciclo observado (AUSTIN et al., 1993);
- Construção baseada em segmentos: segmentos de viagem são definidos a cada mudança no tipo da via ou nível de serviço, sendo selecionados da mesma forma que as microviagens para compor o ciclo final (CARLSON e AUSTIN, 1997). Para Dai et al. (2008), por ser uma metodologia desenvolvida sob a perspectiva da engenharia de transportes, apresenta-se limitada quando relacionada a estudos de emissões;
- Método da classificação padronizada: através de métodos estatísticos são definidas sequências cinemáticas da condução (conjunto de variáveis que descrevem o comportamento dinâmico como duração da viagem, tempo de parada, distância percorrida, velocidade instantânea e aceleração). Os ciclos

de condução são construídos combinando-se sequências cinemáticas aleatoriamente (ANDRÉ et al., 1995). Dai et al. (2008) destacam que este método, apesar de abordar as diferentes condições cinemáticas de condução, não necessariamente diferencia as emissões associadas a essas atividades;

- Construção modal de ciclos: neste método a condução é vista como uma sequência de modos de operação como aceleração, desaceleração, cruzeiro ou parada, assim admite-se que a probabilidade de um evento modal qualquer ocorrer depende somente do modo do evento anterior (LIN e NIEMEIER, 2002);

A metodologia aplicada neste estudo é baseada no conceito de construção de microviagens por seleção sequencial do menor erro quadrático médio (RMSE) da distribuição de potência específica veicular (VSP), proposta e aplicada por Lai et al. (2013) para construção de ciclo específico para ônibus urbanos.

3.2 CONSTRUÇÃO DE CICLOS BASEADA EM DISTRIBUIÇÃO VSP

Apresentado inicialmente por Jimenez-Palacios (1999), o conceito de potência específica veicular é definido como a taxa instantânea de potência pela massa do veículo. Este parâmetro é útil para análises de dinamômetro de chassi e modelagem de emissões, podendo ser calculado a partir de medidas da velocidade, aceleração e inclinação da via, além de estimativas de arrasto aerodinâmico e resistência ao rolamento do veículo. A expressão geral otimizada por Zhai (2008) para o cálculo de VSP estimado para ônibus urbanos é dada pela equação (1):

$$VSP = v \times (a + g \times \sin(\phi) + \psi) + \zeta \times v^3 \quad (1)$$

Onde:

- VSP = Potência Específica Veicular (*Vehicle Specific Power*, kW/ton);
- v = Velocidade do veículo (m/s);
- a = Aceleração do veículo (m/s²);
- g = Aceleração da gravidade, 9,81m/s²;
- ϕ = Inclinação da via (em radianos);
- ψ = Termo do coeficiente de resistência à rolagem (adimensional);
- ζ = Termo do coeficiente de arrasto (m⁻¹).

Para Maciel Filho (2013), VSP é um parâmetro mais adequado do que velocidade ou aceleração para estimativa de emissões de poluentes e consumo de combustível e, conseqüentemente, para construção de ciclos de condução. A correlação das emissões de CO (monóxido de carbono), HC (hidrocarbonetos) e NOx (óxidos de nitrogênio) com VSP é maior do que com outros parâmetros comumente utilizados como velocidade, aceleração, potência absoluta ou consumo de combustível.

Jimenez-Palacios (1999) realizou testes de desempenho e emissões em banco de provas de chassis, submetendo um veículo leve de passageiros com motor ciclo otto ao ciclo FTP (*Federal Test Procedure*) e a um ciclo de alta potência (ciclo randômico de alta carga, estabelecido pelo próprio executor). A figura 10 mostra os gráficos comparativos do fluxo instantâneo de combustível e das emissões de NOx do motor (medidas em concentração) em função da aceleração do veículo e da potência específica veicular. É possível assim verificar a melhor adequação de VSP para estimativas de emissões e consumo de combustível, independente do ciclo testado.

Figura 10 – (a) Consumo de combustível e (b) Emissões de NOx do motor em função de aceleração do veículo e potência específica veicular

Fonte: JIMENEZ-PALACIOS (1999)

Maciel Filho (2013) destaca ainda que o conceito de VSP tem sido amplamente aplicado em diversos estudos, em diferentes formas e tem se mostrado um parâmetro útil para estimar emissões. A Agência Americana de Proteção ambiental (EPA) utiliza o conceito de VSP para desenvolvimento e aprimoramento do MOVES (*Motor Vehicle Emission Simulator*), sistema de modelagem de emissões de fontes móveis que possui alta aceitação tanto na indústria quanto no meio acadêmico.

Apesar de não ter sido desenvolvido especificamente para aplicação em veículos pesados, Zhai et al. (2008) propõem a aplicação do conceito de VSP para desenvolvimento de modelamento de taxas de emissões médias de poluentes em função de “caixas” (*Bin*) de VSP para ônibus urbanos movidos a óleo diesel, como ferramenta para estimativa de emissões para este tipo de veículo. O conceito também foi aplicado posteriormente por Lai et al. (2013), Maciel Filho (2013) e Yu et al. (2016). Lai et al. (2013) propõem a utilização de VSP para construção de ciclos de condução, baseando-se no critério de seleção de microviagens em função da similaridade da distribuição de VSP. Para avaliar a similaridade das microviagens com a amostra total de dados, é utilizado o erro quadrático médio (RMSE) da distribuição de VSP, definido pela equação 2:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=-20}^{i=20} (Bin_{MV,i} - Bin_{TOTAL,i})^2}{N-1}} \quad (2)$$

Onde:

- $RMSE$ = Erro quadrático médio;
- i = Identificador da “caixa” (*Bin*) entre -20 e 20kW/ton;
- $Bin_{MV,i}$ = Proporção de dados com valor de VSP dentro da “caixa” i na microviagem;
- $Bin_{TOTAL,i}$ = Proporção de dados com valor de VSP dentro da “caixa” i na amostra total de dados;
- N = Número total de “caixas” de VSP.

Lai et al. (2013) propõem ainda a sequência de etapas para seleção das microviagens que irão compor o ciclo final:

1. Ordenar as microviagens por ordem crescente segundo os valores de RMSE;

2. Adicionar sequencialmente as microviagens a partir daquelas com menor valor de RMSE até que a duração pré-determinada para o ciclo seja atingida.

Por fim, Maciel Filho (2013) propõe adicionar ao método de seleção proposto por Lai et al. (2013) um critério que analisa e considera também a composição do ciclo com relação ao tempo parado, a partir da distribuição de tempo parado, com intuito de construir um ciclo de condução mais representativo da amostra total de dados.

Dessa forma o cálculo da distribuição de VSP e consequentemente a análise de similaridade por RMSE foram realizados apenas para a proporção de dados das microviagens em condição de movimento (velocidade maior que 0).

4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

4.1 DETERMINAÇÃO DE PERFIL OPERACIONAL MÉDIO POR TIPO DE VEÍCULO

Exposta a complexidade do sistema de transporte de ônibus em São Paulo e para otimizar tanto as aquisições de dados reais em veículo quanto a construção dos ciclos o mais representativos possíveis, foi realizado um estudo para determinação do perfil de operação médio do sistema como ferramenta de seleção das linhas mais representativas a serem efetivamente monitoradas.

O estudo para determinação do perfil de operação médio consistiu em:

- Tabulação dos dados operacionais para todas as 1.377 linhas base da cidade e segmentação em função de categoria de veículo e filtragem por unificação de linhas com apenas diferenciação de identificação (com pequenas diferenciações em parte do trajeto e/ou pontos iniciais e finais), eliminação de linhas sem veículos Proconve P7 na frota, eliminação de linhas com dados inconsistentes e eliminação de linhas noturnas;
- Categorização dos dados tabulados em “Tipo de veículo / Subsistema”;
- Análise estatística dos principais índices operacionais com o intuito de determinar o perfil de operação médio do sistema para pré-seleção de 50 linhas, sendo 10 linhas de cada configuração “Tipo de veículo / Subsistema”;
- Análise topográfica das linhas pré-selecionadas como critério de eliminação de linhas muito ou pouco severas, que poderiam distorcer a análise dos dados para construção do ciclo, para seleção final das linhas potenciais (mais representativas);
- Negociação com as partes envolvidas (SPTrans, SPUrbanuss e empresas operadoras) e seleção de uma linha de cada configuração para aquisição de dados.

4.1.1 Análise estatística dos índices operacionais

Para determinação do perfil operacional médio foram adotadas como premissas as 5 principais características operacionais que mensuram impacto social, eficiência operacional e trânsito de todas as linhas do sistema de transporte, conforme descrito no “Relatório de detalhamento do reajuste da tarifa” da SPTrans (2017). Os índices

operacionais foram calculados para cada uma das 1.377 linhas, utilizando-se, em base mensal, os dados acumulados durante o ano de 2016:

- Índice de passageiros transportados por quilômetro operacional (IPK): relação entre a quantidade de passageiros transportados mensalmente e a quilometragem operacional mensal acumulada (diferença entre a quilometragem total acumulada e a quilometragem ociosa acumulada de todos os veículos de uma mesma linha);
- Índice de passageiros transportados por veículo e por dia (PVD): relação entre a quantidade de passageiros transportados mensalmente, frota total do mês (quantidade de veículos utilizados em um mês) e quantidade média de dias em um mês (30,5 dias, conforme premissas estabelecidas no “Relatório de detalhamento do reajuste da tarifa”);
- Percurso operacional diário médio por veículo (PDM): relação entre a quilometragem operacional diária acumulada e a frota total da linha;
- Velocidade operacional média: calculada como a divisão entre a quilometragem operacional acumulada e o tempo operacional (diferença entre tempo total e tempo ocioso);
- Extensão média das linhas: calculada em função dos dados disponibilizados de extensão das linhas em sentido bairro-centro e em sentido centro-bairro. O cálculo realizado considera a média entre ambos os valores.

Inicialmente todos esses dados foram tabulados de acordo com a respectiva linha (um total de 1.377 linhas base em todo o sistema municipal). Foram unificados os dados das linhas de atendimento com apenas diferenciações de identificação, resumindo a lista a um total de 1.091 linhas efetivamente disponíveis na cidade.

Foram então aplicados os seguintes filtros:

- Eliminação das linhas que não possuem veículos Proconve P7 disponíveis na frota;
- Eliminação das linhas especiais, por não constarem no “Relatório de detalhamento do reajuste da tarifa” (SPTRANS, 2017) e por apresentarem pequena participação na quantidade de passageiros transportados mensalmente (menos de 0,05% do total);

- Eliminação das linhas “609R”, “8809” e “3309” por apresentarem informações implausíveis de quantidade de passageiros transportados mensalmente;
- Eliminação das linhas noturnas, por apresentarem baixa representatividade e perfis de operação muito distintos que poderiam assim distorcer o estudo.

Devido às distintas características operacionais dos subsistemas (Local e Estrutural) e, principalmente, às distintas características técnicas dos veículos quanto à carroceria/chassi (dimensões externas, peso em ordem de marcha, peso bruto total, capacidade de carga de passageiros), ao motor (capacidade volumétrica, torque e potência) e à transmissão (relação de marchas/eixos, quantidade de marchas e acionamento automático ou manual), a lista de dados operacionais foi subdividida em tipo de veículo mais utilizado na linha e subsistema de operação mais significativo para o tipo de veículo (por exemplo, não seria representativo analisar a operação de um midiônibus operando em subsistema estrutural, pois o mesmo só é utilizado neste subsistema ocasionalmente para complementar o serviço). Assim os dados foram distribuídos em 5 tabelas:

- Miniônibus, subsistema Local;
- Midiônibus, subsistema Local;
- Básico, subsistema Estrutural;
- Padron, subsistema Estrutural;
- Articulado, subsistema Estrutural.

Com o objetivo de auxiliar tanto a organização quanto a interpretação da grande massa de dados disponibilizados e distribuídos nas 5 tabelas estabelecidas anteriormente, e assim determinar perfis médios, foram feitas análises com ferramenta estatística desenvolvida em *MS Excel* (exemplo mostrado na Figura 11). Os parâmetros estatísticos identificados como mais relevantes foram:

- Valor médio: como uma medida de tendência central de concentração dos valores. É calculado como a média aritmética da série de dados e neste estudo foi considerado como o valor alvo de cada um dos índices operacionais analisados para determinação do perfil médio de operação.
- Desvio padrão: como medida da variação ou dispersão existente em relação ao valor médio. Neste estudo o desvio padrão foi calculado pelas ferramentas

estatísticas do *MS Excel* e foi utilizado para criar uma faixa de valores em torno do valor médio para determinação dos dados que atendam ao perfil médio.

A figura 11 ilustra um exemplo da ferramenta estatística desenvolvida no *MS Excel* como exemplo do cálculo do valor médio e do desvio padrão do índice operacional “Velocidade operacional média” para as linhas da configuração Miniônibus/Subsistema Local.

Figura 11 – Exemplo da análise estatística da velocidade operacional média para as linhas da configuração Miniônibus/Subsistema Local

Fonte: Autor (2017)

Após determinação dos valores médios e desvios padrão de cada um dos 5 índices operacionais para cada uma das 5 configurações de “Tipo de veículo / Subsistema”, foi estabelecido um critério para pré-seleção das linhas, com o objetivo de eliminar as linhas cujos valores dos índices operacionais estivessem fora da faixa determinada pelo desvio padrão multiplicado por um fator (fator multiplicador). Os valores máximo e mínimo dessa faixa foram calculados de acordo com as equações 3 e 4:

$$Max = VM + (\sigma \times Fm) \quad (3)$$

$$Min = VM - (\sigma \times Fm) \quad (4)$$

Onde:

- Max = Valor máximo da faixa;
- Min = Valor mínimo da faixa;
- VM = Valor médio;
- σ = Desvio padrão;
- Fm = Fator Multiplicador.

O fator multiplicador foi reduzido manualmente e simultaneamente para todos os 5 índices de uma mesma configuração “Tipo de veículo / Subsistema” de forma a estreitar a faixa do desvio padrão até restarem 10 linhas, totalizando ao final 50 linhas. A tabela 4 indica as faixas que foram determinadas após o estudo:

Tabela 4 – Valores médios, máximos e mínimos da faixa de seleção dos índices operacionais para pré-seleção das linhas. (a) IPK, PVD e PDM, (b) Velocidade média e Extensão da linha

(a)									
Tipo de Veículo, Subsistema	IPK [Passageiros/km]			PVD [Passageiros/Veículo/Dia]			PDM [km/Dia]		
	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min
Miniônibus, Local	3,5	3,2	2,9	22,3	20,3	18,4	220,7	197,0	173,3
Midiônibus, Local	3,7	3,3	2,9	24,8	22,6	20,3	211,5	203,0	194,5
Básico, Estrutural	2,9	2,5	2,2	21,2	19,0	16,9	249,9	235,0	220,1
Padron, Estrutural	3,2	2,9	2,5	21,7	19,6	17,6	232,3	217,3	202,4
Articulado, Estrutural	5,1	4,1	3,1	37,1	30,3	23,4	247,1	226,5	205,9

(b)						
Tipo de Veículo, Subsistema	Velocidade Média [km/h]			Extensão da Linha [km]		
	Max	Med	Min	Max	Med	Min
Miniônibus, Local	16,1	15,1	14,2	13,3	11,3	9,2
Midiônibus, Local	16,3	15,1	14,0	14,5	12,2	9,9
Básico, Estrutural	17,1	16,2	15,2	18,5	15,6	12,6
Padron, Estrutural	16,5	15,5	14,4	18,7	16,3	13,8
Articulado, Estrutural	18,2	16,6	15,0	19,6	17,1	14,6

Fonte: Autor (2017)

Como resultado da análise estatística, a tabela 5 mostra as linhas pré-selecionadas como mais representativas para cada configuração “Tipo de veículo / Subsistema”, incluindo também as respectivas áreas de operação e as empresas operadoras.

Tabela 5 – Linhas pré-selecionadas como mais representativas para: (a) Subsistema Local com Miniônibus, (b) subsistema Local com Midiônibus, (c) subsistema Estrutural com ônibus Básico, (d) subsistema Estrutural com ônibus Padron e (e) subsistema Estrutural com ônibus Articulado

(a)			
Tipo de Veículo, Subsistema	Linhas mais representativas	Área	Empresa
Miniônibus, Local	121G10 - PQ NOVO MUNDO / METRO TUCURUVI	AREA 2	NORTE BUSS
	172Y10 - VILA CONSTANÇA / METRO BELEM	AREA 2	NORTE BUSS
	178610 - VILA ALBERTINA / METRO SANTANA	AREA 2	NORTE BUSS
	270710 - CHABILANDIA / METRO ITAQUERA	AREA 3	TRANSUNIÃO
	602810 - RIVIERA / SANTO AMARO	AREA 7	TRANSWOLFF
	604710 - JD LIDIA / SANTO AMARO	AREA 7	TRANSWOLFF
	605310 - JD ELLUS / TERM GRAJAU	AREA 6	TRANSWOLFF
	683710 - JD DAS PALMAS / TERM CAPELINHA	AREA 8	TRANSCAP
	701210 - PQ DO LAGO / TERM GUARAPIRANGA	AREA 7	TRANSWOLFF
	978910 - JD PAULISTANO / BARRA FUNDA	AREA 1	NORTE BUSS

(b)

Tipo de Veículo, Subsistema	Linhas mais representativas	Área	Empresa
Midiônibus, Local	172R10 - JD BRASIL / METRO BELEM	AREA 2	NORTE BUSS
	270410 - JD ROBRU / METRO ITAQUERA	AREA 3	TRANSUNIÃO
	271810 - VILA SILVIA / METRO PENHA	AREA 4	ALLIBUS
	304610 - VILA GUARANI / TATUAPE	AREA 4	ALLIBUS
	309910 - NOVE DE JULHO / JD DA CONQUISTA	AREA 5	MOVEBUSS
	375610 - BARRO BRANCO / METRO ITAQUERA	AREA 3	TRANSUNIÃO
	402910 - SAO MATEUS / VILA PRUDENTE	AREA 5	MOVEBUSS
	524M10 - MASC.MORAES / SHOP.ARICANDUVA	AREA 5	MOVEBUSS
	546T10 - VILA GUACURI / TERM STO AMARO	AREA 6	A2 TRANSPORTE
	807210 - PQ IPE / BUTANTA	AREA 8	TRANSCAP

(c)

Tipo de Veículo, Subsistema	Linhas mais representativas	Área	Empresa
Básico, Estrutural	176010 - COHAB ANTARTICA / SHOP C NORTE	AREA 2	SAMBAIBA
	202310 - CACHOEIRA / METRO TUCURUVI	AREA 2	SAMBAIBA
	400110 - ITAQUERA / TERM VILA CARRAO	AREA 3	VIP
	401410 - JD VILA CARRAO / TER VILA CARRAO	AREA 4	EXPRESS
	470610 - J MARIA ESTELA II / MT V MARIANA	AREA 5	VIA SUL
	472510 - VILA BRASILINA / SH C IBIRAPUERA	AREA 5	VIA SUL
	509110 - JD UBIRAJARA / METRÔ SÃO JUDAS	AREA 6	TUPI
	675M10 - CENTRO SESC / M JABAQUARA	AREA 6	MOBIBRASIL
	800410 - SANTA MONICA / TERM LAPA	AREA 1	SANTA BRIGIDA
	854810 - JD DOS CUNHAS / TERM LAPA	AREA 1	SANTA BRIGIDA

(d)

Tipo de Veículo, Subsistema	Linhas mais representativas	Área	Empresa
Padron, Estrutural	173210 - VILA SABRINA / METRO SANTA CECILIA	AREA 2	SAMBAIBA
	178L10 - LAUZANE PAULISTA / HOSP CLINICAS	AREA 2	SAMBAIBA
	212710 - JD BRASIL / METRO LIBERDADE	AREA 2	SAMBAIBA
	271M10 - PQ NOVO MUNDO / METRO SANTANA	AREA 2	SAMBAIBA
	470910 - JD. SÃO SAVERIO / METRO VL. MARIANA	AREA 5	VIA SUL
	700410 - JD JACIRA / TERM GUIDO	AREA 7	VIP
	741110 - USP / PÇA DA SE	AREA 8	GATO PRETO
	760010 - SHOP. MORUMBI / METRO ARMÊNIA	AREA 7	GATUSA
	861510 - PQ. DA LAPA / TERM. PQ. D. PEDRO II	AREA 8	GATO PRETO
	868610 - MANGALOT / LGO. DO PAISSANDÚ	AREA 1	SANTA BRIGIDA

(e)

Tipo de Veículo, Subsistema	Linhas mais representativas	Área	Empresa
Articulado, Estrutural	106A10 - METRO SANTANA / ITAIM BIBI	AREA 2	SAMBAIBA
	209P10 - CACHOEIRINHA / TERM PINHEIROS	AREA 2	SAMBAIBA
	510810 - JD CELESTE / TERM PQ D PEDRO II	AREA 5	VIA SUL
	607C10 - JD MIRIAM / ITAIM BIBI	AREA 6	MOBIBRASIL
	620010 - TERM STO AMARO / TERM BANDEIRA	AREA 7	GATUSA
	640310 - TERM JOAO DIAS / TERM PQ. D. PEDRO II	AREA 7	CAMPO BELO
	650010 - TERM STO AMARO / TERM BANDEIRA	AREA 7	CAMPO BELO
	650510 - TERM GUARAPIRANGA / TERM BANDEIRA	AREA 7	CAMPO BELO
	675I10 - TERM JOÃO DIAS / METRO S JUDAS	AREA 7	CAMPO BELO
	857P10 - TERM CAMPO LIMPO / METRO PARAISO	AREA 7	CAMPO BELO

Fonte: Autor (2017)

4.1.2 Análise topográfica

Para garantir a robustez dos dados coletados em veículo com a maior representatividade possível, foi feita uma análise topográfica das linhas pré-selecionadas, uma vez que o perfil topográfico do trajeto de uma linha pode ser utilizado como medida de severidade ao qual os veículos são submetidos, impactando diretamente no perfil operacional dos mesmos e distorcendo a análise posterior dos dados.

A análise topográfica foi feita utilizando-se o software *Google Earth* (GOOGLE EARTH, 2017). Os dados GPS da rota de cada uma das linhas foram obtidos através do *Google Maps* e convertidos para formato “kml” através do website *GPS Visualizer* (GPS VISUALIZER, 2017).

O *Google Earth* disponibiliza os dados de elevação (altitude em relação ao nível do mar) inicial, final, mínima, média e máxima, distância total percorrida, ganho/perda de elevação acumulado, rampa positiva máxima e média, rampa negativa mínima e média. Através do *Google Maps* foi ainda possível obter as informações de quantidade de paradas (pontos para embarque/desembarque de passageiros), possibilitando assim o cálculo da distância entre paradas, outra variável que pode determinar o nível de severidade de um trajeto.

A figura 12 ilustra um exemplo de análise topográfica feita através do software do *Google Earth* para a linha “121G10 - PQ NOVO MUNDO/JACANA” sentido “Bairro-Centro”.

Figura 12 – Exemplo de análise topográfica para linha “121G10 - PQ NOVO MUNDO/METRO TUCURUVI”, sentido “Bairro-Centro”

Fonte: Autor (2017)

Com todos os dados coletados e devidamente tabelados, pode-se comparar cada uma das linhas pré-selecionadas e novamente criar um critério de eliminação em função da severidade, eliminando linhas com severidade comparativamente muito alta ou muito baixa. Os principais critérios adotados foram:

- Ganho de elevação acumulada: quanto maior o valor, maior será o ganho de elevação no trajeto (apenas subidas) e consequentemente maior será a severidade, pois o veículo precisará de maior energia para percorrer o trajeto;
- Rampa (inclinação) positiva máxima: quanto maior o valor, maior será a inclinação da via em algum ponto do trajeto percorrido pelo veículo, consequentemente maior será a severidade;
- Rampa (inclinação) positiva média: quanto maior o valor, mais frequentes e/ou mais inclinadas serão as vias de um trajeto relativamente a sua extensão, consequentemente maior será a severidade;
- Distância média entre paradas: neste caso, quanto menor o valor, mais frequentemente o veículo será submetido à paradas, acelerações e desacelerações, assim maior será a severidade do trajeto.

A figura 13 mostra todos os dados topográficos tabelados para todas as linhas pré-selecionadas de cada configuração “Tipo de veículo / Subsistema”, com os valores médios de cada parâmetro (apenas informativos), destacando os valores

considerados de alta severidade (em vermelho) e de baixa severidade (em azul) e as linhas consequentemente eliminadas (em cinza) por apresentarem ao menos um desses parâmetros destacados.

Figura 13 – Tabulação dos dados obtidos através do software *Google Earth* para as linhas pré-selecionadas. (a) Miniônibus, subsistema Local, (b) Midiônibus, subsistema Local, (c) Básico, subsistema Estrutural, (d) Padron, subsistema Estrutural e (e) Articulado, subsistema Estrutural

(a)

LINHA	DIREÇÃO	ALTITUDE			DISTÂNCIA [km]	ELEVACÃO ACUMULADA		RAMPA				PARADAS		LEGENDA
		MÍN [m]	MÉD [m]	MÁX [m]		GANHO [m]	PERDA [m]	POSITIVA MÁX [%]	NEGATIVA MÍN [%]	POSITIVA MÉD [%]	NEGATIVA MÉD [%]	Nº TOTAL [-]	DISTÂNCIA MÉD [m]	
121G	B->C	728	759	806	10.7	206	201	13.5	13.5	3.3	3.8	32	302.3	Baixa Severidade
	C->B	729	761	806	9.3							34		
172Y	B->C	724	754	805	12.0	175	171	13.5	13.5	2.9	2.6	39	314.5	Alta Severidade
	C->B	725	755	805	11.9							37		
1786	B->C	733	782	830	9.1	264	257	18.6	16.7	5.2	5.0	28	325.9	Linha Eliminada
	C->B	736	783	830	9.2							28		
2707	B->C	750	774	833	12.8	205	205	9.8	9.8	2.8	2.8	35	365.7	
	C->B	750	774	833	12.8							35		
6028	B->C	725	762	811	12.0	222	223	17.1	17.2	3.4	3.5	24	422.4	
	C->B	725	762	811	12.5							34		
6047	B->C	729	764	816	10.6	209	209	15.8	15.8	3.8	3.8	28	378.6	
	C->B	729	764	816	10.6							28		
6053	B->C	754	777	815	9.7	206	210	12.3	12.6	4.2	4.2	27	381.6	
	C->B	754	778	816	9.8							24		
6837	B->C	744	768	801	11.2	236	234	18.7	16.7	3.8	4.2	33	327.3	
	C->B	744	767	802	10.4							33		
7012	B->C	738	795	859	11.8	335	335	23.7	23.7	4.7	4.7	20	590.0	
	C->B	738	795	859	11.8							20		
9789	B->C	726	759	888	12.8	282	280	23.0	23.0	3.3	3.4	40	322.2	
	C->B	725	758	888	13.3							41		
MÉDIAS		770			11.2	234	233	16.6	16.4	3.7	3.8	31	373.0	

(b)

LINHA	DIREÇÃO	ALTITUDE			DISTÂNCIA [km]	ELEVACÃO ACUMULADA		RAMPA				PARADAS		LEGENDA
		MÍN [m]	MÉD [m]	MÁX [m]		GANHO [m]	PERDA [m]	POSITIVA MÁX [%]	NEGATIVA MÍN [%]	POSITIVA MÉD [%]	NEGATIVA MÉD [%]	Nº TOTAL [-]	DISTÂNCIA MÉD [m]	
172R	B->C	725	744	766	14.0	132	134	7.8	8.5	1.7	1.7	49	296.8	Baixa Severidade
	C->B	725	743	766	13.6							44		
2704	B->C	743	774	811	10.3	179	175	12.1	11.7	2.9	3.1	33	355.0	Alta Severidade
	C->B	743	774	809	11.0							27		
2718	B->C	732	745	780	9.9	141	143	13.1	12.0	2.7	2.7	31	335.3	Linha Eliminada
	C->B	733	748	787	9.9							28		
3046	B->C	746	781	825	11.6	205	199	11.7	11.6	3.2	3.3	37	305.3	
	C->B	746	782	830	11.6							39		
3099	B->C	779	813	840	9.9	198	197	14.7	12.8	3.5	3.4	29	319.4	
	C->B	779	813	839	10.0							33		
3756	B->C	760	791	838	12.5	279	279	12.9	12.9	4.2	4.2	34	367.6	
	C->B	760	791	838	12.5							34		
4029	B->C	749	795	853	14.6	218	207	10.0	10.4	2.6	2.5	52	298.0	
	C->B	747	794	855	14.6							46		
524M	B->C	744	799	867	12.6	292	292	17.5	17.5	4.3	4.3	47	286.4	
	C->B	744	799	867	12.6							41		
546T	B->C	736	763	821	13.6	289	272	15.7	11.9	3.4	3.3	40	367.5	
	C->B	737	767	838	14.7							37		
8072	B->C	727	750	800	12.9	197	192	10.2	10.4	2.6	2.5	32	388.2	
	C->B	727	750	800	13.5							36		
MÉDIAS		776			12.3	213	209	12.6	12.0	3.1	3.1	37	331.9	

(c)

LINHA	DIREÇÃO	ALTITUDE			DISTÂNCIA [km]	ELEVACÃO ACUMULADA		RAMPA				PARADAS		LEGENDA
		MÍN [m]	MÉD [m]	MÁX [m]		GANHO [m]	PERDA [m]	POSITIVA MÁX [%]	NEGATIVA MÍN [%]	POSITIVA MÉD [%]	NEGATIVA MÉD [%]	Nº TOTAL [-]	DISTÂNCIA MÉD [m]	
1760	B->C	725	763	819	13.3	271	281	17.6	17.8	3.8	3.8	44	313.4	Baixa Severidade
	C->B	725	761	818	12.4							38		
2023	B->C	752	794	880	13.0	378	378	21.3	21.3	5.1	5.1	34	329.1	Alta Severidade
	C->B	752	794	880	13.0							45		
4001	B->C	739	778	823	12.7	243	228	10.3	10.8	3.4	3.2	40	303.5	Linha Eliminada
	C->B	739	780	822	13.1							45		
4014	B->C	745	777	837	12.4	217	209	14.7	15.0	3.1	3.0	41	317.3	
	C->B	745	777	837	13.3							40		
4706	B->C	747	778	820	15.7	290	290	10.3	10.3	3.3	3.3	56	273.0	
	C->B	747	778	820	15.7							59		
4725	B->C	753	784	820	12.4	238	238	11.4	11.4	3.3	3.3	45	285.1	
	C->B	753	784	820	12.4							42		
5091	B->C	736	799	848	17.4	341	341	15.0	15.0	3.8	3.8	50	322.2	
	C->B	736	799	848	17.4							58		
675M	B->C	728	769	822	18.4	359	351	12.8	13.2	3.7	3.8	53	352.4	
	C->B	728	767	823	18.6							52		
8004	B->C	723	751	784	14.1	279	264	12.9	14.1	3.6	3.9	42	340.2	
	C->B	722	750	784	13.8							40		
8548	B->C	721	784	881	16.9	375	375	25.0	25.0	3.7	3.7	43	367.4	
	C->B	721	784	881	16.9							49		
MÉDIAS		778			14.6	299	296	15.1	15.4	3.7	3.7	46	320.4	

(d)

LINHA	DIREÇÃO	ALTITUDE			DISTÂNCIA [km]	ELEVACÃO ACUMULADA		RAMPA				PARADAS		LEGENDA
		MÍN [m]	MÉD [m]	MÁX [m]		GANHO [m]	PERDA [m]	POSITIVA MÁX [%]	NEGATIVA MÍN [%]	POSITIVA MÉD [%]	NEGATIVA MÉD [%]	Nº TOTAL [-]	DISTÂNCIA MÉD [m]	
1732	B-->C	727	746	806	18.0	232	232	13.8	13.8	2.6	2.6	56	330.3	Baixa Severidade
	C-->B	727	746	806	18.0							53		
178L	B-->C	727	766	833	18.8	350	327	15.8	13.9	3.4	3.2	47	398.9	Alta Severidade
	C-->B	726	766	832	17.5							44		
2127	B-->C	727	747	806	16.3	183	183	11.1	11.1	2.1	2.1	48	346.8	Linha Eliminada
	C-->B	727	747	806	16.3							46		
271M	B-->C	728	746	792	13.5	186	183	14.2	14.3	2.5	2.8	42	312.5	
	C-->B	728	745	792	14.0							46		
4709	B-->C	748	789	821	11.9	233	245	15.6	11.6	3.5	3.4	33	339.2	
	C-->B	748	790	821	13.2							41		
7004	B-->C	728	783	851	17.4	410	407	14.4	14.0	4.1	4.0	45	353.0	
	C-->B	727	781	852	17.9							55		
7411	B-->C	724	759	832	13.4	237	265	16.7	22.9	2.9	3.0	26	531.5	
	C-->B	724	758	833	15.3							28		
7600	DADOS DE GPS INDISPONÍVEIS													
8615	B-->C	732	754	806	14.9	257	267	32.8	19.1	3.1	3.3	36	398.8	
	C-->B	731	749	781	17.0							44		
8686	B-->C	723	751	805	17.3	289	283	18.9	18.9	3.1	2.9	39	440.5	
	C-->B	722	745	770	15.3							35		
MÉDIAS		759			15.9	264	266	18.3	15.5	3.0	3.0	42	383.5	

(e)

LINHA	DIREÇÃO	ALTITUDE			DISTÂNCIA [km]	ELEVACÃO ACUMULADA		RAMPA				PARADAS		LEGENDA
		MÍN [m]	MÉD [m]	MÁX [m]		GANHO [m]	PERDA [m]	POSITIVA MÁX [%]	NEGATIVA MÍN [%]	POSITIVA MÉD [%]	NEGATIVA MÉD [%]	Nº TOTAL [-]	DISTÂNCIA MÉD [m]	
106A	B->C	725	751	835	15.8	279	288	23.7	21.2	3.4	3.5	33	494.9	Baixa Severidade
	C->B	726	752	834	13.4							26		
209P	B->C	722	743	806	16.9	193	200	11.2	10.1	2.1	2.0	37	443.6	Alta Severidade
	C->B	722	743	806	17.7							41		
5108	B->C	730	781	833	17.6	260	289	12.0	17.5	2.5	2.9	57	320.2	Linha Eliminada
	C->B	730	782	833	17.3							52		
607C	B->C	727	755	833	14.9	193	196	11.7	12.6	2.0	2.0	31	429.0	
	C->B	727	755	834	14.7							38		
6200	B->C	725	745	835	17.6	302	310	18.4	18.2	3.1	2.9	30	646.4	
	C->B	724	747	835	18.6							26		
6403	B->C	724	748	835	19.3	344	344	18.0	18.0	3.2	3.2	32	689.3	
	C->B	724	748	835	19.3							24		
6500	B->C	737	761	835	15.0	249	247	18.4	18.2	3.1	3.1	23	677.8	
	C->B	736	759	834	15.5							22		
6505	B->C	725	756	835	18.7	295	294	18.5	17.8	2.9	2.9	27	690.9	
	C->B	725	755	835	19.3							28		
675I	B->C	729	770	819	17.5	256	205	9.8	10.0	2.6	2.3	35	466.2	
	C->B	729	768	819	15.6							36		
857P	B->C	723	766	849	18.2	326	326	17.7	17.7	3.3	3.3	37	491.9	
	C->B	723	766	849	18.2							37		
MÉDIAS		758			17.1	270	270	15.9	16.1	2.8	2.8	34	535.0	

Fonte: Autor (2017)

Todas as linhas restantes desse estudo foram consideradas como as de maior potencial (mais representativas) para aquisição de dados.

4.1.3 Seleção das linhas para aquisição de dados

Após o resultado da análise topográfica, iniciou-se um longo processo de negociação com as partes envolvidas (SPTrans, SPUrbanuss e empresas operadoras envolvidas) das linhas restantes, e por fim foram selecionadas 5 linhas a serem efetivamente monitoradas, uma linha de cada configuração “Tipo de veículo / Subsistema”, conforme a tabela 6.

Tabela 6 – Linhas efetivamente selecionadas para a aquisição de dados

Tipo de Veículo, Subsistema	Linhas mais representativas	Área	Empresa
Miniônibus, Local	978910 - JD PAULISTANO / BARRA FUNDA	AREA 1	NORTE BUSS
Midiônibus, Local	402910 - SAO MATEUS / VILA PRUDENTE	AREA 5	MOVEBUSS
Básico, Estrutural	800410 - SANTA MONICA / TERM LAPA	AREA 1	SANTA BRIGIDA
Padron, Estrutural	868610 - MANGALOT / LGO DO PAISSANDÚ	AREA 1	SANTA BRIGIDA
Articulado, Estrutural	650010 - TERM STO AMARO / TERM BANDEIRA	AREA 7	CAMPO BELO

Fonte: Autor (2017)

A figura 14 mostra o trajeto e o perfil da topografia de cada uma das linhas selecionadas, a partir do ponto inicial em sentido “Bairro-Centro”.

Figura 14 – Trajeto e perfil topográfico das linhas selecionadas para aquisição de dados. (a) Miniônibus – Local – Linha: 9789, (b) Midiônibus – Local – Linha: 4029, (c) Básico – Estrutural – Linha: 8004, (d) Padron – Estrutural – Linha: 8686 e (e) Articulado – Estrutural – Linha: 6500

(b)

(c)

(d)

4.2 INSTRUMENTAÇÃO E AQUISIÇÃO DE DADOS EM VEÍCULO

As aquisições de dados em condições reais de condução e de operação em linha foram realizadas em um veículo de cada configuração “Tipo de veículo / Subsistema”, nas linhas selecionadas após o estudo anterior (determinação de perfil operacional médio, conforme Tabela 6 – Linhas efetivamente selecionadas para a aquisição de dados). Cada veículo foi disponibilizado pela respectiva empresa operadora por apenas um dia, assim com intuito de minimizar as diferentes condições de contorno (trânsito, demanda de passageiros e perfil de condução do motorista) às quais cada veículo seria submetido e garantir aquisição de dados robustos e confiáveis, foram adotadas certas premissas para preparação e realização das aquisições de dados, seleção do veículo e seleção do motorista:

- Realizar aquisição de dados apenas na parte da manhã e em duas viagens completas – uma viagem completa consiste em percorrer todo o trajeto nos sentidos bairro-centro e centro-bairro:
 - Iniciar a primeira viagem completa por volta das 06:00a.m., horário de maior oferta de início de viagens na parte da manhã (horário de pico) de acordo com a estimativa de distribuição da demanda de passageiros (SPTRANS, 2017);
 - Iniciar a segunda viagem completa por volta das 09:00a.m., horário de menor oferta de início de viagens na parte da manhã (horário de

entrepico) de acordo com a estimativa de distribuição da demanda de passageiros (SPTRANS, 2017).

- Não realizar as aquisições de dados em dias chuvosos e em datas próximas a feriados ou grandes eventos;
- Selecionar apenas veículos com tecnologia Proconve P7, com a menor quilometragem possível e equipados com sistema de ar-condicionado;
- Eliminar veículos que sofreram acidentes com danos ao chassi (devido à possíveis problemas de alinhamento) ou ao motor e que apresentem falhas presentes no sistema de diagnóstico ou vazamentos excessivos no sistema de ar comprimido;
- Abastecer completamente os tanques de combustível e Arla32 antes do início da primeira viagem;
- Selecionar apenas um motorista para realizar as duas viagens completas, com perfil de agressividade de condução médio – não muito agressivo e não muito passivo;
- Instruir o motorista quanto ao modo de direção: dirigir de forma usual e, no caso dos veículos com transmissão mecânica, observando atentamente o momento correto para troca de marchas.

A tabela 7 mostra as principais especificações técnicas de carroceria, transmissão e motor de cada veículo utilizado nos testes (dados coletados no manual de proprietário dos respectivos veículos). A tabela também mostra o ano modelo do veículo (dados coletados dos documentos dos veículos), a quilometragem inicial (indicada pelo tacógrafo antes do início da primeira viagem) e a existência de sistema de ar-condicionado em cada veículo.

Tabela 7 – Especificações técnicas dos veículos selecionados para aquisição de dados

Tipo de Veículo, Subsistema	Miniônibus Local	Midiônibus Local	Básico Estrutural	Padron Estrutural	Articulado Estrutural
Dados da Carroceria					
Modelo	Mascarello Micro Gran S3	Caio Apache VIP	Caio Apache VIP	Caio Millennium	Caio BRT Millennium
Tara [kg]	6700	9960	10800	12910	24540
PBT [kg]	9200	15000	17000	19500	37000
Altura externa [m]	2,99	3,26	3,26	3,40	3,50
Largura externa [m]	2,40	2,50	2,50	2,50	2,60
Capacidade de Passageiros [-]	33	53	77	89	174
Modelo do Chassi	Volksbus 9.160 OD	Mercedes OF-1519	Mercedes OF-1721	Volvo B290R	Mercedes O- 500UDA 3736
Dados da Transmissão					
Modelo / Marchas	ZF 5 marchas	MB G60 6 marchas	MB G85 6 marchas	Voith D864.5 6 marchas	Voith D884.5 4 marchas
Tipo de Acionamento	Manual	Manual	Manual	Automático	Automático
Dados do Motor					
Modelo	Cummins ISF	MB OM-924	MB OM-924	Volvo D7E	MB OM-457
Nº de Cilindros [-]	4	4	4	6	6
Volume [L]	3,8	4,8	4,8	7,2	12
Potência [cv] @rpm	162 @2600	185 @2200	208 @2200	290 @2100	354 @2000
Torque [Nm] @rpm	600 @1300-1700	700 @1200-1600	780 @1200-1600	1229 @1050-1650	1600 @1100
Sistema de Controle de Emissões	SCR	SCR	SCR	SCR	SCR
Outros Dados					
Ano Modelo	2017	2015	2012	2016	2017
Quilometragem inicial [km]	5.044	137.486	249.877	123.727	8.675
Possui sistema de ar-condicionado?	SIM	SIM	NÃO	SIM	SIM

Fonte: Autor (2018)

Verifica-se a larga abrangência de especificações dos veículos utilizados neste estudo, tanto de carroceria/chassi (dimensões externas, peso em ordem de marcha, peso bruto total e capacidade de carga de passageiros) quanto do sistema de trem-de-força, motor (capacidade volumétrica, torque e potência) e transmissão (relação de marchas/eixos, quantidade de marchas e acionamento automático ou manual), dessa forma atendendo aos requisitos da metodologia proposta e aos dados levantados no estudo de determinação de perfil operacional médio.

A tabela ainda destaca ao final a quilometragem comparativamente alta e a ausência do sistema de ar-condicionado no veículo do tipo Básico disponibilizado para o teste, por falta de oferta de veículos mais novos na frota da linha “800410 – Santa Monica / Terminal Lapa”.

A figura 15 mostra fotos dos veículos disponibilizados para a aquisição de dados.

Figura 15 – Veículos disponibilizados para aquisição de dados. (a) Miniônibus – Mascarello Micro Gran S3 – Volksbus 9.160 OD, (b) Midiônibus – Caio Apache VIP – Mercedes OF-1519, (c) Básico – Caio Apache VIP – Mercedes OF-1721, (d) Padron – Caio Millennium – Volvo B290R e (e) Articulado – Caio BRT Millennium – Mercedes O-500UDA 3736

(a)

(b)

Fonte: Autor (2018)

Assim como a preparação dos testes foi importante para garantir robustez e confiabilidade das aquisições de dados, a adequada seleção e instalação dos equipamentos e *softwares* também se mostrou essencial.

Para aquisição dos dados do motor/veículo foi utilizada a interface ES592 (ETAS), conectada ao barramento de comunicação CAN dos veículos. Os dados foram efetivamente registrados em um computador *laptop* conectado pela porta *ethernet* à ES592 e utilizando o *software* INCA, com arquivos de configuração “dbc” exclusivos para cada veículo, para interpretação dos dados coletados. Para aquisição dos dados GPS foi utilizado um celular Samsung S6, com aplicativo GPS-Logger instalado.

A figura 16 ilustra o esquemático de instalação dos equipamentos de aquisição de dados e a figura 17 mostra uma foto real dos equipamentos instalados em um dos veículos.

Fonte: Autor (2017)

Figura 17 – Foto da instalação dos equipamentos de aquisição de dados em um dos veículos

Fonte: Autor (2017)

Para realizar o cálculo adequado de VSP são utilizadas como variáveis de entrada inclinação da via, velocidade e aceleração do veículo. E para o desenvolvimento do ciclo de teste de banco de provas são necessárias as informações de torque e rotação do motor. Assim foi estabelecida uma lista com os principais parâmetros a serem identificados e registrados pelos equipamentos de aquisição de dados.

Os parâmetros mínimos a serem coletados pelo equipamento conectado ao barramento CAN do veículo e identificados com o arquivo “dbc” a uma taxa mínima de 10Hz são:

- Tempo de aquisição – em segundos (s);
- Pedal do Acelerador – em porcentagem (%);
- Rotação do motor – em rotações por minuto (rpm);
- Torque do motor – em porcentagem do máximo valor de torque (%);
- Velocidade do veículo – em quilômetros por hora (km/h).

Os parâmetros mínimos a serem coletados pelo equipamento GPS a uma taxa mínima de 1Hz (máxima precisão do equipamento) são:

- Tempo de aquisição – em segundos (s);
- Coordenadas de posicionamento (latitude e longitude) – em graus decimais (°).

Posteriormente (item 7) os dados coletados são devidamente tratados e sincronizados para cálculo tanto de VSP quanto dos parâmetros efetivamente utilizados para a construção dos ciclos.

Assim, com os trajetos já selecionados, veículos reservados e equipamentos configurados, as aquisições foram realizadas adequadamente e, como auxílio à organização dos dados, algumas informações foram registradas, conforme mostra a tabela 8. A temperatura ambiente foi registrada como o valor indicado pelo website Climatempo (2017) no momento de início de cada teste e a quantidade total de passageiros transportados foi registrada como a diferença entre o valor inicial e final de cada teste, indicados pela catraca do veículo.

Tabela 8 – Registro das informações coletadas durante a realização das aquisições de dados

	Pico		Entrepico	
	Bairro-Centro	Centro-Bairro	Bairro-Centro	Centro-Bairro
Miniônibus, Local – Linha: 978910 - Jd Paulistano/Barra Funda				
Data do teste	07.12.2017 (Quinta-Feira)			
Identificação do Teste	01	02	03	04
Horário de Início	6:29	7:25	8:49	9:44
Tempo Total [s]	3057	2888	3088	3404
Distância Total [m]	12547	13060	12555	13076
Total de Passageiros [-]	66	33	55	50
Temperatura ambiente [°C]	18	19	20	20
Midiônibus, Local – Linha: 402910 - São Mateus/Vila Prudente				
Data do teste	14.12.2017 (Quinta-Feira)			
Identificação do Teste	05	06	07	08
Horário de Início	6:32	7:40	8:40	9:48
Tempo Total [s]	3268	2769	3172	2977
Distância Total [m]	14841	14795	14804	14771
Total de Passageiros [-]	60	35	63	40
Temperatura ambiente [°C]	19	21	22	22
Básico, Estrutural – Linha: 800410 - Santa Monica/Term Lapa				
Data do teste	30.11.2017 (Quinta-Feira)			
Identificação do Teste	09	10	11	12
Horário de Início	6:52	8:13	8:55	10:02
Tempo Total [s]	4566	2300	3670	2301
Distância Total [m]	14304	14194	14292	14194
Total de Passageiros [-]	90	16	37	16
Temperatura ambiente [°C]	23	23	24	25
Padron, Estrutural – Linha: 868610 - Mangalot/Lgo do Paissandú				
Data do teste	23.11.2017 (Quinta-Feira)			
Identificação do Teste	13	14	15	16
Horário de Início	6:29	7:49	8:44	10:05
Tempo Total [s]	4658	2805	4620	2866
Distância Total [m]	17299	15084	17200	15381
Total de Passageiros [-]	112	63	50	27
Temperatura ambiente [°C]	23	25	26	26
Articulado, Estrutural – Linha: 650010 - Term Santo Amaro/Term Bandeira				
Data do teste	05.12.2017 (Terça-Feira)			
Identificação do Teste	17	18	19	20
Horário de Início	6:43	8:05	9:39	10:39
Tempo Total [s]	4485	4128	3218	3198
Distância Total [m]	14635	14975	14575	14929
Total de Passageiros [-]	130	72	66	95
Temperatura ambiente [°C]	23	25	26	27

Fonte: Autor (2018)

Foram realizadas ao todo 20 aquisições de dados, 4 aquisições para cada uma das 5 configurações “Tipo de veículo / Subsistema”:

- Horário de pico, sentido Bairro-Centro;
- Horário de pico, sentido Centro-Bairro;
- Horário de entrepico, sentido Bairro-Centro;
- Horário de entrepico, sentido Centro-Bairro.

Os dados GPS e CAN foram armazenados em planilhas distintas, resultando assim em 40 arquivos de medição, a serem submetidos ao tratamento de dados.

4.3 TRATAMENTO DOS DADOS E CÁLCULO DE VSP

Após realizadas as 20 aquisições de dados em condições reais de condução e como preparação para o procedimento de construção dos ciclos, foi necessário realizar o tratamento dos dados e o cálculo de VSP para cada uma. O fluxograma da figura 18 mostra todo o procedimento de tratamento dos dados até o cálculo de VSP.

Figura 18 – Fluxograma de tratamento dos dados coletados, integração das planilhas e cálculo de VSP

Fonte: Autor (2017)

4.3.1 Tratamento dos dados

O tratamento dos dados GPS foi iniciado utilizando-se o *Google Earth* para análise e reajuste das coordenadas coletadas. O primeiro reajuste foi realizado de forma a garantir que todos os pontos das coordenadas estejam efetivamente sobre as vias do trajeto, evitando a exportação posterior de dados de elevação errôneos. O segundo reajuste foi realizado para eliminar todos os pontos coletados em pontes sobre rios e em túneis, uma vez que o *GPS Visualizer* exporta os dados de elevação a nível do solo e nessas situações o valor de elevação é distorcido.

Após o reajuste das coordenadas de posicionamento, foram realizados a conversão e exportação dos dados de elevação através do *GPS Visualizer* e os cálculos de distância entre coordenadas e distância percorrida (acumulada). A distância entre coordenadas foi calculada de acordo com a equação 5 (MONICO, 2000).

$$\Delta S_{coord} = 1000 \times (6371 \times \cos^{-1}(\cos(\pi \times (90 - LAT_n) / 180) \times \cos((90 - LAT_{n-1}) \times \pi / 180) + \sin((90 - LAT_n) \times \pi / 180) \times \sin((90 - LAT_{n-1}) \times \pi / 180) \times \cos((LON_{n-1} - LON_n) \times \pi / 180)))$$
(5)

Onde:

- ΔS_{coord} = Distância entre coordenadas (m);
- LAT_n = Latitude atual (°);
- LAT_{n-1} = Latitude anterior (°);
- LON_n = Longitude atual (°);
- LON_{n-1} = Longitude anterior (°).

Para Forcetto e Junior (2017), as informações coletadas por meio de coordenadas GNSS (equipamento GPS) devem ser filtradas para se eliminar os ruídos que o próprio sistema introduz nas medições devido ao sinal dos satélites estarem sujeitos a sombras, reflexões e interferências atmosféricas, bem como o receptor pode apresentar variações nas coordenadas, por se alternar os satélites que estão a fornecer os dados de posição. Uma das recomendações para tratamento dos dados neste caso é o reagrupamento dos segmentos de distância percorrida em pacotes iguais ou superiores a 5m.

Conforme observado pelo *Google Earth*, a precisão de distância utilizada para gerar os dados topográficos é de 0,1% da distância total, sendo esta precisão também adotada neste estudo. Assim foi aplicado o reagrupamento através de interpolação dos dados em função da distância percorrida, aplicando uma variação fixa de distância de 0,1% em relação ao valor da distância total acumulada (por exemplo, se o valor de distância total acumulada de uma medição foi de 15.000m, então os dados da planilha GPS são reagrupados com uma distância fixa de 15m entre os pontos).

Assim foi possível realizar o cálculo de inclinação instantânea, como a relação entre a variação de elevação e a variação de distância entre dois pontos, e também o cálculo da média móvel da inclinação com 5 pontos, como ferramenta para suavização dos dados (FORCETTO e JUNIOR, 2017).

O tratamento dos dados CAN foi iniciado através do reagrupamento em base de tempo de todos os dados coletados, uma vez que os mesmos são disponibilizados em diferentes taxas de amostragem no barramento de comunicação veicular. O reagrupamento foi feito com interpolação dos dados a taxa de 10Hz, taxa suficiente tanto para cálculo e análise de VSP (MACIEL FILHO, 2013) quanto para prover precisão aos dados de rotação e torque do motor.

Em seguida foi aplicado o cálculo da média móvel com 5 pontos para o sinal de velocidade (FORCETTO e JUNIOR, 2017), resultando em um sinal de velocidade mais confiável e menos ruidoso para o cálculo de aceleração. Em seguida a aceleração também foi recalculada utilizando a média móvel com 5 pontos, como ferramenta de suavização do sinal.

Baseado no sinal suavizado de velocidade do veículo foi calculada a distância acumulada, gerando assim um sinal comum entre ambas as planilhas, GPS e CAN.

Por fim, a integração da planilha de dados GPS à planilha de dados CAN foi realizada utilizando-se como base comum exatamente a distância acumulada: calculada na planilha de dados GPS em função das coordenadas de posição e na planilha de dados CAN em função da velocidade do veículo, conforme descrito anteriormente. Dessa forma foi possível integrar os dados de elevação e inclinação através de cálculos de interpolação, já sincronizados em função da distância.

4.3.2 Cálculo de VSP

Com todas as variáveis necessárias para cálculo de VSP de acordo com a equação 1 (inclinação da via, velocidade e aceleração do veículo) já estabelecidas previamente, ainda foi necessária a estimativa das constantes do termo de resistência à rolagem e do termo de arrasto aerodinâmico, a serem estabelecidas para cada veículo testado.

A estimativa do termo do coeficiente de resistência à rolagem (identificado pelo símbolo ψ) mostra-se bastante complexa, devido às diversas influências tanto das características veiculares (resistência à rolagem dos pneus e atritos diversos) quanto das características do ambiente (coeficiente de resistência à rolagem do asfalto). Assim foi adotado neste estudo para todos os veículos o valor constante de 0,092, calculado por Zhai et al. (2008) em estudo de ônibus urbanos com características similares a um ônibus Básico. Também adotado por Maciel Filho (2013) e por Yu et

al. (2016), este valor do termo do coeficiente de resistência à rolagem é bem aplicável neste estudo como valor intermediário considerando-se as características dos veículos testados.

O termo do coeficiente de arrasto aerodinâmico (identificado pelo símbolo ζ) foi estimado de acordo com a equação 6 (GILLESPIE, 1992).

$$\zeta = \left(\frac{1}{2} \times Cd \times \rho \times A\right)/m \quad (6)$$

Onde:

- ζ = Termo do coeficiente de arrasto (m^{-1});
- Cd = Coeficiente de arrasto (adimensional);
- ρ = Densidade do ar (kg/m^3);
- A = Área frontal do veículo (m^2);
- m = Massa do veículo (kg).

O coeficiente de arrasto (Cd) adotado para todos os veículos foi de 0,6, conforme estimado por LAI et al. (2013) e YU et al. (2016) em seus estudos de ônibus urbanos.

Como valor de densidade do ar foi adotado um valor único para todas as medições, o qual foi calculado a partir da equação 7 (NICOLAZZI, 2017):

$$\rho = 0,4647 \times Patm/Tabs \quad (7)$$

Onde:

- $Patm$ = Pressão atmosférica (mmHg);
- $Tabs$ = Temperatura do ar absoluta (K).

Para a equação da densidade do ar foram adotados:

- Pressão atmosférica como valor único médio para todas as medições: 697,56mmHg (930mbar), correspondente à elevação de 760m em relação ao nível do mar, altitude média da cidade de São Paulo segundo Embrapa (2018);
- Temperatura do ar ambiente como um valor único para as medições de uma mesma configuração “Tipo de veículo / Subsistema”, sendo a média entre os

valores registrados na tabela 8 – Registro das informações coletadas durante a realização das aquisições de dados.

A área frontal de cada veículo foi calculada como o produto entre os valores de altura e de largura frontal das carrocerias. As dimensões das carrocerias foram obtidas nos manuais de proprietário de cada veículo (Tabela 7 – Especificações técnicas dos veículos selecionados para aquisição de dados).

A massa total de cada veículo foi adotada como a média entre os valores de PBT (peso bruto total) e de tara (massa do veículo vazio), valores também obtidos nos manuais de proprietário de cada veículo (Tabela 7 – Especificações técnicas dos veículos selecionados para aquisição de dados). Dessa forma foi possível compensar o cálculo de VSP devido as variações de carga dos veículos durante os trajetos (variação da quantidade de passageiros durante as viagens).

A tabela 9 mostra os valores calculados para massa e área frontal de cada tipo de veículo testado, os valores médios de temperatura ambiente das medições de cada veículo, os valores calculados para a densidade do ar e os resultados finais do cálculo do termo do coeficiente de arrasto (ζ).

Tabela 9 – Registro dos dados utilizados para cálculo do termo do coeficiente de arrasto para cada veículo testado

	Miniônibus	Midiônibus	Básico	Padron	Articulado
Tara [kg]	6700	9960	10800	12910	24540
PBT [kg]	9200	15000	17000	19500	37000
Massa Média [kg]	7950	12480	13900	16205	30770
Altura externa [m]	2,99	3,26	3,26	3,40	3,50
Largura externa [m]	2,40	2,50	2,50	2,50	2,60
Área Frontal [m²]	7,18	8,15	8,15	8,50	9,10
Temperatura ambiente [°C]	19,25	21,00	23,75	25,00	25,25
Densidade do ar [kg/m³]	1,109	1,102	1,092	1,087	1,086
Termo do coeficiente de arrasto [m⁻¹]	0,000300	0,000216	0,000192	0,000171	0,000096

Fonte: Autor (2018)

Por fim foram calculados tanto os valores de VSP quanto a aceleração do veículo baseada em VSP, a última como resultado dos valores de VSP divididos pela velocidade do veículo.

Como resultado do tratamento de dados e do cálculo de VSP, foram estabelecidas planilhas únicas para cada uma das 20 aquisições como registrado na tabela 8. A

figura 19 ilustra um exemplo de uma planilha resultante do procedimento de tratamento de dados.

Figura 19 – Exemplo da planilha final com dados GPS e CAN integrados e valores de VSP e aceleração por VSP calculados

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Tempo	Pedal Acelerador	Rotação Motor	Torque Motor	Velocidade 1	Velocidade 2	Aceleração	Distância	Elevação	Inclinação	VSP	Aceleração VSP
2	s	%	U/min	%	km/h	m/s	m/s ²	m	m	%	kW/ton	m/s ²
9982	998.0	0.0	1267	0.0	25.8	7.2	-0.21	24558.7	795.0	1.28	0.2	0.03
9983	998.1	0.0	1263	0.0	25.8	7.2	-0.20	24558.7	795.0	1.22	0.2	0.03
9984	998.2	0.5	1258	0.0	25.7	7.1	-0.19	24558.7	795.1	1.17	0.2	0.03
9985	998.3	7.2	1257	0.0	25.6	7.1	-0.19	24558.7	795.1	1.11	0.2	0.02
9986	998.4	10.0	1260	0.0	25.6	7.1	-0.18	24558.7	795.1	1.05	0.2	0.03
9987	998.5	14.4	1263	0.0	25.5	7.1	-0.16	24558.7	795.1	1.00	0.3	0.04
9988	998.6	16.8	1241	0.0	25.4	7.1	-0.16	24558.7	795.2	0.94	0.3	0.04
9989	998.7	17.2	1255	0.0	25.4	7.1	-0.16	24558.7	795.2	0.89	0.2	0.03
9990	998.8	17.6	1252	0.0	25.4	7.0	-0.14	24558.7	795.2	0.83	0.3	0.05
9991	998.9	17.6	1230	0.0	25.3	7.0	-0.10	24558.7	795.2	0.77	0.6	0.08
9992	999.0	16.0	1238	0.0	25.3	7.0	-0.07	24558.7	795.3	0.71	0.7	0.10
9993	999.1	18.8	1250	0.0	25.2	7.0	-0.06	24558.7	795.3	0.64	0.8	0.11
9994	999.2	18.8	1238	0.0	25.3	7.0	-0.02	24558.7	795.3	0.58	1.0	0.15
9995	999.3	18.8	1228	0.0	25.4	7.0	0.02	24558.7	795.3	0.51	1.3	0.18
9996	999.4	22.1	1238	2.2	25.3	7.0	0.05	24558.7	795.3	0.44	1.4	0.20
9997	999.5	29.7	1261	17.0	25.4	7.1	0.09	24559.8	795.3	0.38	1.7	0.23
9998	999.6	36.8	1307	31.3	25.5	7.1	0.16	24562.5	795.3	0.31	2.1	0.29
9999	999.7	38.8	1243	37.9	25.5	7.1	0.20	24560.4	795.4	0.24	2.3	0.33
10000	999.8	39.2	1223	39.6	25.6	7.1	0.20	24568.2	795.4	0.17	2.3	0.33
10001	999.9	41.6	1287	42.3	25.8	7.2	0.22	24574.7	795.4	0.10	2.4	0.34
10002	1,000.0	43.6	1285	47.3	25.9	7.2	0.30	24580.8	795.4	0.04	2.9	0.41
10003	1,000.1	44.4	1260	48.9	26.0	7.2	0.34	24583.5	795.4	-0.03	3.2	0.44
10004	1,000.2	44.4	1288	48.4	26.1	7.2	0.35	24588.9	795.5	-0.10	3.3	0.45
10005	1,000.3	44.8	1307	49.5	26.3	7.3	0.40	24601.2	795.5	-0.17	3.6	0.49
10006	1,000.4	45.2	1295	49.5	26.5	7.4	0.44	24609.9	795.5	-0.24	3.9	0.53
10007	1,000.5	46.4	1310	52.2	26.6	7.4	0.45	24616.9	795.5	-0.31	3.9	0.53
10008	1,000.6	48.0	1336	53.8	26.9	7.5	0.47	24628.7	795.5	-0.38	4.1	0.54
10009	1,000.7	48.4	1335	54.9	27.1	7.5	0.53	24640.9	795.5	-0.46	4.4	0.59
10010	1,000.8	48.4	1335	54.9	27.1	7.5	0.53	24650.3	795.5	-0.55	4.7	0.63

Fonte: Autor (2018)

4.4 CONSTRUÇÃO DOS CICLOS

Antes do processo de construção dos ciclos, foram estabelecidas certas premissas seguindo as tendências dos ciclos de emissões consolidados e propostas da literatura:

- Cálculo de RMSE para seleção de microviagens realizado apenas em condições de movimento (velocidade do veículo maior que 0km/h) e estabelecimento dos eventos de parada (marcha-lenta) em função da proporção e da distribuição de tempo parado da amostra total, conforme sugerido por Maciel Filho (2013);
- Estabelecimento de duração máxima dos ciclos em 1800s, somando-se o tempo total dos ciclos de horário de pico e de entrepicos, incluindo tempo parado (marcha-lenta) inicial de 15s e final de 20s, conforme estabelecido para no desenvolvimento do ciclo WHTC (STEVEN, 2001);
- Construção dos ciclos com 58% (1044s) dos dados coletados em horário de pico e 42% (756s) dos dados coletados em horário entrepico, conforme estimativa de distribuição de quantidade de viagens e demanda de passageiros, mostrado na Figura 7 (SPTRANS, 2017).

Todo o processo de construção dos ciclos (ciclos de condução para horários de pico e entrepicos, ciclo de condução unificado e ciclo de teste para banco de provas de motores para cada tipo de veículo) é mostrado pelo fluxograma da figura 20, seguindo

metodologia proposta pela literatura (item 3.1 – Construção de ciclos de condução baseada em distribuição VSP), iniciando pela construção dos ciclos de condução para os horários de pico e entrepicos, em seguida a integração dos ciclos para estabelecimento de ciclos de condução únicos para cada tipo de veículo e por fim a derivação dos dados do motor para construção dos ciclos de teste para banco de provas de motores.

Figura 20 – Fluxograma do processo de construção dos ciclos

Fonte: Autor (2018)

4.4.1 Construção dos ciclos de condução

O ciclo de condução consiste em uma série de dados de velocidade do veículo em função do tempo, construído a partir da seleção de microviagens conforme metodologia pré-estabelecida neste estudo com intuito de representar condições reais de operação do veículo servindo como base para padronização de testes tanto em vias públicas quanto em banco de provas de chassis.

Inicialmente foram construídos ciclos de condução exclusivos para cada horário: um a partir dos dados coletados em horário de pico e outro a partir dos dados coletados em horário entrepicos, seguindo os seguintes procedimentos:

1. Integração de planilhas com dados coletados em horário de pico: Sentido Bairro-Centro e Centro-Bairro;
2. Integração de planilhas com dados coletados em horário de entrepico: Sentido Bairro-Centro e Centro-Bairro;
3. Classificação do estado do veículo:
 - a. Parado: velocidade do veículo nula (0 km/h);
 - b. Em movimento: velocidade do veículo maior do que 0 km/h.
4. Estabelecimento da identificação para as microviagens como numeração sequencial;
5. Cálculo das estatísticas da amostra total de dados:
 - a. Proporção de tempo total em movimento (%);
 - b. Distribuição de faixas de tempo parado (exemplo de análise mostrado na figura 21).

Figura 21 – Exemplo de análise da distribuição de tempo parado para a amostra total de dados do Miniônibus em horário de pico

Fonte: Autor (2018)

6. Cálculo da distribuição de VSP para os dados filtrados apenas em movimento (exemplo de análise mostrado na figura 22):
 - a. Para a amostra total de dados;
 - b. Para cada microviagem.

Figura 22 – Exemplo de análise da distribuição de VSP para a amostra total de dados filtrados “em movimento” do Miniônibus em horário de pico

7. Cálculo do RMSE para cada microviagem (exemplo da planilha de cálculos de RMSE mostrado na figura 23);

Figura 23 – Exemplo da planilha de cálculos de RMSE para análise dos dados do Miniônibus em horário de pico

VSP	AMOSTRA TOTAL	MV1		MV2		MV3		MV4		MV5		MV6	
	DISTRIBUIÇÃO	DISTR.	ERROR^2	DISTR.	ERROR^2	DISTR.	ERROR^2	DISTR.	ERROR^2	DISTR.	ERROR^2	DISTR.	ERROR^2
-20	0.02	0.00	0.000	0.00	0.000	1.17	1.336	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000
-19	0.03	0.00	0.001	0.00	0.001	1.17	1.308	0.00	0.001	0.00	0.001	0.00	0.001
-18	0.02	0.00	0.000	0.00	0.000	0.50	0.236	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000
-17	0.04	0.00	0.002	0.00	0.002	2.18	4.555	0.00	0.002	0.00	0.002	0.00	0.002
-16	0.03	0.00	0.001	0.00	0.001	1.17	1.313	0.00	0.001	0.00	0.001	0.00	0.001
-15	0.09	0.00	0.008	0.00	0.008	1.34	1.559	0.00	0.008	2.03	3.777	0.00	0.008
-14	0.12	0.00	0.013	0.00	0.013	1.34	1.500	0.00	0.013	1.45	1.790	0.00	0.013
-13	0.22	0.76	0.297	0.00	0.047	3.02	7.832	0.00	0.047	2.03	3.306	0.00	0.047
-12	0.40	1.90	2.252	0.00	0.163	4.19	14.314	0.00	0.163	2.33	3.692	0.00	0.163
-11	0.53	2.19	2.767	0.00	0.278	3.69	9.974	0.00	0.278	1.16	0.404	0.00	0.278
-10	0.84	3.05	4.886	0.00	0.701	3.35	6.314	0.00	0.701	1.16	0.106	0.00	0.701
-9	1.24	9.24	63.946	0.00	1.541	3.35	4.446	0.00	1.541	2.91	2.774	0.00	1.541
-8	1.21	6.10	23.887	0.00	1.459	5.36	17.242	0.00	1.459	5.52	18.623	1.17	0.001
-7	1.71	4.67	8.738	0.17	2.367	7.04	28.351	0.00	2.926	9.88	66.800	5.09	11.407
-6	2.30	3.05	0.566	2.41	0.013	5.19	8.395	0.00	5.268	9.01	45.110	3.72	2.025
-5	2.66	0.57	4.356	2.58	0.006	7.71	25.469	0.00	7.068	2.33	0.111	7.44	22.828
-4	3.37	2.29	1.177	1.20	4.691	5.53	4.652	0.00	11.362	7.27	15.185	6.85	12.101
-3	4.83	1.33	12.251	0.69	17.181	12.06	52.227	0.00	23.363	6.40	2.439	7.05	4.891
-2	6.20	3.52	7.188	1.03	26.752	8.88	7.144	0.00	38.501	6.69	0.232	7.24	1.073
-1	8.38	5.14	10.463	3.27	26.084	7.04	1.802	55.26	2198.270	10.47	4.358	12.92	20.597
0	13.09	2.10	120.793	21.86	76.966	2.51	111.794	44.74	1001.786	13.08	0.000	18.59	30.307
1	10.44	1.43	81.280	19.45	81.092	7.87	6.612	0.00	109.080	9.01	2.052	12.92	6.109
2	9.40	2.95	41.509	9.64	0.059	2.68	45.092	0.00	88.269	3.49	34.890	8.02	1.881
3	8.27	9.05	0.606	13.94	32.175	1.68	43.483	0.00	68.379	3.78	20.161	4.70	12.763
4	7.01	9.90	8.389	11.53	20.461	0.00	49.119	0.00	49.119	0.00	49.119	0.78	38.759
5	4.90	7.33	5.905	11.19	39.493	0.00	24.042	0.00	24.042	0.00	24.042	1.37	12.485
6	3.52	6.76	10.495	1.03	6.198	0.00	12.406	0.00	12.406	0.00	12.406	1.57	3.829
7	2.35	3.33	0.971	0.00	5.514	0.00	5.514	0.00	5.514	0.00	5.514	0.59	3.101
8	1.80	6.10	18.452	0.00	3.239	0.00	3.239	0.00	3.239	0.00	3.239	0.00	3.239
9	1.62	5.14	12.416	0.00	2.622	0.00	2.622	0.00	2.622	0.00	2.622	0.00	2.622
10	1.07	1.24	0.028	0.00	1.146	0.00	1.146	0.00	1.146	0.00	1.146	0.00	1.146
11	0.99	0.86	0.019	0.00	0.987	0.00	0.987	0.00	0.987	0.00	0.987	0.00	0.987
12	0.52	0.00	0.270	0.00	0.270	0.00	0.270	0.00	0.270	0.00	0.270	0.00	0.270
13	0.33	0.00	0.112	0.00	0.112	0.00	0.112	0.00	0.112	0.00	0.112	0.00	0.112
14	0.20	0.00	0.039	0.00	0.039	0.00	0.039	0.00	0.039	0.00	0.039	0.00	0.039
15	0.04	0.00	0.002	0.00	0.002	0.00	0.002	0.00	0.002	0.00	0.002	0.00	0.002
16	0.05	0.00	0.002	0.00	0.002	0.00	0.002	0.00	0.002	0.00	0.002	0.00	0.002
17	0.06	0.00	0.004	0.00	0.004	0.00	0.004	0.00	0.004	0.00	0.004	0.00	0.004
18	0.05	0.00	0.003	0.00	0.003	0.00	0.003	0.00	0.003	0.00	0.003	0.00	0.003
19	0.04	0.00	0.002	0.00	0.002	0.00	0.002	0.00	0.002	0.00	0.002	0.00	0.002
20	0.02	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000
RMSE		3.291		2.929		3.515		9.446		2.817		2.183	

Fonte: Autor (2018)

8. Ordenação das microviagens por ordem crescente segundo os valores de RMSE;
9. Cálculo do tempo em movimento (de acordo com a proporção da amostra total) como valor-alvo para a seleção das microviagens;
10. Seleção das microviagens, adicionando sequencialmente a partir daquelas com menor valor de RMSE até que o valor-alvo de tempo em movimento (determinado anteriormente) seja atingido;
11. Estabelecimento de tempo de parada de 15s no início e 20s no final (de acordo com premissas estabelecidas);
12. Cálculo do tempo total de cada ciclo a ser construído, como valor-alvo para estabelecimento das condições de parada, conforme premissas pré-estabelecidas:
 - a. Duração do ciclo para horário de Pico: 58% de 1800s = 1044s;
 - b. Duração do ciclo para horário Entrepico: 42% de 1800s = 756s.
13. Estabelecimento das condições de parada (marcha-lenta) entre microviagens até que o valor-alvo do tempo total de cada ciclo (determinado anteriormente) seja atingido, atendendo aos critérios de distribuição de faixas de tempo da amostra total (exemplo da planilha de seleção de microviagens para construção dos ciclos mostrado na figura 24);

Figura 24 – Exemplo da planilha de seleção de microviagens para construção de ciclo do Miniônibus em horário de pico

MICROVIAGENS	RMSE	TEMPO EM MOVIMENTO	TEMPO PARADO
74	0.815	158.8	15.0
50	1.098	77.2	19.0
78	1.174	131.3	91.0
93	1.307	27.6	46.0
66	1.312	152.8	19.0
62	1.322	158.6	68.0
14	1.349	40.7	19.0
			20.0
TEMPO TOTAL		1044.0	

Fonte: Autor (2018)

Por fim, os ciclos são integrados em sequência, iniciando com o ciclo para horário de pico (formando os 1044s iniciais do ciclo proposto) e em seguida o ciclo para horário entrepicos (formando os 756s finais do ciclo proposto), sendo dessa forma estabelecidos os ciclos de condução únicos para cada tipo de veículo.

4.4.2 Construção dos ciclos de teste para banco de provas de motores

O ciclo de teste para banco de provas de motores em função do tempo consiste em uma série de dados de torque e rotação do motor normalizados de acordo com a norma NBR 15634 (ABNT, 2012), que estabelece as diretrizes dos ciclos de teste para demonstração de emissões de poluentes para a regulamentação Proconve P7 (ciclos ESC, ELR e ETC). Porém como este estudo aborda o desenvolvimento de um ciclo de teste transiente, foram consideradas apenas as diretrizes do ciclo ETC.

Para construção destes ciclos, os valores de torque e rotação do motor foram derivados dos ciclos de condução já estabelecidos anteriormente, dessa forma representando fielmente o comportamento do motor em tais condições.

O torque normalizado para cada respectiva rotação real (*Load at current speed*), conforme descrito na norma NBR 15634, já é disponibilizado adequadamente no barramento CAN, não sendo assim necessários cálculos adicionais.

A rotação do motor é disponibilizada em rotações por minuto (rpm) e por este motivo é necessário o cálculo de normalização de acordo com a equação 8 (ABNT, 2012).

$$N_{norm} = (N_{real} - N_{marcha\ lenta}) \times 100 / (N_{ref} - N_{marcha\ lenta}) \quad (8)$$

Onde:

- N_{norm} = Rotação do motor normalizada (%);
- N_{real} = Rotação do motor (rpm);
- $N_{marcha\ lenta}$ = Rotação de marcha lenta (rpm);
- N_{ref} = Rotação de referência (rpm);
 - $N_{ref} = N_{lo} + 0,95 \times (N_{hi} - N_{lo})$;

Onde:

- N_{lo} = Rotação inferior, menor rotação onde ocorre 50% da potência máxima declarada (rpm);
- N_{hi} = Rotação superior, rotação mais elevada onde ocorre 70% da potência máxima declarada (rpm).

A rotação real é a variável contida nos dados coletados a ser convertida para rotação normalizada. A rotação de marcha lenta é um valor constante, obtido também através

dos dados coletados em situações de veículo parado e transmissão em posição neutra. A rotação de referência é uma constante calculada em função das rotações inferior e superior, de acordo com a figura 25.

A tabela 10 mostra para cada veículo utilizado nos testes os registros da rotação de marcha lenta (obtida pela aquisição de dados), rotação inferior e superior (estimadas a partir da curva de desempenho disponível em manual de proprietário) e da rotação de referência calculada a partir desses dados.

Tabela 10 – Registro dos dados utilizados para cálculo da rotação de referência para cada veículo testado

	Miniônibus	Midiônibus	Básico	Padron	Articulado
Motor	Cummins ISF 4C 3.8L 162cv	MB OM-924 4C 4.8L 185cv	MB OM-924 4C 4.8L 208cv	Volvo D7E 6C 7.2L 290cv	MB OM-457 6C 12L 354cv
Marcha lenta [rpm]	750	750	610	700	650
Rotação superior N_{hi} [rpm]	2700	2650	2650	2250	2100
Rotação inferior N_{lo} [rpm]	1100	1000	1000	1150	850
Rotação de Referência N_{ref} [rpm]	2620	2568	2568	2195	2038

Fonte: Autor (2018)

5 RESULTADOS E ANÁLISES

Os ciclos propostos como resultado deste estudo são apresentados graficamente neste capítulo para cada tipo de veículo e seguidos de suas devidas análises quantitativas.

- Ciclo de condução para banco de prova de chassis: velocidade do veículo em função do tempo;
- Ciclo de teste para banco de provas de motores: torque e rotação do motor normalizados em função do tempo.

Os ciclos de condução propostos foram analisados comparativamente à respectiva amostra total dos dados coletados. As análises consistem em:

- Tabela com os valores dos principais parâmetros operacionais: Tempo total, número total de microviagens, tempo médio por microviagem, velocidade máxima, velocidade média, percurso total, porcentagem de tempo parado e distância média entre paradas;
- Histograma da distribuição de potência específica veicular (VSP): porcentagem do tempo de operação em cada faixa de VSP;
- Histograma da distribuição de tempo de parada: porcentagem de eventos de parada por faixa de duração;
- Mapeamento da porcentagem de tempo de operação em função de velocidade e aceleração do veículo: porcentagem do tempo de operação em cada faixa de velocidade e aceleração do veículo, indicando as demandas operacionais do veículo.

Os ciclos de teste para banco de provas de motores foram analisados comparativamente ao ciclo ETC. A análise consiste em:

- Mapeamento da porcentagem de tempo de operação em função de torque e rotação do motor normalizados: porcentagem do tempo de operação em cada faixa de torque e rotação do motor, indicando as demandas operacionais do motor.

Em seguida, a tabela 11 mostra a relação peso-potência calculada em função dos dados dos veículos testados, com o objetivo de possibilitar um melhor entendimento das análises dos ciclos.

Tabela 11 – Relação peso-potência de cada veículo testado

	Miniônibus	Midiônibus	Básico	Padron	Articulado
Massa Média [kg]	7950	12480	13900	16205	30770
Potência [cv]	162	185	208	290	354
Relação Peso-Potência [kg/cv]	49,07	67,46	66,83	55,88	86,92

Fonte: Autor (2018)

5.1 CICLO PROPOSTO PARA MINIÔNIBUS

As figuras 26 e 27 mostram visualmente o ciclo de condução e o ciclo de teste para banco de provas de motores (respectivamente), propostos para representar a operação típica de Miniônibus.

Figura 26 – Representação gráfica do ciclo de condução proposto em perfil de velocidade do veículo

Fonte: Autor (2018)

Figura 27 – Representação gráfica do ciclo de teste para banco de provas de motores proposto em perfil de torque e rotação do motor normalizados

Fonte: Autor (2018)

5.1.1 Análises do ciclo de condução

Tabela 12 – Tabulação dos valores dos principais parâmetros operacionais do ciclo FIGE ETC, da medição total e do ciclo de condução proposto para Miniônibus

Parâmetro	FIGE ETC	Amostra Total	Ciclo Proposto
Tempo Total [s]	1800	12437	1800
Nº Total de MVs [-]	6	219	14
Tempo Médio por MV [s]	300	57	129
Velocidade Máxima [km/h]	90,8	52,9	46,0
Velocidade Média [km/h]	59,0	14,9	18,1
Percurso Total [km]	29,5	51,2	9,1
Porcentagem de Tempo Parado [%]	6,7	31,9	31,0
Distância Média entre Paradas [m]	4910,0	234,0	646,9

Fonte: Autor (2018)

Figura 28 – Gráfico da distribuição de VSP para comparação entre a medição total e o ciclo de condução proposto

Fonte: Autor (2018)

Figura 29 – Histograma da distribuição de tempo de parada para comparação entre a medição total e o ciclo de condução proposto

Fonte: Autor (2018)

O perfil dos histogramas mostrados nas figuras 28 e 29 mostram a similaridade entre a amostra total de dados e o ciclo proposto quanto a VSP e evento de parada do veículo, graças à metodologia de construção aplicada.

Figura 30 – Mapeamento da porcentagem de tempo de operação em função de velocidade e aceleração do veículo para comparação entre a medição total e o ciclo de condução proposto

Fonte: Autor (2018)

O perfil dos mapeamentos de distribuição de velocidade em função da aceleração da figura 30 mostram uma adequada similaridade do comportamento veicular na amostra total de dados e no ciclo proposto, com a tendência de maior concentração do tempo de operação em velocidades mais altas no ciclo proposto.

5.1.2 Análises do ciclo de teste para banco de provas de motores

Figura 31 – Mapeamento da porcentagem de tempo de operação em função de torque e rotação do motor normalizados para comparação entre o ciclo ETC e o ciclo de teste proposto

Fonte: Autor (2018)

A partir do mapeamento de tempo de operação em função de torque e rotação do motor mostrado na figura 31 comparando o ciclo ETC ao ciclo proposto verifica-se:

- A porcentagem de tempo de operação do motor em marcha-lenta é de 37,0% e em plena carga (carga acima de 90%) é de 2,2%;
- A baixa utilização da condição de plena carga do motor (menor porcentagem de tempo de todos os ciclos) ocorre possivelmente devido à relação peso-potência mais favorável em comparação aos outros veículos testados;
- Em cargas parciais a operação é bastante distribuída, com a faixa de rotação de trabalho bem abrangente (até 70% da rotação).

5.2 CICLO PROPOSTO PARA MUDIÔNIBUS

As figuras 32 e 33 mostram visualmente o ciclo de condução e o ciclo de teste para banco de provas de motores (respectivamente), propostos para representar a operação típica de Mudiônibus.

Figura 32 – Representação gráfica do ciclo de condução proposto em perfil de velocidade do veículo

Fonte: Autor (2018)

Figura 33 – Representação gráfica do ciclo de teste para banco de provas de motores proposto em perfil de torque e rotação do motor normalizados

Fonte: Autor (2018)

5.2.1 Análises do ciclo de condução

Tabela 13 – Tabulação dos valores dos principais parâmetros operacionais do ciclo FIGE ETC, da medição total e do ciclo de condução proposto para Midiônibus

Parâmetro	FIGE ETC	Amostra Total	Ciclo Proposto
Tempo Total [s]	1800	12186	1800
Nº Total de MVs [-]	6	224	18
Tempo Médio por MV [s]	300	54	100
Velocidade Máxima [km/h]	90,8	49,1	48,5
Velocidade Média [km/h]	59,0	17,5	20,1
Percurso Total [km]	29,5	59,2	10,0
Porcentagem de Tempo Parado [%]	6,7	23,8	22,6
Distância Média entre Paradas [m]	4910,0	264,3	557,3

Fonte: Autor (2018)

Figura 34 – Gráfico da distribuição de VSP para comparação entre a medição total e o ciclo de condução proposto

Fonte: Autor (2018)

Figura 35 – Histograma da distribuição de tempo de parada para comparação entre a medição total e o ciclo de condução proposto

Fonte: Autor (2018)

O perfil dos histogramas mostrados nas figuras 34 e 35 mostram a similaridade entre a amostra total de dados e o ciclo proposto quanto a VSP e evento de parada do veículo, graças à metodologia de construção aplicada.

Figura 36 – Mapeamento da porcentagem de tempo de operação em função de velocidade e aceleração do veículo para comparação entre a medição total e o ciclo de condução proposto

Fonte: Autor (2018)

O perfil dos mapeamentos de distribuição de velocidade em função da aceleração da figura 36 mostram uma adequada similaridade do comportamento veicular na amostra total de dados e no ciclo proposto, com a tendência de maior concentração do tempo de operação em velocidades mais altas no ciclo proposto.

5.2.2 Análises do ciclo de teste para banco de provas de motores

Figura 37 – Mapeamento da porcentagem de tempo de operação em função de torque e rotação do motor normalizados para comparação entre o ciclo ETC e o ciclo de teste proposto

Fonte: Autor (2018)

A partir do mapeamento de tempo de operação em função de torque e rotação do motor mostrado na figura 37 comparando o ciclo ETC ao ciclo proposto verifica-se:

- A porcentagem de tempo de operação do motor em marcha-lenta é de 28,7%, consequência da menor porcentagem de tempo de veículo parado de todos os ciclos;
- A operação do motor é em geral muito distribuída em cargas parciais (faixa de rotação bastante extensa, atingindo até 90% da rotação), porém com alta concentração (14,7%) em plena carga (carga acima de 90%), a maior porcentagem de tempo de todos os ciclos possivelmente devido à severa relação peso-potência.

5.3 CICLO PROPOSTO PARA ÔNIBUS BÁSICO

As figuras 38 e 39 mostram visualmente o ciclo de condução e o ciclo de teste para banco de provas de motores (respectivamente), propostos para representar a operação típica de ônibus Básico.

Figura 38 – Representação gráfica do ciclo de condução proposto em perfil de velocidade do veículo

Fonte: Autor (2018)

Figura 39 – Representação gráfica do ciclo de teste para banco de provas de motores proposto em perfil de torque e rotação do motor normalizados

Fonte: Autor (2018)

5.3.1 Análises do ciclo de condução

Tabela 14 – Tabulação dos valores dos principais parâmetros operacionais do ciclo FIGE ETC, da medição total e do ciclo de condução proposto para ônibus Básico

Parâmetro	FIGE ETC	Amostra Total	Ciclo Proposto
Tempo Total [s]	1800	12837	1800
Nº Total de MVs [-]	6	248	18
Tempo Médio por MV [s]	300	52	100
Velocidade Máxima [km/h]	90,8	53,2	53,2
Velocidade Média [km/h]	59,0	16,0	17,8
Percurso Total [km]	29,5	57,0	8,9
Porcentagem de Tempo Parado [%]	6,7	26,8	25,5
Distância Média entre Paradas [m]	4910,0	229,8	494,7

Fonte: Autor (2018)

Figura 40 – Gráfico da distribuição de VSP para comparação entre a medição total e o ciclo de condução proposto

Fonte: Autor (2018)

Figura 41 – Histograma da distribuição de tempo de parada para comparação entre a medição total e o ciclo de condução proposto

Fonte: Autor (2018)

O perfil dos histogramas mostrados nas figuras 40 e 41 mostram a similaridade entre a amostra total de dados e o ciclo proposto quanto a VSP e evento de parada do veículo, graças à metodologia de construção aplicada.

Figura 42 – Mapeamento da porcentagem de tempo de operação em função de velocidade e aceleração do veículo para comparação entre a medição total e o ciclo de condução proposto

Fonte: Autor (2018)

O perfil dos mapeamentos de distribuição de velocidade em função da aceleração da figura 42 mostram uma adequada similaridade do comportamento veicular na amostra total de dados e no ciclo proposto, com a tendência de maior concentração do tempo de operação em velocidades mais altas no ciclo proposto.

5.3.2 Análises do ciclo de teste para banco de provas de motores

Figura 43 – Mapeamento da porcentagem de tempo de operação em função de torque e rotação do motor normalizados para comparação entre o ciclo ETC e o ciclo de teste proposto

Fonte: Autor (2018)

A partir do mapeamento de tempo de operação em função de torque e rotação do motor mostrado na figura 43 comparando o ciclo ETC ao ciclo proposto verifica-se:

- A porcentagem de tempo de operação do motor em marcha-lenta é de 32,4% e em plena carga (carga acima de 90%) é de 5,9%;
- A operação é bem distribuída, tanto pela carga quanto pela rotação, levemente mais concentrada em faixas de rotação intermediárias (30% a 70% da rotação).

5.4 CICLO PROPOSTO PARA ÔNIBUS PADRON

As figuras 44 e 45 mostram visualmente o ciclo de condução e o ciclo de teste para banco de provas de motores (respectivamente), propostos para representar a operação típica de ônibus Padron.

Figura 44 – Representação gráfica do ciclo de condução proposto em perfil de velocidade do veículo

Fonte: Autor (2018)

Figura 45 – Representação gráfica do ciclo de teste para banco de provas de motores proposto em perfil de torque e rotação do motor normalizados

Fonte: Autor (2018)

5.4.1 Análises do ciclo de condução

Tabela 15 – Tabulação dos valores dos principais parâmetros operacionais do ciclo FIGE ETC, da medição total e do ciclo de condução proposto para ônibus Padron

Parâmetro	FIGE ETC	Amostra Total	Ciclo Proposto
Tempo Total [s]	1800	14769	1800
Nº Total de MVs [-]	6	280	17
Tempo Médio por MV [s]	300	53	106
Velocidade Máxima [km/h]	90,8	53,6	52,0
Velocidade Média [km/h]	59,0	15,7	20,7
Percurso Total [km]	29,5	64,2	10,4
Porcentagem de Tempo Parado [%]	6,7	35,8	31,0
Distância Média entre Paradas [m]	4910,0	229,4	609,3

Fonte: Autor (2018)

Figura 46 – Gráfico da distribuição de VSP para comparação entre a medição total e o ciclo de condução proposto

Fonte: Autor (2018)

Figura 47 – Histograma da distribuição de tempo de parada para comparação entre a medição total e o ciclo de condução proposto

Fonte: Autor (2018)

O perfil dos histogramas mostrados nas figuras 46 e 47 mostram a similaridade entre a amostra total de dados e o ciclo proposto quanto a VSP e evento de parada do veículo, graças à metodologia de construção aplicada.

Figura 48 – Mapeamento da porcentagem de tempo de operação em função de velocidade e aceleração do veículo para comparação entre a medição total e o ciclo de condução proposto

Fonte: Autor (2018)

O perfil dos mapeamentos de distribuição de velocidade em função da aceleração da figura 48 mostram uma adequada similaridade do comportamento veicular na amostra total de dados e no ciclo proposto, com a tendência de maior concentração do tempo de operação em velocidades mais altas no ciclo proposto.

5.4.2 Análises do ciclo de teste para banco de provas de motores

Figura 49 – Mapeamento da porcentagem de tempo de operação em função de torque e rotação do motor normalizados para comparação entre o ciclo ETC e o ciclo de teste proposto

Fonte: Autor (2018)

A partir do mapeamento de tempo de operação em função de torque e rotação do motor mostrado na figura 49 comparando o ciclo ETC ao ciclo proposto verifica-se:

- A porcentagem de tempo de operação do motor em marcha-lenta é de 40,3% e em plena carga (carga acima de 90%) é de 8,2%;
- Há uma clara tendência de operação em faixas de rotação mais baixas (10% a 40%), possivelmente devido à baixa relação peso-potência e à transmissão automática, que efetua trocas de marchas em rotações mais baixas possíveis com o objetivo de otimizar o consumo de combustível;
- Em situações de maior exigência de desempenho (plena carga) a rotação do motor chega até 80%.

5.5 CICLO PROPOSTO PARA ÔNIBUS ARTICULADO

As figuras 50 e 51 mostram visualmente o ciclo de condução e o ciclo de teste para banco de provas de motores (respectivamente), propostos para representar a operação típica de ônibus Articulado.

Figura 50 – Representação gráfica do ciclo de condução proposto em perfil de velocidade do veículo

Fonte: Autor (2018)

Figura 51 – Representação gráfica do ciclo de teste para banco de provas de motores proposto em perfil de torque e rotação do motor normalizados

Fonte: Autor (2018)

5.5.1 Análises do ciclo de condução

Tabela 16 – Tabulação dos valores dos principais parâmetros operacionais do ciclo FIGE ETC, da medição total e do ciclo de condução proposto para ônibus Articulado

Parâmetro	FIGE ETC	Amostra Total	Ciclo Proposto
Tempo Total [s]	1800	15030	1800
Nº Total de MVs [-]	6	242	18
Tempo Médio por MV [s]	300	62	100
Velocidade Máxima [km/h]	90,8	54,9	51,9
Velocidade Média [km/h]	59,0	14,2	16,4
Percurso Total [km]	29,5	59,1	8,2
Porcentagem de Tempo Parado [%]	6,7	40,6	38,7
Distância Média entre Paradas [m]	4910,0	244,3	454,7

Fonte: Autor (2018)

Figura 52 – Gráfico da distribuição de VSP para comparação entre a medição total e o ciclo de condução proposto

Fonte: Autor (2018)

Figura 53 – Histograma da distribuição de tempo de parada para comparação entre a medição total e o ciclo de condução proposto

Fonte: Autor (2018)

O perfil dos histogramas mostrados nas figuras 52 e 53 mostram a similaridade entre a amostra total de dados e o ciclo proposto quanto a VSP e evento de parada do veículo, graças à metodologia de construção aplicada.

Figura 54 – Mapeamento da porcentagem de tempo de operação em função de velocidade e aceleração do veículo para comparação entre a medição total e o ciclo de condução proposto

Fonte: Autor (2018)

O perfil dos mapeamentos de distribuição de velocidade em função da aceleração da figura 54 mostram uma adequada similaridade do comportamento veicular na amostra total de dados e no ciclo proposto, com a tendência de maior concentração do tempo de operação em velocidades mais altas no ciclo proposto.

5.5.2 Análises do ciclo de teste para banco de provas de motores

Figura 55 – Mapeamento da porcentagem de tempo de operação em função de torque e rotação do motor normalizados para comparação entre o ciclo ETC e o ciclo de teste proposto

Fonte: Autor (2018)

A partir do mapeamento de tempo de operação em função de torque e rotação do motor mostrado na figura 55 comparando o ciclo ETC ao ciclo proposto verifica-se:

- A porcentagem de tempo de operação do motor em marcha-lenta é de 43,7% (maior porcentagem de tempo de todos os ciclos) e em plena carga (carga acima de 90%) é de 7,7%;
- Apesar de possuir a transmissão automática, a operação é concentrada em faixas de rotação intermediárias (20 a 50%), possivelmente devido à severa relação peso-potência (a mais alta de todos os veículos testados);
- Mesmo assim faixas mais altas de rotação do motor só são necessárias em poucas situações de maior exigência de desempenho (plena carga), atingindo até 90% da rotação normalizada.

5.6 ANÁLISE CRÍTICA FINAL

Em geral foi possível verificar nas análises apresentadas que os ciclos propostos, apesar de adequadamente concebidos de forma compacta (tempo total de 1800s) para possibilitar a sua configuração em bancos de provas e por consequência apresentando percursos muito menores do que nas amostras totais (em média apenas 16% do percurso das amostras totais), possuem perfil de distribuição de VSP (conforme histogramas da distribuição de VSP) e perfil de distribuição de velocidade em função da aceleração do veículo (conforme mapeamentos da porcentagem de tempo de operação em função de velocidade e aceleração do veículo) muito parecidos com as amostras totais, indicando uma boa similaridade entre os ciclos propostos e as amostras totais quanto às demandas operacionais do veículo. Assim confirma-se a efetividade da metodologia de construção de ciclos, proposta por Lai et al. (2013).

A partir das análises dos ciclos de teste para banco de provas propostos para cada tipo de veículo, verificam-se algumas características particulares, sendo os principais pontos descritos a seguir:

- Ciclo para miniônibus (Figura 31): A porcentagem de tempo de operação do motor em marcha-lenta é de 37,0% e em plena carga é de 2,2%. A baixa utilização da condição de plena carga do motor (menor porcentagem de tempo de todos os ciclos) ocorre possivelmente devido à relação peso-potência mais favorável em comparação aos outros veículos testados. Em cargas parciais a operação é bastante distribuída, com a faixa de rotação de trabalho bem abrangente (até 70% da rotação);
- Ciclo para midiônibus (Figura 37): A porcentagem de tempo de operação do motor em marcha-lenta é de 28,7%, consequência da menor porcentagem de tempo de veículo parado de todos os ciclos. Em geral a operação do motor é muito distribuída em cargas parciais (faixa de rotação bastante extensa, atingindo até 90% da rotação), porém com alta concentração em plena carga (14,7%), a maior porcentagem de tempo de todos os ciclos possivelmente devido à severa relação peso-potência;
- Ciclo para ônibus básico (Figura 43): A porcentagem de tempo de operação do motor em marcha-lenta é de 32,4% e em plena carga é de 5,9%. A operação

também é bem distribuída, tanto pela carga quanto pela rotação, levemente mais concentrada em faixas de rotação intermediárias (30% a 70% da rotação);

- Ciclo para ônibus padron (Figura 49): A porcentagem de tempo de operação do motor em marcha-lenta é de 40,3% e em plena carga é de 8,2%. Apresenta clara tendência de operação em faixas de rotação mais baixas (10% a 40%), possivelmente devido à baixa relação peso-potência e à transmissão automática, que efetua trocas de marchas em rotações mais baixas possíveis com o objetivo de otimizar o consumo de combustível. Porém em situações de maior exigência de desempenho (plena carga) a rotação do motor chega até 80%;
- Ciclo para ônibus articulado (Figura 55): A porcentagem de tempo de operação do motor em marcha-lenta é de 43,7% (maior porcentagem de tempo de todos os ciclos) e em plena carga é de 7,7%. Apesar de também possuir a transmissão automática, a operação é concentrada em faixas de rotação intermediárias (20 a 50%), possivelmente devido à severa relação peso-potência (a mais alta de todos os veículos testados). Mesmo assim faixas mais altas de rotação do motor só são necessárias em poucas situações de maior exigência de desempenho (plena carga), atingindo até 90% da rotação normalizada.

Em geral é possível verificar nas análises que o ciclo ETC (utilizado para homologação de motores conforme Proconve P7) é pouco representativo para condições reais de operação de motores em ônibus urbanos. A maior parte do tempo de operação do motor no ciclo ETC (aproximadamente 42%) concentra-se em cargas parciais e em faixa estreita e intermediária da rotação normalizada (de 40% a 70%). O motor opera apenas 7,3% do tempo em marcha-lenta (devido a poucos eventos de parada no ciclo de condução respectivo) e 16,4% do tempo em plena carga (devido principalmente ao longo tempo do ciclo de condução em condição de rodovia).

Assim a partir destas observações, espera-se que o desempenho dos sistemas de controle de emissões do motor em condições reais de operação em ônibus urbanos seja menor em comparação ao ciclo ETC. Mesmo considerando o menor tempo de operação em situações de plena carga (onde geralmente ocorrem comparativamente maiores emissões brutas de NOx), espera-se de aumento das emissões finais de NOx (na ponta do escapamento) devido principalmente à alta porcentagem de tempo em

situações de marcha-lenta, baixa carga e transientes, que levam ao aquecimento insuficiente do sistema de pós-tratamento e conseqüentemente à redução drástica na eficiência de conversão dos poluentes.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este estudo apresentou o desenvolvimento de ciclos de teste compactos para banco de provas de chassis (perfil de velocidade em função do tempo) e de motores (perfil de torque e rotação do motor em função do tempo) tendo como premissa representar o mais fielmente possível as características mais significativas das condições reais de condução de ônibus urbanos da cidade de São Paulo. Tais ciclos possibilitam avaliações diversas como emissões de poluentes e consumo de combustível e podem também ser utilizados como ferramentas para levantamento de inventário de emissões tanto por parte das fabricantes como pelas autoridades reguladoras, de forma a garantir a melhor avaliação da qualidade do ar.

Para isso foram coletados dados em condições reais de condução de veículos operando em linhas selecionadas como mais representativas por estudo preliminar. Tal estudo mostrou-se necessário devido à alta complexidade do sistema de transporte coletivo municipal da cidade de São Paulo.

Para aplicação da metodologia proposta por Lai et al. (2013), os dados coletados foram utilizados para cálculo da potência específica veicular (VSP) instantânea. Neste processo verificou-se que a acuracidade dos dados, assim como a garantia de sincronismo entre as diversas variáveis, mostraram-se essenciais com maior destaque para os dados de elevação e inclinação das vias. Especialmente neste caso, sugere-se a aplicação de um sensor inclinômetro que, em conjunto com uma rotina de tratamento dos dados, poderia fornecer dados de inclinação mais precisos e melhor sincronizados aos dados veiculares coletados pelo barramento CAN.

A metodologia proposta utilizando o critério de ordenação e seleção de microviagens por valores crescentes de RMSE da distribuição de VSP (LAI et al., 2013) mostrou-se muito adequada para construção de ciclo com perfil de distribuição de VSP similar ao da amostra total de dados. Esta similaridade pode ser verificada tanto pelo histograma de comparação da distribuição de VSP quanto pelas análises de distribuição de velocidade em função de aceleração do veículo, indicando comportamento veicular muito parecido entre os ciclos propostos e as amostras totais dos dados.

Porém verificou-se uma tendência de seleção de microviagens mais longas, com valores de VSP em média maiores e distribuição de valores de VSP mais abrangentes.

Dessa forma, os ciclos propostos apresentam velocidades médias maiores, distâncias médias entre paradas maiores e maior frequência de valores positivos de VSP, mesmo atendendo aos critérios de tempo total e distribuição de tempo de veículo parado, propostos por Maciel Filho (2013). De acordo com a literatura, este fato pode ser relevado, caso o objetivo seja utilizar os ciclos propostos para estimar emissões, uma vez que sua correlação com VSP é maior do que com outras características operacionais.

Após a análise dos dados dos ciclos propostos, verificou-se adequado o desenvolvimento de ciclos específicos para cada tipo de veículo disponível na frota (miniônibus, midiônibus, básico, padron e articulado), por possuírem características técnicas totalmente distintas (por exemplo os sistemas de trem-de-força, capacidade de carga e relação peso-potência) e aplicações distintas no sistema de transporte da cidade.

Ao realizar a análise do comportamento do motor quanto a distribuição de torque em função de rotação entre os ciclos propostos e o ciclo ETC (utilizado nas homologações dos motores Proconve P7), é possível verificar a falta de representatividade do ciclo ETC quanto às condições reais de operação do motor em ônibus urbanos. Espera-se a partir das análises realizadas, um aumento nas emissões finais de poluentes (principalmente NOx) devido à redução da eficiência dos sistema de pós-tratamento ocasionada pelas reduzidas temperaturas no escapamento.

Assim, conclui-se que para uma avaliação apurada em banco de provas quanto às emissões de poluentes e ao consumo de combustível de motores para aplicações específicas (como no caso de ônibus urbanos) é vital o desenvolvimento de ciclos específicos utilizando metodologias confiáveis e consolidadas. Os ciclos resultantes deste trabalho possibilitam a avaliação mais precisa e padronizada das emissões de poluentes de motores para ônibus urbanos, uma vez que o motor é submetido a condições de operação mais próximas à aplicação real.

6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento deste trabalho, foram verificadas oportunidades de trabalhos futuros neste segmento para melhoria da metodologia aplicada e continuação deste estudo, contemplando as tendências mundiais quanto aos

requisitos de emissões, ciclos de teste harmonizados e emissões em condições reais de operação (RDE):

- Aumentar a amostragem de dados, realizando as aquisições de dados em todas as linhas pré-selecionadas como mais representativas, em diversas épocas do ano e utilizando modelos de ônibus de outras fabricantes;
- Desenvolver metodologia com critérios de seleção de pacotes de microviagens objetivando aumentar a representatividade da amostra total e reduzir a tendência da metodologia aplicada em selecionar microviagens mais longas e com distribuição de VSP mais abrangentes (como observado neste estudo);
- Desenvolver os ciclos a partir dos dados coletados, porém adequando a proposta de metodologia de seleção de pacotes de microviagens com os requisitos da regulamentação Euro VI para validação de testes de emissões em condições reais de operação (RDE) com equipamentos de medição embarcados (PEMS). Além disso aplicando o mesmo cálculo da rotação de referência do ciclo harmonizado WHTC para a construção do ciclo de teste para banco de provas (torque e rotação do motor em função do tempo);
- Desenvolver um ciclo único representativo das condições de operação de todos os tipos de veículo utilizados na frota da cidade de São Paulo, através da sobreposição dos ciclos propostos neste estudo de forma a atender tanto as demandas veiculares observadas quanto aos distintos perfis de operação dos sistemas de trem-de-força.

REFERÊNCIAS

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, v. 73, p. 334-335. 2004.

ARRÈGLE, J; TORMOS, B; LÓPEZ, J; GARCÍA, A. **Analysis of the potential of biodiesel as an alternative fuel for current and future HSDI engines**. SAE Technical Paper, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15634**: Veículos rodoviários automotores – Análise e determinação do gás de exaustão segundo os ciclos ETC, ESC e ELR. Rio de Janeiro, 2012.

AUSTIN, T.C.; DIGENOVA, F.J.; CARLSON, T.R.; JOY, R.W.; GIANOLINI, K.A.; 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.

AUTOMOTIVE BUSINESS. **Brasil cai para a sétima posição em ranking global**. Disponível em: <<http://www.automotivebusiness.com.br/noticia/23493/brasil-cai-para-a-setima-posicao-em-ranking-global>>. Acesso em: 17 jun. 2016.

BARLOW, T. J.; LATHAM, S.; MCCRAE, I. S.; BOULTER, P. G. **A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions**. TRL Published Project Report, 2009.

CARLSON, T.R.; AUSTIN, T.C. **Development of speed correction cycles**. Sacramento: Sierra Research Inc., 1997.

CLIMATEMPO. **Clima de São Paulo – SP em tempo real**. Disponível em: <<https://www.climatepo.com.br/previsao-do-tempo/cidade/558/saopaulo-sp>>. Acesso em: 14 dez. 2017.

COMISSÃO EUROPEIA. **Commission regulation (EU) No 582/2011 – Implementing and amending Regulation (EC) No 595/2009 of the European Parliament and of the Council with respect to emissions from heavy duty vehicles (Euro VI) and amending Annexes I and III to Directive 2007/46/EC of the European Parliament and of the Council**, União Europeia, 2011.

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 of the University of California, 2008.

DIESELNET. **Diesel emissions online**. Disponível em: <<https://dieselnet.com/>>. Acesso em: 04 dez. 2017.

EMBRAPA. **Embrapa Monitoramento por Satélite..** Disponível em: <<http://www.webcitation.org/619rjAWw5>>. Acesso em: 06 mai. 2018.

FORCETTO, A. L. S.; JUNIOR, O. S. **Método para determinação de VSP por meio de pesquisa colaborativa.** Artigo apresentado para o atendimento dos requisitos da disciplina “Técnicas de rastreamento de veículos” (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

GALGAMUWA, U.; PERERA, L.; BANDARA, S. **Developing a general methodology for driving cycle construction:** Comparison of Various Established Driving Cycles in the World to Propose a General Approach. Moratuwa: Journal of Transportation Technologies, 2015.

GILLESPIE, T.D. **Fundamentals of vehicle dynamics.** Warrendale: Society of Automotive Engineers, Inc., 1992.

GOOGLE EARTH. **Google Earth para Windows.** Disponível em <<https://www.google.com.br/earth/download/gep/agree.html>>. Acesso em: 12 jan. 2017.

GPS VISUALIZER. **Google Earth kml to plain text converter.** Disponível em <http://www.gpsvisualizer.com/map_input?form=googleearth>. Acesso em: 12 jan. 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). **Programa de controle da poluição do ar por veículos automotores** – Proconve / Promot / Ibama 3ª Edição. Brasília, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). **Minuta - Resolução - Estabelece a fase Proconve P8.** Disponível em <<http://www.ibama.gov.br/phocadownload/proconve-promot/2017/consulta-publica/2017-10-proposta-conama-P8-%20final-mbv-v3.pdf>> Acesso em: 04 dez. 2017.

JIMENEZ-PALACIOS, J.L. **Understanding and quantifying motor vehicle emissions with vehicle specific power and TILDAS remote sensing.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1999.

LAI, J.; YU, L.; SONG, G.; GUO, P.; CHEN, X. **Development of city-specific driving cycles for transit buses based on VSP distributions:** Case of Beijing. In: Journal of Transportation Engineering, Washington, D.C., 2013.

LIN, J.; NIEMEIER, D.A. **An exploratory analysis comparing a stochastic driving cycle to California’s regulatory cycle.** Atmospheric Environment, v.36, p. 5759-5770, 2002.

MACIEL FILHO, F. F. **Construção de ciclos de condução para estimativa de emissões veiculares para ônibus urbanos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

MAJEWSKI, W. A.; KHAIR, M. K. **Diesel emissions and their control**. Warrendale: SAE Publications, 2006.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS**: Descrição, fundamentos e aplicações. São Paulo: Editora UNESP, 2000.

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

NICOLAZZI, L.C. **Fundamentos de dinâmica veicular** - Capítulo 2: Forças e Acelerações em um Veículo em Operação. Disponível em: <<http://slideplayer.com.br/slide/1596536/>>. Acesso em: 07 dez. 2017.

ROSO, V. R. **Ciclos reais de condução veicular em Santa Maria e seus impactos em consumo e emissões**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção, Área de Concentração: Mobilidade Sustentável), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

SÃO PAULO TRANSPORTE (SPTRANS). **Manual de identidade visual dos veículos**. Disponível em: <http://www.sptrans.com.br/sptrans_acao/identidade-visual.aspx>. Acesso em: 10 jan. 2017.

SÃO PAULO TRANSPORTE (SPTRANS). **Nova rede de ônibus**. Disponível em: <http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/chamadas/rede_referencia_2014_-_diretrizes_3_1424805560.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2017.

SÃO PAULO TRANSPORTE (SPTRANS). **Relatório de detalhamento do reajuste da tarifa**. Disponível em: <http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/chamadas/estudo_tarifa_2017_1500388954.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2017.

SECRETARIA DO VERDE E DO MEIO AMBIENTE (SVMA). **Plano de controle de poluição veicular no município de São Paulo**. São Paulo, 2011

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.

STEVEN, H. **Development of a worldwide harmonised heavy-duty engine emissions test cycle**: Final Report TRANS/WP29/GRPE/2001/2. Genebra: U.N. Economic Commission for Europe, 2001.

YU, Q.; LI, T.; LI, H. **Improving urban bus emission and fuel consumption modeling by incorporating passenger load factor for real world driving**. Applied Energy, v. 161, p. 101-111, 2016.

WI, H.; PARK, J.; LEE, J.; KIM, W.; KIM, Y. **Development of a city bus driving cycle in Seoul based on the actual patterns of urban bus driving**. Warrendale: SAE Publications, 2009.

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, v. 42, p. 7985-7991, 2008.