

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

ANÁLISE DE VEÍCULOS CONVERTIDOS PARA O USO DO COMBUSTÍVEL GÁS
NATURAL

por

Giovani Pelliza

Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre, fevereiro de 2003.

ANÁLISE DE VEÍCULOS CONVERTIDOS PARA O USO DO COMBUSTÍVEL GÁS
NATURAL

por

Giovani Pelliza
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 obtenção do título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Energia

Orientador: Prof. Dr. Pedro Barbosa Mello – PROMEC, UFRGS

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Volnei Borges – PROMEC, UFRGS

Prof. Dr. Gilnei Carvalho Ocácia – PPGEAM, ULBRA

Prof. Dr. Renato Cataluña Veses – Instituto de Química, UFRGS

Prof. Dr. Jun Sérgio Ono Fonseca
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 3 de fevereiro de 2003.

Resumo

No Brasil, a idéia original era de se utilizar o gás natural como substituto do óleo diesel para o uso na frota de veículos pesados nos centros urbanos. Esta idéia deu lugar a uma maior difusão do uso de gás natural na frota de veículos leves, em função de algumas dificuldades inerentes ao mercado do gás natural como substituto do óleo diesel, tais como a pequena diferença de preços entre o óleo diesel e o gás natural.

Com a liberação do uso de gás natural para veículos a gasolina, a partir de 1992, e o crescimento de postos de abastecimento, tem-se notado um grande aumento de veículos convertidos, nas cidades onde o combustível encontra-se disponível, como Porto Alegre.

Devido ao aumento de veículos convertidos, decidiu-se elaborar um trabalho que descreve os principais componentes dos “Kits” de conversão encontrados atualmente no mercado para os veículos equipados com carburador e injeção eletrônica, assim como procedimentos para a correta instalação destes componentes. Simultaneamente efetuou-se testes em veículos convertidos para o uso do gás natural, com a obtenção de curvas de potência as quais estabelecem um comparativo entre a utilização de gasolina e gás natural. Também foram feitas análises quanto a emissões de gases tóxicos dos veículos convertidos e a verificação do fator Lambda responsável pela máxima potência ao utilizar-se gás natural como combustível

Sendo assim, tem-se como objetivos neste trabalho, a análise do desempenho de veículos adaptados para o uso do gás natural em relação a veículos alimentados com combustíveis líquidos, descrevendo detalhadamente os elementos necessários para a conversão de um veículo, procedimentos básicos para uma conversão eficiente e segura, e vários testes de veículos relacionando o uso do gás natural comparativamente ao uso de combustível líquido.

O trabalho é concluído com a indicação dos “Kits” de conversão mais eficientes além da demonstração de algumas técnicas de regulação baseadas nos resultados obtidos nos testes com os veículos convertidos, as quais visam a redução da perda demasiada de potência, a redução do consumo de combustível gás e a redução das emissões de gases tóxicos.

Abstract

“ANALYSIS OF VEHICLES CONVERTED FOR THE USE OF THE COMBUSTIBLE NATURAL GAS “

In Brazil, the original idea was of using the natural gas as substitute of the diesel oil for the use in the fleet of weighed vehicles in the urban centers. This idea gave place to a bigger diffusion of the natural gas use in the fleet of light vehicles, due to some inherent difficulties to the market of the natural gas as a substitute of the diesel oil, such as the small differences of prices between the diesel oil and the natural gas.

Since 1992, with the release of the natural gas use for the gasoline vehicles, and the growth of the of natural gas supplying, an chain increase of converted vehicles has been noticed specially at cities where the fuel has been available, for example is Porto Alegre.

Due to the increase of converted vehicles, it was decided to elaborate this study that kind of the main kit conversion components in the market for this vehicles equipped with carburetor and electronic injection, as well as procedures for the correct installation of these components. In addition, tests were performed with vehicles converted for the natural gas, with the acquisition of power curves data, a comparative analysis between the use of gasoline and natural gas. Also, two other important analysis was made: are given the atmospheric toxic emissions a converted vehicles; the Lambda factor, responsible for the maximum power when using the natural gas as liquid fuel.

Therefore this study propose, the Analysis of Vehicles Converted for the Use of the Natural Gas related to a vehicles fed with liquid fuels, detailing the necessary elements for vehicle conversion, basic procedures for an a secure and efficient conversion, and several vehicles tests relating the use of the natural gas comparatively to the liquid fuel.

The study is concluded with the indication of the most efficient conversion kits beyond the demonstration of some regulation techniques based in the results tests with the converted vehicles, which aim the reduction of the exaggerated loss of power, the reduction of the gas consumption and the reduction of the toxic emissions of gases.

Índice

1.	Introdução.....	1
2.	Revisão Bibliográfica.....	3
3.	Fundamentos dos Motores de Combustão Interna.....	6
3.1.	Classificação dos Motores de Combustão Interna.....	6
3.2.	Motores Ciclo Otto de Quatro Tempos e Motores do Ciclo Diesel.....	6
3.3.	Alimentação dos Motores do Ciclo Otto por Carburador e por Injeção Eletrônica.....	8
3.4.	Torque e Potência.....	10
3.5.	Eficiência Volumétrica e Estabilidade de Funcionamento de Motores.....	11
3.6.	Rendimento Mecânico e Pressão Média Efetiva.....	13
3.7.	Consumo Específico de Conversão.....	14
3.8.	Emissões Específicas e Índice de Emissões.....	14
4.	Conhecendo o Gás Natural.....	16
4.1.	Aspectos Gerais do Gás Natural.....	16
4.2.	Gás Natural – O Gás.....	17
4.2.1.	Composição do Gás Natural Bruto e do Gás Natural Comercial.....	18
4.3.	Equação de Estado do Gás.....	21
4.4.	Compressão e Expansão do Gás.....	22
4.5.	Variação de Temperatura e Liquefação do Gás.....	22
4.6.	Terminologia dos Gases.....	23
5.	Combustão.....	25
5.1.	O processo de Combustão.....	25
5.2.	Composição do Ar de Combustão.....	26
5.3.	Combustão Incompleta, Completa, Estequiométrica e Fator λ	26
5.4.	Efeitos da Razão de Mistura (Ar/Combustível).....	29
5.5.	Composição dos Gases de Escape.....	30
5.6.	Explosão de Combustíveis Gasosos.....	31
5.6.1.	Condições de Ignição e Limites de Inflamabilidade.....	31
5.6.2.	Temperatura de Ignição ou de Inflamação.....	32
5.6.3.	Propagação da Combustão.....	33
5.6.4.	Velocidade de Queima e Deflagração.....	33
5.6.5.	Detonação e Pré-Ignição.....	34
6.	O Uso do Gás Natural em Veículos Automotores.....	35

6.1.	Características Técnicas no Uso de GNV em Motores do Ciclo Otto	37
6.1.1.	Mistura e Distribuição de Combustível.....	37
6.1.2.	Resfriamento do Sistema de Admissão e da Câmara de Combustão.....	37
6.1.3.	Potência Fornecida	37
6.1.4.	Sistema de Ignição	38
6.1.5.	Desgaste, Óleo Lubrificante e Amaciamento do Motor.....	38
6.1.6.	Desgaste de Válvulas ou Sede de Válvulas.....	38
6.1.7.	Octanagem e Número de Metano do Gás Natural.....	39
6.2.	Segurança e Vantagens Econômicas	40
6.3.	Combustível Ecológico	42
6.4.	Aspectos Sobre Emissões.....	42
7.	Equipamentos Básicos para a Conversão de Veículos Equipados com Carburador ou Injeção Eletrônica de Combustível	46
7.1.	Válvula de Abastecimento	46
7.2.	Válvula de Cilindro	46
7.3.	Invólucro Estanque.....	47
7.4.	Redutor de Pressão	47
7.5.	Tubulação de Alta Pressão	48
7.6.	Flanges de Apoio e Tubos de Ventilação da Válvula do Cilindro (ventilação de segurança).....	49
7.7.	Tubulação de Baixa Pressão e Válvula Dosadora de Vácuo (Dosadora de Gás).....	49
7.8.	Mesclador de Gás	49
7.9.	Chave Comutadora de Gás	50
7.10.	Manômetro Eletromecânico	50
7.11.	Válvula de Corte de Combustível Líquido.....	51
7.12.	Cilindros de Alta Pressão	51
7.13.	Implementos para a Conversão de Veículos Equipados com Injeção Eletrônica de Combustível	53
7.13.1.	Emulador de Eletro-Injetores (bicos injetores)	54
7.13.2.	Emulador do Sensor de O ₂ (Sonda Lambda)	54
7.13.3.	Variador de Avanço de Ignição.....	55
7.14.	Sistema básico de instalação de GNV em um veículo com injeção eletrônica.....	55
8.	Procedimentos para a Correta Instalação dos Equipamentos de Conversão de GNV	56
8.1.	Instalação da Válvula de Abastecimento e Válvula de Cilindro	56

8.2.	Instalação do Sistema de Venteio e Detecção de vazamentos	57
8.3.	Instalação do Redutor de Pressão	58
8.3.1.	Primeiro Estágio do Redutor	59
8.3.2.	Segundo Estágio do Redutor	59
8.3.3.	Terceiro Estágio do Redutor e Recomendações de Instalação.....	60
8.4.	Instalação da Tubulação de Alta Pressão e Chave Comutadora	62
8.5.	Instalação do Mesclador e da Tubulação de Baixa Pressão	62
8.6.	Instalação da Válvula de Corte de Combustível Líquido (veículos carburados)	63
8.7.	Desligamento da Bomba Elétrica de Gasolina (veículos com injeção eletrônica).....	63
8.8.	Instalação dos Cilindros de Alta Pressão	63
8.9.	Instalação do Emulador de Eletro-Injetores, (Bicos Injetores)	64
	(Somente veículos com injeção eletrônica).....	64
8.10.	Instalação do Emulador do Sensor de Oxigênio, (Sonda Lambda).....	64
	(Somente veículos com injeção eletrônica em malha fechada).....	64
8.11.	Instalação do Variador de Avanço	65
	(Veículos com injeção eletrônica ou carburador)	65
9.	Procedimentos Experimentais	66
9.1.	Dados Técnicos dos Veículos e Descrição dos Equipamentos	66
9.2.	Execução dos Testes.....	67
10.	Resultados Obtidos.....	69
10.1.	Resultados Obtidos com o Veículo Chevrolet Kadett.....	69
10.2.	Resultados Obtidos com o Veículo FIAT Maréa	73
10.3.	Resultados Obtidos com o Veículo Renault Kangoo Express	79
10.4.	Resultados Obtidos com o Veículo FIAT Siena	82
10.4.1.	Primeiro Ensaio Realizado com o Veículo Siena.....	82
10.4.2.	Segundo Ensaio Realizado com o Veículo Siena.....	90
10.4.3.	Terceiro Ensaio Realizado com o Veículo Siena	95
10.5.	Resultados Obtidos com o Veículo FIAT Strada.....	101
11.	Fatores de Correção de Potência	105
11.1.	Condições Atmosféricas de Referência.....	105
11.2.	Definição do Fator k para Correção da Potência.....	105
11.3.	Definição da Potência de Referência (Corrigida)	105
12.	Conclusão	106
13.	Referências Bibliográficas	108

14.	Apêndices	111
14.1.	Análise de Erros	111
14.2.	Abastecendo com GNV	112
14.2.1.	Equipamentos para o Abastecimento de GNV.....	114
14.2.2.	Critérios de segurança e monitoramento para os equipamentos de abastecimento de GNV	115
14.2.3.	Abastecimento de GNV com Semi-Reboque Feixe.....	115
14.3.	Não Conformidades na Utilização de GNV	117
14.4.	Constituintes dos Gases de Escape dos Motores e seus Possíveis Efeitos.....	119
14.5.	Diagnóstico dos Gases de Escape dos Motores	121
14.5.1.	Veículos sem catalisador (ou amostrado antes do catalisador).....	121
14.5.2.	Veículos com catalisador (ou amostrado após o catalisador)	122
14.5.3.	Veículos de Competição (sem catalisador)	123

Lista de Símbolos

b	comprimento de alavanca do freio [m]
$bsfc$	consumo específico de combustível [kg/kWh]
CO	monóxido de carbono
CO_2	dióxido de carbono
c_p	calor específico à pressão constante [kJ/kgK]
c_v	calor específico a volume constante [kJ/kgK]
F	força medida no transdutor do freio [N]
F_F	massa de combustível [kg]
HC	hidrocarbonetos
K	razão entre os calores específicos do gás (c_p/c_v)
k	fator de correção de potência
M_R	momento resistente [N.m]
m_a	fluxo de ar que entra no motor [kg/s]
m_{ar}	massa de ar [kg]
m_{comb}	massa de combustível [kg]
m_{CO}	fluxo de massa de monóxido de carbono nos gases de escape [kg/s]
m_f	fluxo de massa de combustível [kg/s]
m_{HC}	fluxo de massa de hidrocarbonetos [kg/s]
m_{NO_x}	fluxo de massa de óxido nítrico nos gases de escape [kg/s]
N	velocidade angular [s^{-1}]
NM	número de metano [%]
NO_x	óxidos de nitrogênio [ppm]
n	número de moles [moles]
n_{ar}	massa molecular do ar [kmol]
n_{comb}	massa molecular do combustível [kmol]
n_r	número de cursos de potência para cada ciclo
O_2	oxigênio [%vol]
P	pressão [Pa]
P_{atm}	pressão atmosférica [Pa]
P_{bme}	pressão média efetiva no freio [Pa]
P_b	potência no freio [W]
PCI	poder calorífico superior

PCS	poder calorífico inferior
P_{corr}	potência corrigida [kW]
$P_{c,ig}$	potência indicada bruta por ciclo [W]
P_f	potência gasta nas resistências passivas [W]
PMI	ponto morto inferior
PMS	ponto morto superior
P_M	potência observada [kW]
$P_{máx}$	potência máxima [kW]
P_{me}	pressão média efetiva [kPa]
P_1	pressão na entrada [Pa]
P_2	pressão na saída [Pa]
R	constante universal dos gases ideais [Nm/(molK)]
sCO	emissão específica de monóxido de carbono [g/kWh]
sHC	emissão específica de hidrocarbonetos [g/kWh]
$sNOx$	emissão específica de óxido nítrico [g/kWh]
T	temperatura absoluta [K]
T_{amb}	temperatura ambiente [°C]
T_{ai}	temperatura de entrada do ar de admissão do motor [K]
T_b	torque no freio [J]
T_1	temperatura de entrada [K]
T_2	temperatura de saída [K]
V	volume [m ³]
V_d	volume deslocado por ciclo [m ³]
W	trabalho [J]
z	fator de compressibilidade
ΔR	incerteza do resultado
ϕ	relação combustível/combustível/ar utilizada [kg _{comb} /kg _{ar}]
λ	relação ar/combustível utilizada [kg _{ar} /kg _{comb}]
η_m	eficiência mecânica
η_v	eficiência volumétrica
ρ	densidade do ar seco [kg/m ³]
ρ_{ai}	densidade do ar na admissão [kg/m ³]
v	coeficientes estequiométricos

Índice de Figuras

Figura 3.1- Ciclo padrão de ar Otto.....	7
Figura 3.2 - Funcionamento do motor ciclo Otto quatro tempos.....	7
Figura 3.3 - Curva característica de um motor de automóvel.....	12
Figura 3.4 – Concentração de HC, CO e NO nos gases de escape, ciclo Otto.....	15
Figura 5.1 - Curva de Hook, consumo em um motor ciclo Otto.....	29
Figura 6.1 - CO experimental para alguns combustíveis.....	43
Figura 6.2 - Produção de CO ₂ agregado de alguns combustíveis.....	44
Figura 7.1 - Válvula de abastecimento.....	46
Figura 7.2 - Válvula de cilindro.....	47
Figura 7.3 – Invólucro estanque.....	47
Figura 7.4 - Redutor de pressão.....	48
Figura 7.5 – Tubulação de alta pressão.....	48
Figura 7.6 - Flanges de apoio e tubos de ventilação da válvula do cilindro.....	49
Figura 7.7 - Tubulação de baixa pressão e válvula dosadora de vácuo.....	49
Figura 7.8 – Mescladores de gás.....	50
Figura 7.9 – Chave comutadora de gás.....	50
Figura 7.10 – Manômetro eletromecânico.....	51
Figura 7.11 – Válvula de corte de combustível líquido.....	51
Figura 7.12 Cilindro de alta pressão para uso de GNV.....	52
Figura 7.13 - Emulador de eletro-injetores (bicos injetores).....	54
Figura 7.14 – Emulador do sensor de O ₂ (sonda lambda).....	54
Figura 7.15 – Variador de avanço.....	55
Figura 7.16 - Sistema básico de instalação de GNV em um veículo com injeção eletrônica.....	55
Figura 8.1 – Instalação da válvula de abastecimento.....	57
Figura 8.2 – Instalação da válvula de cilindro.....	57
Figura 8.3 - Instalação do sistema de ventoinho.....	58
Figura 8.4 - Verificação de vazamentos em válvulas e conexões.....	58
Figura 8.5 – Primeiro estágio do redutor.....	59
Figura 8.6 – Segundo estágio do redutor.....	60
Figura 8.7 – Terceiro estágio do redutor.....	61
Figura 8.8 - Instalação da tubulação de alta pressão.....	62
Figura 8.9 – Suporte dos cilindros de alta pressão.....	64

Figura 8.10 – Sinais gerados por Emuladores de O ₂	65
Figura 9.1- Veículo Kadett no dinamômetro do Laboratório de Motores da Petrobras.....	66
Figura 10.1 – Potência Desenvolvida x Lambda para o veículo Kadett ao utilizar-se gás natural.....	72
Figura 10.2 – Curva de potência máxima obtida para o veículo Maréa utilizando como combustível gasolina, com a instalação do “Kit” de GNV. (T _{amb} =23°C; k=1,023).....	74
Figura 10.3 - Curva de potência máxima obtida para o veículo Maréa utilizando como combustível gás natural. (T _{amb} =24°C; k=1,024).....	75
Figura 10.4 – Torque x Rotação para o veículo Maréa ao utilizar-se gasolina com mesclador e gás natural	77
Figura 10.5 – Curva de potência máxima obtida com o veículo Renault utilizando como combustível gasolina, conservando-se as características originais do veículo. (T _{amb} =24°C; k=1,024).....	79
Figura 10.6 - Curva de potência máxima obtida com o veículo Renault utilizando como combustível gasolina, com a instalação do mesclador de GNV. (T _{amb} =23°C; k=1,022)	80
Figura 10.7 - Curva de potência máxima obtida com o veículo Renault utilizando como combustível gás natural. (T _{amb} =24°C; k=1,024).....	81
Figura 10.8 – Curva de potência máxima obtida no primeiro ensaio para o veículo Siena utilizando como combustível gasolina, conservando-se as características originais do veículo.(T _{amb} =29°C; k=sem correção).....	83
Figura 10.9 - Curva de potência máxima obtida no primeiro ensaio para o veículo Siena utilizando como combustível gasolina, com a instalação do mesclador de GNV. (T _{amb} =29°C; k= sem correção)	83
Figura 10.10 - Curva de potência máxima obtida no primeiro ensaio para o veículo Siena utilizando como combustível gás natural. (T _{amb} =29°C; k= sem correção)	84
Figura 10.11 – Curva de potência máxima para o veículo Siena, primeiro ensaio, utilizando como combustível gás natural e “kit” com controlador eletrônico fator $\lambda=0,91$. (T _{amb} =31°C; k=sem correção)	87
Figura 10.12 - Curva de potência máxima para o veículo Siena, primeiro ensaio, utilizando como combustível gás natural e “kit” com controlador eletrônico fator $\lambda=0,88$. (T _{amb} =32°C; k=sem correção)	88
Figura 10.13 - Curva de potência máxima obtida no segundo ensaio para o veículo Siena utilizando como combustível gasolina, conservando-se as características originais do veículo. (T _{amb} =24°C; k=1,030).....	90
Figura 10.14 - Curva de potência máxima obtida no segundo ensaio para o veículo Siena	

utilizando como combustível gasolina, com a instalação do mesclador de GNV. (T _{amb} =23°C; k=1,029).....	91
Figura 10.15 - Curva de potência máxima obtida no segundo ensaio para o veículo Siena utilizando como combustível gás natural. (T _{amb} =23°C; k=1,029).....	91
Figura 10.16 - Curva de potência máxima obtida no segundo ensaio para o veículo Siena utilizando como combustível gás natural e mesclador modificado. (T _{amb} =24°C; k=1,031) .	92
Figura 10.17 - Curva de potência máxima obtida no segundo ensaio para o veículo Siena utilizando combustível GNV, e transferência automática para gasolina a 5400RPM com tempo de sobreposição dos eletro-injetores de 0,10s. (T _{amb} =23°C; k=1,028).....	94
Figura 10.18 - Curva de potência máxima obtida no segundo ensaio para o veículo Siena utilizando combustível GNV, e transferência automática para gasolina a 4600RPM com tempo de sobreposição dos eletro-injetores de 0,02s. (T _{amb} =23°C; k=1,028).....	94
Figura 10.19 - Curva de potência máxima obtida no terceiro ensaio para o veículo Siena utilizando como combustível gasolina, sem mesclador e sem o filtro de ar de admissão. (T _{amb} =30°C; k=1,033).....	95
Figura 10.20 - Curva de potência máxima obtida no terceiro ensaio para o veículo Siena utilizando como combustível gasolina e mesclador de alumínio.(T _{amb} =30°C; k=1,033).....	96
Figura 10.21 - Curva de potência máxima obtida no terceiro ensaio para o veículo Siena utilizando como combustível gás natural e mesclador de alumínio.(T _{amb} =33°C; k=1,038) .	96
Figura 10.22 - Curva de potência máxima obtida no terceiro ensaio para o veículo Siena utilizando como combustível gasolina e mesclador de tecnil. (T _{amb} =31°C; k=1,035).....	98
Figura 10.23 - Curva de potência máxima obtida no terceiro ensaio para o veículo Siena utilizando como combustível gás natural e mesclador de tecnil.(T _{amb} =32°C; k=1,037).....	99
Figura 10.24 - Curva de potência máxima obtida no terceiro ensaio para o veículo Siena utilizando gás natural, mesclador de tecnil, e aumento da vazão de combustível.(T _{amb} =32°C;k=1,037).....	99
Figura 10.25 - Curva de potência máxima obtida no terceiro ensaio para o veículo Siena utilizando gás natural, mesclador de tecnil, e redução da vazão de combustível. (T _{amb} =33°C;k=1,038).....	100
Figura 10.26 – Curva de potência máxima obtida com o veículo Strada utilizando como combustível gasolina, conservando-se as características originais do veículo. (T _{amb} =30°C; k=1,034).....	102
Figura 10.27 - Curva de potência máxima obtida com o veículo Strada utilizando como combustível gasolina, com a instalação do mesclador de GNV. (T _{amb} =29°C; k=1,032)	102

Figura 10.28 - Curva de potência máxima obtida com o veículo Strada utilizando como combustível gás natural e variador de avanço de ignição. ($T_{amb}=33^{\circ}C$; $k=1,038$).....	103
Figura 10.29 - Curva de potência máxima obtida com o veículo Strada utilizando como combustível gás natural sem variador de avanço de ignição. ($T_{amb}=30^{\circ}C$; $k=1,034$)	104
Figura 14.1- Esquema básico de um Posto de Serviço de GNV.....	112
Figura 14.2 - Um "dispenser" típico.....	114
Figura 14.3 - Semi-reboque feixe e caminhão trator.....	116
Figura 14.4 - Semi-Reboque (Carreta) Feixe da BR Distribuidora.....	117
Figura 14.5 - Manobra de Abastecimento de Ônibus com Semi-Reboque Feixe	117
Figura 14.6 - Vista lateral de um acidente no abastecimento de um veículo.....	118
Figura 14.7 - Vista frontal dos resultados de um acidente no abastecimento de um veículo	118
Figura 14.8 - Botijão de GLP após explosão devido ao uso de GNV em alta pressão	119
Figura 14.9 - Cilindro de armazenamento de GNV intacto após explosão do botijão.....	119
Figura 14.10 - Dados experimentais de motor 1000cm^3 a 3800RPM e carga total	123

Índice de Tabelas

Tabela 4.1 – Composição típica do Gás Natural.....	18
Tabela 4.2 – Especificação do Gás Natural (*).....	20
Tabela 5.1 - Condições de λ e de ϕ para mistura pobre, rica e estequiométrica	28
Tabela 5.2 - Composição dos gases de exaustão para a combustão perfeita de diversos gases....	30
Tabela 5.3 - Efeito da temperatura inicial do gás sobre os limites de inflamabilidade.....	31
Tabela 5.4 - Comparação da temperatura de ignição de vários gases em ar e em oxigênio.	32
Tabela 5.5 - Temperatura de ignição do metano para várias concentrações da mistura ar gás....	33
Tabela 6.1 - Economia com a Utilização de GNV	41
Tabela 6.2 - CO ₂ máximo teórico calculado pela reação de combustão no estequiométrico	43
Tabela 10.1 – Dados demonstrativos em diversas velocidades do ensaio de potência na roda do veículo Kadett ao utilizar-se combustível gasolina. T _{amb.} =29°C.....	70
Tabela 10.2 - Dados demonstrativos e comparativos em diversas velocidades do ensaio de potência na roda do veículo Kadett ao utilizar-se combustível gás natural. T _{amb.} =29°C	70
Tabela 10.3 – Potência desenvolvida pelo veículo Kadett ao variar-se o fator Lambda com a utilização de combustível gás natural. T _{amb.} =29°C	72
Tabela 10.4 - Torque desenvolvido pelo veículo Maréa, utilizando como combustível gasolina e gás natural com a instalação do “Kit” de GNV.....	77
Tabela 10.5 – Dados comparativos de emissões do veículo Maréa, ao utilizar-se gasolina e gás natural. (T _{amb.} =24°C).....	78
Tabela 10.6 – Potência máxima na roda do veículo Renault ao utilizar-se gasolina com a instalação do mesclador e gás natural como combustível.....	82
Tabela 10.7 – Potência máxima na roda do veículo Siena, primeiro ensaio, e verificação da eficácia do emulador do sensor de O ₂	85
Tabela 10.8 – Dados comparativos de emissões do veículo Siena, primeiro ensaio, ao utilizar-se gasolina, gás natural.	86
Tabela 10.9 – Potência máxima na roda do veículo Siena, primeiro ensaio, com sistema eletrônico de controle do fator λ	88
Tabela 10.10 - Dados comparativos de emissões do veículo Siena, primeiro ensaio, equipado com “Kit” controlador do fator λ =0,91 ao utilizar-se gasolina, gás natural.	89
Tabela 10.11 - Dados comparativos de emissões do veículo Siena, segundo ensaio, equipado com mesclador modificado e mesclador não modificado ao utilizar-se gás natural.....	93

Tabela 10.12 - Potência máxima na roda do veículo Siena, terceiro ensaio, utilizando gasolina e gás como combustível e mesclador de alumínio.....	97
Tabela 10.13 – Dados comparativos de emissões do veículo Siena, terceiro ensaio, ao utilizar-se gasolina, gás natural com mesclador de alumínio.....	97
Tabela 10.14 - Emissões do veículo Siena, terceiro ensaio, ao utilizar-se gás natural com mesclador de tecnil.....	101

1. Introdução

O gás natural é tradicionalmente visto como uma fonte combustível fóssil abundante e limpa para a geração de energia térmica e elétrica. Atualmente 90% do seu consumo global se destina ao uso combustível ou energético e apenas 10% à produção de amônia ou metanol.

O uso direto como combustível ou para geração de energia elétrica exige uma infraestrutura local de distribuição até o consumidor final, seja em redes de gasodutos ou de transporte e revaporização de gás natural liquefeito GNL.

A movimentação de gás natural por longas distâncias através de gasodutos de alta pressão ou na forma de GNL é consideravelmente cara e as margens de lucro do gás natural oriundo destes campos remotos é perdida por estes elevados custos de transporte.

Os processos de conversão do gás natural em commodities químicas e combustíveis facilmente transportáveis em tanques, modificando o problema do transporte de gás em transporte de líquido e elevando o seu valor agregado. Isto remove as restrições de elevados custos de transporte e restrição de acesso aos mercados distantes, além de ser uma rota de elevação do valor agregado.

Assim, estes projetos não dependem de circunstâncias de mercado locais e podem ser baseadas em pequenas reservas de gás natural.

A cada ano se elevam as restrições ambientais às emissões de veículos automotores, principalmente nos grandes centros urbanos, saturados de automóveis, ônibus e caminhões. Os índices permissíveis dos compostos nos escapamentos vão diminuindo, elevando as pesquisas por alternativas e ampliando o espaço para penetração dos combustíveis limpos.

O gás natural já ocupa o lugar de fonte energética abundante menos nociva ao meio ambiente da atualidade.

Ao considerar-se a demanda cada dia maior por carburantes ambientalmente menos poluentes, como a gasolina e o diesel sem enxofre, e os custos de transformação tecnológica das frotas ao GNL, hidrogênio, metanol, etanol e eletricidade e, por outro lado, as necessidades crescentes de insumos químicos para suportar o desenvolvimento da indústria mundial e as restrições ambientais aos processos tradicionais de produção, compreende-se a importância e a potencialidade dos processos de conversão do gás em combustíveis líquidos e gasoquímicos.

Neste panorama, os processos de conversão do gás se apresentam como escolha natural, pois além de economicamente atrativos, são atividades industriais que não requerem insumos nem geram rejeitos agressivos ao meio ambiente.

As últimas previsões sobre o consumo mundial energético anual indicam que serão utilizados 11,7 bilhões de toneladas equivalentes de petróleo em 2010 e 14,2 bilhões em 2020 contra 8,9 bilhões em 1997. Não obstante, os países já vêm apoiando o consumo do gás natural, em detrimento do petróleo, do carvão e da energia nuclear. Assim, o consumo de gás natural será da ordem de 3,5 trilhões de metros cúbicos em 2010 e 4,7 trilhões em 2020, contra 2,3 trilhões em 1997, ou seja, um crescimento de 52 % ou 4,2 % por ano na próxima década. [Mercado do Gás]

O gás natural é uma fonte abundante, com suas reservas somando 146 trilhões de metros cúbicos o equivalente a 60 anos de consumo. As reservas adicionais prováveis são de 260 trilhões de metros cúbicos, ou 83 anos suplementares do consumo previsto para 2010.

Fica óbvio que a tendência, generalizada no mundo, de proteção ao meio ambiente deverá limitar bastante o uso de derivados de petróleo não tratados. Com isso, prevê-se uma retração da demanda de petróleo antes dos fins das reservas. Até lá, ter-se-á 50 anos de desenvolvimento tecnológico associado à disponibilidade cada vez maior de petróleo e do gás natural.

Sendo assim tem-se como objetivos neste trabalho, a análise do desempenho de veículos adaptados para o uso do gás natural, relacionado à transformação de veículos alimentados com combustíveis líquidos (gasolina, álcool) em veículos bi-combustíveis, (gasolina - gás natural) ou (álcool - gás natural).

Este trabalho contém uma descrição detalhada dos elementos necessários para a conversão de um veículo, procedimentos básicos para uma conversão eficiente e segura, e testes de veículos com a obtenção de curvas de potência relacionando o uso do gás natural comparativamente ao uso de combustível líquido. Apresentam-se ainda, análises de gases de escapamento, com o intuito de visualizar as reduções das emissões de gases tóxicos ao meio ambiente, quando se utiliza gás natural em veículos automotores.

2. Revisão Bibliográfica

Neste Capítulo 2 apresenta-se uma revisão bibliográfica com o objetivo de estabelecer inicialmente o estado da arte de vários conceitos importantes para o entendimento das transformações de veículos a gasolina e álcool para um sistema bi-combustível, onde o combustível adaptado, gás natural veicular, atualmente vem sendo comercializado em postos de combustível no estado do Rio Grande do Sul.

Quanto ao combustível gás, pode-se dizer que se trata de uma fonte de energia diversificada. No Oriente Médio sua participação é de 32%, na Comunidade Européia de 37% e no restante do mundo atinge 31. No Mar do Norte, onde as condições de exploração são as mais difíceis, o custo de produção passou de US\$ 3,7 por MBTU (British Thermal Units) para US\$ 2 por MBTU. No restante do mundo, o custo é da ordem de US\$ 0,5 por MBTU. Contudo, o custo do transporte é mais elevado que o do petróleo bruto, sendo, em média, de US\$ 1,5 por MBTU (7 mil a 11 mil quilômetros). [Silva, V.C.,2001]

No Brasil encontram-se varias distribuidoras de gás natural, que operam em regiões do país como a norte (RONGÁS), região nordeste (CEGÁS, BAHIAGÁS, ALGÁS), região centro-oeste (MSGÁS), região sudeste (PETROBRAS, COMGÁS, COMPAGÁS) e região sul (SULGÁS). A Sulgás, Companhia de Gás do Estado do Rio Grande do Sul, é a empresa responsável pela distribuição e comercialização do gás natural em todo o Estado do Rio Grande do Sul. A empresa foi criada em 1993, resultado de uma parceria entre Governo do Estado do Rio Grande do Sul (51%) e Petrobrás Distribuidora (49%). O gás distribuído pela Sulgás vem diretamente da Bolívia até Canoas, pelo gasoduto Bolívia-Brasil. A companhia Sulgás também distribui o gás argentino que tem entrada por Uruguaiana, sendo disponibilizado para o uso industrial na região Metropolitana de Porto Alegre, para o uso veicular, comercial e residencial. [Mercado do Gás]

Encontram-se ainda, diferentes composições químicas para o gás natural consumido no Brasil, de acordo com a região de extração. Por exemplo, o gás natural consumido no Rio de Janeiro apresenta composições de metano da ordem de 89,4% aproximadamente, enquanto que na Bahia o gás apresenta uma composição de 88,5% de metano. Nos estados de Alagoas, Rio Grande do Norte, Espírito Santo e Ceará o gás apresenta respectivamente 76,9%, 83,4%, 84,8% e 75,5% de metano enquanto o gás oriundo do gasoduto Brasil-Bolívia apresenta uma composição de 91,8% de metano. [Silva, V.C.,2001]

Os equipamentos encontrados comercialmente e destinados à conversão de veículos podem ser utilizados para qualquer composição do combustível gás natural. Geralmente os

fabricantes de “Kits” de conversão possuem seus produtos destinados a veículos equipados com injeção eletrônica e catalisador ou carburador. Os “Kits” mais simples são destinados a veículos carburados (sem injeção eletrônica), e geralmente não possuem o controle eletrônico da mistura ar/gás, sendo dotados basicamente de cilindro de armazenamento de gás, válvula de abastecimento, válvula de cilindro, redutor de pressão, mesclador e tubulações, podendo-se instalar um equipamento adicional chamado variador de avanço que possui a função de melhorar o desempenho do veículo. Para veículos com injeção eletrônica, tem-se além dos equipamentos listados anteriormente, emuladores de sensor de O₂ e eletro-injetores, sendo encontrados também “Kits” com a capacidade de efetuar eletronicamente o controle da relação ar/gás de forma a mantê-la estequiométrica. Existem ainda “Kits” de conversão com sistema de injeção direta de GNV (bicos injetores de gás) utilizados em motores com injeção eletrônica, sensor de O₂ e catalisador, projetados e construídos para integrarem-se com os mais modernos sistemas de injeção eletrônica de forma a manter inalterado os níveis de emissões em qualquer situação de solicitação do motor. [Gás para Uso Automotivo]

Quanto aos trabalhos consultados, abordando tecnologias referentes às transformações de veículos, o de [Podnar, D.J. e Kubesh, J.T.,2000], analisa o desenvolvimento de uma nova geração de motores a gás natural em substituição aos motores Diesel, apresentando inovações nos sistemas de ignição e injeção de gás natural em um motor diesel Jhon Deere de 8100 cm³. Consultou-se ainda [Cox, G.B. and DelVecchio, K.A.,2000], cujo tema trata do desenvolvimento de uma injeção direta de gás natural em motores de veículos de serviço pesado, relatando as pesquisas de escoamento de gases em câmaras de combustão através de métodos computacionais e as falhas existentes em bicos injetores após um determinado tempo de operação. Verificou-se que a grande parte dos trabalhos disponibilizados por autores estrangeiros como [Yang.M. and Min,T.W.,1997] e [Pascoli,S. e Luzzati,T.,2001], tratam de pesquisas referentes a conversões de motores Diesel á motores Diesel-Gás, pois o principal objetivo dos países Europeus, Asiáticos e Norte-Americanos é a redução dos níveis de poluição e ruído urbano, ocasionados principalmente pelos motores Diesel de ônibus e caminhões ficando o gás natural à alternativa mais econômica e viável para a obtenção destes objetivos em comparação com outras alternativas como veículos elétricos ou alimentados por células de combustível, basicamente hidrogênio.

Dentre os trabalhos nacionais publicados, [Machado,E.,2002], elaborou um trabalho com o objetivo de fornecer suporte teórico e prático sobre as transformações de veículos a gasolina e a álcool para gás natural veicular, num sistema bi-combustível, motivado pelas péssimas transformações encontradas no mercado, procurando encontrar soluções que diminuam

os problemas de perdas de potências e emissões de poluentes.

A nível Europeu, Americano e Asiático, encontram-se poucos trabalhos disponíveis para consultas, abordando as tecnologias específicas para as transformações dos veículos movidos a motores Otto ou Diesel para utilizarem o gás natural veicular, razão que acabou de uma certa forma limitando a Revisão Bibliográfica deste trabalho.

3. Fundamentos dos Motores de Combustão Interna

Os motores de combustão interna operam pela transformação de energia calorífica resultante da queima ou da explosão de uma mistura ar/combustível em energia mecânica e baseiam-se no princípio segundo o qual os gases se expandem quando aquecidos. A pressão gerada, se controlada pode ser utilizada para movimentar órgãos da máquina, tendo-se, desta maneira, a transformação da energia calorífica do combustível em energia mecânica. Estes motores podem trabalhar com combustíveis líquidos voláteis (óleos pesados, diesel, querosene, gasolina, álcool, benzol, etc.), ou com gases (butano, propano, etc). [Taylor, C. F.,1988]

3.1. Classificação dos Motores de Combustão Interna

Existem diversas formas de motores de combustão interna, podendo ser classificados segundo:

-Ciclo de trabalho: são classificados em ciclo de quatro tempos (que são subdivididos em naturalmente aspirados ou turbinados) ou ciclo de dois tempos;

-Forma de ignição: podem ser divididos em ignição por centelha (ciclo Otto) ou ignição por compressão (ciclo Diesel);

-Forma de admissão: a mistura ar/combustível pode ser preparada por um carburador (antes do coletor de admissão) ou por injeção de combustível.

3.2. Motores Ciclo Otto de Quatro Tempos e Motores do Ciclo Diesel

O ciclo padrão a ar Otto é um ciclo ideal que se aproxima do motor de combustão interna de ignição por centelha. Os diagramas p-v e T-s deste ciclo estão mostrados na Figura 3.1. O processo 1-2 é uma compressão isoentrópica do ar quando o pistão se move, do ponto morto do lado da manivela (inferior) para o ponto morto do lado do cabeçote (superior). O calor é então transferido para o ar, a volume constante, enquanto o pistão está momentaneamente em repouso no ponto morto superior. O processo 3-4 é uma expansão isoentrópica e o processo 4-1 é o de rejeição de calor do ar, enquanto o pistão esta no ponto morto inferior.

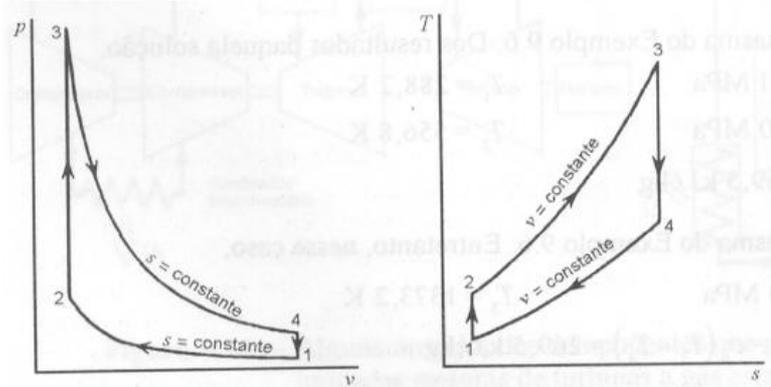


Figura 3.1- Ciclo padrão de ar Otto

O ciclo de um motor de combustão interna inicia-se no ponto morto superior do êmbolo e compreende quatro cursos sucessivos necessitando de duas rotações do eixo de manivelas. Podem ser classificados como:

- Admissão (1º curso): 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 uma certa quantidade de mistura. Essa mistura penetra no cilindro através da válvula de admissão que durante todo o curso do êmbolo se mantém aberta;

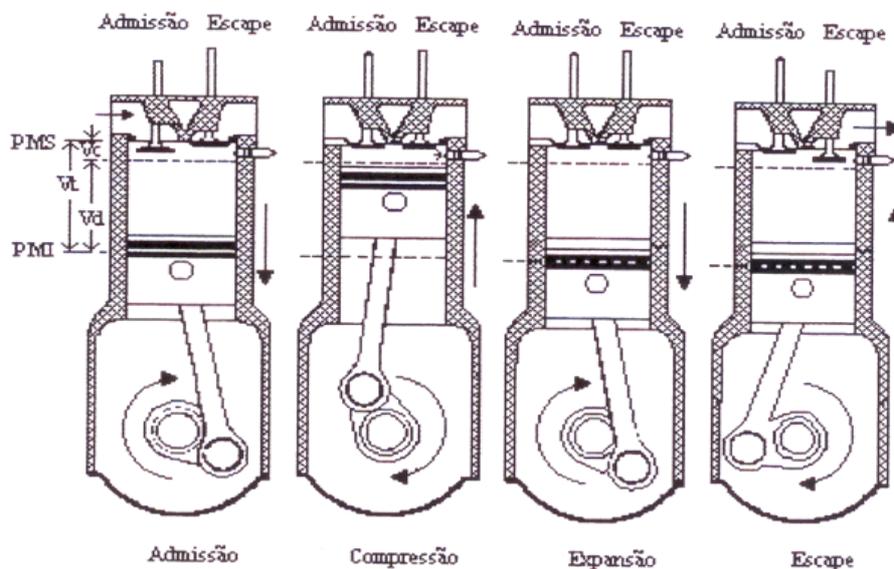


Figura 3.2 - Funcionamento do motor ciclo Otto quatro tempos

- Compressão (2º curso): Inicia com o êmbolo no ponto morto inferior (PMI). Partindo do PMI o êmbolo sobe até a tampa do cilindro. Ao iniciar este movimento, a válvula de admissão se fecha e os gases comprimidos no cilindro sofrem então uma forte compressão. Um pouco antes de o êmbolo chegar ao PMS a combustão é inicializada por uma centelha. No final

deste 2º curso, o eixo de manivelas efetuou uma rotação completa;

- Combustão e Expansão (3º curso): A combustão da mistura na câmara de combustão começa no final do 2º curso, alguns graus antes do êmbolo atingir o PMS. A combustão de toda a massa da mistura provoca uma elevação da temperatura, o que vai dar origem a um grande aumento de pressão. Essa pressão comprime progressivamente o êmbolo do PMS ao PMI, transmitindo ao eixo de manivelas uma força motriz favorável à rotação;

- Escape (4º curso): Perto do final do 3º curso, num ângulo compreendido entre 55 e 60º, a válvula de escape começa abrir-se e os gases queimados podem escapar do interior do motor (processo chamado de blowdown).

Nos motores ciclo Diesel, a combustão ocorre pela injeção direta de combustível na câmara ou na pré-câmara, inflamando-se ao entrar em contato com o ar aquecido pela compressão. São motores de grande porte que utilizam combustível composto por hidrocarbonetos mais pesados, ou seja, menos voláteis. [Szankowski, V.,J.,1965]

3.3. Alimentação dos Motores do Ciclo Otto por Carburador e por Injeção Eletrônica

O carburador é um sistema mecânico responsável pela dosificação da mistura ar/combustível. Essa mistura deve obedecer a uma relação chamada “razão da mistura” que é a razão entre a massa de ar admitido pela massa de combustível admitido pela câmara de combustão. Essa relação deve ser em torno de 15:1 (relação estequiométrica), para motores a gasolina. Quando essa razão é maior que 15:1 dizemos que a mistura é pobre, enquanto que quando essa relação é menor que 15:1 dizemos que a mistura é rica. [Carriconde, E. P.,2000]

No funcionamento do motor, no entanto, verifica-se que a razão da mistura ar/combustível é variável conforme a rotação do motor (posição da borboleta). Para isso, o carburador conta com diversos sistemas de auxílio para obter essa variação.

Pode-se dividir a posição da borboleta em quatro períodos:

- (A) Marcha lenta: borboleta fechada;
- (B) Faixa intermediária: 0 a 25% de abertura da borboleta;
- (C) Faixa média: 25 a 75 % de abertura da borboleta;
- (D) Potência Máxima: 75 a 100% de abertura da borboleta;

Na posição “(A)”, o motor opera com mistura rica, tem-se os maiores níveis de emissões, e como a borboleta encontra-se fechada, existe um circuito auxiliar que permite a passagem de combustível.

Na posição “(B)” o motor ainda opera com mistura rica, existe outro circuito auxiliar que injeta combustível.

Na posição “(C)” o motor opera com mistura pobre, que pode ser obtida com o auxílio de um tubo tipo flauta, que possui diversos orifícios ao longo de seu comprimento, colocado dentro do pulverizador.

Finalmente na posição “(D)”, o motor opera com mistura rica, pois necessita potência máxima, baixa temperatura nas válvulas de escape e maior rendimento volumétrico (relação entre o volume real de ar que entra na câmara de combustão e o volume que poderia entrar).

Quanto aos sistemas de injeção e ignição eletrônica, pode-se dizer que atualmente, os sistemas são integrados e recebem sinais de diversos sensores dispostos no motor. Esse sistema apresenta a grande vantagem de ter um controle mais efetivo do processo de combustão, proporcionado à obtenção de maiores potências, redução de emissões e maior economia de combustível.

Os sistemas de injeção eletrônica de combustíveis podem ser classificados em monoponto, possui apenas um eletro-injetor para todos os cilindros, ou multiponto, que possui um eletro-injetor para cada cilindro, posicionados o mais próximo possível da válvula de admissão. [Rech, C.,2002]

O sistema de injeção multiponto de combustível pode ainda ser subdividido em três outros tipos:

- Injeção eletrônica multiponto sincronizada: onde a injeção de combustível ocorre simultaneamente em todas as válvulas injetoras;

- Injeção eletrônica multiponto seqüencial: onde a injeção de combustível obedece à seqüência de abertura das válvulas de admissão;

- Injeção eletrônica multiponto seqüencial fasada: onde, além do combustível ser injetado obedecendo à seqüência de abertura das válvulas de admissão, a injeção em cada cilindro é dividida em duas etapas, uma quando a válvula de admissão abre e a outra pouco antes da válvula de admissão fechar. Esse sistema, utilizado principalmente em motores de competição, proporciona melhor homogeneização da mistura ar/combustível contribuindo dessa forma para um melhor rendimento do motor.

O principal elemento dos sistemas de injeção eletrônica é o módulo de controle eletrônico que recebe os sinais dos sensores, interruptores, bobina de ignição e bateria. Esses sinais são avaliados e processados, transformando-se em um sinal de saída que acionará os eletro-injetores no momento adequado.

Os principais sensores que esse sistema utiliza para mapear as condições de operação são:

- Sensor de temperatura da água do motor: geralmente é um sensor do tipo NTC que mede e informa ao módulo de controle a temperatura da água do motor;

- Sensor de vazão de ar: mede a quantidade de ar que o motor está admitindo, para que a injeção eletrônica defina a vazão de combustível através da largura do pulso do eletro-injetor. Estes sensores geralmente são do tipo anemômetro de fio quente (relaciona a massa de ar admitida com a potência necessária para manter um fio aquecido a uma certa temperatura); pressão absoluta (relaciona a massa de ar admitida com a pressão absoluta); ou ângulo de posição da borboleta (palheta localizada no coletor, em cujo eixo está acoplado um potenciômetro que informa a posição da borboleta e conseqüentemente a quantidade de ar admitida pelo motor);

- Sensor de temperatura do ar: este sensor informa ao módulo eletrônico de controle a temperatura do ar admitido, está localizado no sistema de admissão;

- Sensor de rotação do motor: trata-se de uma roda dentada instalada no eixo de manivelas, com uma falha de dois dentes e um sensor indutivo montado no bloco. Quando o motor entra em funcionamento, a roda dentada entra em movimento e a falha passa pelo sensor, então é gerada uma tensão de maior amplitude que é utilizada pelo módulo de controle para reconhecer o PMS do motor;

- Sensor de O₂: conhecido como “sonda lambda”, mede a quantidade de oxigênio presente nos gases resultantes da combustão, controlando a dosagem de combustível. Existem dois tipos, com aquecimento ou sem aquecimento;

- Sensor de detonação: trata-se de um sensor de ruído instalado no bloco do motor, tendo a função de informar ao módulo central de injeção a ocorrência do processo de detonação do combustível.

3.4. Torque e Potência

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

$$\vec{T}_b = F \cdot X \cdot \vec{b} \quad (3.1)$$

onde T_b é o torque no freio dado em Joules [J], F é a força medida no freio em Newtons [N] e b é o comprimento de alavanca do freio dado em metros [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:

$$P_b = 2.\pi.N.T_b \quad (3.2)$$

onde P_b é a potência no freio dada em Watts [W] e N é a velocidade angular em $[s^{-1}]$.

3.5. Eficiência Volumétrica e Estabilidade de Funcionamento de Motores

No sistema de admissão do motor, existem várias restrições que impedem o enchimento completo do cilindro. Em motores do ciclo Otto, por exemplo, as restrições podem ser o filtro de ar, a borboleta, a válvula de admissão. A eficiência volumétrica é o parâmetro utilizado para medir a taxa efetiva de volume de ar deslocado pelo êmbolo.

A deficiência no enchimento do motor depende do seu desenho, devido as suas restrições e perdas de carga pelos dutos de admissão e, ainda, da posição da borboleta de aceleração. Pode-se relacionar a eficiência volumétrica da seguinte forma:

$$\eta_V = \frac{\dot{m}_a}{\rho_{a,i} \cdot V_d \cdot \frac{N}{2}} \quad (3.3)$$

onde η_V é o rendimento volumétrico, \dot{m}_a é o fluxo de ar que entra no motor em $[kg/s]$, $\rho_{a,i}$ é a densidade do ar na admissão em $[kg/m^3]$ e V_d é o volume deslocado por ciclo em $[m^3]$.

Considerando um motor a regime permanente, isto é, em condições de funcionamento tais que a velocidade de rotação se mantém constante e toda a potência disponível é utilizada com um momento resistente constante. Se por uma razão qualquer o momento resistente, M_R , vier a diminuir assumindo um valor M'_R , tem-se disponível um momento $M_D = M_R - M'_R$ sendo que sistema tenderá ao equilíbrio recebendo uma aceleração, vencendo as forças de inércia. Mas supondo que o veículo é acelerado por qualquer causa externa (descida), o sistema se comporta para um novo regime de equilíbrio que estabilizará quando o produto do novo momento resistente pela nova velocidade de regime se igualar a nova potência do motor, chama-se nova potência porque não havendo variação na regulagem de alimentação do motor a potência assume um novo valor pelo efeito da variação da rotação do motor, segundo a forma da curva característica, Figura 3.3.

Mas pode ocorrer que o novo regime de equilíbrio possa não estabilizar, isto depende apenas da forma das curvas características. No caso da curva de torque dar valores crescentes ou constantes com o aumento da rotação, ao se observar um aumento de velocidade causado por

uma mínima diminuição do momento resistente, não se terá uma nova condição de equilíbrio, devido à falta de uma causa equilibrante, já que o torque estará aumentando ou estará constante, a rotação tenderá a aumentar cada vez mais. O fenômeno será análogo quando o momento resistente aumentar, a velocidade tenderá a diminuir cada vez mais. Nestas condições se diz que o funcionamento do motor é instável.

Se ao contrário o torque diminuir com o aumento do número de rotações, uma nova condição de equilíbrio se fará seguramente, porque o valor do novo momento resistente está compreendido entre os limites nos quais a curva de torque se mantém com este andamento. Nestas condições o funcionamento é estável e se diz que o motor é elástico. Pode-se dizer então que um motor é auto-regulável e estável quando a curva de seu torque é decrescente com o aumento da rotação.

A Figura 3.3 mostra as curvas características de um motor 4 tempos, com 1400cm^3 , alimentado por carburador, relacionando a curva de velocidade média dos gases através da válvula de admissão com o torque, a potência e o rendimento volumétrico do motor.

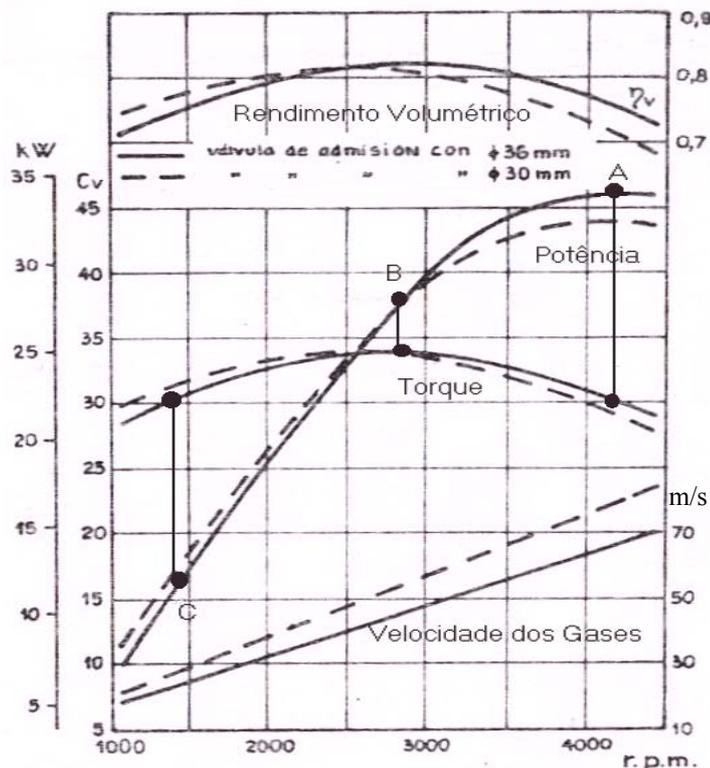


Figura 3.3 - Curva característica de um motor de automóvel

⇒ (A) Motor utilizado a plena potência – Se um aumento do momento resistente se faz presente o funcionamento do motor tende a um deslocamento para um torque mais elevado com diminuição da potência, de modo a satisfazer as novas exigências. Analogamente o motor se acelera pela diminuição do momento resistente. Motor é dito estável e auto-regulador.

⇒ (B) Motor utilizado a média potência – A curva de torque tem nesta zona pequenas variações para cada ponto de equilíbrio, que é estabilizado com recusa de velocidade no caso de diminuição do momento resistente. O motor é conseqüentemente instável, o equilíbrio pode vir estabilizado somente com descarte de velocidade, que em geral é inadmissível.

⇒ (C) Motor utilizado a baixíssima potência – Uma variação do momento resistente tende a fazer o motor funcionar com um torque variado ao contrário do desejado. O motor é instável e não auto-regulável porque se o momento resistente diminuir, pode-se ter um ponto de equilíbrio muito longe do desejado, ao contrário se o momento resistente cresce o motor para de funcionar.

Segundo [Giacosa 1953], para tornar mais elástico um motor é necessário diminuir as dimensões de seus condutos de aspiração, o que ocasiona máximo rendimento volumétrico em baixas rotações. A curva de potência se abaixa e torna-se mais plana devido à diminuição do rendimento volumétrico em altos regimes de rotação. Para se conseguir aumentar a elasticidade de um motor sem o sacrifício da perda de potência máxima, faz-se necessário o aumento da cilindrada do motor, razão esta pela qual os motores de automóveis americanos são de cilindradas maiores que os automóveis de fabricação européia.

3.6. Rendimento Mecânico e Pressão Média Efetiva

Nem toda energia produzida na combustão é convertida em potência efetiva. Parte desta energia é gasta para vencer as resistências passivas do motor, tais como o atrito entre as partes móveis, o bombeamento dos gases de admissão e escape, o acionamento dos grupos acessórios (ex. bomba do óleo, alternador), etc.

O rendimento mecânico (η_m) é, portanto, definida pela relação entre a potência produzida pela expansão dos gases no cilindro, também chamada de potência indicada, e a potência medida no eixo do motor.

$$\eta_m = \frac{P_b}{P_{c,ig}} = 1 - \frac{P_f}{P_{c,ig}} \quad (3.4)$$

onde P_f é a potência gasta nas resistências passivas, P_b é a potência de freio, e $P_{c,ig}$ é a potência indicada bruta por ciclo. A eficiência é influenciada pela velocidade, geometria e posição da borboleta no motor.

Um dos parâmetros de performance mais utilizado para projeto e desenvolvimento de motores é a “pressão média efetiva”, que é obtida pela divisão entre o trabalho por ciclo e o respectivo volume deslocado. Este parâmetro obtido com unidades de força por unidade de área

pode ser expresso pela seguinte equação:

$$Pme = \frac{P_{c,ig} \cdot n_r \cdot 10^3}{V_d \cdot N} \quad (3.5)$$

onde Pme é a pressão média efetiva em [kPa] e n_r é o número de cursos de potência para cada ciclo, (quatro tempos, $n_r=2$; dois tempos, $n_r=1$).

Como a potência bruta não pode ser facilmente medida, utiliza-se a potência média efetiva no freio, que é facilmente obtida em dinamômetros. Desse modo, o parâmetro de pressão mais utilizado é a pressão média efetiva no freio, que é expressa no seguinte modo:

$$Pbme = \frac{P_b \cdot n_r}{V_d \cdot N} \quad (3.6)$$

onde $Pbme$ é a pressão média efetiva no freio em [Pa].

3.7. Consumo Específico de Conversão

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 taxa de fluxo de combustível admitido pelo motor dividido pela potência de freio.

$$bsfc = \frac{\dot{m}_f}{P_b} \quad (3.7)$$

onde \dot{m}_f é o fluxo de massa de combustível em [kg/s].

3.8. Emissões Específicas e Índice de Emissões

As concentrações das emissões em motores de combustão interna, usualmente são medidas em partes por milhão (ppm), partes por cem ou percentual em volume. No entanto é comum indicá-las em emissões específicas, ou seja, o fluxo de gases poluentes pela potência de saída em [g/kWh]. Os índices mais usuais de emissões são o óxido de nitrogênio (NOx), monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos não queimados (HC) e particulados.

$$sNOx = \frac{\dot{m}_{NOx}}{P_{out}} \cdot 3,6 \times 10^9 \quad (3.8)$$

$$sCO = \frac{\dot{m}_{CO}}{P_{out}} \cdot 3,6 \times 10^9 \quad (3.9)$$

$$sHC = \frac{m_{HC}}{P_{out}} \cdot 3,6 \times 10^9 \quad (3.10)$$

onde sNO_x é a emissão específica de óxido nítrico em [g/kWh], sCO é a emissão específica de monóxido de carbono em [g/kWh], sHC é a emissão de hidrocarbonetos em [g/kWh], m_{NO_x} é o fluxo de massa de óxido nítrico nos gases de escape em [kg/s], m_{CO} é o fluxo de massa de monóxido de carbono nos gases de escape em [kg/s] e m_{HC} é o fluxo de massa de hidrocarbonetos nos gases de escape em [kg/s].

Os motores do ciclo Otto podem operar da faixa estequiométrica até levemente rica, e pode-se dizer que quando a mistura encontra-se pobre os níveis de emissões são menores

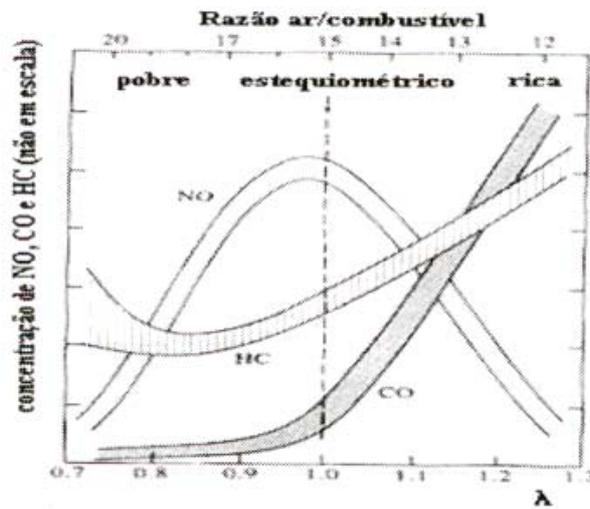


Figura 3.4 – Concentração de HC, CO e NO nos gases de escape, ciclo Otto

Fonte: Heywood, J. B., 1988

4. Conhecendo o Gás Natural

O gás natural é produzido, muitas vezes juntamente com o petróleo, através da extração nas bacias sedimentares da crosta terrestre. Ao chegar à superfície ele é tratado para remoção de impurezas, como água e outros gases. A seguir ele é transportado por gasodutos para as zonas de consumo.

Plantas elétricas e algumas indústrias podem utilizar o gás natural diretamente, captado dos gasodutos. Residências e pequenas indústrias adquirem o gás de empresas distribuidoras.

4.1. Aspectos Gerais do Gás Natural

Gás Natural é a designação genérica de uma mistura de hidrocarbonetos gasosos resultante da decomposição da matéria orgânica fóssil no interior da Terra.

No seu estado bruto, como encontrado na natureza, o gás natural é composto principalmente por Metano além de apresentar proporções de Etano, Propano, Butano, hidrocarbonetos mais pesados e também dióxido de carbono, nitrogênio, água, ácido clorídrico, metanol e impurezas mecânicas.

Após sofrer o tratamento adequado, o Gás Natural apresenta as condições comercialmente especificadas para o uso.

São importantes características do gás natural sua densidade inferior à do ar, seu baixo ponto de vaporização e o limite de inflamabilidade em mistura com o ar, superior a outros gases combustíveis.

A liquefação do Gás Natural produz uma mistura em fase líquida de alta densidade energética que permite a estocagem, o transporte e a transformação em condições técnicas econômicas viáveis.

A comercialização do Gás Natural exige o controle sobre uma série de características com maior ou menor rigor em função do nicho de mercado consumidor à que se destina.

O Gás Natural apresenta como produto as seguintes propriedades relevantes: não poluente e não tóxico, inflamabilidade, segurança intrínseca, ausência de odor, aplicação em processos industriais, formação de hidretos e a apresentação na forma de Gás Natural Liquefeito (GNL).

O gás natural é o insumo básico da indústria da Gasoquímica, similar à Petroquímica, que produz uma série de produtos químicos utilizados na indústria, porém com um espectro de produtos químicos ainda maiores.

Para a Gasoquímica, os componentes do gás natural podem ser agrupados em material não hidrocarbonado, gás seco (metano, etano, propano), gases de petróleo liquefeitos (propano, iso-butano e n-butano) e gasolina natural (iso-butano e normal heptano). Esta separação é feita de acordo com a demanda pelo uso combustível dos componentes ou como química para solventes, para conversão em elementos químicos orgânicos ou para a produção do carbono negro.

São produtos principais da Gasoquímica o Metanol, Misturas de Hidrogênio e Monóxido de Carbono, Hidrogênio puro, Amônia Sintética e seus produtos, Etileno, Acetileno, Compostos Aromáticos, Butadieno, Mono Olefinas, Hélio e, mais recentemente, a Gasolina, o Óleo Diesel e o Querosene.

4.2. Gás Natural – O Gás

O gás natural é, como o próprio nome indica uma substância em estado gasoso nas condições ambiente de temperatura e pressão. Por seu estado gasoso e suas características físico-químicas naturais, qualquer processamento desta substância, seja compressão, expansão, evaporação, variação de temperatura, liquefação ou transporte exigirá um tratamento termodinâmico como qualquer outro gás.

A composição do gás natural bruto é função de uma série de fatores naturais que determina o seu processo de formação e as condições de acumulação do seu reservatório de origem. O gás natural é encontrado em reservatórios subterrâneos em muitos lugares do planeta, tanto em terra quanto no mar, tal qual o petróleo, sendo considerável o número de reservatórios que contém gás natural associado ao petróleo. Nestes casos, o gás recebe a designação de gás natural associado. Quando o reservatório contém pouca ou nenhuma quantidade de petróleo o gás natural é dito não associado. Na Tabela 4.1 podem ser visualizados alguns valores de composição típica do gás natural.

Tabela 4.1 – Composição típica do Gás Natural

Fonte: Agência Nacional do Petróleo

Composição Típica do Gás Natural				
Elementos	Associado (1)	Não-Associado (2)	Processado (3)	Processado (4)
Metano[%]	81,57	85,48	88,56	91,80
Etano[%]	9,17	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
N-Pentano[%]	0,30	0,24	-	-
Hexano[%]	0,15	0,21	-	-
Hep. e Superiores[%]	0,12	0,06	-	-
Nitrogênio[%]	0,52	0,53	1,20	1,42
Ióxido de Carbono[%]	0,39	0,64	0,65	-
Total[%]	100	100	100	100
Densidade	0,71	0,69	0,61	-
Poder Cal. Inf.	8,35 kCal/m ³	9,58 kCal/m ³	8,62 kCal/m ³	8,37 kCal/m ³
Poder Cal. Sup.	10,9 kCal/m ³	10,58 kCal/m ³	9,54 kCal/m ³	9,27 kCal/m ³

(1) Gás do campo de Garoupa, Bacia de Campos

(2) Gás do campo de Miranga, na Bahia

(3) Saída da UPGN Candeias, na Bahia

(4) Gás disponível no gasoduto Brasil-Bolívia

Gás natural não deve ser confundido com metano. Conforme sua origem o teor de metano pode variar de cerca de 70% até 95%. O gás natural que está sendo consumido no RS tem cerca de 89% de metano. O segundo componente em maior quantidade é o etano (aproximadamente 6,5%). Em terceiro vem o nitrogênio que dependendo da temperatura é inerte (aproximadamente 1,4%). Os demais componentes são em quantidades pouco significativas. Portanto a fórmula química equivalente reduzida do gás natural é $\text{CH}_{3,76}$ (a do metano é CH_4). Por decorrência é inadequado o nome “Gás metano veicular”. [Dallávia, Diócles, 2001]

4.2.1. Composição do Gás Natural Bruto e do Gás Natural Comercial

Os processos naturais de formação do gás natural são a degradação da matéria orgânica por bactérias anaeróbias, a degradação da matéria orgânica e do carvão por temperatura e pressões elevadas ou da alteração térmica dos hidrocarbonetos líquidos.

A matéria orgânica fóssil é também chamada de querogêneo e pode ser de dois tipos: querogêneo seco, quando proveniente de matéria vegetal e querogêneo gorduroso, quando proveniente de algas e matéria animal.

No processo natural de formação do planeta ao longo dos milhões de anos a transformação da matéria orgânica vegetal, celulose e lignina produziram o querogêneo seco que ao alcançar maiores profundidades na crosta terrestre sofreu um processo gradual de cozimento, transformando-se em linhito, carvão negro, antracito, xisto carbonífero e metano e dando origem às gigantescas reservas de carvão do planeta.

A transformação da matéria orgânica animal ou querogêneo gorduroso não sofreu o processo de cozimento e deu origem ao petróleo. Nos últimos estágios de degradação do querogêneo gorduroso, o petróleo apresenta-se como condensado volátil associado a hidrocarbonetos gasosos com predominância do metano. Por esta razão é muito comum encontrar-se reservas de petróleo e gás natural associados.

Assim, o gás natural como encontrado na natureza é uma mistura variada de hidrocarbonetos gasosos cujo componente preponderante é sempre o Metano. O gás natural não associado apresenta os maiores teores de Metano, enquanto o gás natural associado apresenta proporções mais significativas de Etano, Propano, Butano e hidrocarbonetos mais pesados.

Além dos hidrocarbonetos fazem parte da composição do gás natural bruto outros componentes, tais como o Dióxido de Carbono (CO_2), o Nitrogênio (N_2), Hidrogênio Sulfurado (H_2S), Água (H_2O), Ácido Clorídrico (HCl), Metanol e impurezas mecânicas. A presença e proporções destes elementos dependem, fundamentalmente da localização do reservatório, se em terra ou no mar, sua condição de associado ou não, do tipo de matéria orgânica ou mistura do qual se originou, da geologia do solo e do tipo de rocha onde se encontra o reservatório.

A composição comercial do gás natural é variada e depende da composição do gás natural bruto, do mercado atendido, do uso final e do produto gás que se deseja. Apesar desta variabilidade da composição, são parâmetros fundamentais que determinam a especificação comercial do gás natural o seu teor de enxofre total, o teor de gás sulfídrico, o teor de gás carbônico, o teor de gases inertes, o ponto de orvalho da água, o ponto de orvalho dos hidrocarbonetos e o poder calorífico. A Tabela 4.2 representa mais algumas especificações do gás natural de acordo com a região de comercialização.

Tabela 4.2 – Especificação do Gás Natural (*)

Fonte: Agência Nacional do Petróleo

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE			MÉTODO	
		Norte (5)	Nordeste	Sul, Sudeste, Centro-Oeste	ASTM	ISO
Poder calorífico superior (3)	kJ/m ³	36.600 a 41.200	38.100 a 46.000		D 3588	6976
	kWh/m ³	10,17 a 11,44	10,58 a 12,78			
Índice de Wobbe (4)	kJ/m ³	40.800 a 47.300	49.600 a 56.000		-	6976
Metano, mín.	% vol.	68,0	86,0		D 1945	6974
Etano, máx.	% vol.	12,0	10,0			
Propano, máx.	% vol.	3,0				
Butano e mais pesados, máx.	% vol.	1,5				
Oxigênio, máx.	% vol.	0,8	0,5			
Hidrogênio	% vol.	Anotar				
Inertes (N ₂ + CO ₂), máx.	% vol.	18,0	5,0	4,0		
Nitrogênio, máx.	% vol.	-	2,0			
Enxofre Total, máx.	mg/m ³	70			D 5504	6326-5
Gás Sulfídrico (H ₂ S), máx.	mg/m ³	10,0	15,0	10,0	D 5504	6326-3
Ponto de orvalho de água a 1 atm, máx.	°C	-39	-39	-45	D 5454	-
Hidrocarbonetos líquidos	mg/m ³	Anotar			-	6570

(*) O gás natural deve estar tecnicamente isento, ou seja, não deve haver traços visíveis de partículas sólidas e partículas líquidas.

(*) Limites especificados são valores referidos a 273,15 K (0°C) e 101,325 kPa (1 atm) em base seca, exceto ponto de orvalho.

(3) O poder calorífico de referência de substância pura empregado nesta tabela encontra-se sob condições de temperatura e pressão equivalentes a 273,15 K, 101,325 kPa, respectivamente em base seca.

(4) O índice de Wobbe é calculado empregando o Poder Calorífico Superior em base seca. Quando o método ASTM D 3588 for aplicado para a obtenção do Poder Calorífico Superior, o índice de Wobbe deverá ser determinado pela fórmula constante do Regulamento Técnico

(5) Os limites para a região Norte se destinam às diversas aplicações exceto veicular e para esse uso específico devem ser atendidos os limites equivalentes à região Nordeste.

O produto, ainda deve estar sempre livre de poeira, água condensada, odores

objetáveis, gomas, elementos formadores de goma, glicóis, hidrocarbonetos condensáveis, compostos aromáticos, metanol ou outros elementos sólidos ou líquidos que possam interferir com a operação dos sistemas de transporte e distribuição e à utilização pelos consumidores.

O gás natural pode ser transportado sem odorização, exceto quando requerido por normas de segurança aplicáveis, porém, é obrigatória a presença de odorante na distribuição.

A determinação das características do produto far-se-á mediante o emprego de normas da American Society for Testing and Materials (ASTM) e da International Organization for Standardization (ISO).

Para adquirir as características comerciais desejadas o gás natural bruto passa por tratamento em uma Unidade de Processamento de Gás Natural – UPGN, que efetua a retirada de impurezas e a separação dos hidrocarbonetos pesados.

4.3. Equação de Estado do Gás

O comportamento das variáveis pressão, temperatura e volume do gás real são difíceis de descrever e para modelá-lo utiliza-se a Lei dos Gases Perfeitos ou Ideais. A partir de observações experimentais foi estabelecido que o comportamento das variáveis pressão, temperatura e volume dos gases à baixa densidade pode ser representado com bastante precisão pela seguinte equação de estado, chamada “Equação de Estado dos Gases Ideais”:

$$P.V = n.R.T \quad (4.1)$$

onde P é a pressão em [Pa], V é o volume em [m³], n é o número de moles, R é a constante universal dos gases ideais (8,3144) em [Nm/(molK)] e T é a temperatura absoluta em [K].

Em densidades muito baixas, todos os gases e vapores reagem de maneira bastante próxima à relação P-V-T da equação de estado dos gases ideais.

Como a densidade é uma função da pressão e da temperatura, verifica-se que em pressões muito baixas e temperaturas superiores tal comportamento se verifica.

Em pressões maiores, o comportamento dos gases pode desviar-se substancialmente da equação de estado dos gases ideais. Para corrigir-se este desvio introduz-se, então, um fator de correção variável chamado Fator de Compressibilidade (z), a equação de estado dos gases reais:

$$P.V = z.n.R.T \quad (4.2)$$

Tal fator pode ser uma função gráfica ou matemática de temperatura, pressão e composição do gás.

Para um gás perfeito $z=1$. Para o gás natural pode-se considerar o fator de

compressibilidade do metano.

4.4. Compressão e Expansão do Gás

A compressão do gás natural tem papel importante em toda sua cadeia, desde a produção até o consumo, seja para desenvolver as atividades de transporte, armazenagem ou alimentação de equipamentos.

Conhecido o comportamento das variáveis pressão, temperatura e volume para o gás natural pode-se calcular a potência teoricamente necessária para comprimi-lo através de expressões analíticas que consideram o desvio dos gases reais da Lei de Estado dos Gases Ideais. Quando está disponível, pode-se obter este valor diretamente no Diagrama de Mollier para gases reais.

Quando um gás real é comprimido em um único estágio a compressão se aproxima de um processo adiabático, ou seja, praticamente sem troca de calor entre o gás comprimido e o ambiente.

Os cálculos teóricos de uma compressão adiabática resultam no máximo trabalho teórico necessário para comprimir o gás entre dois níveis de pressão. Por outro lado, os cálculos teóricos de uma compressão isotérmica, ou seja, na qual a temperatura do gás comprimido não se altera com a elevação de pressão, determinam o valor do mínimo trabalho necessário para se efetuar a compressão.

Portanto, estes dois resultados indicam os limites inferiores e superiores da potência necessária para a compressão do gás.

A expansão do gás natural tem algumas aplicações importantes como a liquefação do gás em pequenas proporções e a realização de trabalho recuperando energia do gás natural liquefeito quando da sua vaporização.

Assim, se a expansão é feita através de uma turbina (turbo-expansor), pode-se realizar trabalho útil vencendo uma resistência (carga) sobre seu eixo.

Neste processo de expansão adiabática as variáveis de estado (P-V-T) comportam-se de tal forma que a temperatura final é significativamente menor que a inicial, permitindo sua aplicação em processos de liquefação.

4.5. Variação de Temperatura e Liquefação do Gás

O fenômeno de variação de temperatura que ocorre com um gás quando da sua compressão ou expansão, pode ser facilmente calculado através da seguinte expressão:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (4.3)$$

onde T_2 e T_1 são as temperaturas de saída e entrada em [K], P_2 e P_1 são as pressões de saída e entrada, k é a razão entre os calores específicos do gás (C_p/C_v). Para o gás natural $k=1,31$, C_p é o calor específico à pressão constante e C_v é o calor específico a volume constante.

A liquefação consiste em processos termodinâmicos que promovem a mudança de estado dos gases para o estado líquido. Devido às características de alguns gases, o Metano entre eles, a mudança para o estado líquido não ocorre com a elevação da pressão, sendo necessário à adoção de resfriamento. Para tais gases, chamados criogênicos, a temperatura acima da qual não existe uma mudança distinta das fases líquido e vapor, a temperatura crítica, se encontra abaixo da temperatura ambiente.

O Gás Natural Liquefeito (GNL) é uma mistura, em fase líquida de vários constituintes. Seu comportamento na presença dos vapores destes componentes obedece às leis da termodinâmica do equilíbrio de fases das misturas. Na prática é usada, a curva e tabela do componente de maior proporção, o metano. Para representar comportamento termodinâmico são usados os diagramas de entropia (temperatura/entropia), entalpia (entalpia/pressão) e de Mollier (entalpia/entropia) do metano com excelente aproximação, para GNL de alto teor de metano, no cálculo das mudanças de fase Gás -GNL.

A liquefação do gás natural permite estocá-lo e transportá-lo sob forma condensada em condições técnico-econômicas viáveis. Como pesa menos de 500 kg/m^3 , não necessita de uma estrutura mais forte do que se fosse para água. Se o gás fosse comprimido, a estrutura necessitaria de mais aço.

4.6. Terminologia dos Gases

- Gás Natural Associado: é aquele que, no reservatório, está dissolvido no óleo ou sob a forma de capa de gás. Neste caso, a produção de gás é determinada basicamente pela produção de óleo;

- Gás Natural não Associado: é aquele que, no reservatório, está livre ou em presença de quantidades muito pequenas de óleo. Nesse caso só se justifica comercialmente produzir o gás;

- Gás Natural Liquefeito (GNL): trata-se do gás natural liquefeito em escala comercial, por um processo de refrigeração, com redução do seu volume original em até 600 vezes. O GNL está permitindo a introdução do gás natural em lugares onde não era possível transportar o gás através de gasodutos;

- Gás Liquefeito de Petróleo (GLP): trata-se do obtido pela refinação do petróleo bruto ou do gás natural, liquefaz-se a temperaturas normais e pressões moderadas sendo armazenado em botijões. O GLP consiste de propano ou de butano, ou das misturas destes dois hidrocarbonetos, sendo hoje o combustível doméstico de maior aceitação no país.

- Gás Condensado: alguns campos de petróleo produzem o chamado gás condensado, que não é considerado verdadeiramente um gás e nem líquido, apresentando uma “dupla fase fluida”. Não é um gás devido a sua alta densidade e não é um líquido porque sua superfície de contato varia da fase gasosa para a fase líquida;

- Gás Natural Seco (ou pobre): é aquele em que a presença de hidrocarbonetos mais pesados do que o metano é pequena, não justificando a extração comercial dos mesmos. Normalmente possui 1 galão de líquido recuperável por 100 pés cúbicos;

- Gás Natural Úmido (ou rico): normalmente possui mais de 5 galões de líquido recuperáveis por 100 pés cúbicos.

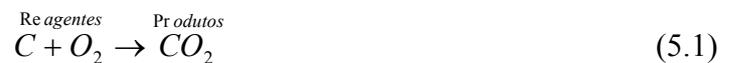
5. Combustão

É a reação química do oxigênio com materiais combustíveis em cujo processo se emitem luz e rápida produção de calor. A diferença entre a reação química de oxidação clássica (ferrugem, zinabre, alumina, etc.) e a de combustão é a velocidade com que esta última ocorre, independente da quantidade de calor liberado. O processo começa quando o sistema atinge a temperatura de ignição, prossegue espontaneamente e cessa quando é alcançado o equilíbrio entre a energia calorífica total dos reagentes e dos produtos.

5.1. O processo de Combustão

O processo de combustão envolve a oxidação dos constituintes do combustível que são oxidáveis e pode, portanto ser representado por uma equação química. Durante o processo de combustão, a massa de cada elemento permanece a mesma. Assim, escrever as equações químicas e resolver os problemas que envolvem quantidades dos vários constituintes implica, basicamente, na conservação de massa de cada elemento.

Considerando, inicialmente a reação do carbono com o oxigênio.



Esta equação indica que um kmol de carbono reage com um kmol de oxigênio para formar um kmol de dióxido de carbono. Isso também significa que 12kg de carbono reagem com 32kg de oxigênio para formar 44kg de dióxido de carbono. Quando um combustível constituído por hidrocarbonetos é queimado, o carbono e o hidrogênio são oxidados. Pode-se exemplificar a combustão do metano.



Neste caso, os produtos de combustão incluem dióxido de carbono e água. Deve ser observado também, que, nos processos de combustão ocorre a formação de muitos produtos intermediários.

Quanto a propagação da chama, pode-se dizer que, nos motores do ciclo Otto é influenciada, principalmente, pela rotação do motor, pressão de admissão, tamanho e curso do êmbolo, relação entre as pressões de admissão e descarga, número de Reynolds, forma da câmara de combustão e pela posição da vela. A temperatura de admissão, umidade atmosférica e temperatura de operação do motor têm pequeno efeito sobre a velocidade de chama. [Taylor C. F.,1982]

Os tipos de chamas são usualmente classificados de três maneiras: pela composição do reagente quando entra na zona de reação, que pode ser pré-misturado ou homogeneizado pelo processo de difusão; pelo fluxo dos gases laminar ou turbulento na zona de reação; e pelo regime estacionário ou transiente da chama. O ciclo Otto é classificado por pré-misturado, regime transiente devido ao ciclo de operação, escoamento turbulento e propagação no estado gasoso. O ciclo diesel caracteriza-se por difusão, regime transiente, turbulência e o combustível inicialmente no estado líquido.

5.2. Composição do Ar de Combustão

Nos motores em geral, o oxigênio disponível no ar é utilizado como oxidante do combustível, enquanto que o restante dos gases existentes no ar são considerados inertes. A mistura do ar seco é composta, em volume, por 21% de oxigênio, 78% de nitrogênio, 1% de argônio e o restante por outros gases, como dióxido de carbono, néon, hélio, metano, etc. O argônio é comumente desprezado na solução dos problemas de combustão que envolve o ar e assim o ar passa a ser considerado como sendo composto por 21% de oxigênio e 79% de nitrogênio (em base volumétrica).

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 tratados 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 $R=8,3143 \text{ J/mol.K}$ e o peso molecular $M=28,962 \text{ g.mol}^{-1}$.

$$\rho = \frac{0,003483 \cdot p_a}{T_{ai}} \quad (5.3)$$

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/m^3].

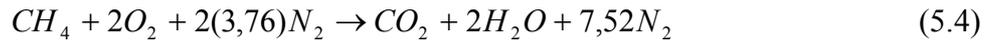
5.3. Combustão Incompleta, Completa, Estequiométrica e Fator λ

Na combustão incompleta ou parcial aparecem produtos intermediários da combustão, especialmente o monóxido de carbono (CO) e o hidrogênio (H_2), 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.

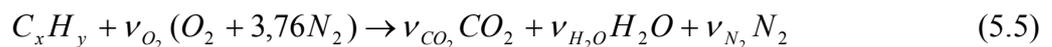
A combustão completa é a reação de combustão em que todos os elementos oxidáveis constituintes do combustível se combinam com o oxigênio, particularmente o carbono e o hidrogênio, que se convertem integralmente em dióxido de carbono (CO_2) e água (H_2O)

independentemente da existência de excesso de oxigênio (O_2) 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. Em geral, a combustão em motores realiza-se a partir do ar atmosférico que apresenta, para cada mol de oxigênio, 3,76 moles de nitrogênio atmosférico. Portanto quando o oxigênio para a combustão do metano for fornecido pelo ar, a reação pode ser escrita:



A quantidade mínima de ar que fornece o oxigênio suficiente par a combustão completa do carbono, hidrogênio e quaisquer outros elementos do combustível que possam oxidar é chamada de “ar teórico”. Quando se consegue combustão completa dos reagentes com o ar teórico, os produtos resultantes não contêm oxigênio. A equação geral para a combustão de um hidrocarboneto com ar apresenta a seguinte forma: [Wylen, G. J. Van, 1995]



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,

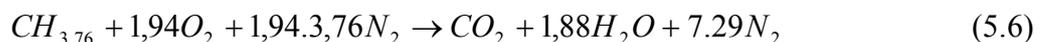
$$C: \nu_{CO_2} = x$$

$$H: 2\nu_{H_2O} = y$$

$$N_2: \nu_{N_2} = 3,76.\nu_{O_2}$$

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

Para a composição do Gás Natural Veicular $CH_{3,76}$ chega-se a seguinte equação da 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:

$$\left(\frac{A}{F} \right) (molar) = \frac{n_{ar}}{n_{comb}} \quad (5.7)$$

onde n_{ar} é dado em [kmol de ar] e n_{comb} é dado em [kmol de combustível]

Calculando a relação ar combustível molar para o combustível gás natural veicular $CH_{3,76}$ chega-se em:

$$\left(\frac{A}{F_F}\right)(molar) = \frac{1,94 + 7,29}{1} = 9,23 \frac{kmolar}{kmolcomb} \quad (5.8)$$

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

$$\left(\frac{A}{F_F}\right)(massa) = \left(\left(\frac{A}{F_F}\right)(molar)\right) \frac{M_{ar}}{M_{comb}} = 9,23 \frac{(0,21 \cdot 32 + 0,79 \cdot 28)}{(12 + 3,76 \cdot 1)} = 16,89 \frac{kg_{ar}}{kg_{comb}} \quad (5.9)$$

Sendo assim necessita-se de $16,89 kg_{ar}$ para oxidar completamente $1 kg_{comb}$, gás natural veicular.

A mistura ar/combustível, quando está com excesso de combustível é chamada de mistura rica e caracteriza-se por apresentar, além do CO_2 e do H_2O , outros produtos, tais como CO e H_2 . Por outro lado, quando há excesso de ar é chamada de mistura pobre. A variável λ representa a relação ar/combustível utilizada (instantânea (i)), com a relação ar/combustível (estequiométrica (s)). Os valores de λ variam conforme descrito na Tabela 5.1. Utiliza-se também o ϕ , que representa o inverso de λ .

$$\lambda = \phi^{-1} = \frac{(A/F_F)_I}{(A/F_F)_S} \quad (5.10)$$

Tabela 5.1 - Condições de λ e de ϕ para mistura pobre, rica e estequiométrica

Mistura	λ	ϕ
Rica	< 1	> 1
Pobre	> 1	< 1
Estequiométrica	= 1	= 1

A potência desenvolvida por um motor do ciclo Otto tem a haver com a posição do pico de pressão máxima (melhor aproveitamento-mecanismo biela manivela) e seu valor (mais corretamente com a área sob a curva). Assumindo como sempre corrigida, para o ótimo, a posição do pico de pressão máxima, a potência fica dependente do seu valor. A pressão tem a haver com a energia envolvida e o número de moles gerados na combustão.

A energia gerada é máxima no estequiométrico e diminui à medida que se invade a região rica. O número de moles gerados aumenta à medida que se invade a região rica. Por um

certo tempo, o aumento de pressão decorrente do aumento do número de moles é maior que o decréscimo de pressão devido à redução da energia envolvida. Por essa razão o valor de máxima potência, para combustíveis líquidos, é na região rica $\lambda < 1$ na situação em que os dois efeitos se equivalem. Para o combustível gás natural esse efeito não se verifica, sendo o $\lambda = 1$ (estequiométrico) para obtenção da máxima potência.

5.4. Efeitos da Razão de Mistura (Ar/Combustível)

Um motor do ciclo Otto pode operar em razões de mistura ar/combustível na faixa de 20:1 a 8:1, ou seja, desde mistura pobre a mistura rica. A relação entre a potência e o consumo específico de combustível pode ser medida variando as razões da mistura ar/combustível com a borboleta totalmente aberta e a rotação constante. Os resultados podem ser apresentados na forma de Curva de Hook, que mostra a relação entre o consumo específico (bsfc) e a pressão média efetiva (bmep).

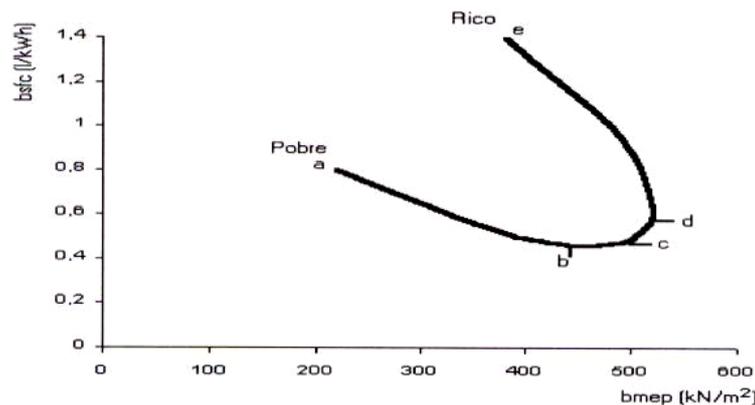


Figura 5.1 - Curva de Hook, consumo em um motor ciclo Otto.

Fonte: Plint, M., A. & Martyr, A., 1997

onde:

- O ponto *a* corresponde à mistura pobre, na qual o motor está operando. Nesse ponto a potência é bastante reduzida, e o consumo específico (eixo das ordenadas), pode chegar a duas vezes mais do que o consumo específico de melhor eficiência;

- O ponto *b* corresponde ao melhor desempenho do motor (maior eficiência térmica);

- O ponto *c* corresponde à razão estequiométrica da mistura;

- O ponto *d* corresponde à máxima potência, mas o consumo específico é cerca de 10% maior do que o consumo específico do ponto de máxima eficiência térmica (ponto *b*);

- O ponto *e* corresponde ao máximo valor de mistura rica em que o motor pode operar.

Cabe ainda ressaltar algumas características importantes relacionadas à razão

ar/combustível, tais como:

- Para misturas ricas a partir da zona de máxima potência em direção à mistura estequiométrica, tem-se uma combustão rápida e de chama azul, que cessa rapidamente no ciclo de expansão;

- Tornando a mistura mais pobre ainda, esta se propagará durante o ciclo de expansão, ocasionando retorno de explosões no coletor de admissão. Por outro lado tornando a mistura mais rica que a de máxima potência, ocorrerá formação de chama amarela devido a partículas incandescentes de carbono que se propagam até a abertura da válvula de escape, podendo ocasionar explosões no sistema de exaustão.

5.5. Composição dos Gases de Escape

O gás de exaustão, também chamado produtos da combustão, tem como seus componentes básicos o dióxido de carbono (CO_2), vapor d'água (H_2O), oxigênio (O_2) e nitrogênio (N_2).

Tabela 5.2 - Composição dos gases de exaustão para a combustão perfeita de diversos gases.

Fonte: Gas Engineers Handbook

Hidrocarbonetos Parafinados	Proporção em Volume [m ³ Produto/m ³ Combustível]				Ponto de Orvalho [°C]	Proporção em Massa [kgProduto/kgCombustível]		
	CO ₂	H ₂ O	N ₂	Total		CO ₂	H ₂ O	N ₂
Metano	1,00	2,00	7,53	10,53	59	2,74	2,25	13,28
Etano	2,00	3,00	13,18	18,18	57	2,93	1,80	12,39
Propano	3,00	4,00	18,82	25,82	55	2,99	1,63	12,07
Butano	4,00	5,00	24,47	33,47	54	3,03	1,55	11,91
Pentano	5,00	6,00	30,11	41,11	53	3,05	1,50	11,81

Os gases de exaustão de uma combustão real contem entre outros produtos o monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H₂), aldeídos, hidrocarbonetos insaturados, óxidos de nitrogênio (NO_x), dióxido de enxofre (SO₂), trióxido de enxofre (SO₃) e gases combustíveis não queimados. O aparecimento destes compostos e a sua proporção dependem dos elementos componentes do combustível, do excesso de ar e das condições em que a combustão se processa, como temperatura, pressão e características construtivas da câmara de combustão.

5.6. Explosão de Combustíveis Gasosos

5.6.1. Condições de Ignição e Limites de Inflamabilidade

Uma mistura de gás inflamável é aquela em que a chama se propaga. A iniciação da chama é realizada por uma fonte externa. Os limites de inflamabilidade de um combustível gasoso definem a faixa de diluição mínima e máxima do gás em ar para que a combustão possa ocorrer. Abaixo do limite mínimo a mistura não queimará sem a presença contínua de uma fonte de calor externa. Acima do limite máximo o gás age como diluente e a chama não se propaga.

Como fatores que influenciam os limites de inflamabilidade, tem-se:

- Temperatura da Mistura: uma elevação da temperatura inicial da mistura gás combustível ar amplia os limites de inflamabilidade, ou seja, o limite inferior se reduz e o limite superior se eleva, como pode ser visto na Tabela 5.3;

Tabela 5.3 - Efeito da temperatura inicial do gás sobre os limites de inflamabilidade.

Fonte: Gas Engineers Handbook

Temperatura Inicial do Gás [°C]	Limite de Inflamabilidade da Mistura Ar Gás [%]			
	Metano	Hidrogênio	Monóxido de Carbono	Etileno
17	6,3 – 12,9	9,4 – 71,5	16,3 – 70,0	3,45 – 13,7
100	5,95 – 13,7	8,3 – 73,5	14,8 – 71,5	3,20 – 14,0
200	5,50 – 14,6	7,9 – 76,0	13,5 – 73,0	2,95 – 14,9
300	5,10 – 15,5	7,1 – 79,0	12,4 – 75,0	2,95 – 14,9
400	4,80 – 16,6	6,3 – 81,5	11,4 – 77,5	2,5 -

- Pressão da Mistura: os valores tabelados dos limites de inflamabilidade são obtidos para a pressão atmosférica. Próximo da pressão atmosférica os valores não variam de forma significativa. Em pressões inferiores a atmosférica a tendência geral é de contração da faixa de inflamabilidade, com elevação do limite inferior e redução do limite superior. Em pressões superiores à atmosférica o limite inferior tende a permanecer estável enquanto o limite superior apresenta um crescimento.

5.6.2. Temperatura de Ignição ou de Inflamação

É a menor temperatura na qual o calor é gerado pela combustão em velocidade superior ao calor dissipado para a vizinhança, dando à mistura condições de se autopropagar. Abaixo desta temperatura a combustão da mistura ar gás só ocorrerá continuamente mediante o fornecimento ininterrupto de calor externo. A temperatura de ignição não é uma propriedade fixa de um gás, pois varia de forma significativa com parâmetros como o excesso de ar, a taxa de diluição do gás na mistura, a concentração de oxigênio no ar de combustão, a composição do gás combustível, a velocidade da mistura ar gás, pressão da mistura, leis do escoamento dos fluidos, fontes de ignição e gradientes de temperatura.

Apesar desta variabilidade, a temperatura de ignição é um importante parâmetro de medida da tendência de um objeto quente provocar a ignição de uma mistura e, portanto, base técnica para considerações de segurança.

A temperatura de ignição de muitas substâncias combustíveis se reduz com o aumento da pressão, o que representa um importante fator para a operação dos motores alternativos e turbinas a gás.

Tabela 5.4 - Comparação da temperatura de ignição de vários gases em ar e em oxigênio.

Fonte: Gas Engineers Handbook

Substância	em Ar [°C]	em O₂ [°C]
Monóxido de Carbono	644 a 658	637 a 658
Metano	705	
Etano	520 a 730	520 a 630
Propano	466	490 a 570
Iso-Butano	462	
n-Butano	505	

Tabela 5.5 - Temperatura de ignição do metano para várias concentrações da mistura ar gás.

Fonte: Gas Engineers Handbook

Proporção do Ar Teórico %	Proporção de O ₂ no Ar de Combustão%	m ³ _{Ar} /m ³ _{Combustível}	Composição da Mistura		Temperatura de Ignição [°C]
			% CH ₄	% Ar	
80	15	10,7	8,5	91,5	740
	10	0,9	10	90	720
	21	7,62	11,6	88,4	717
	25	6,4	13,5	86,5	708
100	15	13,34	7	93	720
	18	11,12	8,4	91,6	712
	21	9,52	9,5	90,5	705
	25	8	11,1	88,9	698

5.6.3. Propagação da Combustão

Atendidas as principais condições para a combustão, ou seja, mistura dentro da faixa entre os limites de inflamabilidade e existência de uma fonte externa capaz de fornecer a energia de ignição a um ponto da mistura que atingirá a temperatura de ignição, se inicia o processo de propagação da combustão.

As características da propagação da combustão, sendo a principal delas a velocidade de propagação da chama, são função do gás combustível, da composição da mistura ar combustível, da sua temperatura, da sua pressão, das características físicas da câmara de combustão e da taxa de absorção de calor da mistura.

5.6.4. Velocidade de Queima e Deflagração

Também chamada de taxa de propagação da chama ou velocidade de ignição, é a velocidade com que a frente de chama se desloca através da mistura ar combustível, inflamando a mistura ainda não queimada.

Deflagração, é a propagação da combustão que ocorre por transmissão de calor devido à condução, convecção e radiação da chama para a mistura ar gás vizinho, levando esta a atingir a temperatura de inflamação e iniciar a combustão. A velocidade de propagação da chama neste processo é relativamente baixa se comparada às velocidades máximas possíveis, e são da

ordem de 6 a 300 cm/s. Para o Metano, Etano, Gás Natural, Propano, Butano e GLP estes valores estão em torno de 25 a 30 cm/s, na mistura com a quantidade de ar teórico.

5.6.5. Detonação e Pré-Igنيção

Detonação é a propagação da combustão que ocorre pelo deslocamento de uma violenta onda de choque de pressão que comprime a mistura gasosa e a leva à sua temperatura de inflamação. A energia necessária à manutenção da onda de choque se origina na própria combustão. As velocidades de propagação da chama em condições de detonação são elevadíssimas, variando entre 1.500 e 6.000 vezes as velocidades em condições normais de combustão à pressão constante.

O combustível queima adequadamente, desde que resista à temperatura de trabalho sem entrar em detonação. Essa qualidade antidetonante é conhecida como octanagem. Se, por exemplo, a taxa de compressão de um motor for muito elevada para a octanagem de um combustível utilizado, poderá então ocorrer a detonação, que é um forte ruído (conhecido como batida de pino) originado por várias explosões simultâneas e isoladas da mistura ar/combustível dentro da câmara de combustão. A presença ou ausência de detonação reflete o resultado da corrida entre o avanço da frente de chama e as reações de pré-combustão do gás terminal. A detonação não ocorrerá se a frente de chama consumir o gás, antes dessas reações terem tempo de causar a auto-ignição da mistura combustível-ar. Detonação ocorrerá se as reações de pré-combustão produzirem auto-ignição antes da frente de chama chegar.

Outro fenômeno importante relacionado com a combustão anormal é a pré-ignição, que não deve ser confundida com a detonação. A pré-ignição é definida como sendo o início da combustão antes da ignição, devido à composição do combustível, temperatura do eletrodo da vela de ignição, depósitos de carbono na câmara de combustão, superaquecimento das válvulas ou qualquer outra superfície quente na câmara de combustão.

6. O Uso do Gás Natural em Veículos Automotores

O Gás Natural Veicular (GNV), é um combustível gasoso cujas propriedades químicas se adaptam bem à substituição dos combustíveis tradicionais para motores que funcionam através da ignição por centelhamento, sejam motores de quatro tempos (ciclo Otto) ou motores de dois tempos. Estes motores usam em geral a gasolina como combustível, porém no Brasil também são comuns os motores que utilizam álcool hidratado (etanol).

No caso do uso do GNV em motores concebidos para utilizar gasolina ou álcool hidratado, é comum que se opere na forma "bicombustível", utilizando preferencialmente o GNV, porém podendo ser usado o combustível original (gasolina ou álcool hidratado). Os veículos que possuem este tipo de adaptação podem ser fabricados desta forma, vindos de fábrica com essa possibilidade de escolha quanto ao combustível a ser utilizado, ou podem ser adaptados em oficinas credenciadas, onde sofrem um processo de conversão e passam a poder contar com a opção de utilizar o GNV como combustível.

O GNV também pode ser usado para propulsão de veículos movidos a óleo diesel (motores de dois ou quatro tempos que possuem ignição por compressão), quer na forma combinada, que utiliza tanto o diesel quanto o gás, ou substituindo o antigo motor movido a diesel por outro movido apenas a gás. Nestes casos, a conversão do veículo é mais complexa e também mais cara, principalmente se houver a necessidade de substituição do motor original ou realização de serviços de retífica.

No Brasil, a idéia original era de se utilizar o GNV como substituto do óleo diesel para a propulsão da frota de veículos pesados nos centros urbanos. Esta frota é composta por micro ônibus, ônibus e caminhões de diversas tonelagens. Esta idéia deu lugar a uma maior difusão do uso de GNV na frota de veículos leves, em função algumas dificuldades inerentes ao mercado de GNV como substituto do óleo diesel, tais como:

- Pequena diferença entre o preço do óleo diesel e do GNV;
- Pouca disponibilidade em território nacional de Postos de Serviço com capacidade específica para atender à frota;

A perspectiva do uso de GNV no Brasil fica mais clara observando-se o cronograma das fases de utilização deste combustível no cenário nacional.

⇒ Primeira Fase: de 1980 ao final de 1991;

- Início das discussões para utilização do GNV como combustível;
- Criação de Comissões Governamentais para o estudo da substituição do óleo diesel

pelo GNV no transporte de cargas e passageiros;

- Dificuldades iniciais com a pouca disponibilidade do produto e a pequena diferença entre os preços do óleo diesel e do GNV, tornando a conversão de frotas inviável;
- Criou-se o impasse: não se investia em conversão de frotas nem na construção de Postos de Serviço.

⇒ Segunda Fase: de 1992 a meados de 1994;

- Liberação do uso de GNV para taxistas e frotas de empresas;
- Inauguração do primeiro Posto de Serviço para venda de GNV para o público;
- Os volumes de GNV demandados cresceram bastante em função da viabilidade econômica do seu uso em táxis, acarretando falta de produto para abastecimento.

⇒ Terceira Fase: meados de 1994 ao final de 1996;

- O Plano Real propicia uma estabilização do preço dos combustíveis e a sensação para o usuário de que a economia feita pelo uso de GNV diminuía;
- Concessão de isenção de impostos para os taxistas que optassem pelo uso de GNV, acarretando uma grande renovação da frota de veículos, principalmente em São Paulo;
- As montadoras não mantinham a garantia para veículos novos convertidos para o uso de GNV.

⇒ Quarta Fase: de 1997 até os dias de hoje;

- Liberação do uso de GNV para veículos particulares;
- Há uma maior percepção por parte dos usuários quanto às vantagens do uso do GNV como substituto da gasolina e do álcool;
- Uma maior conscientização dos benefícios que o GNV trás para o meio ambiente;
- O crescimento do mercado de transportes autônomos e de frotistas alavanca a demanda de GNV;
- Um maior número de Postos de Serviço é oferecido ao público.

⇒ Perspectivas futuras:

- O uso de GNV é uma tendência;
- Espera-se uma pressão dos usuários e a conscientização das montadoras para produção em fábrica de veículos novos movidos a GNV;
- A demanda por GNV deverá crescer consideravelmente;

- Um maior número de Postos de Serviço deverá ser aberto;
- A utilização de GNV para veículos de transporte coletivo de passageiros deverá ser viabilizada, principalmente para veículos de pequeno e médio porte.

6.1. Características Técnicas no Uso de GNV em Motores do Ciclo Otto

Como substituto da gasolina e do álcool hidratado, o GNV tem todas as propriedades físicas e químicas de que um veículo necessita para um bom desempenho. O uso de GNV proporciona a potência necessária e o desempenho regular do motor, tanto em marcha lenta (baixas rotações e sem carga) como em situação de altas solicitações de potência (altas rotações com carga) ou torque (baixas rotações e muita carga), sendo capaz de inibir de forma eficaz o problema de detonação sem a adição de substâncias aditivas. [Lastres, L.F.M.]

6.1.1. Mistura e Distribuição de Combustível

A mistura e distribuição do gás natural com o ar se dão naturalmente sem necessidade de haver turbulência ou aquecimento. Essa mistura homogênea, bem distribuída pelos cilindros, propicia:

- Partidas mais fáceis;
- Funcionamento a frio sem grandes problemas;
- Queimas mais completas.

6.1.2. Resfriamento do Sistema de Admissão e da Câmara de Combustão

Nos motores alimentados por combustíveis líquidos, é necessária a vaporização do combustível para facilitar a mistura com o ar. Para tal, transfere-se calor das paredes em contato com a mistura causando assim um resfriamento das mesmas.

Nos motores alimentados a gás isto não ocorre e pode-se observar um aumento de temperatura na câmara de combustão que o sistema de refrigeração deverá ser capaz de dissipar.

Assim, nos motores movidos a gás, o sistema de refrigeração deverá estar limpo e em perfeito funcionamento.

6.1.3. Potência Fornecida

A quantidade de gás necessária á combustão, ocupa um volume maior do que se esse combustível estivesse em estado líquido. Assim, a quantidade de ar admitida é menor e observa-

se uma perda de potência quando o gás é utilizado.

Pode-se compensar um pouco esta perda resfriando-se a mistura, sem, no entanto, afetar a homogeneidade da mesma.

6.1.4. Sistema de Ignição

A mistura ar-gás ioniza menos o ambiente da câmara de combustão e, assim, requer maior voltagem do sistema de ignição para uma combustão mais eficiente.

Os sistemas de ignição eletrônicos utilizados em motores do ciclo Otto são capazes de fornecer esta carga, desde que se encontrem em boas condições de uso.

A velocidade de queima do gás é mais baixa que as velocidades de queima dos carburentes líquidos. Nesse caso, é preciso regular o avanço de ignição.

6.1.5. Desgaste, Óleo Lubrificante e Amaciamento do Motor

A combustão do GNV com excesso de ar é muito próxima da combustão completa, reduzindo os resíduos a dióxido de carbono e vapor de água e inibindo a formação de resíduos de carbono no motor, (desaparecimento de resíduos nas velas, nas válvulas, nos cilindros e no lubrificante), o que aumenta sua vida útil e o período entre manutenções.

O óleo lubrificante mantém-se isento de impurezas por longos períodos devido à ausência de carbono formado na combustão dos motores alimentados a gás. Outrossim, não são observadas as freqüentes diluições do óleo e remoção da película de óleo dos cilindros causados pelos combustíveis líquidos.

O óleo se mantém em melhores condições de uso, podendo seu período de troca ser aumentado caso seja feito um acompanhamento das características físico-químicas do mesmo.

Devido á menor formação de carbono e, conseqüentemente, melhor lubrificação do conjunto cilindro, êmbolo, anéis, o amaciamento do motor movido a gás é prejudicado e os fabricantes recomendam a sua utilização inicial com combustíveis líquidos.

6.1.6. Desgaste de Válvulas ou Sede de Válvulas

Alguns combustíveis líquidos recebiam uma aditivação de chumbo para aumentar a sua octanagem, antes de 1991. O chumbo contido na gasolina depositava-se nas válvulas e sedes agindo então como um lubrificante e protegendo-as da erosão. Em veículos fabricados antes de 1991, ao utilizar gás natural, verifica-se um maior desgaste das válvulas e suas sedes em relação

aos veículos mais novos, pois eram feitas com materiais de menor dureza em relação aos materiais utilizados atualmente, os quais possuem uma maior dureza devido a ausência do chumbo como aditivo. Uma solução possível para os veículos mais velhos consiste em trocar as sedes por outras de material mais resistente.

6.1.7. Octanagem e Número de Metano do Gás Natural

A qualidade antidetonante de um combustível é traduzida pela sua octanagem, a qual pode ser medida pelos seguintes métodos.

⇒ *MON* (Método Motor), representa a qualidade antidetonante da gasolina em alta rotação e a plena carga (acelerador totalmente acionado)

⇒ *RON* (Método Research), representa a situação em que o motor está à plena carga e em baixa rotação (cerca de 3000RPM).

Para um melhor controle sobre a qualidade antidetonante de um combustível há necessidade de controle do *MON* e do *RON*, pois cada um representa uma situação diferente de uso do motor. Para cada motor há um mínimo de *MON* e *RON* necessário para o funcionamento correto, não havendo vantagem em uma octanagem excedente.

A gasolina automotiva vendida no Brasil com 22% de álcool, possui as seguintes octanagens: $MON=80$ octanas, $(MON+RON)/2=87$ octanas.

A medição de octanagem do gás natural é complicada devido ao seu elevado valor. Por esse motivo foi desenvolvido um método chamado de “Número de Metano”. Basicamente se resume a encontrar uma composição de metano (atribuindo valor 100) e hidrogênio (atribuindo valor 0) que tenha comportamento similar a amostra em motor padrão. O percentual de metano da referência passa a ser o Número de Metano.

Existe correlação desenvolvida entre *MON* e Número de Metano.

$$MON = 0,679.NM + 72.32 \quad (6.1)$$

onde: *NM* é o Número de Metano em [%].

Para uma composição de GNV que contenha 90% de metano, segundo a equação acima, ter-se-á um $MON=133$ octanas.

Um motor especialmente projetado ou adequadamente adaptado para o uso de GNV opera normalmente com taxas de compressão da ordem de 18:1 a 19:1, permitida em função do elevado poder antidetonante inerente ao GNV, e, portanto apresenta uma eficiência térmica superior se comparado a motores à gasolina ou álcool hidratado.

Devido à necessidade de conciliar a operação da forma "bicomustível", em função de uma rede de abastecimento ainda limitada, os veículos convertidos devem manter as taxas de compressão originais de seus motores a gasolina (8:1) ou álcool hidratado (12:1), o que pode acarretar uma sub-utilização das características originais do GNV e uma perda de potência, já que o gás natural poderia trabalhar a uma taxa de compressão entre 18 á 19:1. Os motores alimentados a álcool hidratado apresentam um melhor rendimento quando convertidos, em comparação com os motores a gasolina, devido as maiores taxas de compressão apresentadas nesses motores.

6.2. Segurança e Vantagens Econômicas

O GNV não é uma fonte de perigo para o veículo como muita gente pensa. As normas relacionadas com a conversão são extremamente rígidas e seus controles são melhores do que aqueles relacionados com a maioria das outras partes do veículo. Os componentes do sistema de conversão são testados exaustivamente pelos fabricantes com a finalidade de assegurar uma confiabilidade elevada.

Uma característica do GNV é que em caso de escapamento ele se dissipa rapidamente para a atmosfera, evitando concentrações de produtos potencialmente perigosos, não é tóxico nem irritante e apresenta um ponto de auto ignição elevado, (650°C).

As normas de projeto e construção dos Postos de Serviço são tão ou mais severas do que aquelas empregadas na conversão dos veículos, o que garante normalmente um padrão de segurança nas instalações de GNV no mínimo igual ou superior àquelas encontradas para os combustíveis líquidos.

Quanto as vantagens econômicas, a principal diz respeito ao menor preço de comercialização do GNV se comparado com a gasolina e o álcool hidratado, conforme pode ser verificado na Tabela 6.1, que se aplica à frota de veículos leves.

Tabela 6.1 - Economia com a Utilização de GNV

Fonte: Autor

ECONOMIA COM A UTILIZAÇÃO DE GNV	
PREÇO DO COMBUSTÍVEL NA BOMBA (Gasolina):	R\$ 2,260
PREÇO DO GÁS NATURAL NA BOMBA:	R\$ 1,199
KILOMETRAGEM MÉDIA POR DIA:	250
RENDIMENTO MÉDIO COM COMBUSTÍVEL ORIGINAL (km/L):	8,5
# RENDIMENTO MÉDIO COM GÁS NATURAL (km/m ³):	10,2
DIAS RODADOS POR MÊS EM MÉDIA:	25
KILOMETRAGEM TOTAL (km):	6250
CAPACIDADE DO CILINDRO (m ³):	16
AUTONOMIA (km):	163,20
VALOR PAGO PELO KIT (Média):	R\$ 3.500,00
RESULTADOS	
RODANDO COM COMBUSTÍVEL ORIGINAL	
CONSUMO MÉDIO DIÁRIO COM COMB. ORIGINAL (Litros):	29,41
CONSUMO MÉDIO MENSAL COM COMB. ORIGINAL (Litros):	735,29
GASTO TOTAL POR MÊS:	R\$ 1.661,76
RODANDO COM GNV	
CONSUMO MÉDIO DIÁRIO DE GÁS NATURAL (m ³):	24,51
CONSUMO MÉDIO MENSAL DE GAS NATURAL (m ³):	612,75
GASTO TOTAL POR MÊS:	R\$ 734,68
ECONOMIA MENSAL (por veículo):	R\$ 927,08
RETORNO DO INVESTIMENTO (meses):	3,8

Pode-se ter uma boa aproximação para o Rendimento Médio com o Gás Natural, fazendo-se (Rendimento Médio com o combustível original *1,2). [Costa, M.A.,2001]

Considerando preço do GNV em 1,199 reais/litro, (janeiro de 2003), e um usuário que rode em média 250 km/dia durante 25 dias no mês, pode-se afirmar que o investimento inicial em conversão, de cerca de R\$3500, poderá ser amortizado em média entre 3 a 4 meses, dependendo do combustível original do veículo.

Para o caso do uso de GNV em substituição ao óleo diesel, as vantagens provenientes das economias no custo do combustível são menores, em função da menor diferença entre os preços do óleo diesel e do GNV. Além disso, o custo da conversão neste caso é

significativamente maior em função da necessidade de um maior número de cilindros que permitam o armazenamento de produto suficiente para garantir autonomia operacional dos veículos.

6.3. Combustível Ecológico

Pelas características descritas anteriormente, pode-se verificar que o uso de GNV tem importante papel na redução dos níveis de poluição atmosférica, uma vez que a sua combustão com excesso de ar tende a ser completa, liberando apenas dióxido de carbono (CO_2) e água (H_2O). Acrescente-se a isto o 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.

Quanto às emissões de CO pode-se afirmar que para o ciclo Otto tem-se 1% de CO em vez de 5% e 200ppm de não-queimados em vez de 5000ppm, enquanto para o ciclo Diesel tem-se 0,2% de CO contra 5% normalmente, e 100ppm de não-queimados em vez de 5000ppm. Pode-se assim reduzir no ambiente urbano as emissões de monóxido de carbono (CO) em 70%, óxidos de nitrogênio (NO_x) em 84% e de hidrocarbonetos pesados (C_nH_m) em 88%, em média, praticamente eliminando as emissões de benzeno e formaldeídos cancerígenos.

É importante que se destaque que o GNV apresenta riscos de provocar asfixia, incêndio e explosão, esta última principalmente em função da sua pressão de armazenagem.

6.4. Aspectos Sobre Emissões

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 e o mapeamento. 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 NO_x 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. Por exemplo, está-se avaliando a emissão de CO na relação ar/combustível de máxima potência, ao colocar-se gás hidrogênio puro para queimar o CO não existirá. Por analogia verifica-se que quanto maior o percentual de hidrogênio na molécula (menos carbono) menor será a emissão de CO na região

rica.

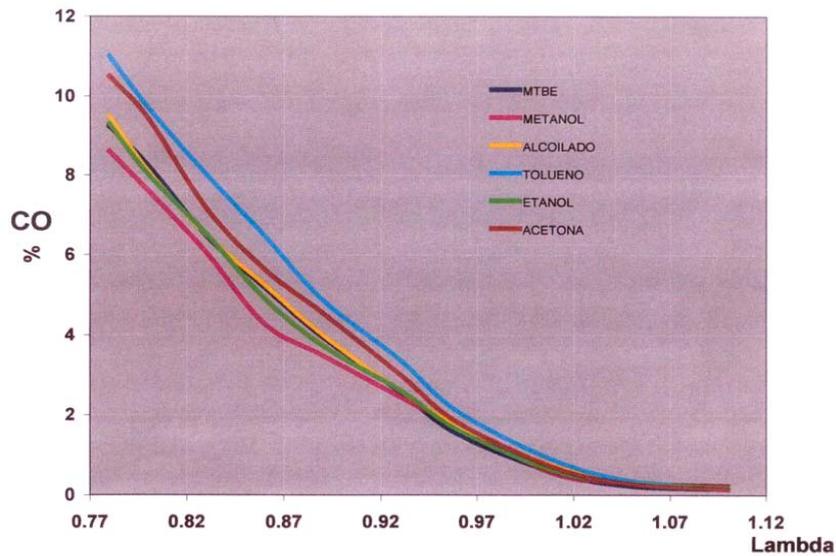


Figura 6.1 - CO experimental para alguns combustíveis

Fonte: Dallávia, D., 2001

À medida que o lambda invade a região rica o monóxido de carbono (CO) aumenta sensivelmente e, para as mesmas famílias (álcoois, hidrocarbonetos...), se separa de acordo com o percentual de carbono da molécula.

Tabela 6.2 - CO₂ máximo teórico calculado pela reação de combustão no estequiométrico

Fonte: Dallávia, D., 2001

	Carbono [%]	Hidrogênio [%]	Oxigênio [%]	CO ₂ 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
GNV	76,02	23,98	0	9,79

O menor CO₂ teórico significa também menor CO na região rica. Portanto verifica-se que o GNV tem um excelente potencial para fazer um motor pouco poluente. Na verdade, dos combustíveis disponíveis, é o melhor.

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.

No caso do GNV, o CO₂ agregado é bastante baixo, pois na maioria dos casos, ele já existe praticamente pronto no subsolo.

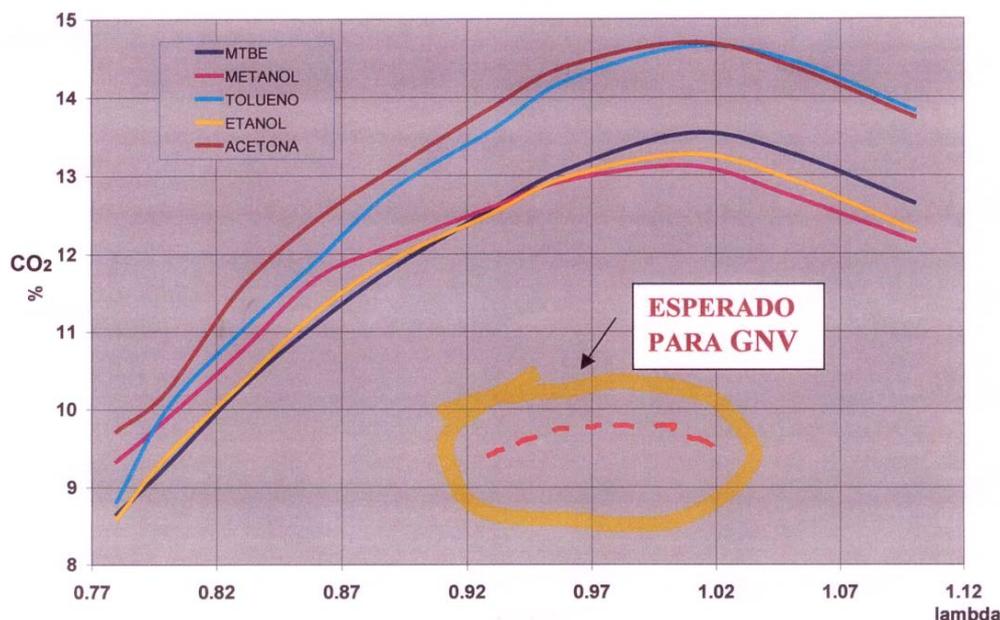


Figura 6.2 - Produção de CO₂ agregado de alguns combustíveis

Fonte: Dallávia, D., 2001

Os valores medidos por analisadores infravermelhos de gases (os normalmente utilizados em oficinas) fornecem um valor levemente maior que os listados para todos os combustíveis. Isto acontece porque a medição é geralmente feita em marcha lenta.

A explicação reside no fato de que como o valor é reportado em “% volume” e condensa boa quantidade de água na descarga quando em lenta, resulta em percentual relativo maior (essa água, ao condensar, deixa de fazer parte dos gases de descarga). Nunca se deve esquecer que todo o hidrogênio do combustível (aproximadamente 24% no caso do GNV) transforma-se em água no processo de combustão, condensando mais ou menos conforme temperatura na descarga.

Em dinamômetro, em especial com condições de altas rotações, por ser a temperatura na descarga bastante alta, os valores lidos são muito próximos do teórico.

Em carga parcial e utilizando combustível líquido, ao acionar-se o acelerador, ocorre aumento na pressão absoluta do coletor (redução no vácuo). Isto faz com que o combustível que estava vaporizado condense molhando a parede do coletor. Se nada for feito o motor irá “engasgar” por pobre, pois a mistura que está sendo admitida naquele instante ficou sem aquele combustível que condensou. Essa situação descrita é contornada com sistemas de

enriquecimento nos transientes. Basicamente aumento do pulso de injeção para os veículos com injeção eletrônica e bomba de aceleração (injeção de combustível adicional na forma líquida) nos carburados. O fato resultante é que se passa por curtos momentos de mistura rica (bastante mais CO) cada vez que se aciona o acelerador.

Com o gás o problema descrito não ocorre, porque ele não condensa. Por conta deste fato o CO fica bastante reduzido se comparado a combustíveis líquidos.

Outro fato importante é quando se está com combustível líquido e deseja-se a potência máxima (uma ultrapassagem, por exemplo). A partir de uma certa posição do acelerador (aproximadamente 70% a 80%) a central de injeção (para combustíveis líquidos) aumenta o pulso de injeção de forma a enriquecer para a máxima potência. Isto resulta em um CO entre 3,5% a 4,5%. Nos veículos carburados existem circuitos enriquecedores para esse fim, (válvula de máxima, Econostat).

O enriquecimento (quando se usa combustível líquido), é necessário porque o lambda de máxima potência é na região rica, da ordem de 0,89 para gasolina e 0,85 para o etanol. Esse valor é uma característica do combustível.

Para o caso do GNV o lambda de máxima potência é próximo do estequiométrico, onde geralmente tem-se CO bastante reduzido, (da ordem de 0,5% a 1% dependendo do combustível).

Pelo exposto, como o GNV não necessita de enriquecimento para aceleração e não necessita de enriquecimento para atingir a potência máxima, resulta em baixíssima emissão de monóxido de carbono, chegando a reduções de até 70% (quando a adaptação for feita de forma correta).

7. Equipamentos Básicos para a Conversão de Veículos Equipados com Carburador ou Injeção Eletrônica de Combustível

Nesta seção serão listados os equipamentos básicos de uma conversão típica de um veículo equipado com carburador ou injeção eletrônica, para o uso de GNV. Estes equipamentos compõem o “kit” de conversão. Ao “kit” de conversão deve-se acrescentar o(s) cilindro(s) de acondicionamento do gás a alta pressão. Desse modo, a conversão é possível por meio da composição: “kit” de conversão + cilindro de alta pressão.

Estes equipamentos permitem que o veículo convertido utilize o GNV como combustível, conjuntamente com o combustível original.

Dentre os equipamentos, destaca-se o cilindro de alta pressão, o redutor de pressão, a válvula do cilindro, a tubulação de alta pressão e a válvula de abastecimento. Estes equipamentos desempenham um papel importante no funcionamento e na segurança do veículo convertido e respondem pela maior parte dos custos. Uma descrição mais detalhada destes equipamentos principais será apresentada a seguir.[CTGÁS,2000]

7.1. Válvula de Abastecimento

A válvula de abastecimento é o dispositivo que permite o abastecimento do veículo. 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 7.1 devem possuir um dispositivo de corte rápido acoplado, de modo a garantir a interrupção do fluxo de gás em caso de acidente no abastecimento.

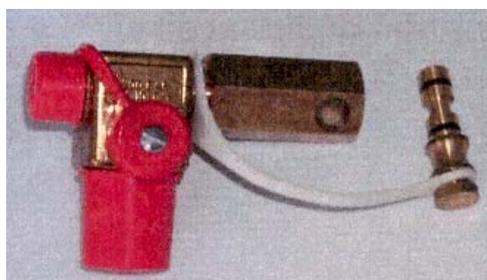


Figura 7.1 - Válvula de abastecimento

7.2. Válvula de Cilindro

A válvula de cilindro, Figura 7.2, é responsável por grande parte da segurança do Kit incorpora três sistemas: o primeiro sistema, de excesso de fluxo, impede 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); o segundo sistema, é o de excesso de pressão, que alivia a pressão interna do cilindro evitando a sua ruptura; o terceiro sistema possibilita o fechamento total do gás no interior do cilindro.

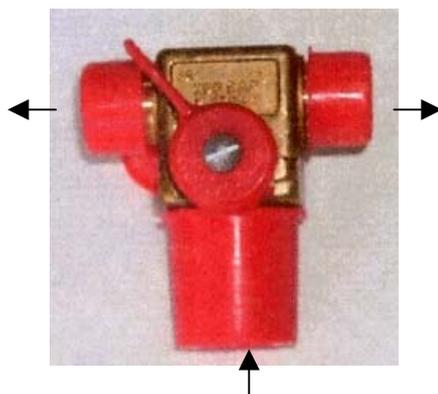


Figura 7.2 - Válvula de cilindro

7.3. Invólucro Estanque

Em caso de possíveis vazamentos na válvula de cilindro, o invólucro estanque, Figura 7.3, encontra-se hermeticamente fechado, propiciando o alívio da pressão para o exterior do veículo.



Figura 7.3 – Invólucro estanque

7.4. Redutor de Pressão

O redutor de pressão, Figura 7.4, tem a função de reduzir e estabilizar a pressão do reservatório, sendo sensível às solicitações do motor, 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.

Sua pressão de trabalho é de 200bar (entrada), 1bar (saída) e 800bar (ensaio).

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 7.4 - Redutor de pressão

7.5. Tubulação de Alta Pressão

A tubulação de alta pressão, Figura 7.5, é responsável por conduzir o GNV desde a válvula de abastecimento até o cilindro de armazenamento e deste até a válvula reguladora de pressão. Tanto a linha de abastecimento do cilindro como de alimentação do redutor de pressão podem apresentar diâmetro interno nominal de 8 mm, ou se pode opcionalmente alimentar o redutor de pressão com tubo de 6 mm de diâmetro interno.

Esta tubulação é produzida em aço-liga e deve apresentar acabamento bicromatizado, internamente e externamente. Eventualmente aceita-se que esta tubulação tenha acabamento externo pintado com tinta epóxi, porém o acabamento cromatizado é uma proteção adicional que deve ser especificada contra a corrosão.



Figura 7.5 – Tubulação de alta pressão

7.6. Flanges de Apoio e Tubos de Ventilação da Válvula do Cilindro (ventilação de segurança)

Os tubos de ventilação (Figura 7.6 (1)), tem como função recolher o gás que por ventura escape acidentalmente da válvula do cilindro e conduzi-lo ao exterior do veículo.

Os flanges dos tubos de ventilação (Figura 7.6 (2)), tem como função à fixação dos tubos de ventilação á carroceria do veículo e ao mesmo tempo servir de canal de escoamento de gases para o exterior do veículo.



Figura 7.6 - Flanges de apoio e tubos de ventilação da válvula do cilindro

7.7. Tubulação de Baixa Pressão e Válvula Dosadora de Vácuo (Dosadora de Gás)

A tubulação de baixa pressão (Figura 7.7 (1)), trata-se de uma mangueira lonada de borracha sintética, responsável pela condução do gás proveniente do terceiro estágio do redutor de pressão até o mesclador, passando pela válvula dosadora de vácuo.

A válvula dosadora de vácuo (Figura 7.7 (2)), trata-se de uma válvula mecanicamente ajustável, que inibe por ação de um parafuso a quantidade de vácuo gerado no mesclador, na câmara do terceiro estágio do redutor de pressão. Em alguns modelos de “Kits” está válvula pode ser encontrada com ajuste eletrônico através de um motor de passo.

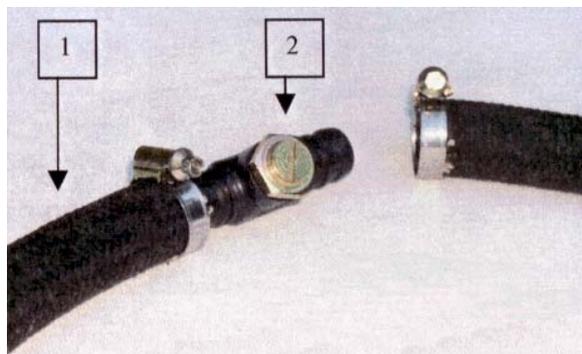


Figura 7.7 - Tubulação de baixa pressão e válvula dosadora de vácuo

7.8. 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. Encontram-se vários modelos de mescladores, Figura 7.8, dependendo do tipo de admissão do motor.



Figura 7.8 – Mescladores de gás

7.9. Chave Comutadora de Gás

Trata-se de uma chave eletrônica, Figura 7.9, que comanda a opção do combustível a ser utilizado, de acordo com a escolha do condutor do veículo, efetuada através de uma simples comutação no botão seletor.

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



Figura 7.9 – Chave comutadora de gás

7.10. Manômetro Eletromecânico

Trata-se de um manômetro do tipo Bordon, Figura 7.10, encontrando-se anexado à sua estrutura frontal externa um potenciômetro. O manômetro tem por objetivo, verificar o valor de pressão encontrado na linha de alta pressão do sistema e, através do potenciômetro nele fixado, transformar esta leitura pneumática em uma leitura elétrica, enviando assim esta informação a chave comutadora de gás.



Figura 7.10 – Manômetro eletromecânico

7.11. Válvula de Corte de Combustível Líquido

(Somente veículos carburados)

Trata-se de uma válvula tipo solenóide, que ao ser energizada libera o fluxo de combustível líquido para a cuba do carburador e em sua condição de repouso o fluxo de combustível é bloqueado.

Esta válvula atua sob o comando da chave comutadora de combustível



Figura 7.11 – Válvula de corte de combustível líquido

7.12. Cilindros de Alta Pressão

Este é um dos mais importantes equipamentos na conversão de veículos para uso de GNV. O cilindro, Figura 7.12, é um reservatório construído segundo os mais rigorosos critérios técnicos, de modo que seja possível armazenar o gás natural a elevadas pressões, necessárias ao abastecimento do veículo. Estas pressões estão na faixa de 220 kgf/cm². Portanto o cilindro de armazenamento deve ser resistente para suportar enormes tensões, porém o mais leve possível, para não comprometer em demasia a capacidade de carga do veículo.



Figura 7.12 Cilindro de alta pressão para uso de GNV

O cilindro de alta pressão para GNV tradicional é fabricado a partir de um tubo de aço-liga cromo-molibdênio, sem costura e de espessura de parede entre 8 e 10mm. O tubo passa por um processo de repuxamento e conformação das extremidades (base de um lado e gargalo do outro). Depois da conformação e do tratamento térmico (tempera e revenido), todos os cilindros são ensaiados pelo método de partículas magnéticas (Magnaflux) de modo a detectar algum tipo de defeito construtivo como trincas e falhas que possam comprometer sua integridade estrutural.

Existem também cilindros fabricados em alumínio, reforçados com fibra de carbono. Estes cilindros são significativamente mais leves que os de aço-liga, porém seu preço ainda é muito elevado.

As características físicas do cilindro de alta pressão exigem que este equipamento seja fabricado seguindo um conjunto de etapas que permitem a obtenção de um equipamento seguro e confiável. Estas etapas compreendem:

- Especificações e projeto;
- Análise;
- Ensaio mecânicos destrutivos e não destrutivos;
- Aprovação.

No projeto de cilindros de alta pressão para GNV são utilizadas fórmulas para cálculo das tensões nas paredes dos recipientes e análise por elementos finitos, com auxílio de programas de computador. Os dados calculados são então verificados experimentalmente, usando-se equipamentos de medição de tensões na parede do cilindro, denominados de extensômetros.

A matéria prima para fabricação dos cilindros deve ser cuidadosamente selecionada. Os tubos de aço-liga sem costura são recebidos do fabricante em diversas bitolas, acompanhados dos certificados de análise química e dos testes hidráulicos, realizados individualmente para cada lote de tubos.

A pintura da superfície do cilindro tem a função de protegê-lo contra as intempéries e corrosão. No Brasil estes cilindros são pintados na cor rosa.

Os ensaios e testes de novos cilindros são executados de diversas formas:

- Ensaio mecânicos como tração, impacto, ruptura hidráulica, dobramento e achatamento, rugosidade e análise química da matéria prima;

Verificação de requisitos de segurança num cilindro de amostra do lote de fabricação; estes requisitos são:

- Teste de ruptura hidráulica;
- Ensaio de pressão cíclica;
- Ensaio de dobramento e impacto;
- Resistência ao fogo;
- Resistência a projéteis;
- Ensaio cíclico de temperatura extrema.

Durante a etapa de produção, 100% dos cilindros devem passar pelos seguintes ensaios:

- Ensaio de dureza (Brinel ou similar);
- Inspeção de ultra-som;
- Ensaio hidráulico de expansão volumétrica;
- Teste dimensional, inclusive da rosca do gargalo;
- Verificação da marcação do cilindro;
- Verificação do acabamento superficial interno e externo;
- Ensaio destrutivo de ruptura hidráulica em um cilindro de amostra do lote fabricado.

A ligação entre o cilindro e a válvula de cilindro é feita por meio do rosqueamento da válvula no gargalo do cilindro. No corpo das válvulas de cilindro é usinada uma rosca cônica padronizada com a rosca do gargalo do cilindro. O perfeito casamento entre esta ligação permite o funcionamento do conjunto sem folgas, vazamentos e dentro do mais perfeito critério de segurança. Desse modo, nenhuma intervenção deverá ser feita na superfície rosqueada da válvula de cilindro ou no gargalo do cilindro.

7.13. Implementos para a Conversão de Veículos Equipados com Injeção Eletrônica de Combustível

Além dos equipamentos listados até o momento, os veículos equipados com injeção eletrônica em malha fechada (sensor de O₂), devem apresentar alguns implementos para a perfeita adaptação do sistema. Nesta seção serão listados estes equipamentos.

7.13.1. Emulador de Eletro-Injetores (bicos injetores)

Trata-se de um componente eletrônico que, anexado à linha de comando de abertura dos eletro-injetores, bloqueia o sinal de comando da central eletrônica (central de injeção de combustível líquido) para os eletro-injetores e ao mesmo tempo, simula um sinal de perfeito funcionamento dos mesmos, para que a central de injeção não identifique qualquer anomalia relacionada com os eletro-injetores, evitando assim que a central eletrônica passe a trabalhar em regime de emergência.



Figura 7.13 - Emulador de eletro-injetores (bicos injetores)

7.13.2. Emulador do Sensor de O₂ (Sonda Lambda)

Trata-se de um componente eletrônico, Figura 7.14, instalado na linha de comunicação da central de injeção de combustível líquido com o sensor de oxigênio (sonda lambda).

Tem por objetivo interromper o sinal enviado pelo sensor de O₂ à central de injeção e ainda simular o sinal de frequência do sensor de O₂, evitando assim que a central de injeção detecte alguma anomalia no circuito do sensor de O₂, levando-se a trabalhar em regime de emergência.



Figura 7.14 – Emulador do sensor de O₂ (sonda lambda)

7.13.3. Variador de Avanço de Ignição

(Veículos com injeção eletrônica ou carburador)

Trata-se de um componente eletrônico ligado a linha de alimentação primária da bobina de ignição, que tem como objetivo, avançar automaticamente o ponto de ignição do motor quando o mesmo estiver sendo alimentado por combustível gasoso GNV, a fim de aumentar a eficiência termodinâmica do propulsor e conseqüentemente seu desempenho.

Este equipamento deve também ser adaptado em veículos equipados com carburador.

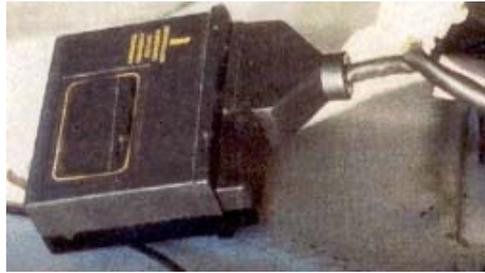


Figura 7.15 – Variador de avanço

7.14. Sistema básico de instalação de GNV em um veículo com injeção eletrônica

Na Figura 7.16, pode ser visualizado um sistema básico de instalação de GNV para um veículo equipado com injeção eletrônica. O kit instalado neste caso possui o controle eletrônico da relação estequiométrica, fator λ ,

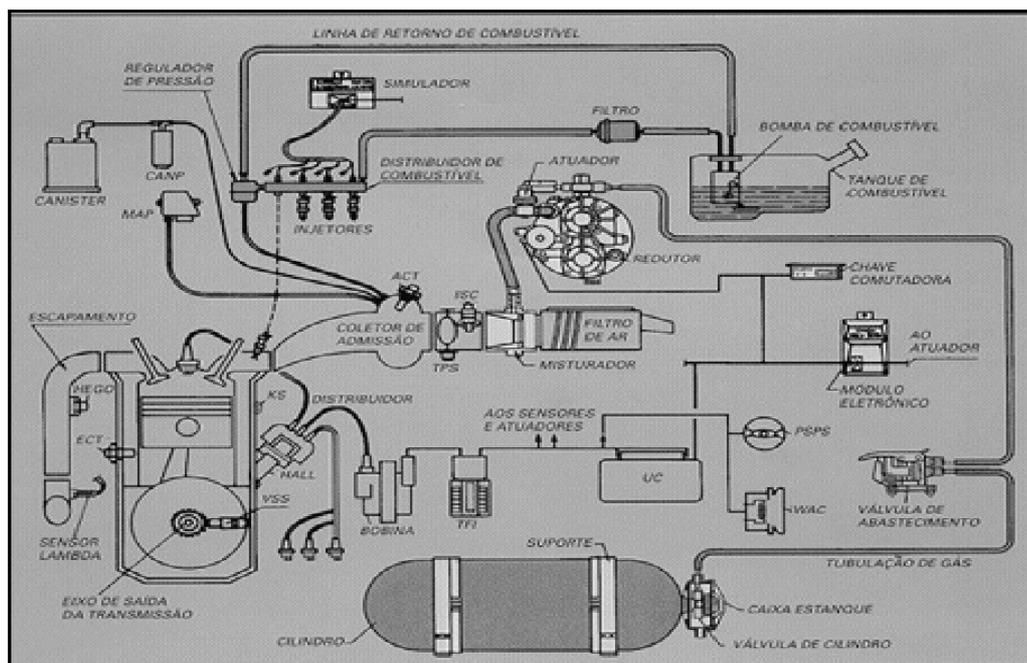


Figura 7.16 - Sistema básico de instalação de GNV em um veículo com injeção eletrônica

8. Procedimentos para a Correta Instalação dos Equipamentos de Conversão de GNV

Esta seção contém alguns procedimentos para a correta instalação e o perfeito funcionamento dos equipamentos destinados a conversão de veículos para o GNV assim como alguns pontos importantes que devem ser verificados nos equipamentos de conversão, com o intuito de verificar a verdadeira funcionalidade do equipamento que se está instalando no veículo.

É fundamental destacar que o veículo a ser convertido deve estar em perfeito estado de conservação, tanto no conjunto moto-propulsor, como também na sua estrutura. Sendo assim deve-se verificar se as seguintes especificações encontram-se conforme recomendado pelo fabricante do veículo.

- Condições estruturais do veículo;
- Compressão dos cilindros;
- Velas de ignição (condições de abertura dos eletrodos);
- Cabos de vela e central da bobina de ignição;
- Bobina de ignição;
- Distribuidor (inclusive rotor, platinado, condensador) e módulo eletrônico;
- Sistema de avanço;
- Sistemas de partida (bateria, motor de partida, alternador);
- Sistema de alimentação de combustível (bomba, carburador ou bicos);
- Filtro de ar;
- Sistema de arrefecimento;
- Dispositivos antipoluição (catalisador, válvula EGR, sonda lambda);

Quaisquer irregularidades nos sistemas citados interferem diretamente no desempenho do veículo no combustível original, principalmente com o uso do GNV, afetando diretamente os índices de emissões de poluentes, fato que certamente será agravado na conversão do veículo para GNV, por instalações mal executadas e/ou que utilizem componentes inadequados para essa finalidade.

8.1. Instalação da Válvula de Abastecimento e Válvula de Cilindro

Deve-se determinar o melhor local para a fixação da válvula de abastecimento observando as seguintes recomendações.

A válvula deverá ser instalada:

- O mais próximo possível do redutor de pressão alta pressão;
- O mais longe possível da bateria e cabos de alta tensão do veículo;
- Em local de fácil acesso;
- Quando possível, do mesmo lado da tubulação de alta pressão de gás;
- O mais longe possível de locais excessivamente quentes;



Figura 8.1 – Instalação da válvula de abastecimento

Para a correta instalação da válvula do cilindro, deve-se primeiramente verificar os fios de rosca da válvula e de seu alojamento no cilindro de alta pressão, instalando a válvula preferencialmente após a fixação do cilindro no seu suporte. Deve-se ainda aplicar um veda rosca nos fios da rosca da válvula do cilindro e apertá-la com um torque em torno de 200N.m (20kgf).



Figura 8.2 – Instalação da válvula de cilindro

8.2. Instalação do Sistema de Venteio e Detecção de vazamentos

Em caso de possíveis vazamentos na válvula de cilindro, o sistema de venteio deve garantir que o gás seja dirigido para o exterior do veículo, sendo assim o sistema deve ser instalado de forma que seus flanges propiciem correntes de ar no interior dos tubos de ventilação. Deve-se ainda tomar o cuidado que o invólucro estanque encontre-se hermeticamente

fechado.

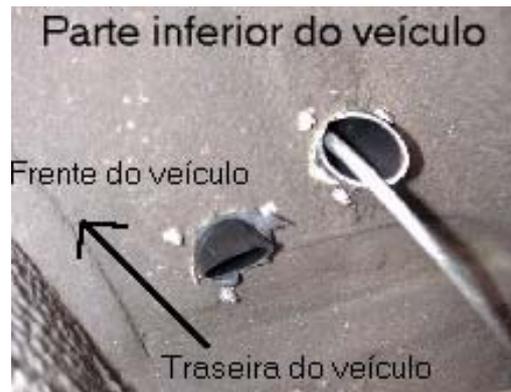


Figura 8.3 - Instalação do sistema de venteio

Após a instalação de todo o sistema, deve-se efetuar uma carga completa com combustível gás e verificar quanto a vazamentos em todas as válvulas e conexões que foram feitas. Pode-se efetuar a verificação de vazamentos através de aparelhos detectores de gases combustíveis que geralmente indicam contaminações através de sinais sonoros ou simplesmente aplicando-se uma solução de água com sabão nas conexões.



Figura 8.4 - Verificação de vazamentos em válvulas e conexões

8.3. Instalação do Redutor de Pressão

Para o perfeito funcionamento e localização do redutor deve-se tomar conhecimento de algumas características suas. Os redutores geralmente são providos de 3 estágios para a redução de pressão, expansão e estabilização do fluxo de gás.

Quando o motor estiver parado, a válvula eletromagnética permanece fechada, bloqueando a passagem do gás encontrado nas câmaras do 1º estágio e 2º estágio, para a câmara do 3º estágio. Com o motor em funcionamento, a válvula eletromagnética abre a passagem de gás do 2º para o 3º estágio e o mesmo é aspirado pelos êmbolos do motor.

8.3.1. Primeiro Estágio do Redutor

É o encarregado de efetuar a expansão e aquecimento do gás, além de reduzir a pressão de 200bar, para valores que variam de 2,8bar a 3,5bar, dependendo de seu fabricante.

O gás que a alta pressão é conduzido até a câmara do 1º estágio do redutor, expande-se e gera assim uma considerável queda de temperatura. Com sua introdução, o gás comprime o diafragma da câmara do 1º estágio, saturando sua mola de apoio (mola de apoio do diafragma). Com a saturação da mola pré-calibrada, o diafragma desloca-se de sua posição de repouso, arrastando com ele o êmbolo e por conseqüência, o balancim nele fixado. Com o arrasto, o balancim desloca-se de encontro a um pistão de fechamento, confeccionado em bronze, com seu assento (sede) em policarbonato, inibindo parcial ou totalmente a entrada de gás para a câmara do 1º estágio do redutor.



Figura 8.5 – Primeiro estágio do redutor

Para que todo o processo ocorra com perfeição, a câmara do primeiro estágio do redutor deverá encontrar-se aquecida, aquecimento este, provido pelo sistema de arrefecimento do motor, no caso de motores refrigerados por água. No caso de motores arrefecidos por ar, o aquecimento da câmara deverá ocorrer por ar quente, calefação, aquecimento elétrico ou pelo óleo lubrificante do motor.

8.3.2. Segundo Estágio do Redutor

Este se ocupa de regular a pressão do gás que provém da cavidade de interligação entre o 1º e 2º estágio, reduzindo esta pressão de valores que variam da ordem de 2,8bar a 3,5bar, para valores na ordem de 0,650bar a 1,5bar dependendo do modelo e do fabricante.

O gás armazenado na câmara do 1º estágio é conduzido até a câmara do 2º estágio

expandido-se ao chegar à câmara do 2º estágio. Com sua introdução, o gás comprime o diafragma da câmara do 2º estágio, saturando a sua mola de apoio. Com a saturação da mola pré-calibrada, o diafragma desloca-se de sua posição de repouso, arrastando com ele o êmbolo e por conseqüência, o balancim nele fixado. Com o arrasto, o balancim desloca-se de encontro à cavidade de comunicação do 2º estágio, inibindo parcial ou totalmente a entrada de gás para a câmara do 2º estágio do redutor.



Figura 8.6 – Segundo estágio do redutor

Para um perfeito funcionamento do propulsor, é importante verificar-se uma uniformidade no fluxo de gás, em qualquer regime de rotação, carga ou temperatura. Mesmo em regimes de baixa absorção, como é o caso da marcha lenta. Para tanto o 1º e 2º estágios deverão apresentar características que possam garantir esta estabilidade, independente da variação de pressão percebida no(s) cilindro(s) de alta pressão.

8.3.3. Terceiro Estágio do Redutor e Recomendações de Instalação

É o estágio responsável pela adequação da dosagem do gás a ser consumido pelo motor, adequação está, dada de forma automática, em face as mais variadas solicitações do motor, mas previamente calibrada pelo mecânico convertedor.

Ao funcionar o motor, os êmbolos criam uma depressão, que é acentuada pelo mesclador (venturi). Esta depressão ao chegar á câmara do terceiro estágio desloca o diafragma de sua posição de repouso, posição esta, garantida pela mola do regulador de sensibilidade. Ao deslocar-se, o diafragma arrasta o êmbolo e conseqüentemente o balancim nele fixado. Com o arrasto, a extremidade do balancim, afasta-se da cavidade de comunicação do 3º estágio liberando parcialmente a saída de gás para a câmara do 3º estágio do redutor. Lembrando que a saída do gás só ocorrerá se a válvula de bloqueio de gás estiver na condição aberta (energizada), caso contrário à cavidade de comunicação do terceiro estágio será liberada, mas o gás ficará

retido nas câmaras dos 1º e 2º estágios.



Figura 8.7 – Terceiro estágio do redutor

Estes redutores são capazes de abastecer os propulsores com um volume máximo ou mínimo de gás, pré-regulado de acordo com as características do motor.

A regulagem de sensibilidade do terceiro estágio efetua-se por meio de um parafuso de regulagem externo, que atua sobre a mola, que se opõe ao deslocamento do balancim do terceiro estágio e conseqüentemente, ao deslocamento do diafragma, fazendo com que haja a necessidade de um acréscimo no valor de carga (maior valor de vácuo gerado), para efetuar seu deslocamento.

O fluxo de gás encontra-se limitado por um parafuso externo de ponta cônica, que tem por finalidade restringir a passagem do gás pela cavidade de comunicação do 3º estágio.

Estes parafusos de regulagem possibilitam a interferência do mecânico convertedor, na busca da melhor relação estequiométrica possível, garantindo assim um melhor rendimento do motor e um menor índice de emissões. Existem redutores em que estes parafusos são substituídos por motores de passo, dispensando esta regulagem manual, os chamados “kits” com controle da relação estequiométrica, fator λ .

Quanto à instalação do redutor, pode-se dizer que o melhor local de fixação pode ser determinado observando as seguintes recomendações.

O redutor deverá ser instalado:

- O mais próximo possível da admissão de gás pelo motor;
- O mais longe possível da bateria e cabos de alta tensão do veículo;
- Sempre que possível em local de fácil acesso;
- Quando possível, do mesmo lado da tubulação de alta pressão de gás;
- O mais longe possível de locais excessivamente quentes;
- Quando possível, próximo à tubulação de arrefecimento do motor;
- Evitando locais de excessiva ventilação (ao lado ou em frente ao radiador).

8.4. Instalação da Tubulação de Alta Pressão e Chave Comutadora

Para a instalação da tubulação de alta pressão deve-se observar alguns itens de segurança como:

- O mais longe possível de locais excessivamente quentes;
- O mais longe de locais de movimentos intensos (coxins, braços oscilantes barras estabilizadoras);
- Mantendo curvas suaves e espirais próximas aos locais de fixação para uma melhor absorção de vibrações;
- Fixando-a de forma que a mesma fique o mais protegida possível contra eventuais raspões e lançamento de pedregulhos na parte inferior do veículo;
- Fixando-a com presilhas plásticas (ou metálicas desde que entre a tubulação e a presilha, haja a proteção por pedaços de borracha ou PVC). Esta fixação deverá ocorrer de forma que a distância entre uma presilha e outra não ultrapasse 300mm.

A chave comutadora de gás deve ser instalada em uma posição que possibilite uma boa visualização do indicador de pressão do cilindro e o fácil acesso.



Figura 8.8 - Instalação da tubulação de alta pressão

8.5. Instalação do Mesclador e da Tubulação de Baixa Pressão

Deve-se atentar na instalação do mesclador ao que se refere a falsas entradas de ar, devido ao corte de dutos de admissão de ar do motor, ou a colocação do mesmo sobre carburadores. Para evitar este tipo de problema, pode-se utilizar silicone como auxiliar na vedação.

Depois de instalado o mesclador, deve-se medir com o auxílio de uma trena a distância entre o mesclador e o redutor de alta pressão, de modo que se houver a possibilidade, colocar a válvula dosadora de vácuo a 1/3 do tamanho da mangueira. A mangueira de baixa pressão deve percorrer o menor caminho possível entre redutor de alta pressão e o mesclador, e ser fixada a estrutura ou ao motor por abraçadeiras plásticas.

8.6. Instalação da Válvula de Corte de Combustível Líquido (veículos carburados)

Aconselha-se colocar um filtro de combustível entre a bomba de combustível e a válvula de corte, a fim de evitar a passagem de impurezas que possam comprometer o seu perfeito funcionamento.

A válvula de corte deve ser instalada levando em consideração que em caso de vazamentos de combustível líquido, o mesmo caia no chão, longe de pontos quentes ou centelhas elétricas.

8.7. Desligamento da Bomba Elétrica de Gasolina (veículos com injeção eletrônica)

Outra consideração a ser feita é quanto ao desligamento da bomba elétrica de combustível em veículos com injeção eletrônica.

Muitas convertedoras optam por deixar a bomba continuamente funcionando, enquanto o motor é alimentado com gás, isto pode ocasionar alguns problemas, como o aquecimento excessivo da bomba, muitas vezes devido ao baixo nível de combustível líquido deixado no tanque e a formação de vapor devido a permanente recirculação do combustível, o que pode ocasionar a abertura da válvula de purga do cânister em determinadas situações tornando a mistura rica, vapor de combustível líquido e gás, causando falhas no funcionamento do motor.

Sendo assim aconselha-se a instalação de um relé que desligue a bomba quando o veículo estiver utilizando GNV, e aconselha-se ainda que se configure o sistema para que inicie sempre com combustível líquido, fazendo a conversão para o GNV somente após a ultrapassagem de uma determinada rotação (2000 a 3000 RPM), evitando-se assim entupimentos por envelhecimento do combustível ou a falta de uso do sistema de injeção eletrônica. Esta configuração pode ser conseguida através de um potenciômetro existente na chave comutadora de gás.

8.8. Instalação dos Cilindros de Alta Pressão

Para a instalação dos cilindros de alta pressão a norma NBR 11.353 especifica que os suportes devem ser construídos de perfis de aço, sendo que as cintas dos suportes para cilindros de até 25m³ devem ter espessuras de (3mm x 30mm), confeccionadas com aço ASTM A-36 ou similar e os parafusos para a fixação do suporte devem ser de classe 8.8 ou superior. Para cilindros de capacidade superior a 25m³, as cintas de fixação devem ter (6mm x 50mm), confeccionadas com aço ASTM A-36 ou similar e os parafusos para a fixação do suporte devem

ser de classe 8.8 ou superior. Deve-se ainda instalar borrachas de proteção nas cintas de apoio dos cilindros, e posicioná-lo de forma a facilitar a abertura e fechamento da válvula.

Se o cilindro for instalado longitudinalmente ao veículo, deve-se colocar uma cinta adicional com a função de evitar que o mesmo possa vir a se deslocar longitudinalmente no caso de algum acidente.



Figura 8.9 – Suporte dos cilindros de alta pressão

8.9. Instalação do Emulador de Eletro-Injetores, (Bicos Injetores) (Somente veículos com injeção eletrônica)

A instalação do emulador de eletro-injetores trata-se de uma tarefa que requer apenas alguns cuidados, como evitar o corte de chicotes elétricos originais do veículo, pois normalmente sua ligação com os eletro-injetores é feita por meio de conectores que o acompanham e definir o local de fixação da unidade de forma a evitar a sua exposição excessiva ao calor ou umidade.

8.10. Instalação do Emulador do Sensor de Oxigênio, (Sonda Lambda) (Somente veículos com injeção eletrônica em malha fechada)

Antes de iniciar a instalação do emulador do sensor de O_2 , aconselha-se testar a unidade, para verificar se realmente tem-se a simulação do sensor de O_2 , (sonda lambda), pois caso contrário o desempenho ficará afetado, ao utilizar-se o gás, já que muitos dos parâmetros definidos pela central de injeção eletrônica, como o avanço de ignição, são baseados nos sinais do sensor de O_2 do veículo.

O teste do emulador de O_2 pode ser feito de uma forma simples, apenas com o auxílio de um Multímetro em uma escala de medida de tensão de mV. O teste consiste em alimentar com a tensão especificada o emulador, ligando o multímetro nos fios de saída de sinal do mesmo e verificar quais os valores de tensão serão apresentados.

O sinal gerado por um sensor de O_2 pode ser visualizado na Figura 8.10



Figura 8.10 – Sinais gerados por Emuladores de O₂

Pode-se verificar na Figura 8.10 que um sinal de um emulador de sonda defeituoso, ou de pouca qualidade, difere muito do sinal a ser emulado, pois o sinal gerado por um sensor de O₂ está constantemente variando entre 50mV e 950 mV aproximadamente, enquanto o emulador de sonda defeituoso gera um sinal praticamente constante.

Se este emulador defeituoso for instalado, o desempenho do veículo ficará afetado, ao utilizar-se gás como combustível, pois a central de injeção eletrônica será informada constantemente que a mistura encontra-se pobre, por exemplo, estabelecendo assim apenas um valor para o avanço de ignição, em todos os regimes de funcionamento do motor.

Os emuladores de sensor de O₂ devem possuir ainda um conjunto de 3 (três) LEDs que auxiliam o mecânico convertido na regulagem da relação ar/gás, com o objetivo da busca da relação estequiométrica.

Deve-se ainda confeccionar o chicote elétrico de interligação do emulador, evitando-se totalmente o corte do chicote original do veículo.

8.11. Instalação do Variador de Avanço (Veículos com injeção eletrônica ou carburador)

O local de instalação do variador de avanço deve ser definido de forma a evitar a sua exposição à umidade elevada e a fontes externas de calor. Este recurso eletrônico é ligado á linha de alimentação primária da bobina de ignição, ao sinal do sensor de rotação, ou ainda ao sinal de retorno do sensor de pressão absoluta do coletor de admissão.

Os variadores possuem uma série de chaves seletoras que, combinadas entre si, permitem a seleção do melhor ângulo de avanço da ignição, em função da condição e especificação do motor. A correta combinação das chaves seletora, é especificada nos manuais que acompanham cada tipo de variador de avanço.

9. Procedimentos Experimentais

Devido à poucos equipamentos relacionados à pesquisa com gás natural veicular nos laboratórios da UFRGS, para a realização deste trabalho, contou-se com a colaboração do SENAI Automotivo de Porto Alegre e do Laboratório de Motores do Departamento de Desenvolvimento de Produto da Petrobras do Rio Grande do Sul para que se pudesse efetuar o teste do desempenho de alguns equipamentos de conversão (emuladores, mescladores, redutores de pressão, variadores de avanço), assim como a realização de testes em veículos convertidos para a análise de potência e emissões, estabelecendo um comparativo entre combustíveis líquidos e o gás natural.

9.1. Dados Técnicos dos Veículos e Descrição dos Equipamentos

Para a realização dos experimentos foram utilizados veículos existentes no SENAI Automotivo de Porto Alegre, sendo estes veículos do fabricante FIAT, modelos Siena e Maréa Weekend. O veículo Siena, ano de fabricação de 1998, equipado com motorização de 1600cm³ de cilindrada, 4 cilindros e 16 válvulas, enquanto o veículo Maréa Weekend, ano de fabricação 1999, equipado com motorização de 2000cm³ de cilindrada, 5 cilindros e 20 válvulas.

Também foram utilizados veículos de propriedade de oficinas mecânicas convertedoras, sendo estes veículos um Chevrolet Kadett com motorização de 2000cm³ de cilindrada, 4 cilindros e 8 válvulas, ano de fabricação 1996, um FIAT Strada com motorização de 1500cm³ de cilindrada, 4 cilindros e 8 válvulas, ano de fabricação 2000, além de um veículo da marca Renault, modelo Kangoo Express com motorização de 1600cm³ de cilindrada, 4 cilindros e 8 válvulas, ano de fabricação 1998. Todos os veículos utilizados possuíam injeção eletrônica de combustível.



Figura 9.1- Veículo Kadett no dinamômetro do Laboratório de Motores da Petrobras

Os testes de potência foram realizados no Laboratório de Motores da Petrobras do

RS, em todos os veículos citados, através de um dinamômetro de rolos da marca Bosch, modelo FLA 203, com desempenho de frenagem de 260kW a 260km/h, força de tração máxima de 6000N e 318mm de diâmetro de rolos. Para a análise das emissões dos veículos, foram utilizados analisadores de gases dos fabricantes Sun e Tecnotest.

Utilizou-se ainda em alguns ensaios, um PLM - Professional Lambda Meter do fabricante Motec com o objetivo de se visualizar a variável λ , além de um módulo computadorizado da marca Napro, modelo PC-Scan 2010 para a visualização das variáveis processadas pela central de injeção eletrônica dos veículos.

Além dos equipamentos básicos encontrados comercialmente para a conversão de veículos (Capítulo 7), todos os veículos foram equipados com emulador de eletro-injetores, variador de avanço e emulador de sensor de O_2 .

9.2. Execução dos Testes

Os veículos foram encaminhados e testados no Laboratório de Motores da Petrobras do RS, sendo que alguns testes contaram com a presença de alunos do curso de conversão de veículos para GNV, oferecido pelo SENAI Automotivo, com o intuito da troca de experiências e a discussão dos resultados obtidos com os alunos, mecânicos convertedores.

Foram realizados, testes para o desenvolvimento de curvas de potência máxima do motor, análise do fator λ , potência disponível na roda dos veículos em diversas velocidades e cargas, em conjunto com tomadas de leitura de emissões dos veículos, utilizando-se GNV e combustível líquido (gasolina).

Para o desenvolvimento das curvas de potência máxima dos veículos em todos os testes, os mesmos foram acelerados aumentando-se a velocidade em incrementos de aproximadamente 15km/h de 1ª (primeira) a 4ª (quarta) marcha, a velocidade máxima em 5ª (quinta) marcha, conforme os degraus que podem ser observados adiante nas curvas de potência do Capítulo 10, entre as velocidades de 0km/h a aproximadamente 60km/h, de forma que se obtivesse uma maior área do gráfico dedicada aos valores de maior potência desenvolvida. Após o alcance da velocidade máxima na última marcha, 5ª (quinta marcha), retirou-se a aceleração (pé do acelerador), que pode ser observada nas curvas de potência Capítulo 10, pelo forte decréscimo de potência, fazendo com que o veículo retornasse a velocidade e potência zero, gerando um ciclo representado pelos traços de menor intensidade de coloração, que representam a potência máxima na roda do veículo. Completado o ciclo, o sistema de processamento do dinamômetro gerou as curvas de maior intensidade de coloração, que representam a potência máxima do motor do veículo, ou seja, a potência máxima na roda do veículo adicionada das

perdas nos sistemas de transmissão dos mesmos. Realizou-se ainda alguns testes de potência em determinadas velocidades fixas, sendo que nestes casos programou-se o dinamômetro para a velocidade máxima desejada, 40km/h, 60km/h e etc.

Na maioria dos testes efetuados o dinamômetro foi configurado para apresentar as curvas de potência máxima corrigida dos motores dos veículos, (curvas de maior coloração), conforme a norma NBR ISO 1585, calculando através da temperatura ambiente e da pressão atmosférica seca os fatores de correção de potência (k), enquanto que as curvas de potência na roda do veículo, (curvas de menor coloração) não estão corrigidas de acordo com a norma, podendo-se efetuar o cálculo da potência corrigida de acordo com o descrito no Capítulo 11.

Devido a algumas indisponibilidades de alguns equipamentos, alguns veículos não tiveram seus testes completamente realizados, e na maioria dos ensaios deu-se ênfase ao teste de algum equipamento ou parâmetro específico, relacionado com sua função básica no veículo.

O procedimento básico aplicado em todos os testes foi à verificação da pressão dos pneus que atuariam com os “rolos” do dinamômetro, um pré-aquecimento dos motores e dos rolos do dinamômetro antes do início dos testes e um único condutor do veículo para cada teste.

Os testes foram realizados com o auxílio de um ventilador na parte frontal do veículo a fim de evitar excessivo aquecimento do motor. Optou-se também por pequenas paradas entre os testes, para que houvesse uma maior refrigeração, principalmente em relação aos sistemas de exaustão de gases, pois não se tem ar em circulação na parte inferior do veículo devido ao mesmo estar parado sobre os rolos.

Para a tomada dos gases de descarga de alguns veículos, furou-se o sistema de escapamento dos mesmos e instalou-se uma tubulação de cobre, de forma que a análise de gases fosse feita antes da passagem dos mesmos pelo conversor catalítico, elemento responsável pela transformação de grande parte dos gases tóxicos emitidos pela queima de combustível do motor em gases inofensivos, a fim de obter-se dados reais de emissões dos motores. A quantidade de gases nocivos, emitida pelos veículos, é apresentada para fins comparativos em unidades de [%.volume] ou [ppm.volume], estando em descordo com as normas do Conselho Nacional de Meio Ambiente, CONAMA que estipula que os gases nocivos sejam apresentados em unidades de [g/km].

10. Resultados Obtidos

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios realizados no Laboratório de Motores da Petrobras, utilizando-se gás natural e combustível líquido (gasolina), nos veículos anteriormente mencionados.

As curvas de potência são representadas por velocidade na roda do veículo em km/h e potência na roda do veículo em kW, sendo representadas estas variáveis respectivamente no eixo das abscissas e ordenadas dos gráficos.

10.1. Resultados Obtidos com o Veículo Chevrolet Kadett

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos no Laboratório de Motores da Petrobrás com o veículo Chevrolet Kadett equipado com motor de 4 cilindros, 8 válvulas e 2000cm³ de cilindrada. Para todos os ensaios realizados com o veículo Kadett, a pressão atmosférica seca manteve-se em $P_{atm}=101\text{kPa}$.

No teste deste veículo deu-se mais ênfase a análise do fator Lambda (λ) necessário para desenvolver a máxima potência ao utilizar-se gás natural como combustível.

Decidiu-se inicialmente verificar a potência na roda do veículo em diversas faixas de velocidade, em quarta marcha e em carga total (pé no fundo), simultaneamente com o monitoramento de algumas variáveis como o fator Lambda (λ), temperatura da água do motor e avanço de ignição, ao utilizar-se gasolina e gás natural como combustíveis, conforme dados da Tabela 10.1 e Tabela 10.2.

Para a coleta dos dados deste teste, tomou-se o cuidado de manter a temperatura da água do motor entre os 93°C e 98°C, para que se pudesse obter dados mais confiáveis, já que a tendência ao operar-se o veículo com gás natural é que a temperatura do motor mantenha-se mais alta em relação à utilização de gasolina, devido a gasolina vaporizar-se contribuindo com uma parcela sobre a refrigeração das câmaras de combustão, o que já não ocorre com o gás, pois este já se encontra em estado gasoso.

Tabela 10.1 – Dados demonstrativos em diversas velocidades do ensaio de potência na roda do veículo Kadett ao utilizar-se combustível gasolina. $T_{amb.}=29^{\circ}\text{C}$

Combustível Gasolina				
Velocidade	40 km/h	60 km/h	80 km/h	100 km/h
Potência	14,4kW	25kW	35,4kW	43,1kW
Fator Lambda (λ)	0,84	0,85	0,89	0,91
Avanço de Ignição	6°	10°	15°	17°
Temperatura da Água do Motor	93°C	95°C	94°C	97°C

Tabela 10.2 - Dados demonstrativos e comparativos em diversas velocidades do ensaio de potência na roda do veículo Kadett ao utilizar-se combustível gás natural. $T_{amb.}=29^{\circ}\text{C}$

Combustível Gás Natural				
Velocidade	40 km/h	60 km/h	80 km/h	100 km/h
Potência	13,4kW	21kW	30,2kW	36kW
Fator Lambda (λ)	0,85	0,91	0,98	1,00
Avanço de Ignição	27°	38°	40°	41°
Temperatura da Água do Motor	95°C	98°C	98°C	91°C
Perdas de Potência em Relação a Utilização de Gasolina	6,9%	16%	14,7%	16,5%

De acordo com os dados apresentados, nota-se em média uma perda de potência da ordem de 13,5% quando se utiliza gás natural como combustível. Esta perda pode ser atribuída a diversos fatores, como a natureza gasosa do combustível e a instalação de um mesclador de gás (venturi) na tubulação do ar de admissão do motor, (Ver Capítulo 7, mesclador de gás), fatores estes que serão discutidos mais detalhadamente nos próximos testes efetuados com os outros veículos.

Analisando os dados da tabela, observa-se que o sistema de gerenciamento do motor do veículo manteve o fator Lambda no valor médio de 0,87 quando utilizando gasolina como combustível, o que representa a situação de carga total (pé no fundo), já que o Lambda para a máxima potência da gasolina é de 0,89, além de incrementar pequenos avanços no ponto de ignição conforme o aumento de rotação do motor, aumento da velocidade.

Observando os dados gerados ao utilizar-se gás natural como combustível nota-se que o sistema de GNV instalado manteve o fator Lambda em valores médios de 0,93, o que representa um bom rendimento para esse combustível, já que o Lambda para a máxima potência ao utilizar-se gás é próximo do estequiométrico, Lambda igual a 1,0. Vale observar ainda, que o avanço de ignição foi aumentado em todas as rotações, devido a instalação de um variador de avanço, (Ver Capítulo 7, Variador de Avanço), para que se pudesse aproveitar a propriedade de menor velocidade de queima do gás natural em relação a gasolina.

Quanto as perdas de potência devido a utilização do gás natural, observa-se que a menor perda ocorre aos 40km/h, sendo de 6,9%. A tendência é ter-se as menores perdas nas menores rotações do motor, pois nas menores rotações o mesclador de gás (venturi) instalado na tubulação do ar de admissão do motor oferece menores restrições ao ar de admissão, devido a menor vazão de ar admitida pelo motor, conseqüência de pouca rotação (velocidade), enquanto que a 100km/h registrou-se uma perda de 16,5%, conseqüência da maior restrição oferecida pelo mesclador devido ao aumento da vazão de ar para combustão, decorrência da maior rotação a velocidade de 100km/h.

Conforme comentado anteriormente, no teste deste veículo deu-se mais ênfase a análise do fator Lambda (λ) necessário para desenvolver a máxima potência ao utilizar-se gás natural como combustível, pois a bibliografia especializada indica que o fator Lambda de máxima potência para o combustível gasoso é próximo do estequiométrico, $\lambda=1,0$. Sendo assim instalou-se um PLM (Professional Lambda Meter) na tubulação de escapamento do veículo com o objetivo de fazer-se a leitura instantânea do fator Lambda, em um teste de potência na roda, onde, fixado duas velocidades para o teste, 40 e 60km/h, alterou-se manualmente a regulagem da válvula dosadora de gás (Ver Capítulo 7, válvula dosadora de gás), alterando conseqüentemente a razão ar/gás admitida pelo motor e a potência desenvolvida.

Na Tabela 10.3 pode-se verificar a potência desenvolvida pelo veículo Kadett em regime de carga total ao variar-se o fator Lambda, na velocidade de 40 e 60km/h.

Tabela 10.3 – Potência desenvolvida pelo veículo Kadett ao variar-se o fator Lambda com a utilização de combustível gás natural. $T_{amb.}=29^{\circ}C$

Combustível Gás Natural			
Velocidade de 40km/h		Velocidade de 60km/h	
λ	Potência kW	λ	Potência kW
0,79	12,3	0,80	20,4
0,81	12,6	0,82	20,5
0,88	13,0	0,84	20,5
0,92	13,1	0,90	20,6
0,95	13,2	0,94	20,7
0,96	13,2	0,96	20,7
0,98	13,1	1,00	20,4
1,03	12,8	1,08	19,4
1,09	12,0	1,24	17,0

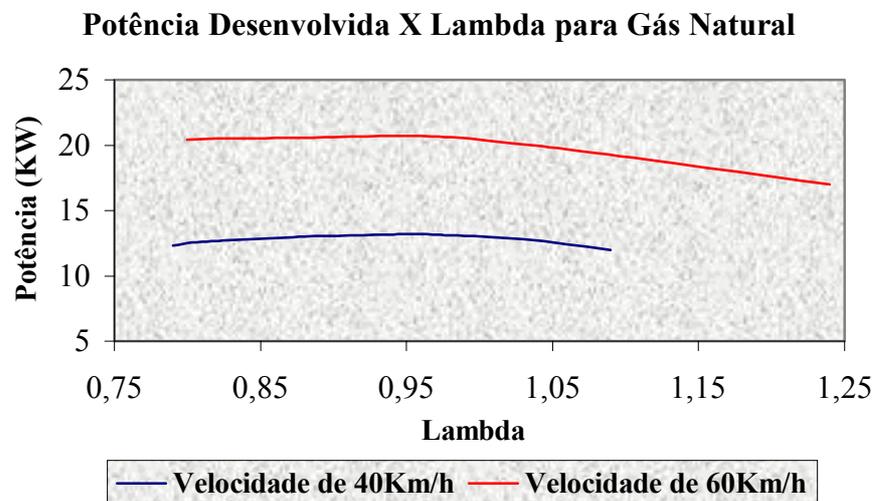


Figura 10.1 – Potência Desenvolvida x Lambda para o veículo Kadett ao utilizar-se gás natural

Quando se utiliza combustíveis líquidos, gasolina particularmente, tem-se a máxima potência em regiões de Lambda entre 0,88 ou seja “rico”, pois a potência máxima desenvolvida por um motor de combustão interna tem a haver com a pressão máxima produzida na combustão, que por sua vez tem a haver com a energia envolvida e o número de moles gerados na

combustão. A energia gerada é máxima no estequiométrico e diminui a medida que se invade a região rica, enquanto que o número de moles gerados aumenta a medida que se invade a região rica. Para combustíveis líquidos, o aumento de pressão decorrente do aumento do número de moles é maior que o decréscimo de pressão devido a redução da energia desenvolvida, ocasionando então maiores potências para valores de Lambda “ricos”. Esse fenômeno já não ocorre com combustíveis gasosos, conforme pode-se comprovar na Figura 10.1, sendo a região de máxima potência próxima do estequiométrico. Portanto para um melhor rendimento de um veículo convertido, menor consumo de combustível gás e redução de gases nocivos ao meio ambiente, deve-se efetuar uma regulagem onde o Lambda para a máxima potência esteja sempre entre valores próximos do estequiométrico, $\lambda=1$.

10.2. Resultados Obtidos com o Veículo FIAT Maréa

Nesta seção serão apresentados os ensaios de potência e emissões realizados no Laboratório de Motores da Petrobrás do RS, com o veículo Maréa equipado com o motor de 5 cilindros, 20Válvulas e 2000cm³ de cilindrada. Para todos os ensaios realizados com o veículo Maréa, a pressão atmosférica seca manteve-se em $P_{atm}=99,5\text{kPa}$.

Devido ao corte realizado na mangueira do ar de admissão do veículo para a instalação do mesclador de gás natural, não foi possível efetuar o teste do veículo conservando todas as suas características originais, pois o veículo não pode ser testado sem a mangueira do ar de admissão devido ao sensor massa de ar existente na mesma, responsável pela medida da massa de ar admitida pelo motor do veículo. Como parâmetro de comparação utiliza-se o dado fornecido pelo fabricante do veículo, que indica como potência máxima 108kW($\approx 147\text{CV}$) a 6100RPM($\approx 200\text{km/h}$) e torque máximo de 187kgf.m a 4500RPM($\approx 150\text{km/h}$).

Na Figura 10.2 tem-se a curva de potência máxima para o veículo, utilizando como combustível gasolina, com a instalação de um “Kit” de GNV encontrado comercialmente caracterizado por possuir o controle eletrônico do fator λ por uma válvula dosadora e por um redutor operados eletronicamente através de motores de passo, os quais são controlados por uma central eletrônica, (central eletrônica de GNV), ligada ao sensor de O₂, sensor de posição da borboleta de aceleração e sensor de rotação do motor do veículo. A regulagem deste sistema é feita através de um “Scanner”, fornecido pelo fabricante do “Kit”, que é ligado a central eletrônica de controle de GNV, onde podem ser configuradas algumas variáveis.

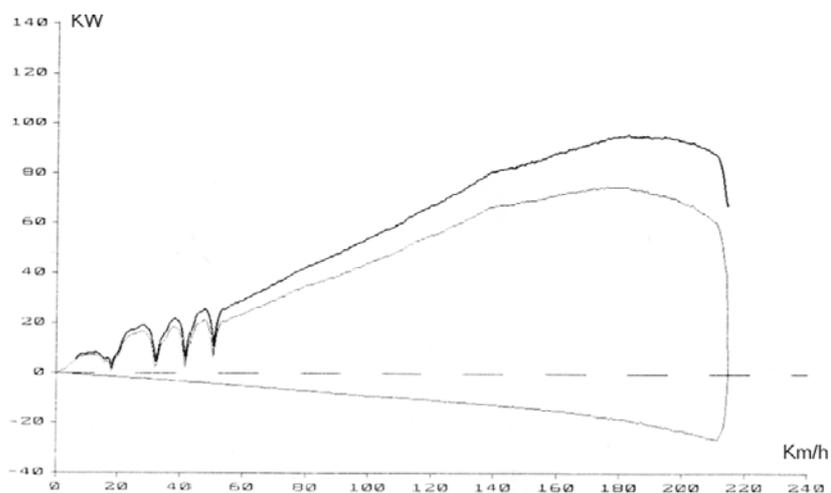


Figura 10.2 – Curva de potência máxima obtida para o veículo Maréa utilizando como combustível gasolina, com a instalação do “Kit” de GNV. ($T_{amb}=23^{\circ}C$; $k=1,023$)

Conforme a curva, pode-se dizer que a potência máxima corrigida do motor do veículo é $P_{m\acute{a}x}=96kW$ (130,43CV) na velocidade de 182,5km/h, estando o veículo equipado com o “Kit” de conversão, (mesclador de 30cm de diâmetro interno e duas entradas de gás), e utilizando como combustível gasolina. Sendo assim houve uma queda de potência de 12kW (16,30CV), ou seja, 9,25% em relação à potência original do veículo. O principal fator para esta queda de potência está na restrição causada pela instalação do mesclador de gás no tubo de admissão de ar do motor do veículo, pois o mesclador, reduz a passagem do ar com o objetivo de causar uma aceleração no ar de admissão e uma conseqüente depressão, que será transmitida para os tubos condutores de gás e para o redutor, ocorrendo a liberação do gás (arraste), quando este estiver sendo utilizado. Sendo assim ter-se-á uma diminuição da eficiência volumétrica do motor, diminuição do ar aspirado pelo motor com conseqüente queda da potência máxima, mesmo com o uso do combustível original do veículo.

Pode-se visualizar o teste de potência máxima do motor do veículo na Figura 10.3 com o veículo utilizando gás natural como combustível.

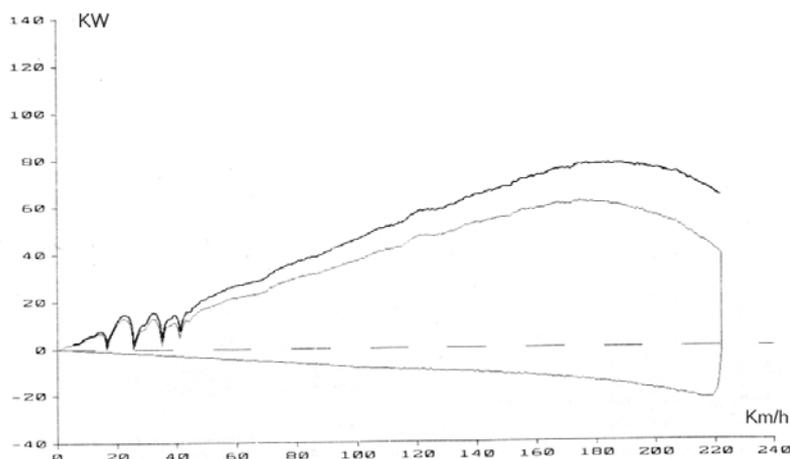


Figura 10.3 - Curva de potência máxima obtida para o veículo Maréa utilizando como combustível gás natural. ($T_{amb}=24^{\circ}\text{C}$; $k=1,024$)

Utilizando gás natural como combustível a potência máxima corrigida do motor do veículo ficou em $P_{m\acute{a}x}=79,1\text{kW}$ (107,47CV) na velocidade de 184km/h, ou seja, verifica-se uma queda de potência de 16,9kW (22,96CV), 17,6% em relação à utilização do combustível original gasolina estando o veículo equipado com o mesclador (“Kit” de conversão). Ao comparar a queda de potência em relação ao veículo conservando suas características originais, tem-se uma queda ainda maior, 28,9kW (39,26CV), ou seja, aproximadamente 26%.

Um dos fatores responsáveis pela queda de potência é a própria utilização de um combustível gasoso, pois a quantidade de gás a combustão ocupa um volume maior do que se esse combustível estivesse em estado líquido, verifica-se uma menor quantidade de ar para a combustão no motor devido ao maior espaço ocupado nas câmaras de combustão pelo combustível gasoso. Além disso, na condição estequiométrica o GNV necessita de 17kg_{ar} para queimar $1\text{kg}_{combust\acute{i}vel}$ enquanto que a gasolina necessita de $14,5\text{kg}_{ar}$ para queimar 1kg_{comb} , logo ao utilizar-se GNV, tem-se uma maior massa de N_2 (gás inerte Nitrogênio), que ocupa volume útil do cilindro.

Vale comentar também que a instalação do mesclador no tubo de admissão do veículo causa uma perda de carga do fluido, simulando uma diminuição no diâmetro do tubo, ocasionando melhores eficiências volumétricas (Ver Capítulo 3, Eficiência Volumétrica) em menores velocidades médias do êmbolo. Conforme [Taylor, C.F.,1988], tubos de admissão longos com pequenas relações de diâmetro, dão altas eficiências volumétricas com baixas velocidades médias do êmbolo, porque é desenvolvida uma energia cinética elevada no tubo no final do processo de indução (eventos que ocorrem entre a abertura e fechamento da válvula de admissão), enquanto que tubos de admissão longos com grandes relações de diâmetro mostram

máximas eficiências nas velocidades médias intermediárias do êmbolo, devido á energia cinética transformada no tubo. Com altas velocidades médias do êmbolo, a massa de ar em tais tubos acelera-se lentamente, e a eficiência volumétrica cai. À medida que os tubos tornam-se mais curtos, os máximos ganhos na eficiência volumétrica crescem menos do que aqueles sem tubo de admissão, mas a faixa de velocidades médias do êmbolo, na qual se verifica algum ganho, cresce mais. Estes efeitos são provocados pela inércia e elasticidade dos gases no tubo de admissão e cilindro. Como conseqüência deste fenômeno observa-se que a potência máxima do veículo quando equipado com o mesclador (restrição na admissão de ar), além de sofrer reduções, ocorre em menores rotações em relação ao veículo com suas características originais conservadas, conforme pode ser observado nos testes anteriores.

Outra característica que será modificada devido à instalação do mesclador é o torque do veículo, sendo que além da redução do seu valor máximo ocasionado pela diminuição da eficiência volumétrica, ter-se-á um deslocamento de seus valores máximos reduzidos para menores faixas de rotação, conforme os efeitos descritos anteriormente.

Pode-se calcular o torque desenvolvido pelo veículo nos dois casos anteriores, de acordo com relação (potência desenvolvida), (velocidade do veículo, rotação do motor em 5ª (quinta) marcha). A potência desenvolvida é retirada das curvas em função da velocidade do veículo, incorrendo-se em pequenos erros de observação visual, que para fins comparativos podem ser desprezados.

Vale lembrar que o torque máximo desenvolvido pelo veículo, conservando suas características originais, é de 187N.m a 4500RPM ($\approx 150\text{km/h}$), conforme as especificações do fabricante.

De acordo com a seção 3.4. do Capítulo 3, pode-se dizer que:

$$T_b = \frac{P_b}{2.\pi.N} \quad (3.2)$$

onde: T_b =Torque no freio em [N.m]; N =Velocidade angular em [s^{-1}] e P_b =Potência no freio em [W].

O torque desenvolvido pelo veículo nos testes anteriores pode ser visualizado na Tabela 10.4.

Tabela 10.4 - Torque desenvolvido pelo veículo Maréa, utilizando como combustível gasolina e gás natural com a instalação do “Kit” de GNV.

Velocidade [km/h]	Rotação do Motor [RPM]	Gasolina com Mesclador		Gás Natural	
		Potência [kW]	Torque [N.m]	Potência [kW]	Torque [N.m]
80	2400	41	162,8	35	138,9
100	3000	52	165,1	45	142,9
120	3600	68	180,0	56	148,2
130	3900	75	183,2	60	146,6
140	4200	82	186,0	64	145,2
150	4500	86	182,1	68	144,0
160	4800	90	178,6	72	142,9
180	5400	98	172,9	80	141,1
200	6000	96	152,4	76	120,7
220	6600	----	----	66	95,2

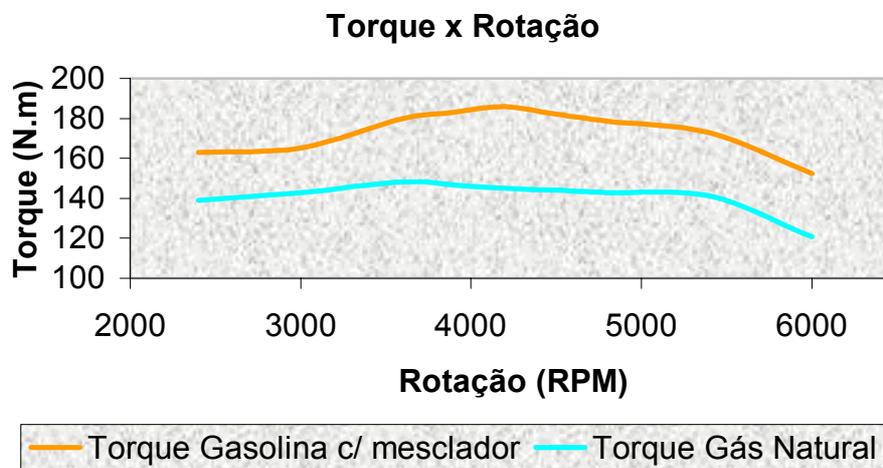


Figura 10.4 – Torque x Rotação para o veículo Maréa ao utilizar-se gasolina com mesclador e gás natural

Conforme a Tabela 10.4, tem-se que o maior torque alcançado pelo veículo ao utilizar combustível gasolina com o mesclador foi de 186N.m a 4200RPM, enquanto que o uso do gás natural proporcionou um torque máximo de 148,2 N.m a 3600RPM. O uso do combustível gasolina com a instalação do mesclador de gás não ocasionou perceptíveis reduções

no valor do torque máximo do veículo, enquanto que o uso do combustível gás ocasionou uma redução de aproximadamente 20% em relação ao torque máximo original do veículo, mas em ambos casos se percebe uma redução da rotação para o regime de torque máximo, 4500RPM veículo sem modificações e a gasolina, 4200RPM veículo com o mesclador de gás e a gasolina e 3600RPM veículo a gás. A ocorrência do torque máximo em menores rotações modifica as condições de dirigibilidade do veículo, tornando-o mais estável (Ver Capítulo 3, Estabilidade de Funcionamento de Motores), causando a errônea idéia em alguns motoristas ao conduzirem em ambientes urbanos que o veículo melhora a sua performance quando convertido a gás.

Simultaneamente aos testes de potência realizados, efetuou-se a tomada de emissão de gases de descarga do veículo em 5ª (quinta) marcha a 100km/h (3000RPM), analisando-se os níveis de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrocarbonetos (HC), oxigênio (O₂) e óxidos de nitrogênio (NO_x), conforme apresentado na Tabela 10.5.

Tabela 10.5 – Dados comparativos de emissões do veículo Maréa, ao utilizar-se gasolina e gás natural. (T_{amb}=24°C)

Gasolina com Mesclador	CO [%vol]	CO₂ [%vol]	HC [ppm vol]	O₂ [%vol]	Nox [ppm vol]	Potência na Roda [kW]	λ [kg_{ar}/kg_{com}]
100 [km/h]	2,80	13,5	154	---*	---*	39	0,917
Gás Natural	CO [%vol]	CO₂ [%vol]	HC [ppm vol]	O₂ [%vol]	NO_x [ppm vol]	Potência na Roda [kW]	λ [kg_{ar}/kg_{com}]
100[km/h]	0,23	11,8	67	---*	4	32	0,988

* O traço inserido na tabela significa que o aparelho utilizado para realizar a medida não possui sensibilidade suficiente para detectar um percentual mínimo, próximo de zero.

Analisando-se os valores de uma forma geral, nota-se uma boa queda nas emissões de CO e HC, quedas de aproximadamente 90% e 55% respectivamente, quando o veículo utiliza gás natural ao invés de gasolina, e nota-se ainda que quando alimentado com gás o veículo possui maiores valores para o coeficiente λ, o que representa menores frações de combustível admitido em relação à utilização da gasolina, (“mais pobre”), fator esse que impulsiona a redução das emissões de CO e HC. O aumento da emissão de óxidos de nitrogênio quando se utiliza gás natural reflete que a temperatura da câmara de combustão do veículo aumentou em comparação com o uso de gasolina como combustível, devido à natureza gasosa do combustível,

pois o combustível líquido ao evaporar-se na câmara de combustão ocasiona a retirada de calor, enquanto que o gás encontra-se em estado vapor.

10.3. Resultados Obtidos com o Veículo Renault Kangoo Express

Esta seção apresenta os ensaios de potência realizado no Laboratório de Motores da Petrobras com o veículo Renault Kangoo Express, de propriedade de uma oficina mecânica convertidora, equipado com o motor de 4 cilindros, 1600cm³ de cilindrada e 8 válvulas. Não se realizaram ensaios de emissões com o veículo, devido à impossibilidade de se efetuar uma tomada dos gases de emissões antes do conversor catalítico, elemento responsável pela transformação de grande parte dos gases tóxicos emitidos pela queima de combustível do motor em gases inofensivos. Para todos os ensaios realizados com o veículo Renault, considera-se a pressão atmosférica seca de $P_{atm}=99,6\text{kPa}$.

De acordo com o fabricante, a potência máxima desenvolvida pelo veículo é de 54kW (74CV) a 5000RPM ($\approx 122\text{km/h}$).

Na Figura 10.5 tem-se a curva de potência máxima para o veículo, utilizando como combustível gasolina, sem a instalação do “Kit” de GNV, ou seja, o veículo conservando as suas características originais.

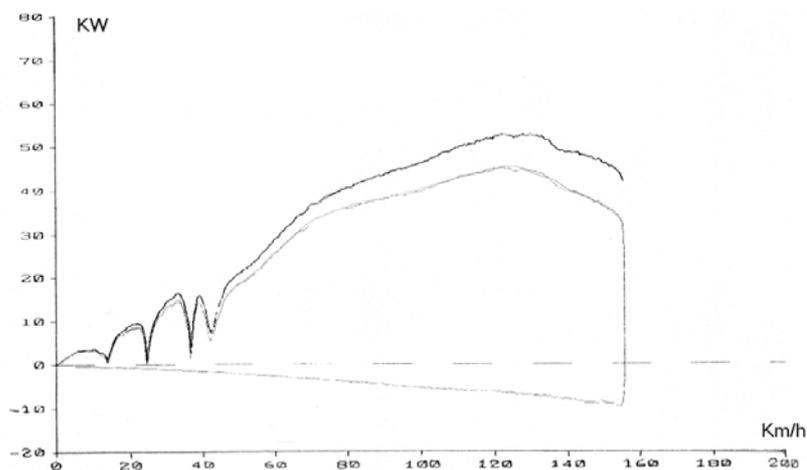


Figura 10.5 – Curva de potência máxima obtida com o veículo Renault utilizando como combustível gasolina, conservando-se as características originais do veículo.

$$(T_{amb}=24^{\circ}\text{C}; k=1,024)$$

Conforme a curva, pode-se dizer que a potência máxima corrigida do motor do veículo é $P_{m\acute{a}x}=52,8\text{kW}$ ($\approx 72\text{CV}$) na velocidade de 122km/h, estando o veículo conforme o seu

estado original e alimentado com gasolina. Nota-se uma diferença de 1,2kW em relação à potência especificada pelo fabricante, diferença esta que se pode atribuir ao envelhecimento de alguns componentes do motor do veículo ou diferenças nas condições atmosféricas dos testes.

A seguir, na Figura 10.6, apresenta-se um teste com o veículo equipado com um “Kit” de GNV encontrado comercialmente, mas utilizando como combustível gasolina. Este “Kit” de GNV possui um mesclador de alumínio com uma entrada de gás, diâmetro interno de 32mm, e que teve sua superfície interna polida.

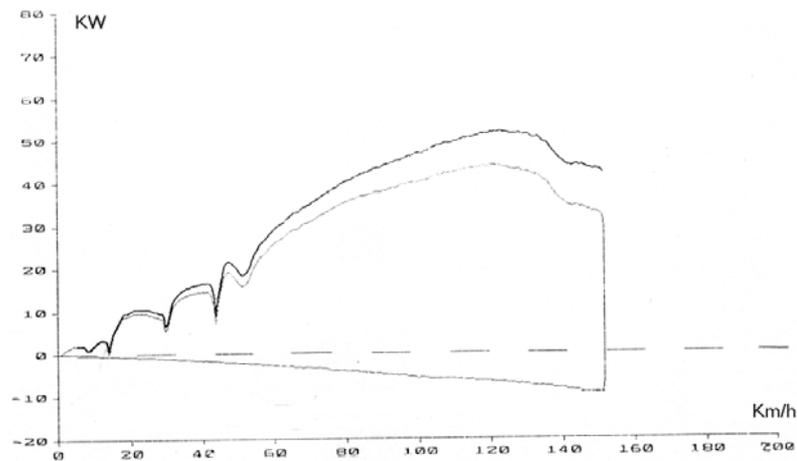


Figura 10.6 - Curva de potência máxima obtida com o veículo Renault utilizando como combustível gasolina, com a instalação do mesclador de GNV. ($T_{amb}=23^{\circ}C$; $k=1,022$)

Verifica-se que a potência máxima corrigida do motor do veículo alcançou valores de $P_{m\acute{a}x}=51,9kW$ ($\approx 70,5CV$) na velocidade de 121km/h. Sendo assim houve uma queda de potência de 1kW ($\approx 1,3CV$), ou seja, 1,7%. Conforme os casos anteriores, o principal fator para está queda de potência está na restrição causada pela instalação do mesclador de gás no tubo de admissão de ar do motor do veículo, mas neste caso verificam-se bons resultados, uma queda de potência muito pequena, refletindo que o mesclador instalado não ocasiona restrições consideráveis no tubo do ar de admissão do veículo. Vale citar ainda, que o mesclador utilizado é de alumínio e teve sua superfície interna polida, com o objetivo de diminuir as perdas ocasionadas pelo atrito com o ar e conseqüentemente a restrição.

Pode-se visualizar o teste de potência máxima do motor do veículo na Figura 10.7 com o veículo utilizando gás natural como combustível.

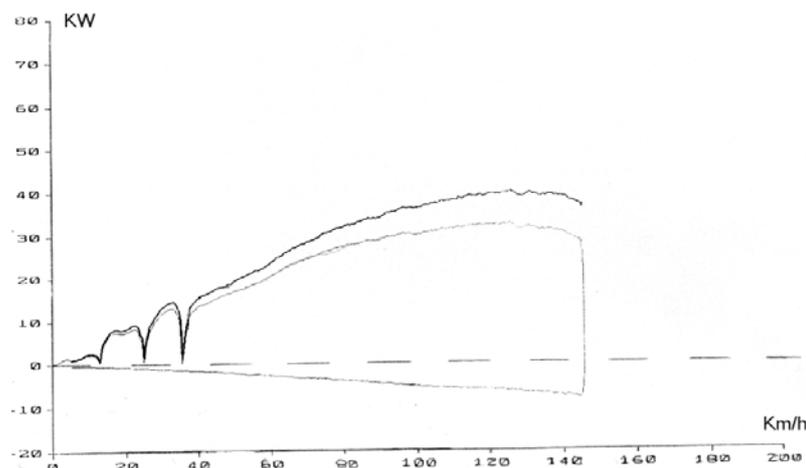


Figura 10.7 - Curva de potência máxima obtida com o veículo Renault utilizando como combustível gás natural. ($T_{amb}=24^{\circ}C$; $k=1,024$)

Utilizando gás natural como combustível a potência máxima corrigida do motor do veículo ficou em $P_{m\acute{a}x}=40,1kW$ ($\approx 54,5CV$) na velocidade de $125,5km/h$, ou seja, verifica-se uma queda de potência de $11,8kW$ ($\approx 16CV$), $22,8\%$ em relação à utilização do combustível original gasolina estando o veículo equipado com o mesclador (“Kit” de conversão). Ao comparar a queda de potência em relação ao veículo utilizando gasolina sem o mesclador, conservando suas características originais, tem-se uma queda um pouco maior, $12,7kW$ ($\approx 17,3CV$), ou seja, aproximadamente 24% .

Como principal fator responsável pela queda de potência, tem-se a utilização do combustível gasoso. Outro fator a ser analisado, é o mesclador de gás utilizado. Nota-se uma pequena queda de potência ao utilizar-se gasolina com a instalação do mesclador, $1,7\%$, enquanto que ao utilizar-se GNV a queda de potência chega a aproximadamente $22,8\%$, podendo-se concluir que o mesclador não ocasiona a restrição necessária para uma alimentação conveniente de gás em regimes de máxima potência. Sendo assim poderia trocar-se o mesclador do veículo em questão por um mesclador de menor diâmetro interno, que ocasionaria uma maior restrição ao ar de admissão, aumentando as perdas ao utilizar-se gasolina como combustível, mas por outro lado diminuir-se-iam as perdas ao utilizar gás como combustível.

Em conjunto com o desenvolvimento da curva de potência do motor do veículo, decidiu-se verificar a potência máxima na roda do veículo em diversas velocidades e em plena carga, ao utilizar-se gás natural como combustível e gasolina com a instalação do mesclador. Os dados obtidos podem ser visualizados na Tabela 10.6.

Tabela 10.6 – Potência máxima na roda do veículo Renault ao utilizar-se gasolina com a instalação do mesclador e gás natural como combustível.

Velocidade [km/h]	Potência na Roda [kW]	
	Gasolina com mesclador	GNV
40	10,1	7,4
60	17,5	14,3
80	24,7	19,2
100	30	23,6
120	34,5	26,8

Verifica-se uma queda média de 22% da potência na roda do veículo convertido quando testado com gasolina e mesclador em relação ao teste com o combustível gás, ou seja, tem-se a mesma queda em comparação com os testes anteriores de potência máxima no motor do veículo ao utilizar-se gasolina com o mesclador e gás como combustível.

10.4. Resultados Obtidos com o Veículo FIAT Siena

Nesta seção serão apresentados os ensaios de potência e emissões realizados no Laboratório de Motores da Petrobras, com o veículo Siena equipado com o motor de 4 cilindros, 1600cm³ de cilindrada e 16Válvulas. Para todos os ensaios realizados com o veículo Siena, considera-se a pressão atmosférica seca de $P_{atm} = 99,4\text{kPa}$.

10.4.1. Primeiro Ensaio Realizado com o Veículo Siena.

Na Figura 10.8 tem-se a curva de potência máxima para o motor do veículo, utilizando como combustível gasolina, sem a instalação do “Kit” de GNV, ou seja, o veículo conservando as suas características originais.

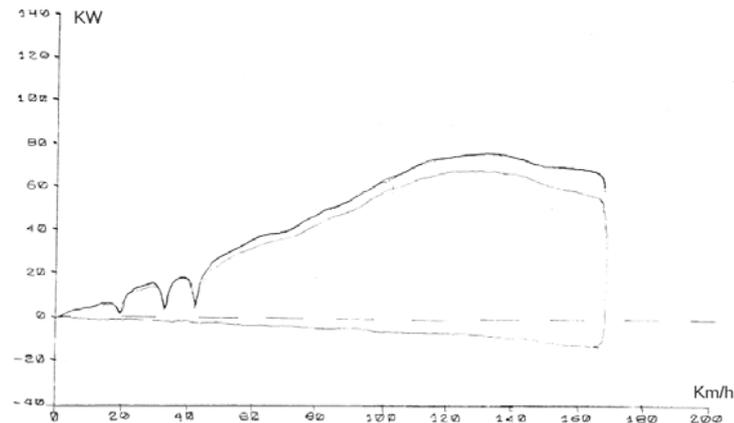


Figura 10.8 – Curva de potência máxima obtida no primeiro ensaio para o veículo Siena utilizando como combustível gasolina, conservando-se as características originais do veículo. ($T_{amb}=29^{\circ}C$; k =sem correção)

Conforme a curva, pode-se dizer que a potência máxima não corrigida do motor do veículo é $P_{m\acute{a}x}=76,1kW$ (103,4CV) na velocidade de 132km/h, estando o veículo conforme o seu estado original e alimentado com gasolina.

A seguir, na Figura 10.9 ,apresenta-se um teste com o veículo equipado com um “Kit” de GNV encontrado comercialmente, mas utilizando como combustível gasolina.

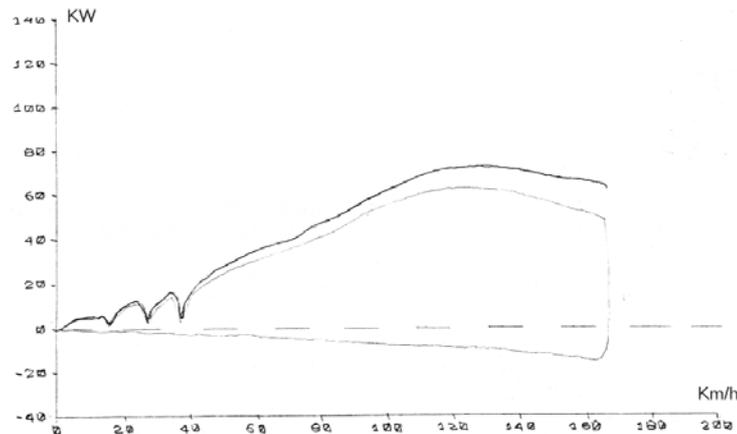


Figura 10.9 - Curva de potência máxima obtida no primeiro ensaio para o veículo Siena utilizando como combustível gasolina, com a instalação do mesclador de GNV.

($T_{amb}=29^{\circ}C$; k = sem correção)

Verifica-se que a potência máxima não corrigida do motor do veículo alcançou valores de $P_{m\acute{a}x}=72,5kW$ (98,5CV) na velocidade de 125km/h. Sendo assim houve uma queda de potência de 3,6kW (4,9CV), ou seja, 4,7%. O principal fator para está queda de potência está na restrição causada pela instalação do mesclador de gás no tubo de admissão de ar do motor do

veículo, pois o mesclador, reduz a passagem do ar com o objetivo de causar uma aceleração no ar de admissão para que haja o arraste do gás natural, quando este estiver sendo utilizado. Sendo assim ter-se-á uma diminuição da eficiência volumétrica do motor, diminuição do ar aspirado pelo motor com conseqüente queda da potência, mesmo com o uso do combustível original do veículo.

Além da queda de potência verifica-se que a potência máxima alcançada neste caso, não corresponde à mesma rotação do motor do teste anterior, o que significa que a restrição causada pelo mesclador no tubo de admissão do ar causou uma modificação nas características da curva de torque do motor, pelas mesmas razões comentadas no primeiro teste do veículo Maréa. Esta diferença será verificada também nos testes posteriores.

Pode-se visualizar o teste de potência máxima do motor do veículo na Figura 10.10 com o veículo utilizando gás natural como combustível.

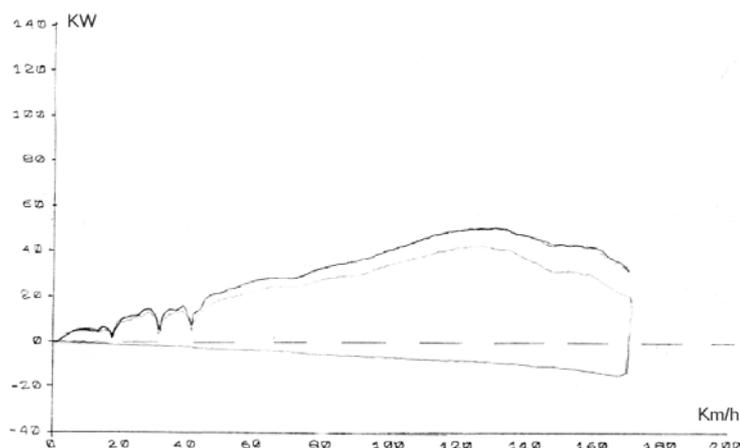


Figura 10.10 - Curva de potência máxima obtida no primeiro ensaio para o veículo Siena utilizando como combustível gás natural. ($T_{amb}=29^{\circ}C$; k = sem correção)

Utilizando gás natural como combustível a potência máxima não corrigida do motor do veículo ficou em $P_{m\acute{a}x}=50,7kW$ (68,8CV) na velocidade de 131km/h, ou seja, verifica-se uma queda de potência de 21,8kW (29,61CV), 30% em relação à utilização do combustível original gasolina estando o veículo equipado com o mesclador (“Kit” de conversão). Ao comparar a queda de potência em relação ao veículo utilizando gasolina sem o mesclador, (“Kit” de conversão), tem-se uma queda ainda maior, 25,4kW (34,51CV), ou seja, aproximadamente 33%.

Como fatores responsáveis pela queda de potência, tem-se a própria utilização do combustível gasoso. Outro fator a ser analisado, é o mesclador de gás utilizado, que não é o ideal para o veículo em questão, sendo que a sua troca pode diminuir a queda de potência a níveis mais aceitáveis, conforme será apresentado em testes posteriores.

Simultaneamente ao desenvolvimento da curva de potência do motor do veículo, decidiu-se verificar a potência máxima na roda do veículo em diversas velocidades e em plena carga, efetuando-se o teste com emulador e sem emulador do sensor de O₂, quando o veículo utilizou gás natural como combustível, com o objetivo de testar a eficácia do emulador. Os dados obtidos podem ser visualizados na Tabela 10.7.

Tabela 10.7 – Potência máxima na roda do veículo Siena, primeiro ensaio, e verificação da eficácia do emulador do sensor de O₂

Velocidade [km/h]	Potência na Roda [kW]		
	Gasolina Com mesclador	GNV com emulador do sensor de O ₂	GNV sem emulador do sensor de O ₂
40	15,2	11,8	11,8
60	27,3	21,6	21,6
80	37	27,9	28,5
100	48,2	35,1	36
120	57	42,6	45
140	56,8	40,8	43

Verifica-se uma queda média de 23% na potência do veículo convertido, quando testado com combustível gás, e verifica-se também uma queda de potência quando o veículo utiliza o emulador do sensor de O₂. Vale ressaltar então a importância da verificação do perfeito funcionamento do componente antes da sua instalação, conforme descrito no Capítulo 8, emulador do sensor de O₂.

Em conjunto com os testes de potência realizados, efetuou-se a medida das emissões dos gases de descarga do veículo, analisando-se os níveis de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrocarbonetos (HC), oxigênio (O₂) e óxidos de nitrogênio (NO_x), conforme apresentado na Tabela 10.8.

Tabela 10.8 – Dados comparativos de emissões do veículo Siena, primeiro ensaio, ao utilizar-se gasolina, gás natural.

Gasolina com Mesclador	CO [%vol]	CO₂ [%vol]	HC [ppm vol]	O₂ [%Vol]	NOx [ppm vol]	λ [kg_{ar}/kg_{comb}]
Marcha Lenta	0,69	13,0	147	1,0	24	1,024
40 [km/h] #	1,24	10,5	302	0,8	214	0,985
60 [km/h] #	1,92	12,7	394	0,4	570	0,945
80 [km/h] #	1,92	12,9	367	---*	180	0,928
100 [km/h] #	5,64	11,2	350	---*	287	0,834
120 [km/h] #	2,46	12,9	332	---*	614	0,916
140 [km/h] #	0,94	12,3	340	2,6	258	1,091
Gás Natural	CO [%vol]	CO₂ [%vol]	HC [ppm vol]	O₂ [%vol]	NOx [ppm vol]	λ [kg_{ar}/kg_{comb}]
Marcha Lenta	0,15	11,0	132	0,3	19	1,011
40 [km/h] #	3,85	8,6	177	1,8	287	0,954
60 [km/h] #	0,03	10,1	111	1,8	834	1,120
80 [km/h] #	0,02	9,9	66	2,1	1156	1,144
100 [km/h] #	0,04	9,9	154	2,2	946	1,146
120 [km/h] #	4,32	7,3	876	2,9	34	0,958
140 [km/h] #	0,13	10,6	233	0,9	326	1,041

Valores obtidos em regime parcial de aceleração

* O traço inserido na tabela significa que o aparelho utilizado para realizar a medida não possui sensibilidade suficiente para detectar um percentual mínimo, próximo de zero.

Analisando-se os valores de uma forma geral, nota-se uma significativa queda nas emissões de CO e HC, quedas de 42,18% e 21,64% respectivamente, quando o veículo utiliza gás natural ao invés de gasolina, sendo o valor médio do coeficiente $\lambda=0,96$ ao utilizar-se gasolina e $\lambda=1,05$ ao utilizar-se gás, valores que demonstram que o veículo permaneceu com uma menor admissão de combustível ao utilizar gás, fator que colabora para a diminuição de emissões de gases tóxicos. Observa-se também alguns picos de emissões de CO em algumas velocidades, utilizando-se gasolina ou gás natural, devido a combustão se realizar de forma incompleta (falta de ar), conforme pode ser observado pelos valores do coeficiente λ .

Deve-se ressaltar ainda que a válvula dosadora de gás utilizada no “Kit” de GNV

empregado permite apenas uma regulagem, ou seja, não permite que o veículo opere sempre na condição estequiométrica.

No próximo teste que pode ser visualizado na Figura 10.11, trocou-se o mesclador do veículo por um mesclador, de outro fabricante de “Kits”, com menor diâmetro interno, maior restrição, e o veículo foi equipado com um novo “Kit” de GNV, que realiza o controle do fator λ através da substituição da válvula dosadora de vácuo por uma válvula operada por um motor de passo, controlado por uma central eletrônica ligada ao sensor de O_2 do veículo, sensor de posição da borboleta de aceleração e sensor de rotação, sendo substituído também o redutor de pressão do veículo por um assistido eletronicamente quanto à regulagem da sensibilidade e vazão de gás através de um motor de passo ligado à mesma central eletrônica de controle do GNV. A regulagem deste sistema é feita através de um “Scanner”, fornecido pelo fabricante do “Kit”, que é ligado a central eletrônica de controle de GNV, onde podem ser configuradas algumas variáveis.

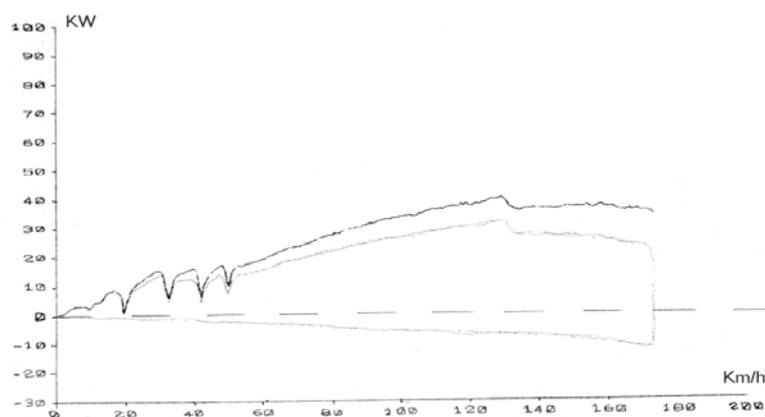


Figura 10.11 – Curva de potência máxima para o veículo Siena, primeiro ensaio, utilizando como combustível gás natural e “kit” com controlador eletrônico fator $\lambda=0,91$.

$$(T_{amb}=31^{\circ}C; k=\text{sem correção})$$

De acordo com a curva tem-se que a potência máxima não corrigida do motor do veículo ficou em $P_{m\acute{a}x}=40,3\text{kW}$ (54,7CV) na velocidade de 129km/h, ou seja, verifica-se uma queda de potência de 10,4kW (14,1CV) em relação ao “Kit” sem controle da relação estequiométrica, fator λ . Um dos fatores responsáveis por está queda, pode estar no novo mesclador utilizado, pois o mesmo pode ser ainda mais inadequado para o veículo e o “Kit” em questão.

Em outro teste realizado, Figura 10.12, manteve-se o fator $\lambda=0,88$, e obteve-se o seguinte resultado:

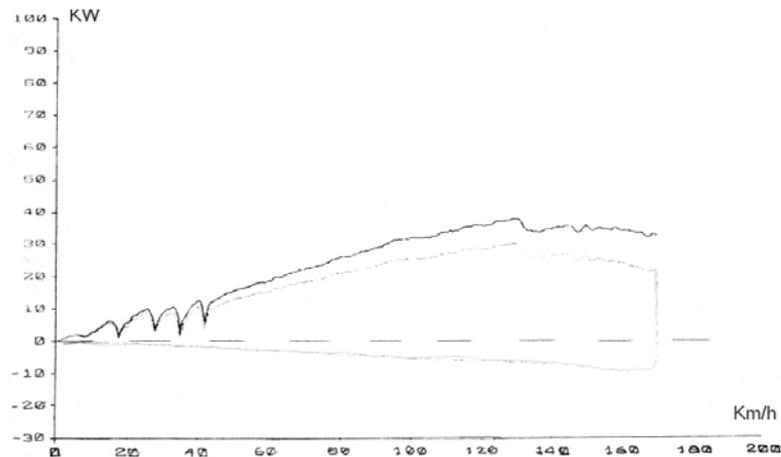


Figura 10.12 - Curva de potência máxima para o veículo Siena, primeiro ensaio, utilizando como combustível gás natural e “kit” com controlador eletrônico fator $\lambda=0,88$.

($T_{amb}=32^{\circ}\text{C}$; k=sem correção)

A potência máxima não corrigida do motor diminuiu em relação ao teste com fator $\lambda=0,91$, passando para $P_{m\acute{a}x}=38\text{kW}$ (51,63CV) na velocidade de 129km/h. Este fato deve-se ao enriquecimento causado a mistura ar/gás, pois para o combustível gás o fator Lambda de máxima potência é próximo do estequiométrico ($\lambda=1$), ao contrário dos combustíveis líquidos cujos fatores Lambda para a máxima potência são da ordem ($\lambda=0,85$ a $0,89$), conforme comentado em testes anteriores.

Na Tabela 10.9 tem-se o teste de potência máxima na roda do veículo, ao utilizar-se o novo mesclador e o sistema eletrônico de controle do fator λ .

Tabela 10.9 – Potência máxima na roda do veículo Siena, primeiro ensaio, com sistema eletrônico de controle do fator λ .

Velocidade [km/h]	Potência na Roda [kW]	
	Gasolina com mesclador	GNV
40	10,8	5,4
60	16,8	13,3
80	25,1	19,2
100	30,2	21,3
120	34,9	25,1
140	38,1	23,2

Estabelecendo-se um comparativo com a Tabela 10.7 nota-se que a potência do veículo diminuiu, mas o fator que deve ser analisado é a queda de potência com o veículo usando gasolina, o que reflete que o novo mesclador instalado esta restringindo mais a passagem do ar de admissão do veículo que o mesclador anteriormente instalado, fazendo com que haja a queda de potência utilizando-se ambos os combustíveis. Enfatiza-se ainda que a diminuição do diâmetro interno do venturi, mesclador, pode não ser a solução apropriada para um melhor rendimento do veículo.

Analisando-se os gases de escapamento com o sistema de controle eletrônico do fator λ , notou-se uma diminuição nas emissões de CO e HC em relação ao teste sem controle eletrônico do fator λ , conforme a Tabela 10.10.

Tabela 10.10 - Dados comparativos de emissões do veículo Siena, primeiro ensaio, equipado com “Kit” controlador do fator $\lambda=0,91$ ao utilizar-se gasolina, gás natural.

Gasolina com mesclador	CO [%vol]	CO₂ [%vol]	HC [ppm vol]	O₂ [%vol]	NOx [ppm vol]	λ [kg _{ar} /kg _{comb}]
40 [km/h] #	0,85	13,6	145	0,2	434	0,980
60 [km/h] #	2,41	13,0	120	---*	400	0,925
80 [km/h] #	3,69	11,9	95	---*	292	0,889
100 [km/h] #	4,18	11,6	82	---*	307	0,875
120 [km/h] #	4,76	11,2	71	---*	273	0,864
140 [km/h] #	4,54	11,1	68	---*	336	0,860
Gás Natural	CO [%vol]	CO₂ [%vol]	HC [ppm vol]	O₂ [%vol]	NOx [ppm vol]	λ [kg _{ar} /kg _{comb}]
40 [km/h] #	0,03	9,0	103	2,8	63	1,110
60 [km/h] #	2,15	10,2	98	0,1	161	0,984
80 [km/h] #	0,04	10,7	72	0,7	634	1,044
100 [km/h] #	0,04	10,5	66	1,5	629	1,097
120 [km/h] #	0,05	10,5	56	1,6	561	1,006
140 [km/h] #	0,05	10,4	67	2,2	361	1,041

Valores obtidos em regime de plena carga (aceleração máxima)

* O traço inserido na tabela significa que o aparelho utilizado para realizar a medida não possui sensibilidade suficiente para detectar um percentual mínimo, próximo de zero.

Nota-se ainda que os valores de emissões de CO diminuíram em média 85% em relação aos valores emitidos pela gasolina, além de permanecerem quase constantes para todas as velocidades, o que reflete o perfeito controle da relação ar/combustível, fator λ , pelo sistema eletrônico instalado, mesmo em regime de aceleração total.

10.4.2. Segundo Ensaio Realizado com o Veículo Siena

Neste teste instalou-se um “Kit” de GNV de outra marca comercial em relação aos utilizados anteriormente, com controle eletrônico do fator λ , e com a particularidade de poder-se ter uma rotação programada de transferência automática para gasolina, conforme mostrado mais adiante, na Figura 10.17 e na Figura 10.18.

Na Figura 10.13 tem-se a curva de potência máxima corrigida para o veículo, utilizando como combustível gasolina, sem a instalação do “Kit” de GNV, ou seja, características originais.

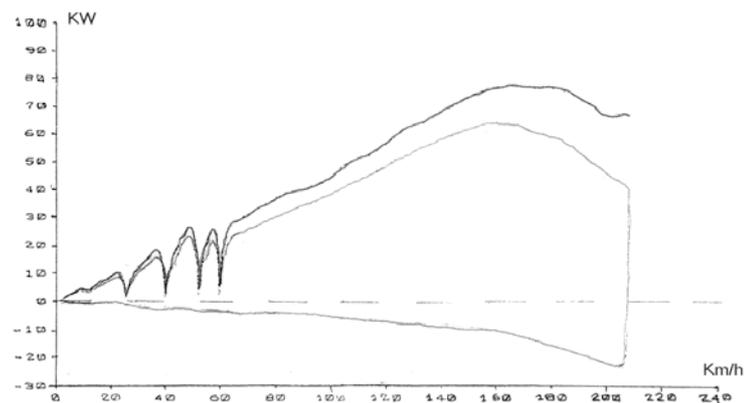


Figura 10.13 - Curva de potência máxima obtida no segundo ensaio para o veículo Siena utilizando como combustível gasolina, conservando-se as características originais do veículo.

$$(T_{\text{amb}}=24^{\circ}\text{C}; k=1,030)$$

Neste teste a potência máxima corrigida do motor do veículo ficou em $P_{\text{máx}}=77,5\text{kW}$ (105,29CV) na velocidade de 165km/h, estando o veículo conforme o seu estado original e alimentado com gasolina.

Na Figura 10.14 apresenta-se o teste com o veículo equipado com o mesclador de GNV do fabricante do referido “Kit”, mas utilizando como combustível gasolina.

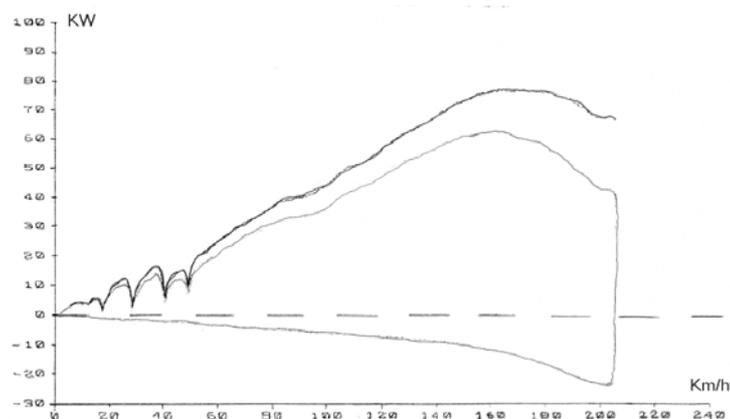


Figura 10.14 - Curva de potência máxima obtida no segundo ensaio para o veículo Siena utilizando como combustível gasolina, com a instalação do mesclador de GNV.
($T_{amb}=23^{\circ}C$; $k=1,029$)

Verifica-se que a potência máxima corrigida do motor do veículo alcançou valores de $P_{m\acute{a}x}=77,1kW$ (104,75CV) na velocidade de 162,5km/h. Sendo assim houve uma queda de potência de apenas 0,4kW (0,54CV), ou seja, aproximadamente 0,5%. Pode-se dizer que o mesclador utilizado neste caso gerou um melhor rendimento em comparação com o mesclador utilizado no primeiro ensaio, que ocasionou uma queda de 4,73% na potência original do veículo. Observa-se também neste caso, uma modificação das características da curva de torque do veículo, refletida na diminuição da velocidade na máxima potência, devido à instalação do mesclador no tubo de admissão, conforme os fatores mencionados em testes anteriores.

Na Figura 10.15 pode-se visualizar o comportamento da potência máxima do motor do veículo utilizando como combustível GNV e o referido mesclador.

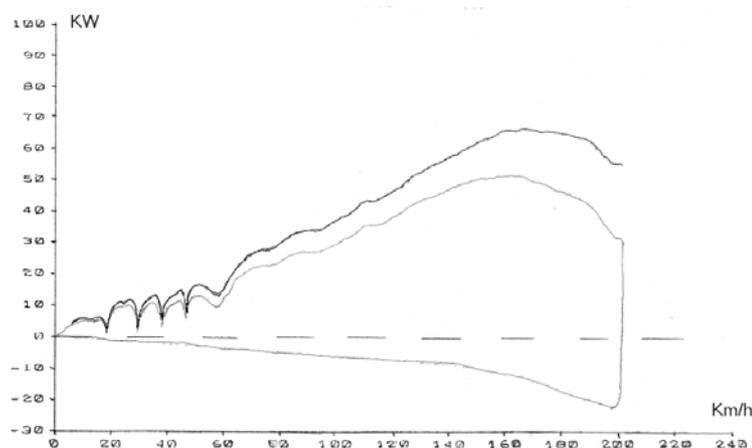


Figura 10.15 - Curva de potência máxima obtida no segundo ensaio para o veículo Siena utilizando como combustível gás natural. ($T_{amb}=23^{\circ}C$; $k=1,029$)

Utilizando gás natural como combustível a potência máxima corrigida do motor do veículo ficou em $P_{\text{máx}}=66,6\text{kW}$ (90,48CV) na velocidade de 165km/h, ou seja, verifica-se uma queda de potência de apenas 10,5kW (14,26CV), 13,6% em relação à utilização do combustível original gasolina estando o veículo equipado com o mesclador. Ao comparar a queda de potência em relação ao veículo utilizando gasolina sem o mesclador, tem-se uma queda de 10,9kW (14,8CV), ou seja, aproximadamente 14%. Comparando-se com o primeiro ensaio realizado no veículo, constata-se que este “Kit” utilizado apresentou melhores resultados, em relação aos dois “Kits” utilizados anteriormente, e pode se dizer que este mesclador utilizado diminuiu muito as perdas de potência máxima do motor.

Como um complemento ao teste, decidiu-se modificar o diâmetro do mesclador utilizado, através da usinagem de um pequeno rebaixo, (aumento de diâmetro), em toda a seção circular e apenas sobre os furos de entrada do gás, os quais estão posicionados em uma pequena seção e por todo o perímetro do referido mesclador, com o intuito de aumentar o efeito de arraste do gás. Na Figura 10.16 pode-se visualizar este teste.

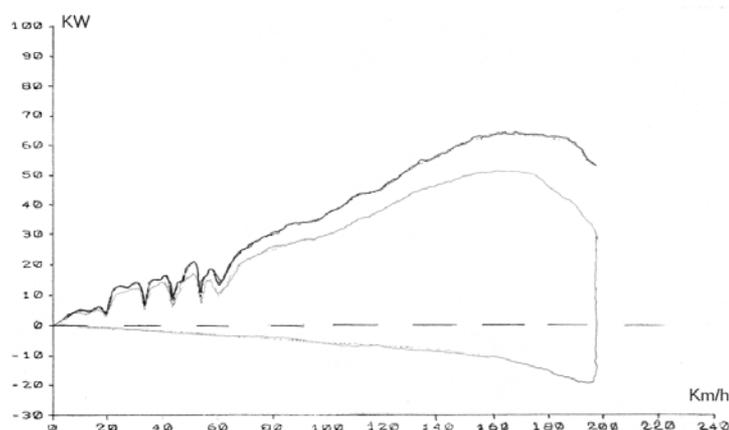


Figura 10.16 - Curva de potência máxima obtida no segundo ensaio para o veículo Siena utilizando como combustível gás natural e mesclador modificado. ($T_{\text{amb}}=24^{\circ}\text{C}$; $k=1,031$)

A potência máxima corrigida do motor do veículo, com o mesclador modificado, alcançou valores de $P_{\text{máx}}=64,5\text{kW}$ (87,63CV) na velocidade de 164km/h. Sendo assim houve uma queda de potência de 2,1kW (2,85CV), em relação ao mesclador não modificado, ou seja, a modificação realizada não melhorou os resultados da potência máxima do motor.

Verificou-se também as emissões geradas em algumas velocidades com a utilização dos dois mescladores, Tabela 10.11.

Tabela 10.11 - Dados comparativos de emissões do veículo Siena, segundo ensaio, equipado com mesclador modificado e mesclador não modificado ao utilizar-se gás natural.

(GNV) Mesclador	CO	CO₂	HC	O₂	NO_x	λ
Não modificado	[%vol]	[%vol]	[ppm vol]	[%vol]	[ppm vol]	[kg_{ar}/kg_{comb}]
60 [km/h] #	0,08	7,9	325	5,4	180	1,442
80 [km/h] #	0,32	8,7	178	3,5	766	1,246
100 [km/h] #	0,38	9,5	272	2,9	810	1,171
120 [km/h] #	0,52	10,8	479	1,4	878	1,043
(GNV) Mesclador	CO	CO₂	HC	O₂	NO_x	λ
Modificado	[%vol]	[%vol]	[ppm vol]	[%vol]	[ppm vol]	[kg_{ar}/kg_{comb}]
60 [km/h] #	3,97	8,4	229	0,3	102	0,864
80 [km/h] #	0,35	10,5	202	0,1	941	0,983
100 [km/h] #	0,34	10,5	188	0,2	712	0,992
120 [km/h] #	0,32	10,5	153	0,1	692	0,987

Valores obtidos em regime de plena carga (aceleração máxima)

Analisando-se as emissões de uma forma geral, pode-se dizer que o “Kit” instalado proporciona as mesmas reduções de emissões ocasionadas pelos “Kits” instalados anteriormente, em torno de 40% de CO e 20% de HC, em relação às emissões ocasionadas pela gasolina.

Conclui-se que a modificação realizada no mesclador não influenciou significativamente as emissões, mas pode-se dizer também, que com a utilização do mesclador modificado a mistura tornou-se mais “rica”, o mesclador modificado apresenta menores valores para o coeficiente λ , o que pode ter levado a queda de potência em relação ao mesclador não modificado, já que se sabe que o λ de máxima potência para o GNV deve ser próximo ao estequiométrico.

No próximo teste realizado, programou-se o sistema para efetuar a transferência automática para gasolina, em uma rotação de 5400 RPM e escolheu-se um tempo de sobreposição dos eletro-injetores de 0,10s, utilizando o mesclador modificado, conforme a Figura 10.17.

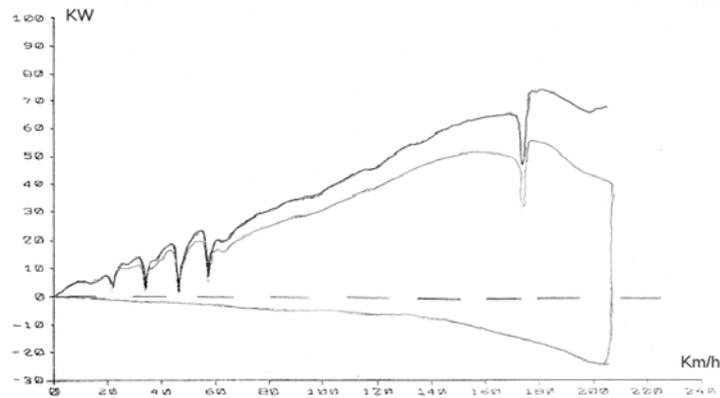


Figura 10.17 - Curva de potência máxima obtida no segundo ensaio para o veículo Siena utilizando combustível GNV, e transferência automática para gasolina a 5400RPM com tempo de sobreposição dos eletro-injetores de 0,10s. ($T_{amb}=23^{\circ}\text{C}$; $k=1,028$)

De acordo com a figura a potência máxima corrigida do motor do veículo ficou em $P_{m\acute{a}x}=74,0\text{kW}$ (100,5CV) na velocidade de 178,5km/h, ou seja, verifica-se uma queda de potência de apenas 3,1kW (4,21CV), 4% em relação à utilização do combustível original gasolina estando o veículo equipado com o mesclador. Esta configuração apresenta maiores vantagens ao condutor do veículo, pois quando for exigida a potência máxima do motor, o veículo será alimentado com gasolina alcançando regimes de potência muito próximos dos originais. No próximo teste, Figura 10.18, programou-se o sistema para efetuar a transferência automática para gasolina a 4600RPM e diminuiu-se o tempo de sobreposição dos eletro-injetores para 0,02s.

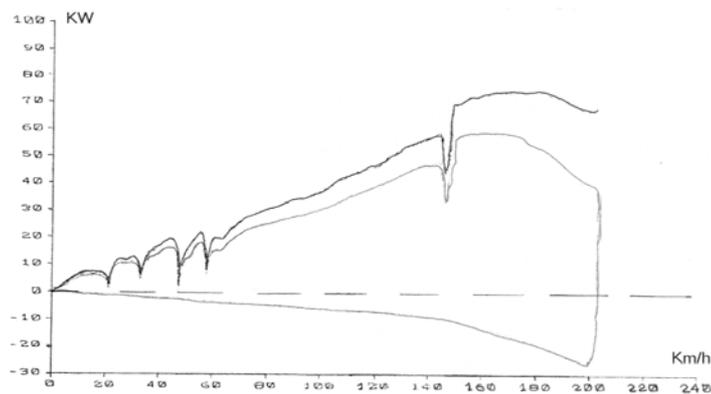


Figura 10.18 - Curva de potência máxima obtida no segundo ensaio para o veículo Siena utilizando combustível GNV, e transferência automática para gasolina a 4600RPM com tempo de sobreposição dos eletro-injetores de 0,02s. ($T_{amb}=23^{\circ}\text{C}$; $k=1,028$)

Neste caso a potência máxima corrigida do motor do veículo ficou em $P_{m\acute{a}x}=75,0\text{kW}$

(101,9CV) na velocidade de 177km/h, verifica-se um ganho de 1kW e redução do vazio de potência ocasionada pela troca de combustível, devido ao menor tempo de sobreposição dos eletro-injetores.

10.4.3. Terceiro Ensaio Realizado com o Veículo Siena

Neste terceiro teste efetuado com o veículo Siena, decidiu-se testar um “kit” de GNV que possui mescladores confeccionados em alumínio e tecnil (nylon), sendo que o mesclador de tecnil possui menor diâmetro interno. Na Figura 10.19 pode-se visualizar o teste do veículo utilizando como combustível gasolina, sem a instalação de nenhum mesclador. Em todos os testes realizados nesta seção retirou-se o filtro de ar do veículo.

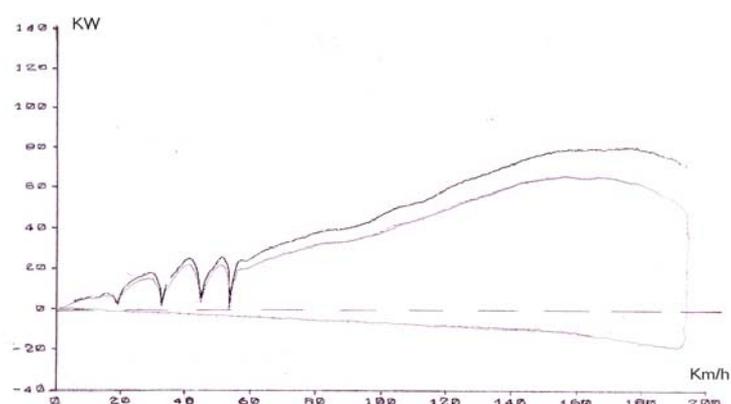


Figura 10.19 - Curva de potência máxima obtida no terceiro ensaio para o veículo Siena utilizando como combustível gasolina, sem mesclador e sem o filtro de ar de admissão.

$$(T_{amb}=30^{\circ}C; k=1,033)$$

Analisando-se a curva, conclui-se que a potência máxima corrigida do motor do veículo chegou a $P_{m\acute{a}x}=80,6kW$ (109,1CV) na velocidade 174km/h, estando o veículo alimentado com gasolina, mas sem o filtro do ar de admissão. Verifica-se então, um ganho de potência em relação aos testes anteriores, utilizando-se gasolina, o que demonstra que as restrições na admissão do ar do motor do veículo, nesse caso o filtro de ar, ocasionam perdas ao utilizar-se qualquer combustível.

Na Figura 10.20 testou-se o veículo com combustível gasolina, e o mesclador de alumínio.

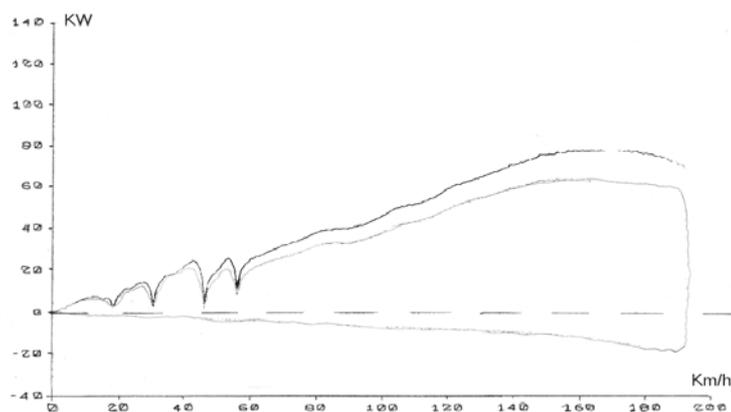


Figura 10.20 - Curva de potência máxima obtida no terceiro ensaio para o veículo Siena utilizando como combustível gasolina e mesclador de alumínio. ($T_{amb}=30^{\circ}C$; $k=1,033$)

De acordo com a curva, a potência máxima corrigida do motor do veículo ficou em $P_{m\acute{a}x}=78,1kW$ (106,11CV) na velocidade de 170km/h, teve-se uma queda de potência de 3,1% em relação ao veículo utilizando gasolina sem a instalação de nenhum mesclador e novamente uma mudança nas características da curva de torque do veículo, conforme fatores mencionados nos testes anteriores.

A Figura 10.21 demonstra o veículo utilizando o mesclador de alumínio e combustível gás natural.

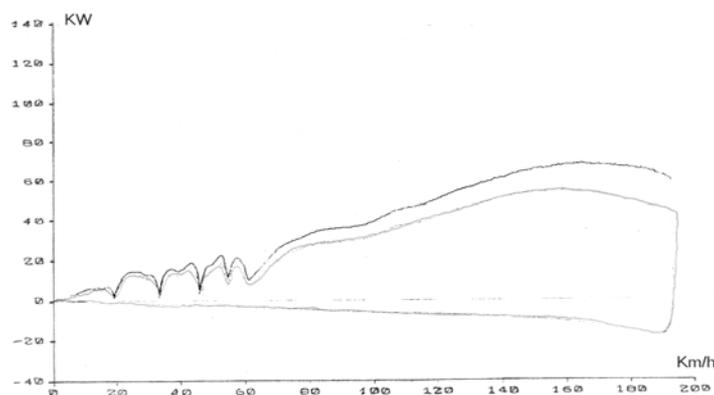


Figura 10.21 - Curva de potência máxima obtida no terceiro ensaio para o veículo Siena utilizando como combustível gás natural e mesclador de alumínio. ($T_{amb}=33^{\circ}C$; $k=1,038$)

Nesse caso a potência máxima corrigida do motor do veículo ficou em $P_{m\acute{a}x}=68,5kW$ (93,07CV) na velocidade de 163km/h, apresentando então uma queda de potência de 12,2% em relação ao veículo utilizando gasolina com a instalação do mesclador, e uma queda de aproximadamente 15% em relação ao veículo sem a instalação do mesclador.

Na Tabela 10.12 tem-se a potência na roda do veículo em condições de plena carga,

utilizando gasolina e gás como combustível e o referido mesclador.

Tabela 10.12 - Potência máxima na roda do veículo Siena, terceiro ensaio, utilizando gasolina e gás como combustível e mesclador de alumínio.

Velocidade [km/h]	Potência na Roda [kW]	
	Gasolina com mesclador alumínio	GNV com mesclador de alumínio
40	10,4	8,3
80	27,4	23,1
100	32,6	26,6
120	42,1	35,1

Têm-se quedas de 16% em média na potência na roda do veículo quando se utiliza gás com o mesclador de alumínio.

Quanto as emissões com a utilização deste mesclador, os resultados podem ser verificados na Tabela 10.13 para os regimes de plena carga.

Tabela 10.13 – Dados comparativos de emissões do veículo Siena, terceiro ensaio, ao utilizar-se gasolina, gás natural com mesclador de alumínio.

Gasolina com Mesclador de Alumínio	CO [% vol]	CO ₂ [% vol]	HC [ppm vol]	O ₂ [% vol]	NOx [ppm vol]
40 [km/h]	5,20	10,9	123	0,06	146
60 [km/h]	7,14	10,1	131	---*	92
80 [km/h]	6,24	10,2	150	0,1	146
100 [km/h]	6,83	10	143	---*	136
120 [km/h]	4,08	11,6	117	---*	356
Gás Natural com Mesclador de Alumínio	CO [% vol]	CO ₂ [% vol]	HC [ppm vol]	O ₂ [% vol]	NOx [ppm vol]
40 [km/h]	0,02	9,9	107	2,5	814
60 [km/h]	7,30	3,8	1761	3,1	4
80 [km/h]	3,96	8,5	185	0,1	161
100 [km/h]	4,31	8,4	131	---*	151
120 [km/h]	3,53	8,9	84	---*	224

* O traço inserido na tabela significa que o aparelho utilizado para realizar a medida

não possui sensibilidade suficiente para detectar um percentual mínimo, próximo de zero.

Analisando-se os dados de uma forma geral, nota-se pequenas reduções nos índices de emissões ao utilizar gás natural, em torno de 35% de redução de CO e 4,5% de redução de HC, valores característicos de “Kits” sem controle da relação estequiométrica, fator λ .

No próximo teste, Figura 10.22, instalou-se o mesclador de tecnil no veículo.

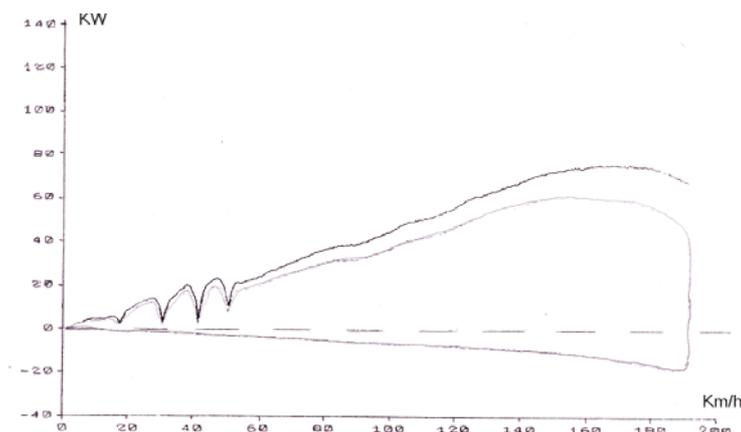


Figura 10.22 - Curva de potência máxima obtida no terceiro ensaio para o veículo Siena utilizando como combustível gasolina e mesclador de tecnil. ($T_{amb}=31^{\circ}C$; $k=1,035$)

De acordo com a curva, a potência máxima corrigida do motor do veículo ficou em $P_{m\acute{a}x}=76,3kW$ (103,6CV) na velocidade de 167,5km/h, tendo-se uma queda de potência de 5,3% em relação ao veículo utilizando gasolina sem a instalação de nenhum mesclador e 2,3% em relação ao veículo utilizando gasolina e mesclador de alumínio. As maiores perdas verificadas agora podem ser atribuídas ao menor diâmetro interno do mesclador de tecnil e a sua maior rugosidade superficial, fatores que acabam causando maiores restrições na admissão de ar do motor do veículo em relação à utilização do mesclador de alumínio.

Em seguida tem-se a curva de potência máxima do veículo utilizando gás natural e o referido mesclador de tecnil.

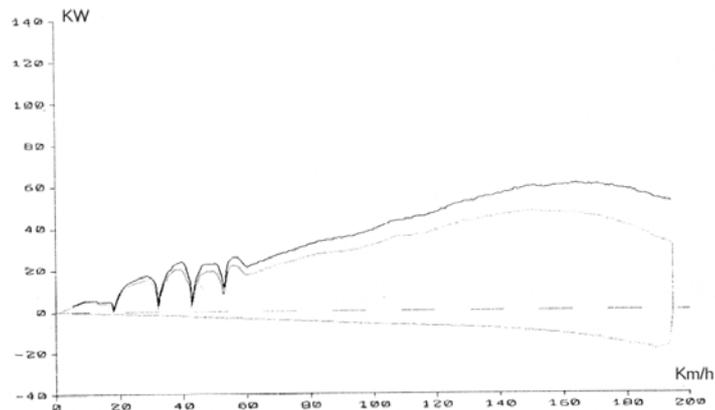


Figura 10.23 - Curva de potência máxima obtida no terceiro ensaio para o veículo Siena utilizando como combustível gás natural e mesclador de tecnil. ($T_{amb}=32^{\circ}C$; $k=1,037$)

Neste caso a potência máxima corrigida do motor do veículo ficou em $P_{m\acute{a}x}=61kW$ (82,8CV) na velocidade de 162km/h, tendo-se uma queda de potência de 20% em relação ao veículo utilizando gasolina com o mesclador de tecnil e uma queda de potência de 24,3% em relação ao veículo utilizando gasolina sem a instalação de nenhum mesclador. Notam-se maiores perdas de potência em relação à utilização do mesclador de alumínio devido aos fatores mencionados anteriormente, rugosidade superficial do tecnil e menor diâmetro interno. No próximo teste, manteve-se o mesclador de tecnil e através da válvula dosadora de vácuo aumentou-se a vazão de gás natural “enriqueceu-se a mistura”, Figura 10.24, mas vale lembrar que não se obtém ganhos significativos de potência enriquecendo-se a mistura, pois o fator λ para a máxima potência do combustível gás deve ser igual a 1, razão estequiométrica.

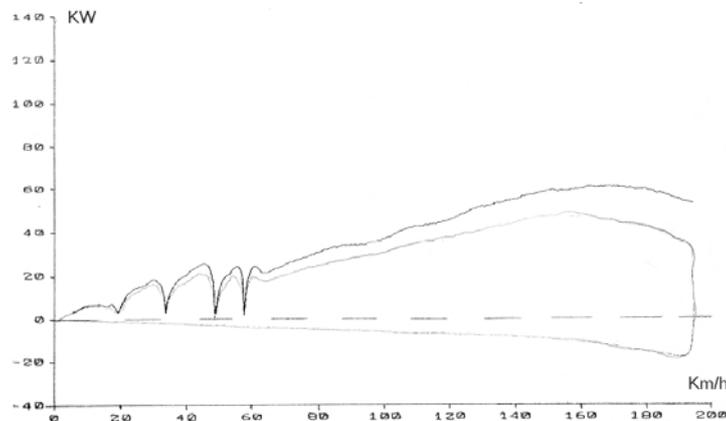


Figura 10.24 - Curva de potência máxima obtida no terceiro ensaio para o veículo Siena utilizando gás natural, mesclador de tecnil, e aumento da vazão de combustível. ($T_{amb}=32^{\circ}C$; $k=1,037$)

Neste caso a potência máxima corrigida do motor do veículo ficou em $P_{m\acute{a}x}=61,1\text{kW}$ (83CV) na velocidade de 163km/h. Pode-se dizer então que não se obteve ganho significativo de potência com a nova relação ar combustível. Sendo assim, no próximo teste, diminuiu-se a vazão de combustível gás através da válvula dosadora de vácuo de forma que pudesse ser estabelecido um comparativo.

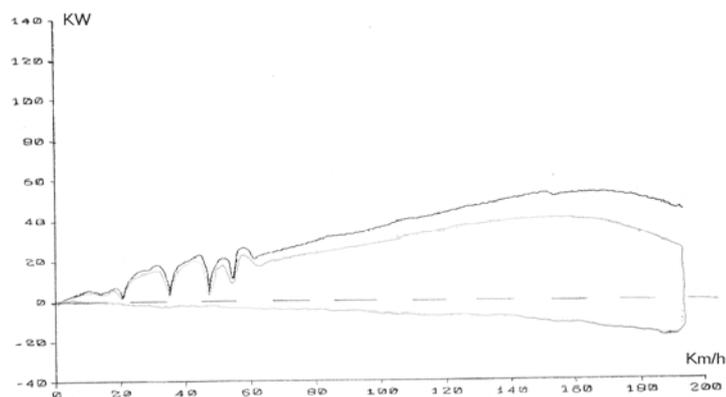


Figura 10.25 - Curva de potência máxima obtida no terceiro ensaio para o veículo Siena utilizando gás natural, mesclador de tecnil, e redução da vazão de combustível.

$$(T_{amb}=33^{\circ}\text{C};k=1,038)$$

Observou-se para este caso que a potência máxima corrigida do motor diminuiu mais ainda, ficando em $P_{m\acute{a}x}=53,7\text{kW}$ (72,9CV) na velocidade de 166km/h o que demonstra que este mesclador não gera a depressão necessária nos dutos responsáveis pela condução do gás, ou seja, necessita uma maior vazão de gás para promover uma alimentação próxima da estequiométrica. Pode-se dizer ainda que a regulagem utilizada no teste da Figura 10.23, (“sem enriquecimento ou empobrecimento da mistura”) é a que mais se aproxima da relação estequiométrica.

Os testes de potência máxima na roda do veículo, ao utilizar-se o mesclador de tecnil, apresentaram o mesmo fator de redução de potência de 2,3%, encontrado no teste de potência máxima do motor do veículo ao utilizar-se gás e mesclador de tecnil em relação à utilização de gás e mesclador de alumínio.

As emissões em regime de plena carga, com a utilização do mesclador de tecnil, podem ser visualizadas na Tabela 10.14.

Tabela 10.14 - Emissões do veículo Siena, terceiro ensaio, ao utilizar-se gás natural com mesclador de tecnil.

Gás Natural com Mesclador de Tecnil	CO [% vol]	CO₂ [% vol]	HC [ppm vol]	O₂ [% vol]	NO_x [ppm vol]
40 [km/h]	0,05	10,3	240	0,9	795
60 [km/h]	5,55	7,8	289	0,4	73
80 [km/h]	3,79	8,7	273	---*	190
100 [km/h]	4,51	8,3	246	---*	151
120 [km/h]	3,92	8,7	197	---*	204

* O traço inserido na tabela significa que o aparelho utilizado para realizar a medida não possui sensibilidade suficiente para detectar um percentual mínimo, próximo de zero.

Analisando-se de uma forma geral os dados, pode-se dizer que com a utilização do mesclador de tecnil emite-se valores semelhantes aos emitidos utilizando o mesclador de alumínio mas comparando-se os dados da Tabela 10.14 com os dados do gás na Tabela 10.13, nota-se redução nas emissões de CO em torno de 6,5% e aumento nas emissões de O₂ na ordem de 4% o que demonstra novamente que mesclador de tecnil ocasiona uma menor depressão nos dutos condutores de gás, ou seja, o veículo operou com menor vazão de gás combustível.

10.5. Resultados Obtidos com o Veículo FIAT Strada

Apresenta-se a seguir os ensaios de potência realizados no Laboratório de Motores da Petrobras do RS, com o veículo FIAT Strada equipado com o motor de 4 cilindros, 1500cm³ de cilindrada e 8Válvulas. Estes ensaios foram realizados com o objetivo de verificar a eficiência do equipamento variador de avanço de ignição (Ver Capítulo 7, Variador de Avanço), instalado na grande maioria dos veículos convertidos para o uso do gás, além da verificação de perdas decorrentes da conversão e do uso do gás natural como combustível. Para os ensaios realizados com o veículo Strada, considera-se a pressão atmosférica seca de $P_{atm}=99,7\text{kPa}$.

Na Figura 10.26 tem-se a curva de potência máxima do veículo, utilizando como combustível gasolina, sem a instalação do “kit” de GNV, ou seja, o veículo conservando as suas características originais.

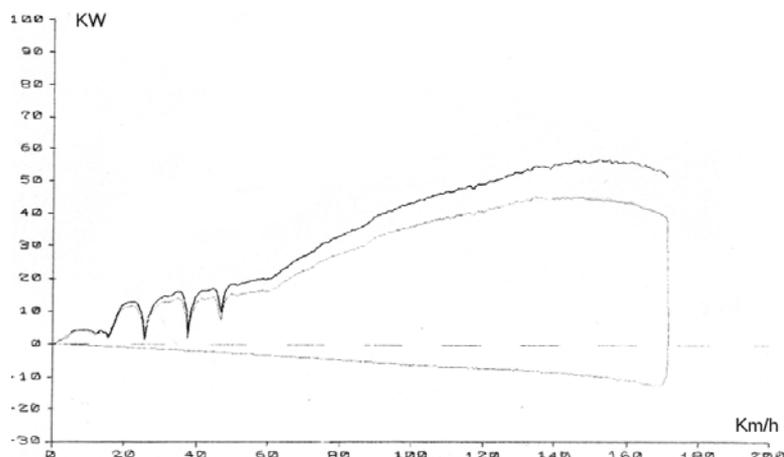


Figura 10.26 – Curva de potência máxima obtida com o veículo Strada utilizando como combustível gasolina, conservando-se as características originais do veículo.

$$(T_{\text{amb}}=30^{\circ}\text{C}; k=1,034)$$

Conforme a curva, pode-se dizer que a potência máxima corrigida do motor do veículo é $P_{\text{máx}}=57,1\text{kW}$ ($\approx 77,5\text{CV}$) na velocidade de $152,5\text{km/h}$, estando o veículo conforme o seu estado original e alimentado com gasolina.

Na Figura 10.27, apresenta-se um teste com o veículo equipado com um “kit” de GNV encontrado comercialmente, mas utilizando como combustível gasolina.

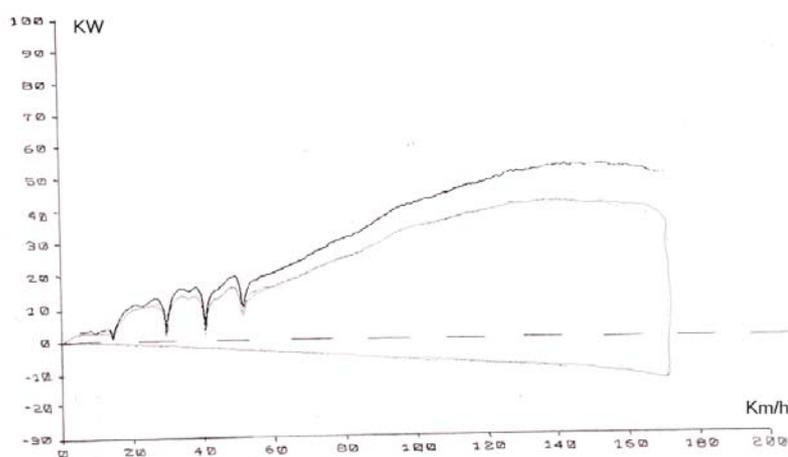


Figura 10.27 - Curva de potência máxima obtida com o veículo Strada utilizando como combustível gasolina, com a instalação do mesclador de GNV. ($T_{\text{amb}}=29^{\circ}\text{C}; k=1,032$)

Verifica-se que a potência máxima corrigida do motor do veículo alcançou valores

de $P_{\text{máx}}=53,4\text{kW}$ ($\approx 72,5\text{CV}$) na velocidade de $150,5\text{km/h}$. Sendo assim houve uma queda de potência de $3,7\text{kW}$ ($\approx 5\text{CV}$), ou seja, de $6,5\%$. Conforme comentado em testes anteriores, o principal fator para esta queda de potência está na restrição causada pela instalação do mesclador de gás no tubo de admissão de ar do motor do veículo e a conseqüente diminuição da eficiência volumétrica do motor.

A seguir apresenta-se o teste de potência máxima do motor do veículo, Figura 10.28, com o veículo utilizando gás natural como combustível e equipado com o equipamento variador de avanço de ignição. Vale citar que em todos os testes anteriores os veículos foram equipados com variador de avanço de ignição.

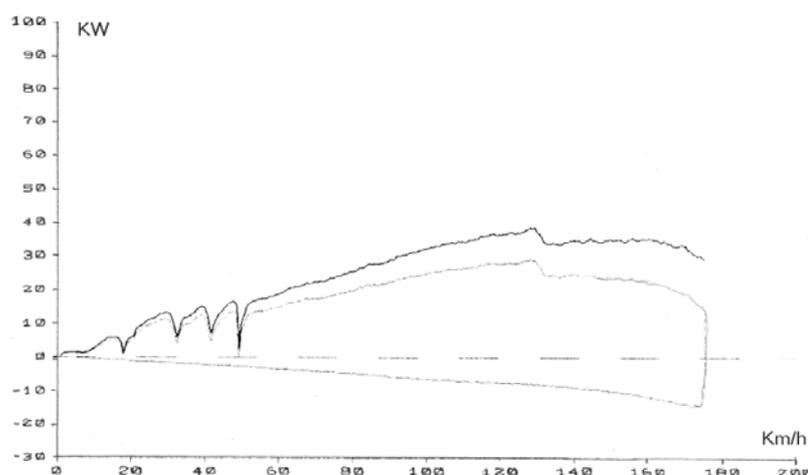


Figura 10.28 - Curva de potência máxima obtida com o veículo Strada utilizando como combustível gás natural e variador de avanço de ignição. ($T_{\text{amb}}=33^{\circ}\text{C}$; $k=1,038$)

Utilizando gás natural como combustível e estando equipado com variador de avanço de ignição, a potência máxima corrigida do motor do veículo ficou em $P_{\text{máx}}=39,5\text{kW}$ ($\approx 54\text{CV}$) na velocidade de 128km/h , ou seja, verifica-se uma queda de potência de $13,9\text{kW}$ ($\approx 18,8\text{CV}$), 26% em relação à utilização do combustível original gasolina estando o veículo equipado com o mesclador (“Kit” de conversão). Ao comparar a queda de potência em relação ao veículo utilizando gasolina sem o mesclador, (sem “Kit” de conversão), tem-se uma queda ainda maior, $17,6\text{kW}$ ($\approx 24\text{CV}$), ou seja, aproximadamente 31% , quedas de potência que podem ser atribuídas à utilização de um combustível gasoso e a restrição oferecida pela instalação do mesclador no tubo de admissão de ar do motor do veículo.

Além da queda de potência, verifica-se que a potência máxima alcançada neste caso a 128km/h não corresponde à mesma rotação do motor do teste anterior, $150,5\text{km/h}$, o que significa que a restrição causada pelo mesclador no tubo de admissão do ar causou modificações

nas características da curva de torque do motor, pelas mesmas razões comentadas no primeiro teste do veículo Maréa.

No próximo teste apresentado, Figura 10.29, retirou-se o variador de avanço de ignição instalado no veículo, com o objetivo de verificar a verdadeira eficácia deste elemento.

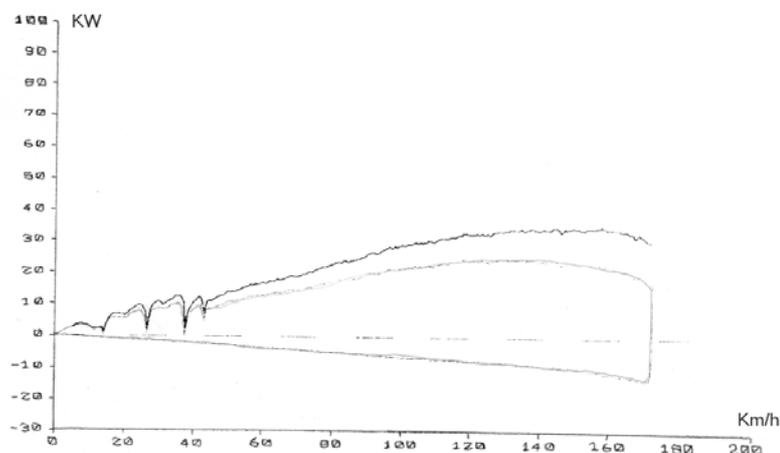


Figura 10.29 - Curva de potência máxima obtida com o veículo Strada utilizando como combustível gás natural sem variador de avanço de ignição. ($T_{amb}=30^{\circ}\text{C}$; $k=1,034$)

De acordo com a curva tem-se que a potência máxima corrigida do motor do veículo ficou em $P_{m\acute{a}x}=35,5\text{kW}$ ($\approx 48,2\text{CV}$) na velocidade de $157,5\text{km/h}$, ou seja, verifica-se uma queda de potência de 4kW ($\approx 5,5\text{CV}$) em relação ao veículo utilizando gás natural como combustível e variador de avanço de ignição. Conclui-se que a falta de instalação deste equipamento responsável pelo avanço do ponto de ignição do veículo propicia uma queda ainda maior de potência ao utilizar-se gás como combustível, neste caso 4kW , e recomenda-se a utilização deste equipamento para que se possa aproveitar a característica de menor velocidade de queima do gás em relação aos combustíveis líquidos aumentando o rendimento e a resposta do motor nas acelerações ao utilizar-se gás. Verifica-se ainda um deslocamento da velocidade em regime de máxima potência de 128km/h para $157,5\text{km/h}$, o que demonstra que o veículo sem o variador de avanço de ignição necessita um maior tempo para atingir o regime de máxima potência, devido a menor velocidade de queima do gás em relação aos combustíveis líquidos.

O dispositivo atua também, reduzindo a possibilidade de que o combustível venha a queimar-se nos coletores de admissão ou escapamento, causando danos, principalmente em carros equipados com coletores de admissão de materiais plásticos.

11. Fatores de Correção de Potência

O objetivo desta seção é definir fatores de correção para valores de potência não corrigida observada em alguns testes, segundo condições atmosféricas de referência para motores de combustão interna por centelha, conforme a norma NBR ISO 1585 (Código de Ensaio de Motores).

11.1. Condições Atmosféricas de Referência

As condições atmosféricas durante o ensaio devem estar dentro dos valores de temperatura ambiente de 288K ($14,85^\circ\text{C}$) $\leq T_{amb} \leq 308\text{K}$ ($34,85^\circ\text{C}$), sendo a temperatura de referência 298K (25°C). A pressão do ar seco de referência é de 99kPa e deve estar entre os valores de $80\text{kPa} \leq P_{atm} \leq 110\text{kPa}$. Estes parâmetros foram verificados em todos os testes realizados.

11.2. Definição do Fator k para Correção da Potência

O fator de correção, k , para motores de ignição por centelha deve ser calculado pela seguinte equação:

$$k = \left(\frac{99}{P_{atm}} \right)^{1,2} \cdot \left(\frac{T_{amb}}{298} \right)^{0,6} \quad (11.1)$$

onde: T_{amb} é a temperatura absoluta em Kelvins e P_{atm} é a pressão atmosférica seca, em quilopascals, isto é, a pressão barométrica total menos a pressão do vapor de água.

Esta equação se aplica a motores carburados e a outros motores onde o sistema de controle é projetado para manter uma relação combustível/ar aproximadamente constante nas mudanças das condições ambientais, e se aplica somente se $0,93 \leq k \leq 1,07$. Se estes limites forem excedidos, o valor obtido corrigido deve ser apresentado e as condições do ensaio (temperatura e pressão) precisamente declaradas no relatório de ensaio.

11.3. Definição da Potência de Referência (Corrigida)

A potência observada (não corrigida), deve ser multiplicada pelo fator k , obtido nas condições atmosféricas de referência especificadas, para que se obtenha a potência corrigida, ou seja:

$$P_{Corr} = k \cdot P_M \quad (11.2)$$

onde: P_{Corr} é a potência corrigida e P_M é a potência observada (não corrigida).

12. Conclusão

Com a análise dos testes realizados nos veículos bi-combustíveis, gás natural – gasolina, constatou-se como principal ponto problemático, a perda demasiada de potência de alguns veículos convertidos.

Neste trabalho foram feitos testes de desempenho e emissões em veículos de diversos fabricantes, sendo que os resultados mostraram perdas médias de potência entre 30% a 12,5% ao utilizar-se gás natural nos veículos equipados com “Kits” de conversão sem controle da relação estequiométrica, fator Lambda, e redução média de emissões de gases nocivos, CO e HC entre 42% e 35%, e 21% e 4,5% respectivamente em relação à utilização de gasolina. Quanto aos veículos equipados com “Kits” de conversão com controle eletrônico da relação estequiométrica, os resultados mostraram-se mais eficientes, registrando-se perdas médias de potência entre 17% a 13% ao utilizar-se gás natural, e redução média de emissões de gases nocivos, CO e HC entre 85% e 17%, e 55% e 20% respectivamente em relação à utilização de gasolina

Sendo assim os testes de potência mostraram que os “Kits” de conversão com controle eletrônico da relação estequiométrica, fator lambda, promovem menores perdas de potência (mantém o $\lambda \cong 1$) e menores emissões de gases tóxicos em relação aos “Kits” de conversão sem controle da relação estequiométrica, pois instalando um “Kit” sem controle da relação estequiométrica em um veículo com injeção eletrônica se está transformando um veículo com injeção multiponto, sonda de oxigênio, sensor de pressão barométrica e outros, em um carro a gás carburado, já que basicamente são instalados emulador de sonda de oxigênio e emulador de eletro-injetores para que não apareça código de erro no painel. Portanto, estando a central eletrônica original do carro “devidamente enganada”, o veículo passa a funcionar de forma carburada a gás sem “feed back”. Isto é muito preocupante, pois trabalhar em controle no estequiométrico é condição necessária para o catalisador ser eficiente.

Cabe ressaltar que praticamente todos os fornecedores de “Kits” têm versão para carros emissionados, onde a mistura é mantida no estequiométrico em todas as condições de uso através da dosagem de gás por um motor de passo controlado por uma central eletrônica ligada ao sensor de O₂. Estes “Kits” não são usados por serem bem mais caros e não ter uma imposição legal. Se os órgãos de fiscalização obrigassem a existência do controle de sonda no estequiométrico à situação seria resolvida

Foi constatado também que o modelo do mesclador influi decisivamente nas perdas

de potência, recomenda-se aos convertedores que optem por mescladores de diversos fabricantes, verificando o que melhor se adapta para cada tipo de veículo, cuidando também quanto à qualidade de outros componentes do “Kit” de conversão, como emulador do sensor de O₂ e variador de avanço, pois em muitos casos apresentados estes equipamentos acabam contribuindo com as perdas de potência.

Quanto ao combustível gás natural, conclui-se que o lambda para a máxima potência deve ser aproximadamente igual a 1,00, mistura estequiométrica.

Pode-se ainda propor técnicas de regulagem para “Kits” sem controle da relação estequiométrica, com o objetivo de reduzir as perdas de potência e a emissão de poluentes, como instalar o aparelho analisador de gases com fonte de 12 Volts no interior do veículo ao alcance visual do motorista, e em um teste de rodagem regular o veículo, em sua situação real e mais apropriada de funcionamento, ou instalar um PLM (Professional Lambda Meter), cujas fontes já são 12 Volts, efetuar um teste de rodagem verificando o fator Lambda e regulando a válvula dosadora de gás de forma que se tenha Lambda aproximadamente 1,00 para as situações reais de uso de cada veículo, pois a técnica de regulagem recomendada para as oficinas convertedoras é ineficiente, sendo recomendado regular o veículo com aparelho analisador de 4 ou 5 gases amostrando antes do catalisador com o veículo parado e a uma certa rotação onde ao se colocar carga no motor automaticamente tem-se a mistura enriquecida.

13.Referências Bibliográficas

- [1] Carriconde, E. P., 2000. “**Análise da Influência dos Pontos T10%, T50% e T90% Evaporados na Destilação ASTM D86 da Gasolina nas Performances Dinâmicas de Motores Ciclo Otto Equipados com Injeção Eletrônica Multiponto de Combustível**”, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- [2] Costa, M. A., 2001. “**CD de Conversão de Veículos ao Uso de Gás Metano Veicular**” Escola SENAI Conde José Vicente de Azevedo, Caxias do Sul, RS.
- [3] Cox, G.B. and DelVecchio, K.A., 2000. “**Development of a Direct-Injected Natural Gas Engine System for Heavy-Duty Vehicles**”, Caterpillar, Inc. Peoria, Illinois.
- [4] CTGÁS, 2000. “**Apostila de Gás Metano Veicular/Técnicas de Conversão – Mecânico Montador/Convertedor**”, Unidade de Negócios de Educação, Natal, RN.
- [5] Dallávia, D., 2001. “**Apostila do Curso de Especialização em Utilizações do Gás Natural –Gás Natural Veicular**”, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Sociedade de Engenharia do Rio Grande do Sul, Serviço Nacional de Aprendizado Industrial, Porto Alegre, RS.
- [6] Giacosa, D., 1953. “**Motori Endotermici**”, Ed. Ulrico Hoepli – 15 ed. Milano.
- [7] Heywood, J. B., 1988. “**Internal Combustion Engine Fundamentals**”, Ed. Mc Graw-Hill, Book Company, New York.
- [8] Lastres, L. F. M. “**Apostila de Utilização de Gás Natural em Motores Veiculares**”, Petrobrás, Cenpes, Diprod, Rio de Janeiro, RJ.
- [9] Machado E., 2002. “**Transformação de Motores Otto para Utilização do Gás Natural Veicular**”, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento e Engenharia Mecânica, Porto Alegre, RS.

-
- [10] NBR ISO 1585, 1986. “**Veículos Rodoviários – Código de Ensaio de Motores – Potência Líquida Efetiva**”, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [11] Pascoli, S. e Luzzati, T., 2001. “**Natural Gas, Cars and the Environment. A (relatively) ‘Clean’ and Cheap Fuel Looking for Users**”, Dipartimento di Scienze Economiche, Università di Pisa, Pisa, Italy.
- [12] Plint, M., A. & Martyr, A., 1997. “**Engine Testing Theory and Practice**”, Butterworth–Heinemann.
- [13] Podnar, D.J. and Kubesh, J.T., 2000. “**Development of the Next Generation Medium-Duty Natural Gas Engine**”, Southwest Research Institute, San Antonio, Texas.
- [14] Rech, C., 2002. “**Relação Ar/Combustível para a Máxima Potência Efetiva**”, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- [15] Silva, V.C., 2001. “**Gás Natural**”, Grupo de Estudos Térmicos e Energéticos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- [16] Szankowski, V., J., 1965. “**O Motor a Gasolina (com suplemento Diesel)**”, Ed. Industrial Teco Limitada, São Paulo, SP.
- [17] Taylor, C. F., 1988. “**Análise dos Motores de Combustão Interna**”, Volume 2, Ed. Edgard Blücher LTDA, São Paulo, SP.
- [18] Zaro, M. A. e Borchardt, I. G., 1982. “**Instrumentação – Guia de Aulas Práticas**”, Ed. da UFRGS, Porto Alegre, RS.
- [19] Yang, M. and Min, T.W., 1997. “**Compressed Natural Gas Vehicles: Motoring Towards a Cleaner Beijing**”, China North Vehicle Research Institute, Beijing, China.

[20] Wylen, G. J. Van, 1995. **“Fundamentos da Termodinâmica Clássica”**. Ed. Edgard Blücher LTDA, São Paulo, SP.

[21] Agência Nacional do Petróleo. **“Composição do Gás Natural”**. Disponível na Internet no site: <http://www.anp.gov.br/gas>, acessado em 13/08/2002.

[22] Gás para Uso Automotivo. **“LandiRenzo”**. Disponível na Internet no site: <http://www.landi.com.br/catalogo>, acessado em 08/04/2002.

[23] Mercado do Gás. **“Distribuidoras de Gás Natural”**. Disponível na Internet no site: <http://www.gasbrasil.com.br/mercado/gn/distribuidoras>, acessado em 17/05/2002.

14. Apêndices

14.1. Análise de Erros

Em resultados finais de trabalhos experimentais, existem erros provenientes de fatores que influenciam na precisão 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. [Zaro, M.A.; Borchardt, I.G., 1982]

Os sistemas de medição de torque e rotação, conforme descrito pela Norma NBR ISO 1585, devem ter exatidão de $\pm 1\%$ e $\pm 0,5\%$ respectivamente. A incerteza de medição está associada à exatidão do instrumento, normalmente expressa em valores percentuais de fundo de escala, especificados pelo fabricante.

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: [Zaro, M.A. e Borchardt, I.G., 1982]

$$\Delta R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} \cdot \Delta_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} \cdot \Delta_2 \right)^2 + \dots \right]^{\frac{1}{2}} \quad (14.1)$$

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

Como neste trabalho não se tem resultados dependentes de medições individuais, pois se obtém potência e emissões diretamente nos aparelhos utilizados (dinamômetro e analisador de gases), decidiu-se apenas explicitar as incertezas de medição destes equipamentos, sendo que a incerteza do resultado, consiste no conjunto de incertezas de outras variáveis independentes relacionadas com o resultado final.

O sistema de processamento de dados dos aparelhos utilizados determina a incerteza do resultado através da incerteza de cada variável independente.

O dinamômetro utilizado possui uma incerteza de $\pm 0,5\%$, estando dentro dos valores estabelecidos pela norma NBR ISO 1585. Quanto ao analisador de gases, o fabricante estipula a seguinte escala de medição, conforme o gás analisado.

- CO = 0 ÷ 99,9%Vol. (resolução 0,01);
- CO₂ = 0 ÷ 19,9%Vol. (resolução 0,1);
- HC = 0 ÷ 9999 ppmVol. (resolução 1);
- O₂ = 0 ÷ 4%Vol. (resolução 0,01) / O₂ = 4 ÷ 25,0% Vol. (resolução 0,1);
- NO_x = 0 ÷ 2000 ppmVol. (resolução 5);
- Lambda = 0,5 ÷ 2,000 (resolução 0,001).

Vale comentar ainda que o trabalho fundamenta-se em análises comparativas de medições de potência e emissões de vários veículos, sendo que todos os testes realizados possuem as mesmas ordens de grandeza para as imprecisões.

14.2. Abastecendo com GNV

Um Posto de Serviço para abastecimento de GNV é uma instalação que apresenta algumas peculiaridades que o diferem dos Postos de Serviço que comercializam combustíveis líquidos. Estas peculiaridades tornam estas instalações aparentemente mais complexas, como pode ser visto no esquema apresentado na Figura 14.1.

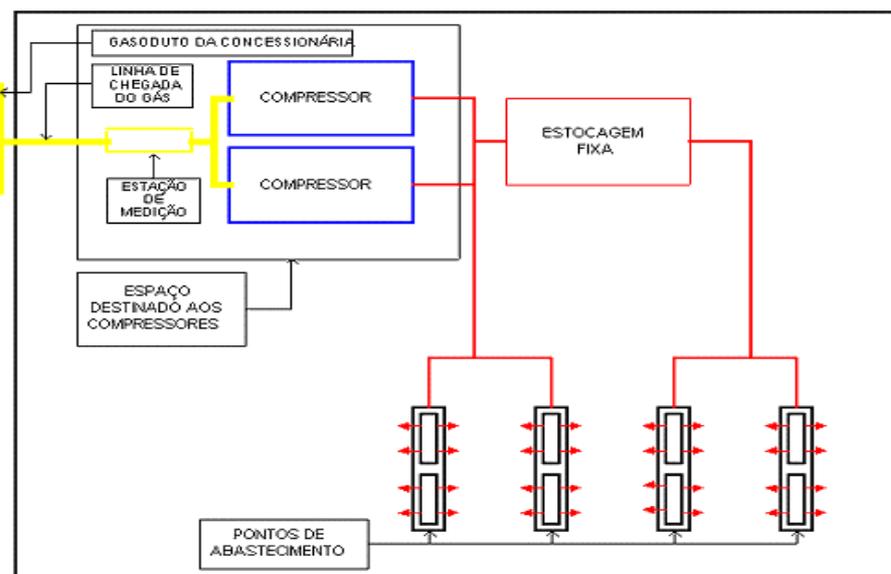


Figura 14.1- Esquema básico de um Posto de Serviço de GNV.

Esta figura apresenta apenas o grupo de equipamentos diretamente relacionado com o abastecimento de GNV. No caso de um Posto de Serviço dedicado ao abastecimento de GNV, estas serão as únicas instalações disponíveis, porém se já houver o serviço de abastecimento de combustíveis líquidos estas instalações serão adicionadas às já existentes.

O gás natural é fornecido pela empresa concessionária de gás canalizado que atende à região onde o Posto de Serviço será instalado. O produto é fornecido através de um gasoduto, como indicado na Figura 14.1. A linha de gás amarela representa uma linha de baixa pressão. O gás fornecido é medido na estação de medição antes de alimentar os compressores.

Depois de medido, o gás é comprimido nos compressores e atinge pressões da ordem de 220 atmosferas, estando pronto para ser disponibilizado nos Pontos de Abastecimento ou encaminhado para uma estocagem fixa, vulgarmente conhecida como "pulmão", que é composta de um conjunto de cilindros conectados entre si por tubulações e dimensionada para suportar as elevadas pressões do gás. A Figura 14.1 apresenta a linha do gás de alta pressão em vermelho.

Cada ponto de abastecimento, também denominado de "dispenser", funciona como se fosse uma bomba de combustível, semelhante a uma bomba de gasolina ou álcool hidratado. O ponto de abastecimento possui equipamento capaz de disponibilizar o produto em um sistema de abastecimento compatível com a válvula de abastecimento do veículo, além de totalizar o volume de GNV abastecido.

O projeto e construção de um posto de serviço para abastecimento de veículos movidos a GNV é, do ponto de vista técnico, um processo que deve ser baseado na norma NBR 12.236 - Critérios de Projeto, Montagem e Operação de Postos de Gás Combustível Comprimido da ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, datada de fevereiro de 1994.

Devido aos elevados valores envolvidos na aquisição de equipamentos e execução das obras e tendo em vista uma operação fácil e segura, tanto em postos novos, como principalmente na adaptação dos já existentes, deve-se proceder a um detalhado estudo de cada subdivisão do projeto para a otimização dos custos e operações envolvidas.

Sumariamente, pode-se dividir o projeto de um posto de serviço de GNV em:

- Arranjo físico dos componentes;
- Projeto de interligação com a concessionária de gás natural;
- Projeto de interligação com a concessionária de energia elétrica;
- Projeto de obras civis;
- Projeto da rede de tubulação de GNV;
- Projeto elétrico;
- Especificação do equipamento de compressão.

14.2.1. Equipamentos para o Abastecimento de GNV

O GNV, armazenado a alta pressão, deve ser abastecido nos veículos por meio de um dispositivo capaz de executar esta tarefa com rapidez e segurança. Estes dispositivos de abastecimento de GNV são normalmente conhecidos como "dispensers" para abastecimento de GNV.

Semelhantes a uma bomba para combustíveis líquidos, os "dispensers" são, na verdade, apenas dispositivos capazes de disponibilizar o GNV e medir o volume ou a massa abastecida.

Como pode ser visto na Figura 14.2, o "dispenser" é composto por um corpo, onde se encontram as unidades mecânicas e de medição do GNV abastecido, mangueiras flexíveis de alta resistência (na cor vermelha) que levam o GNV até a válvula de abastecimento no veículo.



Figura 14.2 - Um "dispenser" típico

Normalmente os "dispensers" são equipados com duas mangueiras de abastecimento, o que permite que se abasteça dois veículos por equipamento. Um Posto de Serviço característico possui um compressor e dois "dispensers", o que representa a possibilidade de abastecer quatro veículos de cada vez.

Existem alguns tipos de "dispensers" para abastecimento de GNV, comparando os tipos de medidores, tipo de abastecimento e as interfaces existentes para monitoramento do abastecimento, uma possível classificação pode ser a seguinte:

- a) Segundo a linha de abastecimento:
 - Sistema de linha Simples;
 - Sistema de linha Múltipla (utilizados quando usado abastecimento por cascata);
- b) Segundo o conjunto de mangueiras:
 - Mangueira Simples;
 - Mangueira Dupla;

c) Segundo a constituição operacional:

- Eletrônicos;
- Eletropneumáticos;

d) Segundo o tipo de medidor:

- Medidor de Turbina;
- Medidor por efeito de Coriolis;

14.2.2. Critérios de segurança e monitoramento para os equipamentos de abastecimento de GNV

Os "dispensers" para abastecimento de GNV devem possuir um conjunto mínimo de itens de segurança, normalmente encontrados nos equipamentos de transporte e distribuição de GNV. Estes equipamentos são pelo menos os seguintes:

- Pressostato de alta pressão: que libera o GNV caso haja excesso de pressão, evitando explosões;
- Válvula de excesso de fluxo: que interrompe o fluxo caso haja uma ruptura nas mangueiras ou tubulações;
- Válvula quick break away: também conhecida como válvula de corte rápido;

O monitoramento do funcionamento e da quantidade abastecida é uma necessidade cada vez maior nos "dispensers" utilizados nos Postos de Serviço modernos, onde a vazão de abastecimento é grande e a agilidade de abastecimento um diferencial de qualidade nos serviços. Existem várias interfaces para monitoramento do abastecimento, que também são comuns nas bombas de abastecimento de combustíveis líquidos, das quais se destacam alguns dispositivos:

- Conexão para sistema de computação para faturamento remoto;
- Interface de comunicação;
- Impressora de ticket;
- Manômetro externo para leitura da pressão de abastecimento;
- Indicação sonora e luminosa do fim de abastecimento;
- Encerrante totalizante e parcial.

14.2.3. Abastecimento de GNV com Semi-Reboque Feixe

Entende-se por semi-reboque feixe como um veículo do tipo semi-reboque, que pode ser acoplado a um caminhão trator. Este semi-reboque é equipado com um conjunto de cilindros de armazenamento de GNV. A Figura 14.3 apresenta um desenho esquemático de um semi-

reboque feixe.

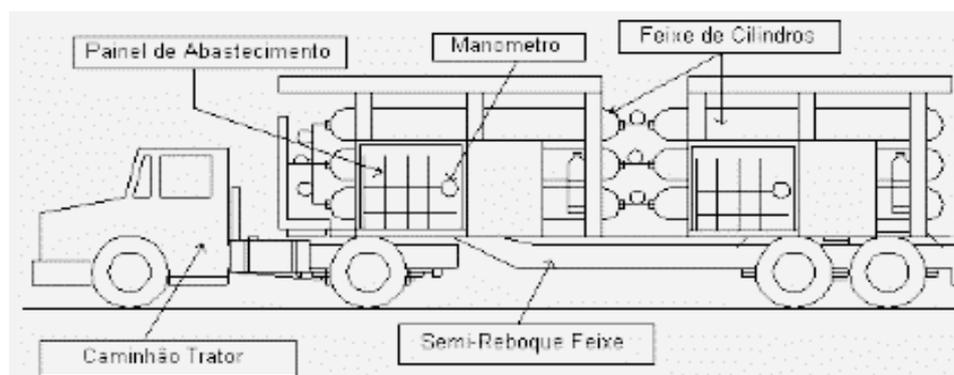


Figura 14.3 - Semi-reboque feixe e caminhão trator

Este dispositivo pode ser utilizado para criar pontos de abastecimento em regiões que não se dispõe de rede de gás natural e não existe a perspectiva de criar uma rede local, embora por motivo de força maior haja a necessidade de se estabelecer pontos de abastecimento. O uso de semi-reboque feixe se presta, por exemplo, para suprir uma necessidade emergencial de GNV em um ponto onde haverá uma ligação futura do produto, para suprir picos de demanda sazonais ou para utilização esporádica (por exemplo, realizar o "gas out" em um veículo recém convertido).

O uso do semi-reboque feixe para abastecimento de veículos com GNV ainda carece de melhor detalhamento, pois além deste transporte não ser regulamentado pela ANP-Agência Nacional de Petróleo, não existe normas que estabeleçam padrões mínimos de engenharia que garantam segurança e confiabilidade de sua aplicação para a população e ao usuário.

Como o uso deste dispositivo é uma opção em determinados casos, apresenta-se aí uma oportunidade para o desenvolvimento de normas e procedimentos para o projeto e construção de tais equipamentos. Há muito tempo foram desenvolvidos e executados projetos de semi-reboques feixe, como destaque pode-se citar os veículos da BR Distribuidora. Utilizados no início do programa de uso de GNV, no final da década de 80 e início da década de 90, estes equipamentos abasteciam a frota experimental de ônibus movidos a GNV da CMTC - Companhia Municipal de Transportes Coletivos em São Paulo. A Figura 14.4 ilustra este equipamento e a Figura 14.5 apresenta uma manobra de abastecimento de ônibus, observa-se o conjunto caminhão trator e semi-reboque feixe no canto direito.



Figura 14.4 - Semi-Reboque (Carreta) Feixe da BR Distribuidora



Figura 14.5 - Manobra de Abastecimento de Ônibus com Semi-Reboque Feixe

Estes semi-reboques foram construídos conforme projetos para transporte e operação de gases em alta pressão e normas de engenharia para transporte de cargas perigosas. Devem ainda obedecer às normas dos transportes rodoviários para produtos perigosos, dentre as quais destaca-se NBR 7500, NBR 8286; NBR 8285, NBR 9735, NBR 11457, NBR 12410, NBR 13095, NBR 12790, NB 1247, NBR 12236.

O abastecimento de veículos a GNV por meio de semi-reboque feixe deve obedecer às mesmas normas que regem o posto de gás natural automotivo, norma ABNT NBR - 12.236.

14.3. Não Conformidades na Utilização de GNV

Na Figura 14.6 e na Figura 14.7 pode-se observar os efeitos de um acidente ocorrido no momento do abastecimento de um veículo convertido para o uso do GNV.



Figura 14.6 - Vista lateral de um acidente no abastecimento de um veículo



Figura 14.7 - Vista frontal dos resultados de um acidente no abastecimento de um veículo

O fator que ocasionou o acidente foi à tentativa de aumento da autonomia do veículo pela instalação de um botijão de armazenamento de GLP (gás liquefeito de petróleo, “gás de cozinha”), em paralelo com o cilindro de armazenamento de GNV. Como a pressão de trabalho de um botijão de GLP é da ordem de 10Kgf/cm^2 , ao colocar-se pressão de aproximadamente 200Kgf/cm^2 , pressão de trabalho do GNV, a explosão foi inevitável.

Na Figura 14.8 pode-se observar o botijão de GLP após a explosão.



Figura 14.8 - Botijão de GLP após explosão devido ao uso de GNV em alta pressão

Na Figura 14.9 pode-se visualizar o interior do veículo e o perfeito estado de conservação do cilindro de armazenamento de GNV após a explosão, o que demonstra que o sistema é seguro quanto a ocorrência de acidentes



Figura 14.9 - Cilindro de armazenamento de GNV intacto após explosão do botijão

14.4. Constituintes dos Gases de Escape dos Motores e seus Possíveis Efeitos

⇒ N_2 – Nitrogênio. O produto que mais sai pela descarga dos carros é o nitrogênio. Ele já existe no ar que respiramos em um teor de 78% em volume. De forma similar com o que acontece quando respiramos, por ser gás inerte, ele praticamente passa direto pelo motor. Devido á elevada temperatura na câmara de combustão, uma quantidade muito pequena reage formando NO_x (óxidos de nitrogênio). Se uma pessoa respirar nitrogênio puro irá morrer por anóxia (falta de oxigênio).

⇒ CO_2 – Dióxido de Carbono. O segundo produto que mais sai pela descarga dos carros é o dióxido de carbono. Trata-se de um gás inodoro que está presente no ar que respiramos a um teor de cerca de 0,03%. Na descarga o seu teor é da ordem de 13%. O dióxido de carbono em teores de até 5% é bem tolerado, produzindo apenas um aumento na frequência e profundidade respiratória. No acontecimento improvável de que o CO_2 (que é mais pesado que o ar) possa se concentrar numa pequena parte de uma instalação, as pessoas podem apresentar ansiedade, seguida por vertigem, coma e, finalmente, morte quando o teor passar de 40%. O tratamento, em caso de exposição elevada, será apenas fornecer ar fresco. Estando os mecanismos respiratórios intactos, o corpo eliminará o excesso de CO_2 rapidamente.

Alguns números: Carro pequeno na cidade, 50km/dia produz 3300 litros de CO_2 ; Uma pessoa em respiração tranqüila produz 530 litros de CO_2 por dia.

⇒ CO – Monóxido de carbono. Trata-se de um gás tóxico, inodoro, incolor e mais leve que o ar. Nos veículos modernos aparece na descarga em teores baixos (menor que 0,5%). As intoxicações por CO ocorrem em ambientes fechados ou mal ventilados. O seu efeito tóxico ocorre quando, depois de inalado, se combina com a hemoglobina formando a carboxi-hemoglobina (COHb) que é incapaz de carregar o oxigênio para a célula, produzindo assim hipóxia tecidual. A afinidade do CO pela hemoglobina é 218 vezes maior que o oxigênio. Basta 0,5% de CO respirado para que 88% da Hb passe para COHb gerando intoxicação. A gravidade das lesões está relacionada ao grau e a duração da hipóxia, principalmente nos tecidos cerebrais e miocárdio. Os sintomas clínicos da intoxicação aguda são relacionados com a porcentagem de COHb no sangue conforme abaixo:

- 1% a 3% - Nenhum efeito observado (existe no sangue 0,5% a 0,8% de COHb);
- 3% a 8% - A atenção diminui (o fumante crônico de cigarros desenvolve 3% a 8% de COHb);
- 20% a 30% - Dores de cabeça frontais;
- 30% a 40%- Náuseas, vômitos, fraqueza, tonteira, diminuição da visão e possibilidade de colapso;
- 40% a 50% - Ataxia (“cambaleiar”), síncope (“desmaio”), colapso, taquicardia e taquipnéia (“aumento da frequência respiratória”);
- 50% a 60% - Coma ou convulsões intermitentes, respiração de Cheyne-Stokes (“respiração muito difícil, agonizante”);
- 60% a 70% - Coma se agrava, convulsões intermitentes, choque clínico;
- 70 a 80% Choque profundo e possível morte.

Em casos de exposições repentinas a altas concentrações, a morte pode ser rápida e provavelmente de origem cardíaca. Já os episódios repetidos de envenenamento agudo suave podem ocorrer sem efeitos cumulativos. Uma vez cessada a exposição e se o indivíduo receber ar fresco, o nível de COHb no sangue deverá voltar ao normal em menos de 3 horas. A recuperação clínica pode ocorrer após horas ou dias assim que o nível de COHb esteja normalizado. É comum o aparecimento de conseqüências neurológicas depois de dias ou semanas após a recuperação clínica.

⇒ NO_x – Óxidos de Nitrogênio. São resultantes da oxidação do nitrogênio do ar em altas temperaturas. No caso do NO_2 trata-se de um gás marrom-amarelado com cheiro de “alvejante”. Concentrações de 50ppm a 300ppm geram fraqueza progressiva, dispnéia (“falta de ar”), tosse e cianose, depois de 1 a 3 semanas após uma ou repetidas exposições. Concentrações maiores que 300ppm causam edema pulmonar fulminante ou broncopneumonia, cuja manifestação se dá após algumas horas ou dias. O impacto da exposição é função da concentração do gás quanto do tempo. Ratos, porquinhos-da-índia, coelhos e cães começam a morrer após uma hora de contínua exposição a concentrações de NO_2 entre 40ppm e 50ppm. A recuperação da reação inflamatória pulmonar pode requerer de 1 a 6 meses, e algumas mudanças enfisematosas podem persistir indefinidamente.

⇒ HC – Hidrocarbonetos. Chama-se de HC o combustível não queimado (ou parcialmente queimado) que está saindo pela descarga. São irritantes das vias respiratórias. Olefinicos e acetilenos são integrantes da reação “smog fotoquímico” que causa irritações dos olhos, nariz, garganta e pulmão, agravando doenças respiratórias. Alguns tipos de aromáticos são considerados cancerígenos e atacam o sistema nervoso. Da mesma forma que o CO a sua quantidade na descarga está pequena devido às tecnologias utilizadas.

14.5. Diagnóstico dos Gases de Escape dos Motores

14.5.1. Veículos sem catalisador (ou amostrado antes do catalisador)

a) **Teor de CO próximo ao teor de O_2** – Isto indica que a mistura está próxima do estequiométrico. O HC estará baixo (da ordem de 150ppm). Se o HC for muito maior será sintoma que existe passagem de óleo. No caso do CO_2 , estará próximo de seu valor máximo (da

ordem de 13,2% para gasolina (BR) e 12,2 para o álcool). Se o teor de CO₂ estiver muito abaixo do seu máximo (e os valores de CO e O₂ próximos) é indicativo que existe entrada de ar na descarga (diluindo os gases) ou que o aparelho necessita ser calibrado. Se o aparelho estiver OK, a conclusão será que o motor está com mistura rica (o O₂ existente é oriundo do ar que entra e os valores de CO e HC são maiores do que está sendo mostrado).

b) Teor de CO muito abaixo do teor de O₂ – Isto indica que a mistura deve estar pobre. É esperado que o HC esteja muito alto, e o CO₂ muito abaixo de seu máximo. Se o HC não estiver alto é indicativo que está entrando ar pela descarga (diluindo os gases). Neste caso não dá para afirmar que a mistura está pobre.

c) Teor de CO muito acima do teor de O₂ – Isto indica que a mistura deve estar rica. É esperado HC muito alto e CO₂ muito baixo.

d) Teor de O₂ alto com HC muitíssimo alto – Isto é indicativo de que está passando mistura sem queimar para a descarga. O CO ficará baixo bem como o CO₂ devido á diluição com mistura fresca (ar com HC). Causas comuns deste fato são falhas da ignição e válvulas “enforcadas” (a ausência de folga aumenta o “overlap” colocando mais mistura para a descarga).

14.5.2. Veículos com catalisador (ou amostrado após o catalisador)

Como é sabido o pote catalítico promove reações em seu interior. Por esse motivo à abordagem deve ser um pouco diferente, dando atenção especial ao CO₂. Estando motor e catalisador quentes e o sistema de descarga estanque, tem-se os seguintes casos:

a) Valor de CO₂ em seu valor máximo (13,2% para gasolina (BR) e 12,2% para álcool) – É indicativo que a mistura está no estequiométrico. São esperados CO e HC praticamente zero e O₂ muito baixo.

b) Valor de CO₂ muito baixo com O₂ alto – Isto é indicativo de que a mistura está pobre. Os valores de CO e HC serão praticamente zeros. Se o gás de descarga estiver sendo diluído com o ar também irão ocorrer esses valores. Por essa razão é importantíssimo checar o sistema quanto à entrada de ar.

c) Valor de CO₂ muito baixo com O₂ praticamente zero – Isto é indicativo de que a mistura está rica. O CO e HC poderão estar momentaneamente baixos ou não, dependendo se está sendo consumido oxigênio armazenado no catalisador (formação de óxidos metálicos nos transientes pobres). Com o passar do tempo, os valores de CO e HC tenderão a ficar altos.

14.5.3. Veículos de Competição (sem catalisador)

O diferencial importante em veículos de competição é o uso de comandos de válvulas especiais com maior duração “lift” e “overlap”. O grande “overlap” (cruzamento de válvulas) faz com que fique a descarga muito diluída com mistura fresca (ar com HC). Isto faz com que o CO₂ nunca atinja o seu valor máximo teórico, o HC fique altíssimo (cerca de 1000 a 3000ppm dependendo do comando) e o O₂ alto.

O diagnóstico se baseia no CO, CO₂ e HC aliada à experiência do técnico naquela configuração de motor. Basicamente deve ser determinado experimentalmente o valor de máximo CO₂ ($\lambda=1$) o qual será menor que o teórico. Têm-se os seguintes casos:

a) **CO₂ menor que o máximo prático daquela configuração, HC muitíssimo mais alto (estourada escala) e CO baixo** - Isto é indicativo de falha de ignição. É esperado O₂ alto devido adicional diluição dos gases com mistura fresca, (ar com HC).

b) **CO₂ menor que o máximo prático daquela configuração, HC muitíssimo alto (sem estourar escala) e CO praticamente zero** – Isto é indicativo de mistura muito pobre, é esperado O₂ alto.

c) **CO₂ menor que o máximo prático daquela configuração, HC muitíssimo alto (sem estourar escala) e CO alto** – Isto é indicativo de mistura muito rica, é esperado O₂ baixo, mas nunca zero (devido ao comando com muito “overlap”).

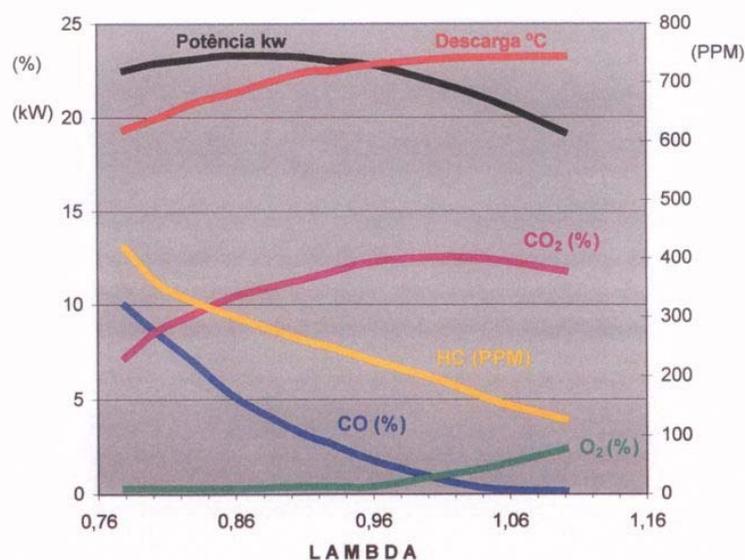


Figura 14.10 - Dados experimentais de motor 1000cm³ a 3800RPM e carga total

Fonte: Dallávia, D., 2001.