

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

USO DO GNV EM ÔNIBUS URBANO PARA OPERAR EM LINHA COMERCIAL
- PROJETO PILOTO GASBUS -

por

Serguei Nogueira da Silva

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, 01 de Dezembro de 2006.

USO DO GNV EM ÔNIBUS URBANO PARA OPERAR EM LINHA COMERCIAL
- PROJETO PILOTO GASBUS -

por

Serguei Nogueira da Silva
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Vilson João Batista

Comissão de Avaliação: (na versão apresentada à banca) ou Aprovada por: (na versão final)

Prof. Dr. Luis Antonio Lindau

Prof. Dr. Luiz Carlos Gertz

Prof. Dr. Ney Francisco Fereira

Prof. Dr. Flavio José Lorini
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 01 de Dezembro de 2006.

Dedico este trabalho aos meus
pais Nilton Dario e Elaine ,
e ao meu irmão Vinicius.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Nilton Dario e Elaine e meu irmão Vinicius, por ter ficado ao meu lado e incentivado em todas as horas e, principalmente, pelo apoio e carinho incondicionais. Amo vocês e obrigado por servirem de exemplo de vida para mim.

Ao meu orientador Wilson Batista, por ter colaborado no desenvolvimento do trabalho, com seus ensinamentos de trabalho em equipe e relacionamento pessoal.

Ao Carlos Kern Thomas, “pato”, pela colaboração em todas as horas durante o projeto, por me mostrar sempre que tudo é mais complicado do que parece, mas com jeito e paciência pode se realizar muita coisa.

Ao Roberto Trindade e Paulo Podorodevsk, bolsistas de iniciação científica que trabalharam arduamente para o sucesso do projeto.

A todos os amigos, por terem sorrido comigo nas horas boas e apoiado nas horas mais difíceis.

Um especial aos professores Flavio Lorini e Ignácio Iturrioz, por seus exemplos como mestre e pessoa aos alunos do PROMEC.

RESUMO

Este Projeto Piloto tem como objetivo desenvolver um experimento de campo partindo de um ônibus comercial usado e, após conversão via rota tecnológica de Ottolização, opera-lo com combustível GNV – Gás Natural Veicular. Além da conversão do motor, originalmente movido a diesel, instalou-se cilindros de material compósito para armazenamento do GNV. Fez-se a implementação de um sistema de instrumentação embarcada, registrando em tempo real grandezas que caracterizam o desempenho do ônibus convertido, tais como: velocidade, rotação do motor, posição do acelerador e temperaturas do óleo e líquido de arrefecimento. Projetou-se e executou-se um experimento de campo onde o ônibus convertido – GASBUS – juntamente com dois ônibus Diesel com características construtivas semelhantes, operaram em condições reais de tráfego seguindo linhas comerciais entre Alvorada e Porto Alegre. Ao todo foram 12 meses em operação, período esse que foram registrados dados referentes a operação, consumo de combustível, manutenção e emissão de poluentes, gerando um banco de dados para viabilizar uma análise comparativa entre os ônibus. Ao todo, o GASBUS trafegou mais de 50.000 km, transportando 80.000 pessoas por itinerários diversos na região metropolitana da capital gaúcha, sem apresentar “quebras” ou falhas devido à motorização. O consumo de combustível do GASBUS foi de 2,28 km/m³, próximo aos 2,5 km/l dos ônibus Diesel. Considerando incentivos a utilização de GNV no modal de transporte coletivo por parte do Governo Federal, subsidiando o metro cúbico do GNV a 55% do litro do diesel para os frotistas, obtém-se uma redução de 40% do custo de combustível em prol do GASBUS, ou seja, uma economia de R\$ 0,28 /km. Através dos registros de manutenção verificou-se custos compatíveis entre as duas motorizações, salientando novamente a robustez apresentada pelo motor convertido. Com a realização de testes de medição de emissões, verificou-se que o GASBUS emite 45% de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera em relação ao ônibus original Diesel, ainda ocorre a cessão da emissão de material particulado e compostos de enxofre, principais causadores das chuvas ácidas. Durante o trajeto em linhas comerciais, destaca-se a boa aceitação por parte dos usuários e operadores, devido a cessão da vibração e ruídos no interior do ônibus, característicos dos motores ciclo Diesel. Com base nos resultados econômicos favoráveis, associados aos ganhos ambientais, melhoria na qualidade para usuários e operadores, considera-se a rota tecnológica de ottolização viável para inserção de GNV no modal de transporte coletivo nos grandes centros urbanos brasileiros em substituição ao diesel.

ABSTRACT

“PROJECT GASBUS – USES GNV FUEL IN UNBAN BUSES”

This Project has as objective to develop an experiment with an used commercial bus, and after conversion under the Ottolização technological route, run with GNV fuel – Natural Gas. With the conversion of the Diesel engine, it was installed lightweight cylinders for the storage of the GNV. It was made an implementation of one on-board instrumentation system, to register in real time the performance of the converted bus. It was projected and executed an experiment where the converted bus – GASBUS –, together with two buses diesel with similar constructive characteristics, ran in real conditions of traffic, using commercial lines between the cities of Alvorada and Porto Alegre. The buses ran for 12 months, in this period it was registered the consumption of fuel and the emission of pollutants, as well as information about maintenance and operation. It generated a databank able to analyze the differences between these two kinds of buses. After the 12 months, the GASBUS ran more than 50.000 km, carrying about 80.000 passengers trough many itineraries in the Porto Alegre metropolitan region, without failures because of the "conversion kit" installed. The GASBUS specific fuel consumption was 2,28 km/m³ and the diesel's 2,5 km/l. Considering the price of GNV at 55% of the diesel price for transport companies, established by the Federal Government, its use results in a reduction of 40% of the fuel cost (a savings of R\$ 0,28 /km). Through the maintenance registers it was verified compatible costs between the two buses, pointing out the trustworthiness of the converted engine. With the accomplishment of the emissions measurement tests, it was registered a reduction of about 45% of carbon dioxide (CO₂) of the GASBUS emissions exhaust gas to the atmosphere. It also occurs the stopping of the emission of particulates material and sulphur composites, responsible for acid rains. In the running through commercial lines, the good acceptance of the users and operators was noted due to the large reduction of the vibration and of the noises in the interior of the GASBUS, an undesired characteristic of the diesel cycle engines. With favorable economic results associated to the ambient profits and improvement of quality for users and operators, the Ottolização technological route can be considered viable for the insertion of GNV in collective transport for diesel substitution.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Veículos de Transporte Urbano.....	5
1.2	Objetivos.....	6
1.3	Metodologia.....	7
1.4	Estrutura do Trabalho.....	8
2	PANORAMA DA UTILIZAÇÃO DE GNC NO TRANSPORTE COLETIVO URBANO.....	9
2.1	Experiência brasileira na utilização do GNC no transporte coletivo urbano.....	9
2.2	Experiência da utilização de GNC no transporte coletivo em outros países.....	14
2.3	Análise das experiências anteriores.....	16
2.4	Cenário Atual.....	19
2.4.1	Motores de combustão interna	19
2.4.2	Logística de abastecimento.....	21
3	FUNDAMENTOS DOS MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA.....	24
3.1	Motores ciclo Otto de quatro tempos.....	24
3.2	Processo de combustão em motores Alternativos.....	26
3.2.1	Composição do Ar.....	26
3.2.2	Combustível GNC.....	27
3.2.3	Torque, potência, consumo específico e eficiência de combustão.....	28
3.2.4	Combustão Estequiométrica e Relação Ar/Combustível.....	29
3.2.5	Balanco químico.....	32
3.3	Emissão veicular.....	32
3.3.1	Dióxido de Carbono – CO ₂	33
3.3.2	Monóxido de Carbono – CO.....	34
3.3.3	Hidrocarbonetos – HC.....	35
3.3.4	Óxidos Nitrosos – NO _x	36
3.3.5	Material Particulado – MP.....	36
3.3.6	Compostos de Enxofre – SO _x	36
3.4	Ensaio para a determinação da emissão de poluentes.....	37
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	44

4.1	Conversão do ônibus.....	45
4.1.1	Instalação dos cilindros de armazenamento.....	47
4.1.2	Ottolização do motor diesel.....	51
4.1.3	Sistema de Instrumentação Embarcada.....	54
4.2	Projeto do Experimento.....	59
4.2.1	Cenário de Testes.....	62
4.3	Medidas de Emissão de Poluentes em Campo.....	63
4.3.1	Sistema de instrumentação embarcada para medição de emissões de poluentes.....	65
4.3.2	Grandezas estimadas de desempenho do motor.....	68
4.3.3	Metodologia de testes.....	69
4.3.4	Metodologia de cálculo.....	70
5	RESULTADOS.....	71
5.1	Registros Operacionais.....	71
5.2	Custos Operacionais.....	78
5.2.1	Custo com combustível.....	79
5.2.2	Custos com manutenção.....	80
5.2.3	Custo de operação em linha comercial.....	83
5.2.4	Análise do Retorno do Investimento.....	84
5.3	Testes de Emissão de Poluentes.....	85
5.3.1	Análise do potencial redutor de emissões.....	95
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE CONTINUIDADE.....	100
6.1	Conclusões.....	100
6.2	Sugestões de Continuidade.....	101
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103
	ANEXO A	103
	ANEXO B	110
	APÊNDICE A	113
	APÊNDICE B	117
	APÊNDICE C.....	120
	APÊNDICE D.....	127
	APÊNDICE E.....	131
	APÊNDICE F.....	136
	APÊNDICE G	137

APÊNDICE H	141
APÊNDICE I	142
APÊNDICE J	144
APÊNDICE K.....	146
APÊNDICE L	149
APÊNDICE M.....	153
APÊNDICE N	160

LISTA DE SÍMBOLOS

η_m	Eficiência Mecânica	
λ	Lambda	
ρ	Densidade do ar	[kg/m ³]
(A/F)	Relação ar/combustível	
A	Argônio	
A/D	Analógico / Digital	
b	Comprimento da alavanca de freio	[m]
bfsc	Consumo de combustível específico	[g/kw]
CO	Monóxido de carbono	
CO ₂	Dióxido de Carbono	
F	Força	[N]
g	Gramas	[g]
GN	Gás Natural	
GNV	Gás Natural Veicular	
GPS	Sistema de Posicionamento Global (Global Positioner System)	
HC	Hidrocarbonetos	
IE	Índice de Emissão	[g/km]
M	Milhões	
MAF	Sensor de Massa de Ar (Mass air Flow)	
MAP	Sensor de Pressão no coletor (Manifold Absolute Pressure)	
mf	Vazão mássica de combustível	[g/s]
MP	Material Particulado	
N	Nitrogênio	
N	Velocidade Angular	[RPM]
nf	Eficiência da combustão	
NO _x	Óxidos Nitrosos	
O	Oxigênio	

pa	Pressão atmosférica	[Pa]
P _b	Potência no freio	[w]
p _{bme}	Pressão média efetiva no freio	[Pa]
P _{c,i}	Potência indicada bruta por ciclo	[w]
PCS	Poder Calorífico Superior	[J/kg]
P _f	Potência de atrito	[w]
PLM	Sonda Lambda de Banda Larga (Proportional Lambda Meter)	
p _{me}	Pressão média efetiva	[Pa]
P _{out}	Potência liberada pelo motor	[w]
SO _x	Óxidos de Enxofre	
T	Torque	[N.m]
T _a	Temperatura ambiente	[Pa]
tep	Toneladas equivalente de petróleo	[tep]
TPS	Sensor de Posição do Acelerador (Tottlen Position Sensor)	
URD	Unidade de Registro de Dados	
W _{out}	Trabalho liberado pelo motor	[J]

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Participação por fontes na matriz energética nacional em 2004.....	1
Figura 1.2	Evolução do preço do barril de petróleo nos últimos 35 anos, em U\$.....	2
Figura 2.1	Rede de distribuição de Gás Natural no Brasil	22
Figura 2.2	Reservas brasileiras comprovadas de GN, em 10 ⁹ m ³	23
Figura 3.1	Ciclo padrão Otto.....	24
Figura 3.2	Ciclo de combustão em motores Otto 4 tempos.....	25
Figura 3.3	Variação da composição dos gases de escape em função da relação ar combustível.....	31
Figura 3.4	CO ₂ agregado produzido por alguns combustíveis.....	34
Figura 3.5	CO experimental para alguns combustíveis.....	35
Figura 3.6	Limites de emissão de gases de escape nas sucessivas fases do PROCONVE.....	38
Figura 3.7	Perfil de velocidade do veículo testado durante o ciclo de condução FTP-75, regulamentado no Brasil para medição de emissões em veículos leves, conforme NBR 6601. Intervalo 1 (505 s) simula a partida a frio, Intervalo 2 (867 s) fase estabilizada, parada do teste durante 10 minutos sem amostragem dos gases e Intervalo 3 (505 s) idêntica ao Intervalo 1, mas com partida a quente.....	40
Figura 3.8	Sistema utilizado para teste de emissão de poluentes em veículos leves	40
Figura 3.9	Sistema de medição embarcado, da Horiba, instalado no microônibus	42
Figura 3.10	Registro da emissão de gases realizada pelo sistema de instrumentação embarcado.....	43
Figura 4.1	Veículos produzidos no Brasil entre 1990 e 2003, modalidade ônibus.....	45
Figura 4.2	Modelo de ônibus diesel utilizado para a “Ottolização”.....	46
Figura 4.3	Layout de instalação dos cilindros leves de GNV sob o assoalho do GASBUS	47
Figura 4.4	Vista inferior do chassi com os elementos a serem removidos para instalação dos cilindros.....	48
Figura 4.5	Cilindros de armazenamento fixados sob o assoalho do GASBUS.....	48
Figura 4.6	Reabastecimento do GASBUS realizado em posto de combustível comercial próximo ao Terminal Rui Barbosa, centro de Porto Alegre.....	49
Figura 4.7	Vista do motor após a instalação do cabeçote componente do kit de conversão, da	

	Tomasetto Achille.....	51
Figura 4.8	Elementos do sistema de combustível componentes do kit de “Ottolização” instalado no motor do GASBUS	52
Figura 4.9	Unidade de Comando Eletrônico montada em uma caixa de alumínio (a esquerda) e sua disposição no painel frontal do GASBUS (a direita).....	52
Figura 4.10	Vista lateral do motor do GASBUS depois da instalação do “kit de Ottolização”.....	52
Figura 4.11	Sistema de instrumentação instalado no GASBUS.	53
Figura 4.12	Sistema de aquisição e registro de dados instalado na central elétrica do GASBUS	55
Figura 4.13	Sensor de rotação montado na saída da caixa de marcha.....	56
Figura 4.14	TPS montado no eixo da borboleta.....	57
Figura 4.15	Termopar para a medição da temperatura do óleo inserido no carter do motor (esquerda) e sensor de temperatura do líquido de arrefecimento montado no cabeçote do motor.....	57
Figura 4.16	Sensor de temperatura do líquido de arrefecimento montado no cabeçote do motor.....	58
Figura 4.17	Diagrama esquemático com os fatores do experimento realizado para a análise comparativa entre os veículos.....	59
Figura 4.18	Treinamento dos motoristas selecionados para operar o GASBUS.....	61
Figura 4.19	Localização do município de Alvorada.....	63
Figura 4.20	Sistema de aquisição/condicionamento de sinal ADS2000IP, da Lynx.....	64
Figura 4.21	Sensor MAF instalado no veículo GASBUS	64
Figura 4.22	Sonda Lambda de Banda Larga instalada no cano de escape.....	65
Figura 4.23	Sensor MAP instalado no coletor de entrada.....;;.....	66
Figura 4.24	Analizador de gases MEXA 574GE, fabricado pela Horiba, instalado no GASBUS durante testes de campo.....	66
Figura 4.25	Serpentina fixada no cano de escape mangueira de conexão com analisador de gases.....	67
Figura 4.26	GPS utilizado durante testes de campo.....	68
Figura 4.27	As emissões são calculadas comparando a massa de carbono fornecido ao motor através do GNV com a emitida nos gases de escape.....	70
Figura 5.1	Resultado da análise de variância da média mensal de passageiros transportados (esquerda) e do consumo específico de combustível (direita). Colunas assinaladas com a mesma letra não apresentam diferenças significativas ($\alpha=0,05$).....	74
Figura 5.2	Mapa operacional típico da operação do GASBUS, realizado pelo sistema de instrumentação embarcada.....	76
Figura 5.3	Registros da operação do GASBUS entre trafegando em linhas comerciais, entre duas sinaleiras, exemplificando o potencial de análise da ferramenta proposta.....	77

Figura 5.4	Temperaturas registradas durante operação do motor Ottolizado no trajeto por diferentes linhas comerciais na região metropolitana de Porto Alegre.....	78
Figura 5.5	Gráfico com custos de manutenção com material e peças de reposição, em R\$....	80
Figura 5.6	Gráfico com os custos de manutenção devido a Mão-de-Obra, em R\$.....	81
Figura 5.7	Custos de manutenção devido a Pneus, em R\$.....	81
Figura 5.8	Comparação dos custos operacionais dos veículos durante operação em linhas comerciais na região metropolitana de Porto Alegre, em R\$/km.....	84
Figura 5.9	Gráfico com o tempo de retorno de investimento da conversão do ônibus diesel para GNV, utilizando a rota tecnológica da Ottolização.....	85
Figura 5.10	Trajeto 1 percorrido pelo GASBUS durante os testes de campo de agosto/setembro, registrado pelo GPS.....	87
Figura 5.11	Trajeto 2 percorrido pelo GASBUS durante os testes de campo de agosto/setembro, registrado pelo GPS.....	88
Figura 5.12	Concentração de CO medida no cano de escape – Condição Parada.....	90
Figura 5.13	Mapa operacional registrado durante o trajeto Porto Alegre - Alvorada, em linha comercial, para registro das emissões geradas no motor ottolizado em condições reais de operação.....	92
Figura 5.14	Análise do movimento entre duas sinaleiras, no trajeto em linha comercial, apresentando através do mapa operacional a variação dos registros de emissões e desempenho do GASBUS.....	93
Figura 5.15	Índice de emissões de monóxido de carbono registrado nos diferentes trechos do percorrido pelo GASBUS em linha comercial.....	94
Figura 5.16	Comparação do índice de emissão de CO ₂ para diferentes tipos de ônibus utilizando GNV ou diesel como combustível, em g/km	96
Figura 5.17	Comparação do índice de emissão de CO para diferentes tipos de ônibus utilizando GNV ou diesel como combustível, em g/km.....	96
Figura 5.18	Comparação do índice de emissão de hidrocarbonetos para diferentes tipos de ônibus utilizando GNV ou diesel como combustível, em g/km.....	97

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1	Frota total brasileira e frota nas cidades com disponibilidades de postos de abastecimento de GNV.....	5
Tabela 2.1	Utilização dos diferentes modais de transporte de passageiros nos centros urbanos do mundo, em %.....	9
Tabela 2.1	Frota GNV durante experiências anteriores no transporte coletivo	10
Tabela 2.2	Frota de ônibus GNC operante em São Paulo em 1998.....	13
Tabela 3.1	Principais constituintes do ar atmosférico.....	27
Tabela 3.2	Composição físico-químicas do GNV comercializado no Brasil.....	28
Tabela 3.3	CO ₂ máximo teórico calculado para a reação de combustão estequiométrica.....	36
Tabela 3.4	Teor de enxofre no diesel comercializado no Brasil.....	37
Tabela 3.5	Calendário de implantação das etapas do PROCONVE.....	38
Tabela 3.6	Ciclos de ensaios aplicados em cada fase do PROCONVE definidos na Resolução do CONAMA nº 315/2002.....	39
Tabela 3.7	Sistema para a medição de emissões de escape em condições reais de operação....	42
Tabela 4.1	Características construtivas dos ônibus urbano analisados.....	46
Tabela 4.2	Comparação entre os cilindros de Aço comercializados no Brasil e os cilindros leves de duro alumínio/fibra de carbono instalados no GASBUS	50
Tabela 4.3	Grandezas registradas pelo SIE instalado no GASBUS.....	54
Tabela 4.4	Quadro com o revezamento diário dos veículos entre as linhas pré-estabelecidas.....	60
Tabela 4.5	Quadro com o revezamento dos motoristas entre os veículos semanalmente	60
Tabela 4.6	Grandezas mensuradas pelo Sistema de Instrumentação Embarcado para Medição de Emissão de Poluentes.....	63
Tabela 4.7	Relação do sistema de transmissão do GASBUS.....	69
Tabela 5.1	Dias de operação em linha comercial de cada veículo.....	71
Tabela 5.2	Média diária da distância percorrida pelos ônibus 7071, 7072 e 7073, em km.....	73
Tabela 5.3	Média diária de passageiros transportados em linhas comerciais.....	73
Tabela 5.4	Média mensal do consumo específico de combustível, em km/l para 7071 e 7073 e km/m ³ para 7072.....	74
Tabela 5.5	Resumo operacional dos dados registrados pelo sistema de instrumentação	

	embarcado durante trajeto em linha comercial	77
Tabela 5.6	Custo com combustível por quilômetro trafegado.....	79
Tabela 5.7	Custos totais de Manutenção, em R\$.....	82
Tabela 5.8	Custo de Manutenção por Quilometro trafegado, em R\$/km.....	83
Tabela 5.9	Custo da conversão do veículo, em R\$.....	84
Tabela 5.10	Resultado do teste de campo março/abril, condição parado.....	88
Tabela 5.11	Resultado do teste de campo maio/junho, condição parado.....	89
Tabela 5.12	Resultado do teste de campo agosto/setembro, condição parado.....	89
Tabela 5.13	Teste de emissões março/abril - regime constante.....	90
Tabela 5.14	Teste de emissões agosto/setembro - regime constante.....	90
Tabela 5.15	Resultado do testes de emissões maio/junho.....	95
Tabela 5.16	Resultado do testes de emissões agosto/setembro.....	95
Tabela 5.17	Ganhos ambientais com a substituição do diesel por GNV, através da Rota Tecnológica de Ottolização.....	99

1 INTRODUÇÃO

As tecnologias tradicionalmente utilizadas pelos veículos automotores originam-se no final do século XIX, estimuladas pela crescente produção de petróleo e pela evolução da era industrial. Desde então, é marcante a expansão do transporte automotor em todo o mundo [Ribeiro, 2001]. Conseqüentemente, a indústria do petróleo desenvolveu-se intensamente, para atender tanto a demanda do setor automotivo quanto a de outros setores.

Conforme dados da International Energy Agency (IEA), 2004, o consumo de energia mundial no ano de 2002, em todos os setores da economia, foi da ordem de 7.000 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep). Deste total, 43% foi devido a consumos de energéticos de derivados de petróleo, cujo montante conta com 57% de participação do setor de transporte.

No Brasil o cenário é similar ao do resto do mundo, ocorrendo o predomínio dos derivados de petróleo sobre as outras fontes energéticas. O consumo de energia bruta foi de 191 Mtep, com 39% de participação de petróleo [MME, 2005], vide figura 1.1. Do consumo total dos derivados de petróleo, 51% correspondem ao setor de transportes.

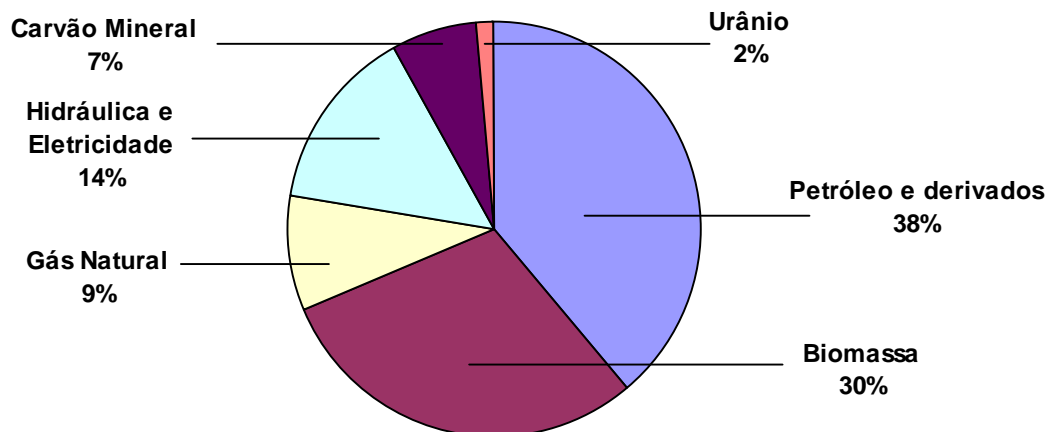


Figura 1.1: Participação por fontes na matriz energética nacional em 2004. Fonte: MME, 2005.

A PETROBRAS anunciou que em 2006 o Brasil atingiu a auto-suficiência na produção de petróleo, ou seja, produz todo o petróleo consumido no país [Guandalini, 2006]. Mesmo atingindo a auto-suficiência, o preço do produto segue a cotação internacional, fortemente influenciada pela instabilidade política do Oriente Médio e pela especulação de alguns atores envolvidos na indústria do petróleo, ocasionando a elevação do preço a patamares recorde na história conforme figura 1.2.

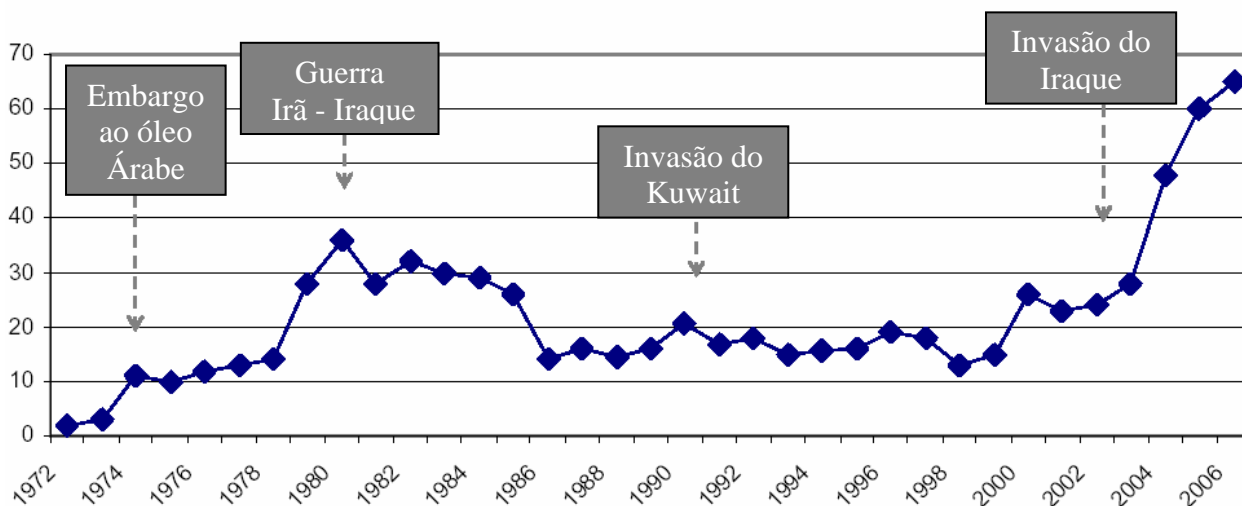


Figura 1.2: Evolução do preço do barril de petróleo nos últimos 35 anos, em US\$.

Fonte: Dudenhoeffer, 2006.

Além da elevada cotação do petróleo, outra desvantagem da utilização de seus derivados é a questão ambiental, devido à emissão de gases e materiais particulados, os quais provocam o aumento da poluição ambiental e do efeito estufa. Esse problema é agravado nos centros urbanos, dada à baixa capacidade de dispersão dos poluentes emitidos. Estima-se que nos grandes centros urbanos, com constantes congestionamentos no tráfego, cerca de 80 a 90% da emissão de poluentes seja oriunda da utilização de derivados de petróleo como combustível veicular [Whitelegg & Haq, 2003]. Somente em São Paulo, conforme CETESB, 2005, foram emitidas 5.600 toneladas de compostos de enxofre e 13.900 toneladas de material particulado pelos veículos diesel.

Neste contexto, iniciou-se a busca por fontes alternativas aos derivados de petróleo no setor automotivo, com merecido destaque a alguns combustíveis:

Etanol: Combustível alternativo renovável mais utilizado no mundo, tendo o Brasil como maior produtor e consumidor. Pode ser produzido a partir de processos petroquímicos. Porém, a sua principal fonte é a biomassa, através da qual o álcool é caracterizado como combustível alternativo, apresentando como principais insumos a cana de açúcar, o milho, a mandioca entre outros vegetais ricos em carbono [IEA, 2002].

Eletricidade: Esta é utilizada em veículos sob duas concepções básicas de motorização: veículos dedicados ou veículos híbridos. No Brasil, esses veículos são utilizados em pequena escala, em sistemas coletivos, nos grandes centros urbanos. Em alguns centros de pesquisas brasileiros estão sendo desenvolvidos projetos visando tornar viável a utilização de veículos elétricos dedicados ou híbridos em larga escala.

Biodiesel: Potencial concorrente para a substituição do diesel derivado de petróleo. O biodiesel é obtido através do processamento de vegetais denominados oleaginosos, podendo ser extraído da soja, da palma, da mamona, do babaçu, do girassol, entre outros. Sua principal vantagem é a adaptação a motores ciclo diesel, sendo esse combustível alternativo incentivado pelo Governo Federal, através de pesquisas para a produção e utilização, no seu modo puro ou ainda misturado ao diesel derivado do petróleo [Biodieselbr, 2006].

H-bio: Não se trata de um biodiesel – em que o óleo diesel, de origem mineral, é simplesmente misturado a um óleo vegetal. No H-Bio, o óleo de soja passa por uma reação química, sua molécula é quebrada e integrada ao diesel já durante o processo de refino. O resultado é um combustível com as mesmas características do diesel comum – que não exige adaptação dos motores, portanto –, mas que é menos poluente e utiliza matéria-prima renovável. O H-Bio estará disponível para o consumidor no final deste ano [PETROBRAS, 2006].

Hidrogênio: O hidrogênio pode ser utilizado através de células ou pilhas combustíveis. Seu funcionamento se assemelha ao de uma bateria comum, onde um processo físico-químico viabiliza a geração de eletricidade a partir do combustível hidrogênio interagindo com o comburente oxigênio, gerando água como principal subproduto. Hoje não existe viabilidade para a sua aplicação em larga escala, sendo utilizado em alguns projetos pilotos como combustível em veículos leves e pesados.

Gás Natural: Combustível proveniente de reservas de subsolo, associadas ou não a reservas de petróleo. O uso do gás natural (GN, ou também chamado gás natural veicular – GNV) vem crescendo em diversas partes do mundo, sendo consumido em diferentes setores, tais como industrial, automotivo, comercial e residencial. O GNV é comprimido a uma pressão de 200 bar e armazenado em cilindros. É utilizado em veículos leves através de motores dedicados ou, ainda, pela conversão de motores ciclo Otto para utilização de GNV, tornando-o um motor bi-combustível. No caso de veículos pesados existem basicamente três rotas tecnológicas para sua utilização: (i) Através de motores dedicados; (ii) Com a conversão de motores ciclo diesel para ciclo Otto (“Ottolização”); (iii) Através de motores *dual-fuel*, onde é utilizada uma mistura de GNV+diesel como combustível.

No Brasil, o GNV começou a ser utilizado em larga escala por veículos leves na década de 80, alcançando mais de 400.000 veículos leves convertidos no ano de 2006 [MME, 2006].

A escolha do melhor combustível alternativo a implantar em uma região depende de uma série de fatores intrínsecos às alternativas: Domínio da tecnologia; Disponibilidade de insumos; Escala de consumo, dentre outras. Dessa forma, existe uma série de obstáculos que

contrapõem a expansão de qualquer tipo de combustível alternativo. De acordo com Ribeiro, 2001, as barreiras estão associadas à tecnologia, à economia e ao mercado e podem ser assim explicitadas:

Barreira tecnológica: decorre dos riscos financeiros associados à pesquisa e ao desenvolvimento de novas tecnologias. Em todo o mundo, desde o final dos anos 80, os recursos aplicados neste sentido sofreram quedas substanciais.

Barreira econômica: gera uma série de discussões. Sob a perspectiva da eficiência econômica, a melhor maneira de reduzir o consumo de derivados de petróleo é aumentar os impostos sobre combustíveis fósseis. Por outro lado, reduzir os impostos relacionados aos combustíveis alternativos seria uma maneira de incentivar o consumo dos mesmos.

Barreiras de mercado: Decorrem do fato “*da sociedade desconhecer os custos ambientais e sociais do uso de petróleo no transporte*”. De fato, a poluição originada pela combustão de motores veiculares vem gerando sérios problemas à saúde da população, o que afeta diretamente a economia. Outro obstáculo relacionado à barreira de mercado é a incerteza dos investidores sobre o impacto de uma nova alternativa de combustível, além de falta de incentivos por parte das instâncias governamentais [Filho, 2005].

Dessa forma, o GNV apresenta-se como uma estratégia viável para o atendimento de curto e médio prazo das regulamentações ambientais cada vez mais rigorosas. Além disso, nas grandes zonas metropolitanas, o energético é visto como uma das poucas alternativas amplamente disponíveis de modo imediato para a redução dos impactos ambientais negativos do setor de transporte em vários mercados consumidores do mundo.

Especificamente no Brasil, o GNV vem se destacando como combustível alternativo ao uso da gasolina e do diesel, conquistando cada vez mais espaço no mercado. No país, existe hoje uma grande oferta deste combustível, destacando-se as reservas disponíveis na Bolívia e as recentes reservas descobertas na costa brasileira. Hoje, há disponibilidade de GNV nas principais capitais brasileiras, onde se encontram a maior parte da frota nacional de veículos, vide tabela 1.1.

Tabela 1.1: Frota total brasileira e frota nas cidades com disponibilidades de postos de abastecimento de GNV. Fonte: Teixeira, 2003.

Veículos	Frota total brasileira de veículos	Frota total de veículos nas cidades que possuem postos de abastecimento de GNV
Veículos de Passeio	22.486.611	10.247.641
Veículos comerciais leves	3.507.026	1.301.684
Ônibus	441.797	181.122
Caminhão	1.723.745	493.896
Motocicletas	1.723.745	1.145.518
Outros	4.646.440	407.441
Total	34.529.364	13.777.302

Associado às vantagens econômicas e ambientais, o GNV é tido como prioridade no planejamento energético nacional, conforme destaca a Ministra das Minas e Energia, Dilma Rousseff: “*O grande esforço para o desenvolvimento do mercado de gás natural não será feito em termoelétricas: será na área industrial e, sobretudo, na veicular*” [Brasil e Energia, 2004].

1.1 Veículos de Transporte Urbano

Na década de 80 foram realizadas as primeiras experiências com vistas à utilização de GNV no transporte coletivo urbano em centros como São Paulo, Rio de Janeiro, Natal e Salvador. Esses projetos esbarraram, principalmente, em problemas quanto à qualidade do combustível ofertado na época e na tecnologia disponibilizada nos motores GNV utilizados, além de outros fatores.

A PETROBRAS, juntamente com a Rede Gás e Energia, buscam rotas tecnológicas que viabilizem a utilização de GNV no transporte coletivo urbano em substituição ao diesel. Como estratégia e, visando o desenvolvimento de alternativas para superar as barreiras tecnológicas, de mercado e econômicas, incentivam-se projetos pilotos junto a centros de pesquisa, para implantação de GNV no transporte coletivo urbano. Esses projetos estão desenvolvendo temas em sistemas de reabastecimento e armazenamento de GNV, e sistemas e conjuntos moto-propulsor para veículos pesados usados no transporte de passageiros e cargas.

Ainda, como incentivo ao uso do GNV em substituição ao diesel, o Governo Federal e PETROBRAS assinaram um termo de cooperação durante a VIII marcha a Brasília em Defesa dos Municípios, em março de 2005. Pelo termo de cooperação assinado, a PETROBRAS irá comercializar o metro cúbico de GNV ao preço máximo de 55% do valor do litro de diesel para os empresários de transporte coletivo urbano, durante 10 anos [ANTP, 2005].

Dentro deste cenário, na UFRGS, através do Grupo de Projeto, Fabricação e Automação Industrial (GPF AI), iniciou em 2004 o projeto piloto GASBUS, com o objetivo de analisar a viabilidade da conversão de motores diesel para utilização de GNV através da “rota tecnológica de Ottolização”. Esta consiste em, através da instalação de um kit comercial, converter o motor ciclo diesel em ciclo Otto, adequado à utilização de Gás Natural.

Esta tecnologia já é utilizada em países como Índia e Argentina, sendo sua utilização pioneira no Brasil.

1.2 Objetivos

Tem-se como objetivo geral, projetar e implementar uma metodologia para análise comparativa do desempenho de ônibus de transporte coletivo urbano utilizando os combustíveis diesel e GNV, operando em linhas comerciais na grande Porto Alegre. Os dados registrados em condições reais de operação possibilitaram a comparação dos custos operacionais, manutenção e emissões entre os veículos, determinando a viabilidade da implantação do GNV através da rota tecnológica da Ottolização.

Como objetivos específicos, pretende-se realizar um estudo de caso com dois tipos de veículos: ônibus diesel original e um ônibus de características construtivas semelhante, convertido para a utilização do GNV como combustível. Para tanto, a execução do projeto piloto GASBUS será realizada em diversas etapas como:

- Conversão do motor via rota tecnológica de ottolização;
- Montagem dos cilindros de armazenamento de GNV;
- Instalação de um sistema de instrumentação embarcada;
- Registro dos dados operacionais dos veículos de teste de campo;
- Levantamento dos custos envolvidos na manutenção do veículo, explicitando os custos de mão-de-obra, peças de reposição e pneus;
- Análise dos custos totais envolvidos na operação, determinando o tempo de retorno de investimento;
- Medição do nível de emissões do GASBUS trafegando em linhas comerciais – condições reais de operação.

1.3 Metodologia

O presente estudo foi concebido a partir de uma demanda de mercado apresentada pela PETROBRAS/Rede Gás Energia/TBG/SULGAS empresas responsáveis pela distribuição e comercialização do GNV no estado do Rio Grande do Sul, visando a inserção do GNV no modal de transporte coletivo urbano através da rota tecnológica de “Ottolização”. Para o desenvolvimento deste trabalho de perfil interdisciplinar, pesquisa e desenvolvimento tecnológico foi realizada uma parceria com a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), a fabricante canadense de cilindros leves Dynatec, representada no Brasil pela empresa Bee Engenharia e a empresa de viação Soul, operadora de linhas comerciais de transporte coletivo entre as cidades de Porto Alegre e Alvorada. A gestão do projeto foi conduzida pela UFRGS, com reuniões periódicas para a avaliação juntamente com os respectivos parceiros do projeto. Nestas reuniões foram definidos o tema com seus objetivos, seus desdobramentos e pontos a serem trabalhados dentro deste projeto de cooperação.

Conforme estabelecido pelo grupo de trabalho, um dos objetivos propostos foi a avaliação das características operacionais de um ônibus diesel convertido para GNV – GASBUS, através da rota tecnológica da “Ottolização”. Em particular, foram priorizados os comparativos de custos operacionais e de manutenção entre veículos diesel originais e o convertido para GNV. Para a avaliação dos ganhos ambientais, estabeleceu-se a necessidade de medidas comparativas entre as emissões geradas na combustão.

A partir da definição do objetivo, foram realizadas pesquisas e avaliações pela equipe de pesquisadores da UFRGS, analisando os resultados obtidos através da metodologia baseada em testes de campo, onde o GASBUS trafegou em condições reais de operação, durante um período de 12 meses, implementada e registrada neste trabalho.

Ainda desenvolveu-se uma metodologia para a medição de emissão de poluentes com o veículo em condições reais de operação, caracterizando as emissões reais geradas durante percurso em linha comercial.

Assim, após o projeto do experimento, montou-se um sistema de instrumentação embarcada para registros dos dados característicos de desempenho e do nível de emissão de poluentes do GASBUS.

1.4 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho apresentou uma introdução no capítulo um, onde foi contextualizado o assunto e apresentado os objetivos a serem atingidos.

No segundo capítulo é apresentada a revisão bibliográfica dos tópicos pertinentes aos testes desenvolvidos, bem como definições e conceitos que servem de embasamento para o desenvolvimento e execução da pesquisa com seus desdobramentos e registros que seguem nos capítulos seguintes.

O terceiro capítulo traz uma revisão dos fundamentos de motores endotérmicos, destacando o funcionamento do motor antes e depois da conversão do diesel para GNV, bem como as características de emissão de poluentes em motores de combustão interna.

O capítulo quatro apresenta o projeto do experimento executado no período de testes de campo. Também descreve as etapas executadas para conversão do veículo, assim como o sistema de instrumentação embarcado instalado no GASBUS para acompanhamento do desempenho durante a operação em linhas comerciais. Ainda apresenta-se a metodologia proposta para a medição da emissão de poluentes, descrevendo os modos de teste executados bem como o sistema de instrumentação embarcado implementado.

No capítulo cinco apresentam-se os registros operacionais propostos no projeto de experimento apresentado no capítulo quatro, resultados dos testes para a medição de emissões e uma análise comparativa dos custos operacionais dos veículos diesel e Ottolizado.

Tem-se no capítulo sete a conclusão e sugestões de continuidade propostas para esse trabalho.

No fechamento do trabalho, após o capítulo das conclusões, estão as referências bibliográficas e, na seqüência, anexos e apêndices do trabalho.

2 PANORAMA DA UTILIZAÇÃO DE GNC NO TRANSPORTE COLETIVO URBANO

Os dois choques do petróleo ocorridos nos anos 70, seguidos das altas taxas de juros internacionais, impuseram uma revisão na política energética brasileira, principalmente no que se referia a grande dependência nacional dos combustíveis derivados do refino do petróleo para o setor de transportes, notadamente o óleo diesel e a gasolina. As diretrizes fundamentais procuravam fomentar a substituição do petróleo importado e a conservação de energia de modo a minimizar o impacto do aumento dos preços do petróleo no mercado internacional sobre a economia brasileira.

Entre as medidas tomadas, pelo Ministério das Minas e Energia, no sentido de buscar fontes de energia alternativa para o transporte rodoviário, destaca-se a criação do Programa Nacional do Álcool – PROÁLCOOL, iniciado na década de 70 e o Plano Nacional de Gás Natural – PLÁNGAS, desenvolvido na década de 80. Esses programas tinham, entre outras finalidades, a de buscar um substituto energético para o óleo diesel empregado no transporte rodoviário de passageiros e de carga, principalmente nos grandes centros urbanos, onde também já se tornavam críticos os problemas ambientais decorrentes das emissões de poluentes atmosféricos.

Nesse capítulo são descritas as principais experiências no Brasil e em alguns países no mundo na utilização de GNC no transporte coletivo urbano. Na seqüência deste foram discutidos os resultados obtidos, descrevendo as medidas necessárias para o sucesso da conversão de novas frotas de ônibus para GNC na opinião do governo, frotistas e fabricante de veículos.

2.1 Experiência brasileira na utilização do GNC no transporte coletivo urbano

Segundo Santos *et al.*, 2003, as primeiras frotas experimentais com ônibus a GNC surgiram no início dos anos 80 na cidade do Rio de Janeiro, onde a PETROBRAS desenvolvia atividades de produção de petróleo e GN e em São Paulo, onde o gás metano, principal componente do gás natural, era obtido a partir de Aterro Sanitário. Outras cidades como Natal, Salvador, Recife e Aracaju também realizaram experiências nos anos 80 com ônibus equipados com motores dedicados ou motores bi-combustível (diesel+gás), conforme apresentado na tabela 2.1.

Tabela 2.1: Frota GNV durante experiências anteriores no transporte coletivo.

Cidade	Frota GNV Motor dedicado	Frota GNV Motor bi-combustível
São Paulo	265 (em 1999)	-----
Rio de Janeiro	177 (em 1997)	19 (em 1989)
Salvador	5 (em 1991)	5 (em 1991)
Natal	27 (em 1991)	2 (em 1996)
Aracaju	25 (em 1987)	-----
Recife	14 (em 1987)	2 (em 1987)

Na seqüência apresentam-se as experiências nas cidades do Rio de Janeiro e São Paulo, onde realizaram-se os maiores programas de implantação de GNC no transporte coletivo do Brasil.

Rio de Janeiro

No desenvolvimento dos testes de campo um fator importante foi a evolução tecnológica dos motores para a utilização do GNC. O Centro de Pesquisas da PETROBRAS (CENPES), no Rio de Janeiro, iniciou na década de 80 o desenvolvimento de um motor para operar com uma mistura de diesel+GNC (*dual-fuel*). Estes motores caracterizam-se por substituição do diesel em cerca de 85%, utilizando este somente para iniciar o processo de combustão do GNC [Lobkov, 2006]. A Mercedes Bens do Brasil (MBB) iniciou o desenvolvimento de motores também no início da década de 80, optando por comercializar chassis equipados por motores dedicados para a utilização de GNC e cilindros de aço para armazenagem do combustível. Os ônibus equipados com estes chassis possuíam uma autonomia entre 250 e 300 km.

No estado do Rio de Janeiro a experiência com GNC iniciou no ano de 1984 envolvendo a Companhia de Transporte Coletivos (CTC), com a entrada em operação de 18 ônibus utilizando motores diesel+GNC, desenvolvidos pelo CENPES. Os resultados, após 210.000 km rodados, indicaram redução das emissões de particulados (fumaça negra), redução de 40 a 70% do consumo de óleo diesel, porém um consumo de energia 20% superior, se comparado com a operação do veículo com o ciclo diesel tradicional. Posteriormente, já no início da década de 90, alguns testes foram feitos em veículos equipados com dispositivos eletrônicos para controle dos sistemas de alimentação de combustível e os resultados obtidos foram bem mais favoráveis. Foram obtidas economias de 65% a 85% de diesel, com desempenho semelhante ao veículo tradicional. No entanto, fatores políticos e econômicos,

vinculados aos interesses da empresa e do país, conduziram à descontinuidade deste programa de desenvolvimento [Lobkov, 2006].

Em 1992, para transporte dos participantes do fórum Mundial do Meio Ambiente ECO92, foram adquiridos 150 novos ônibus a GNC [Balassiano, 1997].

O fechamento da CTC em 1997 ocasionou uma descontinuidade do programa de GNC no Rio de Janeiro. A última iniciativa teve início ainda no final de 2002 quando foi lançado mais um projeto piloto contemplando uma parceria entre a Companhia Distribuidora de Gás do Rio de Janeiro (CEG) e a Transurb [CEG, 2002].

São Paulo

Conforme Lindau *et al.*, 2002, e Lobkov, 2006, o uso de ônibus a GNC, em São Paulo, teve um começo muito promissor. A experiência para utilização de Gás Metano como combustível no Município de São Paulo iniciou-se em 1983, com a celebração de Convênio de Cooperação Técnica entre CMTC, Mercedes-Benz do Brasil (MBB), Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT e SABESP, quando se definiu que 10 ônibus seriam adaptados para operarem com o sistema bi-combustível (gás-diesel). O Gás Metano era oriundo da decomposição da matéria orgânica contida no Resíduo Sólido Urbano depositado no Aterro Sanitário de Santo Amaro. Este, após a filtragem e compressão, abastecia os ônibus na Estação Compressora junto ao aterro sanitário. Em 1986 o programa foi desativado por motivos Políticos.

Em 1988, o início da distribuição de GNC originário da Bacia de Campos através de carretas-feixes propiciou entre 1989 e 1991 a retomada das experiências de campo, por parte da CMTC, com 8 ônibus a GNC, sendo testados os seguintes equipamentos:

- 02 ônibus motores ciclo Otto cedidos pela MBB;
- 02 motores modificados para ciclo Otto (Faculdade de São Carlos);
- 02 Motores bi-combustível utilizando o sistema RODOGÁS;
- 02 motores bi-combustível utilizando sistema AFS Canadense.

Os motores ciclo Otto foram os que apresentaram melhores resultados operacionais.

Em 1991, devido a uma política para a redução da poluição ambiental e a diminuição dos custos operacionais gerados pelo GNC, foi promulgada a Lei municipal nº 10.950, que estabeleceu um período de 10 anos para a renovação da frota de onze mil ônibus destinados ao transporte coletivo de passageiros com ônibus utilizando GNC como combustível [UNILIVRE, 2003].

No biênio 1991/1992, para continuidade do programa, foram adquiridos 60 ônibus movidos a GNC, fornecidos pela MBB, equipados com motor aspirado operando com mistura

pobre em ciclo aberto e catalisador de oxidação, atingindo uma potência de 150 cv [Lobkov, 2006].

Entre 1991 e 1993 foram avaliados pelos técnicos da CMTC os ônibus de 1ª geração durante a operação, chegando aos seguintes diagnósticos:

- baixa potência, com perda de rendimento em acíves acentuados;
- carbonização com pré-ignição e detonação de alguns motores;
- baixa eficiência do sistema de alimentação e outros problemas em conjuntos periféricos ao motor.

Passados cinco anos de vigência da Lei Municipal 10.950, apenas 133 ônibus foram convertidos. Diante do atraso no cumprimento desta, a Secretaria Municipal dos Transportes procurou identificar as causas, destacando como principais problemas: (i) Sistema de abastecimento; (ii) Custos envolvidos do energético frente ao diesel; (iii) Maior número de falhas mecânicas nos veículos GNC, principalmente no redutor de GNC e sistema de embreagem; (iv) Problemas para a aquisição dos ônibus; (v) custos mais elevados de operação dos ônibus GNC em relação aos diesel [Ribeiro, 2001].

Em 1996, a Lei 12.140 alterou a Lei 10.950, promovendo uma flexibilização no cronograma estabelecido anteriormente, de forma que, nos dois primeiros anos de vigência da nova Lei, a substituição dos ônibus deveria ocorrer à proporção de 5% ao ano da frota existente no período anterior, elevando-se para 10% a partir do terceiro ano. Também foi modificado o prazo de conversão dos onze mil ônibus, passando de 2001 para o ano de 2007. Nesse ano a MBB iniciou a comercialização do motor de 2ª Geração, modelo OM366LAG, equipado com turbo - compressor e *intercooler*. Esse motor possui potência de 230 cv a 2600 RPM e torque máximo de 170 N.m.

Em 1998 a CMTC realizou uma análise dos 246 ônibus movidos a GNC em operação em São Paulo, com os resultados agrupados de acordo com a geração do motor, vide Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Frota de ônibus GNC operante em São Paulo em 1998. Fonte: Lobovk, 2006.

Ônibus com motores 1ª Geração (150 cv)				
Empresa	Quantidade	Quilometragem [km]	Consumo de combustível [m³]	Desempenho [km/m³]
CTC	61	3.571.335	1.872.616	1,91
Viação Jaraguá	72	4.133.316	2.110.336	1,96
Total 1ª Geração	133	7.704.651	3.982.952	1,93¹
Ônibus com motores 2ª Geração (230 cv)				
Empresa	Quantidade	Quilometragem [km]	Consumo de combustível [m³]	Desempenho [km/m³]
CCTC	20	233.574	133.239	1,75
V. Santa Madalena	28	1.063.104	765.908	1,39
GATUSA	65	618.732	346.611	1,79
Total 2ª Geração	113	1.915.410	1.245.759	1,59¹

¹ Média ponderada.

Comparando as duas gerações de motores comercializadas pela MBB, o motor de 2ª geração disponibiliza 53% mais potência que o motor de 1ª geração, embora o consumo de combustível aumente 21%. Com o aumento de potência melhoraram o desempenho operacional dos ônibus GNC.

Comparando com os motores Diesel, a emissão do ruído dos motores GNC são de 10 dBA, aproximadamente 50% menor que nos motores diesel, emitindo o mesmo nível de ruído de um automóvel. Essa redução é percebida pelos passageiros, motoristas e a população. Ainda nota-se a cessão da emissão de fumaça preta com a troca do combustível [Teixeira, 2003].

A partir de 2000 a frota de ônibus a GNC começou a declinar na cidade de São Paulo. Em 2001, apenas cerca de 224 ônibus a GNC circulavam em São Paulo [Farah, 2001]. Segundo Santos *et al.*, 2003, em 2003 existiam cerca de 150 ônibus em operação, porém deverão desaparecer quando passarem por revisões técnicas mais profundas, incluindo a inspeção periódica dos cilindros de abastecimento, acentuando ainda mais a sua inviabilidade econômica. A capital paulista chegou a atingir, no auge do programa, 265 ônibus a GNC [Farah, 2001].

2.2 Experiência da utilização de GNC no transporte coletivo em outros países

Após o choque no preço do petróleo ocorrido nos anos 70, associado à busca de combustíveis limpos em substituição aos derivados do petróleo, levou muitos países a experiências na utilização de GNC no transporte coletivo. Podem ser destacadas as experiências de implantação de GNC nos seguintes países:

Itália

Na Itália, iniciaram os testes com motores GNC no ano de 1978, utilizando motores bi-combustível, sendo no ano seguinte o início da operação com motores dedicados. Frente ao sucesso dos protótipos e redução dos custos, em 1986, a Itália contava com uma frota de cerca de 60 veículos [Balassiano, 1991].

Estados Unidos

Os Estados Unidos (EUA) é o líder mundial no uso de ônibus a GNC [Watt, 2000], apesar de ser hoje o sexto país com a maior frota de veículos a GNC, com mais de 125.000 veículos [IANGV, 2003]. O principal incentivo à utilização do combustível no transporte coletivo é a substituição do petróleo importado por um combustível abundante no país, incentivos do governo Federal Americano além da redução de emissão de poluentes.

Nos Estados Unidos é comercializado o gás natural na sua forma comprimida (GNC) e liquefeita (GNL).

O governo federal dos EUA apóia ônibus a GNC. Os ônibus são vistos como benéficos para a qualidade do ar e o GN é um recurso doméstico abundante. Embora os ônibus a GNC tenham um maior custo inicial, eles são vistos como um bom investimento de longo prazo. O seu uso promove o desenvolvimento econômico e diminui o consumo dos combustíveis importados.

Atualmente cerca de 10% da sua frota de ônibus urbanos, utilizam o GNC como combustível. Cidades como Los Angeles, através de programas de fomento (Clean Cities), em pouco tempo terão toda sua frota de transporte coletivo urbano operando a gás. Destaca-se o crescimento significativo nas encomendas aos fabricantes locais por veículos novos, ou seja, na renovação das frotas utilizando GNC [Filho, 2005].

Suécia

Malmö, na Suécia, é a cidade da Europa com a maior frota de ônibus a GNC [Seisler, 2001]. A decisão de introduzir ônibus a GNC surgiu por razões ambientais, devido à necessidade de implantar um sistema de transporte limpo nas áreas centrais da cidade [Watt, 2000].

As principais razões que favoreceram a escolha do GNC em substituição ao diesel foram [Carlson, 1997]: (i) somente o GN possibilitava a melhoria do meio ambiente do centro da cidade; (ii) as refinarias não prometiam um diesel de melhor qualidade e entendiam que o futuro do diesel limpo era pouco promissor - hoje se sabe que estavam erradas na previsão; (iii) o GN havia sido introduzido recentemente no mercado sueco, a operadora liderava a Corporação de Transporte Público e, naturalmente, a distribuidora de GN tinha muito interesse em vender GN a um cliente como este; (iv) a operadora de transporte tinha experiência com o GLP em alguns ônibus. As principais dificuldades encontradas foram referentes à burocracia enfrentada devido à falta de normas técnicas para a regulamentação do GNC.

Argentina

O programa de substituição do óleo diesel para GNC teve início em 1984. No ano de 1987 foi reduzido o subsídio do óleo diesel para tornar o GNC economicamente viável no médio e longo prazo [Mattos, 2001].

O resultado do plano foi a substituição da gasolina e do álcool importados do Brasil pelo GNC, tendo hoje a Argentina a maior frota de veículos GNC do mundo.

Rússia

Desde 1982, segundo o programa do governo da ex-URSS, estavam sendo produzidos mais de 30 modelos de ônibus e caminhões, sendo produzidos mais de 100.000 veículos até então. Existe uma vasta experiência no uso massivo de ônibus e caminhões com este combustível em grandes centros urbanos como Moscou, São Petersburgo, Kiev e Tashkent [Lobkov, 2006].

A exploração em massa na Rússia dos veículos que utilizam gás natural como combustível demonstrou que os motores trabalham entre 1,5 e 2 vezes mais sem necessidade de reparos. Isto se deve ao fato de que, durante a combustão de gás, praticamente não se forma material particulado, que desgasta os cilindros e êmbolos, além do fato de que a película lubrificante que os cobre não ser removida pelo gás, como ocorre no caso da gasolina, corroendo menos as partes metálicas [Lobkov, 2006].

2.3 Análise das experiências anteriores

As experiências nas décadas de 80 e 90 deixaram uma imagem negativa da utilização de GNC no transporte coletivo urbano. A seguir apresentam-se os principais problemas enfrentados, citados por Watt, 2000, Cannon *et al.* 2000, Farah, 2001, Ribeiro, 2001, Lindau *et al.*, 2003, e Santos *et al.*, 2003, servem como referenciais para a situação brasileira.

Uma das principais barreiras para implantação do ônibus a GNC reside nos maiores custos dos ônibus GNC em relação aos ônibus tradicionais diesel. Esse custo pode ser dividido em três categorias: custo de aquisição do veículo; custo da infra-estrutura de abastecimento (incluindo a modificação nas garagens); e custo de operação e manutenção dos veículos.

Custos de aquisição dos ônibus a GNC são mais elevados que os equivalentes a diesel. Um ônibus a GNC típico americano custa entre 15% e 25% mais que um equivalente a diesel [Cannon *et al.*, 2000]. No Brasil ocorre a resistência dos empresários de ônibus diante das limitações para a revenda dos ônibus usados, no caso restrita aos municípios atendidos por gasodutos [Ribeiro, 2001].

Custos com infra-estrutura de abastecimento são significativamente mais elevados que o requerido para o abastecimento de óleo diesel. Dependem de vários fatores como a sua localização, o tipo de abastecimento utilizado, e a manutenção dos equipamentos, sendo de 5 a 8 vezes mais oneroso que os requeridos pelos ônibus diesel [Watt, 2000]. Nos projetos de utilização de GNC brasileiros, o abastecimento era realizado em postos convencionais, com tempos de abastecimentos maiores de 15 minutos.

Adaptação das garagens dos ônibus diesel para os ônibus GNC. Como o GN é mais leve que ar, ele dissipa facilmente, requerendo uma adequação do teto das garagens fechadas [Watt, 2000]. No caso de garagens fechadas devem dispor de dispositivos de segurança tais como sensores e alarmes para detecção de metano a níveis perigosos, com risco de explosão.

Custos de operação dos ônibus a GNC dependem fortemente do preço do combustível e do consumo do ônibus. Um ponto importante é o modo de condução do motorista, uma vez que o motorista está adaptado a resposta do motor diesel. A condução do veículo de modo correto pode diminuir o consumo de combustível em mais de 25%.

Custo de manutenção dos ônibus varia entre empresas analisadas. Alguns operadores, particularmente nos EUA e Canadá, relatam que a manutenção de ônibus a GNC seria 40% mais onerosa que a manutenção de ônibus a diesel. Alguns operadores como a Sunline e Sacramento RT obtiveram custos inferiores com manutenção. No Brasil esta foi uma das

barreiras para o sucesso da implantação do GNC, sendo os veículos GNC apresentaram quebras devido ao sistema de transmissão e falhas do sistema de ignição [Ribeiro, 2001].

Para tornar a operação economicamente viável quanto aos custos de manutenção e operação, a frota precisa alcançar economia de escala. Relatórios dos EUA e da França mostram que frotas com 50 ou mais ônibus produzem resultados significativamente melhores que frotas menores, particularmente se elas estiverem localizadas todas em uma mesma garagem [Watt, 2000]. Conforme Teixeira, 2003, para o bom andamento dos programas de ônibus a GNC é necessário o treinamento do pessoal envolvido na parte de abastecimento, manutenção e ainda na operação.

A autonomia dos ônibus é outra barreira a ser enfrentada, sendo menor que a dos ônibus equivalentes a diesel. Um ônibus a GNC típico tem uma autonomia média de 400 km comparada com os 700 km dos ônibus a diesel. A capacidade de armazenamento envolve uma troca compensatória entre o peso do cilindro, a autonomia e a carga útil dos ônibus. Rotas e viagens longas durante o dia devem ser planejadas de forma cuidadosa para assegurar a não ocorrência de dificuldades operacionais ou custos adicionais [Watt, 2000]. No caso da experiência na cidade de São Paulo, foram utilizados ônibus tipo PADRON, com a instalação de 10 cilindros de aço com uma capacidade entre 100 e 110 m³, garantindo uma autonomia de menos de 200 km [Lindau *et al.*, 2003].

Tempo de abastecimentos elevados, em média superiores a 15 minutos contra menos de 5 minutos necessários para o abastecimento dos ônibus diesel;

Falta de qualidade do GNC fornecido, muitas vezes contaminado pelo óleo dos compressores nos postos de abastecimento;

A diminuição na eficiência e confiabilidade dos ônibus GNC é outra barreira destacada nas experiências anteriores. É comum a ocorrência de uma diminuição na eficiência do combustível GNC da ordem de 10 a 15%, quando comparado ao diesel. Raramente este nível de redução de eficiência pode ser atribuído apenas ao motor, a menos que envolva tecnologias de conversão antigas [Watt, 2000]. Os resultados derivados da introdução de ônibus a GNC no início dos anos 90 revelaram que a confiabilidade em ônibus a GNC não era igual a do diesel. Em muitos casos esse valor atingia patamares da ordem de metade da confiabilidade apresentada pelos ônibus a diesel [Teixeira, 2003].

Limitação de revenda dos ônibus usados a cidades que possuam abastecimento de GNC, dificultando a comercialização dos ônibus usados, prática comum com os ônibus diesel.

Segundo Ribeiro, 2001, uma pesquisa onde participaram mais de 100 agentes de diversos setores da indústria do GN, identificou as principais barreiras para o uso do GNC no Brasil:

(i) a falta de planejamento governamental quanto a garantias de suprimento de combustíveis sendo que o Programa Nacional do Álcool reduziu a confiança da sociedade em novos combustíveis alternativos aos derivados do petróleo;

(ii) a inexistência de uma política de preços de longo prazo que incentive o uso de combustíveis alternativos e

(iii) questões normativas, regulatórias e de fiscalização pertinentes às condições de segurança das instalações tanto nos postos de abastecimento como nos veículos convertidos.

É importante destacar que a promoção de novos combustíveis, como o GNC, fica sempre à mercê de sérios comprometimentos decorrentes de eventuais acidentes graves.

Segundo a Mercedes-Benz do Brasil [MMB, 2000], única fabricante nacional de chassi com motor dedicado a GNC, o êxito de um programa brasileiro voltado para o uso do GNC em ônibus dependeria de vários fatores decorrentes das ações:

(i) governamentais: legislações ambientais; oportunidades de financiamento; reduções de impostos e tarifas diferenciadas;

(ii) fabricantes de veículos: eficiência no consumo; manutenção adequada; desempenho superior; custo operacional competitivo;

(iii) empresas de petróleo e GN: extração e ampla distribuição; custo compatível; qualidade do GN e

(iv) fornecedores de equipamentos: qualidade e preço adequado de compressores e cilindros.

De acordo com GASBUS, 2003, na visão dos frotistas o sucesso de um programa de GNC para ônibus urbanos residiria na:

(i) parceria ativa com fornecedores de equipamentos (veículos, serviços e peças);

(ii) fornecimento adequado do GNC (infra-estrutura e logística);

(iii) autoridades públicas (remuneração adequada do serviço ofertado, incentivos à adesão de tecnologia veicular mais favorável ao meio ambiente)

(iv) custo da operação do ônibus GNC vantajoso em relação ao ônibus diesel;

(v) programas de financiamento ao setor [Farah, 2001].

A experiência americana com ônibus a GNC apresenta várias lições (Watt, 2000):

(i) para justificar os custos adicionais, é preciso haver um comprometimento dos operadores de frotas e este comprometimento deve envolver todos os que trabalham no setor;

- (ii) uma parte significativa da frota de ônibus deve passar para o GNC;
- (iii) o sucesso da operação do ônibus a GNC não pode depender da necessidade de suplantar algum obstáculo regulatório;
- (iv) o ônibus a GNC tem um custo da ordem de 10 a 20% a mais que um equivalente a diesel;
- (v) o abastecimento, a manutenção e a infra-estrutura de estocagem é cara, mas relativamente simples e duradoura;
- (vi) deve haver um amplo treinamento de motoristas e mecânicos;
- (vii) não basta apenas a regulamentação governamental, incentivos são também necessários para para encorajar o uso de GNC;
- (viii) é preciso haver o envolvimento ativo do fornecedor de combustível;
- (ix) há a necessidade de reconhecer e aceitar alguns custos adicionais e inconveniências durante a fase de transição;
- (x) os passageiros e o público precisam ser informados; e
- (xi) as despesas com combustível são geralmente reduzidas;

2.4 Cenário Atual

2.4.1 Motores de combustão interna

A partir da constatação de que a grave poluição ambiental verificada nos grandes centros urbanos advinda da queima de combustíveis em veículos automotores, países europeus, os Estados Unidos e Japão iniciam programas visando controlar as emissões de poluentes advindas da queima do petróleo. Estes em geral estabelecem limites de emissões cada vez mais estreitos para emissão de gases formadores do efeito estufa pelos veículos automotivos.

Para o atendimento dos novos limites de emissões de poluentes foram desenvolvidas novas tecnologias de motores de combustão interna, agregando os benefícios da eletrônica embarcada e sistemas de tratamento dos gases de escape. Este aumento dos custos tornou competitiva a utilização de combustíveis alternativos aos derivados de petróleo tais como eletricidade, hidrogênio ou ainda GNC.

No Brasil iniciou-se durante a década de 80 um programa nacional que contemplasse as emissões atmosféricas de origem veicular, que fosse tecnicamente factível e economicamente viável, o Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA – criou, em 1986, o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE. O PROCONVE tem

como objetivos a redução dos níveis de emissão de poluentes nos veículos automotores além de incentivar o desenvolvimento tecnológico nacional da engenharia automotiva. Os limites máximos de emissão de poluentes foram fixados, com um cronograma específico para três categorias distintas de veículos, são elas: "Veículo Leve de Passageiros" (automóveis); "Veículo Leve Comercial" (pick-up, vans, utilitários, etc) e "Veículo Pesado" (ônibus e caminhões). Este programa ainda é responsável pela determinação dos métodos e equipamentos para a medição de poluentes. As normativas brasileiras para veículos pesados são baseadas nas normativas implantadas na Comunidade Européia (EURO).

Para atender estes níveis de emissões automotivos tão baixos para os veículos pesados, os fabricantes de motores estão investindo em tecnologias nos motores Diesel. As principais inovações foram quanto são:

- Sistemas de gerenciamento eletrônico do motor;
- Melhoria na formação da mistura na câmara de combustível elevando a pressão de injeção de combustível (*common rail*) e novos bicos injetores;
- Sistemas de pós-tratamento dos gases de escape, como catalisadores;
- EGR (*Exhaust Gas Recirculation*), recirculação dos gases de escape entre outros.

Os sistemas de tratamento de gases de escape possuem sua eficiência diminuída devido a elevada concentração de enxofre presente no combustível brasileiro (2000 ppm) comparado com o diesel comercializado na Europa, com até 50 ppm. Em paralelo, a PETROBRAS realizou investimentos da ordem de US\$ 8,2 bilhões em refinarias para a redução do teor de enxofre de 2000 ppm (diesel metropolitano) para menos de 500 ppm (D500). Este combustível já está disponível hoje em algumas capitais brasileiras.

Em contrapartida com este desenvolvimento tecnológico dos motores Diesel, aumentaram a complexidade dos motores, os custos de fabricação e manutenção.

Para atender os limites de emissão outra alternativa para o Brasil é a utilização de combustíveis alternativos, destacando o GNC e o biodiesel. Existem disponíveis para a utilização de dos motores Otto a GNC três alternativas comerciais: Motor dedicado, Motor bi-combustível ou Ottolização.

Motor GNC dedicado

Existe uma gama de fabricantes internacionais de motores dedicados a GNC no mundo como a *John-Deere*, Cumins, Detroit Diesel entre outros. No Brasil, a MBB exporta chassis equipados com motor OH477 (aspirado) e OM366LAG (turbo e intercooler), com sistemas de tratamento de gases de escape e atendendo os limites de emissões EURO IV.

Para a avaliação dos equipamentos disponíveis entra em operação na cidade do Rio de Janeiro um ônibus fabricado com um chassi comercial OH1721, da Mercedes-Benz, equipado com motor OH447, utilizando cilindros de aço de armazenamento totalizando uma autonomia superior a 250 km. O ônibus operou em vias urbanas, com um consumo específico de combustível de 1,47 km/m³. A operação/avaliação é realizada pelo CENPES – PETROBRAS.

Motores Dual Fuel (diesel+GNC)

Motores operando com mistura diesel+GNV estão sendo desenvolvidos pela empresa Delphi no Brasil, estando esses em fase de testes e já utilizados em aplicações como grupo-geradores. A empresa da Nova Zelândia CIVIC comercializa um chassi equipado com motor bi-combustível também, estando algumas unidades em teste no Brasil, na cidade de Campo Grande - MS. A principal dificuldade dos fabricantes destes motores é atender os limites de emissões estabelecidos pelo PROCONVE com as tecnologias existentes hoje para este tipo de motor.

Motores Ottolizado

A rota de Ottolização é utilizada em alguns países como Argentina e Índia. Nesses países, foram convertidos veículos equipados com motores OM366L (aspirado) e OM366LAG (turbo e intercooler). A conversão dos motores é realizada por meio da instalação de kits de conversão, sendo comercializados pelas empresas Tomasetto Achille, Contereal e Galileu (Argentina), Perkins (EUA) entre outras.

Esta rota tecnológica possui como principais vantagens o tempo de implantação, visto que pode ser convertida os veículos Diesel, não necessitando a espera pela renovação da frota.

2.4.2 Logística de abastecimento

Quanto a logística do GNC, atualmente o transporte deste combustível realiza-se na sua grande maioria através de gasodutos, disponibilizando o combustível em 16 estados brasileiros incluindo os principais centros industriais e urbanos do país. Os estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná são abastecidos pelo GNV boliviano. Na figura 2.1 apresenta-se a distribuição dos gasodutos no Brasil.



Figura 2.1: Rede de distribuição de Gás Natural no Brasil. Fonte: Teixeira, F., 2003.

No Brasil, cerca de 65% do GNV consumido é importado da Bolívia. A PETROBRAS anunciou a descoberta de novas reservas de GN nas bacias de Campos, investindo na extração visando reduzir a dependência da importação do GN boliviano. Na figura 2.2 apresentam-se as reservas comprovadas de GN nos últimos anos.

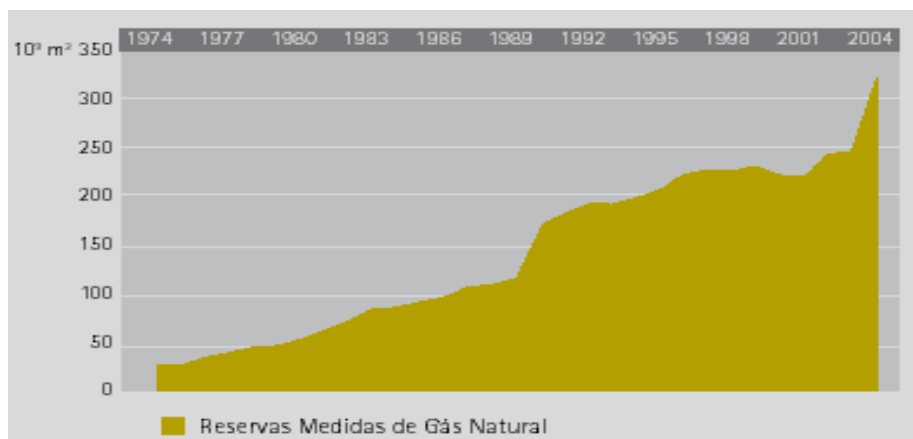


Figura 2.2: Reservas brasileiras comprovadas de GN, em 10^9 m^3 .

O cenário nacional associando a disponibilidade de GNC nos principais centros urbanos e as perspectivas do aumento da produção nacional garantem o fornecimento de combustível de qualidade aos frotistas. Para viabilizar financeiramente a utilização deste combustível, o Governo Federal e PETROBRAS assinaram um termo de cooperação, durante a VIII marcha a Brasília em Defesa dos Municípios, em março de 2005. Pelo termo de cooperação assinado, a PETROBRAS irá comercializar o metro cúbico de GNV ao preço máximo de 55% do valor do litro de diesel para os empresários de transporte coletivo urbano, durante 10 anos [ANTP, 2005].

3 FUNDAMENTOS DOS MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

Os motores de combustão interna é a fonte de energia mais utilizada em veículos automotores. Os motores de combustão interna geram energia através da conversão da energia química contida no combustível em calor e o calor, assim produzido, em trabalho mecânico. A conversão da energia química em trabalho se dá por meio da combustão, enquanto a conversão subsequente em trabalho mecânico é realizada permitindo-se que a energia do calor aumente a pressão dentro de um meio, que então realiza trabalho na medida em que se expande [Bosch, 2006]. O conjunto de árvore/manivela converte o serviço gerado neste processo em torque disponível na manivela. Comumente os motores pesados operam em ciclos de 4 tempo, onde um ciclo de trabalho completo corresponde a duas voltas da árvore de manivela.

Neste capítulo apresentam-se o princípio de funcionamento dos motores alternativos e o mecanismo de combustão em motores ciclo Otto, as características do combustível GNC e os principais subprodutos da combustão presentes nos gases de escape. No fechamento do capítulo realiza-se uma análise dos principais métodos de medição de emissões utilizadas para motores ciclo Otto.

3.1 Motores ciclo Otto de quatro tempos

O ciclo padrão Otto é um ciclo ideal que se aproxima do ciclo real dos motores de ignição interna de ignição por centelha. Os diagramas $p-v$ e $T-s$ deste ciclo são apresentados na figura 3.1. O processo 1-2 é um processo de compressão isentrópica do ar quando o pistão se move, do ponto morto inferior (PMI) ao ponto morto superior (PMS). O calor é então transferido para o ar, a volume constante, enquanto o pistão está momentaneamente em repouso no PMS. O processo 3-4 é uma expansão isentrópica e o processo 4-1 é o de rejeição do ar no PMI.

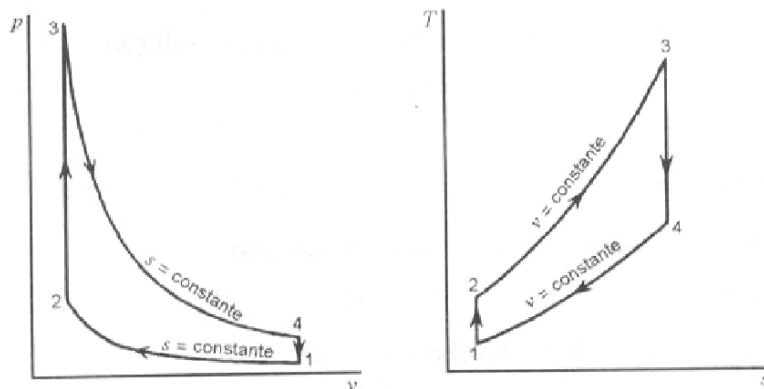


Figura 3.1: Ciclo padrão Otto.

O ciclo de combustão em um motor de combustão interna real consiste em 4 tempos, sendo completado a cada duas voltas da manivela (ou virabrequim), vide figura 3.2.

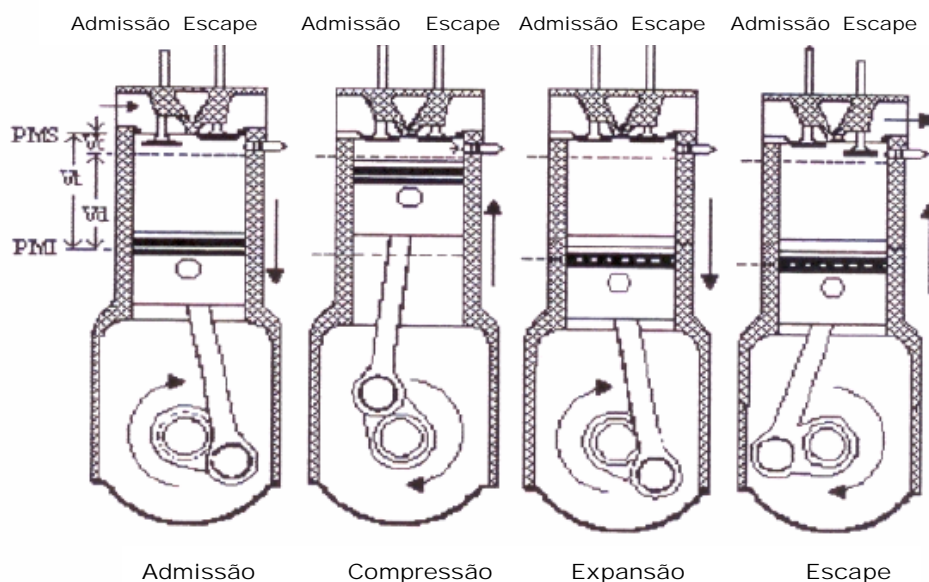


Figura 3.2: Ciclo de combustão em motores Otto 4 tempos.

Admissão

Inicia com o êmbolo no ponto morto superior (PMS). Acionado pela biela e pelo eixo de manivelas, o êmbolo afasta-se da tampa do cilindro e cria uma depressão provocando a aspiração de certa quantidade de mistura ar/combustível. Essa mistura penetra no cilindro através da válvula de admissão que durante todo o curso do êmbolo se mantém aberta.

Compressão

Partindo o deslocamento do êmbolo no ponto morto inferior (PMI) ao PMS, com as duas válvulas de admissão e escape fechadas, comprimindo os gases no cilindro. Um pouco antes de o êmbolo chegar ao PMS a combustão é inicializada por uma centelha. A combustão de toda a massa da mistura provoca uma elevação da temperatura, o que vai dar origem a um grande aumento de pressão. No final deste 2º curso, a energia química do combustível foi convertida em energia térmica;

Expansão

A elevada pressão no interior do cilindro força o deslocamento do embolo do PMS ao PMI, com as válvulas ainda fechadas. A transformação da energia térmica em trabalho no eixo do virabrequim, gerando um torque através do mecanismo biela/manivela;

Escape

Perto do final do 3º curso, a válvula de escape começa abrir-se e os gases queimados são empurrados para fora da câmara de combustão pelo movimento do pistão do PMI ao PMS, completando o ciclo de combustão.

3.2 Processo de combustão em motores Alternativos

O processo de combustão química liberando energia, que ocorre normalmente entre o oxigênio contido no ar e um combustível, é chamado de combustão ou reação de oxidação. Mesmo que a energia liberada seja muitas vezes associada ao combustível, é o rearranjo de elétrons nas camadas eletrônica nas moléculas de combustível e do ar que são a fonte desta energia [Vilanova, 1998].

Em uma combustão ideal, quando fornecida a quantidade de ar suficiente para a oxidação de todo combustível, os produtos da combustão são exclusivamente CO_2 e H_2O [Heywood, 1988, Bosch, 2005].

3.2.1 Composição do Ar

Assume-se a composição volumétrica do ar, em base seca, como sendo 21% de oxigênio (O_2) e 79% de nitrogênio (N_2). Porém existem traços de outros gases que constituem o mesmo, tais como o argônio (A) e o dióxido de carbono (CO_2). Estes em uma hipótese simplificadora são incluídos na análise volumétrica juntamente com o N_2 [Heywood, 1988]. Apresenta-se na tabela 3.1 os principais constituintes do ar atmosférico, com a análise volumétrica e em peso.

Tabela 3.1: Principais constituintes do ar atmosférico. Fonte: Heywood, 1998.

Símbolo	Peso Molecular [g/mol]	Análise Volumétrica [%]	Peso Relativo [g/mol]	Análise Volumétrica [%]	Volume relativo [m ³ /mol]	Análise em peso [%]
O ₂	31,998	20,95	6,703	20,95	1	23,1
N ₂	28,012	78,09	21,874			
A	39,948	0,93	0,372	79,05	3,773	76,9
CO ₂	44,009	0,03	0,013			
Total		100	28,962	100	4,762	100

As espécies de gases que compõem o fluido de trabalho em motores de combustão interna, (oxigênio, nitrogênio, vapor de combustível, dióxido de carbono, vapor de água, etc) podem ser tratadas como gás ideal. A densidade do ar seco (ρ) pode ser calculada a partir da equação de estado dos gases ideais, com a constante particular $R=8,3143$ J/mol.K e o peso molecular $M=28,962$ g/mol.

$$\rho = \frac{0,003483 * p_a}{T_{ai}} \quad (4.8)$$

onde p_a é a pressão atmosférica em [Pa], T_{ai} é a temperatura de entrada do ar de admissão do motor em [K] e ρ é a densidade do ar em [kg/m³].

3.2.2 Combustível GNC

O combustível Gás Natural Comprimido (GNC) ou Gás Natural Veicular (GNV), como comumente é denominado no Brasil, é uma mistura de muitos gases, sendo seu principal componente o gás metano que apresenta concentrações típicas de 85 a 99% em volume. Os outros hidrocarbonetos em grau decrescente de concentração são etano, propano e butano. Ainda encontram-se traços de gases inertes como hidrogênio, nitrogênio e dióxido de carbono.

As características do GNV variam de acordo com a região de extração e do tipo e das características da reserva. Na Tabela 3.2 apresenta-se as características físico-químicas do GNV comercializadas no Brasil extraído em diferentes locais.

Tabela 3.2: Composição físico-químicas do GNV comercializado no Brasil

Elementos	Associado (1)	Não-Associado(2)	Processado (3)	Processado (4)
Metano [%]	81,57	85,48	88,56	91,80
Etano [%]	9,71	8,26	9,17	5,58
Propano [%]	5,13	3,06	0,42	0,97
I-Butano [%]	0,94	0,47	-	0,03
N-Butano [%]	1,45	0,85	-	0,02
I-Pentano [%]	0,26	0,20	-	0,10
Outros ¹ [%]	0,57	0,51	-	-
Nitrogênio [%]	0,52	0,53	1,20	1,42
Dióxido de C. [%]	0,39	0,64	0,65	-
Densidade	0,71	0,69	0,61	0,61
Poder Cal. Inf. [Kcal/m ³]	8,34	9,58	8,62	8,37
Poder Cal. Sup. [Kcal/m ³]	10,9	10,58	9,54	9,27

(1) Gás do campo de Garoupa, Bacia de Campos; (2) Gás do campo de Mirangá, na Bahia; (3) Saída da UPGN Candeias, na Bahia; (4) Gás disponível no gasoduto Brasil-Bolívia.

¹ N-Pentano+Hexano+Heptano e Superiores.

3.2.3 Torque, potência, consumo específico e eficiência de combustão

Denomina-se torque do motor a medida do momento que o motor é capaz de exercer. Normalmente mede-se por um dinamômetro acoplado ao seu eixo. Esta acoplagem normalmente é feita hidraulicamente, eletromecanicamente ou por fricção mecânica. O torque medido em um dinamômetro é denominado “torque de freio” e é dado pela seguinte equação:

$$T = F * b \quad (4.1)$$

Onde T é o torque no freio [Nm], F a força medida no transdutor no freio [N] e b o comprimento de alavanca do freio [m].

Já a potência fornecida pelo motor e absorvida pelo dinamômetro é o produto do torque pela velocidade angular do motor, ou seja, é a taxa com que o trabalho é produzido. A potência medida em um dinamômetro é denominada “potência de freio” e é dada pela seguinte equação:

$$P_b = 2 * \pi * N * T \quad (4.2)$$

Onde P_b é a potência no freio [W] e N a velocidade angular [s⁻¹].

O consumo específico de combustível (*bsfc* – *brake specific fuel consumption*) representa a taxa que o motor está convertendo o combustível em trabalho, isto é a vazão mássica de combustível admitido pelo motor (\dot{m}_f), em [Kg/s], dividido pela potência de freio (P_b), em [W]

$$bfs_c = \frac{\dot{m}_f}{P_b} \quad (4.6)$$

A eficiência da combustão (n_f) é um parâmetro adimensional, que relaciona a potencia de saída do motor com o suprimento necessário de energia (fornecido pelo combustível) para produzir esta potência:

$$n_f = \frac{W_{out}}{\dot{m}_f * PCS} = \frac{P_{out}}{\dot{m}_f * PCS} \quad (4.7)$$

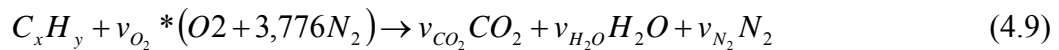
Onde PCS é o poder calorífico superior do combustível, em J/kg, m_f a massa de combustível, W_{out} o trabalho liberado pelo motor [J], P_{out} a potência liberada pelo motor [w] e m_f a vazão mássica de combustível [kg/s];

3.2.4 Combustão Estequiométrica e Relação Ar/Combustível

Na combustão incompleta ou parcial aparecem produtos intermediários da combustão, especialmente o monóxido de carbono (CO) e o hidrogênio (H₂), resultado da oxidação incompleta dos elementos do combustível. Ela pode ser induzida pela limitação na quantidade de oxigênio oferecido para a reação, pelo resfriamento ou sopragem da chama.

A combustão completa é a reação de combustão em que todos os elementos oxidáveis constituintes do combustível se combinam com o oxigênio, particularmente o carbono e o hidrogênio, que se convertem integralmente em dióxido de carbono (CO₂) e água (H₂O) independentemente da existência de excesso de oxigênio (O₂) para a reação.

A combustão estequiométrica é a reação de oxidação teórica que determina a quantidade exata de moléculas de oxigênio necessárias para efetuar a completa oxidação de um combustível. Se o oxigênio disponível for suficiente, o combustível hidrocarboneto pode ser completamente oxidado. A equação geral para a combustão de um hidrocarboneto com ar apresenta a seguinte forma:



onde os coeficientes relativos as substâncias são conhecidos como os coeficientes estequiométricos. A conservação das espécies químicas nos fornece a quantidade de ar teórica.

Assim,

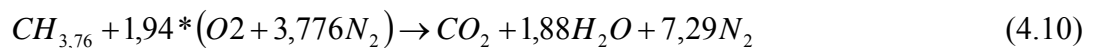
$$C : v_{CO_2} = x$$

$$H : 2v_{H_2O} = y$$

$$N : v_{N_2} = 3,776v_{O_2}$$

$$O : v_{O_2} = v_{CO_2} + (v_{H_2O}/2) = x + y/4$$

Para a composição do GNV igual a $CH_{3,76}$ chega-se a seguinte equação de combustão:



Sabe-se que a combustão completa não é alcançada a menos que a quantidade de ar fornecida seja maior do que a quantidade teórica necessária. Um dos parâmetros importantes para expressar a relação entre o combustível e o ar é a relação ar combustível designada por:

$$\left(\frac{A}{F} \right) (molar) = \frac{n_{ar}}{n_{comb}} \quad (4.11)$$

onde n_{ar} em [kmol de ar] e n_{comb} em [kmol de combustível]. Calculando a relação ar combustível molar para o combustível gás natural veicular ($CH_{3,76}$) tem-se em:

$$\left(\frac{A}{F} \right) (molar) = \frac{1,94 + 7,29}{1} = 9,23 \text{ kmol}_{ar} / \text{kmol}_{comb}$$

Vinculando a equação acima através das massas moleculares do ar e do combustível chega-se ao seguinte resultado para o combustível gás natural veicular, $CH_{3,76}$.

$$\left(\frac{A}{F} \right) (massa) = \left(\frac{A}{F} \right) (molar) * \frac{M_{ar}}{M_{comb}} = 9,23 \frac{0,21*32 + 0,79*28}{12 + 3,76*1} = 16,89 \text{ kg}_{ar} / \text{kg}_{comb}$$

Sendo assim necessita-se de 16,89kg de ar para oxidar completamente 1kg de GNV.

A variável Lambda (λ) é adimensional, expressa a relação ar/combustível instantânea (i) no cilindro, no momento da combustão, em relação à mistura ar/combustível ideal ou estequiométrica (s) para que ocorresse a queima de todo combustível.

$$\lambda = \frac{\left(\frac{A}{F_F}\right)_i}{\left(\frac{A}{F_F}\right)_s} \quad (4.12)$$

Assim, a mistura ar/combustível, quando está com excesso de combustível é chamada de mistura rica ($\lambda < 1$) e caracteriza-se por apresentar, além do CO_2 e do H_2O , outros produtos, tais como CO e H_2 . O gráfico da figura 3.3 apresenta a variação dos principais componentes dos gases de escape em função do Lambda. Em geral, motores ciclo Otto operam com mistura rica de combustível. Por outro lado, a mistura ar/combustível com excesso de ar é chamada de mistura pobre ($\lambda > 1$). Os motores ciclo diesel operam com excesso de ar na combustão (mistura pobre).

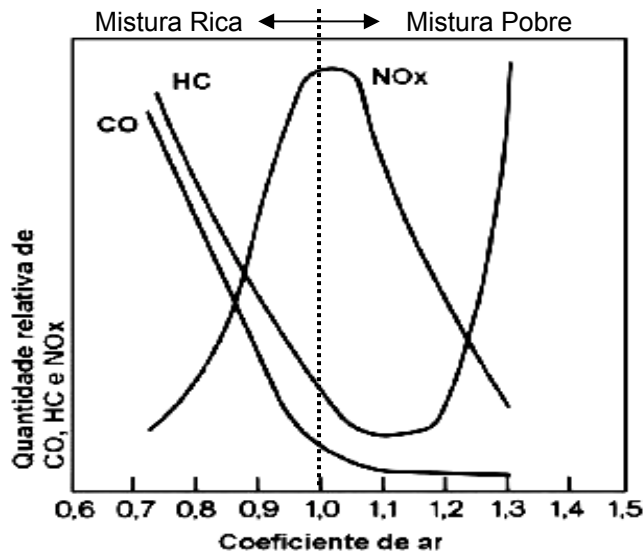


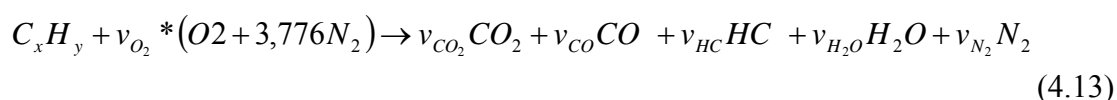
Figura 3.3: Variação da composição dos gases de escape em função da relação ar combustível.
Fonte: Heywood, 1998.

A relação ar/combustível é um dos principais parâmetros de operação do motor, sendo possível variar a composição dos gases de escape, temperatura de combustão, a potência útil ou ainda o rendimento do motor somente com a variação do Lambda durante a combustão.

3.2.5 Balanço químico

Quando não é possível medir todas as variáveis do processo de combustão, um dos recursos existentes para a determinação das variáveis não registradas é o balanço químico. Este compara a quantidade de um determinado elemento químico fornecido ao motor com a quantidade presente deste associado nos diferentes gases de escape. Um dos elementos usados para a realização do balanço químico é o carbono.

Para a realização do balanço de carbono, é comparada a quantidade de carbono fornecida ao motor através do combustível com a quantidade presente nos gases de escape.



$$x = v_{CO_2} + v_{CO} + v_{HC}$$

Considera-se que todo o carbono presente no gas de escape está associado na forma de monóxido de carbono, dióxido de carbono ou ainda na forma de hidrocarbonetos.

3.3 Emissão veicular

Existem duas formas de abordagem que geram confusões. O que está o motor emitindo e o potencial do combustível.

O que está o motor emitindo tem a haver com o projeto, o mapeamento, utilização de sistemas para tratamento dos gases de escape, etc. Por exemplo, supondo ar/combustível no estequiométrico e nas mesmas condições de carga, ao colocar um combustível (com similar relação hidrogênio carbono) que queime mais lento e não fazer correção de ponto (aceitando a queda de potência), o NOx irá diminuir porque a temperatura de câmara irá diminuir. Essa redução de emissão não é mérito do combustível. Se com o combustível original houvesse o atraso do ponto (perdendo potência), ter-se-ia o mesmo efeito [Dallávia, D.,2001].

O potencial do combustível tem a haver com a sua composição, tendo relação direta com a razão entre o Hidrogênio/Carbono presente no combustível. É calculado a partir das equações de balanço químico. Por exemplo, se o combustível utilizado fosse hidrogênio puro, a emissão de compostos de carbono seria nula.

Os principais produtos da combustão são o dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC), óxidos nitrosos (NO_x) e ainda outros componentes em menor escala tais como compostos de enxofre (SO_x) e material particulado (MP).

3.3.1 Dióxido de Carbono – CO₂

Em uma combustão estequiométrica, todo carbono presente no combustível é convertido em CO₂. Sendo assim, a emissão de CO₂ é diretamente proporcional ao consumo de combustível [Boch, 2004].

O dióxido de carbono não é considerado poluente por ser um gás constituinte do ar, mas a sua emissão, principalmente pela queima de derivados de petróleo, colabora para a formação do efeito estufa. Quanto maior a relação entre carbono/hidrogênio da molécula de combustível, menor a geração de CO₂, vide tabela 3.3.

Tabela 3.3: CO₂ máximo teórico calculado para a reação de combustão estequiométrica. Fonte: Dallávia, D.,2001.

	Carbono [%]	Hidrogênio [%]	Oxigênio [%]	CO₂ máximo calculado [%]
Metanol	37,48	12,58	49,93	11,53
Etanol	52,14	13,13	34,73	12,24
Gasolina	86,13	13,63	0	13,34
GNC	76,02	23,98	0	9,79

Sob aspecto de efeito estufa, devemos considerar não somente o CO₂ máximo do combustível, mas também toda a cadeia de sua produção.

Para o caso do etanol, por exemplo, tem-se que considerar a indústria de nitrogenados (adubação do solo), maquinário agrícola, caminhões transportando cana do campo até a usina, fermentação, geração de CO₂ na usina (caldeiras) etc.

Como apresentado na figura 3.4, o CO₂ agregado é bastante baixo no caso do GNV. Este deve-se que na maioria dos casos ele já existe praticamente pronto no subsolo.

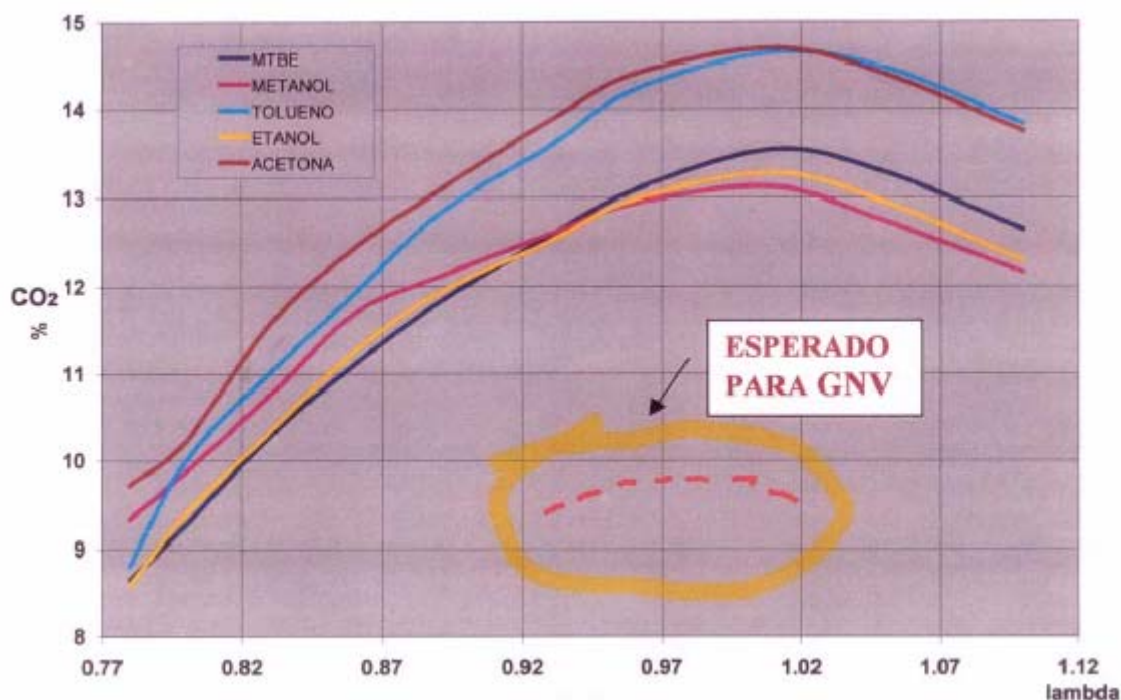


Figura 3.4: CO₂ agregado produzido por alguns combustíveis. Fonte: Dallávia, D.,2001

3.3.2 Monóxido de Carbono – CO

Segundo BOSCH, 2005, em condições de mistura rica (deficiência de ar), o monóxido de carbono é produto da combustão incompleta da mistura e, portanto, a emissão de CO é fortemente dependente da razão ar-combustível. Para combustão em torno da faixa estequiométrica, $\lambda=1$, a emissão de CO é determinada pela distribuição uniforme de combustível em cada cilindro. Se alguns dos cilindros estiverem operando com mistura rica e outros com mistura pobre, o resultado será uma média maior de CO emitido, do que quando todos os cilindros estão operando com o mesmo λ [Pelliza, 2003].

Avaliando o potencial de emissão de CO para diferentes combustíveis verifica-se que, quanto maior o percentual de hidrogênio na molécula (menos carbono), menor será a emissão de CO na região rica. Portanto, como verifica-se na figura 3.5, o GNV tem um excelente potencial para fazer um motor pouco poluente. Na verdade, dos combustíveis disponíveis, é o melhor.

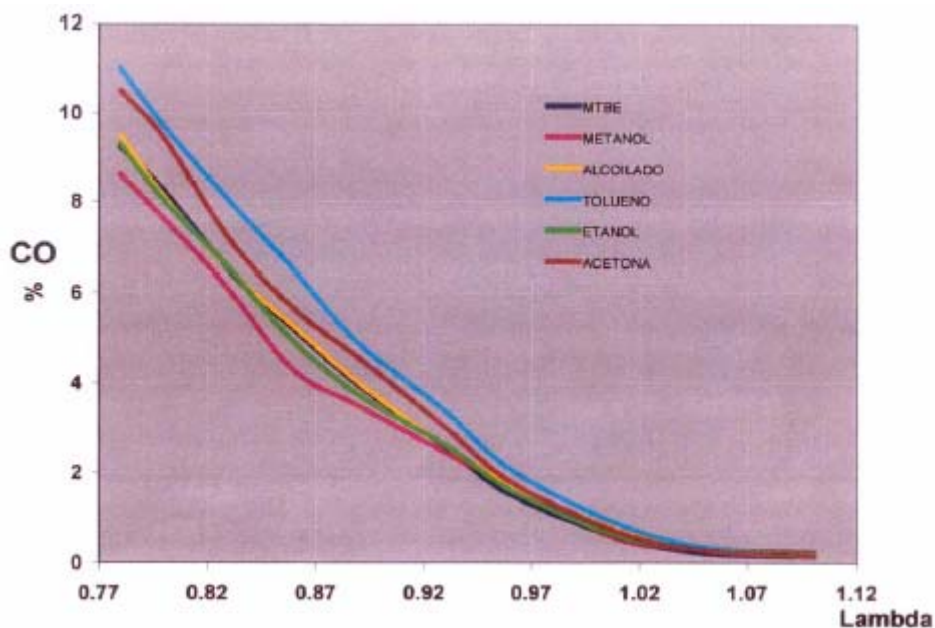


Figura 3.5: CO experimental para alguns combustíveis. Fonte: Dallávia, D.,2001

3.3.3 Hidrocarbonetos – HC

Os hidrocarbonetos, assim como no caso do CO, deficiência de ar leva à combustão incompleta da mistura ar-combustível e, portanto, à emissão de hidrocarbonetos não-queimados e parcialmente queimados. Desta forma, a emissão de HC ocorre na faixa de mistura rica e diminui à medida que λ aumenta. Na faixa de mistura pobre, porém, a emissão de HC aumenta novamente enquanto a região de emissão mínima fica em torno de $\lambda = 1,1 \dots 1,2$, conforme pode ser visto na figura 3.6. Esse aumento na emissão é devido às regiões do cilindro em que não ocorre efetivamente a combustão. Essas regiões correspondem às camadas fronteiriças, próximas às paredes do cilindro, onde a chama é extinta por resfriamento devido à baixa temperatura da câmara de combustão.

Em adição à combustão incompleta, outra fonte de emissão de HC ocorre quando a mistura nova escapa para o cárter através das folgas entre o cilindro e o pistão; porém, através do respiro do cárter para a admissão, esses hidrocarbonetos retornam para a câmara de combustão (*blow-by*).

Outras fontes importantes de HC não queimados são as perdas evaporativas do tanque e do carburador (em veículos que ainda o utilizam) e a evaporação de parte do combustível líquido durante sua manipulação no transporte e armazenagem. Devido ao fato de que, por ser um combustível gasoso, possui um sistema de abastecimento e alimentação do motor isolado da atmosfera, reduzindo bastante as perdas por manipulação para abastecimento e estocagem [Peliza, 2003].

3.3.4 Óxidos Nítricos – NO_x

A formação de NO_x durante o processo de combustão está ligada diretamente a picos de temperatura na câmara de combustão, e a duração de seu efeito. Além de monóxido de nitrogênio (NO), também são produzidos em pequena escala dióxido de nitrogênio (NO₂) e óxido nitroso (N₂O). A dependência da emissão de NO_x com relação ao fator λ é exatamente o inverso da emissão de HC, sendo que, na faixa de mistura rica, ocorre o aumento de NO_x emitido com o aumento de λ , como resultado do aumento da concentração de oxigênio. Na região de mistura pobre, a emissão de NO_x diminui com o aumento de λ , pois nesta faixa, aumentando a concentração de oxigênio, a temperatura da câmara de combustão diminui. A emissão máxima ocorre com uma mistura levemente pobre, localizada em uma faixa em torno de $\lambda = 1,05$ a $1,1$.

3.3.5 Material Particulado – MP

Sob a denominação geral de Material Particulado se encontra um conjunto de poluentes constituídos de poeiras, fumaças e todo tipo de material sólido e líquido que se mantém suspenso na atmosfera por causa de seu pequeno tamanho. O material particulado pode também se formar na atmosfera a partir de gases como dióxido de enxofre (SO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x) e compostos orgânicos voláteis (COVs), que são emitidos principalmente em atividades de combustão, transformando-se em partículas como resultado de reações químicas no ar.

O tamanho das partículas está diretamente associado ao seu potencial para causar problemas à saúde, sendo que, quanto menores elas forem, maiores os efeitos provocados. O particulado pode também reduzir a visibilidade na atmosfera.

3.3.6 Compostos de Enxofre – SO_x

Resulta principalmente da queima de combustíveis que contém enxofre, como óleo diesel e gasolina. É um dos principais formadores da chuva ácida. O dióxido de enxofre pode reagir com outras substâncias presentes no ar formando partículas de sulfato que são responsáveis pela redução da visibilidade na atmosfera [CETESB, 2006]. No Brasil, o diesel comercializado vem sofrendo uma redução significativa no seu teor de enxofre nos últimos anos, vide Tabela 3.4. Para isso, a PETROBRAS vem realizando grandes investimentos na melhoria do processo de refino, visando comercializar um combustível que atender a demanda dos novos motores Diesel equipados com sistema de tratamento de escape.

Tabela 3.4: Teor de enxofre no diesel comercializado no Brasil. Fonte: GASBUS, 2004; PETROBRAS, 2006.

Classificação	Teor de Enxofre	Localidades comercializadas
D500	< 500 ppm	São Paulo, Porto Alegre, Rio de Janeiro, Belo Horizonte e principais capitais.
Tipo B Diesel Metropolitano	< 2000 ppm	Deve ser utilizado nas demais cidades até 2007
Tipo A	5000 – 2000 ppm	As demais localidades

Com origem diferente do diesel comercializado no Brasil, o diesel na Europa possui limite de 20ppm. O GNV apresenta grande vantagem em relação ao diesel por ser isento de enxofre.

3.4 Ensaios para a determinação da emissão de poluentes

A avaliação da emissão de poluentes por um veículo deve ser realizada com o mesmo em funcionamento sob condições representativas do seu uso normal. Estas condições são influenciadas mais pelas condições impostas pelo tráfego do que pelo modo individual de se dirigir, devendo ser caracterizada na avaliação os diversos modos de condução em diferentes padrões de vias existentes (avenidas, ruas, anéis viários, etc.), o horário de operação dos veículos, etc. [CETESB, 2006].

As regulamentações da EPA (Agencia do Meio Ambiente – Estados Unidos) e da EU (União Européia) utilizam três tipos de testes para a análise de emissão de poluentes: Ensaios de homologação de motores; Simulação de ciclos de condução; Medição em condições reais de operação. Cabe salientar que as duas primeiras metodologias têm a vantagem de realizar a comparação dos veículos e/ou motores em condições similares de ensaio, proporcionando boa repetibilidade dos resultados medidos. Com a medição em condições reais de operação, registra-se o perfil de emissões ao longo de um trajeto, levando em consideração características de tráfego, de operação e condições climáticas de cada região.

No Brasil, de acordo com a Resolução nº 315 de 2002, o PROCONVE estabelece para motores de veículos pesados, um programa de controle da emissão veicular composto por sucessivas fases restringindo cada vez mais os limites permitidos das emissões de escape. As fases de implantação, limites permissíveis e ciclos de ensaio adotados são similares aos adotados pela Comunidade Européia, mas com calendário próprio de implantação, vide tabela 3.5. Na

figura 3.6 apresentam-se os sucessivos limites de emissão de cada composto dos gases de escape a serem cumpridos nas sucessivas fases do programa.

Tabela 3.5: Calendário de implantação das etapas do PROCONVE. Fonte: CETESB, 2006.

Ano de Vigência	Veículos	PROCONVE	EURO
1989	Todos	Fase I	
1994	Todos	Fase II	
1996	Todos	Fase III	
2000	Todos	Fase IV	EURO II
2004	Ônibus Urbano	Fase V	EURO III
2005	Micro-ônibus	Fase V	EURO III
2006	40% dos demais	Fase V	EURO III
2007	100% da produção	Fase V	EURO III
2009	100% da produção	Fase VI	EURO IV

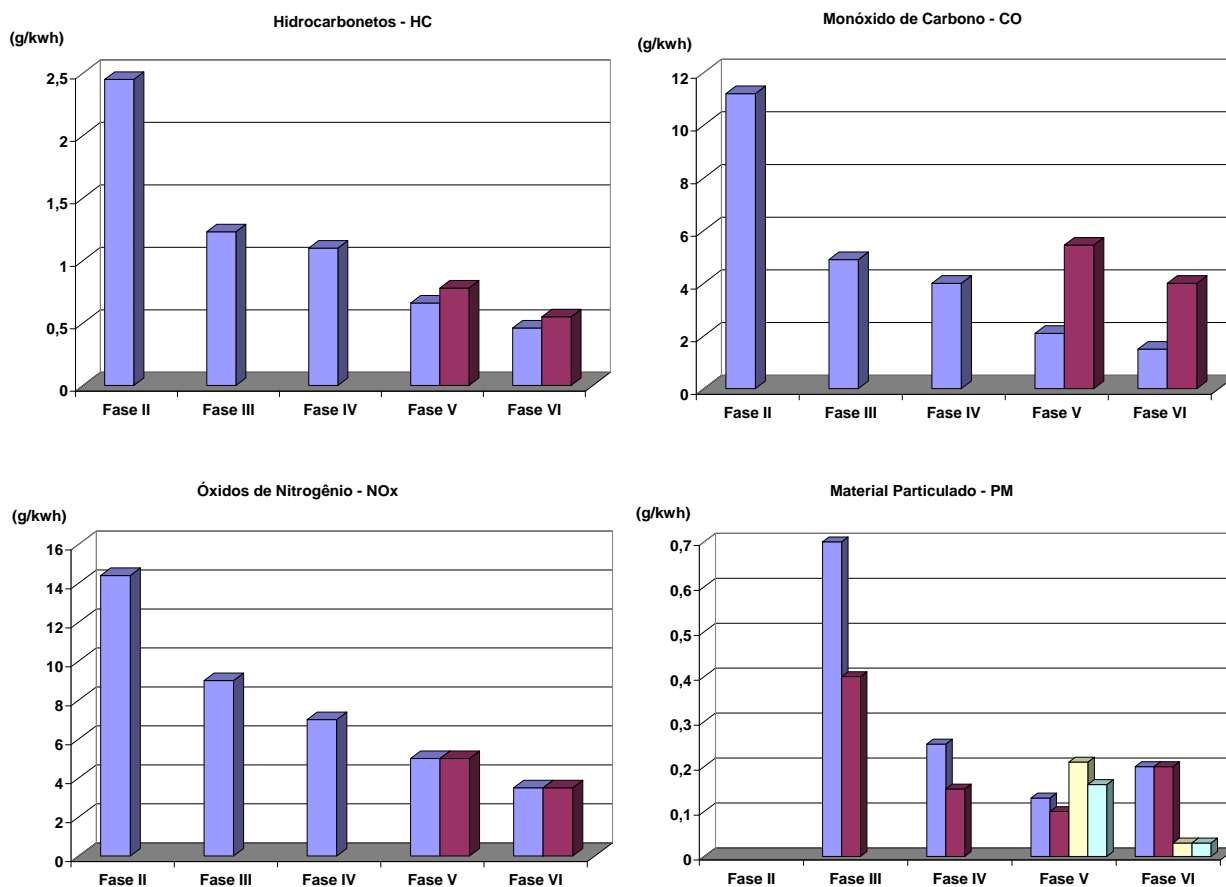


Figura 3.6: Limites de emissão de gases de escape nas sucessivas fases do PROCONVE. Fonte: CETESB, 2006.

Conforme normativas vigentes no Brasil e nos países da Europa, para a inspeção do nível de emissões em veículos pesados aplicam-se ensaios para homologação de motores. Estes consistem na retirada do motor do veículo e, através da utilização de dinamômetros de bancada, aplicar diferentes ciclos de carregamento compostos de binários de torque x tempo e potência x tempo. Os resultados são expressos em gramas de poluente por energia utilizada, registrando a emissão de poluentes em relação à energia demandada pelo veículo, produzida pelo motor, em regimes estatisticamente representativos ou existentes na sua utilização média. De acordo com o ano de produção e o combustível utilizado, definem-se os ciclos de ensaio a serem utilizados, conforme apresenta-se na Tabela 3.6. No Anexo A são apresentados as características de cada ciclo de ensaio.

Tabela 3.6: Ciclos de ensaios aplicados em cada fase do PROCONVE definidos na Resolução do CONAMA nº 315/2002. Fonte: IBAMA, 2006.

PROCONVE	Combustível	Gás Emitido	Ciclo de Ensaio
Fases I, II, III e IV	Diesel	Todos	ECE R-49
Fase V	Diesel	Todos	ESC e ERL
	GNV	Todos	ETC
Fase VI	Diesel	CO, CO ₂ , HC, PM	ESC, ERL
		NO _x	ETC
	GNV	Todos	ETC

Do ponto de vista prático, a utilização dos resultados de emissão obtidos nos ensaios de homologação de motores são bastante oportunos, visto que comparam os motores em termos tecnológicos, sendo mais fácil e econômico ensaiar apenas os motores. Porém, tal conceito presta-se muito bem à certificação de motores, mas não mede a emissão do veículo propriamente dito.

Outro método regulamentado para determinação da emissão de veículos leves consiste em uma simulação dos movimentos do veículo (não apenas do motor), em termos de velocidades, acelerações, períodos em marcha lenta, peso bruto médio, forças de atrito e forças aerodinâmicas.

No caso de veículos leves, existem alguns ciclos padrão que simulam a utilização em trânsito urbano e em estrada, sendo que os movimentos impostos ao veículo são perfis de velocidade x tempo levantados. No Brasil, a medição de emissões veiculares é realizada

seguindo o ciclo de condução norte americano FTP 75 – *Federa Test Procedure 1975* – vide figura 3.7.

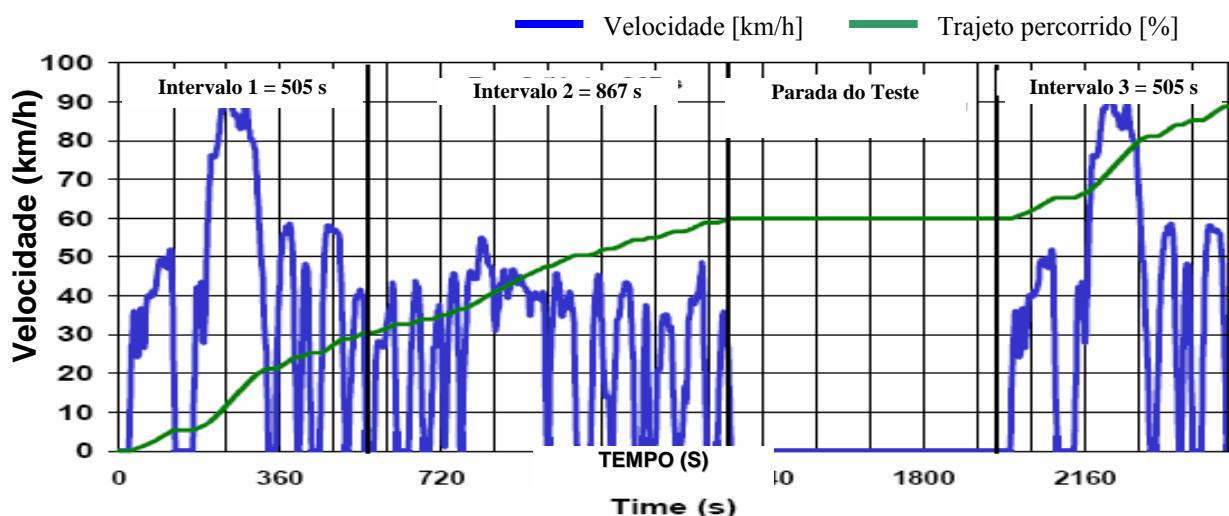


Figura 3.7: Perfil de velocidade do veículo testado durante o ciclo de condução FTP-75, regulamentado no Brasil para medição de emissões em veículos leves, conforme NBR 6601. Intervalo 1 (505 s) simula a partida a frio, Intervalo 2 (867 s) fase estabilizada, parada do teste durante 10 minutos sem amostragem dos gases e Intervalo 3 (505 s) idêntica ao Intervalo 1, mas com partida a quente. Fonte: IBAMA, 2006.

Nestes tipos de ensaio são utilizados dinamômetros de rolos, conforme a figura 3.8, aos quais estão acoplados volantes de inércia para a simulação do peso e uma máquina de absorção de potência (bomba d'água ou gerador de corrente elétrica) controlada eletronicamente para oferecer uma curva de torque que corresponda fielmente à curva de resistências dissipativas do veículo em função da sua velocidade. Durante o ensaio, os gases de escapamento são coletados e medidos, sendo o resultado expresso em gramas por quilômetro rodado nas condições representadas pelo ciclo de condução escolhido para o teste [Schettino,2001].

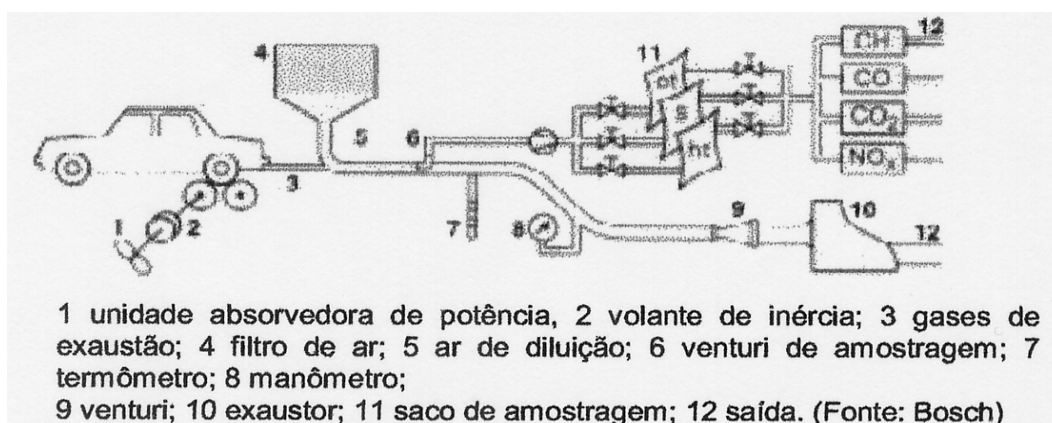


Figura 3.8: Sistema utilizado para teste de emissão de poluentes em veículos leves. Fonte: Schettino, 2001.

Para o caso dos veículos pesados (ônibus e caminhões), a situação é um pouco mais complexa. Sob o aspecto da representatividade, cada aplicação se comporta de maneira diferente, onde as velocidades praticadas também dependem fortemente do tipo e da quantidade de carga, bem como do trajeto, muitas vezes, fixo e repetitivo. O comportamento dos ônibus urbanos, por exemplo, é fortemente influenciado pela linha em que operam, o que é facilmente notado através do consumo médio de combustível. No caso dos automóveis particulares este efeito também pode ser observado entre usuários diferentes, porém desaparece quando se considera toda a população [Schettino, 2001].

Neste sentido, foram desenvolvidos diferentes ciclos de condução para estimar a emissão de veículos pesados, cada um representativo de uma aplicação ou de uma situação em particular. É importante ressaltar que os regimes de operação do veículo e, conseqüentemente, as velocidades médias dos ciclos acima são bastante diferentes e, conseqüentemente, o consumo médio de combustível varia significativamente também, variando o consumo de energia e os níveis de emissões médios em cada ciclo [Clark *et al.*, 1999]. No Apêndice A apresenta-se diferentes ciclos de condução utilizados na medição de veículos pesados.

Nos últimos anos está sendo desenvolvida uma metodologia para a medição de emissões de poluentes a bordo do veículo. Esta apresenta uma solução para medir a emissão de veículos onde os dados são coletados em condições reais de operação, na localidade onde opera normalmente o veículo [Pei, 2004]. A utilização desta metodologia se aplica nos seguintes casos:

- Teste de veículos de tamanho e/ou potência que não existam condições técnicas para teste em laboratório utilizando dinamômetro de rolos, simulando ciclos de condução [Weaver, 2004];

- Para uma estimativa do nível de emissão do veículo antes da realização de testes em laboratório, reduzindo o tempo de utilização do laboratório e os custos de projeto [Weaver, 2004];

- Comparação entre diferentes modos de transporte, em condições reais de operação, registrando a variação do nível de emissões dos veículos em função das condições de tráfego do veículo, das características da via, da localização geográfica, do modo de operação, do motorista ou ainda outros fatores que não podem ser representados ou analisados por outros métodos tais como efeitos climáticos [Frey, 2001];

- Confirmar os resultados obtidos através de simulação computacional, utilizando modelos para previsão do nível de emissões.

A primeira geração de sistemas de medição embarcada de emissão de poluentes são mostrados na tabela 3.7.

Tabela 3.7: Sistema para a medição de emissões de escape em condições reais de operação.

Sistema	Instituição	Combustível			Gás de escape analisado					
		Diesel	Gasolina	GNV	CO	CO ₂	HC	NO/ NO _x	O ₂	PM
VPEMS	Imperial College/SIRA	X	X		X	X	X	X	X	
MEMS	West Virginea University	X				X		X		
Horiba OBS-1000	Horiba	X	X	X	X	X	X	X		
SEMTECH-QCM	Sensor Inc	X	X	X	X	X	X	X		X
PEMS	Clean Air Technologies	X	X	X	X	X	X	X	X	X
TRL GasScan	TRL	X	X		X	X	X	X		

Para a medição em condições reais de operação utiliza-se um conjunto de sensores para registro do desempenho do veículo, um analisador de gases, um medidor de vazão de escape e um sistema de aquisição e registro de dados. Como exemplo apresenta-se na figura 3.9 o sistema de medição OBS-1000, da Horiba, instalado em um microônibus para a medição das emissões geradas na combustão.

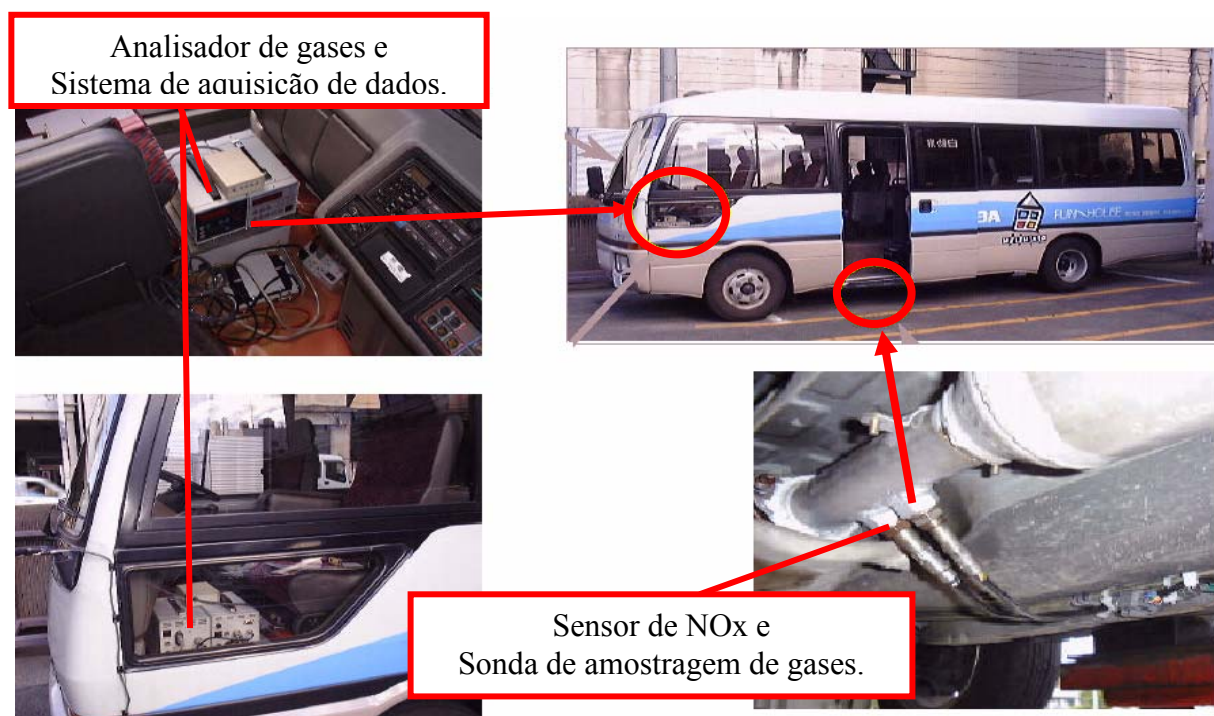


Figura 3.9: Sistema de medição embarcado, da Horiba, instalado no microônibus.

Fonte: Oestergaard, 2002.

Com o registro em tempo real da vazão do caudal de escape e da concentração dos componentes dos gases gerados na combustão (CO, NO_x e HC), como apresentado na figura 3.10, calcula-se o valor mássico emitido de cada componente dos gases de escape. Integrando o registro da vazão mássica de cada componente registrado, calculamos o valor da massa total emitida de cada componente durante o trajeto. O resultado final do teste pode ser expresso através do Índice de Emissão (IE), que representa a quantidade de cada componente do gás de escape emitido pela distância percorrida, expresso em g/km. O resultado ainda pode ser expresso em função da energia utilizada durante o deslocamento, medida indiretamente através do consumo de combustível, expressando o resultado em gramas do componente emitido por quilowatt-hora.

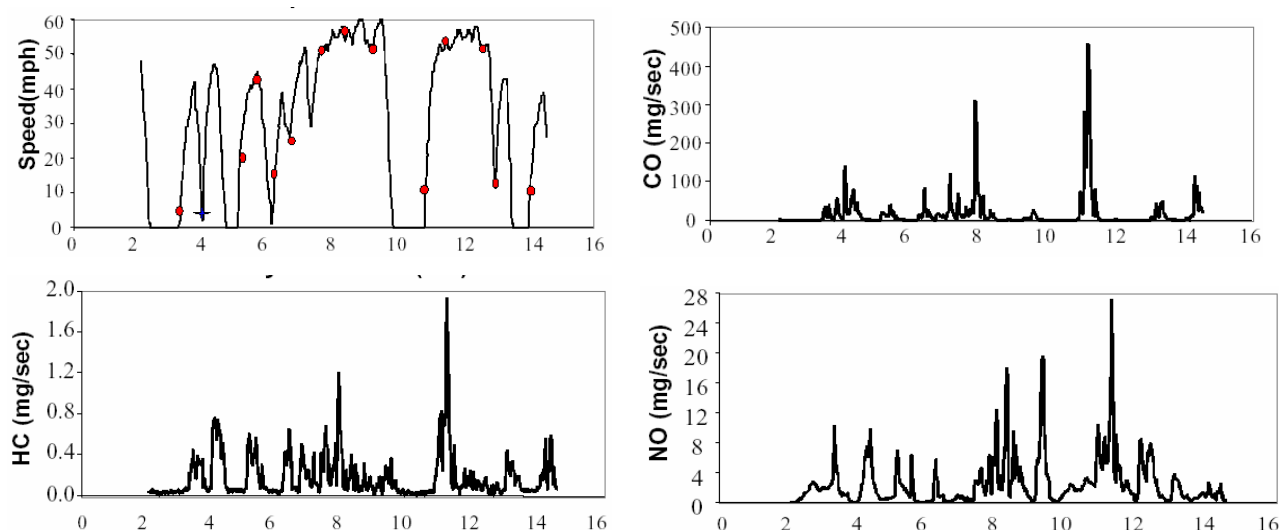


Figura 3.10: Registro da emissão de gases realizada pelo sistema de instrumentação embarcado.

Fonte: Oestergaard, 2002.

Esta metodologia está em fase de desenvolvimento, sendo atualmente realizados estudos para aprimoramento do sistema de instrumentação embarcado, visando viabilizar a medição da emissão de poluentes de veículos classificados como “emissão zero” (Zero Emission) [Pei, 2004].

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo estão descritas as etapas desenvolvidas no projeto piloto GASBUS na seleção/conversão do ônibus diesel, a metodologia utilizada para a realização dos testes de campo e o instrumental instalado no ônibus, visando gerar dados de desempenho durante a operação.

Pode-se salientar ainda que o projeto piloto GASBUS foi planejado com diversos pontos considerados diferenciais, justamente para gerar resultados repetitivos e representativos, caracterizando ganhos com a adoção da rota alternativa de motorização de ônibus urbano. Estas são:

- Utilização de ônibus usado – chassi de meia idade;
- Motor convertido para utilização de GNV – Rota tecnológica de Ottolização;
- Adoção de cilindros leves de materiais compósitos adaptados à carroceria existente;
- Sistema de instrumentação embarcado para registro de dados operacionais do veículo;
- Análise comparativa dos dados operacionais entre os veículos original diesel e o convertido para GNV durante condições reais de operação;

Para viabilizar uma análise comparativa, projetou-se um experimento de campo onde três ônibus: GASBUS juntamente com dois veículos diesel originais, operaram em condições reais de tráfego, em linhas comerciais, entre os municípios de Alvorada e Porto Alegre. O projeto do experimento de campo foi elaborado para gerar dados de operação, manutenção, desempenho e ainda emissão de poluentes. Para a operação, consideram-se os registros diários durante a linha comercial tais como número de passageiros, distância percorrida e consumo de combustível. A manutenção engloba os custos envolvidos com peças de reposição, pneus e ainda com a mão-de-obra empregada. O desempenho do GASBUS é caracterizado através dos mapas operacionais gerados a partir do sistema de instrumentação embarcada instalado. Nesses estão registrados em tempo real a velocidade do ônibus, rotação do motor, posição do acelerador e temperaturas de trabalho. Para a análise da emissão de poluentes utilizou-se uma metodologia implementada pelos pesquisadores da UFRGS, baseada em medições durante a operação com o veículo em linha comercial, utilizando-se do sistema de instrumentação embarcada implementado. Como resultado compara-se a emissão gerada pelo GASBUS nos testes de campo com os valores de emissão do ônibus diesel original disponível na bibliografia.

4.1 Conversão do ônibus

Conforme escopo do projeto piloto GASBUS levantou-se as informações necessárias para a escolha de um motor multicilindro comercial ciclo Diesel, numericamente representativo da frota nacional circulante. Como referência utilizou-se a base de dados da ANFAVEA (Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores). Nela estão registrados os volumes totais de motores diesel produzidos no Brasil. A seguir são apresentados os mapas na forma gráfica, com volumes totais dos ônibus diesel produzidos no Brasil, no período compreendido entre 1990 a 2003. Pode-se verificar, conforme figura 4.1, a liderança dos motores diesel fabricados pela Mercedes-Benz do Brasil, contra os outros fabricantes. O motor OM366LA foi amplamente utilizado neste período nos veículos produzidos pela Mercedes-Benz do Brasil [ENGEPRO, 2004].

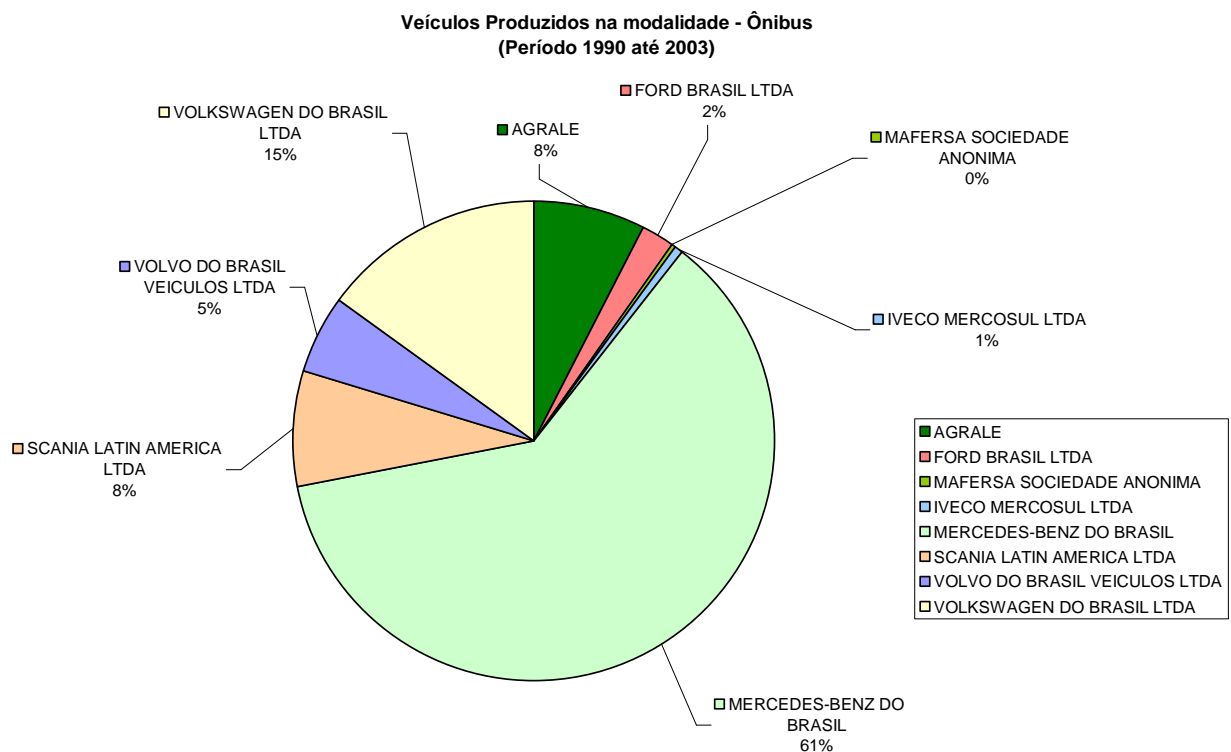


Figura 4.1: Veículos produzidos no Brasil entre 1990 e 2003, modalidade ônibus.

Outro fator motivador da seleção do modelo foi a comercialização pela Mercedes-Benz do chassi de fabricação nacional, utilizando um motor dedicado para utilização de GNV, modelo OM366LAG, desenvolvido sobre a plataforma original do motor OM366. No Apêndice B apresentam-se as características mecânicas, curvas de torque, potência e consumo específico dos motores OM366LA diesel, OM366LAG GNV dedicado e OM366LA Ottolizado.

No escopo do projeto piloto GASBUS definiu-se o acompanhamento de mais dois veículos, além do GASBUS, durante o período de testes de campo. A seleção dos veículos a serem acompanhados foi realizada entre as equipes da UFRGS e da empresa de viação Soul. Foram analisados os históricos de manutenção e consumo de combustível de 10 veículos (7067 ao 7076) que utilizavam o motor OM366LA, adquiridos no mesmo lote no ano de 1999, vide figura 4.2. As carrocerias dos ônibus utilizados no estudo são do modelo Svelto, fabricadas pela Comil, e montado sobre o chassi modelo OH1721. Na tabela 4.1 apresenta-se as características típicas construtivas dos veículos utilizados nesse projeto piloto.



Figura 4.2: Modelo de ônibus diesel utilizado para a “Ottolização”.

Tabela 4.1: Características construtivas dos ônibus urbano analisados.

Características Construtivas / Operacionais	Dimensões & Observações
Comprimento	13,2 m
Largura	2,47 m
Peso	7,3 ton
Altura	3,18 m
Capacidade (sentados) ¹	52 passageiros (3.640 kg)
Capacidade (total) ¹	122 passageiros (8.540 kg)
Entre eixos	6,55 m
Motor	OM366LA, com turbocompressor e <i>intercooler</i> , 6 cilindros em linha

¹ Considerado o peso de cada passageiro igual a 70kg.

Do conjunto de dez veículos, foram selecionados três veículos para a execução dos testes de campo devido à proximidade dos históricos de operação, de manutenção e do consumo de combustível. Definiu-se o ônibus 7072 para a conversão do motor – GASBUS – e, outros dois, 7071 e 7073 para acompanhamento durante a operação.

Com a seleção do ônibus a ser convertido, executou-se no carro 7072 a instalação dos cilindros de armazenamento de GNV, a “Ottolização” do motor diesel e a instalação do sistema de instrumentação embarcada, estas descritas na seqüência do capítulo.

4.1.1 Instalação dos cilindros de armazenamento

Em atendimento às demanda operacional da SOUL, necessitando de autonomia superior a 400 km para o veículo operando em linhas comerciais, executou-se um layout possível pelo espaço permitido abaixo da carroceria do ônibus. Planejou-se a instalação de cinco cilindros de 45,6 m³, conforme mostra a figura 4.3, totalizando uma capacidade de armazenamento de 228 m³ GNV.

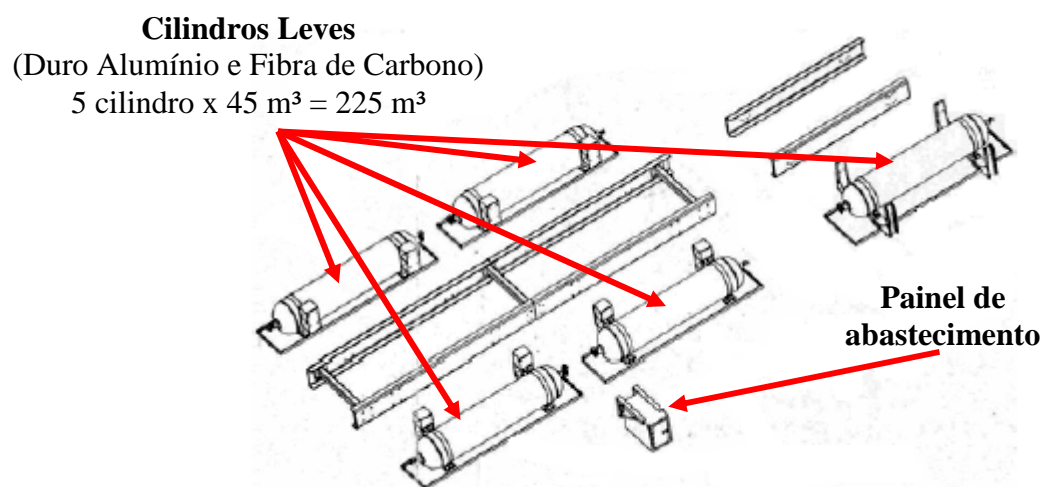


Figura 4.3: Layout de instalação dos cilindros leves de GNV sob o assoalho do GASBUS.

Os cilindros, bem como o painel abastecimento, foram fornecidos pela Dynetek/Bee Engenharia, parceira no projeto. Para o projeto e confecção dos suportes dos cilindros, enviou-se para a matriz da fábrica o layout estrutural do ônibus. Com a finalidade de verificar a compatibilidade dos cilindros leves importados com as normativas brasileiras para cilindros de material compósito, foi ensaiado um cilindro junto ao CTGÁS/Laboratório de Testes de Cilindros. Segue no Anexo B o relatório do ensaio do cilindro.

Para a instalação dos cilindros junto ao chassi do veículo, realizou-se consulta junto a engenharia da COMIL, fabricante da carroceria, verificando a possibilidade de modificações na

parte inferior da carroceria. Conforme mostrado na figura 4.4, alterou-se a posição da caixa de baterias, longarinas de fixação da saia da carroceria e do tubo de escape. Ainda retirou-se o tanque do combustível diesel, liberando espaço para a instalação dos cinco cilindros para o armazenamento do GNV.

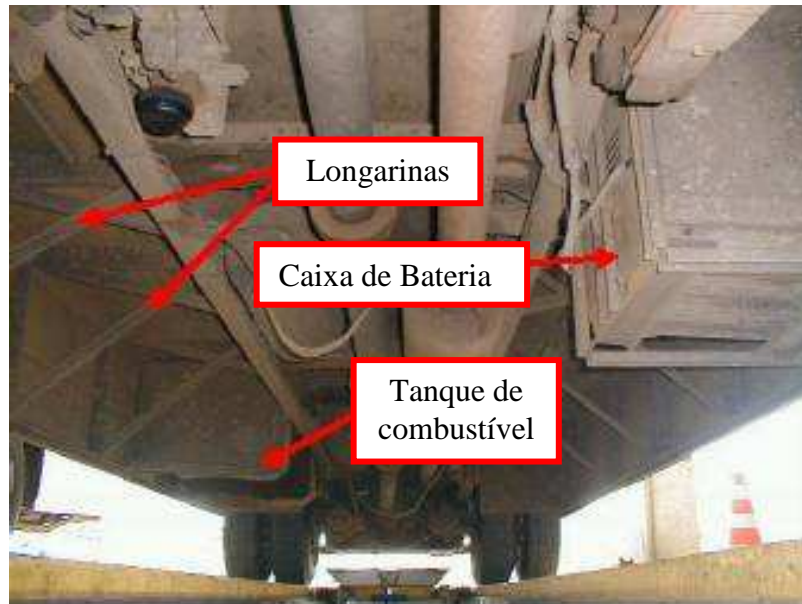


Figura 4.4: Vista inferior do chassi com os elementos a serem removidos para instalação dos cilindros.

Juntamente com o suporte de cada cilindro montou-se uma grade de proteção na parte inferior do suporte de fixação. Essa previne que objetos arremessados durante o percurso, em linha comercial, atinjam os reservatórios de GNV. Conforme apresenta-se na figura 4.5, o conjunto foi instalado sob o assoalho, fixados nas longarinas principais do chassi do ônibus.



Figura 4.5: Cilindros de armazenamento fixados sob o assoalho do GASBUS.

Na posição original da caixa de bateria do GASBUS foi instalada a Central de Reabastecimento de GNV, vide figura 4.6. A posição facilita o acesso externo no momento do reabastecimento através da portinhola lateral. Não houve adaptações tais como instalação de válvulas de abastecimento rápido nas instalações do posto para reabastecimento do GASBUS, sendo o tempo de reabastecimento médio de 16 minutos.



Figura 4.6: Reabastecimento do GASBUS realizado em posto de combustível comercial próximo ao Terminal Rui Barbosa, centro de Porto Alegre.

Uma das propostas inovadoras do projeto piloto GASBUS é a utilização de cilindros leves para armazenamento de GNV. Os cilindros leves possuem como principal benefício a redução de peso, sendo os cilindros leves cerca de 30% do peso dos tradicionais cilindros de aço disponíveis no mercado, conforme os dados apresentados na tabela 4.2.

No caso da utilização de cilindros de aço com a mesma capacidade de armazenamento ao invés dos cilindros de material leve no GASBUS, seria acrescida uma carga total de 680 kg, ou seja, equivalente ao transporte de 10 passageiros.

Tabela 4.2: Comparação entre os cilindros de Aço comercializados no Brasil e os cilindros leves de duro alumínio/fibra de carbono instalados no GASBUS.

	Cilindro Leve	Cilindro Convencional
Fabricante	Dynetek	Calibras
Material	Duro Alumínio/fibra de carbono	Aço
Capacidade	45,6 m ³	45 m ³
Volume Interno	176 litros	185 litros
Peso total	59,2 kg	200,7 kg
Peso por m³	1,29 kg/m ³	4,44 kg/m ³

4.1.2 Ottolização do motor diesel

A conversão do motor diesel realizou-se com a instalação de um kit de conversão especial, desenvolvido pela empresa Tomasetto Achille, via rota tecnológica de Ottolização. A equipe da UFRGS auxiliou no processo de conversão, atuando junto com os técnicos da empresa Tomasetto Achille e a equipe de manutenção da Soul. As atividades foram realizadas na oficina de manutenção da Soul, em Alvorada.

Para a operação de Ottolização, retirou-se o motor do ônibus, passando o mesmo por uma revisão dos componentes mecânicos. Conforme solicitado pela Tomasetto Achille, para a instalação do kit é necessário que o motor esteja com suas medidas nominais, sendo realizado ajustes em seu sistema mecânico – camisas/biela – manivela/casquilhos e munhões, visto que tratava-se de um motor com mais de 350.000 km rodados. Do motor Diesel foram retirados o cabeçote, pistões, comando de válvulas, coletor de admissão, freio motor e o sistema de alimentação de combustível.

A seguir, foram instalados no bloco do motor componentes do kit de Ottolização: pistões, cabeçote e comando de válvulas. O cabeçote Otto, conforme indicado na figura 4.7, possui suporte para velas de ignição no local dos bicos injetores. Outra mudança em relação ao cabeçote diesel original é o aumento das galerias do líquido de arrefecimento, melhorando a troca de calor. No Apêndice C são apresentados os componentes do “kit de conversão” utilizado.

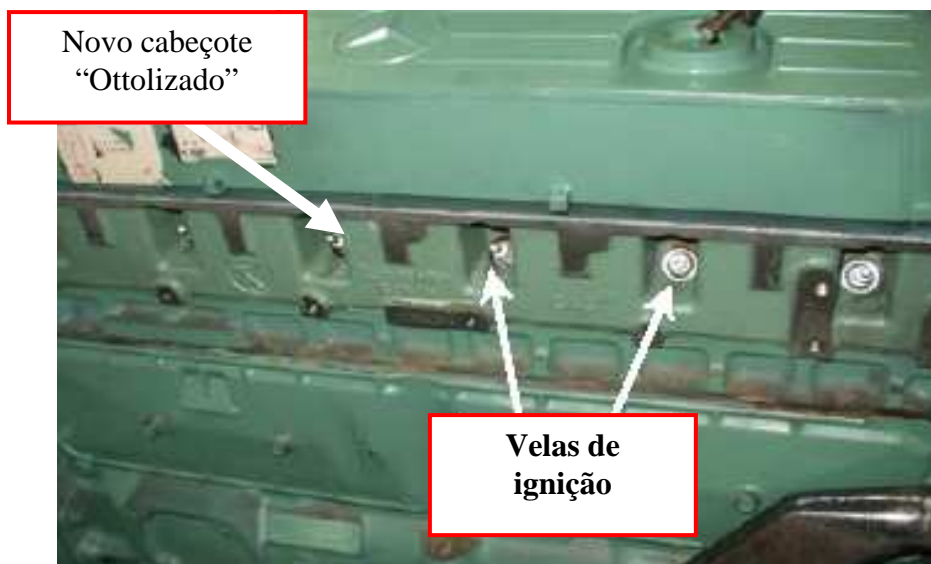


Figura 4.7: Vista do motor após a instalação do cabeçote Otto, da Tomasetto Achille.

Após a montagem do motor, iniciou-se a instalação dos componentes do kit de conversão pertencentes ao sistema de alimentação de combustível e sistema de ignição.

O sistema de alimentação de combustível é constituído por uma Unidade de Comando Eletrônico (ECU ou centralina), válvula redutora de pressão, mesclador de GNV, válvula dosadora (motor-de-passo), válvula borboleta, sonda lambda, indicador de combustível, sensor de posição da borboleta (TPS) e mangueiras de conexão. O mesclador de GNV trata-se de um venturi provido de um orifício condutor de gás, que tem por objetivo acelerar a velocidade do ar admitido, gerando uma alta depressão no orifício condutor de gás. A depressão chega à saída da válvula redutora de pressão, gerando um fluxo de combustível para o motor.

O gerenciamento de combustível realiza-se através da ECU que, através da leitura de parâmetros de operação como a relação ar/combustível, posição do acelerador e rotação do motor. Este determina a ação do atuador e, conseqüentemente, da quantidade de GNV fornecida ao motor. O elemento atuador no controle de combustível é a válvula dosadora de GNV, a qual está acoplada um motor-de-passo, possibilitando o acionamento eletronicamente. O mesclador foi instalado na tubulação do ar de admissão do motor, entre a saída do *intercooler* e a válvula borboleta, conforme apresenta-se na figura 4.8.

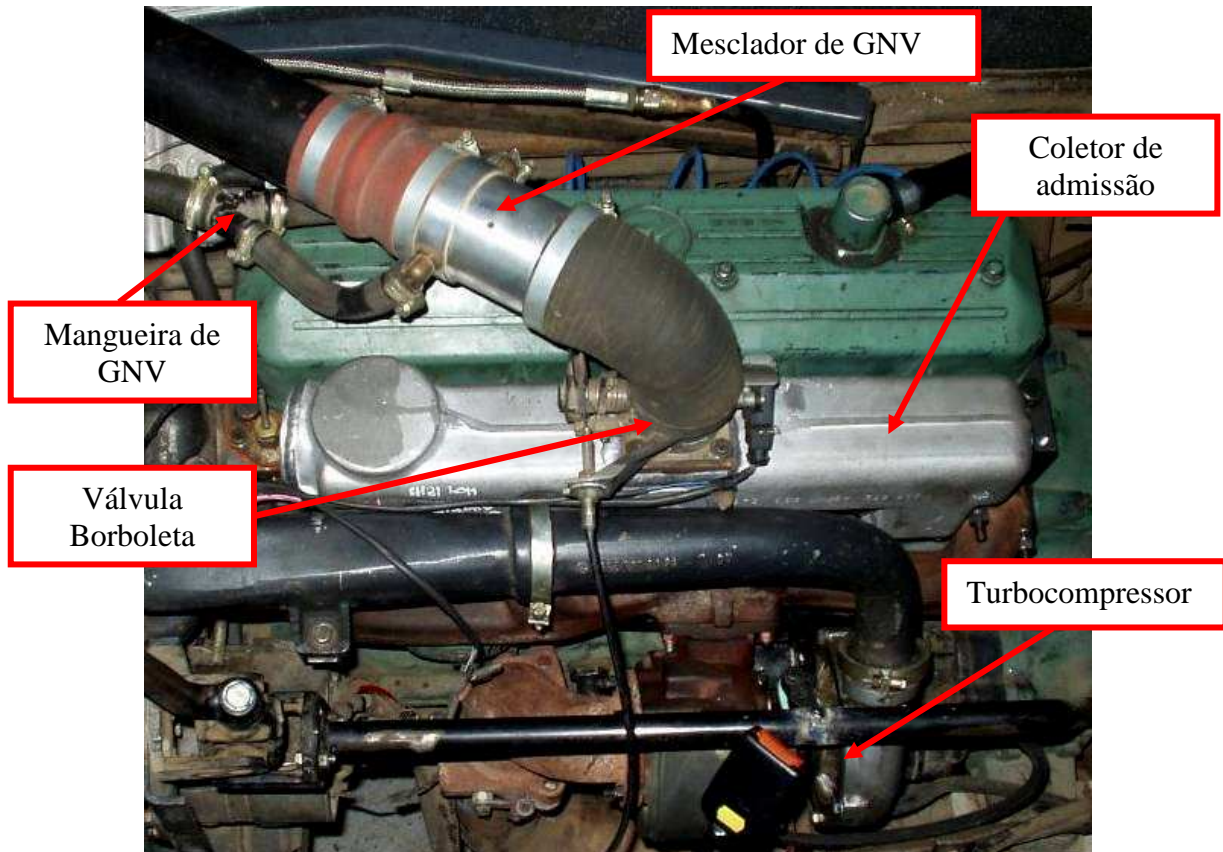


Figura 4.8: Elementos do sistema de combustível componentes do kit de “Ottolização” instalado no motor do GASBUS.

A ECU foi montada em uma caixa de alumínio, conforme a figura 4.9, fixada no painel frontal do GASBUS, atrás da porta dianteira.



Figura 4.9: Unidade de Comando Eletrônico montada em uma caixa de alumínio (a esquerda) e sua disposição no painel frontal do GASBUS (a direita).

O sistema de ignição, gerenciado também pela ECU, é composto por velas de ignição, cabos de vela, bobinas e sensor de posição do virabrequim. A ECU, com base na posição do virabrequim, determina o momento de energizar a bobina correspondente ao cilindro em que será executada a combustão. O sensor de posição do virabrequim foi instalado no local da bomba injetora diesel original, vide figura 4.10.

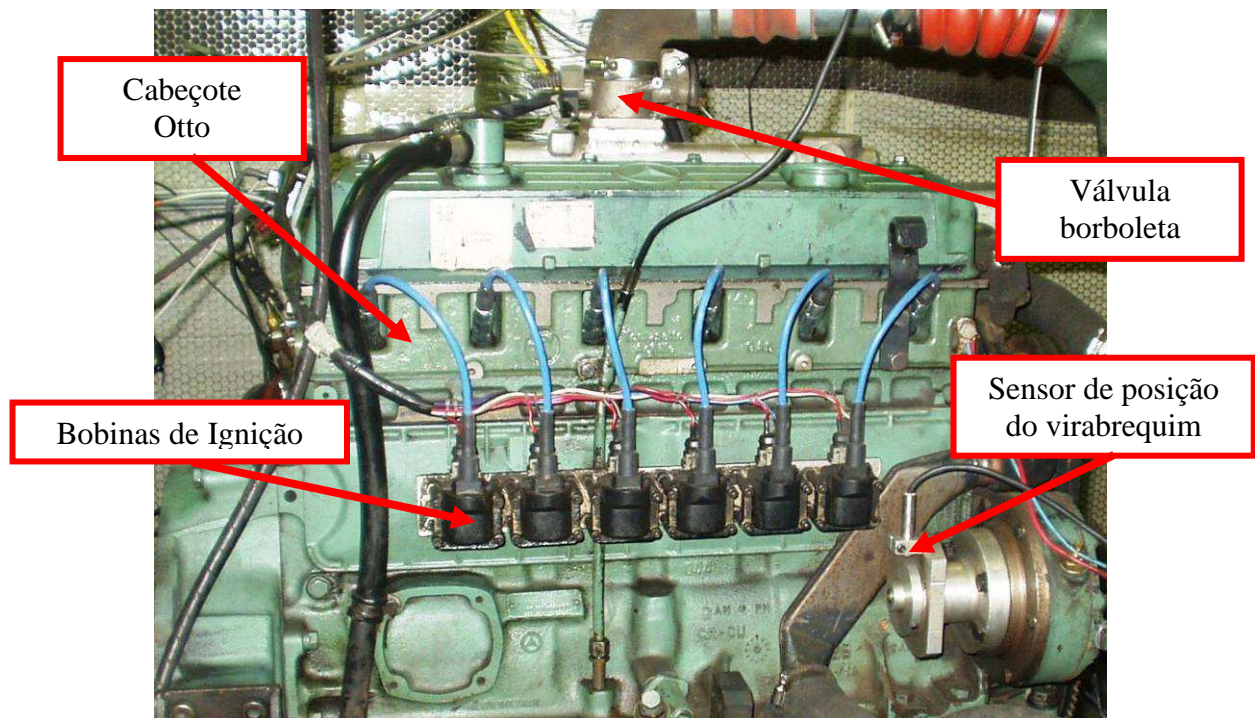


Figura 4.10: Vista lateral do motor do GASBUS depois da instalação do “kit de Ottolização”.

Com a instalação do sistema elétrico do kit de conversão a “ottolização” do motor foi finalizada com a realização de testes de campo para ajustes de parâmetros do sistema de controle de combustível e da pressão máxima na admissão.

Todos os componentes originais do motor diesel substituídos por componentes do kit de conversão foram devidamente armazenados. Estes componentes podem ser utilizados para a reconversão do motor para ciclo diesel novamente.

4.1.3 Sistema de Instrumentação Embarcada

As aquisições de dados realizadas no decorrer do período de experimentos de campo contaram com sistema de instrumentação embarcada (SIE), implementado pela equipe de pesquisadores da UFRGS. Esse sistema é composto por uma unidade de registro de dados (URD) e um conjunto de sensores. Para viabilizar a leitura pela URD dos sinais gerados pelos sensores,

os pesquisadores da UFRGS desenvolveram circuitos eletrônicos para o condicionamento de sinais. Na tabela 4.3 apresenta-se o conjunto de grandezas registradas durante o teste de campo e as faixas de medição e a figura 4.11 apresenta um diagrama esquemático do sistema de instrumentação embarcado. No projeto dos componentes do sistema de instrumentação embarcada consideraram-se as condições de operação do veículo, onde os sensores utilizados foram sujeitos à condições adversas tais como vibrações mecânicas, umidade, poeira, etc. A seguir são descritos os componentes da URD bem como o conjunto de sensores/condicionadores componentes do SIE. Para melhor compreensão dos tópicos abordados a seguir, apresenta-se no Apêndice D fundamentos de aquisição e registro de dados.

Tabela 4.3: Grandezas registradas pelo SIE instalado no GASBUS.

Grandeza Mensurada	Faixa de operação	Incerteza	Sensor
Velocidade instantânea	0 – 100 Km/h	5%	Sensor de rotação
Rotação do motor	0 – 3000 RPM	5%	Sensor de rotação
Posição do acelerador	Medida relativa	10%	TPS
Temp. Ambiente	0 – 50 °C	10%	Sensor eletrônico
Temp. do líquido de arrefecimento	0 – 120 °C	0,5 °C	PT100
Temp. do óleo do motor	0 – 120 °C	1,1 °C	Termopar tipo K

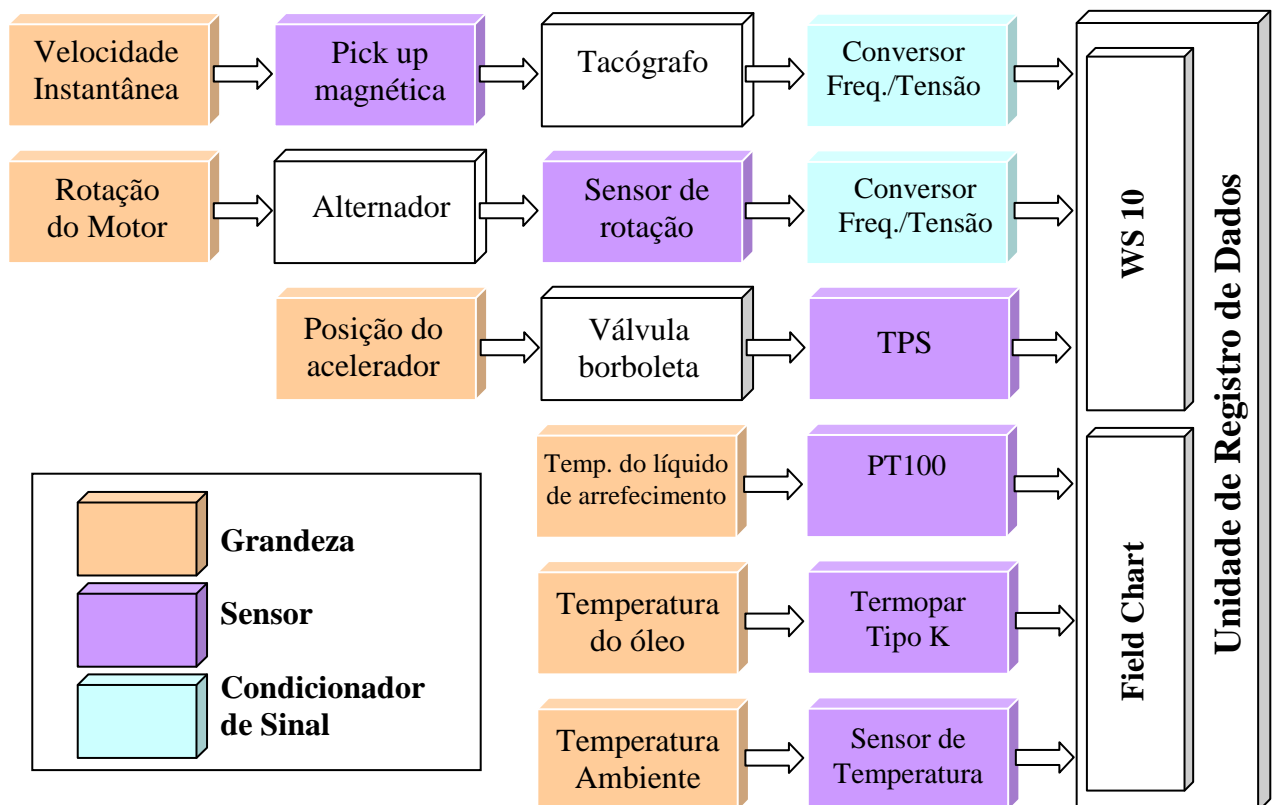


Figura 4.11: Sistema de instrumentação instalado no GASBUS.

A Unidade de Registro de Dados é constituída de um microcontrolador e um circuito condicionador de sinais da marca Novus, modelo WS10 / Field Logger. As unidades são compostas por um conversor analógico/digital (A/D) de 12 bits, 4 canais de entrada analógicos e um condicionador de sinais com 8 canais de entrada, configuráveis via software, para a leitura de sensores tipo termopar e PT100. As duas unidades foram instaladas na tampa da central elétrica do GASBUS, vide figura 4.12.

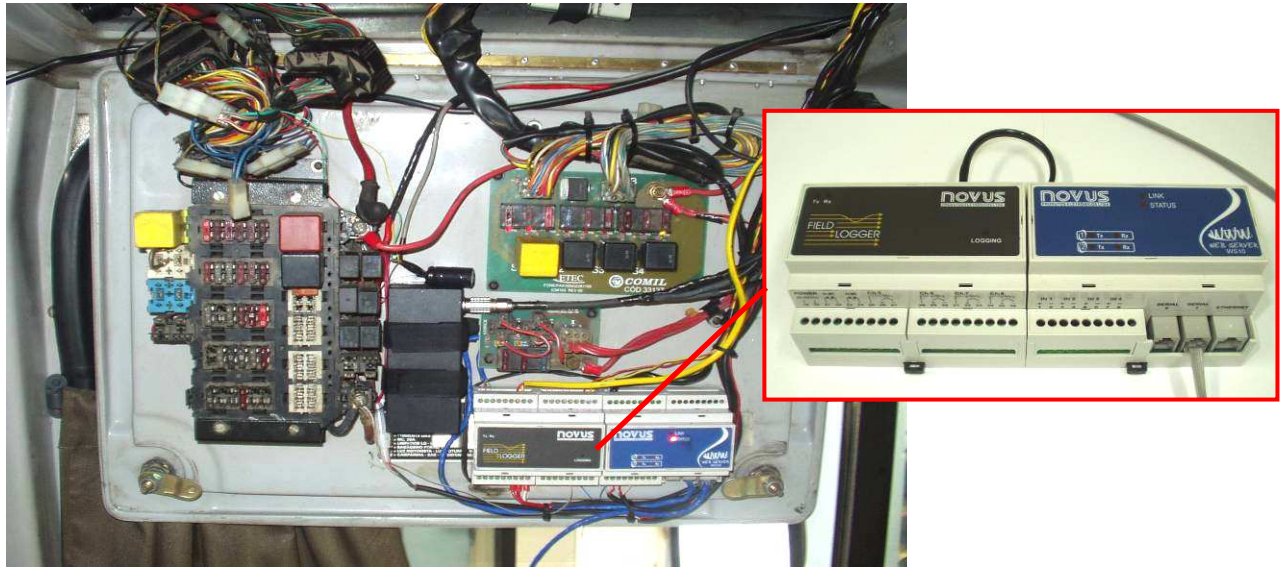


Figura 4.12: Sistema de aquisição e registro de dados instalado na central elétrica do GASBUS.

Os dados adquiridos são armazenados na memória interna da URD. Ao término do trajeto, são descarregados para um computador portátil através da conexão de rede. Como parâmetro durante os testes de campo os dados foram adquiridos com uma frequência de uma amostra por segundo. Segundo Chandler et al., 2003, e Oestergard, 2002, essa taxa de amostragem é suficiente para caracterizar as grandezas envolvidas e taxa de aquisição mais elevada geram grandes volumes de dados devido aos grandes intervalos de aquisição.

No Apêndice E apresenta-se a metodologia utilizada para a determinação da incerteza de medição dos sensores, bem como as curvas de resposta obtidas durante a calibração dos mesmos.

Para o registro da velocidade instantânea utiliza-se um sensor de rotação na saída da caixa de marcha do GASBUS, vide figura 4.13. Este sensor, componente original do veículo, mede a rotação do eixo cardan, que é proporcional à velocidade de rotação da roda e, conseqüentemente, ao deslocamento do ônibus. O tacógrafo, com base no sinal gerado pelo sensor, realiza o registro da velocidade do ônibus durante a operação. Prevendo a instalação de um computador de bordo o tacógrafo gera, em uma saída digital, um sinal com frequência

proporcional à velocidade do ônibus. Através de um conversor de frequência/tensão implementado pelos pesquisadores da UFRGS, o sinal de frequência é convertido em um sinal de tensão proporcional entre 0 e 5V, registrado pela URD. O circuito do conversor frequência/tensão desenvolvido está no Apêndice F.

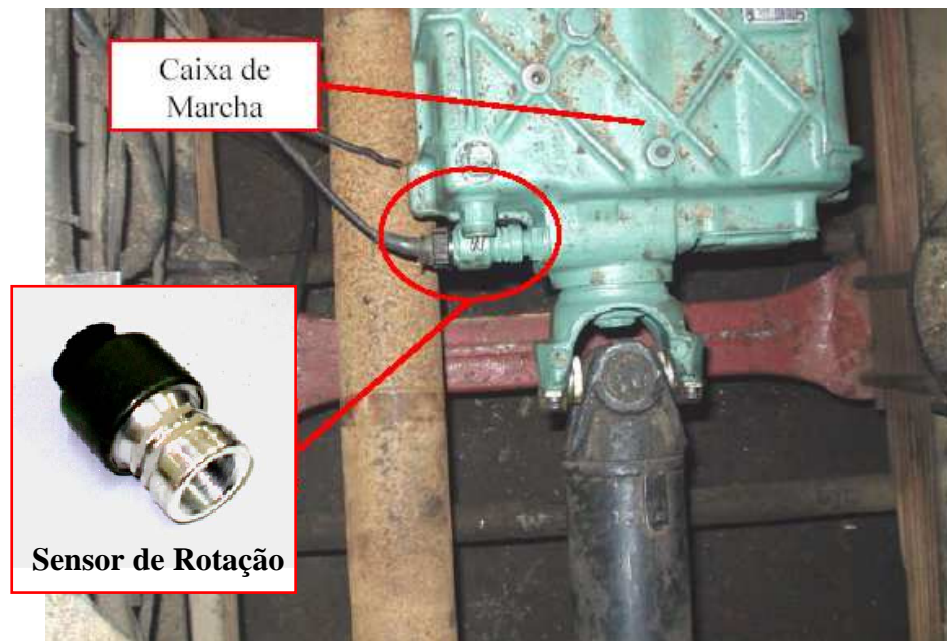


Figura 4.13: Sensor de rotação montado na saída da caixa de marcha.

Para o registro da rotação do motor utilizou-se um sensor de rotação instalado junto ao alternador. Com a utilização do circuito conversor frequência/tensão implementado pela equipe UFRGS, o sinal de frequência pulsante gerado pelo sensor de rotação é convertido em um sinal de tensão entre 0 e 5V, sendo registrado em um canal de tensão da URD.

Registra-se a posição do pedal do acelerador através do ângulo de abertura da borboleta. Este é registrado através de um sensor potenciométrico (TPS - Throttlén Position Sensor) montado no eixo da válvula borboleta, vide figura 4.14. O sensor disponibiliza um sinal de tensão entre 0 e 5V, registrado em um canal de tensão da URD.

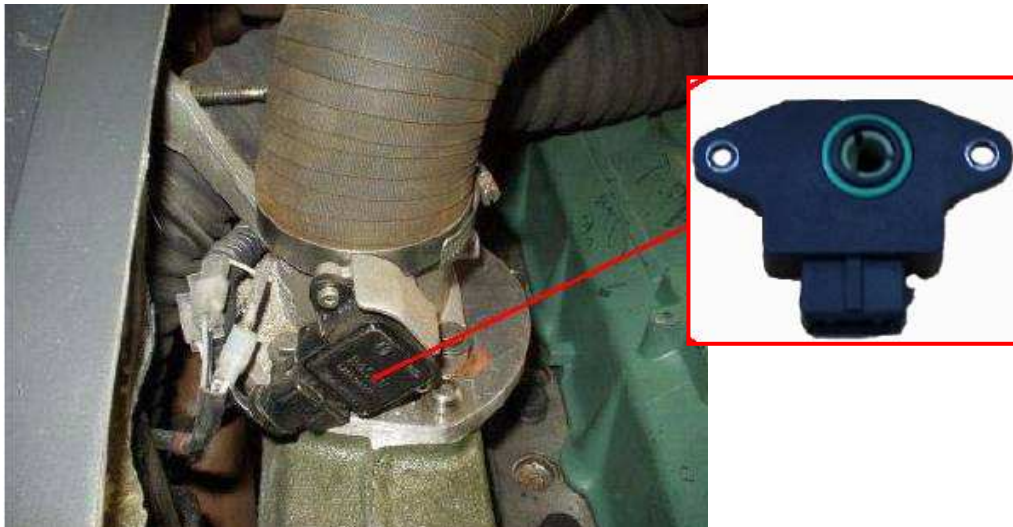


Figura 4.14: TPS montado no eixo da borboleta.

No sistema de instrumentação embarcada registram-se ainda durante os testes de campo as temperaturas ambiente, do óleo do motor e do líquido de arrefecimento. A temperatura ambiente é medida através de um sensor interno à URD (Circuito Integrado LM35). Para a medição da temperatura do óleo do motor utilizou-se um termopar tipo K, vide figura 4.15. Esse foi posicionado dentro do carter do motor, de maneira a evitar contato com as partes móveis do motor.

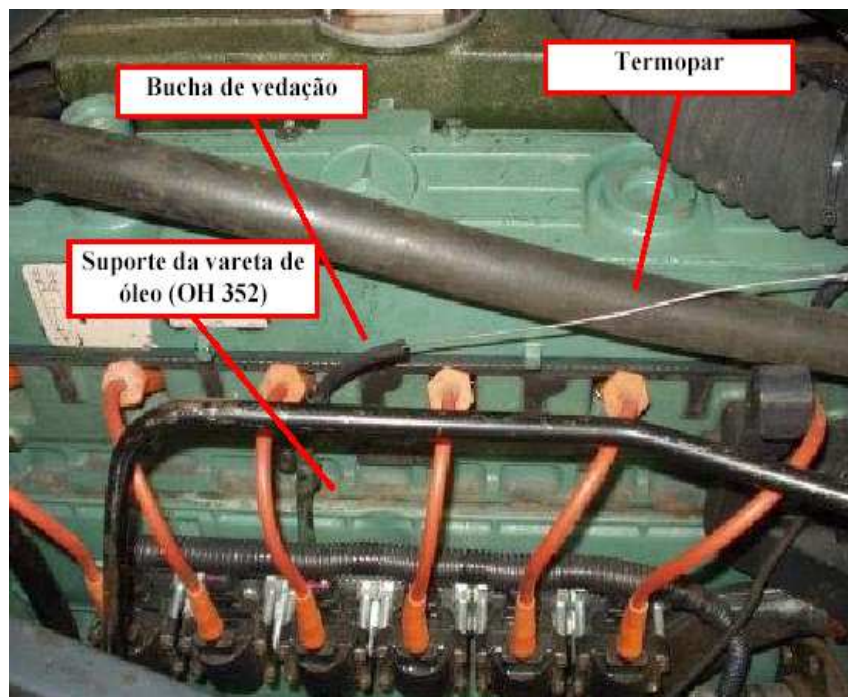


Figura 4.15: Termopar para a medição da temperatura do óleo inserido no carter do motor

Para a medição da temperatura do líquido de arrefecimento utilizou-se um resistor de platina (PT100) montado na saída das galerias de arrefecimento do cabeçote do motor, conforme

Figura 4.16. A URD possui entrada condicionada para leitura do sinal de PT100 e termopar, realizando internamente a compensação de junta fria e registrando o valor da temperatura diretamente em graus Celsius.

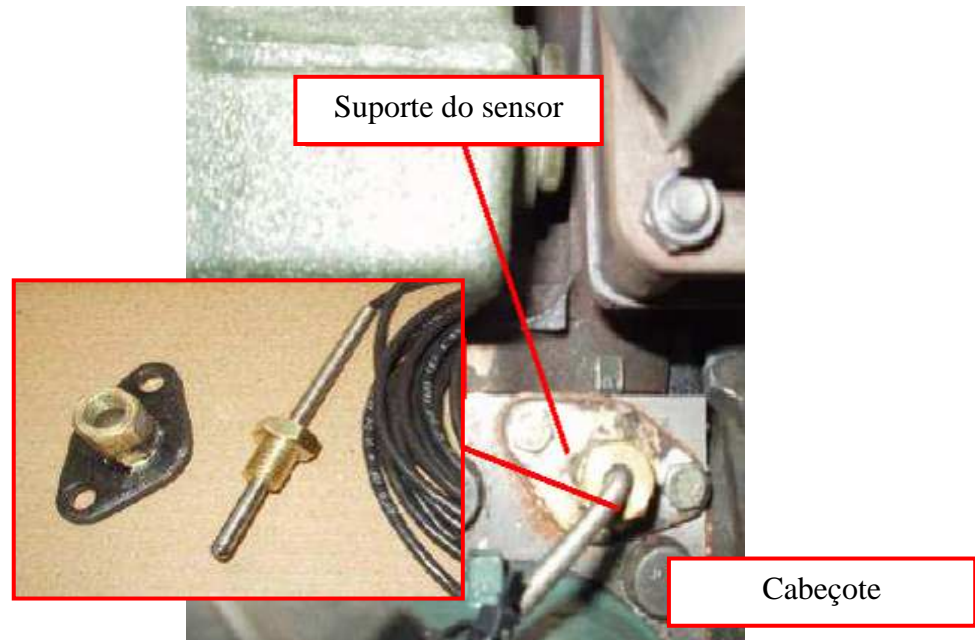


Figura 4.16: Sensor de temperatura do líquido de arrefecimento montado no cabeçote do motor.

4.2. Projeto do Experimento

Um experimento pode ser definido como sendo um conjunto de “ensaios científico para a verificação de um fenômeno físico” [Aurélio, 2004]. Este ensaio pode apresentar caráter de levantamento, onde somente são observadas as características de interesse sem realizar manipulação. Se tiver caráter experimental, um grupo de variáveis são manipuladas para determinar o efeito de diferentes tratamentos (ou processos) [Barbetta, 2005].

Neste projeto um delineamento experimental fatorial, onde o processo do experimento foi a operação em linhas comerciais. Os fatores a serem investigados, ou seja, variáveis de resposta (de saída) são o consumo de combustível, custo de manutenção e emissão de poluentes. As variáveis manipuladas de entrada, cujo objetivo é estabelecer uma comparação entre elas, são os dois veículos Diesel e o GASBUS. Os fatores que podem influenciar diretamente no resultado do experimento foram classificados em fatores controláveis ou não controláveis, conforme diagrama da figura 4.17.

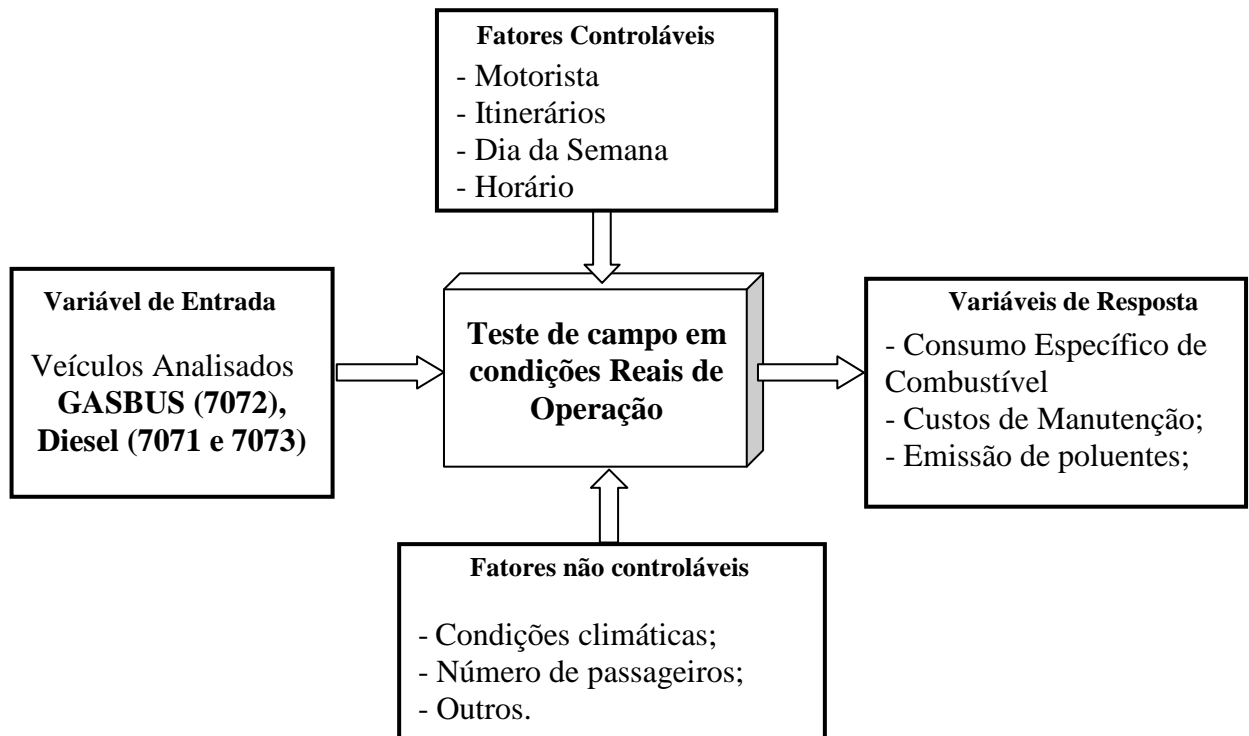


Figura 4.17: Diagrama esquemático com os fatores do experimento realizado para a análise comparativa entre os veículos.

Fatores controláveis são os que podemos, através da manipulação dos mesmos, minimizar ou controlar sua influência na variável de saída [Barbetta, 2005]. Estes são os motoristas, os itinerários, os dias da semana e os horários em que os veículos operam.

Fatores não controláveis são variáveis que não podem ser controladas pela equipe técnica. São responsáveis pelo erro experimental (variabilidade) [Ribeiro e Caten, 2000]. Estes são os fatores climáticos e número de passageiros transportados durante o itinerário.

Com o intuito de tornar estes fatores uniformes aos três veículos, para a análise estatística dos dados gerados durante os testes de campo, planejou-se um experimento equilibrado utilizando a técnica do quadrado latino. Operacionalmente realizou-se o revezamento entre os motoristas e os itinerários entre os três veículos analisados.

Conforme norma da Empresa, o sistema operacional dos veículos da SOUL é composto de tabelas de itinerários formadas por 6 a 8 linhas comerciais a serem executadas ao longo do dia, as quais variam a distância percorrida com deslocamentos que totalizam de 135 a 250 km. Estabeleceu-se três conjuntos de linhas comerciais para a operação durante os testes de campo, realizando a alternância dos veículos entre elas, conforme escala apresentada na tabela 4.4.

Tabela 4.4: Quadro com o revezamento diário dos veículos entre as linhas pré-estabelecidas.

Dia da Semana / Veículo	Veículo 1	Veículo 2	Veículo 3
Segunda-feira	Linha 1	Linha 2	Linha 3
Terça-feira	Linha 3	Linha 1	Linha 2
Quarta-feira	Linha 2	Linha 3	Linha 1
Quinta-feira	Linha 1	Linha 2	Linha 3
Sexta-feira	Linha 3	Linha 1	Linha 2
Sábado	Linha 2	Linha 3	Linha 1

Em acordo com a Soul estabeleceu-se três motoristas para a realização dos testes. Estes são revezados semanalmente entre os veículos, conforme a tabela 4.5. A cada três semanas completa-se o ciclo de revezamento dos motoristas entre os veículos analisados.

Tabela 4.5: Quadro com o revezamento dos motoristas entre os veículos semanalmente.

Dia da Semana / Motoristas	Motorista 1	Motorista 2	Motorista 3
Semana 1	Veículo 1	Veículo 2	Veículo 3
Semana 2	Veículo 2	Veículo 3	Veículo 1
Semana 3	Veículo 3	Veículo 1	Veículo 2

Conforme planejado, a solicitação do GASBUS foi aumentada progressivamente através da operação em itinerários classificados como fácil, médio e difícil. No Apêndice G são apresentados os itinerários selecionados para operação durante o período de testes em linha comercial.

Um dos pontos importantes para o sucesso da implantação de novas tecnologias no transporte coletivo é a escolha de motoristas interessados em participar do programa de teste, assim como o comprometimento da equipe de manutenção e gerencia da operadora de transporte. [Chandler *et al*, 2003]. Para a seleção dos motoristas que participariam do projeto piloto, realizou-se treinamento dos motoristas da Soul, conforme a figura 4.18, objetivando familiarizá-los com o modo de operação do motor otolizado. Durante esse treinamento selecionou-se, dentre os voluntários a participarem do projeto piloto, os três motoristas que operaram os ônibus analisados durante o período de testes de campo.



Figura 4.18: Treinamento dos motoristas selecionados para operar o GASBUS.

Em paralelo, as equipes UFRGS e a coordenação de manutenção da Soul planejaram as atividades de manutenção dos veículos e o modo de registro dos eventos. Definiu-se que a manutenção dos veículos seria realizada normalmente pela equipe da Soul e as intervenções em componentes do kit de conversão seriam realizadas com o acompanhamento dos pesquisadores da UFRGS. Através do sistema informatizado de gerenciamento de manutenção da frota da Soul, foram registradas todas as atividades executadas. O sistema informatizado gera relatórios contendo descritivo dos custos com peças de reposição, com pneus e com mão de obra empregada.

Visando familiarizar a equipe de manutenção da Soul com o equipamento instalado para a conversão do motor, as atividades de instalação do kit de conversão e dos cilindros de armazenamento realizaram-se com ações integradas dos técnicos da UFRGS, Tomasetto Achille e da Soul.

O registro dos dados operacionais dos veículos tais como itinerário, número de passageiros, eventos e motorista condutor foi realizado através das “fichas de itinerários”. Estas são geradas pela empresa SOUL para informar as rotas diárias para o motorista e cobrador. Assim, nestes formulários - “fichas de itinerários” - registram-se os números de passageiros transportados por viagem e o respectivo horário, bem como qualquer evento anormal ocorrido durante a operação.

O consumo de combustível dos veículos diesel é registrado durante os sucessivos abastecimentos através do valor indicado na bomba de combustível, na garagem da SOUL. O abastecimento do GASBUS foi executado em um posto comercial, próximo ao terminal de ônibus Rui Barbosa, no centro de Porto Alegre. No momento do reabastecimento, registra-se o

valor indicado pela bomba de GNV na ficha de itinerário, sendo digitalizados os valores no sistema da Soul ao final do itinerário.

4.2.1 Cenário de Testes

A realização dos testes de campo em condições normais de operação dá-se em linhas comerciais dentro da região metropolitana de Porto Alegre, entre o município de Alvorada e o centro da cidade de Porto Alegre.

A cidade de Alvorada possui cerca de 205.000 habitantes, e está localizada na latitude S 30° 01'59" e longitude W 51°13'48", com uma altitude média de 17 m acima do nível do mar, vide figura 4.19. A distância entre o centro de Alvorada e o Centro de Porto Alegre é de 32 km. A economia é baseada principalmente no comércio e no setor de serviços, além de a grande maioria da população trabalhar no município de Porto Alegre, fazendo com que a cidade seja conhecida também como cidade-dormitório [Alvorada, 2006].

O único meio de transporte coletivo entre Alvorada – Porto Alegre é o ônibus.

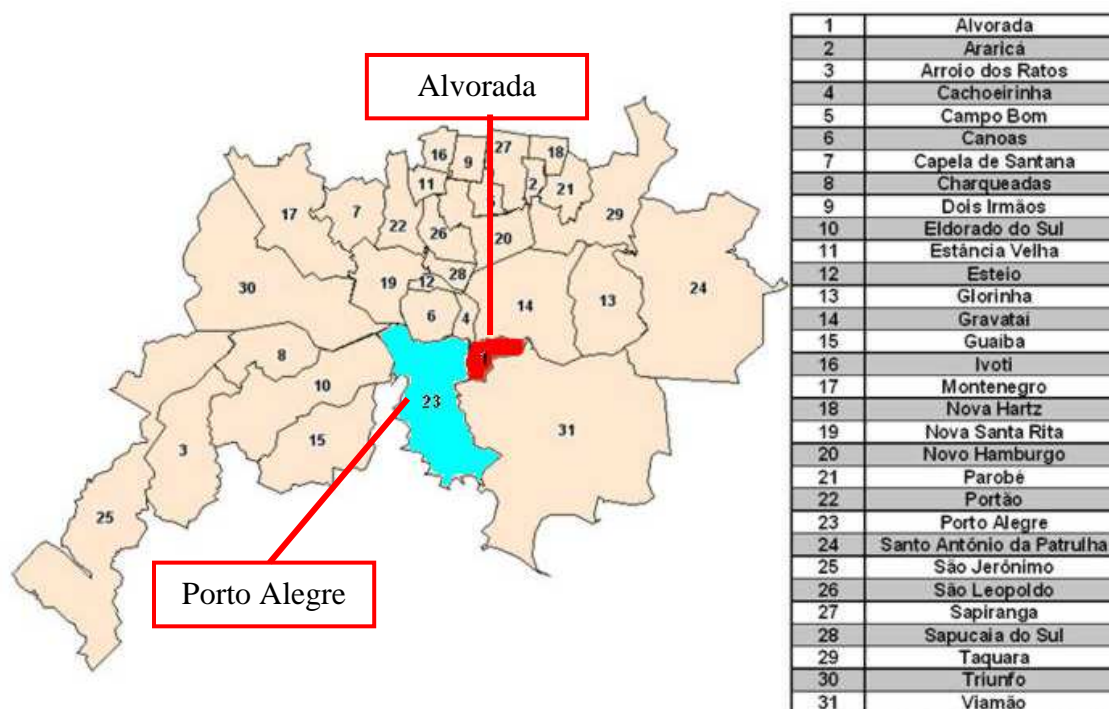


Figura 4.19: Localização do município de Alvorada dentro da região metropolitana de Porto Alegre.

4.3 Medidas de Emissão de Poluentes em Campo

Para a avaliação do impacto ambiental da substituição do diesel pelo GNV no transporte coletivo, faz-se necessária a medição do nível de emissões geradas durante o tráfego

do GASBUS em linhas comerciais. Dado o fato de não haver uma normativa que regulamente testes de emissão de poluentes em veículos pesados sem que seja necessária a retirada o motor do ônibus, optou-se por implementar uma metodologia alternativa, viabilizando a medição de emissões representativas do modo normal de operação do veículo.

A metodologia desenvolvida por Silva *et al.*, 2006, onde, através de um mapa operacional gerado a partir de registros do desempenho do veículo e a concentração dos gases de escape, calcula-se o nível de emissão de poluentes em condições reais de operação. Os resultados finais são expressos em g/km de cada poluente.

4.3.1 Sistema de instrumentação embarcada para medição de emissões de poluentes

Projetou-se um sistema de instrumentação embarcado para viabilizar a medida de emissões em campo. Este sistema utiliza-se de um conjunto de sensores, um analisador de gases portátil e um aparelho de localização global – GPS para registro de um conjunto de grandezas descritas na tabela 4.6. Os sinais dos sensores são registrados em um computador portátil com a utilização de uma unidade condicionador/conversor A/D.

Tabela 4.6: Grandezas mensuradas pelo Sistema de Instrumentação Embarcado para Medição de Emissão de Poluentes.

Grandeza Mensurada	Faixa de medição	Incerteza de medição	Sensor
Velocidade instantânea	0 – 100 Km/h	5%	Sensor de rotação
Rotação do motor	0 – 3000RPM	5%	Sensor de rotação
Posição do acelerador	Medida relativa	15%	TPS
Temp. Ambiente	0 – 50 °C	10%	Sensor eletrônico
Temp. do líq. de arrefecimento	0 – 120 °C	0,5 °C	PT100
Temp. do óleo do motor	0 – 120 °C	1,1°C	Termopar tipo K
Pressão no coletor de entrada	0 – 2,5 BAR	5%	MAP
Relação Ar/Combustível - λ	0 – 100 Km/h	2%	Sensor de rotação
Posição Global	-		GPS
Massa de ar admitida	0 – 600 kg/h	5%	MAF
Concentração de CO	0 – 10% vol	5%	Analisador de gás MEXA 574GE, Horiba, sensor N-DIR
Concentração de CO ₂	0 – 20% vol	5%	
Concentração de HC	0 – 20000ppm	5%	

Durante a realização dos testes de campo utilizou-se o condicionador de sinais da marca Lynx, modelo ADS2000IP, composto por conversor A/D e controlador AC2122 de 16 bits, condicionador de sinais AI2164 contendo 32 canais de entrada configuráveis por software, vide figura 4.20. Como unidade de registro, utilizou-se um microcomputador portátil da marca Toshiba, modelo Satellite, processador Intel de 2GHz, 256 MB de memória RAM, capacidade de disco rígido de 30GBytes. A transmissão dos dados entre o computador e o condicionador de sinais foi feita através de rede Ethernet/IP. Foram utilizados programas específicos para aquisição de dados (AqDados). Para pós-processamento dos dados, utilizou-se o programa OriginPro para cálculo dos totais emitidos, ajuste de curvas e geração de gráficos.

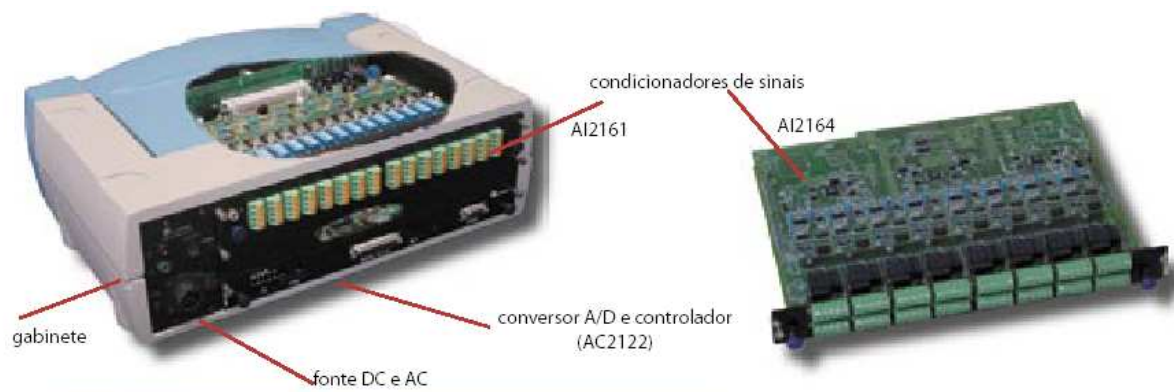


Figura 4.20: Sistema de aquisição/condicionamento de sinal ADS2000IP, da Lynx.

Como parâmetro, nos testes de campo, utilizou-se uma taxa de aquisição de 10 amostras por segundo. Conforme valores observados na bibliografia, as frequências envolvidas em testes de emissão de poluentes são baixas, na sua maioria não ultrapassando 1 Hz.

Para a medição da massa de ar admitida utilizou-se um sensor de vazão mássica de ar (Mass Air Flow – MAF) modelo HFM 5, da Bosch, conforme figura 4.21. Este possui princípio de funcionamento similar a um anemômetro de fio quente. Possui como principais características: grande confiabilidade, eficiência e repetibilidade, porque além de medir diretamente a massa do ar admitido, não possui elementos móveis tais como palhetas ou cames e não necessita de compensação devido à variação da temperatura do ar admitido. Conforme especificado pelo fabricante, este modelo de sensor possui uma faixa de medição de 25 a 600 kg/h de massa de ar, com uma incerteza de 5%. No GASBUS instalou-se o sensor MAF na saída do filtro de ar, e a entrada do turbocompressor.

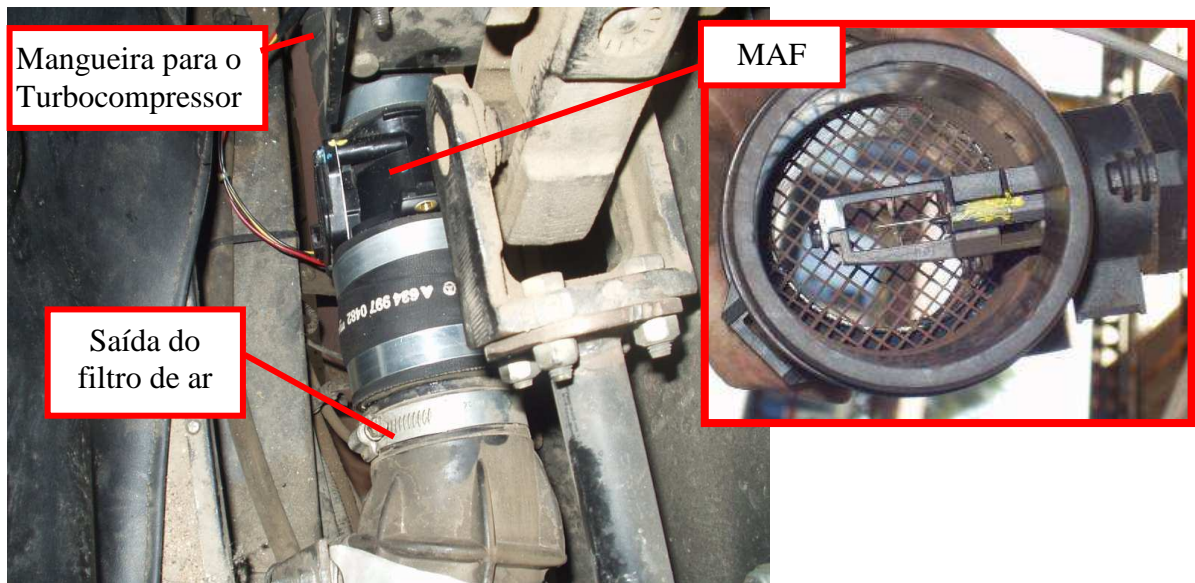


Figura 4.21: Sensor MAF instalado no veículo GASBUS.

Registra-se a relação ar/combustível utilizando uma Sonda Lambda de Banda Larga (Proportional Lambda Meter - PLM), da MOTEC, instalada no tubo de escape do GASBUS como indicado na figura 4.22. Esta gera uma tensão linear proporcional a relação ar/combustível média em que ocorreu a combustão nos cilindros.



Figura 4.22: Sonda Lambda de Banda Larga instalada no tubo de escape.

Para o registro da pressão no coletor de entrada instalou-se um sensor MAP (Manifold Absolute Pressure), vide figura 4.23. Este consiste em um sensor automotivo, composto por um circuito integrado de silício que varia sua resistência de acordo com a pressão,

gerando na saída um sinal de tensão proporcional à pressão aplicada. No GASBUS, foi utilizado um sensor MAP fabricado pela Mercedes-Bens, modelo MB16244329. Esse possui uma faixa de medição de 0,3 a 2,5 bar, gerando uma tensão de saída proporcional entre 0,7 e 4,5 V. Esse foi instalado em uma tomada na lateral do coletor de admissão.

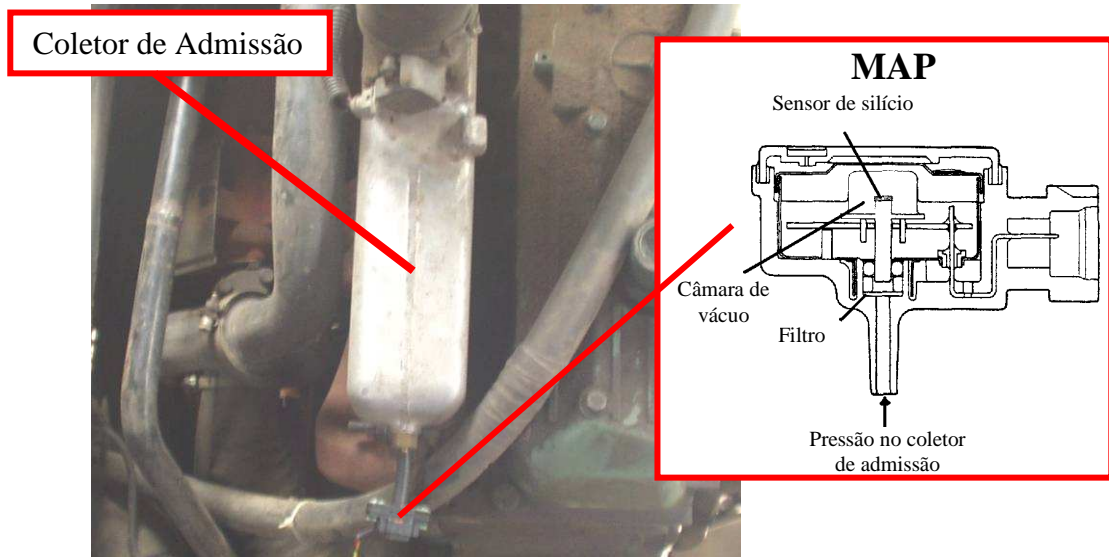


Figura 4.23: Sensor MAP instalado no coletor de entrada.

Durante os testes de campo mede-se a concentração dos gases de escape em condições reais de operação com a utilização de um analisador de gases portátil modelo MEXA 574GE, da Horiba, vide figura 4.24. Esse mede a concentração de CO, CO₂ e HC por meio de uma célula de infravermelho não-dispersivo (Non Dispersive Infra Red - NDIR). Através de uma saída analógica de tensão para cada componente do gás de escape medido, registra-se no sistema de aquisição de dados continuamente os valores de emissões geradas.



Figura 4.24: Analisador de gases MEXA 574GE, fabricado pela Horiba, instalado no GASBUS durante testes de campo.

Através de uma ponta de prova inserida na extremidade do tubo de escape, conforme figura 4.25, retira-se uma amostra dos gases gerado na combustão para análise no aparelho. A sucção dos gases é realizada por meio de uma bomba de deslocamento positivo, inclusa no analisador de gases, retirando uma amostra com vazão constante. Antes de ser analisada a amostra dos gases passa por uma serpentina de resfriamento, dois filtros de partículas e um purgador, para a retirada da umidade. Considerou-se os registros realizados dos gases de escape em base seca.

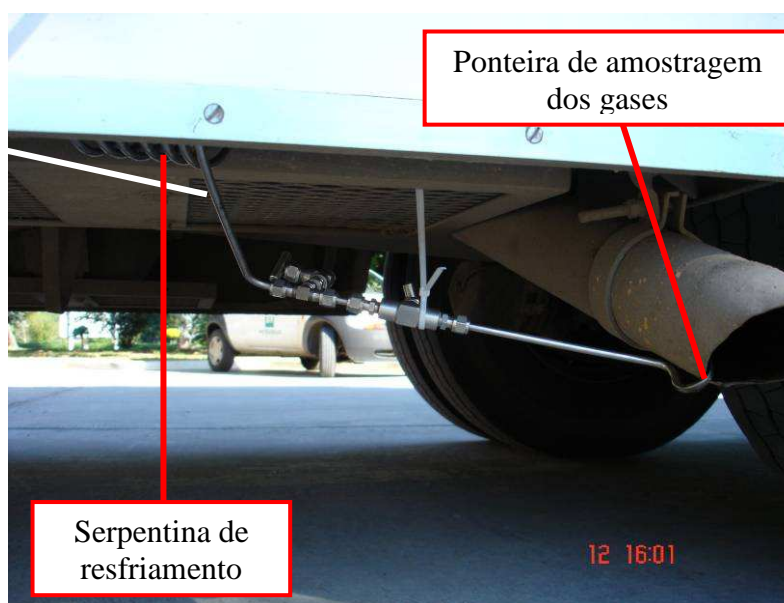


Figura 4.25: Serpentina fixada no tubo de escape mangueira de conexão com analisador de gases.

Foi realizada a calibração do analisador de gases no início e ao final dos testes de campo, de maneira a reduzir incertezas de medição atribuídas a leitura da concentração dos gases.

Juntamente com o sistema de instrumentação embarcado utilizou-se um aparelho de localização global – GPS – modelo Etrex Venture, da Garmin, vide figura 4.26. Este foi programado para registrar a cada cinco segundos a localização do GASBUS durante os testes de campo. Com base nesses registros, são calculadas velocidades em cada trecho, à distância percorrida e a altitude do veículo, sendo ao final do teste realizado o cruzamento dos registros do GPS com os do sistema de instrumentação embarcado.



Figura 4.26: GPS utilizado durante testes de campo.

4.3.2 Grandezas estimadas de desempenho do motor

Com os registros do sistema de instrumentação embarcado projetado e utilizando equações que regem os fenômenos físicos da operação do motor, calcula-se ainda o consumo específico de combustível, a marcha em operação, a potência e o torque do motor.

Para cálculo do consumo específico de combustível utiliza-se a equação 3.12. No mapa operacional do GASBUS são registradas a relação ar combustível real e a massa de ar admitida. Conhecendo-se a relação ar/combustível estequiométrica para o GNV, o consumo de combustível pode ser dado pela fórmula:

$$\text{Consumo_Combustível} = A/F_s * \lambda * m_{ar} * \rho_{GNV} = 16,89 * \lambda * m_{ar} * \rho_{GNV} [m^3 / \text{min}] \quad (4.1)$$

Determina-se a marcha utilizada pelo motorista através da relação entre a velocidade do veículo e a rotação do motor. Sendo a caixa de marcha possuindo relações constantes, a marcha em operação do veículo é obtida pela razão entre a velocidade e a rotação do motor.

Tabela 4.7: Relação entre a velocidade do GASBUS e a rotação do motor¹.

Marcha	Razão velocidade / marcha
1 ^a	4,4
2 ^a	7,5
3 ^a	12,5
4 ^a	20,2
5 ^a	29,8

¹ A relação de transmissão da caixa de marcha, diferencial e diâmetro da roda.

Com o término do projeto, executou-se junto ao laboratório de motores do Instituto de Pesquisa e Tecnologia (IPT), da USP, o levantamento das curvas de potência e torque do motor Ottolizado. Com base nos dados operacionais levantados durante o teste, realizou-se uma correlação entre a potência demandada do motor e a massa de ar admitida, sendo a potência dada pela equação:

$$P = 0,3422 * \dot{m}_{ar} - 9,4195 \quad [kw] \quad (4.2)$$

O torque do motor é estimado através da equação com a potencia e a rotação do motor, podemos estimar o torque através da equação 4.2. Rearranjando os termos da equação, temos o torque do motor dado por:

$$T = \frac{\pi * N}{30 * P} \quad (4.2)$$

Onde N é a rotação do motor, expressa em RPM. No Apêndice H apresenta-se o gráfico com a correlação entre a massa específica de ar e a potência e o torque do motor.

4.3.3 Metodologia de testes

A metodologia propõe a realização de três modos de testes, caracterizando os modos comuns de operação do ônibus em linha comercial. O teste com o veículo parado operacionalmente consiste em, com o veículo estacionado, estabilizar a rotação do motor em diferentes patamares, medindo a concentração de CO gerada. No teste de regime constante, tem-se por objetivo medir a massa de CO, CO₂ e HC geradas na combustão, com o veículo

trafegando em regime constante, caracterizando o modo de operação em rodovias e vias expressas. Para a realização deste teste utiliza-se uma via plana, mantendo patamares de velocidade.

No teste em condições reais de operação o veículo trafega em linhas comerciais, realizando a medição continuamente ao longo do trajeto. Como cenário de teste – condições reais – foram adotados diferentes trajetos, operando com o veículo fora da linha comercial, percorrendo itinerários comerciais ou ainda em circuitos específicos, percorridos diversas vezes para verificar a repetibilidade dos resultados obtidos através da metodologia proposta.

O descritivo da preparação para a execução dos testes de emissão de poluentes bem como detalhes dos modos de operação são apresentados no Apêndice I.

4.3.4 Metodologia de cálculo

Determina-se a massa total gerada na combustão do GNV comparando a massa de carbono fornecida ao motor através do combustível (GNV) com a massa de carbono associada nos componentes dos gases de escape, conforme a figura 4.27. Esta metodologia de cálculo é chamado de balanço de carbono [Heywood, 1988; Weaver, 2004].

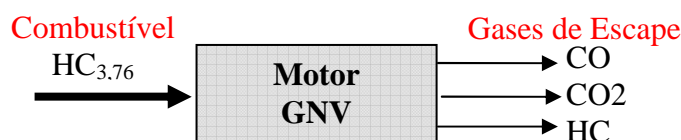


Figura 4.27: As emissões são calculadas comparando a massa de carbono fornecido ao motor através do GNV com a emitida nos gases de escape.

Assim, com base nos registros da concentração dos gases de escape e da vazão mássica de ar admitido pelo motor, calcula-se as vazões mássicas de CO, CO₂ e HC emitidas. No Apêndice J apresenta-se de forma detalhada a metodologia de cálculo utilizada na determinação do caudal mássico emitido de cada poluente.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir apresentam-se de forma detalhada os resultados quantitativos gerados pelo GASBUS e os dois ônibus diesel originais durante os 12 meses de operação em linhas comerciais, conforme descrito no projeto do experimento. Esses foram compilados em um banco de dados, viabilizando a análise comparativa dos custos operacionais entre as duas motorizações propostas, determinando o tempo de retorno do investimento e os ganhos quanto a emissões de poluentes.

5.1 Registros Operacionais

Durante o período de execução dos testes em linhas comerciais registrou-se dados referentes à operação do veículo tais como dias em operação, distância percorrida, número de passageiros, consumo de combustível, atividades de manutenção e os registros através do sistema de instrumentação embarcada instalado.

– Dias em Operação

Quanto à operação diária, os três veículos foram selecionados para operar em linhas comerciais durante a semana, de segunda a sábado, em geral não operando domingo por haver uma redução no número de horários das linhas comerciais da empresa. Na tabela 5.1 apresenta-se mensalmente os dias em “operação normal” dos veículos analisados, ou seja, dias que completaram a tabela diária programada.

Tabela 5.1: Dias de operação em cada mês em e o total de dias em operação em linhas comerciais dos ônibus diesel (7071 e 7073) e o GASBUS (7072).

	Out 04	Nov 04	Dez 04	Jan 05	Fev 05	Mar 05	Abr 05	Mai 05	Jun 05	Jul 05	Ago 05	Set 05	Total
7071¹	25	24	25	23	21	24	23	26	26	24	27	27	295
7073¹	25	23	24	24	24	23	24	23	24	23	26	24	287
7072²	20	20	21	16	12	13	15	19	26	20	25	26	233

¹ Ônibus motor diesel; ² GASBUS

Conforme apresentado, o GASBUS trafegou menos dias que os veículos diesel até o mês de maio de 2005. Isto foi devido às participações do veículo em eventos tais como:

- Visita do Presidente **Luiz Inácio Lula da Silva** e sua Comitativa ao **Projeto Piloto GASBUS**, durante sua estada em Porto Alegre no Fórum Social Mundial – 27/Jan/2005;
- Apresentação pela Petrobrás & Rede Gás Energia via respectivas Diretoria e Gerência, Sr. Ildo Sauer e Sr. Antônio Luiz Santos, da Viabilidade Tecnológica do Projeto Piloto **GASBUS** junto a FIERGS – Federação das Indústrias do Estado do Rio Grande do Sul – Out/2004;
- Apresentação pela Petrobrás & RedeGasEnergia da Viabilidade Tecnológica do Projeto Piloto **GASBUS** junto a “marcha dos prefeitos” em Brasília – a Globaltech - Fev/2005;
- Diversas viagens para demonstração da “rota tecnológica de ottolização por conversão” para empresários, e pessoal da REDEGASENERGIA / PETROBRAS e distribuidoras de GN e outras Empresas como: DALÇOQUIO, DYNETEK, SULGAS, TBG, MARCOPOLO, AGRALE, DELPHI, FOCKINK e etc., sempre com intuito de mostrar a “rota tecnológica”, além de testes de campo;
- Também, no mês de abril de 2005 ocorreu o “*upgrade*” programado, conforme acordado pela Petrobrás & Tomasetto Achille, para a inspeção e substituição de alguns componentes do kit de conversão do motor, totalizando uma parada de 12 dias.

No Apêndice K apresenta-se um conjunto de tabelas contendo uma agenda detalhada com a execução para cada um dos três veículos durante o período de estudo.

– **Distância trafegada**

A distância diária percorrida pelos veículos é conferida no momento da chegada do veículo na garagem da SOUL, através da leitura do ôdometro de cada um dos veículos e após, é registrado pelos fiscais da garagem nas planilhas de acompanhamento. Conforme definido no projeto de experimento, estabeleceu-se que, durante o início dos testes de campo, o GASBUS operasse o total de uma tabela diária. Uma tabela corresponde de seis a oito linhas comerciais entre os municípios de Alvorada e Porto Alegre, com uma distância média de 155 km diários, vide tabela 5.2. Contudo, nos dois últimos meses analisados, com a intenção de verificar a durabilidade do motor e dos seus componentes, determinou-se que o GASBUS operasse em tabelas mais longas, elevando-se assim a distância de média diária percorrida para 235 km. Até o final do mês de setembro os ônibus diesel 7071 e 7073 totalizaram respectivamente 45706 e 46413 km percorridos. O GASBUS totalizou 42035 km em linhas comerciais.

Tabela 5.2: Média diária da distância percorrida pelos ônibus diesel (7071 e 7073) e o GASBUS (7072), em km.

	Out 04	Nov 04	Dez 04	Jan 05	Fev 05	Mar 05	Abr 05	Mai 05	Jun 05	Jul 05	Ago 05	Set 05	Média
7071¹	153,1	162,5	171,4	161,6	152,0	156,1	158,8	163,8	137,2	140,8	155,0	148,0	154,9
7073¹	158,7	152,5	169,3	175,9	175,9	161,3	165,9	158,3	153,2	170,3	231,1	252,6	161,7
7072²	155,4	158,2	162,4	163,3	168,7	171,7	169,0	170,0	155,7	170,3	165,8	131,8	180,4

¹ Ônibus motor diesel; ² GASBUS

– Passageiros Transportados

O número de passageiros transportados é um item importante para comparar-se o desempenho dos veículos, caracterizando a carga no veículo durante a operação. Conforme tabela 5.3, diariamente foram transportados uma média de 338 passageiros. Até o fim do mês de setembro foram transportados um total de 97407 e 98582 respectivamente pelos ônibus diesel 7071 e 7073, e 79569 pelo GASBUS.

Tabela 5.3: Média diária de passageiros transportados em linhas comerciais pelos ônibus diesel (7071 e 7073) e o GASBUS (7072).

	Out 04	Nov 04	Dez 04	Jan 05	Fev 05	Mar 05	Abr 05	Mai 05	Jun 05	Jul 05	Ago 05	Set 05	Média
7071¹	364	357	350	314	276	307	306	333	315	339	359	330	330
7073¹	367	330	357	293	317	309	312	301	320	335	382	411	343
7072²	348	336	336	313	323	355	345	350	361	378	379	297	341

¹ Ônibus motor diesel; ² GASBUS

– Consumo de Combustível

Conforme informação da Empresa SOUL, o consumo de combustível representa o maior item do custo operacional dos veículos de transporte urbano. Para a comparação do consumo de combustível entre os veículos, comumente utiliza-se o consumo específico de combustível, ou seja, a razão entre o total de combustível e a distância percorrida pelo veículo, vide tabela 5.4.

Definindo a energia interna contida no combustível como Poder Calorífico, o GNV possui 8293 kcal/m³ [CTGAS, 2006] e o diesel 8767 kcal/l [ANTP, 2003]. Para realizar a análise comparativa de consumo específico, considerou-se a energia contida em 1m³ de GNV equivalente a contida em 1l de diesel.

Tabela 5.4: Média mensal do consumo específico de combustível dos ônibus diesel (7071 e 7073), em l/km, e o GASBUS (7072), em m³/km.

	Out 04	Nov 04	Dez 04	Jan 05	Fev 05	Mar 05	Abr 05	Mai 05	Jun 05	Jul 05	Ago 05	Set 05	Média
7071¹	2,46	2,53	2,57	2,59	2,63	2,65	2,65	2,68	2,40	2,29	2,40	2,32	2,51
7073¹	2,51	2,51	2,53	2,48	2,63	2,58	2,52	2,52	2,39	2,52	2,30	2,30	2,48
7072³	2,18	2,19	2,23	2,27	2,26	2,17	2,21	2,13	2,41	2,27	2,43	2,39	2,28

¹ Ônibus motor diesel; ² GASBUS

Realizou-se análise da variância, com nível de significância de 5%, do número de passageiros transportados e do consumo específico de combustível, vide figura 5.1. A análise de variância efetuada com o com a média de passageiros transportados dos três ônibus mostra que não há diferença significativa entre os veículos quando analisado. O resultado demonstra a homogeneidade da distribuição dos passageiros transportados entre os veículos, durante a operação em linhas comerciais, conforme planejado no projeto do experimento. Para o consumo específico de combustível a análise de variância realizada mostra uma diferença significativa entre a média de 2,28 km/m³ do GASBUS e 2,51 km/l e 2,48 km/l dos ônibus 7071 e 7073. Não foram determinadas diferenças significativas entre as médias de consumo específico dos ônibus diesel.

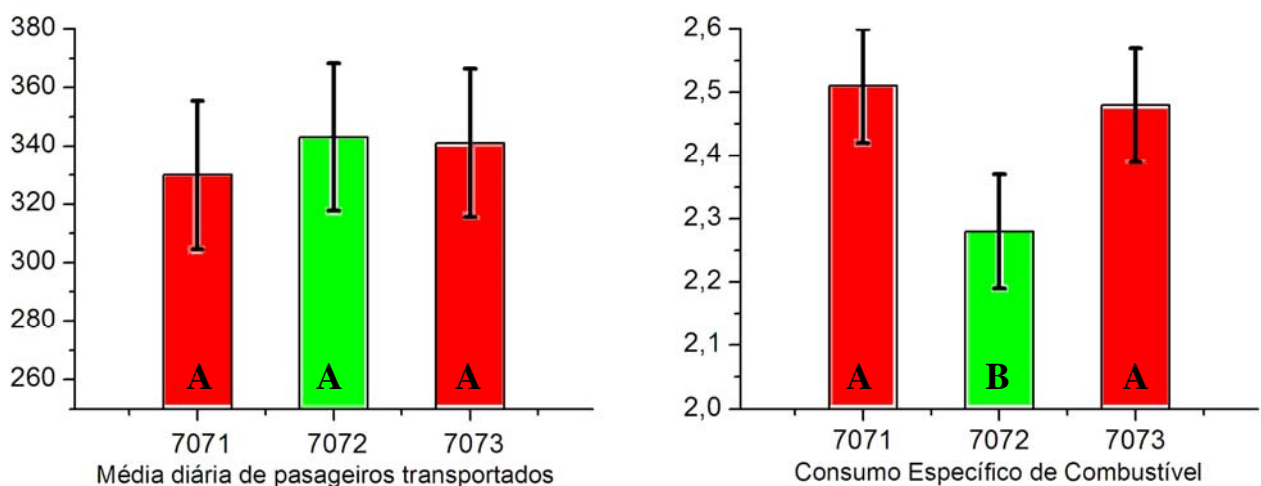


Figura 5.1: Resultado da análise de variância da média mensal de passageiros transportados (esquerda) e do consumo específico de combustível (direita). Colunas assinaladas com a mesma letra não apresentam diferenças significativas ($\alpha=0,05$).

– Manutenção

Conforme definido pelo grupo de trabalho, as atividades de manutenção foram executadas pela equipe da Soul. Estas foram registradas no sistema informatizado de gestão de manutenção do frota, sendo emitido um relatório mensal de acompanhamento contendo os componentes substituídos, o tempo de trabalho dos técnicos no veículo e os custos envolvidos.

As atividades de manutenção dos componentes do kit de conversão foram realizadas com a participação da equipe da UFRGS. Durante o período de operação em linha comercial realizaram-se as seguintes ações:

- Em março de 2005, com 18.000 km em operação, conforme solicitado pela equipe de técnicos da Tomasetto Achille, foram trocados preventivamente os cabos de velas e velas de ignição devido ao desgaste dos componentes, estimado durante testes de laboratórios do fabricante;

- Em maio de 2005, com 22.000 km em operação, conforme solicitados pela equipe da Tomasetto Achille, realizou-se uma parada programada do GASBUS para a revisão dos componentes do kit de conversão;

- Em agosto de 2005, com 32.000 km em operação, realizou-se novamente a troca de cabos de vela e velas de ignição, conforme solicitado pela equipe da Tomasetto Achille.

Durante o tráfego em linhas comerciais não ocorreram “quebras” de nenhum componente do item de conversão, que acarretasse a retirada do GASBUS de operação. As atividades de manutenção realizadas foram a troca programada de itens do sistema de ignição. Conforme Ribeiro, 2001, esse é um dos pontos críticos para motores GNV.

– Desempenho em Operação

Através do sistema de instrumentação embarcado instalado no GASBUS são registrados, na memória de um microcontrolador, dados gerados por um conjunto de sensores, durante a operação em linhas comerciais. Ao final do itinerário, os dados são transferidos para um microcomputador portátil, sendo esses processados e confeccionados os “mapas operacionais”. Através desses torna-se possível a análise do:

Modo de condução do motorista: Caracterizado através da faixa de rotação do motor na qual foram realizadas as trocas de marcha e posição média do acelerador. Quanto à rotação do motor, indica-se qual o valor médio durante a operação e o número de vezes em que foi ultrapassado o limite de 2400 RPM estabelecido pelo fabricante do kit de conversão. Sendo o acelerador a interface entre o motorista e o ônibus, sua posição indica a potência demandada do motor.

Condições de tráfego: são caracterizadas pelo perfil de velocidade do ônibus, através da velocidade média, picos de velocidade e o tempo parado durante o trajeto,.

Operação do motor: As temperaturas do óleo e do líquido de arrefecimento são indicativos do correto funcionamento no motor, devendo estas variar dentro da faixa de trabalho do motor.

Para exemplificar a análise realizada apresentam-se registros gerados na linha Jardim Algarve – Porto Alegre, sentido Porto Alegre – Alvorada, na manhã do dia 3 de novembro de 2004. A figura 5.2 apresenta o mapa operacional do GASBUS registrado no percurso na linha comercial, onde o trajeto de 15,9 km foi percorrido em 56 minutos. Na tabela 5.2 apresentam-se um resumo da operação.

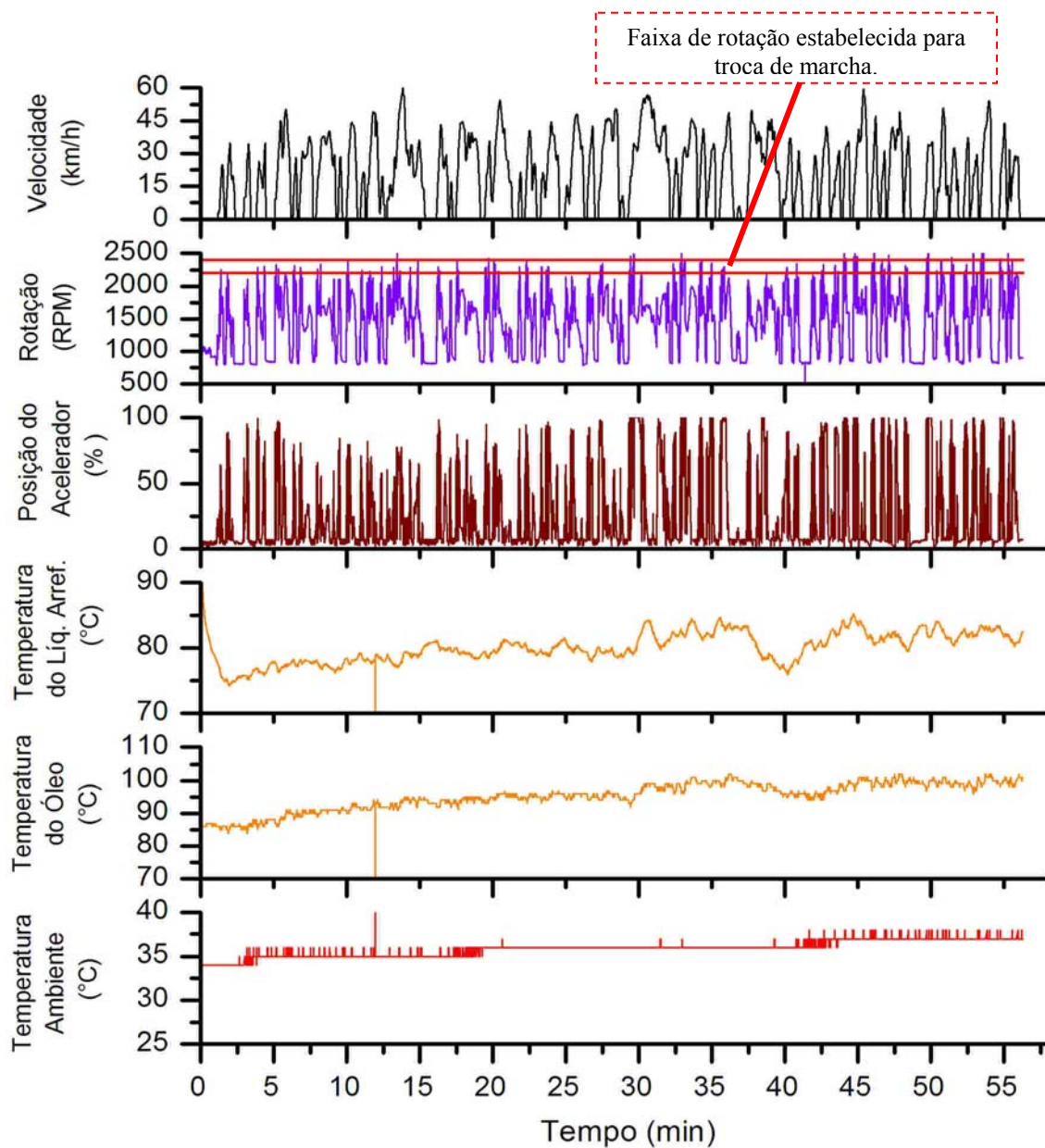


Figura 5.2: Mapa operacional típico da operação do GASBUS, realizado pelo sistema de instrumentação embarcada.

Tabela 5.5: Resumo dos dados operacionais registrados pelo sistema de instrumentação embarcado durante trajeto em linha comercial.

Grandeza	Registro	Grandeza	Registro
Velocidade média	17,2 km/h	Duração do trajeto	56 min
Velocidade máxima	61,25 km/h	Tempo parado	14,5 min
Temperatura média do óleo	95,2 °C	P. acelerador - média	35,38%
Temperatura máxima do óleo	102,4 °C	Rotação motor - média	1436 RPM
Temperatura ambiente	35,4 °C	Rotação motor - máxima	2510 RPM
Temp. média do líq. Arrefef.	80,5 °C	Ultrapassagens do lim. Rotação	19

Outras análises são possíveis através dos mapas operacionais, como exemplificado na figura 5.3, onde selecionou-se o trecho entre duas sinalleiras, partindo o GASBUS na condição parada, acelerando até os 43,5 km/h, em quinta marcha, desacelerando até a parada novamente.

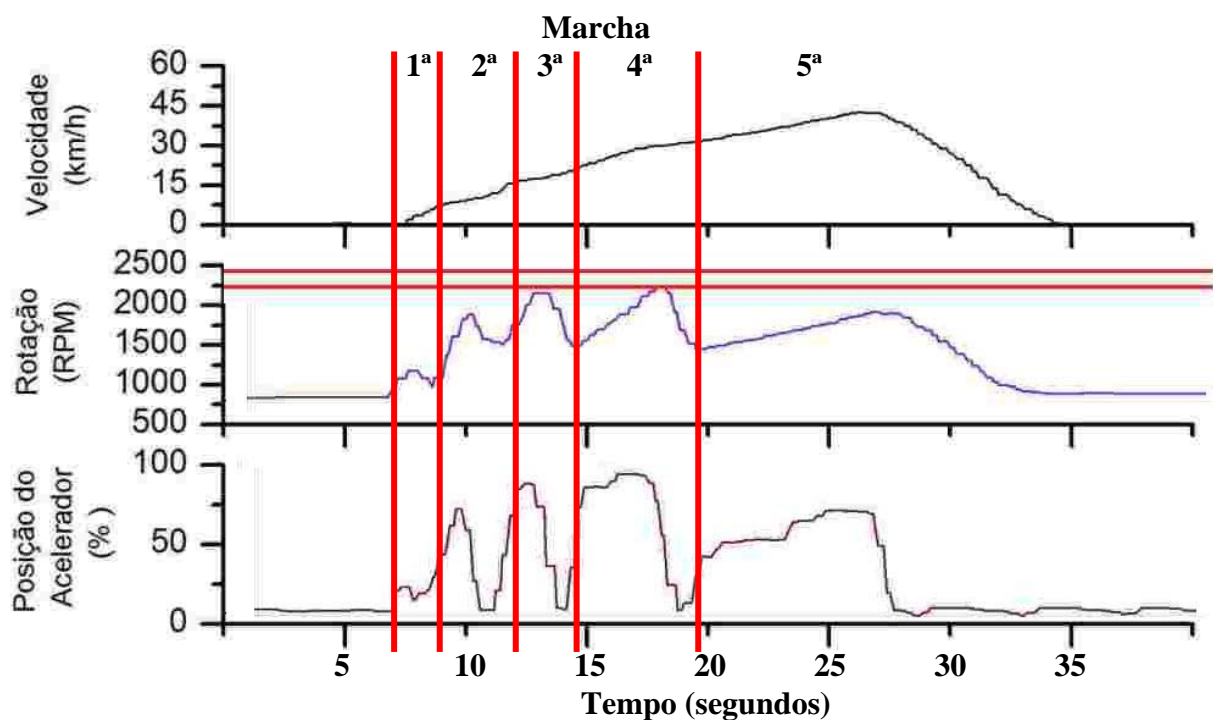


Figura 5.3: Registros da operação do GASBUS entre trafegando em linhas comerciais, entre dois semáforos, exemplificando o potencial de análise da ferramenta proposta.

Durante todos os trajetos foram realizados registros das temperaturas de operação do motor, verificando indícios de falhas no seu funcionamento. Para exemplificar os registros de temperatura realizados, apresentam-se na figura 5.4 registros da temperatura durante a operação em 3 linhas comerciais com graus de dificuldades distintos: fácil, intermediária e difícil, essas

descritas no projeto do experimento. Analisando todo o conjunto de dados registrados observa-se que a variação da temperatura do óleo do motor varia entre 90 °C e 105 °C, dentro da faixa de temperatura de trabalho do motor Diesel original, conforme dados do fabricante. A temperatura do líquido de arrefecimento varia nos três trajetos entre 75 °C e 85 °C. Os valores de temperaturas ambientes superiores a 35 °C deve-se a posição do sensor de temperatura, localizado dentro da URD, na tampa da central elétrica do GASBUS.

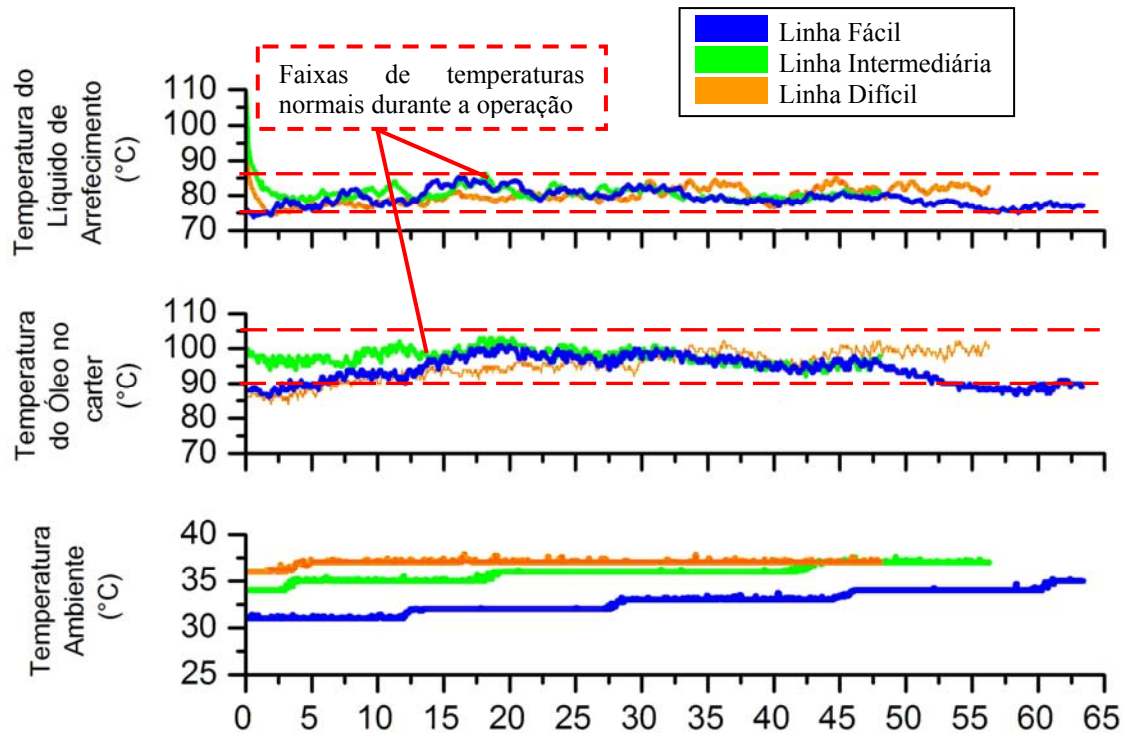


Figura 5.4: Temperaturas registradas durante operação do motor otolizado no trajeto por diferentes linhas comerciais na região metropolitana de Porto Alegre.

5.2 Custos Operacionais

A viabilidade da utilização de GNV depende dos custos operacionais com combustível e aos custos com manutenção. Para aumentar a robustez dos resultados comparou-se os custos operacionais e de manutenção dos três veículos analisados (7071, 7072, 7073) e mais 7 veículos do mesmo modelo e ano de fabricação (7064, 7065, 7066, 7067, 7068, 7069, 7070 e 7074), embora as condições de operação destes veículos não tenham sido acompanhadas ao longo do projeto. Os registros operacionais dos ônibus são apresentados no Apêndice L.

5.2.1 Custo com combustível

O custo com combustível é o item de maior impacto no custo operacional dos veículos de transporte urbano, determinante na análise de viabilidade da conversão dos veículos de diesel para GNV. O decreto assinado no início de 2005 vinculou o preço para as empresas de transporte coletivo urbano do GNV a 55% do preço do diesel. Para o diesel adotou-se o preço de compra da SOUL, em dezembro de 2005, de R\$ 1,7481 por litro. Para o GNV adotou-se a situação mais desfavorável, ou seja, o custo R\$ 0,9795 por metro cúbico, valor máximo estabelecido através de decreto federal. O custo por quilômetro rodado foi de R\$ 0,422 para o GASBUS, R\$ 0,700 a média dos ônibus 7071 e 7073 e R\$ 0,653 a média dos nove ônibus diesel, conforme tabela 5.6. Devido ao consumo de combustível ser fortemente influenciado pelo modo de operação do veículo [Bosch, 2006], foram utilizados para os ônibus diesel a média dos custos com combustível dos carros 7071 e 7073.

Tabela 5.6: Custo com combustível por quilômetro trafegado.

Veículo	Consumo Especifico*	R\$/km
7064	2,61	0,671
7065	2,88	0,606
7066	2,63	0,665
7067	2,85	0,614
7068	2,43	0,718
7069	2,91	0,601
7070	2,76	0,634
7071	2,51	0,696
7072	2,28	0,422
7073	2,49	0,702
7074	2,82	0,620
Média 7071 e 7073	2,50	0,700
Media diesel	2,68	0,653

* Em l/km para diesel e m³/km para o GASBUS

5.2.2 Custos com manutenção

Outra parcela significativa nos custos operacionais do veículo de transporte urbano são os custos de manutenção, sendo importante à análise deste quando proposta uma mudança de tecnologia para a propulsão do veículo. Os custos totais de manutenção para cada veículo são dados pela soma dos custos com peças de reposição, mão de obra e pneus. Os custos com peças de reposição englobam custos com reposição de componentes e materiais para chapeação, vide figura 5.5. Os custos médios mensal com peças de reposição entre os nove ônibus diesel foram de R\$ 1.301,09 contra R\$ 423,97 do GASBUS.

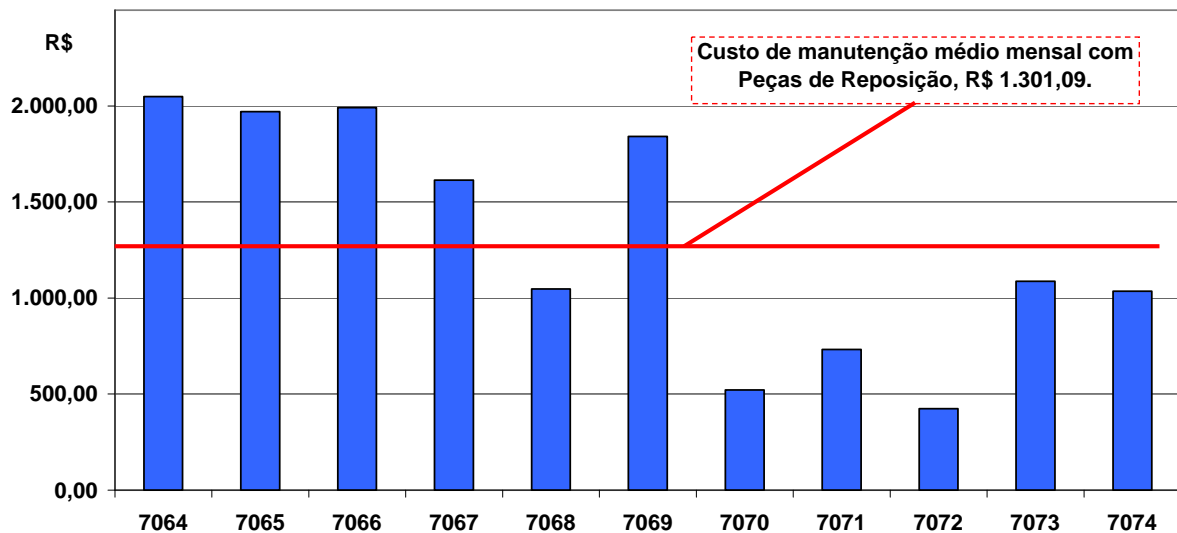


Figura 5.5: Gráfico com custos de manutenção com material e peças de reposição, em R\$.

Para o cálculo do custo com mão-de-obra médio mensal, apresentado na figura 5.6, utilizou-se a metodologia adotada pelo frotista. Para a realização de um reparo, o mecânico recebe uma ordem de serviço. Nessa é registrado o momento do início e término do serviço, sendo posteriormente registrado no sistema. O tempo total gasto em cada veículo pelos mecânicos é multiplicado pelo custo médio da hora-homem, esse estabelecido pela empresa. O custo médio devido a mão-de-obra empregada na manutenção dos veículos analisados foram de R\$ 1.060,66 e para o GASBUS R\$ 962,96.

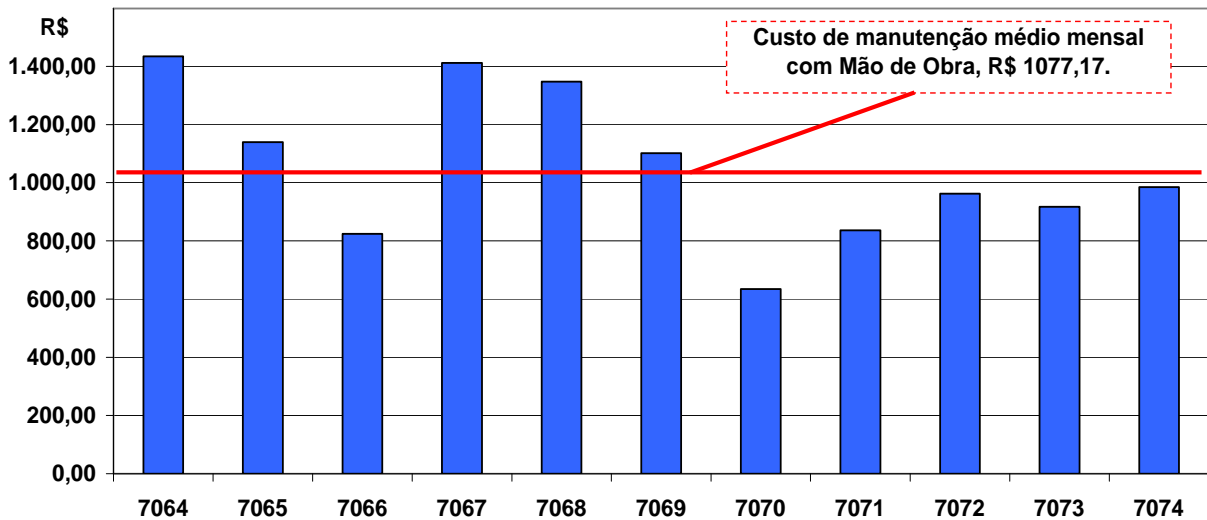


Figura 5.6: Gráfico com os custos de manutenção devido a Mão-de-Obra, em R\$.

O custo de pneus engloba os custos com aquisição/reparo de pneus e rodas dos ônibus. A empresa de viação adota como critério de manutenção uma análise a cada 50.000 km trafegados com o veículo, podendo os mesmos serem substituídos ou ainda reparados, de acordo com o estado dos mesmos. Como apresentam-se na figura 5.7, a média mensal dos custos com troca de pneus dos ônibus diesel foram de R\$ 436,80 contra R\$ 462,98 do ônibus convertido. Os valores com os custos com pneus superiores à média dos ônibus diesel, apresentados pelo GASBUS, devem-se a troca de pneus e aros dianteiros no mês de março de 2005. Estes foram trocados antecipadamente para melhorar a aparência do ônibus “ottolizado” durante participação em feiras e eventos.

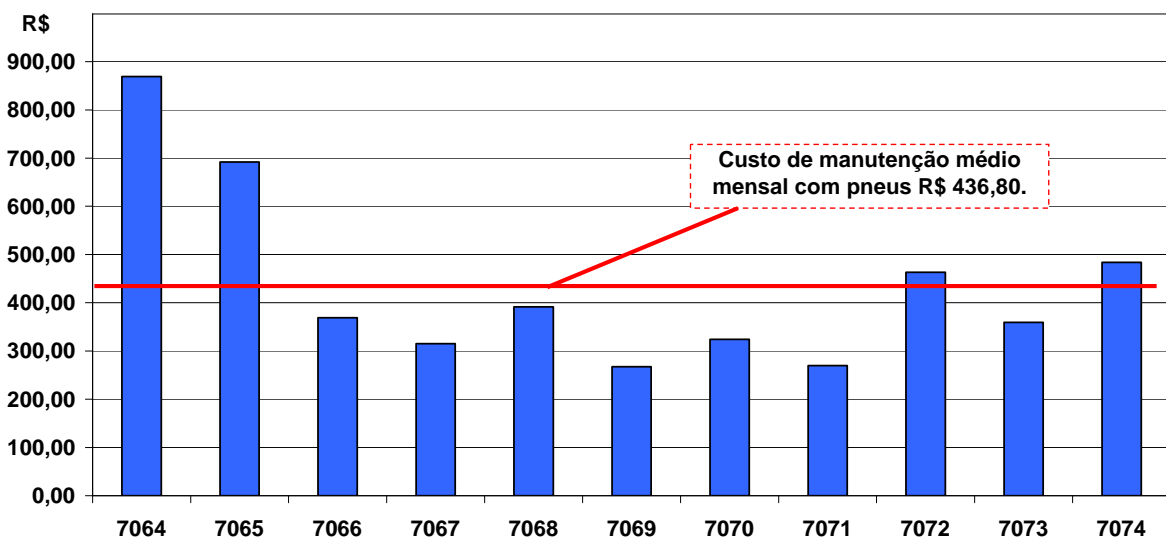


Figura 5.7: Custos de manutenção devido a Pneus, em R\$.

O custo de manutenção médio mensal, conforme a tabela 5.7, é dada pela soma dos custos com mão-de-obra, com peças de reposição e com pneus. Através da análise da variância, com nível de significância de 5%, determinou-se que não há diferença significativa dos custos de manutenção entre os ônibus diesel e o GASBUS. Este resultado ocorre devido à dispersão dos valores registrados durante o período de operação em linhas comerciais. Um indicativo são os custos médios mensais dos nove ônibus diesel de R\$ 2.768,60 contra uma R\$ 1.849,91 do GASBUS, ou seja, uma redução dos custos de manutenção de 33% a favor do ônibus convertido.

Tabela 5.7: Custos totais de Manutenção, em R\$.

Veículo	Mão-de-obra	Peças de Reposição	Pneus	Total
7064	1.433,89	2.048,69	869,40	4.351,98
7065	1.139,61	1.970,73	692,03	3.802,37
7066	824,67	1.991,23	368,99	3.184,89
7067	1.411,60	1.613,47	315,19	3.340,27
7068	1.347,77	1.046,88	391,31	2.785,96
7069	1.101,41	1.840,95	267,63	3.210,00
7070	634,69	521,60	324,10	1.480,39
7071	836,57	731,82	297,33	1.579,71
7072	962,96	423,97	462,98	1.849,91
7073	917,73	1.086,95	359,47	2.364,16
7074	985,49	1.035,69	483,79	2.504,97
Média 7071 e 7073	877,15	909,40	328,41	1971,94
Média	1.054,22	1.301,09	413,29	2.768,60

Para comparar os custos operacionais dos ônibus foram calculados os custos com manutenção em função da distância percorrida, vide tabela 5.8. Embora a média dos custos de manutenção por quilometro rodado do GASBUS seja menor que a dos veículos diesel, através da análise da variância determinou-se que não há diferença significativa entre as médias apresentadas ($\alpha=5\%$).

Tabela 5.8: Custo de Manutenção por Quilometro trafegado, em R\$/km.

Veículo	Mão-de-obra	Peças de Reposição	Pneus	Total
7064	0,24	0,35	0,15	0,74
7065	0,17	0,30	0,10	0,57
7066	0,17	0,41	0,08	0,66
7067	0,30	0,34	0,07	0,71
7068	0,29	0,23	0,08	0,60
7069	0,23	0,38	0,06	0,67
7070	0,14	0,12	0,07	0,34
7071	0,22	0,19	0,07	0,49
7072	0,27	0,12	0,13	0,51
7073	0,24	0,28	0,09	0,61
7074	0,20	0,21	0,10	0,50
Média 7071 e 7073	0,23	0,24	0,09	0,55
Média	0,22	0,27	0,08	0,57

5.2.3 Custo de operação em linha comercial

Os custos operacionais do ônibus compõem-se basicamente por três parcelas: Custos com manutenção, com combustível e com pessoal. Esta última parcela engloba os custos com motoristas e cobradores além da equipe de apoio da companhia, sendo independente do tipo de veículo utilizado. Através da soma das outras parcelas dos custos operacionais (manutenção e combustível), verifica-se o potencial da redução de custos com a utilização de GNV em substituição ao diesel. O GASBUS, conforme a figura 5.8, possui custo operacional menor devido a manutenção e ao combustível de 0,93 Reais/km rodado contra 1,25 Reais/km rodado dos veículos diesel, ou seja, uma redução de custos de R\$ 0,34 por quilometro rodado (27% de redução dos custos).

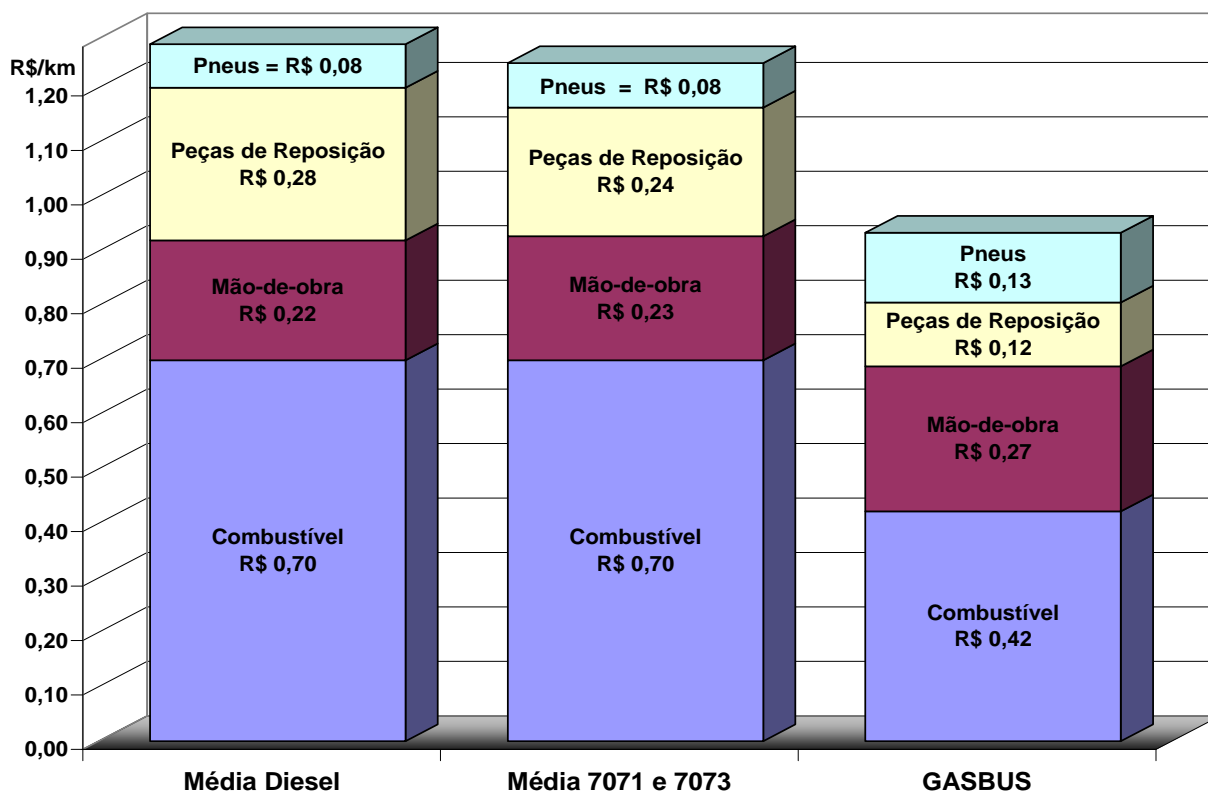


Figura 5.8: Comparação dos custos operacionais dos veículos durante operação em linhas comerciais na região metropolitana de Porto Alegre, em R\$/km.

5.2.4 Análise do Retorno do Investimento

Um dos pontos importantes para implantação da “Rota da Ottolização” para a utilização de GNV em substituição ao diesel é o tempo para retorno do investimento. De acordo com a Petrobras, 2004, os custos de conversão do motor de diesel para GNV, com a aquisição do “kit de conversão”, dos cilindros e ainda a instalação no veículo dos componentes é de R\$ 53.000,00, vide tabela 5.9. Esse custo considera a necessidade de importação dos cilindros de material leve e do kit de conversão. Com a adoção dessa rota tecnológica, os custos com aquisição dos componentes devem ser reduzidos com a fabricação dos mesmos no território nacional.

Tabela 5.9: Custo da conversão do veículo, em R\$.

Componente	Custo (R\$)
Kit de Conversão	27.000,00
Cilindros de Material Leve	26.000,00
Total	53.000,00

Para a análise do tempo de investimento considerou-se a diferença entre os custos de operação somente atribuída à redução do custo com combustível, ou seja, de R\$ 0,28 / km. Considerando a distância média de 70,290 km trafegada anualmente pelos ônibus na região metropolitana de Porto Alegre [PMPA, 2006], o tempo de retorno do investimento é de 32 meses, vide figura 5.9.

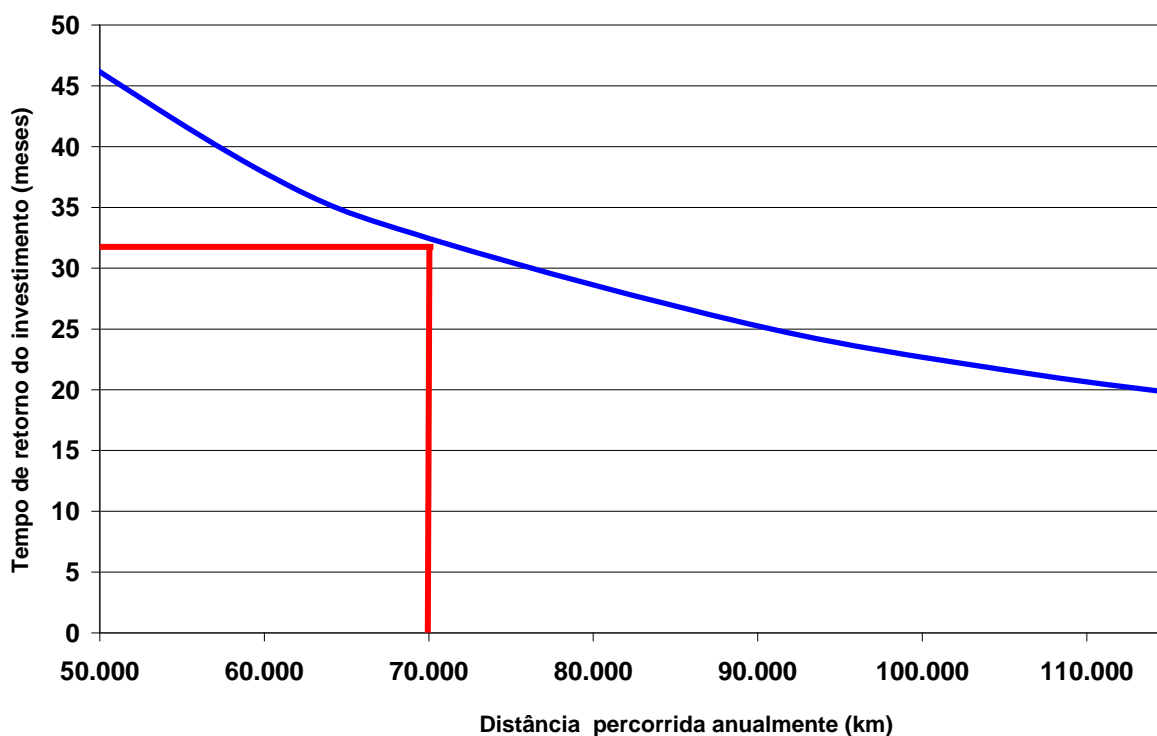


Figura 5.9: Gráfico com o tempo de retorno de investimento da conversão do ônibus diesel para GNV, utilizando a rota tecnológica da Ottolização.

5.3 Testes de Emissão de Poluentes

Conforme definido no escopo do projeto piloto GASBUS, fez-se necessário determinar o índice de emissões dos gases de escape do ônibus Ottolizado, comparando com as emissões geradas pelos veículos diesel original, disponível na bibliografia. A metodologia utilizada, desenvolvida pelos pesquisadores da UFRGS, consiste na utilização de um sistema de instrumentação embarcada e um analisador de gases portátil para registro contínuo das emissões durante trajetos em linhas comerciais. Os registros geram um “mapa operacional” do trajeto, possibilitando a análise do nível de emissões gerados nos diferentes trechos do trajeto. Ainda realizou-se testes em regime constante e na condição parado. Foram executadas três medidas de emissão de poluentes nos meses de março, maio e agosto de 2005.

- Teste Março/Abril

No mês de março executaram-se as primeiras medidas de emissões em campo, como GASBUS trafegando na auto-estrada Porto Alegre – Osório. Realizaram-se medidas em regime constante e na condição parado. As condições climáticas durante o teste eram de tempo nublado, com temperatura de 23° C. O motorista utilizado foi um dos instrutores responsável pelo treinamento dos motoristas da empresa de viação Soul. Além do motorista, estavam presentes mais três membros da equipe da UFRGS.

- Teste Maio/Junho

No teste de maio/junho operou-se ao longo de uma linha comercial da empresa de viação Soul, entre os municípios de Porto Alegre e Alvorada. Visando simular o perfil de velocidades empregado durante operação com passageiros, acompanhou-se no trajeto outro ônibus transportando passageiros, empregando as mesmas acelerações, paradas e frenagens. Realizaram-se ainda medidas de emissões na condição parado.

As condições climáticas nos testes eram de tempo aberto, com temperatura de 25° C. O condutor do GASBUS durante o teste foi um dos instrutores responsável pelo treinamento dos motoristas da empresa de viação Soul. Além do motorista, estavam presentes mais quatro membros da equipe da UFRGS embarcados no GASBUS acompanhando os testes.

O trajeto percorrido iniciou na UFRGS, em frente ao prédio da Engenharia Mecânica (Rua Sarmento Leite, 425), trafegando posteriormente pelo corredor de ônibus da Av. Osvaldo Aranha, percorrendo a Av. Protásio Alves até o terminal de ônibus Parque Dornelles, já no município de Alvorada. O percurso pela Avenida Protásio Alves compõem o itinerário de mais difícil operação da Soul, devido ao número de aclives e declives acentuados ao longo de todo o trajeto. Foram realizadas 4 repetições do trajeto (duas sentido Porto Alegre – Alvorada e duas no sentido oposto).

- Teste Maio/Junho

Para verificar a repetibilidade da metodologia proposta, executou-se mais uma medida de emissões operando em dois trajetos de curta duração, repetindo três vezes cada percurso. Durante a realização dos testes, a condição do tempo alternou entre nublado e pancadas de chuvas, com temperaturas próximas a 18° C. A tripulação do GASBUS durante o ensaio era composta por três pessoas da equipe da UFRGS e um técnico da PETROBRAS que acompanhou o experimento. Um dos motoristas que operam diariamente o GASBUS foi selecionado para conduzir o ônibus durante o teste. Realizaram-se ainda medidas de emissões na condição parado.

O trajeto 1 tem uma extensão de 7,33 quilômetros e caracteriza-se pelo trânsito intenso, com sinaleiras nas Av. João Correa e Av. Mauá, aclives e declives acentuados na Av. Unisinos e ainda trajeto de estrada através da BR116. Este inicia no cruzamento da BR116 com a Av. João Correa, percorrendo pela Av. João Correa, Av. Mauá, Av. Unisinos e pela Br 116, retornando ao ponto de partida, vide figura 5.10.

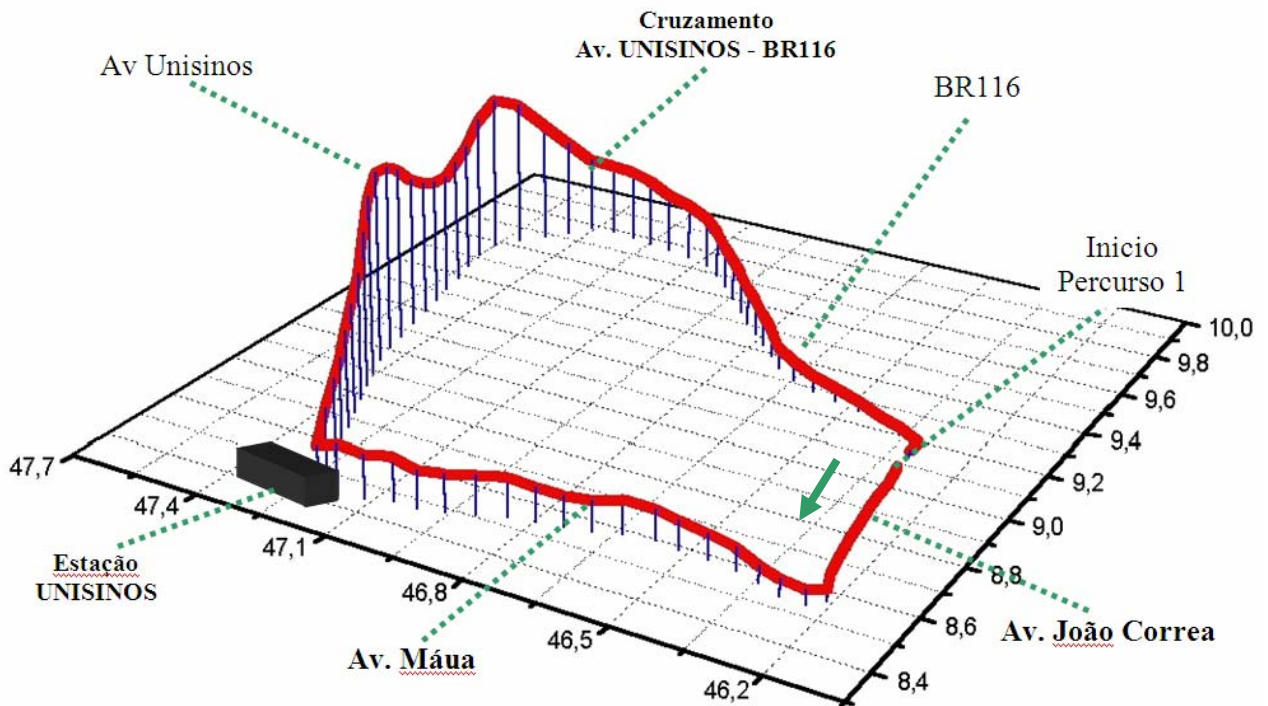


Figura 5.10: Trajeto 1 percorrido pelo GASBUS durante os testes de campo de agosto/setembro, registrado pelo GPS.

O trajeto 2 inicia no cruzamento das Av. Unisinos e Theodomiro Porto da Fonseca, trafegando até o cruzamento com a BR 116, onde realizou-se o retorno, trafegando pela Av. Unisinos até a estação de trem Unisinos, onde realiza-se o retorno até o ponto de partida, vide figura 5.11. O trajeto 2 caracteriza-se por aclives e declives acentuados.

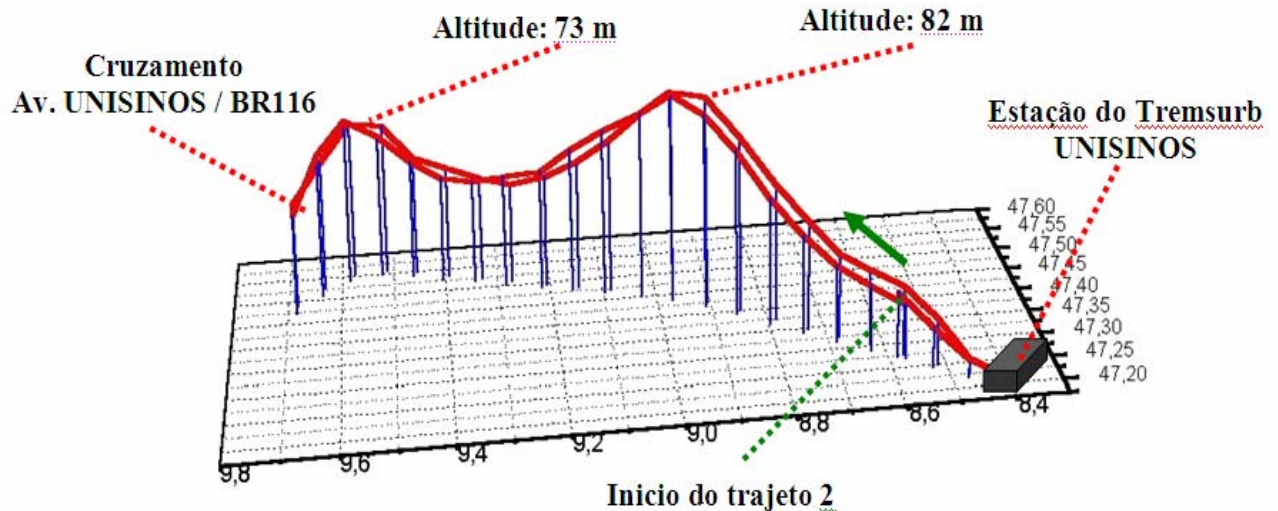


Figura 5.11: Trajeto 2 percorrido pelo GASBUS durante os testes de campo de agosto/setembro, registrado pelo GPS.

A seguir, apresentam-se os resultados registrados de emissão nos três modos de testes propostos.

- Teste de emissões: Condição Parado

Executou-se teste na condição parado nas três medições em campo realizadas. Na tabela 5.10, 5.11 e 5.12 apresentam-se os resultados registrados.

Tabela 5.10: Resultado do teste de campo março/abril, condição parado.

Rotação do motor (RPM)		(Lambda)	CO	CO ₂	HC
Nominal	Registrado		(% Vol)	(% Vol)	(ppm*)
1000	902	1,01	0,14	8,37	34,40
1500	1300	1,02	0,29	8,33	25,70
2000	1830	1,00	0,28	8,21	14,20
2500	2217	0,99	0,30	8,19	12,10
3000	2538	1,02	0,22	8,42	9,70

Tabela 5.11: Resultado do teste de campo maio/junho, condição parado.

Rotação do motor (RPM)		(Lambda)	CO	CO2	HC
Nominal	Registrado		(% Vol)	(% Vol)	(ppm*)
1000	951	1,00	0,16	8,25	42,30
1500	1315	1,01	0,32	8,19	36,70
2000	1728	1,04	0,30	8,15	18,20
2500	2372	1,02	0,34	8,12	23,90
3000	2520	0,99	0,29	8,28	16,40

Tabela 5.12: Resultado do teste de campo agosto/setembro, condição parado.

Rotação do motor (RPM)		(Lambda)	CO	CO2	HC
Nominal	Registrado		(% Vol)	(% Vol)	(ppm*)
1000	972	1,01	0,16	8,29	35,90
1500	1295	1,02	0,30	8,35	25,00
2000	1855	1,02	0,27	8,19	19,00
2500	2241	1,01	0,38	8,08	23,00
3000	2497	1,00	0,25	8,36	8,00

Comparando os resultados obtidos na medição do monóxido de carbono emitido nos três testes realizados com o veículo na condição parado, foi verificada a repetibilidade dos resultados, sendo atribuída a variação da medição em alta rotação (2500 e 3000 RPM) a diferença entre a rotação do motor que foi efetuado os testes. Conforme a resolução nº 315 do CONAMA, o limite de emissão de monóxido de carbono com o veículo em marcha lenta é de 0,50%, como apresentado na figura 5.13. O limite de concentração de CO não foi atingido em nenhuma das rotações utilizadas durante o teste com o GASBUS.

Destaca-se ainda da medição a relação ar/combustível próxima à estequiométrica durante as medições, seguindo a estratégia de gerenciamento de combustível adotada pelo fabricante do kit de conversão. Os outros gases não são analisados nessa condição.

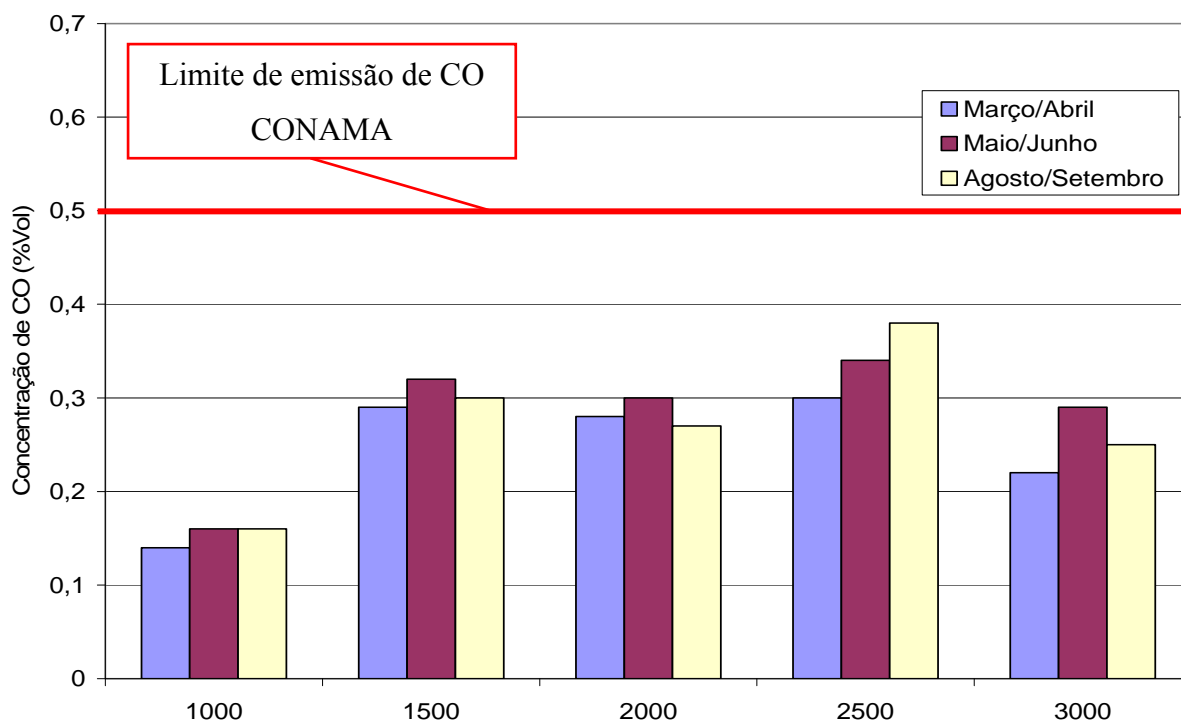


Figura 5.12: Concentração de CO medida no cano de escape – Condição Parada.

- Teste de emissões: Regime Constante

Objetiva-se com este modo de teste determinar o nível de emissões em regime constante, assim como realizado durante o teste para a homologação dos motores. Apresentam-se os resultados obtidos nos testes de campo de março/abril e agosto/setembro respectivamente nas tabelas 5.13 e 5.14. O teste de campo maio/junho realizou-se dentro do perímetro urbano, com o veículo operando em linhas comerciais, não viabilizando a realização do mesmo.

Tabela 5.13: Teste de emissões março/abril - regime constante.

Velocidade média (km/h)	Rotação (RPM)	Lambda	Potência média (cv)	CO (%vol)	CO (g/km)	CO ₂ (%Vol)	HC (ppm)
52,1	1460	1,00	28	0,27	9,8	8,68	17
63,9	1695	1,01	32	0,3	12,5	8,83	13
69,4	1995	1,00	31	0,25	11,3	8,95	11
82,7	2235	1,02	38	0,35	14,3	8,72	61

Tabela 5.14: Teste de emissões agosto/setembro - regime constante.

Velocidade média (km/h)	Rotação (RPM)	Lambda	Potência média (cv)	CO (%vol)	CO (g/km)	CO ₂ (%Vol)	HC (ppm)
55,3	1536	1,01	24	0,23	8,3	8,71	21
66,2	1723	1,01	30	0,27	11,4	8,63	15
73,4	2065	1,03	35	0,29	9,1	8,69	23
81,9	2290	1,04	34	0,33	12,9	8,76	56

Durante a realização dos testes, o valor médio da relação ar/combustível (Lambda) registrado foi 1,00, ou seja, a relação ar/combustível nos cilindros no momento da combustão é estequiométrica. Como destacado em no capítulo 2.5, a combustão do GNV apresenta maior potência com a relação ar/combustível estequiométrica. A relação de combustão durante os diversos modos de operação do motor do GASBUS é definida pela estratégia de gerenciamento de combustível adotada pelo fabricante do kit de conversão.

- Teste de emissões: Condições reais de operação

No teste de maio/junho e agosto/setembro foram registrados, com a utilização do sistema de instrumentação embarcada para medição de emissões, os mapas típicos operacional do GASBUS durante o trajeto, caracterizando o desempenho e as emissões, vide figura 5.13.

Para exemplificar o potencial de análise dessa ferramenta selecionou-se um intervalo de 40 segundos, apresentado na figura 5.14, representando um deslocamento de 275 metros do GASBUS entre duas sinaleiras. Nesse intervalo o veículo operou no corredor de ônibus da Avenida Protásio Alves, onde partiu da condição parada e acelerou até 43 km/h, na seqüência reduziu a velocidade novamente até a condição parada. No gráfico da variação da rotação do motor observa-se que os valores de pico indicam o momento da mudança de marcha. Também é possível fazer a leitura da variação no fator Lambda entre as mudanças de marcha, indicando regimes transientes com estabilização posterior.

Com os registros simultâneos de desempenho, emissões e a posição geográfica tornam-se possível o cálculo do índice de emissões em diferentes trechos do trajeto, caracterizando a influência das acelerações, paradas e condições de tráfegos no total de gases emitidos pelo GASBUS emissões, conforme apresenta-se na figura 5.15.

Pode-se ressaltar que outras análises são possíveis, portanto validando a robustez da metodologia de emissão de poluentes proposta bem como do instrumental implementado. Os mapas operacionais registrados durante todos os trajetos são apresentados no Apêndice M.

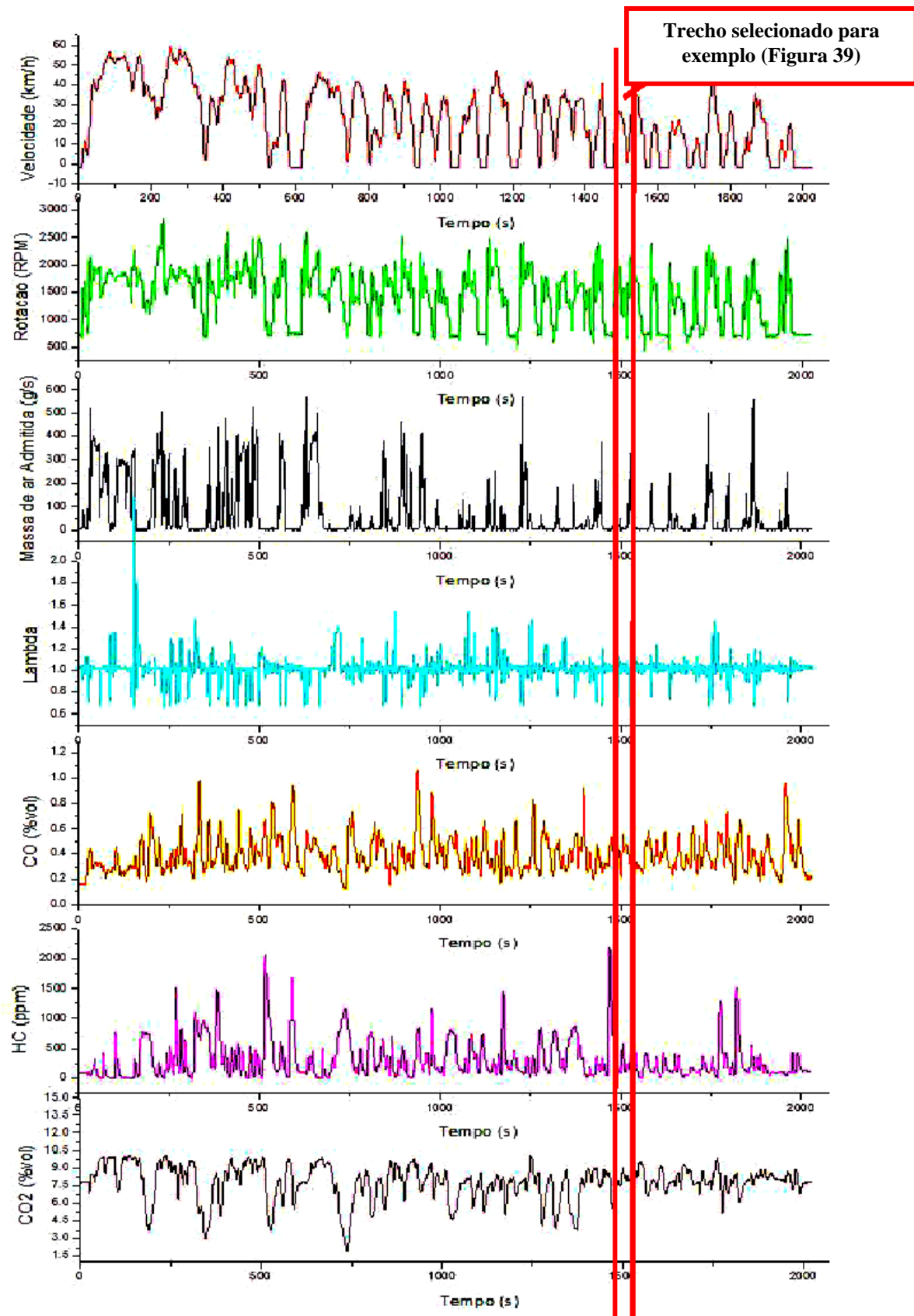


Figura 5.13: Mapa operacional registrado durante o trajeto Porto Alegre - Alvorada, em linha comercial, para registro das emissões geradas no motor otolizado em condições reais de operação.

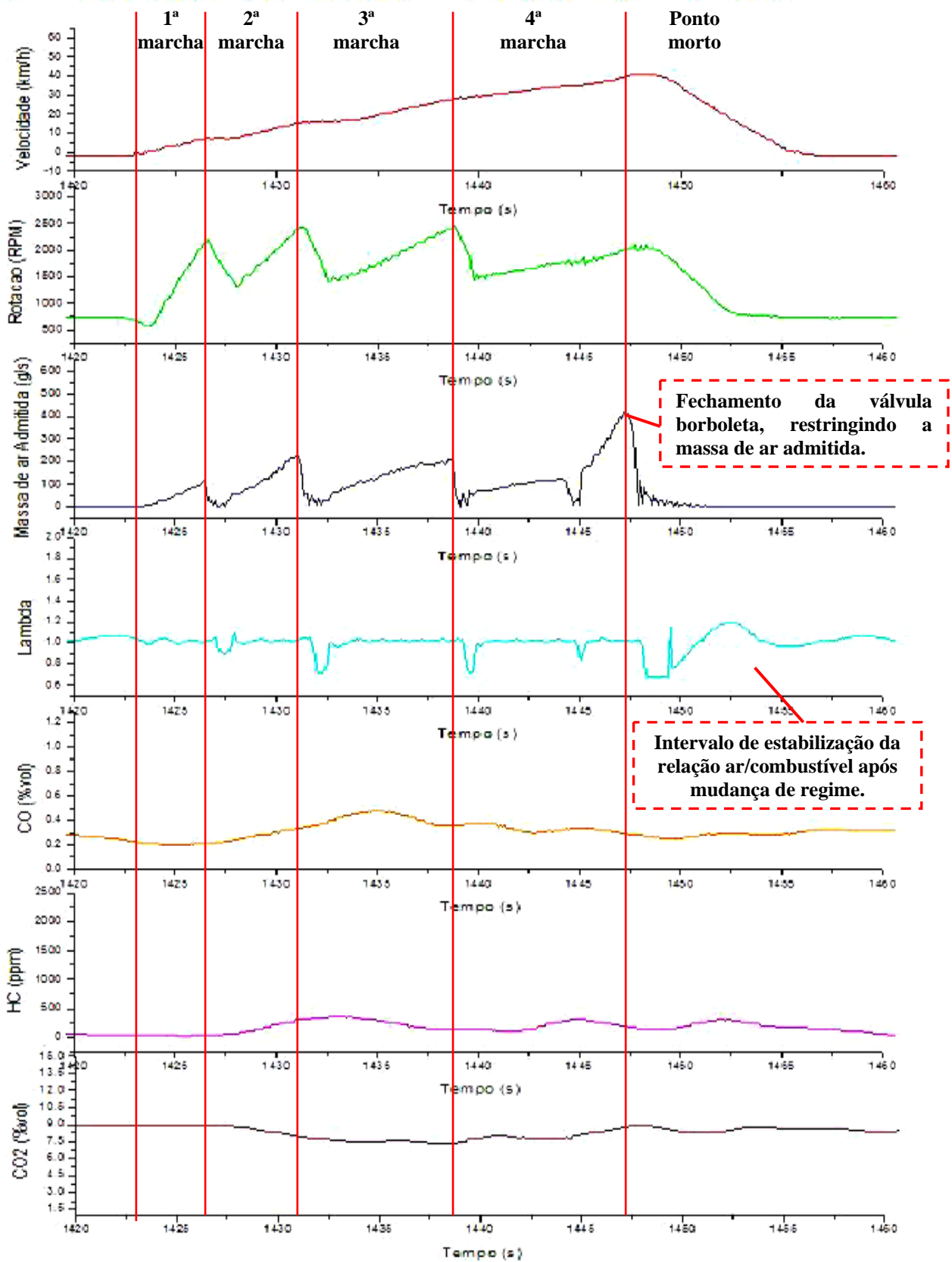


Figura 5.14: Análise do movimento entre duas sinaleiras, no trajeto em linha comercial, apresentando através do mapa operacional a variação dos registros de emissões e desempenho do GASBUS.

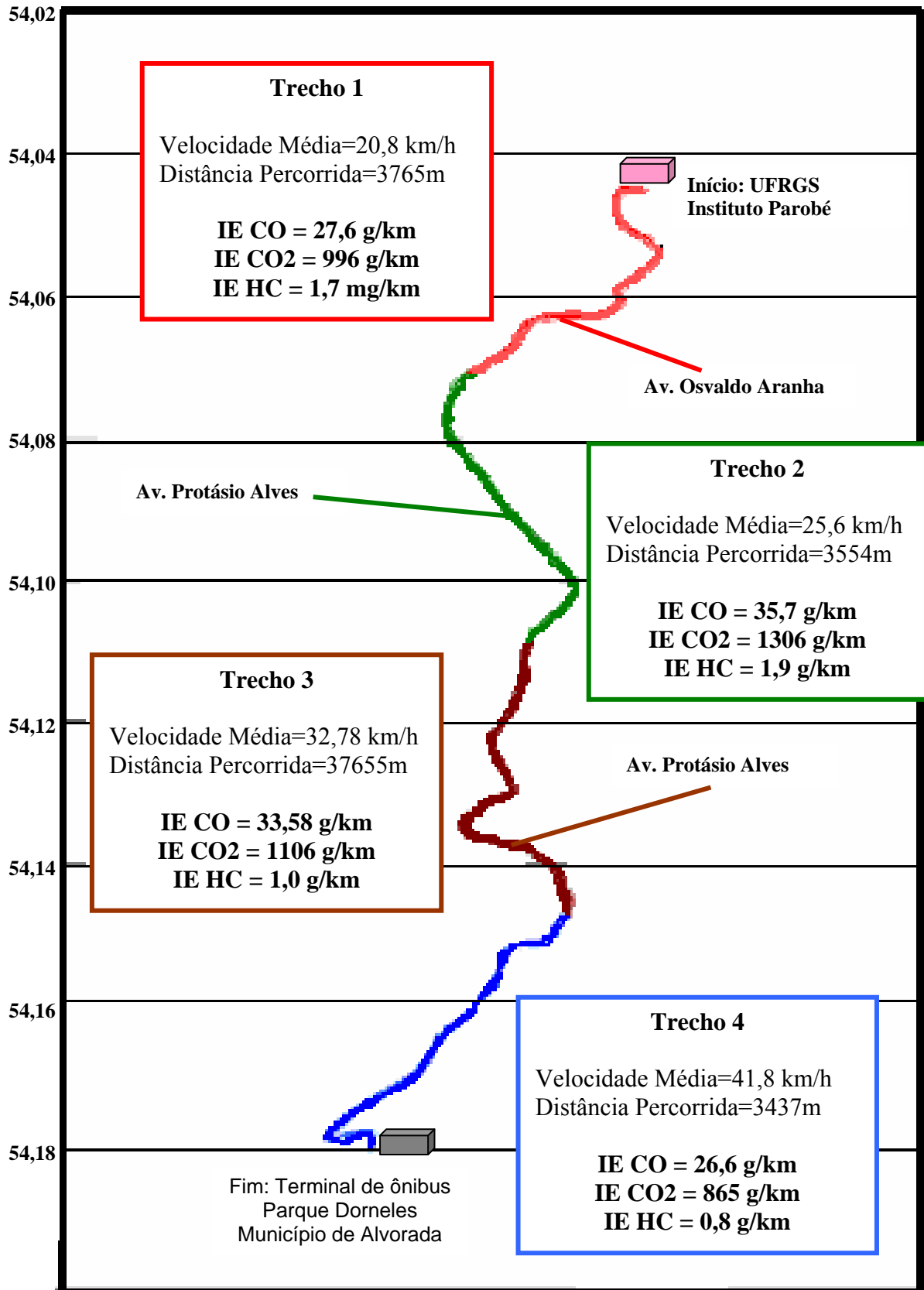


Figura 5.15 - Índice de emissões médio de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) e hidrocarbonetos (HC) registrado nos diferentes trechos durante teste de campo com o GASBUS operando em condições reais de tráfego, seguindo itinerários comerciais.

Nas tabelas 5.15 e 5.16 apresenta-se os índices de emissões calculados nos testes de março/abril e agosto/setembro respectivamente, durante a operação em condições reais de tráfego.

Tabela 5.15: Resultado do testes de emissões maio/junho.

Trajeto	Velocidade (km/h)	Distância (km)	Lambda	Consumo Específico (km/m ³)	CO (g/km)	CO ₂ (g/km)	HC (mg/km)
POA – Alv. 1	27,1	13,93	1,04	2,57	28,9	810,9	1,2
Alv. – POA 1	26,8	14,05	1,03	2,62	25,2	695,83	5,1
POA – Alv. 2	25,9	14,5	1,03	2,52	31,3	1064,46	1,4
Alv. – POA 2	24,8	13,98	1,02	2,65	26,3	964,25	1,2

Tabela 5.16: Resultado do testes de emissões agosto/setembro.

Trajeto	Velocidade (km/h)	Distância (km)	Lambda	Consumo Específico (km/m ³)	CO (g/km)	CO ₂ (g/km)	HC (mg/km)
Trajeto 1 - A	32,6	7,31	1,02	3,15	18,02	600,7	0,76
Trajeto 1 – B	28,0	7,33	1,04	2,96	16,00	645,9	0,58
Trajeto 1 – C	29,1	7,34	1,01	2,94	17,60	646,4	0,58
Média trajeto1	29,9	7,32	1,02	3,01	17,20	631	0,64
Trajeto 2 - A	28,7	4,29	1,01	2,39	21,43	796,9	0,61
Trajeto 2 – B	23,7	4,40	1,03	2,01	25,73	957,8	0,79
Trajeto 2 – C	23,9	4,41	1,02	2,06	25,31	920,8	0,65
Média trajeto 2	25,4	4,36	1,02	2,15	24,15	891,8	0,68

Analisando os resultados obtidos com os testes propostos para a medição de emissões constata-se a influência do modo de condução do ônibus, condições de tráfego e o trajeto realizado nos resultados obtidos de consumo específico e, conseqüentemente, nos índices de emissão de cada poluente. As repetições realizadas apresentam resultados semelhantes nos diferentes modos de testes propostos, verificando a repetibilidade das medições realizadas.

5.3.1 Análise do potencial redutor de emissões.

Os gases de escape gerados a partir da combustão em motores endotérmicos são compostos basicamente por monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrocarbonetos (HC), compostos de enxofre (SO_x), compostos de nitrogênio (NO_x) e material particulado (MP). Os índices de emissão dos ônibus variam de acordo com o tipo de combustível, tecnologia do motor e utilização de sistemas de pós-tratamento de gases. Para a

análise comparativa dos resultados de emissões do GASBUS utilizou-se como referência os registrados por Vitto, 2004, utilizando diferentes ônibus diesel com certificação EURO 0, EURO 1 e EURO2 e dois ônibus GNV, com e sem tratamento dos gases de escape; Vilanova, 1998, utilizando ônibus com motor OM366 diesel e o índice de emissão dos veículos diesel divulgado pela CETESB, 2005, caracterizando a frota diesel em operação no Brasil. No apêndice N apresentam-se as características dos veículos utilizados para comparação, os métodos e resultados das medições de emissões. Nas figuras 5.16, 5.17 e 5.18 apresentam-se respectivamente a comparação dos índices de emissão de CO₂, CO e HC do GASBUS com os ônibus de referência.

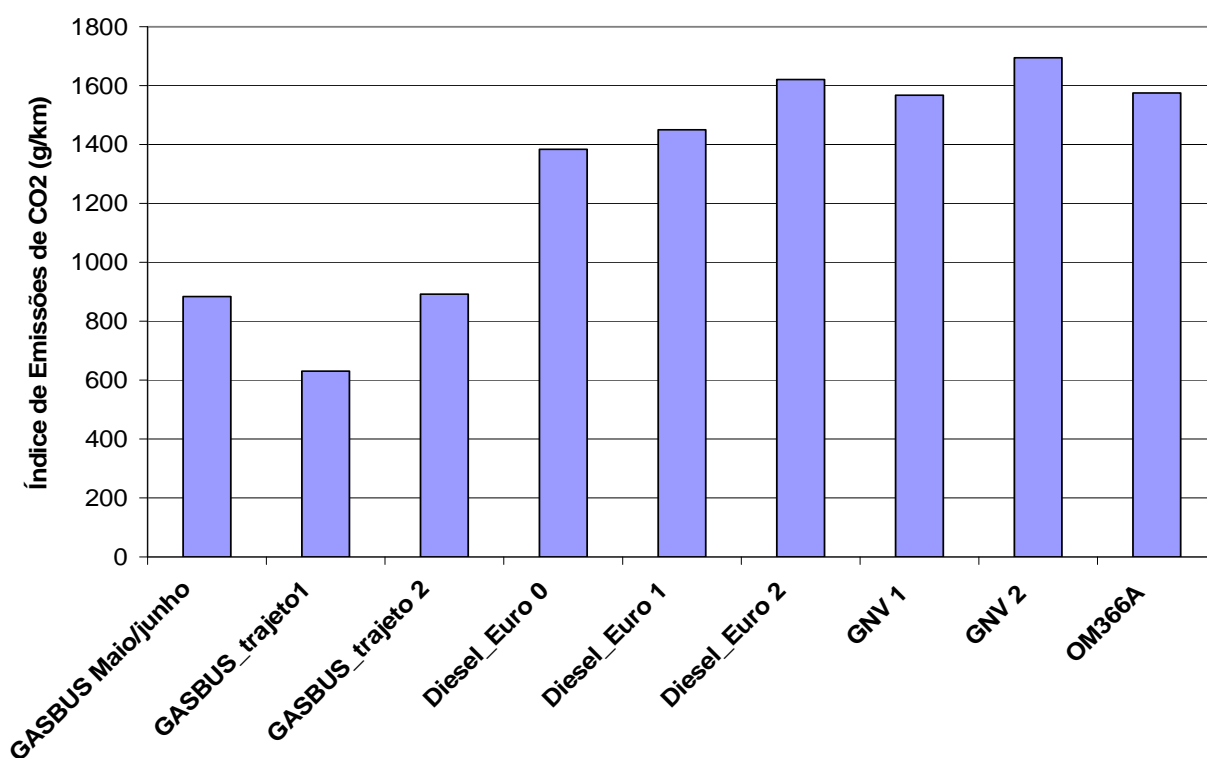


Figura 5.16: Comparação do índice de emissão de CO₂ para diferentes tipos de ônibus utilizando GNV ou diesel como combustível, em g/km.

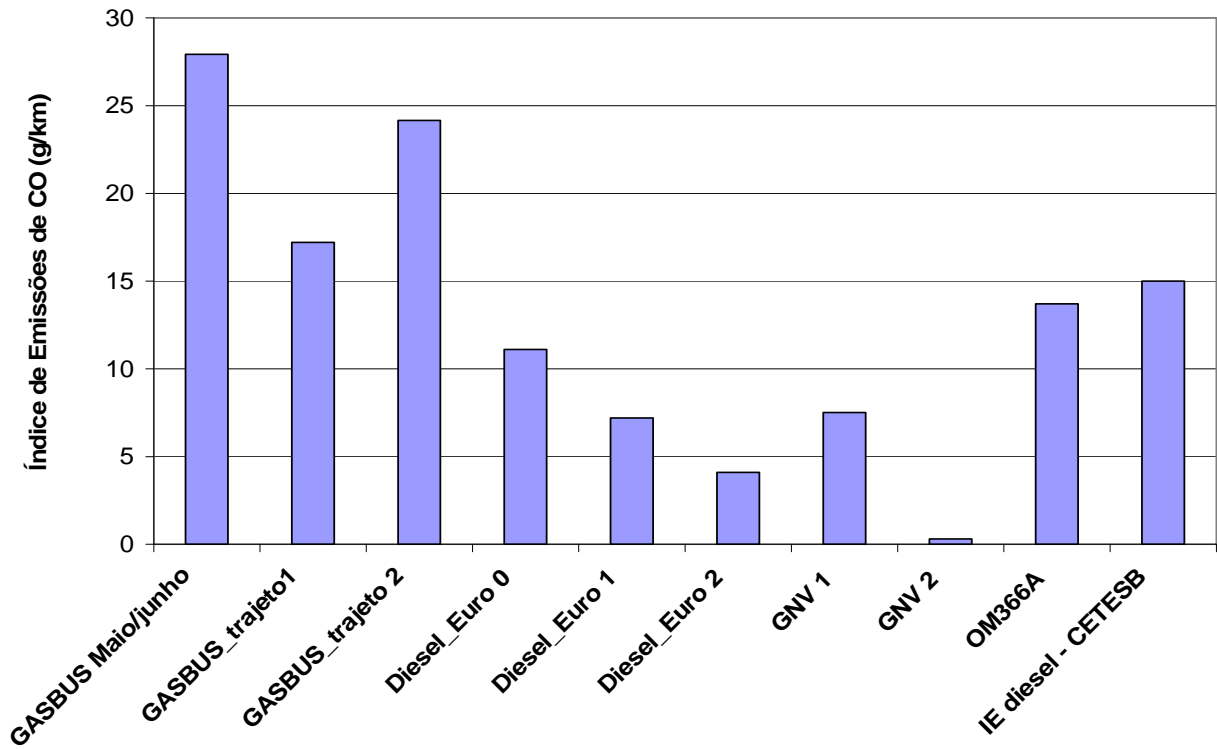


Figura 5.17: Comparação do índice de emissão de CO para diferentes tipos de ônibus utilizando GNV ou diesel como combustível, em g/km.

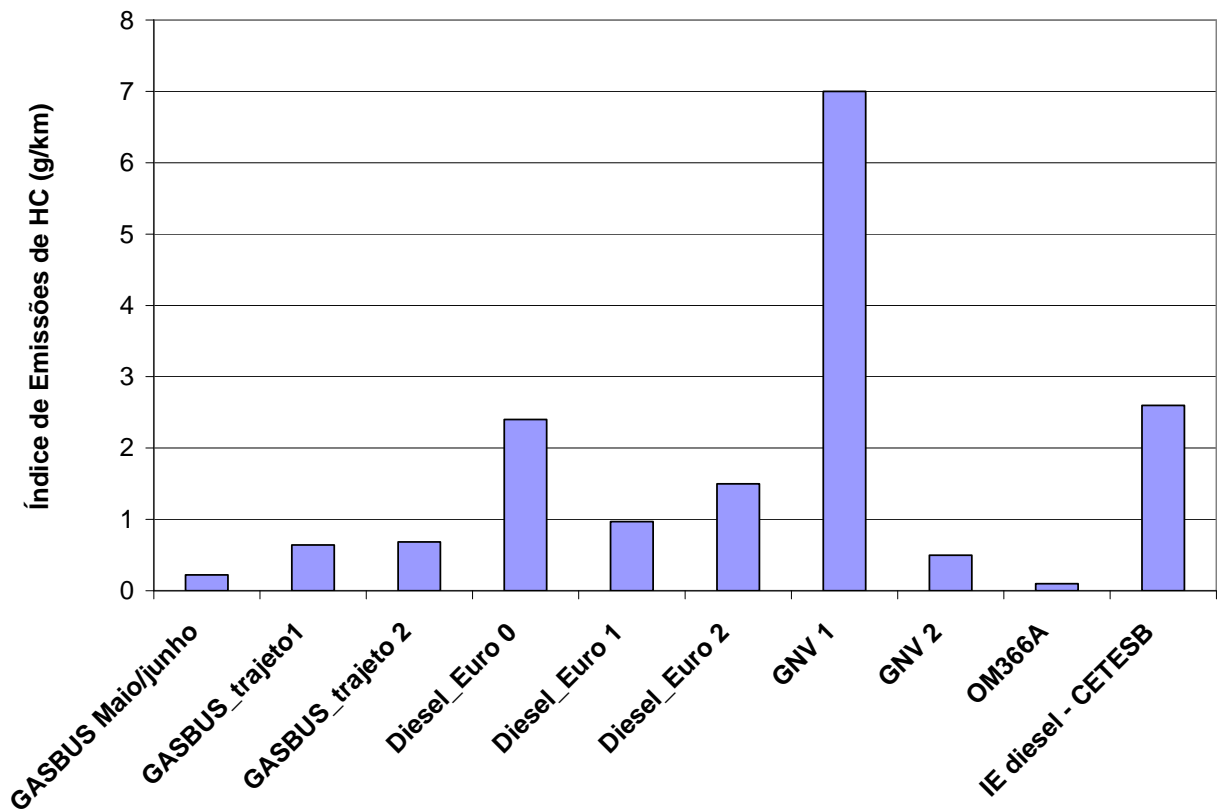


Figura 5.18: Comparação do índice de emissão de hidrocarbonetos para diferentes tipos de ônibus utilizando GNV ou diesel como combustível, em g/km.

Quanto a emissão de dióxido de carbono – CO₂ – o GASBUS apresenta uma redução de mais de 40% em relação aos ônibus diesel original (OH366A). Os veículos GNV apresentam uma redução da emissão de emissão de CO₂ em relação aos diesel devido a maior relação hidrogênio/carbono na molécula do GNV em relação ao diesel [Heywood, 1989]. O menor IE em relação aos outros ônibus GNV decorre da emissão de CO₂ ser proporcional ao consumo de combustível, tendo o GASBUS um consumo específico de combustível superior aos outros ônibus GNV.

Os índices de emissão de monóxido de carbono superiores evidenciam a estratégia de controle adotada pelo fabricante do kit de conversão, operando com relação ar/combustível levemente rica. Conforme a figura 3.1, misturas ricas apresentam valores de emissão de CO mais elevados.

Quanto aos hidrocarbonetos, os valores registrados foram abaixo do esperado pela estratégia de controle adotada. Atribui-se este a condensação de parte dos hidrocarbonetos junto com a água retirada antes do analisador de gases.

Por características da utilização do GNV ocorre a cessação da emissão de material particulado (MP) e de compostos de enxofre (SO_x), principais causadores de chuva ácida. De acordo com CETESB, 2005, os Índices de Emissão de MP médio de um veículo diesel operando em São Paulo é de 0,57 g/km e para os SO_x de 0,21 g/km.

A quantidade emitida de um componente dos gases de escape no ambiente anualmente é denominada Potencial de Emissão do Veículo Anual (PEVA), calculada através da equação 5.1

$$PEVA = IE_{Comp} * Dist * 1.000.000 \quad [ton / ano] \quad (5.1)$$

onde IE_{comp} é o Índice de Emissão do componente [g/km] e $Dist$ a distância trafegada anualmente [km].

Considerando uma distância média de operação de 70.290 km, com a conversão de diesel para GNV, através da rota tecnológica da Ottolização, cada ônibus deixaria de emitir anualmente na atmosfera 48,5 toneladas de Dióxido de Carbono, 0,0401 ton de Material Particulado e 0,0148 ton de compostos de Enxofre, vide tabela 5.17. Através da conversão dos 1.593 ônibus em operação dentro da cidade de Porto Alegre para GNV, deixariam de ser emitidas anualmente 77.261,24 ton de Dióxido de Enxofre, 63,82 ton de Material Particulado e 23,51 ton de compostos de Enxofre.

Tabela 5.17: Ganhos ambientais com a substituição do diesel por GNV, através da Rota Tecnológica de Ottolização.

Componente do gás de escape	Índice de Emissão (g/km)		PEVA (ton/ano) ⁴		Redução de emissões (ton/ano) ⁵	
	Diesel ¹	GNV	Diesel	GNV	Ônibus	Frota
CO ₂	1550	860 ²	108,94	60,44	48,5	77.261,24
MP	0,57	0 ³	0,0401	0	0,0401	63,82
SO _x	0,21	0 ³	0,0148	0	0,0148	23,51

¹ Índice de Emissão médio da frota de veículos diesel operando em São Paulo, com adoção do diesel de baixo teor de enxofre (350ppm);

² Índices de Emissão medidos em condições reais de operação;

³ Característicos da utilização de GNV.

⁴ Distância média de operação da frota de 70.290 km por ano [PMPA, 2006]

⁵ Considerada a frota operando dentro da cidade de Porto Alegre de 1.593 ônibus [PMPA, 2006], não levando em consideração a frota operando dentro da região metropolitana que chegam ao centro de Porto Alegre.

Essa medida poderia melhorar significativamente a qualidade do ar na região central da capital gaúcha, visto que tornam-se cada vez mais frequentes eventos de ultrapassagem do limite máximo permitido de concentração de gases tóxicos no ar, o que causa problemas de saúde imperceptíveis a curto prazo na população, mas através do acúmulo de substâncias tóxicas nos pulmões dos habitantes podem causar graves doenças a médio e longo prazo.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE CONTINUIDADE

6.1 Conclusões

Neste Projeto Piloto GASBUS, implementou-se um conjunto de tecnologias e equipamentos sobre os quais desenvolveu-se e executou-se uma metodologia baseada na realização de testes de campo visando comparar três veículos: dois diesel e outro, convertido para GNV através da “Rota Tecnológica de Ottolização”. Foram trafegados em 12 meses um total que ultrapassou os 50.000 km, entre testes de campo e os itinerários em linhas comerciais. Nestas linhas comerciais, classificadas como de fácil, média e difícil circulação, foram transportados 80.000 passageiros entre o município de Alvorada e a capital Porto Alegre, na região metropolitana.

Neste período, o ônibus convertido – GASBUS – apresentou elevada performance de dirigibilidade, devido ao ganho em mais de 5%, respectivamente, das curvas de torque e potência, se comparadas as do motor Diesel original. Também, não houve registros de falha ou quebra durante a operação devido à motorização utilizada, garantindo a plena disponibilidade do veículo “Ottolizado” para o frotista operar.

Com a instalação dos cilindros de material compósito para reservatório do GNV, foram adicionados 328 kg ao veículo, contra os 980 kg se fossem utilizados os tradicionais cilindros de aço. Obteve-se assim, uma redução de 652 kg na massa transportada, e que corresponderia a aproximadamente 10 passageiros. Assim, durante os testes de campo, sempre com verificação periódica, não foram registrados afrouxamentos ou trincas no chassi e estruturas de fixação dos respectivos cilindros, problemas estes muito comuns enfrentados em experiências anteriores e recentes realizadas no Brasil, que usaram cilindros de aço.

Os custos envolvidos para operação com combustível GNV apresentaram uma redução de 40%, ou seja, R\$ 0,28 reais por quilometro trafegado. Quanto aos custos de manutenção, o GASBUS apresentou custos equivalentes aos veículos Diesel. Considerando a média de operação de 70.000 km/ano, típica das frotas dos ônibus em Porto Alegre, estima-se que o tempo de retorno de investimento com a conversão do veículo seja de 32 meses. Com as possibilidades da nacionalização das tecnologias e dos componentes utilizados na conversão do ônibus, estima-se uma redução significativa dos custos envolvidos, reduzindo esse tempo de retorno de investimento.

Comparando-se a utilização de GNV, através de motores dedicados ou com as possibilidades da conversão de ônibus de meia idade com a “Rota Tecnológica de Ottolização”,

o Projeto Piloto GASBUS apresenta-se como uma opção técnica exequível. Ainda dentro desta modalidade “Rota Tecnológica de Ottolização”, também pode-se destacar como vantagens a possibilidade de reconversão dos ônibus para utilização novamente de diesel, viabilizando a comercialização dos veículos usados para cidades que não sejam atendidas por GNV. Outro aspecto estrategicamente importante com o uso da “Rota Tecnológica de Ottolização” é a possibilidade imediata da implantação do GNV na frota usada, não necessitando esperar pela renovação da frota.

No aspecto ambiental, verificou-se a redução superior a 40% da geração de CO₂ e a imediata cessação da emissão de material particulado, bem como dos excessivamente danosos compostos de enxofre, principais responsáveis pela chuva ácida. Pensando localmente, com a conversão da frota em circulação na região metropolitana de Porto Alegre que totaliza 1530 ônibus, estima-se que deixariam de ser emitidas anualmente 63,82 toneladas de material particulado e 21,7 toneladas de compostos de enxofre oriundos da combustão do diesel, o que resultaria diretamente numa significativa melhora da qualidade do ar e, conseqüentemente, em ganho para a saúde da população.

Destaca-se ainda a boa aceitação por parte dos passageiros, motoristas e cobradores devido à redução da vibração mecânica e do ruído interno, característicos dos motores diesel, aumentando o conforto e a qualidade no transporte coletivo. Com os indicativos da redução do custo com combustível, torna-se real e possível uma redução no preço das tarifas, facilitando assim o transporte coletivo para a população.

Finalmente, somando-se os ganhos obtidos por todos os atores envolvidos como, frotistas, operadores, passageiros e habitantes da cidade, e considerando os resultados obtidos pela metodologia desenvolvida pela equipe de pesquisadores da UFRGS, através do Projeto Piloto GASBUS, pode-se concluir que a “Rota Tecnológica de Ottolização” apresentou-se viável e exequível para a utilização de GNV no transporte coletivo urbano.

6.2 Sugestões de Continuidade

- **Melhoria dos níveis de emissão de poluentes:** Considera-se o GNV um combustível limpo, devido à possibilidade de “emissão zero”, ou seja, associando vantagens intrínsecas a utilização deste combustível como cessão da emissão de material particulado e compostos de enxofre e, com ajustes na estratégia de gerenciamento de combustível associada a

sistemas de tratamento dos gases de escape reduz-se a emissão de CO, NO_x, e HC a níveis extremamente reduzidos;

- **Aperfeiçoamento da metodologia de medição de poluentes:** Para contemplar a medição de outros gases de escape como HC, NO_x, O₂ e material particulado em condições reais de operação;

- **Telemetria:** Viabilizar o acompanhamento em tempo real, via internet, das condições de operação durante o trajeto em linhas comerciais;

- **Continuidade da operação do motor:** Uma das vantagens da utilização dos motores diesel é a durabilidade, operando por mais de 500.000 km. Para a comparação, devem ser continuado os testes de campo, determinando a durabilidade do motor Ottolizado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, G. S. **Avaliação experimental da proporção diesel+gás natural e o efeito da variação no ponto de injeção na pressão da camara de combustão utilizando um motor padrão ASTM-CFR.** Porto Alegre, 2003. 106 f. Monografia (Graduação Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

ANTP. **Desenvolvimento urbano transporte e trânsito no Brasil:** proposta para debate. São Paulo, 2002.

ANTP. **Regulamento técnico ANTP n° X / 2003.** [s.l.]: Associação Nacional do Petróleo, 2003.

ANTP. **Semana ANTP N° 07, março de 2005.** Disponível em: <http://www.antp.org.br/semana_antp/noticia35.htm>. Acesso em: 25 maio 2005.

AURÉLIO, B.H.F. **Novo dicionário Aurélio.** [s.l.]: Positivo, 2004.

BALASSIANO, R., White, P. Experience of compressed natural gas bus operations in Rio de Janeiro, Brasil. **Transportation Research**, Londres, v. 2, n. 2, p. 147-55, 1997.

BARBETTA, P. A. **Projeto e análise de experimentos:** notas de aula. [s.l.]: INE; UFSC, 2005.

BEN. **Balanco energético nacional 2002.** Brasília, DF: Ministério das Minas e Energia, 2003.

BIODIESELBR. **O que é biodiesel?.** Disponível em: <<http://www.biodieselbr.com/biodiesel/definicao/o-que-e-biodiesel.htm>>. Acesso em: 12 out. 2006.

BOSCH, R. **Diesel-engine management.** 3. ed. [s.l.]: SAE, 2004.

BOSCH, R. **Manual de tecnologia automotiva.** Tradução da 25. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2005.

BRASIL E ENERGIA Governo federal prioriza planos de expansão para o gás natural. **Brasil e energia**, Rio de Janeiro, jun. 2003.

CANNON, J. S. Bus futures: new technologies for cleaner cities. In: ANNUAL EUROPEAN NATURAL GAS VEHICLE ASSOCIATION CONFERENCE, 7., 2001, Malmö, Sweden. **Anais...** Malmö, 2001.

CANNON, J. S., SUN, C. **Bus futures:** new technologies for cleaner cities. Disponível em: <<http://www.informinc.org/busfutr.pdf>>. Acesso em: 25 maio 2003.

CARLSON, I. **Extraído de uma apresentação do Dr. Ingman Carlson.** Disponível em: <<http://www.gnv.cl/>>. Acesso em: 18 fev. 2003.

CE. **Directiva 1996/96/CE.** [s.l.]: Parlamento Europeu; Conselho da União Européia: 1999.

CEG. **CEG lança seu primeiro ônibus movido a gás natural.** Disponível em: <<http://www.gasenergia.com.br/portal/port/noticias/entrevista/onibus.jsp>>. Acesso em: 14 jun. 2003.

CETESB. **Emissão veicular.** Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/Ar/emissoes/introducao.asp>>. Acesso em: 02 maio 2006.

CETESB. **Relatório de qualidade do ar no estado de São Paulo 2005.** São Paulo, SP, 2006.

CHANDLER, B. K. et al. **Ralphs grocery company EC-dieseltm truck fleet: final results.** [s.l.]: United Stated Department of Energy, 2003.

CHANDLER, B. K., WALKOWICZ, K. **United parcel service (UPS) CNG truck fleet: final results.** [s.l.]: United Stated Department of Energy, 2002.

CLARK, N. N. et al. **Diesel and CNG transit bus emission characterization by two dynamometer laboratories: results and issues.** [s.l.]: [s.n.], 1999. (SAE Technical papers series).

CTGAS. **Propriedades físico-químicas do gás natural.** Disponível em: <<http://www.ctgas.com.br/template04.asp?parametro=5068>>. Acesso em: 07 nov. 2006.

DUDENHOEFFER, F. **Scenarios for future motorization: powertrains, fuels, emissions.** Key Note Speakers. In: XIV SIMEA, dezembro de 2006. Disponível em <http://www.simea.org.br/downloads/area_downloads.htm>. Acessado em: 02 novembro de 2006.

FARAH, E.L. A experiência da cidade de São Paulo na utilização do gás metano veicular. In: SEMINÁRIO DE GÁS NATURAL AUTOMOTIVO, 2001, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 2001.

FILHO, J. E. B. **Previsão de demanda por gás natural veicular: uma modelagem baseada em dados de preferência declarada e relevada.** Fortaleza, 2005. n° de folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará.

FREY, H. C. **Measurement of on-road tailpipe CO, NO, and hydrocarbon emissions using a portable instrument.** In: ANNUAL MEETING OF THE AIR & WASTE MANAGEMENT ASSOCIATION, 2001, Orlando. **Anais...** Orlando: A&WMA, 2001. p. 9-12.

- GUANDALINI, G., Silva, C. Enfim livres. **Revista Veja**, local, n. 1941, p. 90-94, nov. 2006.
- HEYWOOD, J. B., **Internal combustion engines fundamentals**. Nova York: Macgraw-Hill, 1988.
- IBAMA. **Programas de controle da poluição do ar por veículos automotores**. Disponível em: <<https://www.ibama.gov.br/proconve/>>. Acesso em: 02 nov. 2006.
- IEA. **Biofuel in transport: international perspectives**. Paris: International Energy Agency, 2002.
- IEA. **Key word energy statistics – 2003**. França: International Energy Agency, 2004.
- LINDAU, L. A. Relato sobre o VII congresso anual europeu e exposição do gás natural veicular transportes. **Revista Transportes**, São Paulo, v. 9, n 1, 2001.
- LINDAU, L.A., TEIXEIRA, F.M.T. An overview of the CNG vehicular market in Brazil. **World NGV**, Wanshington, out. 2002.
- MATTOS, L.B.R. Gás natural veicular. In: RIBEIRO, S. K. et al. **Transporte sustentável: alternativas para ônibus urbanos**. Rio de Janeiro: COPPE / UFRJ, 2001.
- MBB. **Apresentação da Daimler Chrysler: ônibus Mercedes-Benz**. [s.l.]: [s.n.], 2000.
- MME. **Balanco energético nacional – ano base 2004: relatório final**. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética, 2005.
- OESTERGAARD, K. **The Horiba approach to on-board measurement**. Japão: Engine Measurement Division, 2002.
- OLIVEIRA, C.C. **Tecnologia & energia nos transportes urbanos - desenvolvimento urbano transporte e trânsito no Brasil: proposta para debate**. São Paulo: Associação Nacional de Transportes Públicos, 2002.
- PEI, W., SHAO, C., YU, L. **A dynamic model for vehicle emission in Beijing streets, social capacity development for environmental management and international cooperation in D developing countries**. Hiroshima, Japão: [s.n.], 2004.
- PELKMANS, L., LENAERS, G., KEUKELEERE, D. **Evolution of emission and fuel consumption of heavy duty natural gas vehicle in real city traffic**. Bélgica: Flemish Institute for Thecnological Research, 2002.
- PELLIZA, G. **Análise de veículos convertidos para uso do combustível gás natural**. Porto Alegre, 2001. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- PMPA. **Anuário estatístico – 2005**. Porto Alegre: Prefeitura Municipal de Porto Alegre, 2006.
- PETROBRAS. **Tecnologia PETROBRAS para a produção de óleo diesel renovável**. Disponível em: < <http://www2.petrobras.com.br/tecnologia/port/hbio.asp>>. Acesso em: 12 out. 2006.

PROCONVE. **Programa de controle da poluição do ar por veículos automotores.** 2. ed. Brasília, 2004.

RIBEIRO, J.L.D., CATEN, C.T. **Projeto do experimento.** Porto Alegre, RS: UFRGS, 2000. (Série Monografia de Qualidade).

RIBEIRO, S. K. **Barreiras na implantação de alternativas energéticas para o transporte rodoviário no Brasil.** Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2001.

SANTOS, E. M., FAGÁ, M. T., NETO, A. B. **Uso do gás natural como combustível em veículos de transporte coletivo urbano – estágio atual - Perspectivas e dificuldades:** relatório final. [s.l.]: [s.n.], 2003.

SCHETTINO, M.R.A., BRANCO, G.M., BRANCO, F.C. **Estimativa do potencial poluidor para veículos pesados:** proposta de projeto. [s.l.]: CETESB, 2001.

SILVA, S.N., BATISTA, V.J., THOMAS, C.K. Metodologia experimental para medição de emissões em veículos de transporte urbano movido a GNV. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA, 14., 2006, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2006. Disponível em: <http://www.simea.org.br/simea2006/cont_simea2006.html#>. Acesso em: 13 nov. 2006.

TAYLOR, C. F. **Análise dos motores de combustão interna.** São Paulo, SP: Edgard Blucher, 1971-1976.

TEIXEIRA, F.M.T. **O potencial do gás natural veicular no mercado gaúcho.** Porto Alegre, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

UNILIVRE. **Banco de experiências:** uso do gás metano veicular em São Paulo. Disponível em: <<http://www.unilivre.org.br/centro/experiencias/experiencias/157.html>>. Acesso em: 22 jun. 2004.

VILANOVA, L.V. **Contribuição das emissões veiculares na qualidade do ar atmosférico da região metropolitana de Porto Alegre.** Porto Alegre, 1998. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande Do Sul.

WANG, W. G. et al. Emission from nine heavy trucks fueled by diesel and biodiesel blend without engine modification. **ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY**, EUA, v. 34, p. 933-39, 2000.

WATT, G. M. **Natural gás vehicle transit bus fleets:** the current international experience. Okyohama, Japão: International Association for natural gas vehicles, 2000. Disponível em: <http://www.apvgn.pt/documentacao/iangv_bus%20fleets.pdf>. Acesso em: 12 out. 2006.

WEAVER, C. S., Petty, L. E. Reproducibility and accuracy of on-board emission measurements usin REDEM system, SAE Paper n° 2004-01-0965, 2004.

WHITELEGG, J., Haq, G. 2003. The Global Transport Problem: Same Issues but a Different Place. In: Whitelegg J and Haq G eds. *The Earthscan Reader in World Transport Policy and Practice.* Earthscan, London.

ANEXO A

CICLOS DE ENSAIO PARA HOMOLOGAÇÃO DE EQUIPAMENTOS PESADOS.

ECE R49: Ciclo de ensaio utilizado como padrão de testes de motores diesel que atendem os limites estabelecidos pela EURO I e EURO II, sendo posteriormente substituído pelo ciclo de ensaio ESC. Consiste na aplicação de 13 patamares de binários rotação/torque do motor, sendo realizadas para cada modo medidas do nível de emissões. O resultado de cada modo é expresso em gramas do poluente pela potência demandada do motor (g/kwh). O resultado final é uma média de cada modo, atribuindo pesos conforme Figura A1, expresso também em g/kwh.

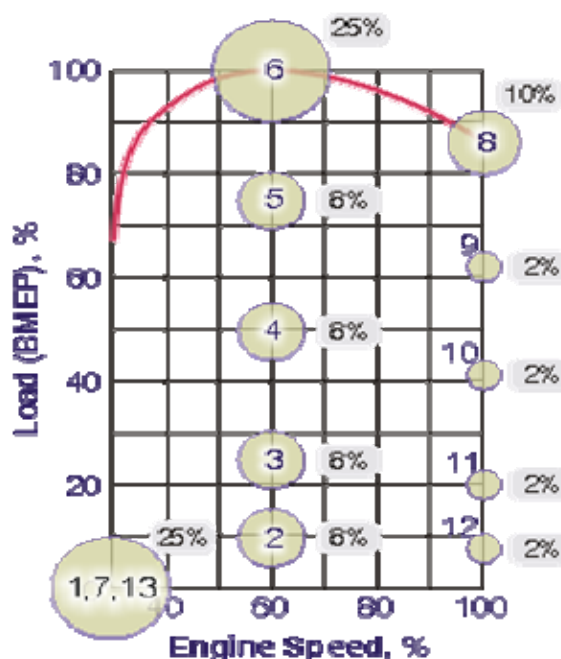


Figura A1: Modos de ensaio do ciclo R-49.

European Stationary Cycle (ESC): Este ciclo de ensaio juntamente com o European transient Cycle (ETC) e European Load Response (ERL) foram adotados para a certificação de motores de pesados a partir do ano 2000 na Europa, quando entraram em vigência a normativa EURO III. O modo de teste é especificado na directiva 1999/96/CE.

O ESC vem em substituição ao ciclo de teste R-49, sendo utilizado para a determinação da emissão gerada de CO, CO₂, NO_x e HC por motores pesados diesel. O ciclo ESC assim como o R-49 é composto por 13 modos de teste, onde o resultado final é uma média ponderada, de acordo com os pesos apresentados no gráfico da Figura A2, sendo o resultado final também expresso em g/kwh.

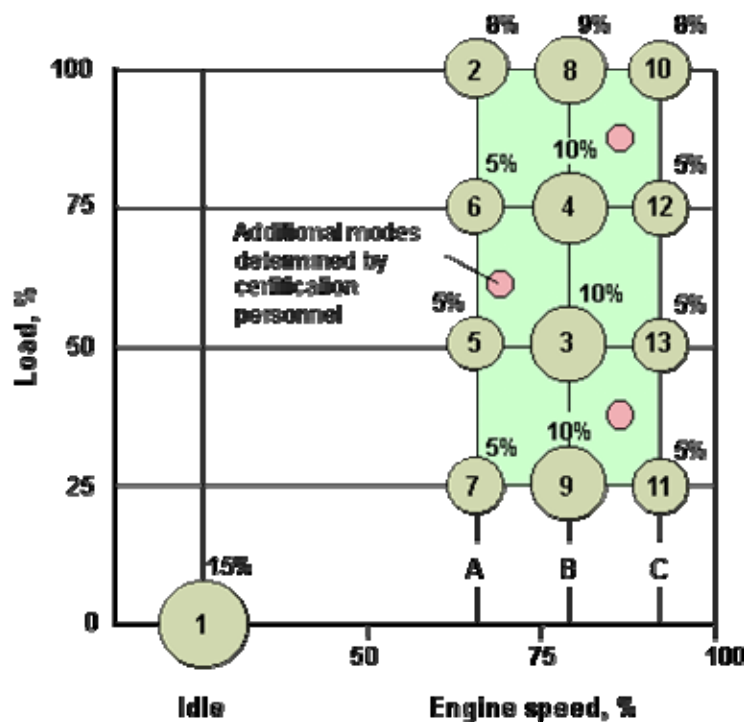


Figura A2: Modos de ensaio do ciclo ESC.

European Load Response (ERL): Esse ciclo de ensaio foi introduzido pela normativa de emissões EURO III, sendo utilizado para a determinação do nível de opacidade em motores pesados. Consiste na aplicação de quatro modos de rotação do motor, como apresenta-se na figura A3. Em cada modo varia-se o torque aplicado, medindo continuamente o nível de fumaça gerada. O resultado final é uma média ponderada de cada modo de rotação, sendo expresso em g/kwh.

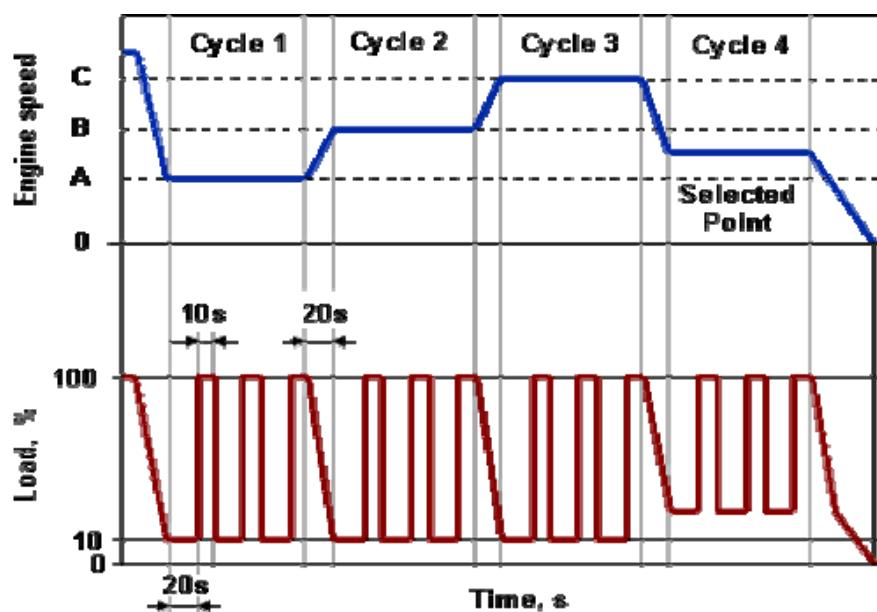


Figura A3: Modos de ensaio do ciclo ERL.

European transient Cycle (ETC): Introduzido também pela normativa EURO III, o ciclo ETC foi desenvolvido com base na observação do perfil de velocidades e carregamentos de veículos pesados operando na Europa.

O ciclo caracteriza três modos de condução distintos, como apresentado na Figura A4. O primeiro modo caracteriza o tráfego urbano, com constantes partidas, desacelerações e tempo parado; O segundo modo representa o modo rural, com segmentos de aceleração elevados; O terceiro modo caracteriza o tráfego em estradas, com velocidade média de 88Km/h. Cada modo tem uma duração de 600 segundos, totalizando 1800 segundos de ensaio.

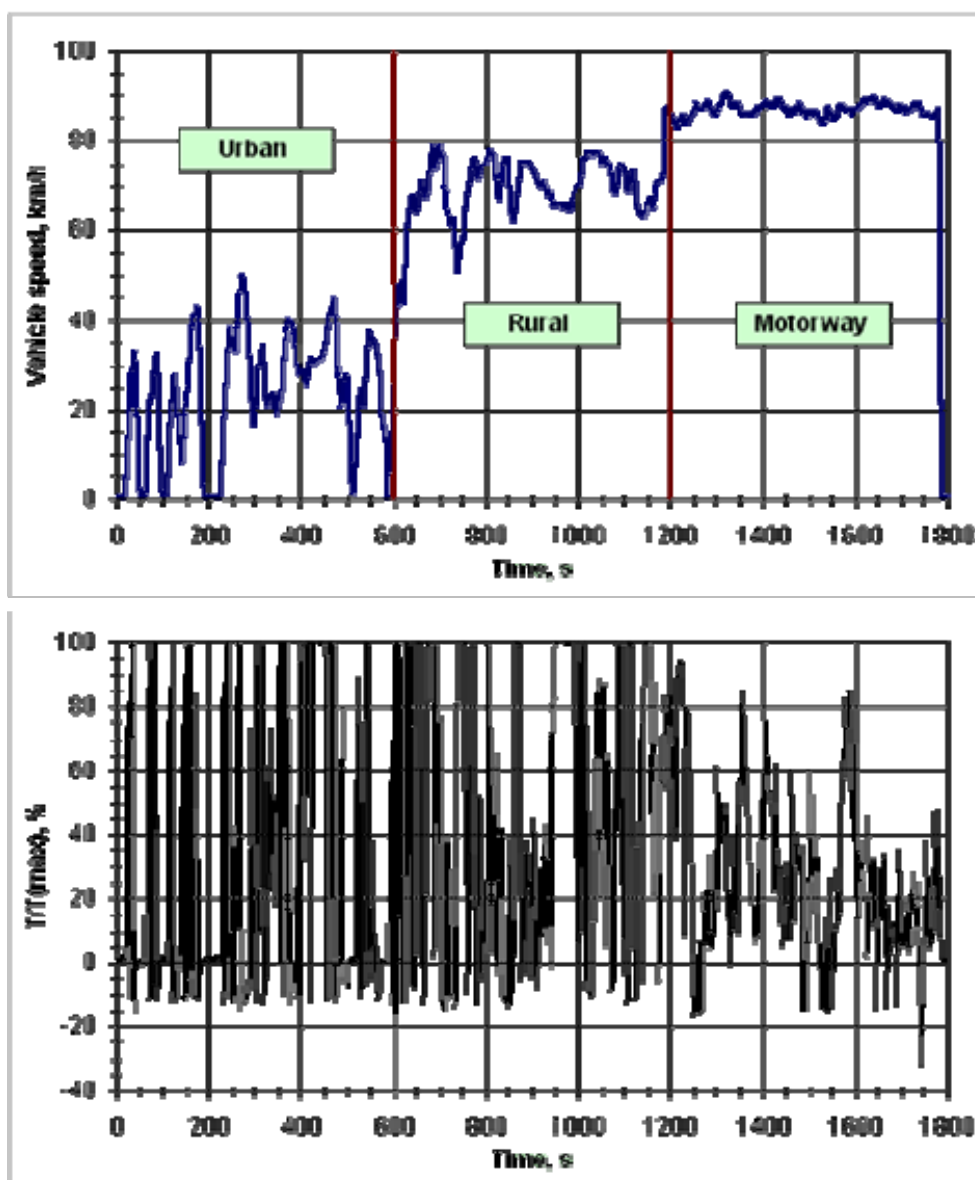


Figura A4: Perfil de velocidades característico de cada modo do teste (superior) e a variação do torque (inferior).

ANEXO B

RELATÓRIO DE ENSAIO DO CILINDRO DE MATERIAL COMPÓSITO SEGUNDO NORMATIVAS VIGENTES NO BRASIL REALIZADO NO CTGÁS.



LABORATÓRIO DO CENTRO DE TECNOLOGIAS DO GÁS - LTG
CENTRO DE TECNOLOGIAS DO GÁS
LABORATÓRIO DE TESTE DE CILINDROS
Av. Capitão Mor Gouveia, 1480 - Lagoa Nova CEP:59063-400 - Natal/RN
Fone: 55(0xx84) 204-8127 Fax: 55(0xx84) 206-2778
www.ctgas.com.br - Correio eletrônico pesquisa@ctgas.com.br

RELATÓRIO DE ENSAIO Nº 00.122/03 - LTC

GPFAI - Grupo de Projeto, Fabricação e Automação Industrial/ UFRGS

Cliente : Cel. Genuino 342 / 410 Centro
Porto Alegre - RS CEP 90010.350

Material: Cilindro Compósito Tipo GNV-3

Número de Controle: 0556/03

1. IDENTIFICAÇÃO

Marca : Dynetek
Número de Série : I 5721
Capacidade Volumétrica : 176 L
Tara : 69 kg
Pressão de Serviço : 24,8 Mpa

2. RESULTADOS

2.1 ENSAIO HIDROSTÁTICO

ENSAIO HIDROSTÁTICO								Incerteza de Expansão (*)	Incerteza de Pressão (MPa)	Motivo da Condenação	Aprovado/ Reprovado
Valor 1 (ml)	Valor 2 (ml)	Valor 3 (ml)	Pressão (Mpa)	ET* (cm³)	EP* (cm³)	EE* (cm³)	EP*/ET* (cm³)				
0,00	2147,78	36,16	37,20	2147,78	36,16	2111,62	1,68	0,004%	+/-0,10		APROVADO
Observações : 1 Mpa = 10,1978 kgf/cm²; 1 Mpa= 10 Bar (Mpa: Mega Pascal - unidade de pressão do S.I)											
Na estimativa de cálculo de incerteza de medição não foi considerada a incerteza tipo B devido a calibração da balança.											

Valor 1 : Valor ajustado na bureta antes da expansão do cilindro;
Valor 2 : Valor indicado na bureta quando o cilindro atinge a pressão de ensaio;
Valor 3 : Valor indicado na bureta após a despressurização do cilindro residual

*ET - Expansão Total
*EP - Expansão Permanente
*EE - Expansão Elástica
EP/ET* - Expansão Volumétrica Permanente. Conforme a norma ISO 11623/2002, seu valor máximo deve ser 5%

Incerteza de Expansão :

A incerteza expandida de medição de expansão é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência "K=2", o qual para uma distribuição com grau de liberdade "Vef" corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
É realizada apenas uma medição e a incerteza do tipo "A" é considerada indeterminada.

Incerteza de Pressão :

A incerteza expandida relatada é baseada em uma incerteza padronizada combinada multiplicada por um fator de abrangência "K = 2" para um nível de confiança de aproximadamente 95%.
É realizada apenas uma medição e a incerteza do tipo "A" é considerada indeterminada.

Os resultados apresentados neste documento têm significação restrita e se aplicam ao espécime ensaiado.
Os resultados deste documento não podem ser usados para fins promocionais.
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.



LABORATÓRIO DO CENTRO DE TECNOLOGIAS DO GÁS - LTG
CENTRO DE TECNOLOGIAS DO GÁS
LABORATÓRIO DE TESTE DE CILINDROS
 Av. Capitão Mor Gouveia, 1480 - Lagoa Nova CEP:59063-400 - Natal/RN
 Fone: 55(0xx84) 204-8127 Fax: 55(0xx84) 206-2778
 www.ctgas.com.br - Correio eletrônico pesquisa@ctgas.com.br

RELATÓRIO DE ENSAIO Nº 00.122/03 - LTC

2.2 INSPEÇÃO VISUAL EXTERNA

Danos ocasionados por fogo	Eletrodo de arco elétrico ou bico de gás	Complementos e/ou modificações não autorizadas e reparos complementares	Etelos de corrosão	Marcações ou vitórias	Tara (kg)	Capacidade (L ou dm ³ de água)	Identificação do gás	Cortes, dobras de laminação, trincas, inchaços e calambos	Corrosão particularmente na base	Outros defeitos, tais como: malhotas não autorizadas	Aprovado / Reprovado
NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	89	176 L	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	APROVADO

Observações:

2.3 AVALIAÇÃO DA MASSA

Tara (kg)	Medição 1 (kg)	Medição 2 (kg)	Medição 3 (kg)	Medição 4 (kg)	Média (kg)	Perda de Massa (%)	Incerteza de Massa (kg)	Aprovado/Reprovado
69,0	69,00	69,00	69,00	69,00	69,00	0,00	0,10	APROVADO

Observações:

Incerteza de Massa:

A incerteza expandida relatada é baseada em uma incerteza padrão combinada multiplicada por um fator de abrangência "K = 2", para um nível de confiança de aproximadamente 95%.

2.4 INSPEÇÃO VISUAL INTERNA

Colúmbio	Massas	Corte	Trinca	Dobras de laminação	Queimaduras por arco elétrico	Qualificação	por chama	Corrosão localizada	Corrosão em linha	Corrosão	Resíduos	Aprovado/Reprovado
NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	APROVADO

Observações:

2.5 MEDIÇÃO DE ESPESSURA DE PAREDE POR ULTRA-SOM

Replê	Medição 1 (mm)	Medição 2 (mm)	Medição 3 (mm)	Medição 4 (mm)	Medição 5 (mm)	Medição 6 (mm)	Medição 7 (mm)	Medição 8 (mm)	Medição 9 (mm)	Medição 10 (mm)	Média	Max. Esp. (mm)	Min. Esp. (mm)	Incerteza de esp. (mm)	Fator de Amplificação "K"	Aprovado/Reprovado	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Os resultados apresentados neste documento têm significação restrita e se aplicam ao espécime ensaiado.

Os resultados deste documento não podem ser usados para fins promocionais.

A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

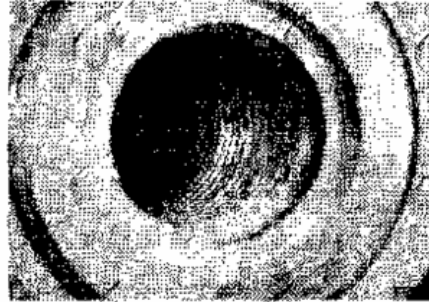
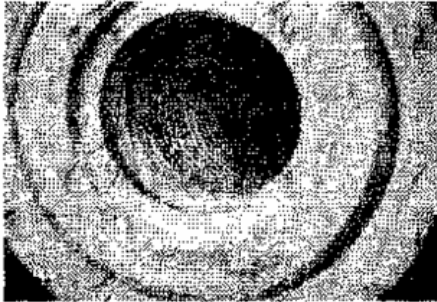
incerteza de espessura:

A incerteza expandida relatada é baseada em uma incerteza padrão combinada multiplicada por um fator de abrangência "K", para um nível de confiança de aproximadamente 85%.



LABORATÓRIO DO CENTRO DE TECNOLOGIAS DO GÁS - LTG
CENTRO DE TECNOLOGIAS DO GÁS
LABORATÓRIO DE TESTE DE CILINDROS
 Av. Capitão Mor Gouveia, 1480 - Lagoa Nova CEP:59063-400 - Natal/RN
 Fone: 55(0xx84) 204-8127 Fax: 55(0xx84) 206-2778
 www.ctgas.com.br - Correio eletrônico pesquisa@ctgas.com.br
RELATÓRIO DE ENSAIO Nº 00.122/03 - LTC

2.6 VERIFICAÇÃO DA ROSCA DO CILINDRO



Na verificação da rosca foi constatado que a mesma possui perfil paralelo, diâmetro externo 28,5 mm e diâmetro interno 26,6 mm o que difere do padrão 3/4 14 BSPT conforme estabelecido pela portaria 170 de 28 de agosto 2002, sendo por este motivo a rosca do cilindro considerada não conforme com os padrões nacionais.

3. PROCEDIMENTO DE ENSAIO

O cilindro foi ensaiado de acordo com o procedimento PO-LTG-030 - Inspeção e ensaios de cilindros reforçados com fibra para alta pressão_rev00

Data do recebimento do material: 19/12/03
 Data da execução do ensaio: 30/12/03

Luiz Ângelo Aniceto
 Responsável Técnico do Laboratório

Kathya Maria Nizza de Carvalho Canele
 Gerente Técnico do LTG

Os resultados apresentados neste documento têm significação restrita e se aplicam ao espécime ensaiado.
 Os resultados deste documento não podem ser usados para fins promocionais.
 A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

Handwritten marks and signatures are present throughout the page, including a large '16' in the top right corner and several smaller '16's and '17's scattered across the document.

APÊNDICE A

CICLOS DE ENSAIO PARA MEDIÇÃO DA EMISSÃO DE POLUENTES EM VEÍCULOS PESADOS UTILIZANDO DINAMOMETRO DE ROLOS

Tabela B1 - Características operacionais dos ciclos de ensaios para a determinação do potencial poluidor de veículos pesados com a utilização de dinamômetros de rolos.

Ciclo de Ensaio	Velocidade Média (km/h)	Distância Total (m)	Duração (s)	Nº de paradas	Características
Manhattan Bus Cycle	11,02	3227	1089	19	Ciclo que caracteriza o tráfego urbano em Manhattan (NY), com freqüentes paradas e baixa velocidade média.
Ney York Bus	5,94	0,99	600	11	Ciclo caracterizado por baixa velocidade média, grande parte do tempo parado e acelerações elevadas. Representa o perfil de velocidades dos ônibus urbanos em NY.
New York Composite	14,25	4,06	1029	9	Representativo para veículos pesados que operam na cidade de NY.
Central Business District (SAE J1376)	20,23	3,22	560	15	Esse ciclo inclui 14 repetições do ciclo básico, composto pelos regimes parado, aceleração, em marcha e desaceleração.
EPA Urban Driving Dynamometer Schedule (UDDS) (CFR40,86)	30,4	8,9	1060	8	Ciclo de ensaio desenvolvido pela EPA para teste de veículos pesados em dinamômetro.
WVU 5-Peak		8,0	900		Ciclo de ensaio desenvolvido pela Universidade de West Virginea para a medição de emissões utilizando o dinamômetro portátil.
Orange County Bus					Desenvolvido pela Universidade de West Virginea para caracterizar o transido de ônibus nas regiões de Los Angeles.

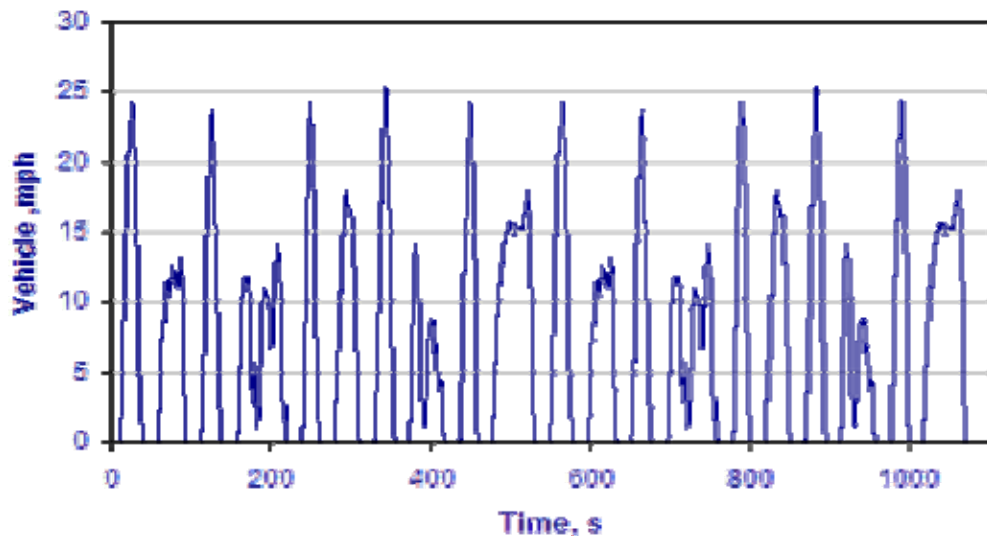


Figura B1: Perfil de velocidade empregado no Manhattan Bus Cycle

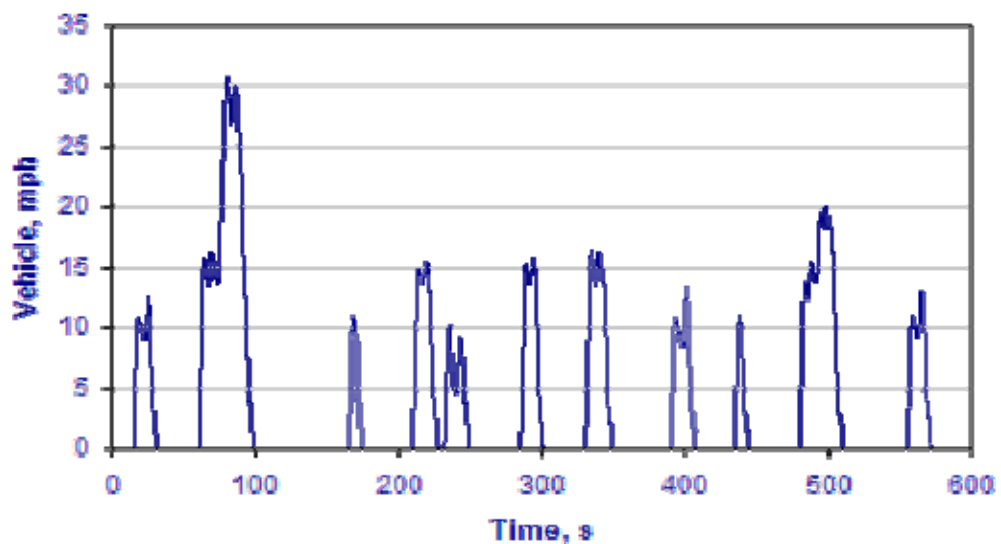


Figura B2: Perfil de velocidade empregado no Ney York Bus Cycle.

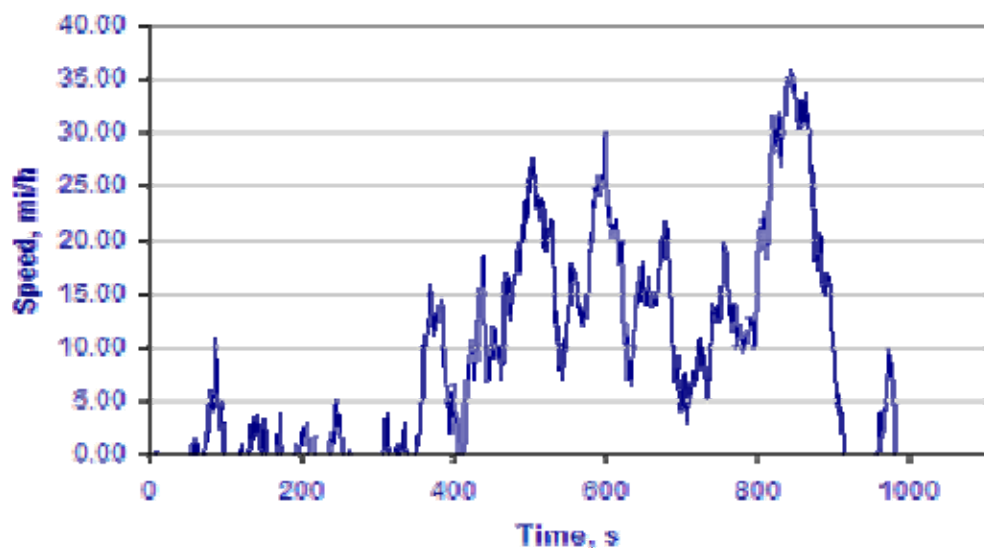


Figura B3: Perfil de velocidade empregado no Ney York Composite Cycle.

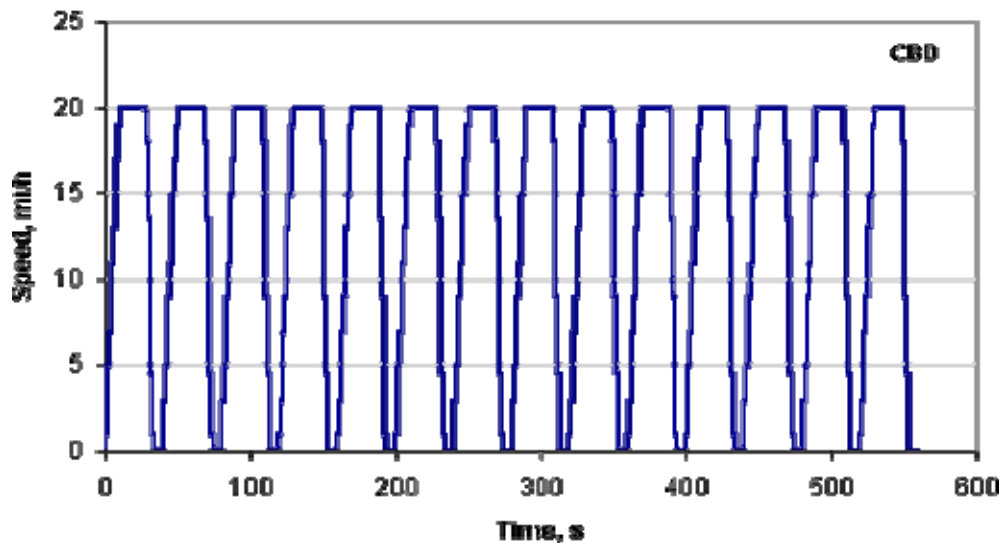


Figura B4: Perfil de velocidade empregado no Central Business District Cycle.

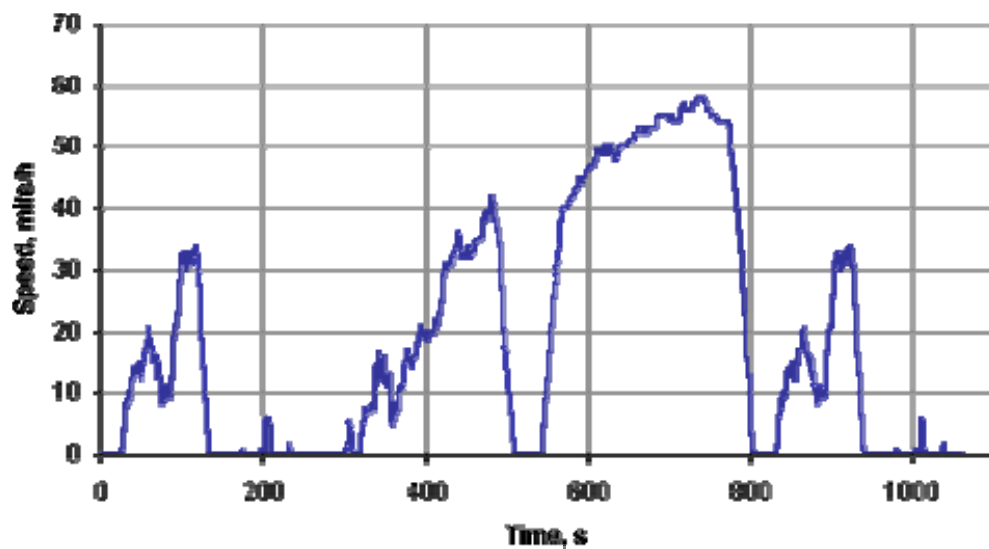


Figura B5: Perfil de velocidade empregado no EPA Urban Driving Dynamometer Schedule Cycle.

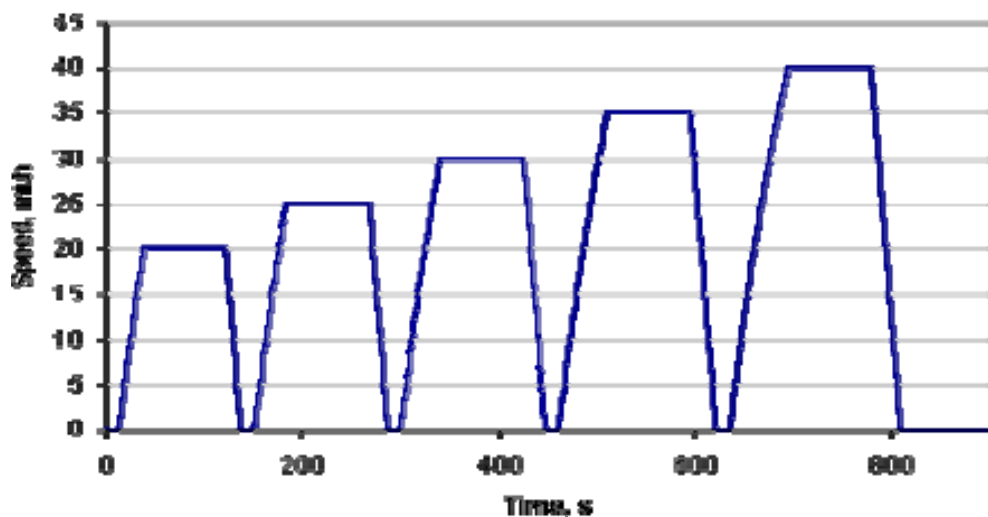


Figura B6: Perfil de velocidade empregado no WVU 5-Peak Cycle.

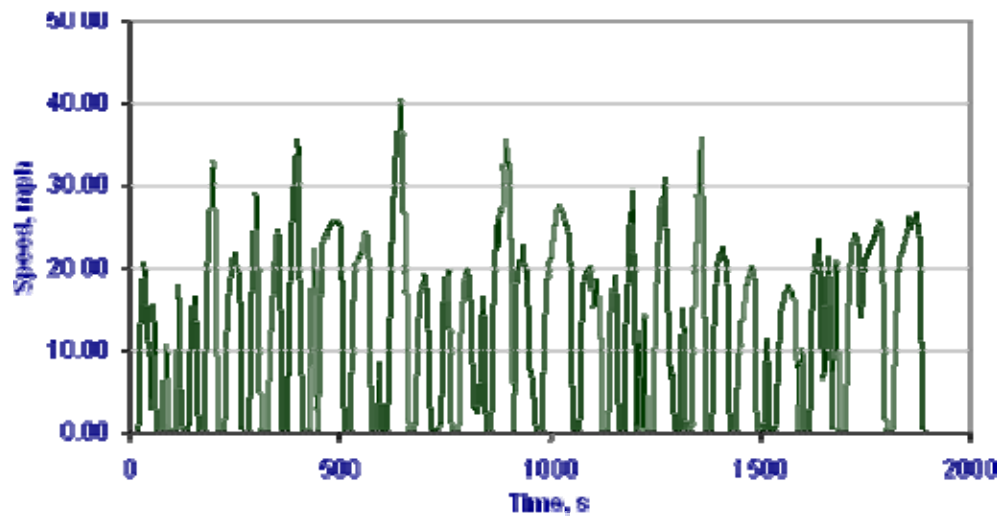


Figura B7: Perfil de velocidade empregado no Orange County Bus Cycle.

APÊNDICE B

CARACTERÍSTICAS DOS MOTORES DA FAMÍLIA OH 366, CHASSIS MERCEDES-BENZ EQUIPADOS COM ESTA MOTORIZAÇÃO E COMPARAÇÃO ENTRE AS CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DOS MOTORES.

Tabela B2: Características Mecânicas do Motor OM366; Fonte: GASBUS, 2004.

Modelo	Mercedes-Bens OM366
Tipo	6 Cilindros verticais em linha, com turbocooler (turboalimentado com pós resfriador do ar de admissão)
Mancais de árvores de manivelas	7, de camadas múltiplas em liga
Localização das válvulas	No cabeçote
Cilindradas total	5958 m ³
Diâmetro do pistão	97,5 mm
Curso do pistão	133 mm
Sequência de injeção	1-5-3-6-2-4
Bomba de óleo – tipo	Engrenagens
Filtro de óleo – tipo	Filtragem total com elemento de papel
Filtro de ar – tipo	Seco, com elemento de papel
Sistema de arrefecimento	Por circulação de água, com termostato



Figura B8: Chassi OF 1721, motorização dianteira, motor OM366LA, utilizado no ônibus original diesel.



Figura B9: Chassi OH 1621, equipado com motor OM366LA.

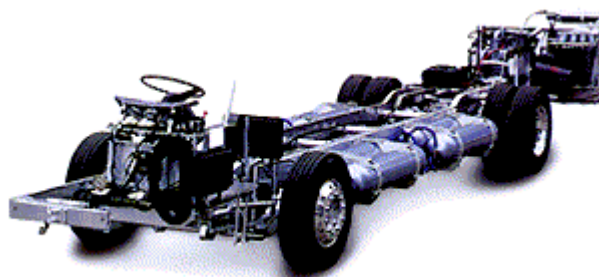


Figura B10: Chassi OH 1723 LG, motorização traseira, motor OM366LAG, dedicado para a utilização de GNV, com cilindros de armazenamento de aço instalados junto ao chassi.

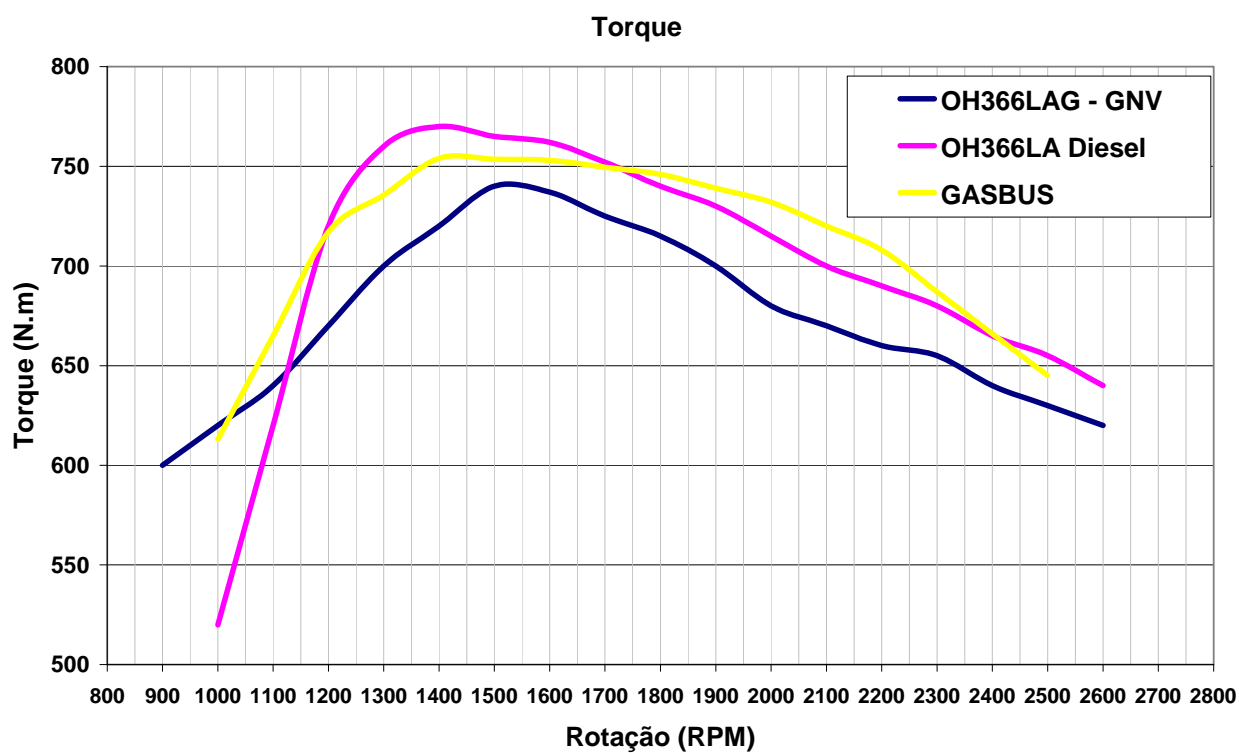


Figura B11: Torque dos motores OH366LA (original diesel), OH366LAG (dedicado a GNV) e Motor Ottolizado (GASBUS). A curva de torque dos motores GNV dedicados e Ottolizado são superiores à do motor diesel em toda a faixa operacional.

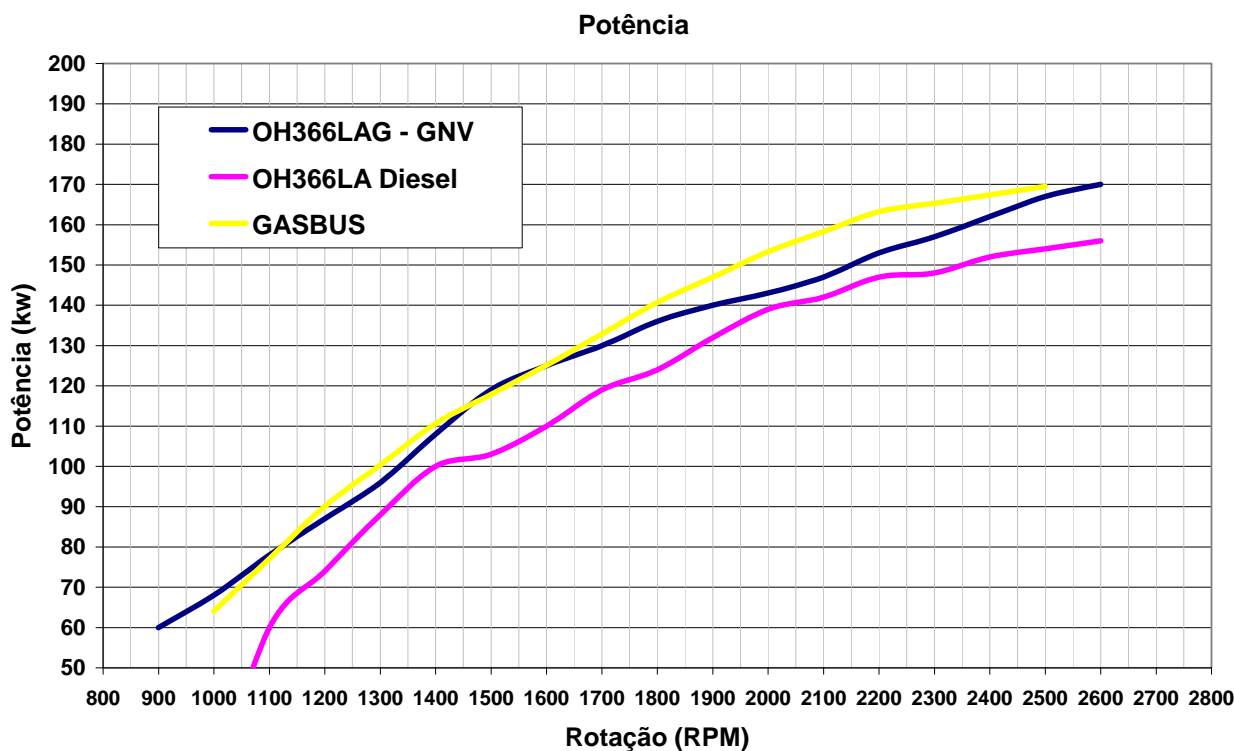


Figura B12: Potência dos motores OH366LA (original diesel), OH366LAG (dedicado a GNV) e Motor Ottolizado (GASBUS). A curva de potência dos motores GNV dedicados e Ottolizado são superiores à do motor diesel em toda a faixa operacional.

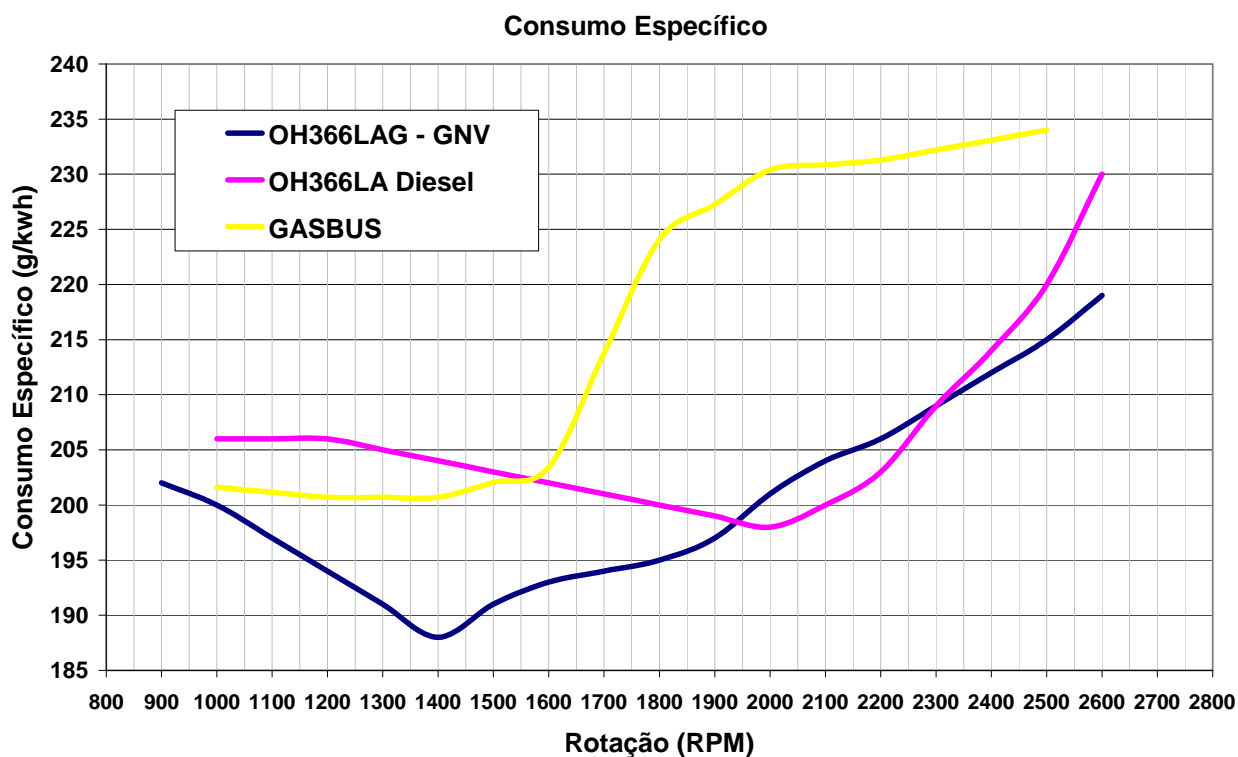


Figura B13: Consumo específico dos motores OH366LA (original diesel), OH366LAG (dedicado a GNV) e Motor Ottolizado (GASBUS). A curva de torque dos motores GNV dedicados e Ottolizado são superiores à do motor diesel em toda a faixa operacional.

APÊNDICE C

COMPONENTES DO KIT DE OTTOLIZAÇÃO

Este apêndice apresenta a relação dos itens instalados no GASBUS para a Ottolização do motor diesel, descrevendo sua função e funcionamento.

Sistema de Abastecimento

O sistema de abastecimento foi fornecido pela empresa Dynatec/Bee Engenharia. É composto por um feixe de 5 cilindros, central de abastecimento e mangueiras de conexão, vide figura B14.

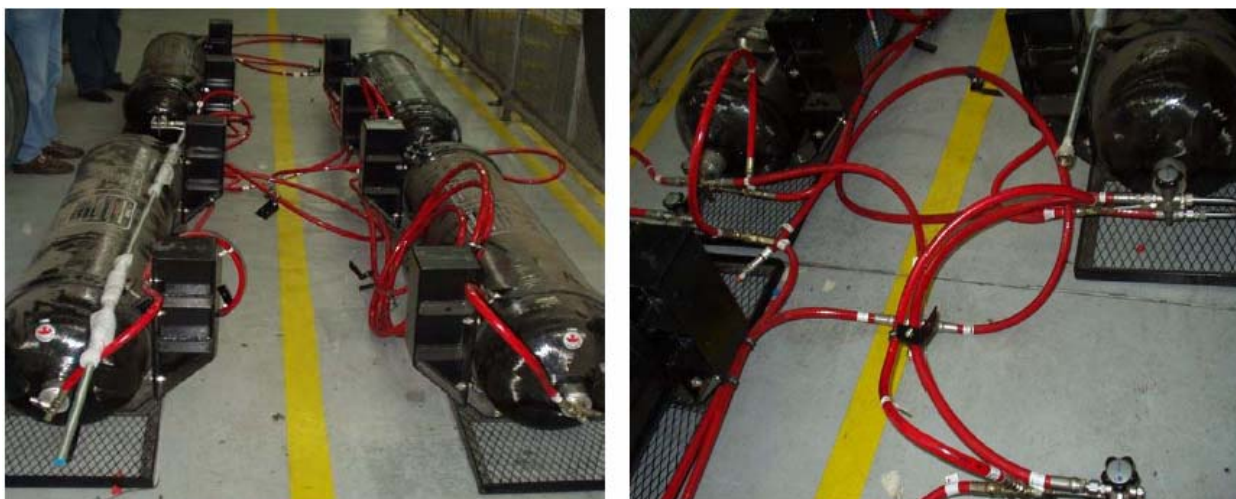


Figura B14: Disposição dos cilindros antes da montagem no GASBUS para verificação das conexões com as mangueiras.

O abastecimento é realizado através da válvula de abastecimento. Esta é composta de um corpo de latão fundido ou de aço-liga e uma sede capaz de acoplar o bico de abastecimento do “dispenser”. A vedação entre estas duas partes é feita por meio de “o rings” de borracha.

As válvulas de abastecimento figura A6 devem possuir um dispositivo de corte rápido acoplado, de modo a garantir a interrupção do fluxo de gás em caso de acidente no abastecimento. Através da tubulação de alta pressão, o GNV é transportado a uma pressão de 200 bar até a redutor de pressão.

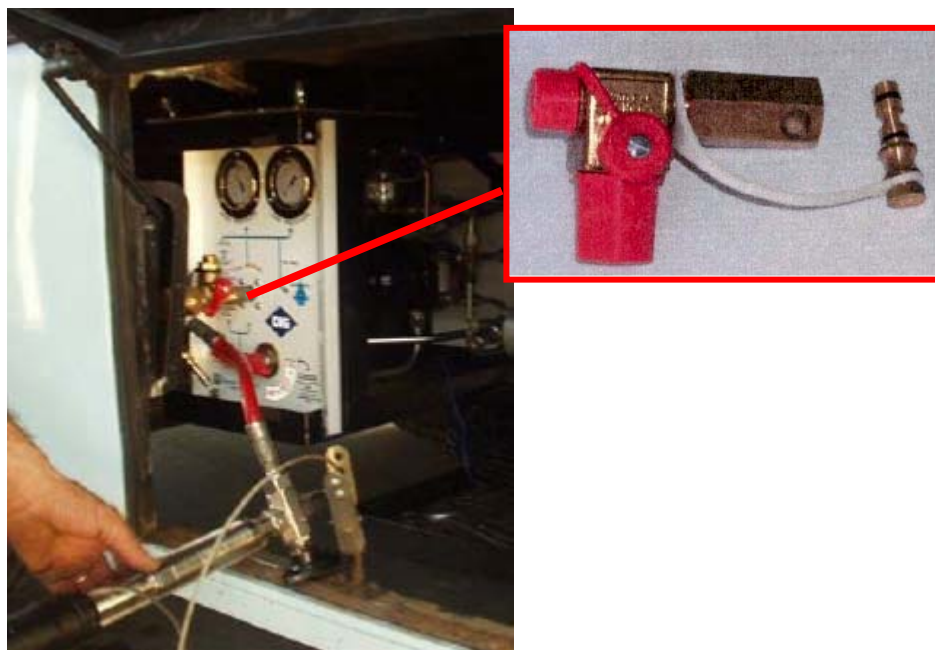


Figura B15: Detalhe da válvula de abastecimento instalada na central de reabastecimento do GASBUS.

A conexão entra o cilindro e as mangueiras são realizadas pela válvula do cilindro. Esta tem as funções de limitar o excesso de fluxo, impedindo a saída de gás do cilindro com uma vazão superior ao que o veículo necessita (muito importante no caso de ruptura do tubo de alta pressão); alívio da pressão interna do cilindro evitando a sua ruptura; fechamento total do gás no interior do cilindro.

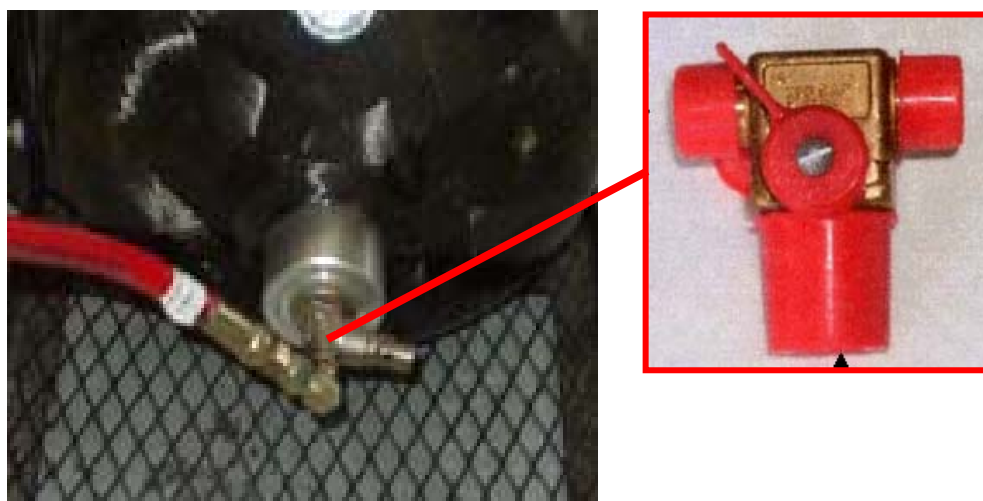


Figura B16: Detalhe da válvula do cilindro utilizada.

Regulador de Pressão

Tem a função de reduzir e estabilizar a pressão do reservatório, fornecendo a quantidade de gás necessária para atender a todos os regimes de trabalho. O redutor é dotado de eletroválvula de corte de gás que ao ser energizada libera o fluxo de combustível gasoso para a admissão do motor e em sua condição de repouso bloqueia o fluxo de gás combustível, além de um sistema de segurança que impede que a pressão interna ultrapasse o limite de resistência da carcaça. Pode ser dotado também de manômetro.

Para fornecer a vazão necessária ao motor Ottolizado foram instalados dois reguladores em paralelo.

Para garantir o bom funcionamento e evitar o congelamento deste elemento, em função da expansão do gás, existe um dispositivo que utiliza o fluido de refrigeração do veículo, com a finalidade de aquecer as partes internas do redutor de pressão.



Figura B17: Redutor de Pressão

Válvula dosadora

A válvula dosadora ou motor-de-passo é responsável pelo ajuste fino de gás no sistema de alimentação do motor. Trata-se de uma válvula eletrônica, montada na saída do redutor de pressão. É controlada pela ECU através do sinal da sonda lambda, mantendo a relação Ar/Combustível correta, nas condições de regime e carga do motor.



Figura B18: Válvula dosadora (motor-de-passo) instalada.

Mesclador de gás

O mesclador de gás trata-se de um venturi provido de um orifício condutor de gás, que tem como objetivo acelerar a velocidade do ar admitido, gerando uma alta depressão no orifício condutor de gás, depressão esta, que ao chegar a câmara do terceiro estágio do redutor de pressão, libera a passagem do gás para o admissão do motor.



Figura B19: Mesclador de gás instalado entre o intercooler e o coletor de entrada.

Mangueiras de baixa pressão

Utilizou-se para a tubulação de baixa pressão mangueiras lonada de borracha sintética de 8 mm de diâmetro. Esta é responsável pela condução do gás proveniente do redutor de pressão até o mesclador, passando pela válvula dosadora.

Válvula Borboleta

Esta restringe a passagem da mistura de ar + GNV aos cilindros de combustão, sendo sua abertura controlada através de um cabo conectado diretamente ao pedal do acelerador. O ângulo de abertura da válvula borboleta é proporcional a posição do acelerador.



Figura B20: Válvula borboleta instalada no coletor de admissão.

Chave comutadora

Comumente utilizada nos veículos leves para comutar entre a gasolina/álcool e o GNV, foi instalada no GASBUS para cortar o fornecimento de GNV ao motor.

Além da função comutadora, algumas chaves encontram-se equipadas com um circuito eletrônico sinalizador (LEDS), que ao receber um sinal voltagem do manômetro de alta pressão, informa ao condutor do veículo a quantidade de gás armazenado no cilindro.

Unidade de Controle Eletrônico – ECU

A ECU realiza o gerenciamento de combustível através da leitura de parâmetros de operação como a relação ar/combustível, posição do acelerador e rotação do motor determina a ação do atuador e, conseqüentemente, da quantidade de GNV fornecida ao motor. Ainda controla o momento da ignição em cada cilindro.



Figura B21: Unidade de Comando Eletrônico, responsável pelo controle de combustível e da ignição.

Sonda Lambda

Realiza a realimentação do sistema de controle de combustível, medindo a relação ar/combustível da combustão. Esta serve como parâmetro para a determinação da abertura da válvula dosadora, controlando o fornecimento de GNV ao motor.

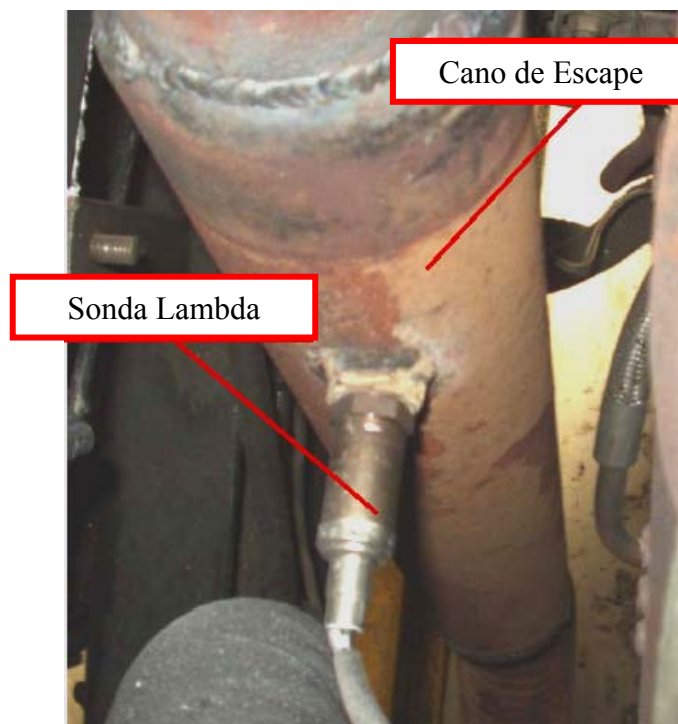


Figura B22: Sonda Lambda instalada no cano de escape.

Sistema de Ignição

Para a conversão do motor de ciclo diesel para ciclo Otto, instalou-se um sistema de ignição, gerenciado também pela ECU, composto por velas de ignição, cabos de vela, bobinas e sensor de posição do virabrequim. Este, com base na posição do virabrequim, gera uma faísca para a combustão do GNV dentro do cilindro.

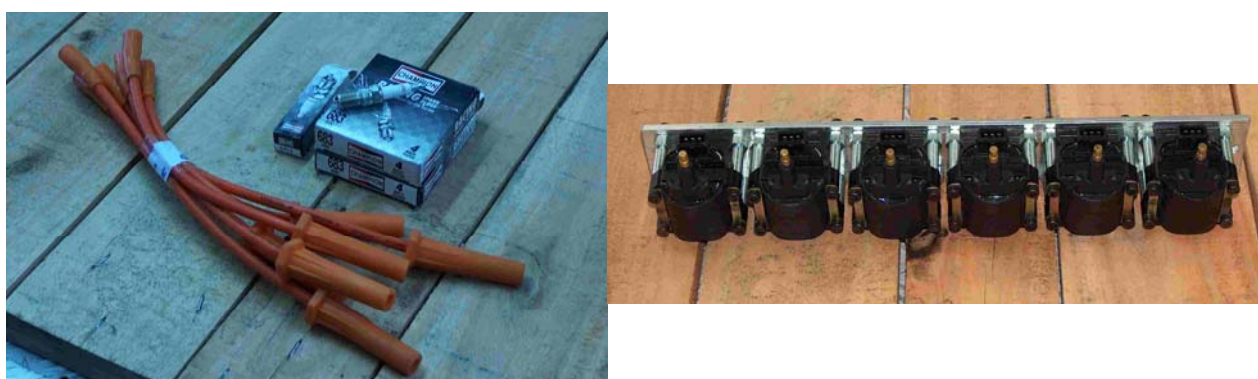


Figura B23: Jogo de velas e cabos (esquerda) e conjunto de bobinas individuais (a direita) utilizados pelo sistema de ignição.

Componentes Mecânicos

Com a Ottolização do motor, foram substituídos alguns componentes mecânicos do motor diesel original tais como pistões, árvore do comando de válvulas, cabeçote, coletores de admissão e escape.



Figura B24: Pistões utilizados na conversão do motor sem a pré-câmara de combustão presente nos pistões do motor diesel original.



Figura B25: Árvore de comando instalada na conversão.



Figura B26: Coletor de escape (esquerda) e coletor de admissão (direita) componentes do kit de conversão.



Figura B27: Cabeçote do motor Otto, prevendo a instalação de velas de ignição e mecanismo de catraca para abertura das válvulas, uniformizando o desgaste.

APÊNDICE D

FUNDAMENTOS DA AQUISIÇÃO DE DADOS.

Nesse define-se os principais conceitos para a aquisição de dados com microcomputadores.

Aquisição de Dados: Termo usado genericamente para designar a obtenção de informações a respeito de um processo. Os processos podem ser de naturezas diversas, podendo-se citar, entre outros: químico, biofísico, industrial, elétrico ou mecânico. Nestes, algumas das grandezas que se pode medir são: temperatura, pressão, aceleração, vazão, etc.

Sensores: Sensores ou transdutores são dispositivos que convertem grandezas físicas em sinais elétricos (tensão ou corrente). São exemplos de sensores:

Acelerômetros: Medição de Aceleração;

Termopar: Medição de temperatura;

Célula de Carga: Medição de Força.

Condicionadores: equipamentos eletrônicos que modificam o sinal de entrada de alguma forma. São exemplos de condicionamento: amplificação ou atenuação, filtragem, conversão de corrente para tensão e isolamento galvânica.

Grandezas analógicas: são aquelas cujas medidas podem assumir uma infinidade de valores, registrando continuamente uma grandeza. São exemplos de grandeza analógica a posição de um carro na pista, a força de tração num cabo de aço, a corrente elétrica consumida por um equipamento, a força numa mola, a temperatura ambiente, entre outras.

Conversão Analógico/Digital (Conversor A/D): converte um sinal analógico em dado digital, ou seja, discretiza um sinal analógico ou contínuo em intervalos predefinidos, anotando os valores em cada ponto de amostragem. O sinal digitalizado pode então ser armazenado e manipulado pelo microcomputador, através de programas específicos. A conversão analógica-digital permite representar numericamente um sinal, sendo que a precisão de representação digital depende de vários fatores, entre os quais destacam-se a faixa de entrada, resolução e a taxa de amostragem.

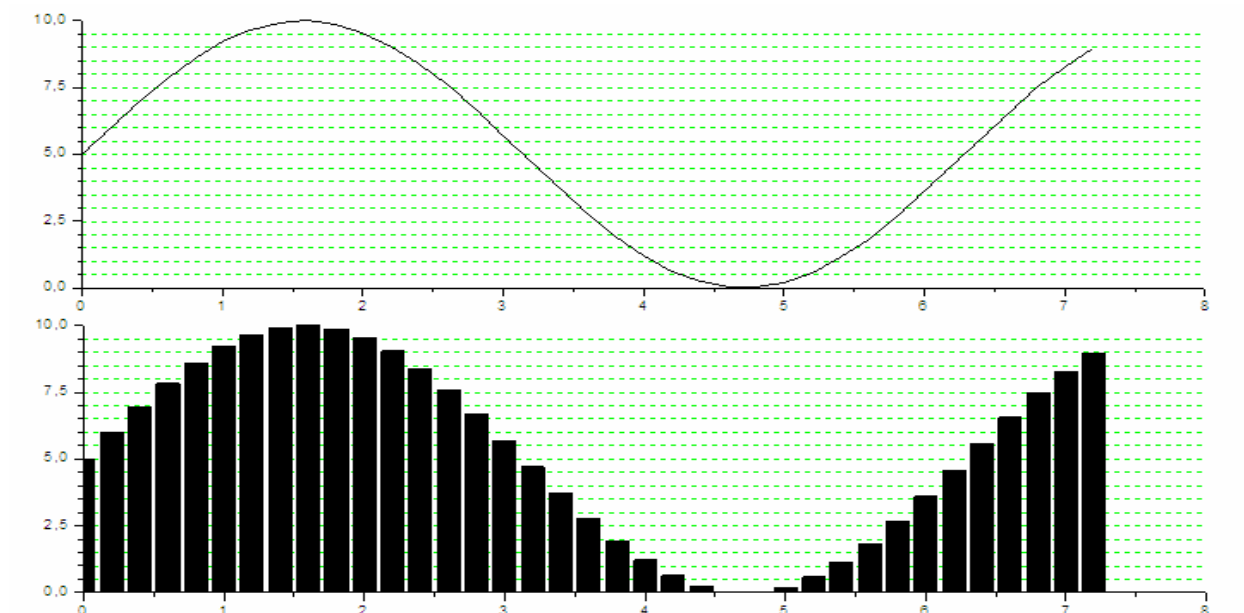


Figura B28: Conversão do sinal contínuo (analgico) em um sinal discreto (digital).

Faixa de Entrada: A faixa de entrada é um parâmetro associado à resolução e informa a faixa de tensões e/ou correntes que a placa conversora A/D consegue representar numericamente. Esta faixa pode ser de ± 5 V, 0 a 5V, ± 10 V, 0 a 20 mA, etc. Quando os sinais de entrada não forem adequados para as faixas de entrada disponíveis na placa A/D será necessário condicioná-los (amplificar ou atenuar) antes de conectá-los na entrada da placa A/D.

Resolução: Indica a menor variação do sinal analógico que o conversor pode detectar. É geralmente indicada em termos de número de bits do conversor analógico/digital utilizado. Assim, têm-se conversores com resolução de 6, 8, 10, 12, 14, 16, ...bits. Como exemplo, para uma faixa de entrada de 10V um conversor de 4 bits discretiza o valor analógico em 2^4 ou 16 valores, detectando variações de 0,625 V. Utilizando um conversor A/D de 3 bits de resolução a faixa de medição é discretizada em 2^3 ou 8 valores, detectando variações de 0,125 V.

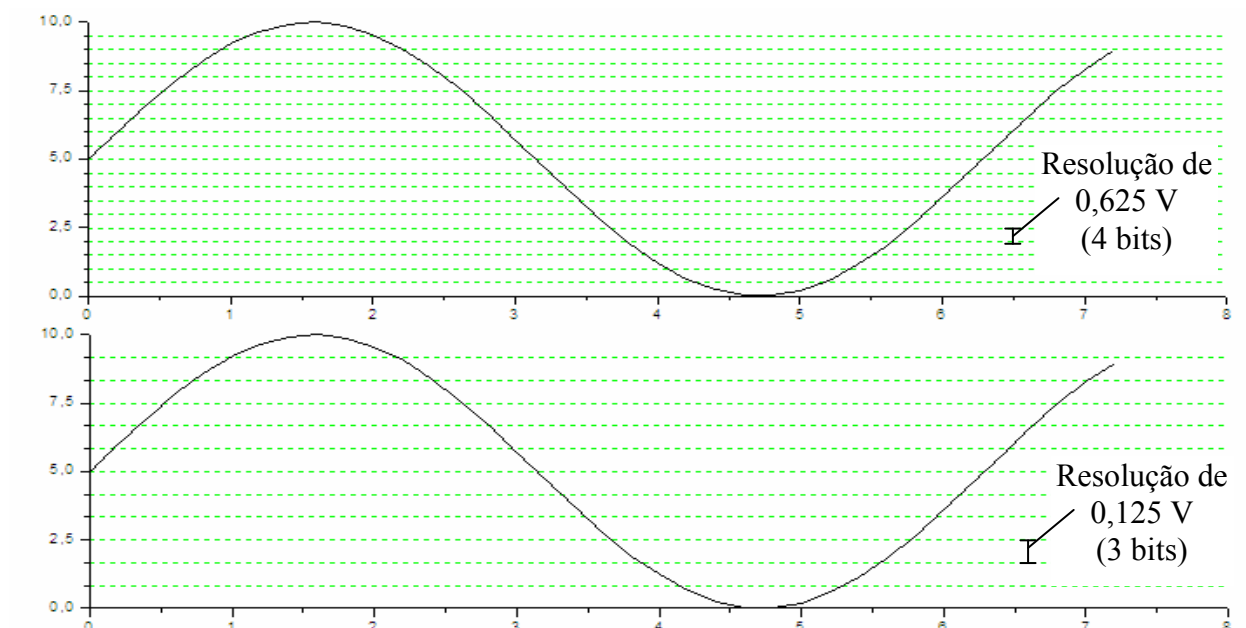


Figura B29: Exemplo de resolução do sistema de conversão de dados.

Taxa de amostragem: Numa aplicação prática o sinal de entrada do conversor A/D varia no decorrer do tempo, e o que se deseja é registrar esta variação. A discretização é feita através da amostragem do sinal a intervalos regulares. O inverso desse intervalo é a taxa de amostragem. Por exemplo, para uma taxa de amostragem de 100 amostras por segundo (ou seja, 100 Hz), o intervalo entre as amostras é de 10 ms (ou seja, 1/100 de segundo). A taxa de amostragem é semelhante a resolução da conversão A/D, só que aplicada ao tempo.

Quanto maior a taxa, melhor a representação do sinal. No entanto, devido à limitação do espaço disponível para armazenamento dos dados, há uma relação de compromisso entre a taxa de amostragem e a duração da aquisição.

A taxa de amostragem também não pode ser muito baixa, comparada com a frequência de variação do sinal, devido ao efeito de subamostragem (*Aliasing*). O efeito *Aliasing* ocorre sempre que a frequência de amostragem é menor que duas vezes a frequência da componente de maior frequência do sinal (Teorema de Nyquist).

A Figura A1.3 mostra gráficos que representam um sinal senoidal de 100 Hz amostrado em diferentes taxas de amostragem. No caso A, a taxa de amostragem é de 500 Hz e não ocorre *Aliasing* (taxa = 500 Hz > 2 x 100 Hz). No caso B a taxa de amostragem é de 83.3 Hz e ocorre *Aliasing*. É importante observar que os pontos amostrados representam um sinal senoidal de frequência menor que a da senóide original. No caso C a taxa de amostragem é exatamente igual à frequência do sinal de entrada, ou seja, 100 Hz. Neste caso, os valores amostrados são sempre iguais, dando a impressão de que se trata de um sinal contínuo (DC).

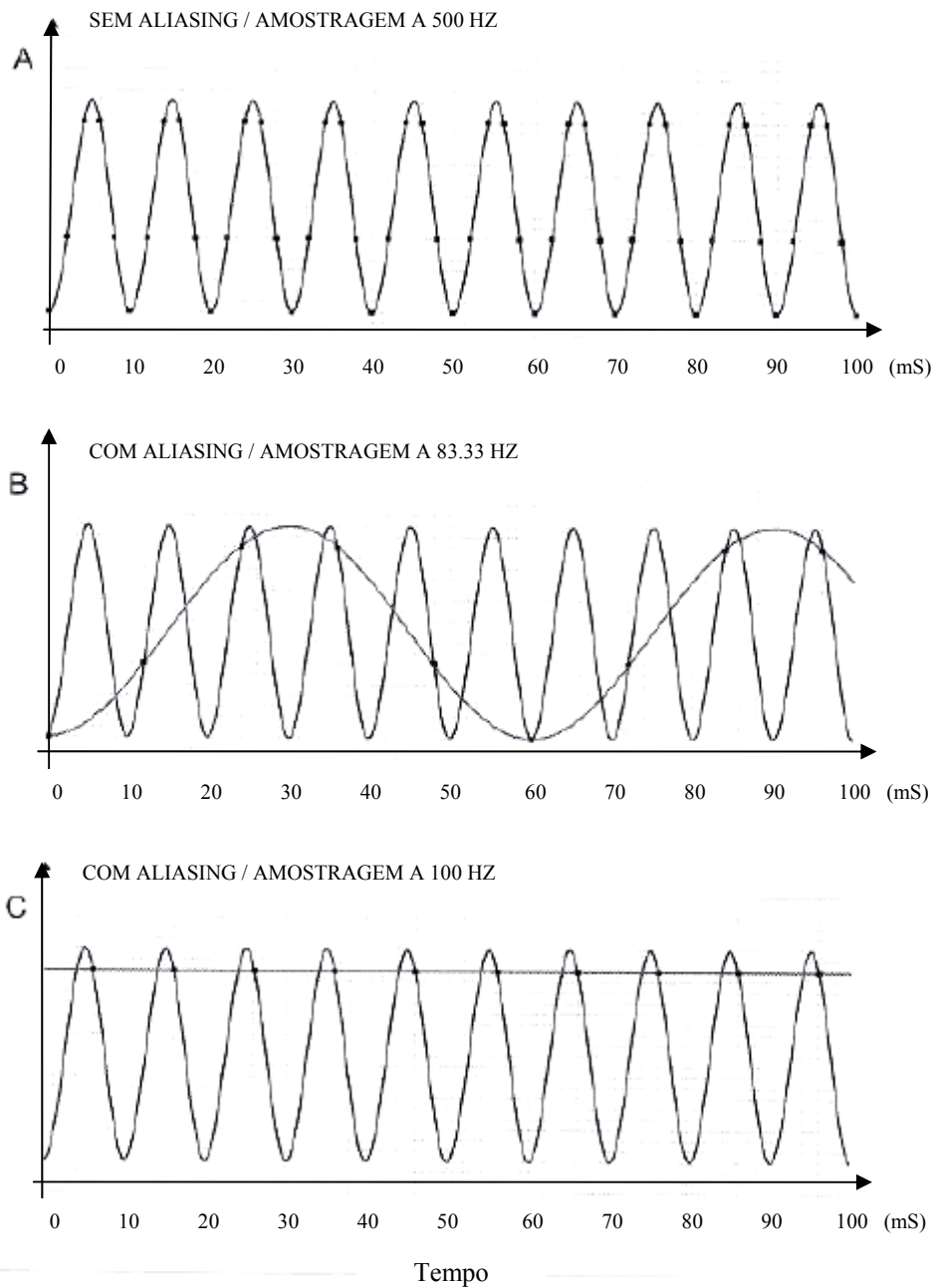


Figura B30: Exemplos de amostragem. (A) sem aliasing, (B e C) com aliasing.

APÊNDICE E

CURVAS DE RESPOSTA, CALIBRAÇÃO E INCERTEZAS DO SISTEMA DE MEDIÇÃO.

Em resultados de trabalhos experimentais, existem erros provenientes de fatores que influenciam na exatidão de medição, tais como: incerteza do instrumento de medição, metodologia empregada e erros aleatórios. Para atenuar os efeitos desses erros, costuma-se repetir a medida várias vezes e efetuar um tratamento estatístico. O emprego de um método estatístico em um estudo científico aplica-se quando a variabilidade, complexidade ou parcial desconhecimento das origens do fenômeno comprometem a confiabilidade dos resultados. O resultado obtido pelas técnicas estatísticas permite alcançar uma série de comportamentos gerais frente a casos acidentais ou isolados, com os quais se fabrica um modelo.

Na prática o que em termos gerais se determina é o erro aparente, ou seja, a diferença entre o valor objetivo na medida e o valor mais provável da grandeza física considerada, pois a determinação do erro de uma medida em relação ao verdadeiro valor da grandeza é impraticável. Uma grandeza física experimental deve ser determinada a partir de medição, e o resultado é sempre uma aproximação para o valor verdadeiro da grandeza [Borchardt & Zaro, 1982b].

Segundo Borchardt & Zaro, 1982b, quando o resultado procurado é dependente de medições individuais, o método mais utilizado na bibliografia especializada é o de Kleine e McClintock dado pela equação A1.

$$\Delta R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} * \Delta_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} * \Delta_2 \right)^2 + \dots \right] \quad (A1)$$

Onde ΔR é a incerteza do resultado, $x_1, x_2 \dots x_n$ são as variáveis independentes e Δ a incerteza de cada variável independente.

Nesse trabalho no caso de variáveis medidas diretamente por sensores decidiu-se explicitar somente a incerteza e a resolução especificadas pelo fabricante. Nas grandezas medidas através de sistema de instrumentação implementado pela equipe da UFRGS explicitou-se o procedimento de calibração e a curva de resposta do sistema. Para as grandezas medidas indiretamente realizou-se o cálculo da incerteza de medição.

A seguir apresenta-se o método de calibração e a incerteza associada com cada grandeza medida pelo SIE e SIEMEP

Unidade de Aquisição e Registro de Dados

A calibração dos canais de entrada da Unidade de Registro de Dados do SIE realizou-se pelo fabricante, no momento da entrega do equipamento. Consiste em aplicar tensões de referência com uma fonte de tensão modelo Microcall 1000, marca Eurotrom em cada canal e comparar o valor registrado com o indicado no sistema de referência montado em paralelo. Utilizou-se como sistema de referência um multímetro HP34401A, aferido no Labelo, certificado de calibração E0671/2004, procedimento 1.06.01-rev 02.

Nos canais de tensão o sistema utiliza um conversor A/D de 10 bits, para a leitura dos canais de temperatura a conversão A/D realiza-se por um conversor de 12 bits. Na Tabela B3 apresenta-se a resolução e a incerteza de medição da URD.

Tabela B3: Características operacionais da URD.

Canal	Faixa de Medição	Resolução	Incerteza
Tensão	0 – 5V	4,883mV	4,883mV
Temperatura (Termopar)	0-1500 °C	0,32 °C	1 °C
Temperatura (PT100)	0 – 150 °C	0,032 °C	0,1 °C

Medição de Temperatura

Como incerteza na medição de temperatura utilizou-se os dados fornecidos pelos fabricantes dos sensores, sendo a incerteza de cada sensor apresentada na Tabela B4.

Tabela B4: Características técnicas dos sensores de temperatura utilizados.

Sensor	Faixa de operação	Incerteza
Termopar tipo K ¹	0 - 1270 °C	± 1,1°C ³
PT100 ²	-50 – 600°C	± 0,5°C ³

¹ Valores de acordo com circular MC96.1–1975 da ANSI (American National Standart Institute).

² Valores de acordo com norma ASTM E1337.

³ Para a faixa de temperatura entre 0 e 100°C.

Medição de Velocidade Instantânea

Realizou-se a calibração do sistema de registro da velocidade instantânea através do procedimento de pela empresa Kertnez, certificada pelo INMETRO, com a utilização do calibrados HTC, modelo 162, n° 002925. Este é conectado ao tacógrafo do veículo no lugar do sensor, simulando diferentes velocidades, sendo a tensão na saída do condicionador registrado na URD. Para fins práticos admitiu-se uma incerteza na medição de velocidade de 2%.

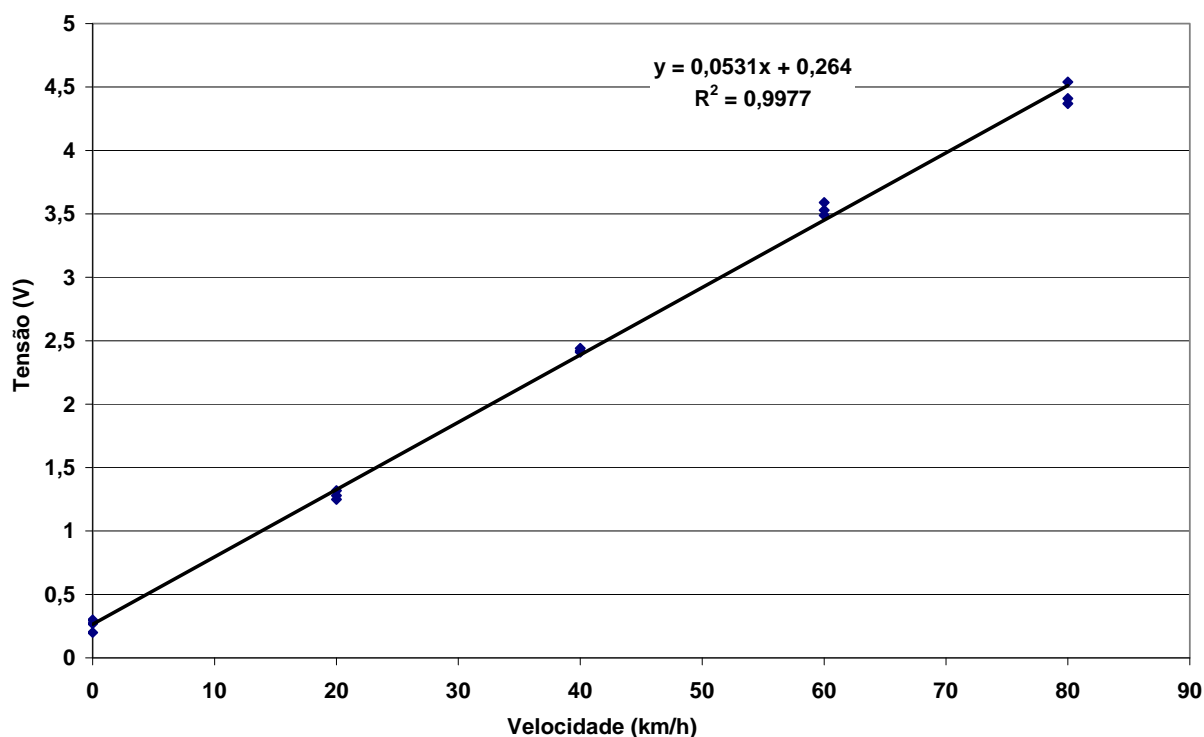


Figura B31: Curva de resposta do sistema de medição de velocidade instantânea.

Medição da Rotação do motor

Para a calibração do sistema de registro da rotação do motor montou-se em paralelo com o sistema de aquisição de dados um sistema de medição de referência, composto por uma garra indutiva e um osciloscópio. Pelo princípio de funcionamento de motores de 4 tempos temos uma descarga elétrica em cada vela do cilindro a cada duas rotações do virabrequim. Fixou-se a garra indutiva em um dos cabos de vela do motor, registrando no osciloscópio a frequência dos pulsos de ignição. No gráfico da Figura B32 apresenta-se a curva de resposta do sistema de medição da rotação do motor.

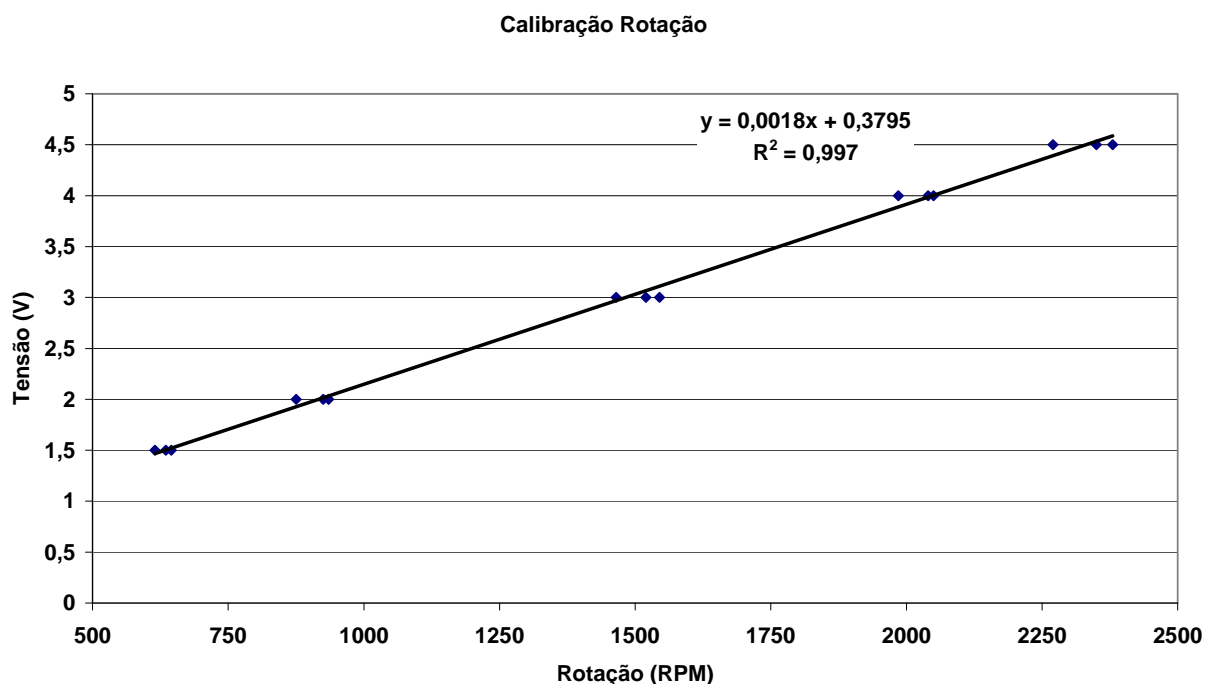


Figura B32: Curva de resposta do sistema de medição da rotação do motor.

Medição da Posição do Acelerador

Para a medição da posição do pedal do acelerador considerou-se a variação do ângulo de abertura da válvula borboleta com o deslocamento do pedal do acelerador é linear. Com isso, para a calibração do sensor de posição do acelerador foi posicionando o pedal do acelerador nas posições extremas e registrando o valor da tensão através da URD. Apresenta-se na Figura B35 o gráfico com a curva de calibração do sistema de medição da posição do pedal do acelerador.

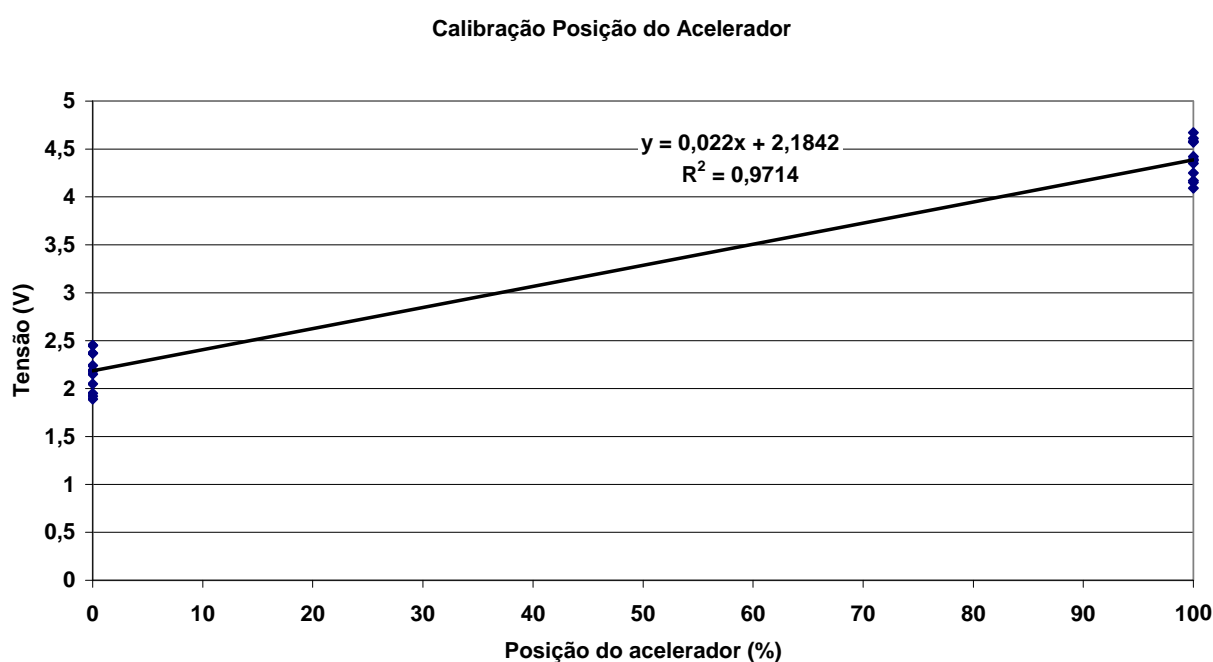


Figura B35: Curva de resposta do sistema da medição da posição do pedal do acelerador.

Medição da Massa de Ar Admitida

Utilizou-se como incerteza da medição da massa de ar admitida dados fornecidos pelo fabricante do sensor MAF (Mass Air Flowing sensor), da Boch, modelo HFM 5. Na Figura A2.5 apresenta-se a curva de resposta do sensor MAF.

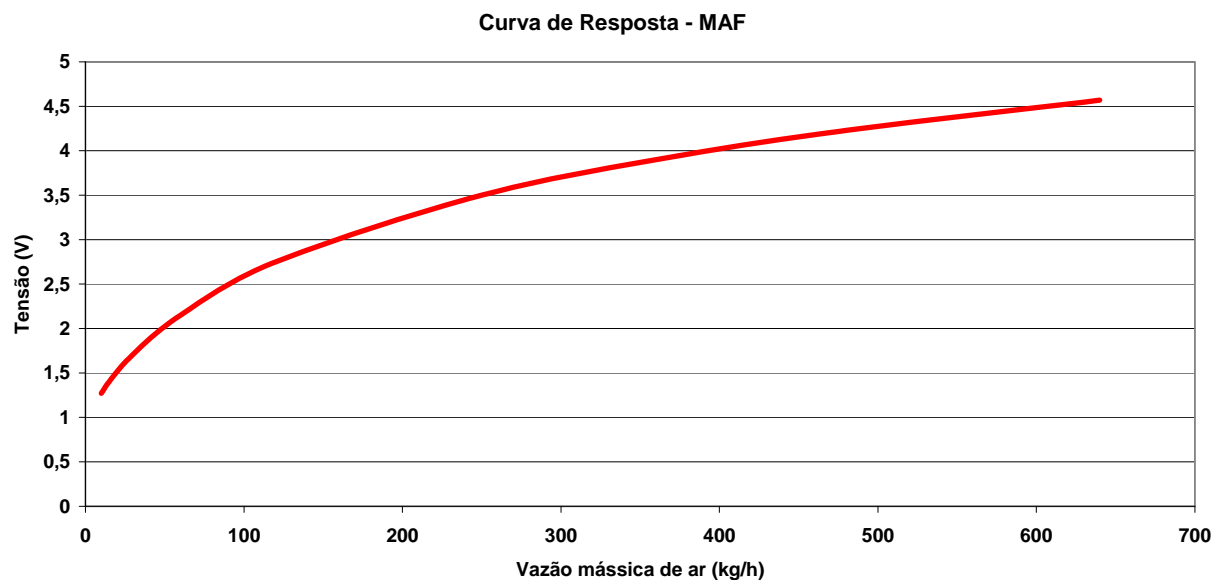


Figura B36: Curva de resposta do sensor de medição da massa de ar.

Medição da Pressão no Coletor de Entrada

Utilizou-se como incerteza da medição Pressão no Coletor de Entrada dados fornecidos pelo fabricante do sensor MAP (Manifold Absolute Pressure Sensor), da Mercedes-Benz, modelo MB16244629. Na Figura A2.6 apresenta-se a curva de resposta do sensor MAP.

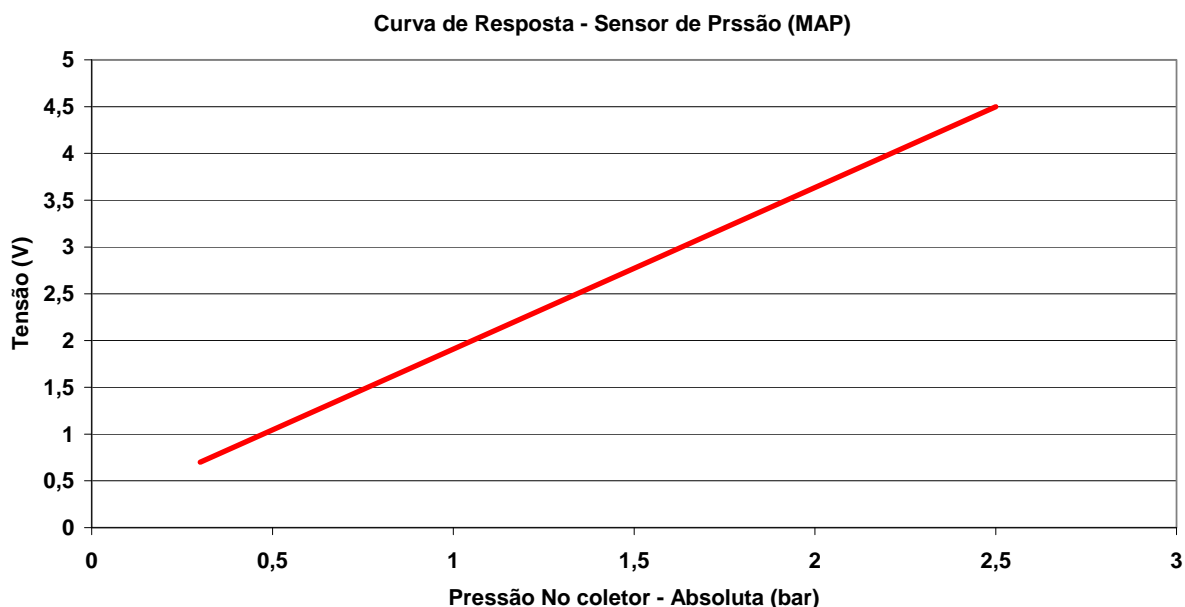
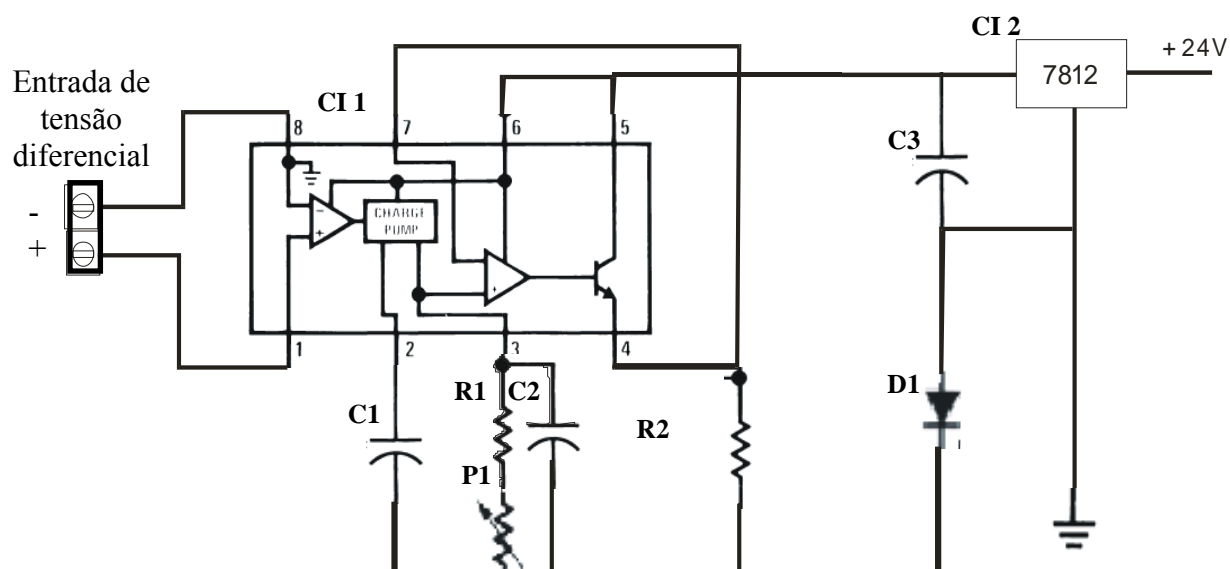


Figura B37: Curva de resposta do sensor de pressão do coletor de entrada.

APÊNDICE F

CIRCUITO ELETRÔNICO DO CONVERSOR FREQUÊNCIA / TENSÃO



Ganho regulável no potenciômetro P1 entre 80 hz/V e 16 hz/V.

Lista de componentes

Conversor:

C1 = 0,1 μ F;

C2 = 1 pF;

R1 = 10 k Ω ;

P1 = 50 k Ω ;

R2 = 100 k Ω ;

D1 = 4001;

CI 1 = LM 2907;

Fonte:

CI 2 = LM 7812 – Regulador de Tensão;

C3 = 4700 μ F;

APÊNDICE G

TABELA COM O REVEZAMENTO DIÁRIO ENTRE OS MOTORISTAS / ÔNIBUS E ITINERÁRIOS REALIZADA NOS 90 DIAS INICIAIS DE TESTE DE CAMPO EM LINHAS COMERCIAIS.

No Apêndice 2 apresenta-se as tabelas com o período e os itinerários que os dois ônibus diesel (números 7071 e 7073) e o convertido para GNV (número 7072) em análise percorreram durante o período de testes, agrupados de acordo com o grau de dificuldade do terreno. O itinerário diário detalhado indicando os motoristas e datas em que cada veículo percorre cada tabela é mostrado na tabela 6.

Tabela B3: Classificação dos itinerários do ônibus GNV durante o período de testes experimental, classificados de acordo com o tipo de terreno.

Período	Trajeto	Características do trajeto
Semanas 1, 2 e 3	Bairros Umbu - Salomé	Percurso em terreno plano no município de Porto Alegre (corredor de ônibus da av. Assis Brasil) e com pequenos aclives no município de Alvorada (zona central e bairros Umbu e Salomé)
Semanas 4, 5 e 6	Bairros Jardim Aparecida / Algarve	Percurso em terreno plano em Porto Alegre (corredor de ônibus da av. Assis Brasil) e bairros com aclives em Alvorada (Jardins Aparecida e Algarve)
Semanas 7, 8 e 9	via Av. Protásio Alves	Percurso com aclives acentuados no município de Porto Alegre (Av. Protásio Alves) e terrenos com pequenos aclives em Alvorada (zona central)

Tabela B4: Itinerário diário dos veículos em análise durante o período experimental, Semanas 1, 2 e 3
– Trajetos bairros Umbu – Salomé.

Tabela 127	
Descrição	Horário
Umbu/POA	06:45
POA/Salomé	08:45
Salomé/POA	10:10
Anchieta/Umbu	17:10
Expresso	18:10
Cairu/Umbu	18:48

Tabela 352	
Descrição	Horário
Cabral/POA	06:30
POA/Figueira	07:34
Vila Elza/POA	08:40
POA/Americana	09:50
Alvorada/POA	10:50
Cairu/Salomé	17:44

Tabela 1048	
Descrição	Horário
Umbu/Anchieta	06:54
POA/Umbu	13:50
Salomé/POA	15:20
POA/Vila Elza	16:20
Figueira SP/POA	17:40
POA/Americana	18:55

Aos Sábados

Tabela 613	
Descrição	Horário
Alvorada/POA	07:05
POA/Alvorada	08:00
Alvorada/POA	09:05
POA/Alvorada	10:00
Alvorada/POA	11:05
POA/Alvorada	12:00
Alvorada/POA	13:45
POA/Alvorada	14:30

Tabela 660	
Descrição	Horário
Umbu/POA	06:40
POA/Salomé	07:53
Salomé/POA	09:07
POA/Fig.SP.FF	10:04
Fig.SP.FF/POA	11:25
POA/Alvorada	16:58

Tabela 674	
Descrição	Horário
Salomé/POA	06:55
POA/Fig.SP.FF	08:04
Fig.SP.FF/POA	09:25
POA/Fig.SP.FF	10:42
Fig.SP.FF/POA	12:05
POA/Alvorada	18:28

Semana 1	7071
Motorista	1
Segunda	127
Terça	352
Quarta	1048
Quinta	127
Sexta	352
Sábado	674

Semana 1	7072
Motorista	2
Segunda	352
Terça	1048
Quarta	127
Quinta	352
Sexta	1048
Sábado	613

Semana 1	7073
Motorista	3
Segunda	1048
Terça	127
Quarta	352
Quinta	1048
Sexta	127
Sábado	660

Semana 2	7071
Motorista	3
Segunda	352
Terça	1048
Quarta	127
Quinta	352
Sexta	1048
Sábado	613

Semana 2	7072
Motorista	1
Segunda	1048
Terça	127
Quarta	352
Quinta	1048
Sexta	127
Sábado	660

Semana 2	7073
Motorista	2
Segunda	127
Terça	352
Quarta	1048
Quinta	127
Sexta	352
Sábado	674

Semana 3	7071
Motorista	2
Segunda	1048
Terça	127
Quarta	352
Quinta	1048
Sexta	127
Sábado	660

Semana 3	7072
Motorista	3
Segunda	127
Terça	352
Quarta	1048
Quinta	127
Sexta	352
Sábado	674

Semana 3	7073
Motorista	1
Segunda	352
Terça	1048
Quarta	127
Quinta	352
Sexta	1048
Sábado	613

Tabela B5: Itinerário diário dos veículos em análise durante o período experimental, Semanas 4, 5 e 6 – Trajeto bairros Jardim Aparecida / Algarve

Tabela 18	
Descrição	Horário
J.Alvorada/POA	07:12
POA/J.Aparecida	08:20
J.Aparecida/POA	09:20
POA/Fig.SP.FF	10:40
Fig.S.Pedro/POA	11:55
Cairu/J.Aparecida	18:26

Tabela 200	
Descrição	Horário
J.Alvorada/P.Alves	06:50
POA/J.Alv.Inters.BH	12:50
J.Alv.Inters.BH/POA	14:00
POA/Stella	15:30
Stella/POA	16:30
Anchieta/J.Aparecida	17:27

Tabela 365	
Descrição	Horário
J.Alvorada/POA	06:40
Expresso	07:40
J.POA/POA	08:20
POA/J.Algarve	09:31
J.Algarve/POA	10:30
POA/J.Alv. Intersul	18:15

Aos Sábados

Tabela 673	
Descrição	Horário
J.POA/POA	06:50
Expresso	07:40
Portoverde/POA	08:25
POA/Stella	09:20
Stella/POA	10:30
POA/Alvorada	11:18
Americana/POA	14:05
POA/Alvorada	15:00

Tabela 684	
Descrição	Horário
Algarve/POA	07:00
Expresso	08:05
Americana/POA	08:35
POA/Algarve	09:36
Algarve/POA	10:46
POA/J.POA	11:48
J.POA/POA	12:58
POA/Americana	14:53

Tabela 693	
Descrição	Horário
Algarve/POA	06:00
POA/Americana	07:00
Alvorada/POA	08:35
POA/J.Aparecida	09:33
J.Aparecida/POA	10:43
POA/J.Aparecida	11:43
J.Aparecida/POA	12:43
POA/J.Aparecida	13:43

Semana 4	7071
Motorista	3
Segunda	200
Terça	365
Quarta	18
Quinta	200
Sexta	365
Sábado	673

Semana 4	7072
Motorista	1
Segunda	365
Terça	18
Quarta	200
Quinta	365
Sexta	18
Sábado	684

Semana 4	7073
Motorista	2
Segunda	18
Terça	200
Quarta	365
Quinta	18
Sexta	200
Sábado	693

Semana 5	7071
Motorista	2
Segunda	365
Terça	18
Quarta	200
Quinta	365
Sexta	18
Sábado	684

Semana 5	7072
Motorista	3
Segunda	18
Terça	200
Quarta	365
Quinta	18
Sexta	200
Sábado	693

Semana 5	7073
Motorista	1
Segunda	200
Terça	365
Quarta	18
Quinta	200
Sexta	365
Sábado	673

Semana 6	7071
Motorista	1
Segunda	18
Terça	200
Quarta	365
Quinta	18
Sexta	200
Sábado	693

Semana 6	7072
Motorista	2
Segunda	200
Terça	365
Quarta	18
Quinta	200
Sexta	365
Sábado	673

Semana 6	7073
Motorista	3
Segunda	365
Terça	18
Quarta	200
Quinta	365
Sexta	18
Sábado	684

Tabela B6: Itinerário diário dos veículos em análise durante o período experimental, Semanas 7, 8 e 9 – Trajeto via Av. Protásio Alves

Tabela 57	
Descrição	Horário
Stella/POA	07:10
Expresso	08:05
Stella/POA	08:40
POA/Stella	16:44
Stella/POA	18:00
POA/Stella	19:00

Tabela 76	
Descrição	Horário
Intersul F.Peixoto/POA	06:30
Expresso	07:25
J.Aparecida/P.Alves	08:00
P.Alves/Alvorada	09:05
Alvorada/POA	10:20
P.Alves/Umbu	18:06

Tabela 1065	
Descrição	Horário
São Pedro/POA	06:43
Expresso	07:45
Figueira/P.Alves	08:30
POA/V.Elza	09:57
Fig.F.Ferrari/POA	11:25
P.Alves/Salomé	18:15

Aos Sábados

Tabela 625	
Descrição	Horário
Stella/POA	08:10
Expresso	09:00
Stella/POA	13:30
POA/Stella	14:20
Stella/POA	15:30
POA/Stella	16:20
Stella/POA	17:30
POA/J.Alv.Intersul	18:15

Tabela 629	
Descrição	Horário
Americana/POA	07:30
Expresso	08:20
Stella/POA	09:00
POA/Stella	09:50
Stella/POA	11:00
POA/Stella	11:50
Stella/POA	13:00
POA/Stella	17:15

Tabela 683	
Descrição	Horário
Algarve/POA	07:15
POA/Stella	13:50
Stella/POA	15:00
POA/Stella	15:50
Stella/POA	17:00
POA/Alvorada	17:56

Semana 7	7071
Motorista	2
Segunda	1065
Terça	57
Quarta	76
Quinta	1065
Sexta	57
Sábado	629

Semana 7	7072
Motorista	3
Segunda	57
Terça	76
Quarta	1065
Quinta	57
Sexta	76
Sábado	683

Semana 7	7073
Motorista	1
Segunda	76
Terça	1065
Quarta	57
Quinta	76
Sexta	1065
Sábado	625

Semana 8	7071
Motorista	1
Segunda	57
Terça	76
Quarta	1065
Quinta	57
Sexta	76
Sábado	683

Semana 8	7072
Motorista	2
Segunda	76
Terça	1065
Quarta	57
Quinta	76
Sexta	1065
Sábado	625

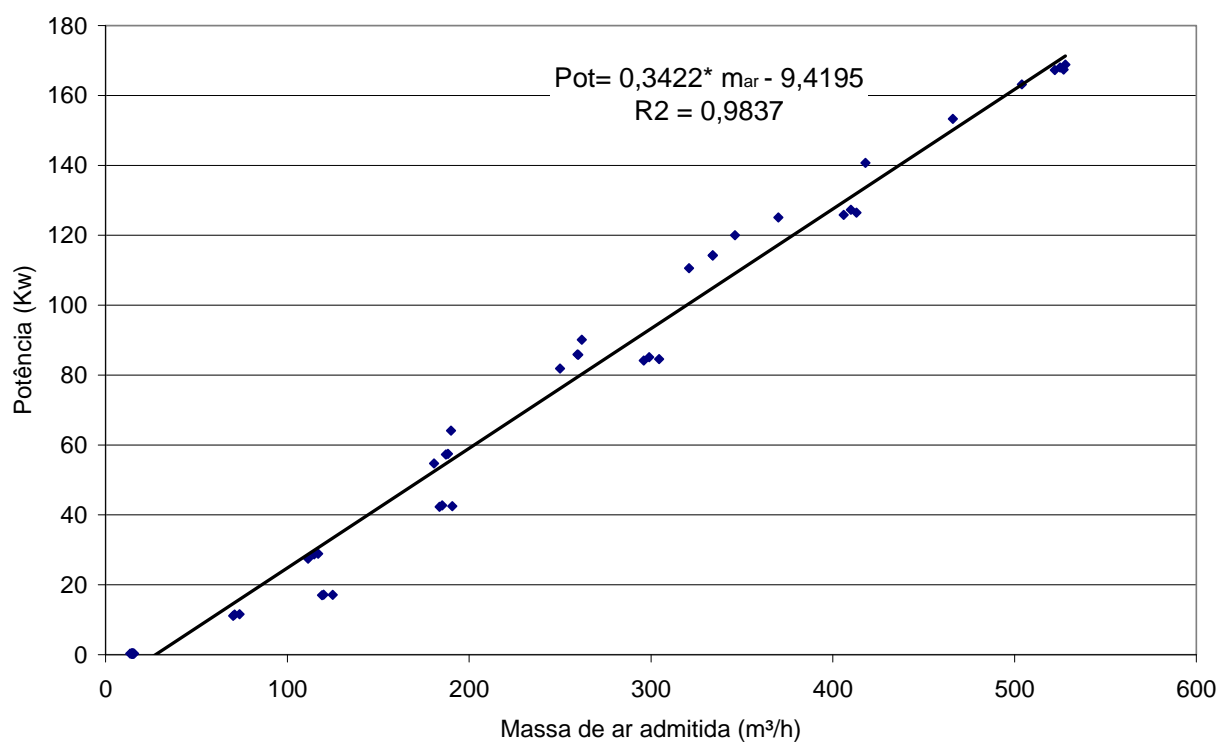
Semana 8	7073
Motorista	3
Segunda	1065
Terça	57
Quarta	76
Quinta	1065
Sexta	57
Sábado	629

Semana 9	7071
Motorista	3
Segunda	76
Terça	1065
Quarta	57
Quinta	76
Sexta	1065
Sábado	625

Semana 9	7072
Motorista	1
Segunda	1065
Terça	57
Quarta	76
Quinta	1065
Sexta	57
Sábado	629

Semana 9	7073
Motorista	2
Segunda	57
Terça	76
Quarta	1065
Quinta	57
Sexta	76
Sábado	683

APÊNDICE H

**RELAÇÃO ENTRE A MASSA DE AR ADMITIDA E A POTÊNCIA DO MOTOR –
TESTE DE DESEMPENHO EM DINAMÔMETRO DE BANCADA – LABORATÓRIO
DO IPT/USP**

APÊNDICE I

METODOLOGIA DE TESTE DE EMISSÃO DE POLUENTES

A metodologia propõe a realização de testes de campo para a caracterização do nível de emissões de poluentes em diferentes modos de operação do veículo, caracterizando os modos comuns de operação de um ônibus comercial em grandes centros urbanos. Propõem-se três diferentes modos de testes: teste sem carga com veículo parado, teste com velocidade constante de deslocamento e teste em condições reais de operação.

Antes da realização de cada teste realiza-se:

- Calibração do analisador de gases através do procedimento padrão com a passagem de gás de referência nos seus condutos internos, como sugerido pelo fabricante. Com o término do teste é verificada novamente a calibração do analisador;

- A temperatura dentro da faixa nominal de operação, ou seja, entre 82 e 96 °C, sendo esta monitorada através de um termopar imerso no óleo do cárter.

- Verificação o correto registros dos sensores componentes do sistema de aquisição de dados, variando os parâmetros e verificando os sinais registrados.

A seguir, são apresentados os três diferentes modos de teste de campo propostos para a determinação do potencial poluidor do GASBUS.

a) Testes sem carga com veículo parado

O teste consiste em realizar a medição da concentração de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) e hidrocarbonetos (HC) na saída do cano de escape do veículo na condição estacionado, sem marcha engrenada e variando somente a rotação do motor dentro da faixa normal de operação.

Operacionalmente o teste consiste em, com o veículo estacionado, estabilizar a rotação do motor conforme desejada, mantendo constante durante um intervalo 2 minutos. Neste período registra-se o valor de emissão dos gases de escape, sendo o resultado final é expresso pela média aritmética dos registros durante os últimos 30 segundos do intervalo de medição. O motor é testado nas rotações de marcha lenta, 1000, 1500, 2000, 2500 RPM.

Os resultados obtidos de emissões são fornecidos diretamente pelo analisador de gases, sendo apresentados na forma de porcentagem do volume molar de CO, CO₂ e HC presentes no cano de escape.

b) Teste Com Carga em Regime Constante

Este teste objetiva registrar os níveis dos gases gerados no escape em regime de carga constante (velocidade constante) com o veículo se deslocando em via plana.

O ciclo de ensaio consiste na aplicação de patamares pré-estabelecidos de velocidades de deslocamento do veículo combinada com diferentes marchas utilizadas, cobrindo a prática operacional de funcionamento típica de um veículo em via rodoviária. Para cada modo operacional escolhido, faz-se o registro durante o período de 120 segundos de emissões. O resultado é obtido pela média aritmética de cada modo.

Os testes serão executados em uma auto-estrada com baixo tráfego, tornando possível estabelecer deslocamentos em regime com velocidade constante conforme planejado. Através do GPS verifica-se a variação de altitude durante o trajeto e, com o registro da posição do acelerador, a variação do ângulo de abertura da borboleta.

Com o valor do registro da massa de ar admitida pelo motor e a relação ar/combustível calcula-se o consumo específico e a massa dos componentes dos gases de escape, através do método de balanço de carbono, conforme descrito na metodologia de cálculo.

c) Teste em condições reais de operação

Para levantamento dos níveis de emissões do veículo circulando em condições reais de operação na região metropolitana de Porto Alegre realiza-se o registro contínuo da concentração dos gases de escape e do modo de operação do ônibus, calculando em tempo real o índice de emissão, em g/km.

Com o GPS são registradas as posições do ônibus durante o itinerário realizado, podendo discretizar os resultados em cada trecho percorrido, verificando o nível de emissões em função do modo de operação do veículo, condições de tráfego ou ainda em função das características do trajeto selecionado.

APÊNDICE J

PROCEDIMENTO DE CÁLCULO DO ÍNDICE DE EMISSÃO DURANTE OS TESTE DE CAMPO DE EMISSÃO DE POLUENTES.

Determina-se a massa total gerada na combustão do GNV comparando a massa de carbono fornecida ao motor através do combustível (GNV) com a massa de carbono associada nos componentes dos gases de escape, conforme a figura B38. Esta metodologia de calculo é chamado de balanço de carbono [Heywood, 1988; Weaver, 2004].

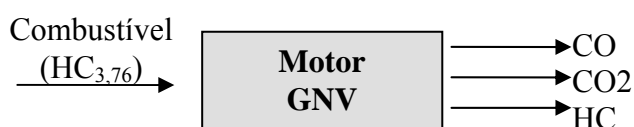


Figura B38: As emissões são calculadas comparando a massa de carbono fornecido ao motor através do GNV com a emitida nos gases de escape.

Desconsiderando a parcela de carbono existente no ar ambiente, o calculo do valor instantâneo de gases emitido é baseado na consideração que todo carbono fornecido ao motor provém do combustível. Então, para determinar a massa de carbono presente no combustível temos:

$$\dot{m}_{C\ comb} = \dot{m}_{comb} * \frac{m_C}{m_{CH_{3,75}}} \quad [g / s] \quad (5.1)$$

Onde:

$\dot{m}_{C\ comb}$ = Vazão mássica de carbono presente no combustível;

\dot{m}_{comb} = Vazão mássica de combustível;

m_C = Massa atômica do carbono (12 kg/mol);

$m_{CH_{3,75}}$ = Massa molecular do GNV (15,75 kg/mol).

Para cálculo da massa de poluentes emitidos considera-se que todas as moléculas de carbono fornecidas pelo combustível, após o processo de combustão, estão presentes nos gases de escapes combinadas na forma de CO, CO₂ e HC. Os hidrocarbonetos nos gases de escape são provenientes da queima incompleta de combustível, sendo considerado a forma CH_{3,75}.

Realizando o balanço químico, comparando o carbono que é fornecido ao motor com o presente nos gases gerados temos:

$$\dot{m}_{CO} = \%CO / (\%CO + \%CO_2 + \%HC) * \dot{m}_{Ccomb} * CO / C \quad (5.2)$$

$$\dot{m}_{CO_2} = \%CO_2 / (\%CO + \%CO_2 + \%HC) * \dot{m}_{Ccomb} * CO_2 / C \quad (5.3)$$

$$\dot{m}_{HC} = \%HC / (\%CO + \%CO_2 + \%HC) * \dot{m}_{Ccomb} * HC / C \quad (5.4)$$

Onde:

\dot{m}_{CO} = Vazão mássica de CO no escape;

\dot{m}_{CO_2} = Vazão mássica de CO₂ no escape;

\dot{m}_{HC} = Vazão mássica de HC no escape;

$\%CO$ = Fração molar de CO no escape;

$\%CO_2$ = Fração molar de CO₂ no escape;

$\%HC$ = Fração molar de HC no escape;

CO = Massa molecular do CO (28 Kg/mol);

CO_2 = Massa molecular do CO₂ (44 Kg/mol);

HC = Massa molecular do HC (3,75 Kg/mol);

Com a massa total de cada poluente emitido, o resultado do teste de emissões pode ser expresso em função da distância percorrida (g/km) ou em função da energia consumida durante o trajeto (g/kw).

APÊNDICE K

TABELAS DIÁRIAS DE OPERAÇÃO DOS ÔNIBUS ANALISADOS

Tabela B8: Agenda diária de operação do ônibus 7071.

	out 04	Nov 04	Dez 04	Jan 05	Fev 05	Mar 05	Abr 05	Mai 05	Jun 05	Jul 05	Ago 05	Set 05	
1	Sex	seg	qua	sab	ter	ter	sex	Dom	qua	sex	seg	qui	
2	Sáb	ter	qui	Dom	qua	qua	sab	seg	qui	sáb	ter	sex	
3	Dom	qua	sex	seg	qui	qui	Dom	ter	sex	Dom	qua	sáb	
4	Seg	qui	sáb	ter	sex	sex	seg	qua	sáb	seg	qui	Dom	
5	Ter	sex	Dom	qua	sáb	sáb	ter	qui	Dom	ter	sex	seg	
6	Qua	sáb	seg	qui	Dom	Dom	qua	sex	seg	qua	sáb	ter	
7	Qui	Dom	ter	sex	seg	seg	qui	sáb	ter	qui	Dom	qua	
8	Sex	seg	qua	sáb	ter	ter	sex	Dom	qua	sex	seg	qui	
9	Sáb	ter	qui	Dom	qua	qua	sáb	seg	qui	sáb	ter	sex	
10	Dom	qua	sex	seg	qui	qui	Dom	ter	sex	Dom	qua	sáb	
11	Seg	qui	sáb	ter	sex	sex	seg	qua	sáb	seg	qui	Dom	
12	Ter	sex	Dom	qua	sáb	sáb	ter	qui	Dom	ter	sex	seg	
13	Qua	sáb	seg	qui	Dom	Dom	qua	sex	seg	qua	sáb	ter	
14	Qui	Dom	ter	sex	seg	seg	qui	sáb	ter	qui	Dom	qua	
15	Sex	seg	qua	sáb	ter	ter	sex	Dom	qua	sex	seg	qui	
16	Sáb	ter	qui	Dom	qua	qua	sáb	seg	qui	sáb	ter	sex	
17	Dom	qua	sex	seg	qui	qui	Dom	ter	sex	Dom	qua	sáb	
18	Seg	qui	sáb	ter	sex	sex	seg	qua	sáb	seg	qui	Dom	
19	Ter	sex	Dom	qua	sáb	sáb	ter	qui	Dom	ter	sex	seg	
20	Qua	sáb	seg	qui	Dom	Dom	qua	sex	seg	qua	sáb	ter	
21	Qui	Dom	ter	sex	seg	seg	qui	sáb	ter	qui	Dom	qua	
22	Sex	seg	qua	sáb	ter	ter	sex	Dom	qua	sex	seg	qui	
23	Sáb	ter	qui	Dom	qua	qua	sáb	seg	qui	sáb	ter	sex	
24	Dom	qua	sex	seg	qui	qui	Dom	ter	sex	Dom	qua	sáb	
25	Seg	qui	sáb	ter	sex	sex	seg	qua	sáb	seg	qui	Dom	
26	Ter	sex	Dom	qua	sáb	sáb	ter	qui	Dom	ter	sex	seg	
27	Qua	sáb	seg	qui	Dom	Dom	qua	sex	seg	qua	sáb	ter	
28	Qui	Dom	ter	sex	seg	seg	qui	sáb	ter	qui	Dom	qua	
29	Sex	qua	qua	sáb			ter	sex	Dom	qua	sex	seg	qui
30	Sáb	qui	qui	Dom			qua	sáb	seg	qui	sáb	ter	sex
31	Dom		sex	seg			qui		ter		qua		

- Veículo trafegando em condições normais de operação;
- Veículo disponível, mas não utilizado em linha comercial;
- Veículo parado para manutenção

Tabela B9: Agenda diária de operação do ônibus 7072 (GASBUS).

	Out 04	Nov 04	Dez 04	Jan 05	Fev 05	Mar 05	Abr 05	Mai 05	Jun 05	Jul 05	Ago 05	Set 05
1		seg	qua	sáb	ter	ter	sex	Dom	qua	sex	seg	qui
2		ter	qui	Dom	qua	qua	sáb	seg	qui	sáb	ter	sex
3	Dom	qua	sex	seg	qui	qui	Dom	ter	sex	Dom	qua	sáb
4	seg	qui	sáb	ter	sex	sex	seg	qua	sáb	seg	qui	Dom
5	ter	sex	Dom	qua	sáb	sáb	ter	qui	Dom	ter	sex	seg
6	qua	sáb	seg	qui	Dom	Dom	qua	sex	seg	qua	sáb	ter
7	qui	Dom	ter	sex	seg	seg	qui	sáb	ter	qui	Dom	qua
8	sex	seg	qua	sáb	ter	ter	sex	Dom	qua	sex	seg	qui
9	sáb	ter	qui	Dom	qua	qua	sáb	seg	qui	sáb	ter	sex
10	Dom	qua	sex	seg	qui	qui	Dom	ter	sex	Dom	qua	sáb
11	seg	qui	Sáb	ter	sex	sex	seg	qua	sáb	seg	qui	Dom
12	ter	sex	Dom	qua	sáb	sáb	ter	qui	Dom	ter	sex	seg
13	qua	sáb	seg	qui	Dom	Dom	qua	sex	seg	qua	sáb	ter
14	qui	Dom	ter	sex	seg	seg	qui	sáb	ter	qui	Dom	qua
15	sex	seg	qua	sáb	ter	ter	sex	Dom	qua	sex	seg	qui
16	sáb	ter	qui	Dom	qua	qua	sáb	seg	qui	sáb	ter	sex
17	Dom	qua	sex	seg	qui	qui	Dom	ter	sex	Dom	qua	sáb
18	seg	qui	sáb	ter	sex	sex	seg	qua	sáb	seg	qui	Dom
19	ter	sex	Dom	qua	sáb	sáb	ter	qui	Dom	ter	sex	seg
20	qua	sáb	seg	qui	Dom	Dom	qua	sex	seg	qua	sáb	ter
21	qui	Dom	ter	sex	seg	seg	qui	sáb	ter	qui	Dom	qua
22	sex	seg	qua	sáb	ter	ter	sex	Dom	qua	sex	seg	qui
23	sáb	ter	qui	Dom	qua	qua	sáb	seg	qui	sáb	ter	sex
24	Dom	qua	sex	seg	qui	qui	Dom	ter	sex	Dom	qua	sáb
25	seg	qui	sáb	ter	sex	sex	seg	qua	sáb	seg	qui	Dom
26	ter	sex	Dom	qua	sáb	sáb	ter	qui	Dom	ter	sex	seg
27	qua	sáb	seg	qui	Dom	Dom	qua	sex	seg	qua	sáb	ter
28	qui	Dom	ter	sex	seg	seg	qui	sáb	ter	qui	Dom	qua
29	sex	qua	qua	sáb		ter	sex	Dom	qua	sex	seg	qui
30	sáb	qui	qui	Dom		qua	sáb	seg	qui	sáb	ter	sex
31	Dom		sex	seg		qui		ter		qua		

- Veículo trafegando em condições normais de operação;
- Veículo disponível, mas não utilizado em linha comercial;
- Veículo parado para manutenção;
- Parada programada para *Upgrade* do kit de conversão;
- Paradas programadas para teste de campo, inspeção do veículo ou apresentações do projeto.
- Participação no Fórum Social Mundial, com visita do Presidente Lula.
- Participação na Marcha dos Prefeitos em Brasília;

Tabela B10: Agenda diária de operação do ônibus 7073.

	Out 04	Nov 04	Dez 04	Jan 05	Fev 05	Mar 05	Abr 05	Mai 05	Jun 05	Jul 05	Ago 05	Set 05
1		seg	qua	sáb	ter	ter	sex	Dom	qua	sex	seg	qui
2		ter	qui	Dom	qua	qua	sáb	seg	qui	sáb	ter	sex
3	Dom	qua	sex	seg	qui	qui	Dom	ter	sex	Dom	qua	sáb
4	seg	qui	sáb	ter	sex	sex	seg	qua	sáb	seg	qui	Dom
5	ter	sex	Dom	qua	sáb	sáb	ter	qui	Dom	ter	sex	seg
6	qua	sáb	seg	qui	Dom	Dom	qua	sex	seg	qua	sáb	ter
7	qui	Dom	ter	sex	seg	seg	qui	sáb	ter	qui	Dom	qua
8	sex	seg	qua	sáb	ter	ter	sex	Dom	qua	sex	seg	qui
9	sáb	ter	qui	Dom	qua	qua	sáb	seg	qui	sáb	ter	sex
10	Dom	qua	sex	seg	qui	qui	Dom	ter	sex	Dom	qua	sáb
11	seg	qui	Sáb	ter	sex	sex	seg	qua	sáb	seg	qui	Dom
12	ter	sex	Dom	qua	sáb	sáb	ter	qui	Dom	ter	sex	seg
13	qua	sáb	seg	qui	Dom	Dom	qua	sex	seg	qua	sáb	ter
14	qui	Dom	ter	sex	seg	seg	qui	sáb	ter	qui	Dom	qua
15	sex	seg	qua	sáb	ter	ter	sex	Dom	qua	sex	seg	qui
16	sáb	ter	qui	Dom	qua	qua	sáb	seg	qui	sáb	ter	sex
17	Dom	qua	sex	seg	qui	qui	Dom	ter	sex	Dom	qua	sáb
18	seg	qui	sáb	ter	sex	sex	seg	qua	sáb	seg	qui	Dom
19	ter	sex	Dom	qua	sáb	sáb	ter	qui	Dom	ter	sex	seg
20	qua	sáb	seg	qui	Dom	Dom	qua	sex	seg	qua	sáb	ter
21	qui	Dom	ter	sex	seg	seg	qui	sáb	ter	qui	Dom	qua
22	sex	seg	qua	sáb	ter	ter	sex	Dom	qua	sex	seg	qui
23	sáb	ter	qui	Dom	qua	qua	sáb	seg	qui	sáb	ter	sex
24	Dom	qua	sex	seg	qui	qui	Dom	ter	sex	Dom	qua	sáb
25	seg	qui	sáb	ter	sex	sex	seg	qua	sáb	seg	qui	Dom
26	ter	sex	Dom	qua	sáb	sáb	ter	qui	Dom	ter	sex	seg
27	qua	sáb	seg	qui	Dom	Dom	qua	sex	seg	qua	sáb	ter
28	qui	Dom	ter	sex	seg	seg	qui	sáb	ter	qui	Dom	qua
29	sex	qua	qua	sáb		ter	sex	Dom	qua	sex	seg	qui
30	sáb	qui	qui	Dom		qua	sáb	seg	qui	sáb	ter	sex
31	Dom		sex	seg		qui		ter			qua	

- Veículo trafegando em condições normais de operação;
- Veículo disponível, mas não utilizado em linha comercial;
- Veículo parado para manutenção

APÊNDICE L

DADOS OPERACIONAIS DOS VEÍCULOS ANALISADOS DURANTE OS TESTES DE CAMPO

- A) **Custo com manutenção:** engloba os custos com peças de reposição utilizada na manutenção dos veículos, expresso em R\$.
- B) **Custo com diesel:** representa o total de diesel consumido pelo veículo no mês, em litros, multiplicado pelo preço do litro do diesel, expresso em R\$.
- C) **Custo com pneus:** representa os custos com troca ou reparos nos pneus e aros, expresso em R\$.
- D) **Total (A+B+C):** engloba a soma dos custos com peças de reposição, pneus e com combustível, expresso em R\$.
- E) **Custo com chapeação:** representa o custo com material utilizado em reparos no setor de chapeação, incluindo bancos, pintura e reparos na lataria, expresso em R\$.
- F) **Km rodada mês:** representa a distância operada total no mês, expresso em km.
- G) **Consumo em litros de diesel:** representa o consumo total de combustível, expresso em litros;
- H) **Mão-de-obra:** representa o custo total de mão de obra empregado, sendo computado no sistema informatizado o tempo gasto por operador na manutenção do carro multiplicado pelo valor da hora de trabalho estabelecido pela gerência da empresa, expresso em R\$.

Carro	dez/04	jan/05	fev/05	mar/05	abr/05	mai/05	jun/05	jul/05	ago/05	set/05	MÉDIA	
7064	A - Custo c/ manutenção	2.195,52	866,79	6.285,92	1.836,99	856,13	2.392,60	519,85	766,82	615,32	3.087,07	1.942,30
	E - Custo c/ óleo Diesel	3.780,44	2.810,85	2.409,98	3.767,92	3.525,01	3.694,38	4.019,64	4.151,91	4.091,94	4.079,01	3.633,11
	B - Custo c/ Pneu	0,00	2.586,02	0,00	0,00	3.302,94	53,20	0,00	97,10	2.654,72	0,00	869,40
	C - Custo c/ Chapeação	29,34	300,86	80,20	7,00	299,10	309,65	10,78	0,00	25,00	2,00	106,39
	D - Total (A + B + C)	6.005,30	6.564,52	8.776,10	5.611,91	7.983,18	6.449,83	4.550,27	5.015,83	7.386,98	7.168,08	6.551,20
	F - Km Rodada Mês	6.013,44	4.278,84	3.779,88	6.259,81	5.981,87	6.191,45	6.694,82	6.733,97	6.732,30	6.316,71	5.898,31
	G - Consumo em Litros Diesel	2.351,16	1.767,00	1.517,28	2.372,17	2.219,20	2.296,68	2.495,44	2.577,40	2.595,50	2.436,72	2.262,86
	H - Mão-de-obra	1.795,80	2.157,49	2.251,18	628,06	728,32	1.648,78	987,44	562,66	2.395,11	1.184,08	1.433,89
	A - Custo c/ manutenção	2.503,94	6.615,63	1.724,18	304,35	21,70	678,99	856,21	629,50	1.059,94	4.899,13	1.929,36
	E - Custo c/ óleo Diesel	3.482,28	2.811,23	3.117,67	4.187,75	3.823,59	4.023,21	3.528,71	4.149,02	4.429,45	3.502,55	3.705,55
	B - Custo c/ Pneu	0,00	2.803,42	1.415,18	0,00	0,00	0,00	0,00	47,02	2.654,72	0,00	692,03
	C - Custo c/ Chapeação	0,00	0,00	0,00	52,55	30,78	6,00	0,00	272,65	40,50	11,24	41,37
D - Total (A + B + C)	5.986,22	12.230,28	6.257,03	4.544,65	3.876,07	4.708,20	4.384,92	5.098,19	8.184,61	8.412,92	6.368,31	
F - Km Rodada Mês	6.123,65	4.850,93	5.819,06	7.576,02	7.014,27	7.246,90	6.657,57	7.352,02	7.906,45	6.031,29	6.657,82	
G - Consumo em Litros Diesel	2.165,76	1.765,84	1.962,80	2.636,50	2.407,16	2.500,28	2.190,68	2.575,56	2.812,80	2.081,48	2.309,89	
H - Mão-de-obra	980,48	2.772,74	492,16	915,17	516,78	702,89	1.423,86	1.412,67	474,15	1.705,15	1.139,61	
A - Custo c/ manutenção	9.674,43	3.595,42	512,11	247,21	213,11	234,41	989,59	801,54	2.594,48	551,70	1.941,40	
E - Custo c/ óleo Diesel	2.392,61	2.999,05	2.641,40	3.092,20	2.955,98	3.201,12	3.112,43	3.019,44	3.154,18	3.006,49	2.957,49	
B - Custo c/ Pneu	2.586,02	653,37	0,00	72,00	0,00	0,00	374,77	0,00	0,00	3,75	368,99	
C - Custo c/ Chapeação	102,99	5,00	0,00	43,95	20,80	2,58	0,00	19,80	35,00	268,19	49,83	
D - Total (A + B + C)	14.756,05	7.252,84	3.153,51	3.455,36	3.189,89	3.438,11	4.476,79	3.840,78	5.783,66	3.830,13	5.317,71	
F - Km Rodada Mês	3.665,21	4.835,92	4.318,81	5.299,75	5.141,03	5.290,81	5.232,62	4.879,45	5.226,20	4.582,37	4.847,22	
G - Consumo em Litros Diesel	1.488,04	1.883,92	1.662,96	1.946,76	1.860,96	1.989,04	1.932,24	1.874,36	2.004,13	1.785,20	1.842,76	
H - Mão-de-obra	2.633,79	849,58	1.199,42	495,27	497,46	385,86	825,75	894,22	2.824,41	1.087,14	1.169,29	

Carro	dez/04	jan/05	fev/05	mar/05	abr/05	mai/05	jun/05	jul/05	ago/05	set/05	MÉDIA	
7067	A - Custo c/ manutenção	406,67	643,45	870,66	263,04	1.762,88	895,35	249,54	3.940,62	4.010,15	2.044,75	1.508,71
	E - Custo c/ óleo Diesel	3.080,17	2.685,61	2.509,47	3.031,73	2.505,68	2.818,21	2.676,51	2.108,80	2.464,72	2.682,10	2.656,30
	B - Custo c/ Pneu	0,00	60,50	2.586,02	0,00	505,10	0,00	0,00	0,30	0,00	0,00	315,19
	C - Custo c/ Chapeação	0,00	77,40	41,90	0,00	0,00	9,00	124,95	470,92	289,45	34,00	104,76
	D - Total (A + B + C)	3.486,84	3.466,96	6.008,05	3.294,77	4.773,66	3.722,56	3.051,00	6.520,64	6.764,32	4.760,85	4.584,97
	F - Km Rodada Mês	5.465,88	5.072,92	4.476,85	5.700,92	4.610,15	5.105,61	4.815,41	3.776,91	4.033,83	4.062,41	4.712,09
	G - Consumo em Litros Diesel	1.915,66	1.687,92	1.579,90	1.908,68	1.577,44	1.752,16	1.661,60	1.309,08	1.566,20	1.589,84	1.654,85
	H - Mão-de-obra	498,74	669,96	825,74	1.336,86	1.078,95	928,15	841,45	4.079,27	2.242,61	1.614,27	1.411,60
	E - Custo c/ óleo Diesel	2.750,21	3.052,72	2.779,91	2.620,90	3.002,59	3.360,37	2.793,23	3.528,03	3.410,54	3.064,02	3.036,25
	B - Custo c/ Pneu	1.079,31	0,00	0,00	0,00	89,90	2.676,02	1,04	66,80	0,00	0,00	391,31
	C - Custo c/ Chapeação	296,50	0,00	19,70	79,20	0,00	19,00	1.017,29	0,00	161,00	7,00	159,97
	D - Total (A + B + C)	4.343,80	3.267,76	3.005,22	7.030,37	3.579,13	6.418,18	5.084,88	3.959,02	4.188,66	3.867,38	4.474,44
F - Km Rodada Mês	4.351,29	4.869,48	4.132,33	3.973,75	4.743,52	5.022,12	4.147,51	5.292,77	5.138,26	4.404,69	4.607,57	
G - Consumo em Litros Diesel	1.710,44	1.918,52	1.750,16	1.650,04	1.890,32	2.088,68	1.734,08	2.190,08	2.165,80	1.835,24	1.893,34	
H - Mão-de-obra	1.192,61	655,51	1.148,38	2.063,61	1.531,01	385,86	2.233,91	653,08	2.960,24	653,50	1.347,77	
A - Custo c/ manutenção	181,68	11.768,25	38,49	230,22	149,37	985,87	1.170,38	1.304,73	1.428,02	569,62	1.782,66	
E - Custo c/ óleo Diesel	2.577,98	1.942,45	1.952,78	2.425,60	2.546,98	2.503,40	2.922,36	3.077,35	3.095,43	3.465,26	2.650,96	
B - Custo c/ Pneu	0,00	0,00	0,00	0,00	2.676,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	267,63	
C - Custo c/ Chapeação	0,00	29,00	6,00	22,56	0,00	0,00	26,50	468,22	30,60	0,00	58,29	
D - Total (A + B + C)	2.759,66	13.739,70	1.997,27	2.678,38	5.372,67	3.489,27	4.119,24	4.850,30	4.554,05	4.034,88	4.759,54	
F - Km Rodada Mês	4.710,09	3.542,66	3.770,56	4.635,63	4.358,67	4.354,65	5.235,24	5.563,79	5.850,35	5.942,20	4.796,38	
G - Consumo em Litros Diesel	1.603,32	1.219,48	1.229,40	1.527,08	1.603,48	1.556,32	1.814,24	1.910,32	1.964,79	2.059,08	1.648,75	
H - Mão-de-obra	307,67	3.380,76	264,31	376,83	523,54	743,57	1.522,76	2.435,50	602,30	856,90	1.101,41	
A - Custo c/ manutenção	1.302,07	80,31	289,73	89,01	208,25	372,65	171,14	569,19	136,11	1.760,83	497,93	
E - Custo c/ óleo Diesel	2.357,12	2.628,21	2.185,68	2.255,68	2.580,10	2.680,53	2.752,92	2.734,59	2.599,08	2.885,67	2.565,96	
B - Custo c/ Pneu	0,00	0,00	0,00	19,94	2.676,02	0,00	0,00	0,00	0,00	545,07	324,10	
C - Custo c/ Chapeação	0,00	0,00	0,00	7,94	0,00	87,00	0,00	0,00	0,00	141,72	23,67	
D - Total (A + B + C)	3.659,19	2.708,52	2.475,41	2.372,57	5.464,37	3.140,18	2.924,06	3.303,78	2.735,19	5.333,29	3.411,66	
F - Km Rodada Mês	4.189,85	4.566,23	3.879,50	4.017,72	4.354,39	4.426,45	4.641,60	4.699,75	4.606,10	4.661,33	4.404,29	
G - Consumo em Litros Diesel	1.465,96	1.651,16	1.376,04	1.420,11	1.624,32	1.666,16	1.709,04	1.697,52	1.650,48	1.722,52	1.598,33	
H - Mão-de-obra	518,18	144,52	145,83	726,75	299,44	1.338,00	353,22	673,18	897,04	1.250,73	634,69	

carro	dez/04	jan/05	fev/05	mar/05	abr/05	mai/05	jun/05	jul/05	ago/05	set/05	MÉDIA	
7071	A - Custo c/ manutenção	181,40	308,78	231,66	1.156,97	77,69	3.589,79	668,38	272,95	237,79	686,42	
	E - Custo c/ óleo Diesel	2.683,44	2.281,02	1.924,43	2.248,92	2.192,44	2.399,26	2.374,19	2.743,33	2.884,51	2.429,08	
	B - Custo c/ Pneus	0,00	0,00	0,00	18,36	0,00	0,00	94,95	0,00	0,00	11,33	
	C - Custo c/ Chapeação	0,00	0,38	7,40	0,00	198,49	73,04	83,68	90,98	0,00	45,40	
	D - Total (A + B + C)	2.864,84	2.590,18	2.163,49	3.424,25	2.468,62	2.771,05	6.072,73	3.228,50	3.016,28	3.122,30	3.172,22
	F - Km Rodada Mês	4.281,24	3.716,06	3.192,07	3.746,93	3.651,86	4.260,43	3.567,64	3.380,51	4.187,19	3.995,56	3.797,95
	G - Consumo em Litros Diesel	1.668,92	1.433,52	1.211,56	1.415,85	1.380,28	1.590,68	1.489,48	1.473,84	1.741,60	1.720,96	1.512,67
	H - Mão-de-obra	400,78	469,69	1.244,99	739,31	1.149,46	479,72	1.510,21	1.466,93	653,56	251,01	836,57
	A - Custo c/ manutenção	502,08	581,24	105,59	136,52	92,76	142,98	440,84	112,26	609,70	669,24	339,32
	E - Custo c/ óleo Diesel /Gás	0,00	0,00	0,00							0,00	0,00
	B - Custo c/ Pneus	0,00	0,00	0,00	3.537,81	0,00	0,00	0,00	0,00	546,25	545,70	462,98
C - Custo c/ Chapeação	0,00	280,00	287,40	97,45	131,28	0,00	7,00	13,80	21,79	7,80	84,65	
D - Total (A + B + C)	502,08	861,24	392,99	3.771,78	224,04	142,98	447,84	126,06	1.177,74	1.222,74	886,95	
F - Km Rodada Mês	3.840,00	2.815,00	2.111,00	2.097,00	2.489,00	3.008,00	3.984,00	3.485,18	5.777,00	6.567,97	3.617,42	
G - Consumo em Litros Diesel	1.935,43	1.362,12	1.058,91	1.065,23	1.239,46	1.425,59	1.960,62	1.809,39	2.692,02	2.849,49	1.739,83	
H - Mão-de-obra	529,51	1.362,63	1.266,86	1.046,16	342,91	580,88	274,73	608,88	2.941,02	676,00	962,96	
A - Custo c/ manutenção	2.306,57	474,99	500,81	63,42	1.175,67	523,98	85,55	282,34	990,55	3.845,69	1.024,96	
E - Custo c/ óleo Diesel	2.481,50	2.511,59	2.439,73	2.438,68	2.554,48	2.505,49	2.513,37	2.500,26	2.954,11	2.312,56	2.521,18	
B - Custo c/ Pneus	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3.594,72	0,00	359,47	
C - Custo c/ Chapeação	84,31	0,16	0,00	189,47	34,20	213,32	45,00	0,00	25,50	28,00	62,00	
D - Total (A + B + C)	4.872,38	2.986,74	2.940,54	2.691,57	3.764,35	3.242,79	2.643,92	2.782,60	7.564,88	6.186,25	3.967,60	
F - Km Rodada Mês	3.896,89	3.918,10	4.035,54	3.948,95	4.056,28	3.917,35	3.723,96	3.916,96	4.311,53	3.163,68	3.888,92	
G - Consumo em Litros Diesel	1.543,32	1.577,88	1.536,00	1.533,44	1.608,20	1.557,28	1.560,32	1.552,08	1.875,64	1.376,52	1.572,07	
H - Mão-de-obra	1.441,17	263,23	455,71	1.028,22	719,62	2.322,47	384,62	823,89	630,49	1.107,91	917,73	
A - Custo c/ manutenção	921,31	178,22	175,56	1.271,07	632,42	1.274,97	1.289,82	991,70	2.818,17	147,68	970,09	
E - Custo c/ óleo Diesel	3.110,63	3.063,95	2.667,65	2.981,51	3.119,11	3.219,89	2.891,91	2.425,44	2.586,76	2.457,86	2.852,47	
B - Custo c/ Pneus	3.766,61	0,00	0,00	0,00	0,00	1.067,50	0,00	3,75	0,00	0,00	483,79	
C - Custo c/ Chapeação	87,84	37,50	12,34	32,40	0,00	0,62	50,54	409,24	0,00	25,50	65,60	
D - Total (A + B + C)	7.886,39	3.279,67	2.855,55	4.284,98	3.751,53	5.562,98	4.232,27	3.830,13	5.404,93	2.631,04	4.371,95	
F - Km Rodada Mês	5.357,56	5.483,95	4.432,52	5.159,90	5.552,73	5.565,01	5.241,38	4.348,79	4.779,85	4.238,23	5.015,99	
G - Consumo em Litros Diesel	1.934,60	1.926,32	1.679,48	1.877,07	1.963,64	2.000,52	1.795,32	1.505,64	1.642,67	1.465,20	1.779,05	
H - Mão-de-obra	1.110,03	676,15	783,81	1.220,22	531,27	1.130,47	1.616,96	1.963,27	294,74	527,99	985,49	

APÊNDICE M

MAPAS OPERACIONAIS REGISTRADOS ATRAVÉS DO SISTEMA DE INSTRUMENTAÇÃO EMBARCADA UTILIZADO NOS TESTES DE EMISSÃO DE POLUENTES.

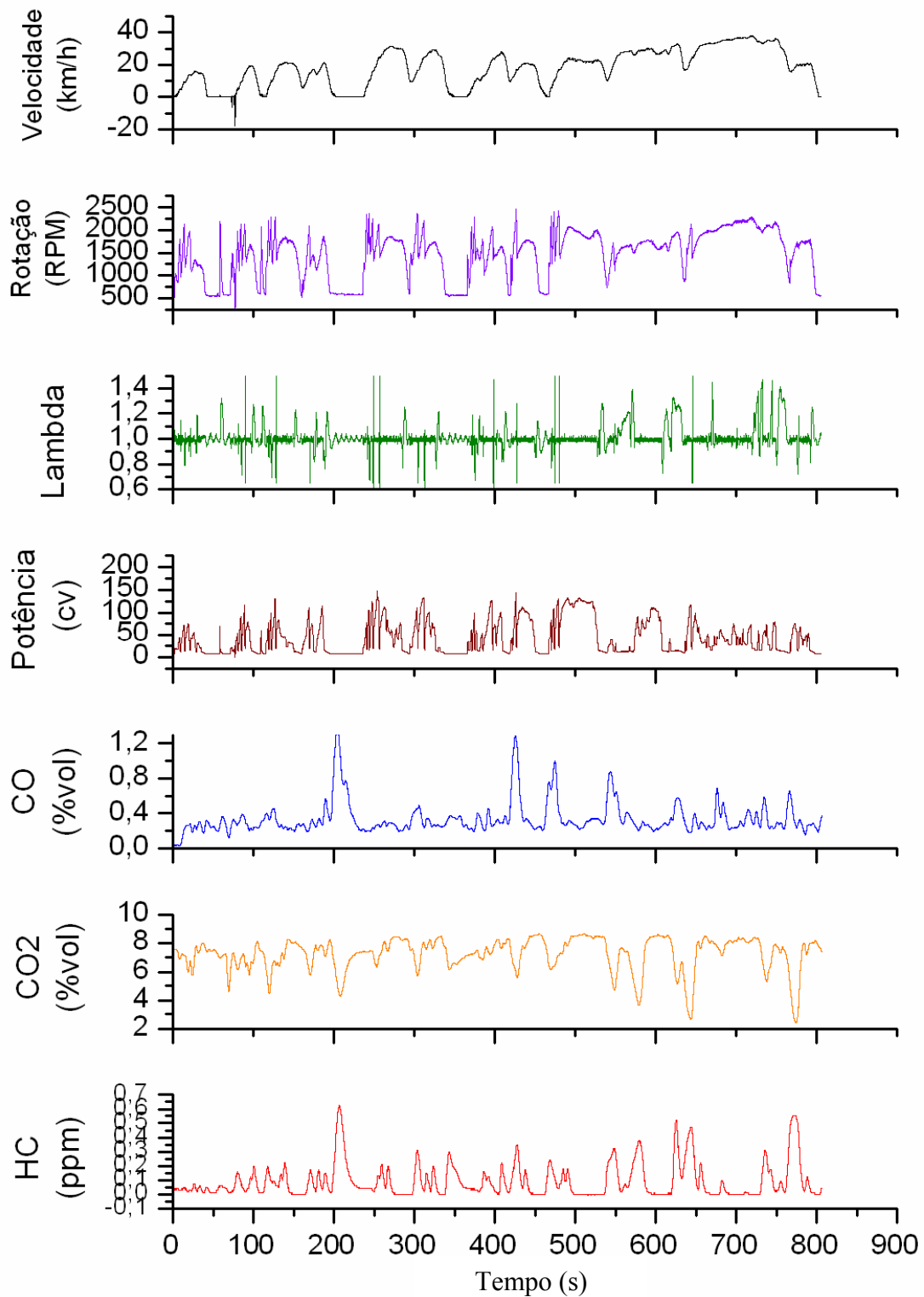


Figura B39: Mapa Operacional do teste de emissão Agosto/Setembro – Trajeto 1 – Repetição 1

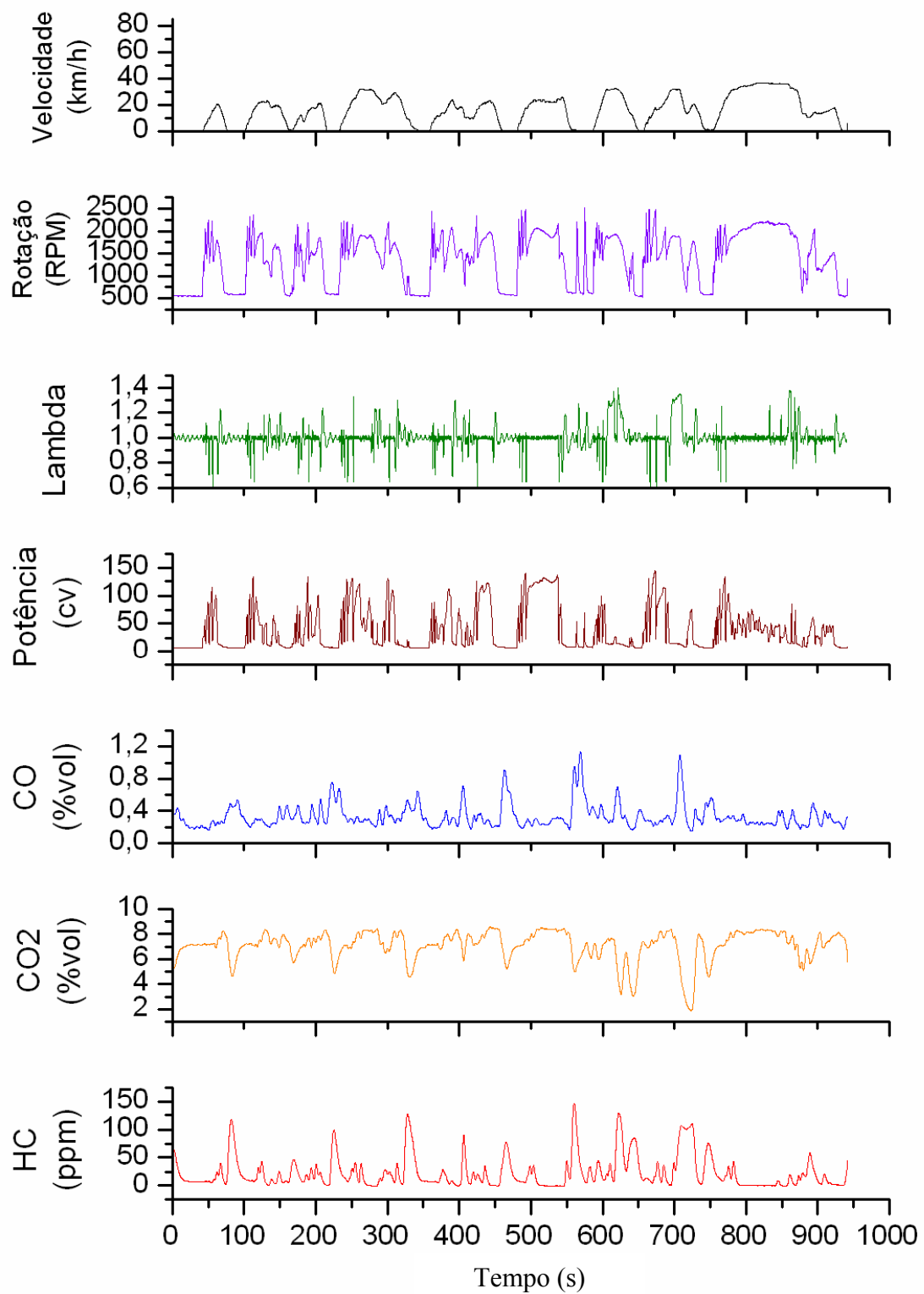


Figura B40: Mapa Operacional do teste de emissão Agosto/Setembro – Trajeto 1 – Repetição 2

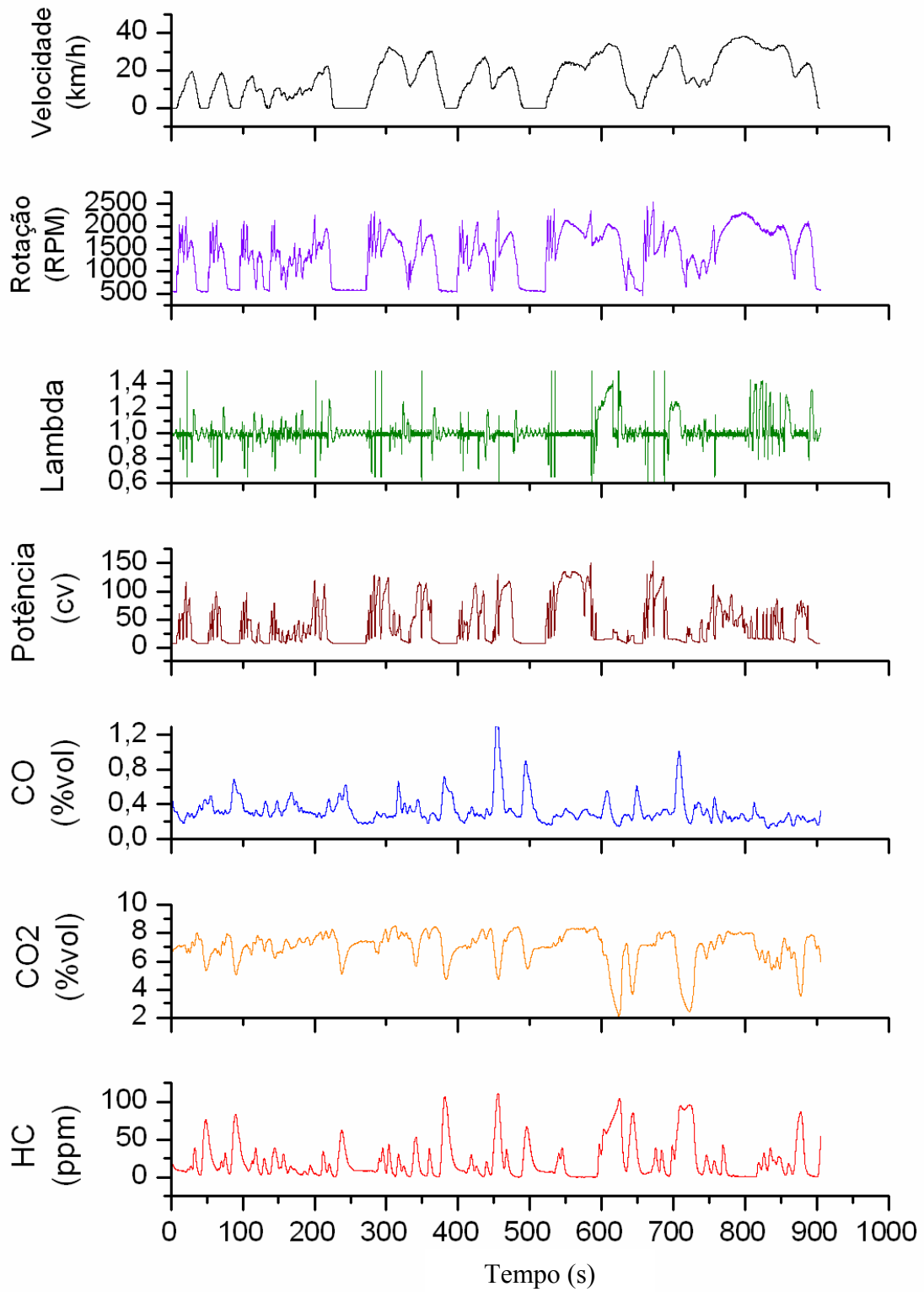


Figura B41: Mapa Operacional do teste de emissão Agosto/Setembro – Trajeto 1 – Repetição 3

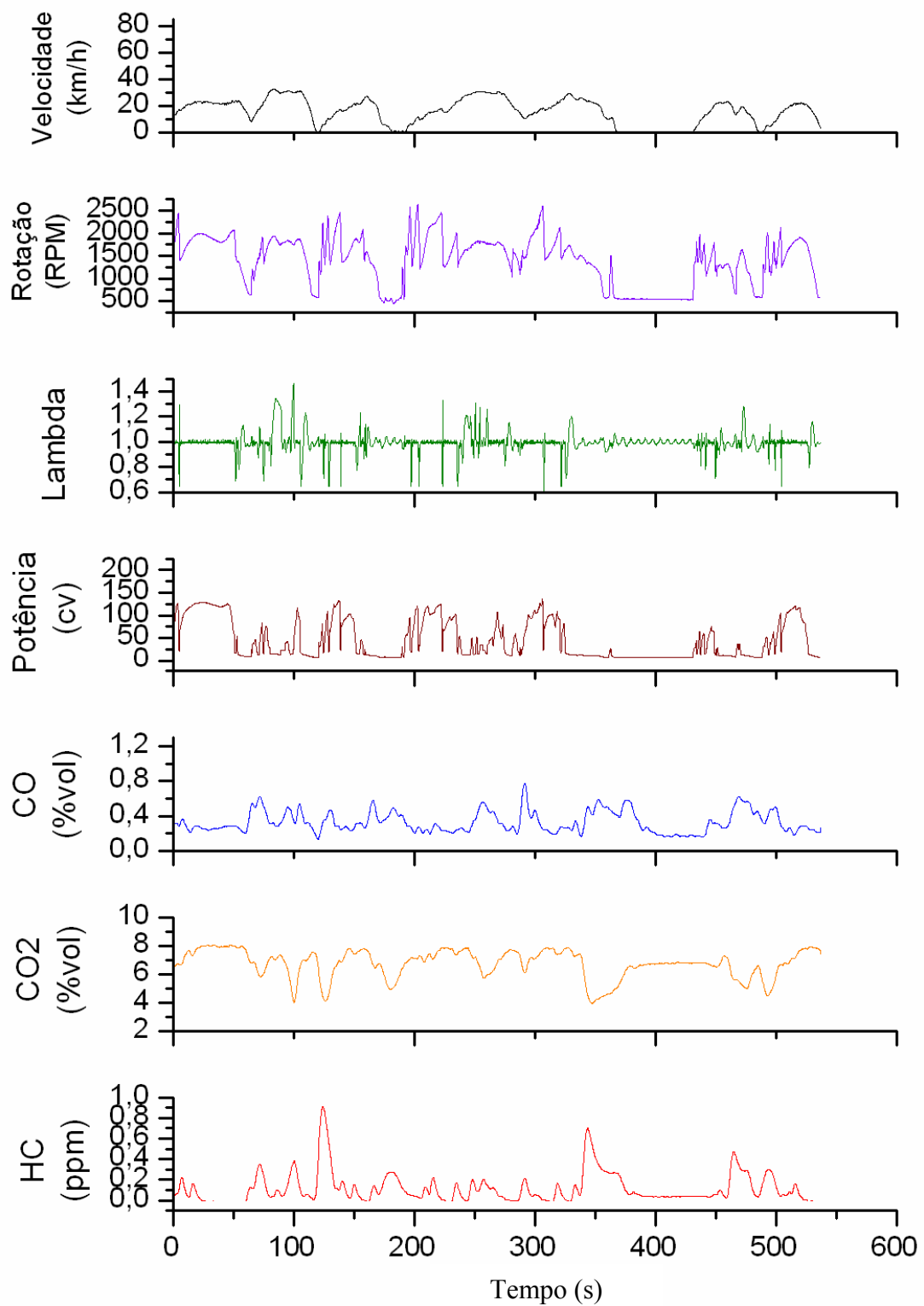


Figura B42: Mapa Operacional do teste de emissão Agosto/Setembro – Trajeto 2 – Repetição 1

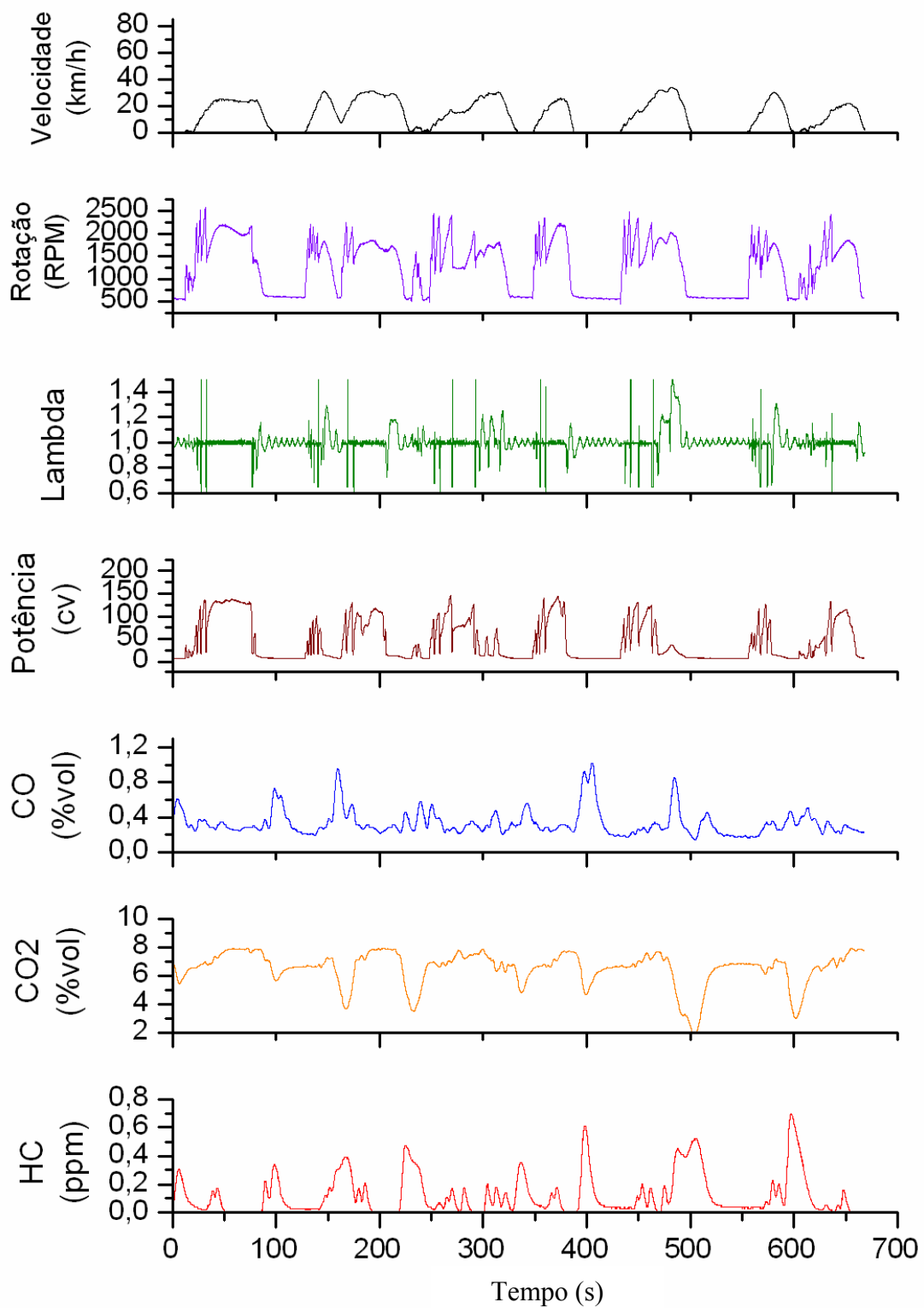


Figura B43: Mapa Operacional do teste de emissão Agosto/Setembro – Trajeto 2 – Repetição 2

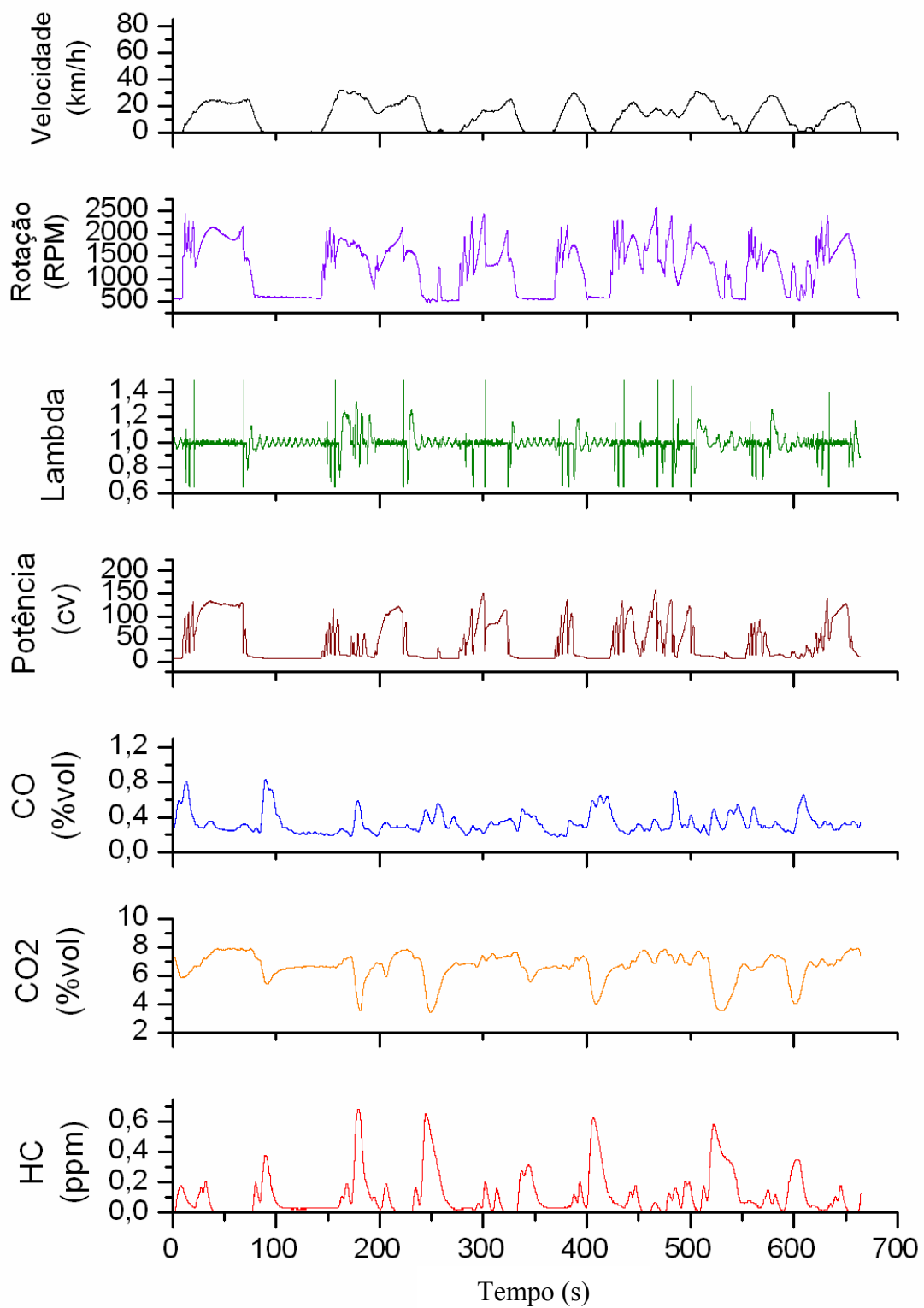


Figura B44: Mapa Operacional do teste de emissão Agosto/Setembro – Trajeto 2 – Repetição 3

APÊNDICE N

VEÍCULOS UTILIZADOS PARA A COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DOS TESTES DE EMISSÕES DE POLUENTES.

Veículo	Chassi	Motor	Ano de produção	Sistema de pós-tratamento de gases de escape
Diesel EURO 0	MAN SL 200	MAN D2866	1985	Nenhum
Diesel EURO 1	Van Hool A300D	MAN D0826LOH07	1993	Nenhum
Diesel EURO 2	MB O530 Citaro	OM 906hLA	1988	CRT ¹
GNV 1 ²	Van Hool A330 NGV	MAN E2866LUH01 lean burn ²	1999	Catalisador
GNV 2 ³	IVECO 490.12	IVECO 8469.21 ³	1998	Catalisador de 3 vias
GASBUS ²	OH1721	OM366LA, convertido para GNV	1999	Nenhum

¹ Continuous Regeneration Trap

² Sistema de controle de combustível realimentado, com mistura ar/GNV antes do coletor por meio de mesclador.

³ Sistema de controle de combustível realimentado, injeção multiponto seqüencial.