



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



Boniek Evangelista Leite

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO RENDIMENTO
GLOBAL OBTIDO PARA UM MOTOR COM
SISTEMA TETRAFUEL OPERANDO COM
DIFERENTES COMBUSTÍVEIS**

CAMPINA GRANDE / PB

2012

Boniek Evangelista Leite

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO RENDIMENTO
GLOBAL OBTIDO PARA UM MOTOR COM
SISTEMA TETRAFUEL OPERANDO COM
DIFERENTES COMBUSTÍVEIS

Este trabalho corresponde à dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

ORIENTADOR: **Prof. Dr. Marcelo Bezerra Grilo**

CAMPINA GRANDE / PB

2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

L536a Leite, Boniek Evangelista
Análise experimental do rendimento global obtido para um motor com sistema tetrafuel operando com diferentes combustíveis / Boniek Evangelista Leite. - Campina Grande, 2012.
121f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia.
Orientador: Prof. Dr. Marcelo Bezerra Grilo.
Referências.

1. Rendimento Global. 2. Motor Tetrafuel. 3. Multicombustível. I. Título.

CDU 621.01 (043)

DEDICATÓRIA

A minha família

Dedico a Deus por ter me abençoado com minha maravilhosa família, em especial a minha mãe, Jailza Evangelista, que sempre me apoiou nos momentos mais difíceis.

Aos meus irmãos Rhafael e Larissa, e minha noiva Maria Enacarla, pelo incentivo.

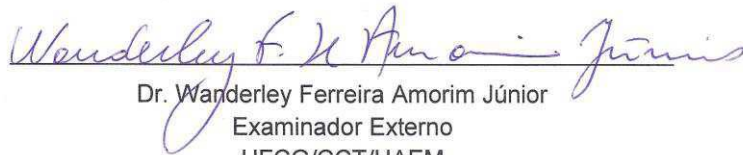
ANÁLISE EXPERIMENTAL DO REDIMENTO GLOBAL OBTIDO PARA UM
MOTOR COM SISTEMA TETRAFUEL OPERANDO COM DIFERENTES
COMBUSTÍVEIS

Boniek Evangelista Leite

Dissertação Aprovada em 29/02/2012 pela banca examinadora constituída dos
seguintes membros:



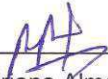
Dr. Marcelo Bezerra Grilo
Orientador
UFCG/CCT/PPGEM/UAEM



Dr. Wanderley Ferreira Amorim Júnior
Examinador Externo
UFCG/CCT/UAEM



Dr. Yoge Jerônimo Ramos da Costa
Examinador Interno
UFCG/CCT/PPGEM/UAEM



Dra. Adriana Almeida Cutrim
Examinadora Externa
UFCG/CCT/UAEM



Dr. Antonio Augusto Pereira de Sousa
Examinador Externo
UEPB/CCT/DQ

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e saúde na realização das atividades.

A minha família, pelo apoio durante a execução do trabalho.

Aos professores Marcelo Bezerra Grilo e Wanderley Ferreira de Amorim Júnior pela orientação e paciência.

Ao CTGAS-ER, pelo apoio na realização dos ensaios, em especial ao Dimas Alves Ferreira e todos os técnicos que contribuíram para realização dessa dissertação.

Ao PPGEM-UFMG, pela oportunidade de realizar esse trabalho.

A CAPES pelo fomento à pesquisa.

Resumo

O Brasil consolida-se como um dos principais mercados consumidores de automóveis do mundo, com uma produção interna de mais de 3,3 milhões de veículos por ano. Os combustíveis do setor automobilístico são tradicionalmente derivados de petróleo. A partir desse cenário de dependência de combustíveis fósseis, a indústria e o mercado consumidor têm procurado alternativas energéticas para substituição desses combustíveis derivados de petróleo. Seguindo a tendência de diversificar a matriz energética, os veículos flexfuel se apresentam como uma alternativa viável. Para uma utilização mais racional de cada energético é importante realizar a análise comparativa do rendimento global, obtido por cada energético em um motor ciclo Otto com sistema tetrafuel, operando com quatro diferentes combustíveis comerciais disponíveis no mercado nacional. Os testes experimentais foram realizados em um Fiat Siena 1.4 tetrafuel de fábrica, operando com os seguintes combustíveis: gasolina C, etanol, GNV e mistura de 50% em volume de etanol com 50% de gasolina C. Para a obtenção das curvas características do motor, operando separadamente com cada combustível, foi utilizado o dinamômetro de chassi do laboratório automotivo do Centro de Tecnologia do Gás e Energias Renováveis em Natal-RN. São analisados, comparativamente, os resultados obtidos para cada combustível em relação a cada propriedade medida. Os resultados dos ensaios indicaram que o etanol apresentou o melhor rendimento global entre os combustíveis testados.

Palavras-chave: Rendimento global, Motor tetrafuel, Multicombustível.

ABSTRACT

Brazil has established as one of the main automobilistic consumer markets of the world with a internal production lager than 3 million vehicles per year. The fuels in the automotive sector are traditionally derived from petroleum. From this scenario of dependence on fossil fuels, the industry and the consumer market have sought alternative energy sources to substitutes these petroleum derived fuels. Following the trend of diversifying the energetic matrix, flexfuel vehicles are presented as a viable alternative. For a more intelligent use of each energy source it is important to perform a comparative analysis of the global performance obtained for each energy source into a Otto cycle engine with Tetrafuel system, operating with four different commercially available fuels in the national market. Experimental tests were performed on standard a Fiat Siena 1.4 Tetrafuel, operating with the following fuels: C gasoline, ethanol, natural gas and a mixture of 50% by volume of ethanol with 50% of C gasoline. To obtain the characteristic curves of the engine operating separately with each fuel, it was used the chassis dynamometer from the automotive laboratory of the Center of Gas Technology and Renewable Energies in Natal-RN. The obtained results, for each fuel, were comparative analyzed for each measured property. The essays results indicated that the ethanol presented the best global performance among the tested fuels.

Keywords: Global Performance, Tetrafuel Engine, Flexfuel

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.	Motor Otto silencioso.....	23
Figura 2.	Primeira motocicleta.....	24
Figura 3.	Ford modelo T flex.....	26
Figura 4.	O primeiro carro flexfuel nacional VW Gol total flex.....	27
Figura 5.	Sistema flex start.....	28
Figura 6.	Fiat siena tetrafuel testado.....	29
Figura 7.	Kit GNV de segunda geração.....	32
Figura 8.	Kit GNV de terceira geração.....	33
Figura 9.	Kit GNV de quarta geração.....	34
Figura 10.	Kit GNV de quinta geração.....	35
Figura 11.	Esquema de funcionamento do sistema tetrafuel.....	36
Figura 12.	Componentes do sistema tetrafuel.....	36
Figura 13.	Curvas características.....	37
Figura 14.	Curva de potência x rpm.....	40
Figura 15.	Binário de forças.....	41
Figura 16.	Curva de toque x rpm.....	42
Figura 17.	Curva de consumo específico de combustível x rpm.....	43
Figura 18.	Diagrama de rendimentos dos motores de combustão.....	44
Figura 19.	Gráfico torque x rpm vs pressão média efetiva.....	46

Figura 20.	Gráfico eficiência térmica x rpm.....	47
Figura 21.	Disposição dos equipamentos de ensaio.....	54
Figura 22.	Dinamômetro de chassis modelo FLA 203 do fabricante BOSCH.....	55
Figura 23.	Manômetro de pressão e esquema de montagem.....	56
Figura 24.	Tanque e bomba externa de combustível.....	57
Figura 25.	Cilindro de gás natural veicular em material compósito e alumínio.....	58
Figura 26.	Balança de precisão digital.....	59
Figura 27.	Sistema de ventilação forçada.....	60
Figura 28.	Sistema de exaustão do laboratório automotivo do CTGAS-ER.....	61
Figura 29.	Adaptador interligado ao sistema de exaustão do laboratório automotivo do CTGAS-ER.....	62
Figura 30.	Fiat siena tetrafuel.....	63
Figura 31.	Painel de instrumentos do siena tetrafuel.....	65
Figura 32.	Fluxograma de funcionamento do sistema tetrafuel do siena.....	67
Figura 33.	Gráfico da potência efetiva da gasolina x rpm.....	80
Figura 34.	Gráfico da potência efetiva do etanol x rpm.....	80
Figura 35.	Gráfico da potência efetiva do GNV x rpm.....	81
Figura 36.	Gráfico da potência efetiva mistura 50% etanol com gasolina x rpm.....	82
Figura 37.	Gráfico da potência efetiva em função da rpm de todos os combustíveis.....	83
Figura 38.	Gráfico do consumo específico de combustível para gasolina C x rpm...90	

Figura 39.	Gráfico do consumo específico de combustível para o etanol x rpm.....	90
Figura 40.	Gráfico do consumo específico de combustível para o GNV x rpm.....	91
Figura 41.	Gráfico do consumo específico de comb. para mistura de 50% x rpm....	92
Figura 42.	Gráfico do consumo específico de combustível pesquisados x rpm.....	93
Figura 43.	Gráfico do torque da gasolina C em função da rpm.....	95
Figura 44.	Gráfico do torque do etanol em função da rpm.....	95
Figura 45.	Gráfico do torque do GNV em função da rpm.....	96
Figura 46.	Gráfico do torque da mistura 50% em função da rpm.....	97
Figura 47.	Gráfico do torque em função da rpm para os combustíveis usados.....	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Volkswagen no 14° <i>Ethanol Summit</i>	29
Tabela 2.	Características dos combustíveis analisados.....	53
Tabela 3.	Informações técnicas do Fiat Siena tetrafuel.....	64
Tabela 4.	Parâmetros de entrada do software do dinamômetro.....	70
Tabela 5.	Consumo horário de combustível.....	71
Tabela 6.	Torque em função da rpm.....	73
Tabela 7.	Rendimento global para cada combustível testado.....	74
Tabela 8.	Potência máxima teórica.....	76
Tabela 9.	Potência máxima efetiva obtida.....	78
Tabela 10.	Variação de potência efetiva em relação à gasolina C.....	83
Tabela 11.	Consumo horário para cada combustível em função da rpm.....	88
Tabela 12.	Rendimento global do motor obtido.....	98
Tabela 13.	Comparativo entre todos os combustíveis testados.....	99

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACOES

AEAC	Álcool Etílico Anidro Carburante
AEHC	Álcool Etílico Hidratado Carburante
ANFAVEA	Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
BHP	<i>Brake Horsepower</i>
CCT	Centro de Ciências e Tecnologia
CO	Monóxido de Carbono
CO₂	Dióxido de Carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CSE	Consumo Específico de Combustível
CTGAS-ER	Centro de Tecnologia do Gás Natural e Energias Renováveis
FENABRAVE	Federação Nacional dos Distribuidores de Veículos Automotores
FHP	<i>Friction Horsepower</i>
FIRE	<i>Fully Integrated Robotized Engine</i>
GNV	Gás Natural Veicular
HC	Hidrocarbonetos não queimados
HEGO	<i>Heated Exhaust Gas Oxygen</i>
INPM	Instituto Nacional de Pesos e Medidas
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Rec. Nat. Renováveis

ICE	Ignição por Centelha
IHP	<i>Indicated Horsepower</i>
LEMT	Laboratório Experimental de Máquinas Térmicas
MCI	Motores de Combustão Interna
MON	<i>Motor Octane Number</i>
ODBI	<i>On Board Diagnostics II</i>
PME	Pressão Média Efetiva
PROALCOOL	Programa Nacional do Álcool
PROCONVE	Programa de Controle Poluição do Ar por Veículos Automotores
RAC	Relação Ar Combustível
ROM	<i>Research Octane Number</i>
SI	Sistema Internacional
UAEM	Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica
UCE	Unidade de Comando Eletrônico
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	Justificativa.....	19
1.2	Objetivos.....	19
1.2.1	Geral.....	19
1.2.2	Específicos.....	20

CAPÍTULO II

2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	22
2.1	Motores de Combustão Interna.....	22
2.2	Tecnologia Flexfuel.....	25
2.3	Sistema GNV.....	30
2.4	Curvas Características dos Motores de Combustão Interna.....	37
2.4.1	Potência.....	38
2.4.2	Torque.....	40
2.4.3	Consumo Específico de Combustível.....	42
2.4.4	Rendimentos dos Motores Térmicos.....	43
2.5	Estado da Arte (motores com sistema flexfuel e GNV).....	45

CAPÍTULO III

3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	52
3.1	Materiais.....	52
3.1.1	Tipos de Combustíveis.....	52
3.2	Bancada Dinamométrica Experimental.....	53
3.3	Veículo Usado nos Ensaios.....	62
3.3.1	Programação do Sistema de Alimentação de Combustível Tetrafuel do Veículo...	65
3.4	Metodologia dos Ensaios Realizados.....	68
3.4.1	Ensaio de Potência Máxima do Motor.....	68

3.4.1.1	Execução do Ensaio de Potência Máxima do Motor.....	70
3.4.2	Ensaio de Consumo Específico de Combustível.....	71
3.4.3	Cálculo do Consumo Específico de Combustível.....	72
3.4.4	Cálculo do Torque do Motor.....	73
3.4.5	Rendimento global do Motor.....	74

CAPÍTULO IV

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	76
4.1	Resultados dos Ensaio de Potência do Motor.....	76
4.1.1	Resultados do Cálculo de Potência máxima Teórica.....	76
4.1.2	Resultados dos Ensaio de Potência Efetiva Máxima.....	78
4.1.3	Determinação da Curva de Potência Efetiva do Motor.....	79
4.2	Resultados dos Ensaio de Consumo de Combustível.....	88
4.2.1	Resultado do Consumo Horário de Combustível.....	88
4.2.2	Resultado do Consumo Específico de Combustível.....	89
4.3	Resultados do Cálculo do Torque do Motor.....	94
4.4	Resultados do Cálculo do Rendimento Termomecânico do Motor.....	99

CAPÍTULO V

5	CONCLUSÕES.....	102
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	104
	REFERÊNCIAS.....	106
	ANEXOS.....	110
	ANEXO A.....	111
	ANEXO B.....	113
	ANEXO C.....	115
	APÊNDICES.....	117
	APÊNDICE A.....	118
	APÊNDICE B.....	120
	APÊNDICE C.....	121

Capítulo I

Introdução

1. Introdução

O Brasil consolida-se como um dos maiores produtores mundiais de automóveis, com uma produção de 3,3 milhões de veículos por ano (FENABRAVE, 2010), ficando na quarta posição mundial no ano de 2010 e com elevado potencial de crescimento em volume de produção.

O mercado consumidor tem preferido veículos com maior rendimento e por consequência com menor consumo de combustível, pelo fato das vendas de automóveis no Brasil serem concentradas em veículos com motorização de 1.0 a 1.6 litro (FENABRAVE, 2010), devido os combustíveis sofrerem aumento de seus preços constantemente. Outro fator de grande importância dado pelos consumidores são os efeitos nocivos ao meio ambiente causados pelas emissões dos automóveis.

Os combustíveis do setor automotivo, tradicionalmente, são derivados de petróleo, logo sua demanda de consumo é sempre alta o que força sempre um aumento de preço, com isso, há sempre o interesse em fontes de combustíveis alternativos ao petróleo. Quando os preços dos derivados de petróleo se elevam, as empresas tentam utilizar outros energéticos. O primeiro e segundo choques de petróleo, em 1973 e 1979, mostraram claramente isto.

No Brasil, os combustíveis renováveis se mostram como solução para substituição dos combustíveis fósseis, dado o grande potencial produtivo do país. Neste contexto, o etanol é o principal combustível renovável em produção e, recentemente, o biodiesel vem assumindo importância neste cenário (BURGER *et al*, 2007).

O Brasil, em 1975, começou um programa para utilização de etanol hidratado em substituição a gasolina, o Programa Nacional do Alcool (PROALCOOL). Com isso, conseguiu diminuir a evasão de divisas, resultante da importação de petróleo estrangeiro. Além disso, resolveu misturar etanol anidro na gasolina em um percentual variando de 18 a 25%, para substituir o composto chumbo tetraetila, que era usado para manter a octanagem da gasolina elevada. Outro benefício em eliminar o composto

contendo chumbo da nossa gasolina foi melhorar a qualidade do ar, pois o chumbo é muito tóxico.

Em geral, as vantagens técnicas em utilizar o etanol nos motores do ciclo Otto em relação a gasolina são a maior potência e torque, menor carbonização do motor e menor emissão de poluentes decorrente de uma queima mais limpa do etanol. A principal desvantagem do etanol em relação a gasolina é o maior consumo volumétrico e a variação do preço em razão da sazonalidade da safra da cana de açúcar.

Na década de 80, foi introduzido o gás natural veicular (GNV) como combustível alternativo para táxis e frotas de empresas nos grandes centros urbanos do país, pois o custo por quilômetro rodado é bem inferior ao do veículo utilizando gasolina ou etanol.

O GNV começou a ser utilizado em veículos particulares na década de 1990. Também, devido ao custo por quilômetro rodado, é bem inferior ao do mesmo veículo utilizando combustíveis líquidos. No caso da utilização do GNV, o veículo trabalha de forma bicombustível, utilizando 2 combustíveis armazenados em tanques separados para alimentar o motor do veículo. Para fazer a escolha do combustível a ser utilizado na condução do automóvel é usada uma chave comutadora, na qual é escolhido o combustível líquido ou gasoso. A principal desvantagem em utilizar o gás natural é o aumento da massa do veículo, devido ao kit de adaptação do GNV e também à perda de desempenho do motor por causa da baixa tecnologia do kit GNV.

A partir da década de 1990 a 2000, acompanhando a queda dos preços do petróleo, a indústria automobilística voltou a investir na atualização tecnológica dos veículos a gasolina, fato que resultou na redução da vantagem energética relativa dos veículos a etanol (NIGRO *et. al.*, 2009).

Com isso, a demanda por veículos a etanol diminuiu, e os automóveis a gasolina voltaram a ser preferidos dos consumidores. É nesse contexto que a demanda por etanol diminuiu e os preços do etanol também caíram.

Paralelamente, em 1990, começaram no Brasil os primeiros estudos com veículos flexfuel que, após passarem por um processo de evolução, foram lançados no mercado em 2003 (NIGRO *et. al.*, 2009).

A tecnologia dos motores flexfuel veio dar novo fôlego ao consumo interno de etanol. O carro que pode ser movido à gasolina, álcool ou uma mistura dos dois combustíveis foi introduzido no país em março de 2003, e conquistou rapidamente o consumidor (BIODIESELBR, 2010).

Mesmo não privilegiando o etanol, a tecnologia flexfuel teve aceitação do consumidor. Dados mostram que, atualmente, de cada 100 veículos leves comercializados no Brasil, 88 utilizam a tecnologia flexfuel (SZWARC, 2009).

Em paralelo com a evolução dos sistemas de alimentação para combustíveis líquidos, os kits de GNV também passaram por um processo evolutivo ao longo dos anos, de modo a aperfeiçoar o desempenho do veículo, logo chegando a um nível tecnológico semelhante aos dos combustíveis líquidos.

1.1 Justificativa

Com a popularização da tecnologia flexfuel os consumidores passaram a exigir veículos que funcionem com mais de um combustível. Logo, a fusão dos kits GNV com o sistema de alimentação de combustíveis líquidos fez com que aparecessem veículos com a capacidade de funcionar com 3 ou até 4 combustíveis (gasolina sem etanol, gasolina C, etanol e GNV) diferentes em um mesmo motor. Com isso, é importante para a indústria, como também para a sociedade, estudar o rendimento do motor do veículo tetrafuel, utilizando combustíveis comerciais e comparando tecnicamente cada combustível utilizado.

1.2 Objetivos

1.2.1 Geral

- Testar experimentalmente o uso de quatro combustíveis; gasolina C, etanol, mistura de 50% etanol com 50% de gasolina C e gás natural veicular no motor de um Fiat Siena tetrafuel 1.4 de fábrica. A partir dos resultados obtidos com

cada combustível, calcular o rendimento global e analisar, comparativamente, o comportamento de cada energético.

1.2.2 Específicos

- Desenvolver uma metodologia para realização dos ensaios experimentais no veículo Fiat Siena tetrafuel testado;
- Adquirir no comércio e caracterizar, quanto as suas características básicas, os combustíveis a serem testados, no caso, gasolina C, etanol e gás natural veicular e formular uma mistura de 50% etanol com 50% de gasolina C;
- A partir dos testes experimentais realizados com cada combustível, separadamente, construir suas respectivas curvas características (curvas de potência efetiva, torque e consumo específico de combustível);
- Analisar, comparativamente, os resultados do rendimento global obtido para cada ensaio, mostrando as vantagens e desvantagens do uso de cada combustível.

Capítulo II
Fundamentação Teórica

2. Fundamentação Teórica

2.1 Motores de Combustão Interna

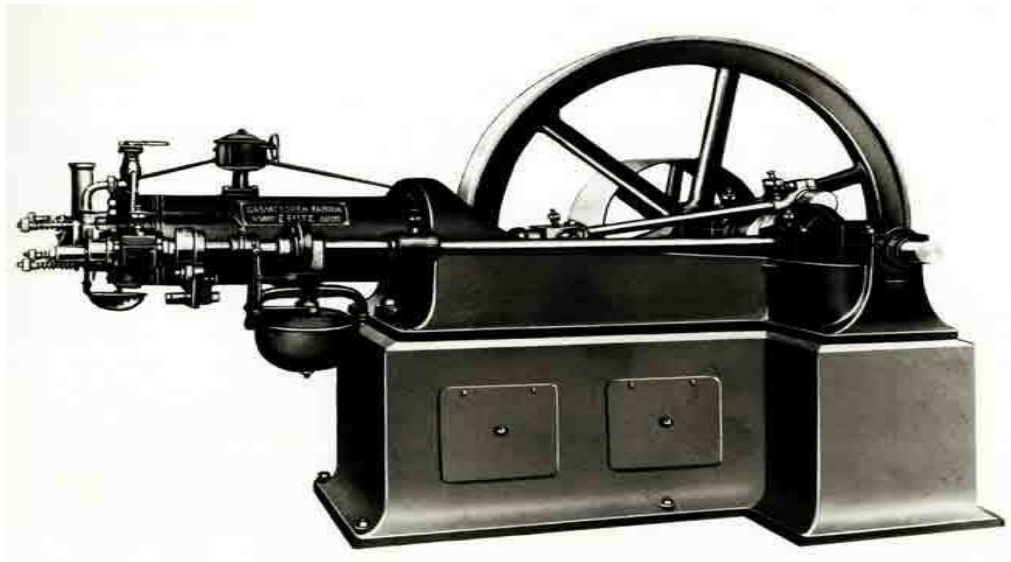
Os motores de combustão interna (MCI) são dispositivos que tem a finalidade de transformar calor em trabalho mecânico. Nos MCI os produtos da combustão são os próprios executores do trabalho, com isso, os motores térmicos são uma das máquinas motrizes mais leves existentes, justificando seu emprego nos meios de transportes (OBERT, 1971).

Em 1860, J. J. E Lenoir, inventor francês, desenvolveu o primeiro motor de combustão interna comercial. Uma mistura de gás de iluminação e ar era introduzida no cilindro durante a primeira metade do curso do pistão. A seguir, era provocada a ignição da mistura através de uma centelha, produzindo potência somente durante a segunda metade do curso. Esse motor desenvolveu, na ocasião, rendimento próximo a 5% (HEYWOOD, 1988).

Em 1862, o francês Beau de Rochas, na concepção do ciclo de quatro cursos, que leva seu nome, observou “pode-se levar a compressão dos motores até 5,5 ou 5,6 atm. Pode-se levar até mesmo, até o ponto de ignição...” (MACHADO, 2003). Logo, a variável razão de compressão é um importante parâmetro para melhora do rendimento do motor de combustão interna.

Nikolaus August Otto, em 1876, alemão, sócio de uma fábrica de motores a gás, foi quem construiu depois de ter inventado, independentemente, o mesmo ciclo, descrito por Beau de Rochas, o motor que foi chamado de Otto silencioso. É interessante saber que Otto conheceu o projeto e o motor de Lenoir, construindo primeiro um motor semelhante. Após esse experimento, Otto conseguiu formar uma opinião e solidificar seus conhecimentos para, somente em 1878, apresentar seu motor na Feira Internacional de Paris (VARELLA, 2010), mostrado na Figura 1.

Figura 1. Motor Otto silencioso.



Fonte: <http://www.museudantu.org.br/Tecnologica/otto.jpg>, (2011)

O experimento de Otto foi o seguinte: movimentou o pistão manualmente até onde pode. Esse movimento do pistão resultou na compressão da mistura ar-combustível no cilindro. Feito isso, ligou a ignição e ocorreu a explosão, seguida de rápidas rotações no volante do motor. Desta forma, concluiu que:

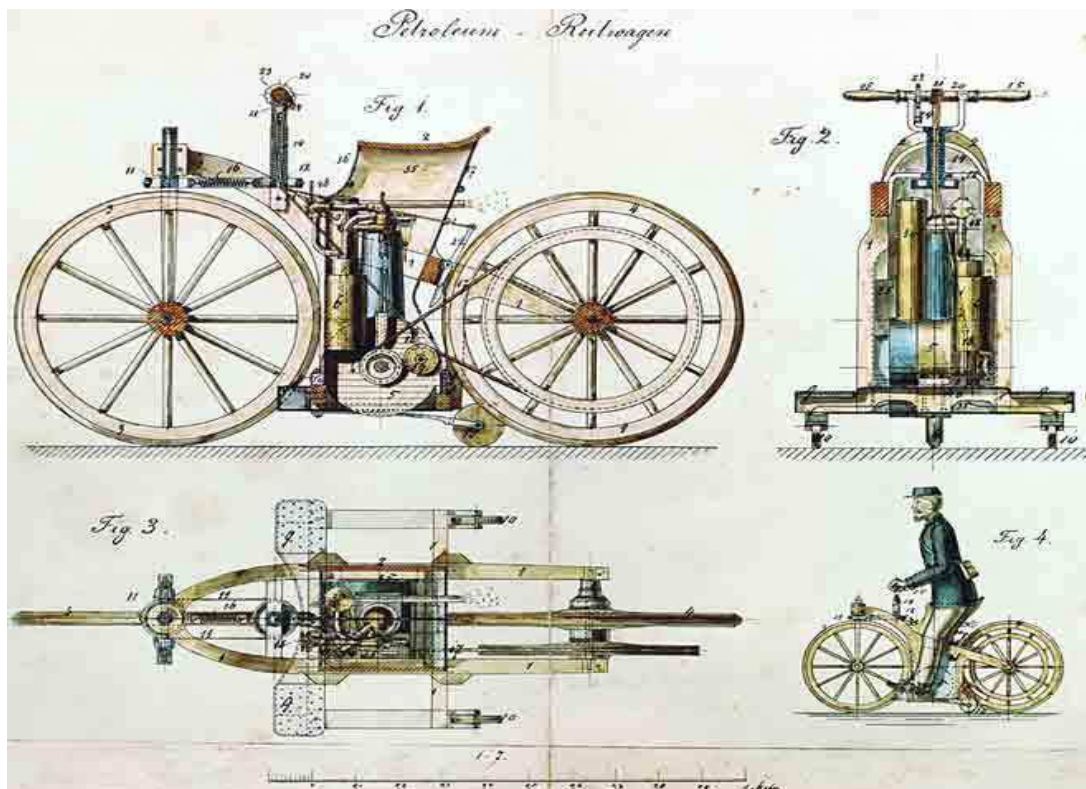
- ✓ Admita o combustível no primeiro movimento, onde ocorre o recuo do pistão;
- ✓ Comprima o combustível no segundo movimento;
- ✓ No terceiro movimento, a expansão (combustão) cria a força útil;
- ✓ No quarto movimento (volta do pistão) ocorre a descarga: liberação e expulsão dos resíduos da combustão.

Otto se associou com o engenheiro Eugen Logen e fundou a N. A. OTTO & CIA, primeira fábrica de motores de combustão do mundo (VARELLA, 2010).

Em 1882, o alemão Gottlieb Wilhelm Daimler revolucionou a época com uma série de trabalhos e invenções que foram fundamentais para a evolução dos meios de transporte. Ele patenteou o primeiro motor de combustão interna, desenvolveu o

carburador, adaptou um motor em uma bicicleta (o que provavelmente foi a primeira motocicleta), mostrado na Figura 2; instalou um motor em uma carruagem, inventando provavelmente o primeiro automóvel movido por um motor de combustão interna (LARANJA, 2010).

Figura 2. Primeira motocicleta.



Fonte: <http://www.museudantu.org.br/Tecnologica/reitwagen2.jpg>, (2011)

Apesar do princípio de funcionamento dos motores de combustão ser o mesmo desde 1800, ocorreram otimizações no seu ciclo de funcionamento como também nos materiais utilizados na construção dos motores, de modo a permitir que fiquem mais leves e resistentes a partir do uso de ligas metálicas especiais.

A eletrônica veio melhorar o rendimento dos MCI pela maior flexibilidade em monitorar e controlar os processos. Com isso, foram desenvolvidos os sistemas de alimentação eletrônicos, com a finalidade de controlar o consumo de combustível como também as emissões dos motores.

Os combustíveis de cada país têm seu uso incentivado pela disponibilidade como também por interesse econômicos. No Brasil não é diferente; pela legislação vigente

para automóveis leves há uma disponibilidade de gasolina, etanol e gás natural, isso implica na busca por melhorar o rendimento dos motores para esses combustíveis.

Com isso, os consumidores fazem pressão para que os automóveis funcionem com mais de um combustível, pela necessidade de alternar de energético devido às alterações dos seus preços.

Em 2003 a Volkswagen do Brasil apresentou o primeiro automóvel flexfuel no País, veículo com capacidade de funcionar com gasolina C, etanol, ou mistura de ambos em qualquer proporção. Para um funcionamento sem falhas ou danos ao motor do veículo há uma série de alterações em seus componentes, as principais são o tratamento superficial das peças internas do motor, com o objetivo de resistir ao poder corrosivo do etanol. Outro parâmetro que sofre modificação é o gerenciamento eletrônico do motor. O sensor de oxigênio *Heated Exhaust Gas Oxygen* (HEGO), conhecido como sonda lambda, posicionado no escapamento do automóvel, detecta, a partir da composição dos gases de descarga do motor, o combustível utilizado, e com isso faz a dosagem estequiométrica.

2.2 Tecnologia Flexfuel

O conceito de veículo flexível em combustível ou flexfuel pode ser definido como um veículo que utiliza dois ou mais combustíveis num mesmo tanque, isso indica que o automóvel pode funcionar com cada combustível distinto, de forma isolada ou com misturas deles no mesmo tanque de combustível.

O primeiro veículo flexfuel comercial vendido no mundo foi o Ford modelo T, produzido de 1908 até 1927. O automóvel era fabricado com um carburador de injeção ajustável que permitia o uso de gasolina, etanol, ou uma mistura de ambos (ECOBIOFUEL, 2010). A Figura 3 mostra uma foto do Ford modelo T flexfuel.

Figura 3. Ford modelo T flex.



Fonte: <http://www.ecobiofuel.ie/the-very-first-ethanol-flex-fuel-vehicle-the-ford-model-t-1908/>, (2012)

Com a introdução dos modernos sistemas de injeção eletrônica nos automóveis, nos anos 80, os fabricantes de automóveis começaram a estudar a possibilidade de uso de misturas de combustíveis em um mesmo motor, incentivados por interesses governamentais em diminuir a dependência nos derivados de petróleo.

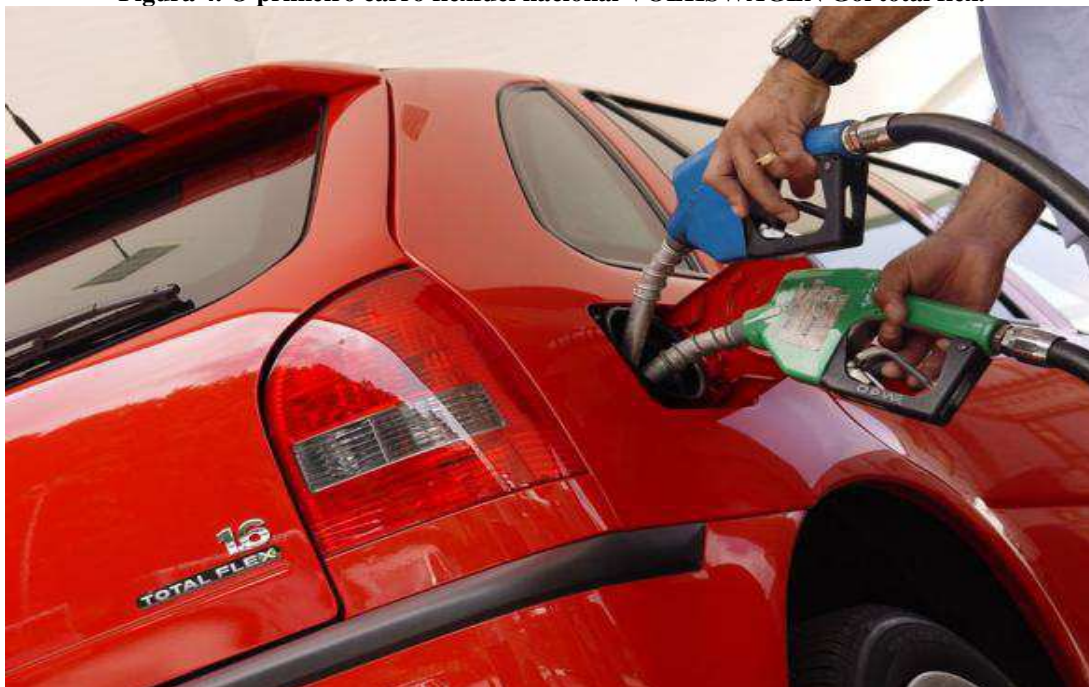
Trabalhos de pesquisa sobre combustíveis alternativos, realizados nos Estados Unidos, Europa e Japão no início da década de 1980, já haviam efetuado adaptações em protótipos, antevendo a possibilidade de utilizar etanol, metanol ou gasolina em um mesmo motor (NIGRO *et al.*, 2009).

No Brasil, na década de noventa, começaram estudos sobre a flexibilização dos sistemas de injeção, a partir do domínio de conhecimento com os sistemas de injeção eletrônica para motores a etanol hidratado. Em 1994, foi criado o primeiro protótipo de um veículo nacional Flexfuel, alimentado por qualquer combinação entre gasolina e álcool (FERREIRA, 2009).

O sistema brasileiro se diferenciava dos estrangeiros por não utilizar um sensor capacitivo na linha de combustível, sensor com a função de detectar o combustível utilizado antes de ser queimado pelo motor. No sistema nacional é utilizado o sensor de oxigênio (sonda lambda), que mede a concentração de oxigênio nos gases de descarga e, com isso, determina o combustível que alimenta o motor. Esse sistema identifica o combustível depois de ser queimado pelo motor.

Logo depois de um desenvolvimento para os combustíveis nacionais, o sistema flexfuel foi apresentado para as montadoras em 1998. A partir de 2003, os consumidores começaram a ter acesso a tecnologia e, em apenas cinco anos, o motor flex assumiu mais de 85% de participação na venda de novos veículos (FERREIRA, 2009). A figura 4 mostra o primeiro carro flexfuel nacional, VOLKSWAGEN Gol total flex.

Figura 4. O primeiro carro flexfuel nacional VOLKSWAGEN Gol total flex.



Fonte: <http://autobrasil.wordpress.com/2009/03/25/vw-dois-milhoes-de-carros-flex/>, (2008)

As limitações do sistema flexfuel começaram a aparecer devido ao ponto de partida adotado pelos fabricantes para veículos flexíveis de primeira geração ser o automóvel a gasolina. A eficiência no uso do etanol ficou reduzida, porque esses veículos possuíam propulsores com razão de compressão baixa para o uso do etanol.

Em uma segunda geração, as razões de compressão subiram cerca de um ponto em relação aos motores dedicados a gasolina C, buscando-se um maior equilíbrio no desenvolvimento do motor para os dois combustíveis, com ganhos de potência e torque para o etanol, na faixa dos 3% a 4%. Também foi introduzido o uso de novos catalisadores e velas de ignição adequadas para as novas taxas de compressão. Numa terceira geração, adotada em alguns modelos pelas montadoras com grande experiência no desenvolvimento de motores a etanol, as taxas de compressão se aproximaram bastante das máximas taxas admissíveis para o etanol, com ganhos de torque para o etanol acima dos 5% (NIGRO *et. al.*, 2009).

Continuando o desenvolvimento da tecnologia, o que pode se considerar como uma quarta geração do sistema flexível, o sistema Flex Start é um novo sistema de partida a frio, que objetiva a eliminação do conhecido “tanquinho” de gasolina, usado para as partidas em dias frios nos carros flexíveis, há redução da emissão de poluentes e maior conforto do usuário (ARAÚJO *et. al.*, 2009).

O sistema Flex Start é composto de uma rampa injetora produzida em aço inoxidável, unidades injetoras especiais, quatro resistências aquecedoras, HCU ou unidade de comando de aquecimento. O sistema funciona de modo inteligente, gerando, de forma automática, o aquecimento do combustível em dias frios. O condutor é informado da utilização do sistema quando no painel acende uma luz de aviso com uma resistência elétrica. O sistema entra em ação quando a temperatura externa for inferior a 15°C. A Figura 5 mostra o sistema Flex Start.

Figura 5. Sistema Flex Start.



Fonte: <http://revistaautoesporte.globo.com/Revista/Autoesporte/EMI270471-10142,00.html>, (2010)

A Tabela 1, adaptada da apresentação feita por representante da Volkswagen na 14º *Ethanol Summit* – 2009, resume, na visão da montadora, como tem ocorrido a evolução da tecnologia.

Tabela 1. Volkswagen 14º no *Ethanol Summit*.

Geração	Entrada no mercado	Ganho de potência com etanol	Ganho de torque com etanol	Perda de autonomia com etanol	Partida a frio com gasolina
1º	2003	2,10%	2,10%	25% a 35%	sim
2º	2006	4,40%	3,20%	25% a 35%	sim
3º	2008	5,60%	9,30%	25% a 30%	sim
4º	2009	5,60%	9,30%	25% a 30%	não

Fonte: Volkswagen do Brasil, (2009).

Com a popularização da tecnologia flexfuel foi normal que aparecessem veículos com essa tecnologia e também com kits GNV instalados pelos fabricantes, o que originou veículos com capacidade de funcionar com três combustíveis (etanol, gasolina C e GNV). A partir disso a fabricante Fiat desenvolveu um sistema com capacidade de funcionar com quatro combustíveis logo os três citados mais a gasolina sem etanol ou gasolina A, usado no Siena tetrafuel, com a vantagem de todos os sistemas de alimentação serem gerenciados pela mesma central eletrônica, mostrado na Figura 6.

Figura 6. Fiat Siena tetrafuel.



Fonte : <http://revistaautoesporte.globo.com/Revista/Autoesporte/0,,EMI21428-10142,00.htm>, (2009)

2.3 Sistema GNV

Em relação aos aspectos técnicos do uso de Gás Natural Veicular, a evolução dos sistemas de conversão acompanha tanto a evolução dos sistemas de injeção de combustível líquido, quanto o aumento das restrições de emissões veiculares impostas por órgãos competentes. Diversos autores também denominam sistemas de conversão como “kits de Conversão”. A palavra “kit” tem origem no idioma inglês e significa equipamento ou conjunto no idioma português (VALIANTE, 2006).

Segundo Pelizza (2003), 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, misturador e tubulações, podendo-se instalar um equipamento adicional denominado 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 eletroinjetores, 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.

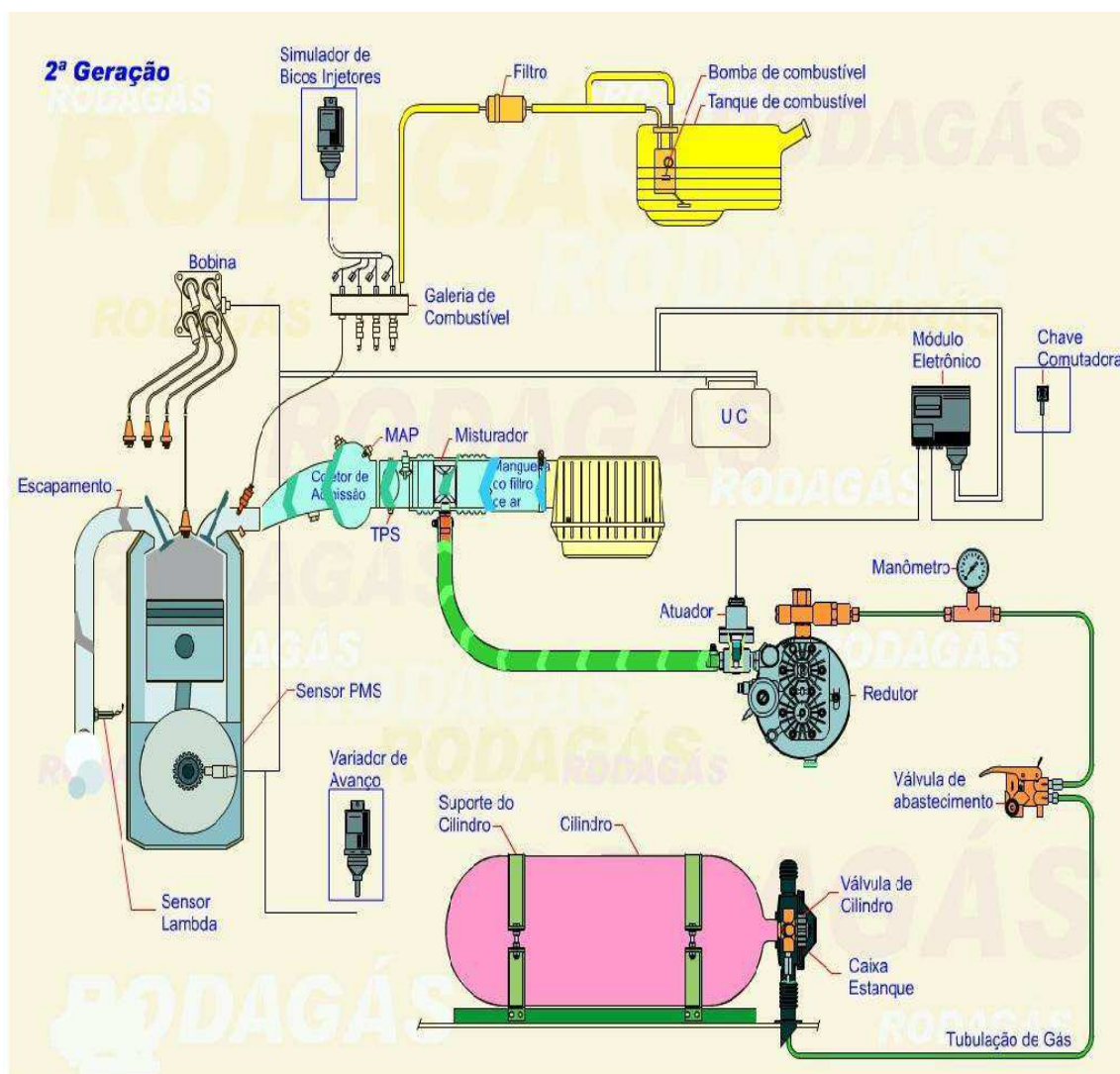
As questões ambientais forçaram a evolução dos kits de GNV, pois o controle das emissões gasosas pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) com seu órgão competente o Programa de Controle da Poluição do ar por Veículos Automotores (PROCONVE), determinam parâmetros máximos de emissões, e as normas de segurança cada vez mais rígidas obrigam a modernização dos sistemas. Com isso, somente kits certificados conseguem se estabelecer no mercado.

No Brasil, a evolução dos sistemas pode ser dividida em fases ou gerações, como mostradas a seguir, até o momento em seis gerações.

Os kits de primeira geração são caracterizados por serem ser um sistema com controle da mistura ar/gás, feita de modo mecânico por um registro para marcha lenta e outro para as outras faixas de operação do motor. Esse sistema era utilizado em veículos carburados, e tinha ausência de componentes eletrônicos, assim, era mais simples e apresentava menor rendimento mecânico.

A segunda geração de kits GNV se diferencia da anterior, pois incorporava o sistema de injeção de gás, no qual a dosagem do combustível era feita de modo eletrônico e executado por um atuador eletromecânico. Com isso, de modo mais preciso que os kits da geração anterior, esse sistema tinha vantagem de ser adaptável a carros com injeção eletrônica e também atendia as normas de emissões da época. A Figura 7 mostra o sistema.

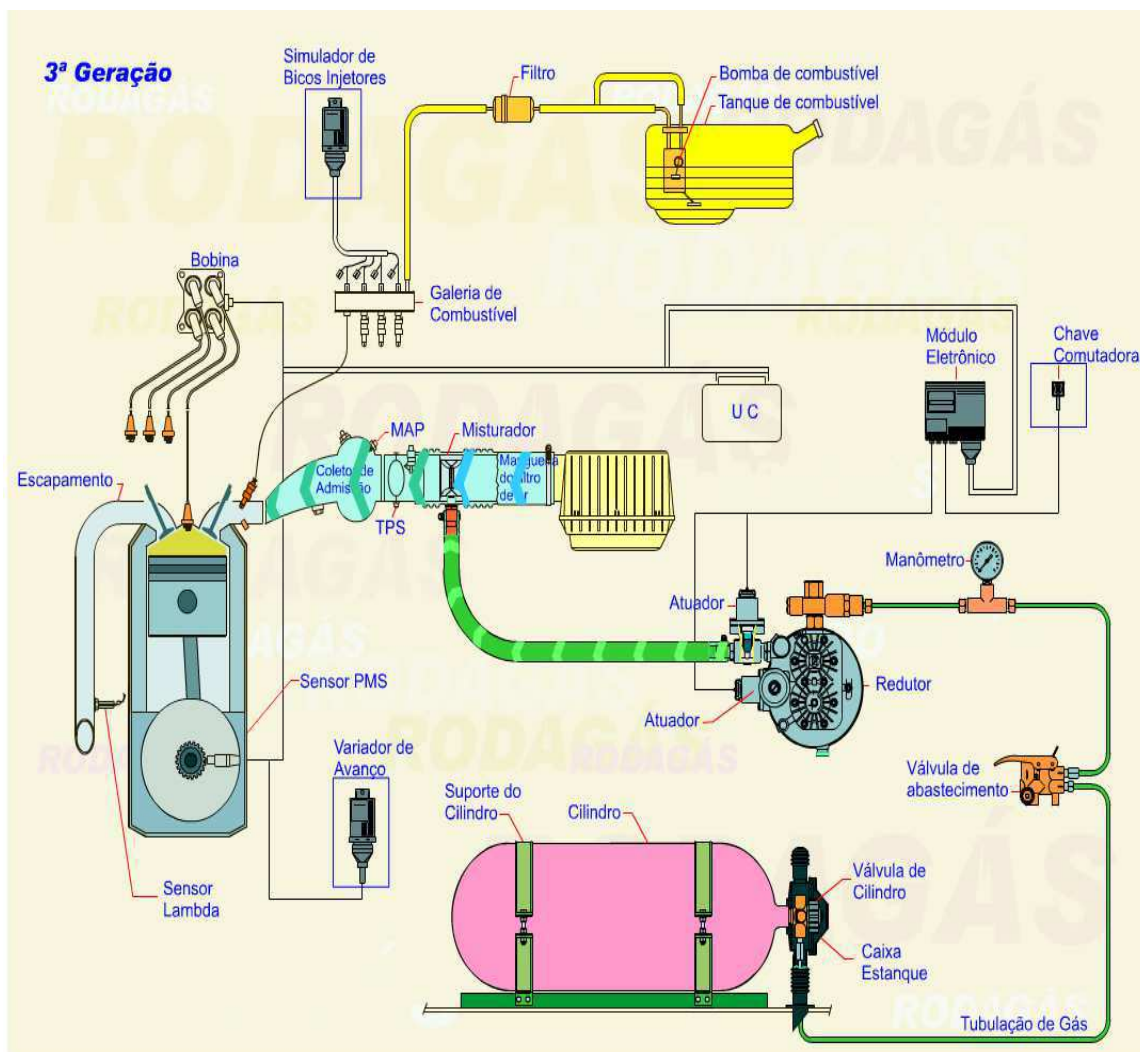
Figura 7. Kit GNV de segunda geração.



Fonte: Rodagás (2005).

A terceira geração de kits GNV foi caracterizada pelo investimento dos fabricantes nacionais em nacionalizar os kits, baratear os custos de produção e reduzir a dependência de componentes externos. Outra vantagem técnica introduzida foi a adição de outro atuador eletromecânico para regulação da marcha lenta do motor, na geração anterior essa regulação era feita de modo mecânico. A partir da nacionalização dos componentes e do uso de sistemas eletromecânicos, foi nessa geração que ocorreu a popularização dos kits de GNV no país, apresentado na Figura 8.

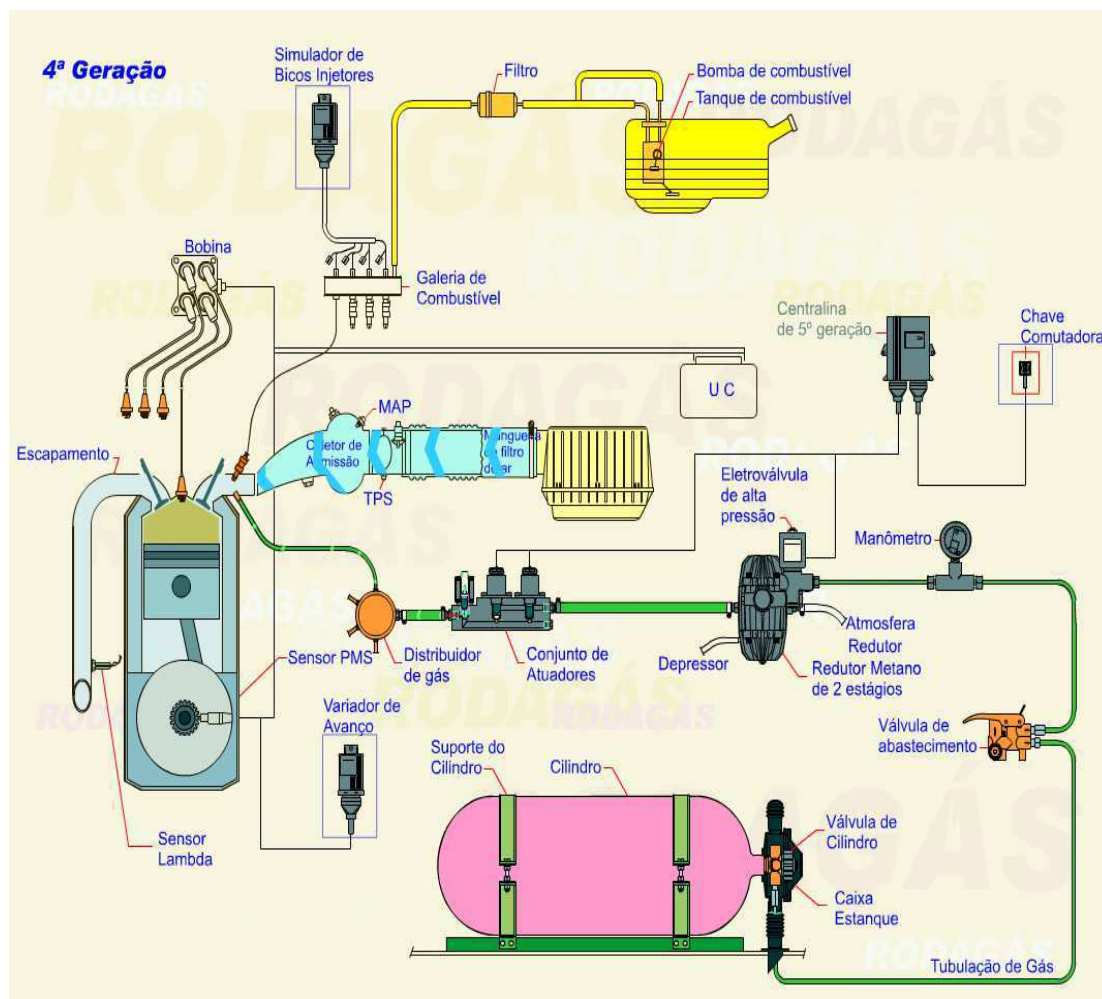
Figura 8. Kit GNV de terceira geração.



Fonte: Rodagás, (2005).

A quarta geração de kits GNV foi marcada pela eliminação do misturador de gás. Essa mudança ocorria, pois o misturador restringia a passagem de ar pelo coletor de admissão, e prejudicava o desempenho do automóvel mesmo com o combustível líquido. A injeção de gás natural era feita em malha fechada, o sistema tinha maior controle da mistura ar/gás e também apresentava compatibilidade com os sistemas de injeção eletrônica e o padrão de diagnóstico *ODBII* (*On Board Diagnostics*, "diagnóstico embarcado"), indicado na Figura 9.

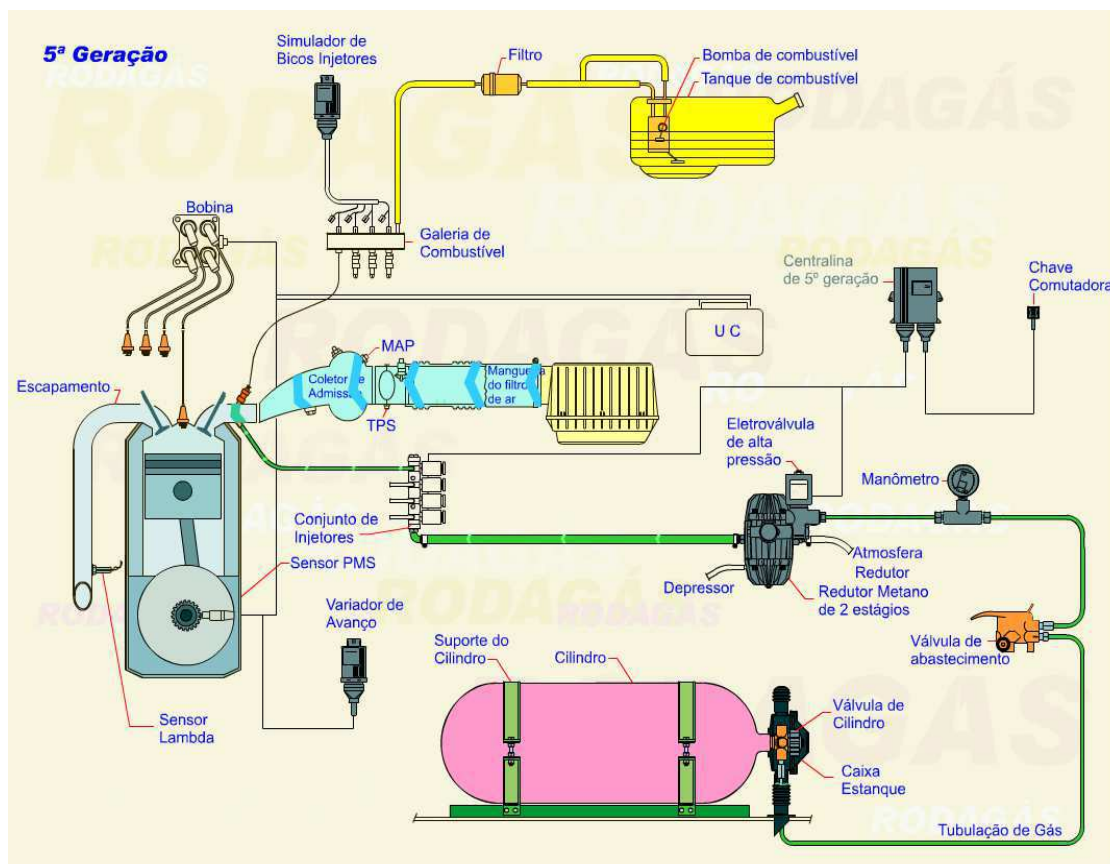
Figura 9. Kit GNV de quarta geração.



Fonte: Rodagás, (2005).

A quinta geração de kits GNV se assemelhava com a anterior no sistema de injeção do gás natural, introduziam alguns avanços técnicos como os injetores específicos para gás natural, que melhoravam a dosagem do combustível. Outro avanço foi trabalhar de modo sequencial, com isso cada cilindro do motor recebe um injetor de gás e este só injeta combustível quando a válvula de admissão é aberta, melhorando assim a economia de combustível e o desempenho do motor. O sistema era gerenciado por um módulo eletrônico que faz os ajustes nos parâmetros do motor em tempo real. Com esses avanços, a geração de kits tinha desempenho muito similar ao combustível original do automóvel, o kit de quinta geração é mostrado na Figura 10.

Figura 10. Kit GNV de quinta geração.



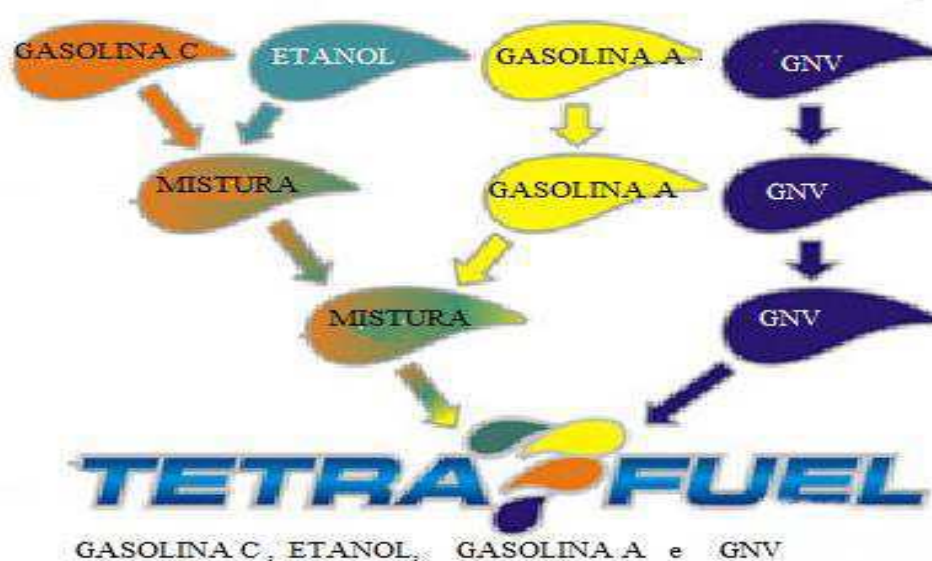
Fonte: Rogodás, (2005).

O sistema de sexta geração é o mais sofisticado no uso do GNV, pois agrega um sistema de alimentação de combustíveis líquidos e gasosos, em uma mesma unidade eletrônica de comando.

Esse sistema permite o veículo poder trabalhar com até quatro combustíveis diferentes, gasolina sem adição de etanol, gasolina com adição de etanol (gasolina brasileira), Álcool Etilico Hidratado Carburante (AEHC) ou GNV. O sistema tetrafuel gerencia os combustíveis, de acordo com a utilização do motor, com a finalidade de melhor performance com maior economia de combustível.

A central eletrônica utilizará, prioritariamente, o GNV sempre que houver gás no cilindro. No entanto, no caso de uma aceleração de emergência ou necessidade extrema de potência, será usado o combustível líquido, seja ele qual for que estiver no tanque. A Figura 11 mostra um esquema de funcionamento do sistema tetrafuel.

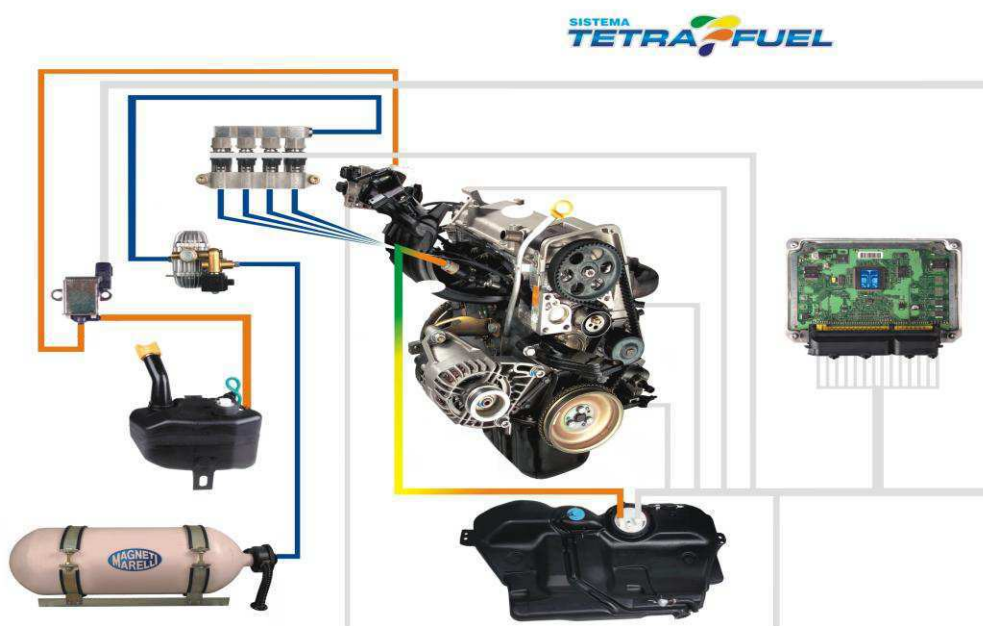
Figura 11. Esquema de funcionamento do sistema tetrafuel.



Fonte: Magneti Marelli Brasil, (2011).

A central eletrônica do sistema de sexta geração gerencia duas galerias de eletroinjetores, sendo que cada uma tem um injetor para cada cilindro do motor. Uma galeria injeta o combustível no estado líquido (etanol, gasolina C e gasolina sem etanol), enquanto a outra faz a injeção do gás, quando necessário. A Figura 12 mostra os componentes do sistema tetrafuel.

Figura 12. Componentes do sistema tetrafuel.



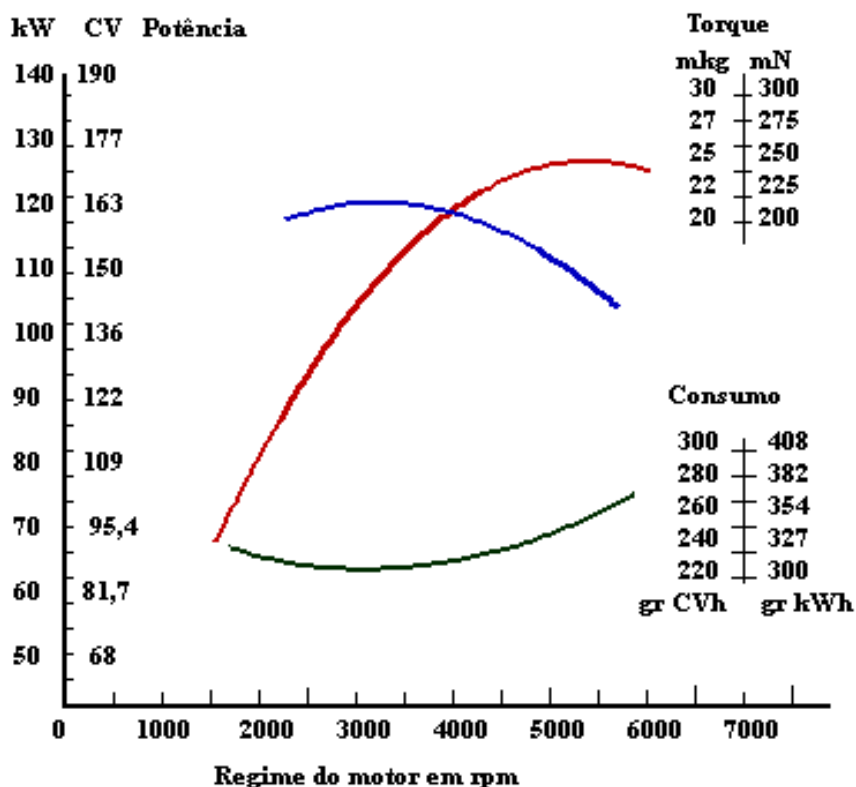
Fonte: *Magneti Marelli Brasil*, (2011).

O sistema de escolha de combustíveis tem prioridade de acionamento automático para o GNV. A partir desse fato foi eliminada a chave comutadora, presente nos sistemas anteriores de kits GNV, que realizava a mudança de combustível, com isso o sistema de gerenciamento do automóvel faz a mudança de combustível de modo automático.

2.4 Curvas Características dos Motores de Combustão Interna

Com a popularização dos motores de combustão interna tornou-se necessário fazer a caracterização dos mesmos, tanto para determinar suas características de funcionamento como para comparar motores diferentes. Os motores de combustão interna apresentam três curvas características básicas para comparação: torque, potência e consumo específico de combustível. Essas curvas são sempre em função da rotação, mostrada na Figura 13.

Figura 13. Curvas características.



Fonte: Fiat Brasil, 2010.

2.4.1 Potência

Pode-se perceber, facilmente, que para compreender o conceito de potência é necessário definir, previamente, o conceito de força e trabalho. O primeiro destes termos refere-se a tudo aquilo que é capaz de produzir movimento ou modificar a velocidade ou a direção do movimento, segundo este conceito é necessário, por exemplo, força para o arranque e aumento de velocidade, para a imobilização e para a mudança de direção de um veículo, etc.

O trabalho é o resultado do produto de uma força pelo espaço percorrido na direção em que o mesmo é aplicado. Assim, a noção de potência relaciona-se com o tempo necessário para execução de um trabalho, sendo tanto mais elevada quanto menor for o tempo necessário para realização deste (SANTOS, 1996).

Traduzindo matematicamente esta noção tem-se:

$$\text{Potência} = \text{trabalho} * \text{tempo}^{-1} = \text{força} * (\text{espaço} * \text{tempo}^{-1}) = \text{força} * \text{velocidade}$$

A potência teórica é estimada com base em propriedades físico-químicas e consumo volumétrico de combustível. Essa potência teórica considera que toda energia química do combustível proveniente da combustão é convertida em energia mecânica mostrada na equação 1.

$$\text{Potência teórica} = P_{ci} * q * d \quad (\text{eq.1})$$

Em que:

Potência teórica é a Potência em kcal.h⁻¹;

P_{ci} é o poder calorífico inferior do combustível, kcal.kg⁻¹

q é o consumo de combustível, L.h⁻¹

d é a massa específica do combustível, kg.L⁻¹

Segundo (OBERT, 1971), a potência desenvolvida por um motor é, comumente, designada potência no eixo, com abreviação de *Brake Horsepower* (BHP). A potência total desenvolvida pelos êmbolos do motor é designada de potência indicada, com abreviação de *Indicated Horsepower* (IHP). Uma parte da potência indicada, desenvolvida pela queima da mistura ar combustível, não aparece como potência no eixo, em virtude de ser necessário vencer o atrito das peças internas do motor, e para efetuar a aspiração da mistura ar combustível e a expulsão dos gases de descarga, esta parte da potência indicada denomina-se potência de atrito, com abreviação de FHP (Friction Horsepower). Pela definição, temos na equação 2:

$$\text{IHP} = \text{BHP} + \text{FHP} \quad (\text{eq.2})$$

Heywood (1988) calcula a potência indicada do motor pela equação na qual diz que potência é o produto do torque com a velocidade angular, mostrado na equação 3:

$$\text{Pot}_{\text{ind}} = 2\pi * N * T \quad (\text{eq.3})$$

Onde:

N é a velocidade angular de rotação da árvore de manivela;

T é o torque do motor.

substituindo em unidades SI tem-se:

$$\text{Pot}_{\text{ind}} (\text{kW}) = 2\pi * N(\text{rps}) * T(\text{N} * \text{m}) * 10^{-3} \quad (\text{eq.4})$$

Onde:

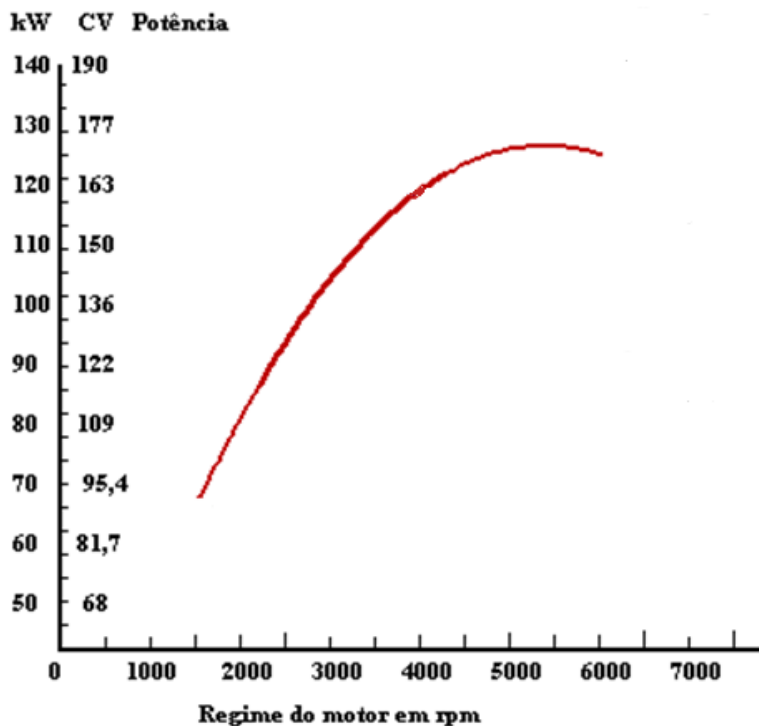
Pot_{ind} em kilowatt (kW)

N em revoluções por segundo (rps)

T em newton*metro (N* m)

A potência do motor é uma função que depende do binário produzido pelo motor, como também da velocidade angular da árvore de manivela, mostrado no gráfico na Figura14.

Figura 14. Curva de potência x rpm.



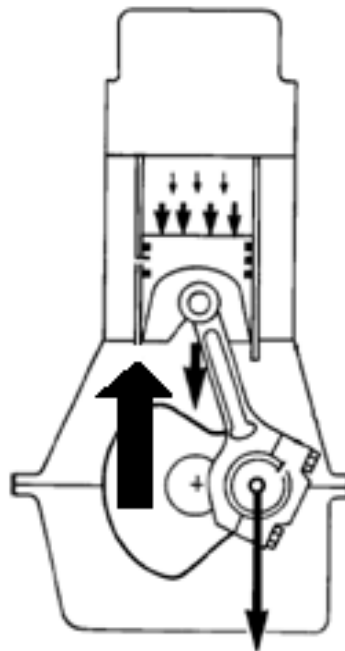
Fonte: Fiat Brasil, (2010).

2.4.2 Torque

O torque ou binário do motor (T) é uma grandeza física que mede a capacidade de produção de trabalho da máquina, enquanto a potência mede a razão de produção de trabalho na unidade de tempo. Em outras palavras, pelo torque sabe-se quanto um veículo é capaz de enfrentar obstáculos ou carga, ao passo que a potência dirá com que rapidez ele será capaz de fazê-lo.

Assim, os gases resultantes da combustão ao aplicarem uma força sobre o moente da árvore de manivelas, o eixo deste faz pressão sobre o seu apoio, o qual reage com uma força igual, mas de sentido contrário, dando lugar a um par de forças, que é o binário motor. Binário motor é o conjunto de duas forças iguais, paralelas e de sentido contrário, que originam ou tendem a originar, um movimento de rotação, medindo-se o seu valor pelo momento ilustrado na Figura 15.

Figura 15. Binário de forças.



Fonte: Heywood, (1988).

Obert (1971) calcula o torque (T) pela equação 5, no sistema métrico de unidades:

$$\text{Torque} = 716,2 * \text{Pot}(\text{cv}) * N(\text{rpm})^{-1} \quad (\text{eq.5})$$

Onde:

Torque é expresso em metros*kilogramaforça ($\text{m} * \text{kgf}$)

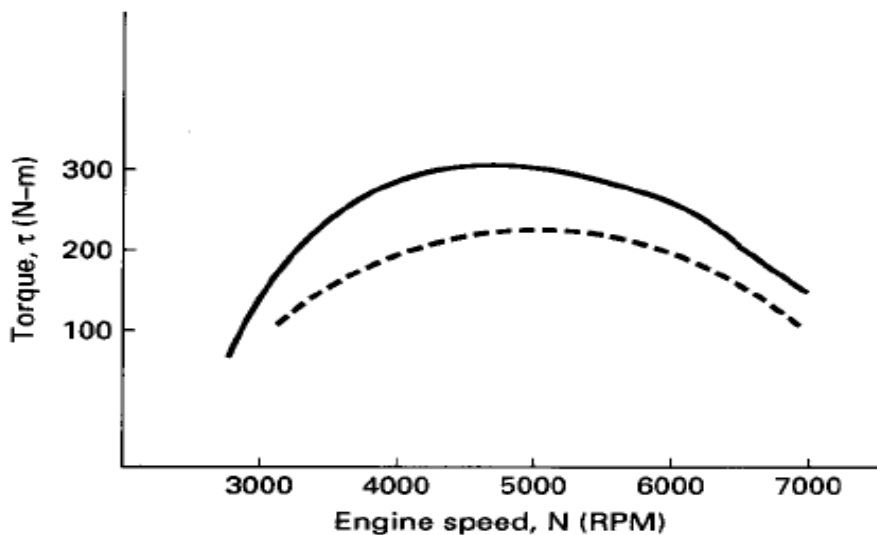
Potência em cavalos vapor (cv)

Rotação N em (rpm)

O torque do motor é uma função que depende da rotação do motor como da pressão no interior do cilindro. A curva de torque do motor aumenta até uma determinada rotação onde ocorre o valor máximo do torque do motor, para, em seguida,

começar a declinar, pois o atrito interno nas partes moveis aumenta com a rotação. A curva de torque vs rotação é mostrada no gráfico na Figura 16.

figura 16 curva de toque x rpm.



Fonte: Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine, Willard W. Pulkrabek (2003).

2.4.3 Consumo Específico de Combustível

O consumo específico de combustível dos motores indica que, por cada kilowatt fornecido pelo motor, o consumo de combustível, em gramas por hora, é dado pela equação 6:

$$C_{sc} = m(g) * [Pot(kW) * t(h)]^{-1} \quad (eq.6)$$

Onde:

C_{sc} é o consumo específico de combustível em gramas * (kilo watt * hora)⁻¹

Pot em kilowatt (kW)

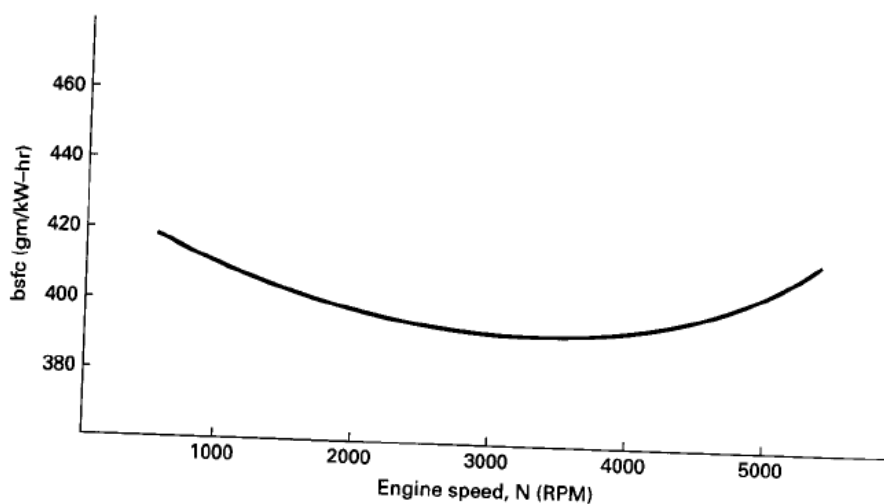
t em horas (h)

m a massa de combustível m em gramas (g)

O consumo específico de combustível é um parâmetro de comparação muito usado para mostrar quão eficientemente um motor está transformando combustível em trabalho. O emprego do consumo específico tem maior aceitação do que o rendimento térmico porque todas as variáveis envolvidas são medidas em unidades padrão: tempo, massa e potência (OBERT, 1971).

O seu valor varia em função do regime e da carga a que o motor está sujeito, sendo máximo em regimes baixos, diminuindo à medida que este aumenta, crescendo depois novamente para os regimes mais altos, como mostra a Figura 17.

Figura 17. Curva de consumo específico de combustível x rpm.



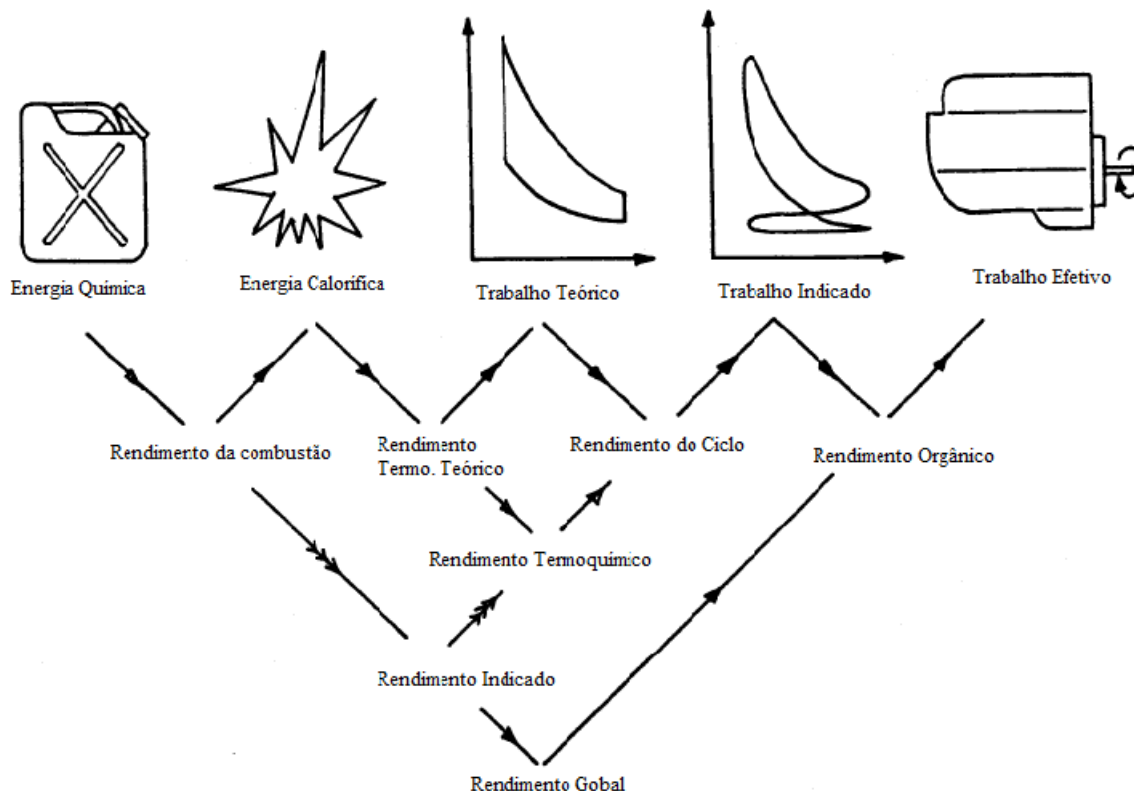
Fonte: *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*, Willard Pulkrabek, (2003).

2.4.4 Rendimentos dos Motores Térmicos

Os rendimentos dos motores térmicos são usados como parâmetros comparativos entre motores na avaliação de perdas caloríficas e mecânicas. São coeficientes que expressam a eficiência dos motores térmicos na conversão da energia proveniente da combustão (VARELLA, 2010).

A Figura 18 indica todos os rendimentos dos motores de combustão interna

Figura 18. Diagrama de rendimentos dos motores de combustão.



Fonte: Eng. Julio Cesar Lodetti, Volvo Powertrain, (2008).

O rendimento mecânico expressa a eficiência dos mecanismos móveis do motor como também as perdas por atrito, ele representa o percentual de energia mecânica nos pistões que está sendo convertido em energia mecânica no volante motor. Podemos calcular o rendimento mecânico a partir da equação 7:

$$\text{Rendimento mecânico} = \text{Potência Efetiva} * \text{Potência Indicada}^{-1} \quad (\text{eq.7})$$

Onde o rendimento mecânico é um número adimensional.

O rendimento térmico representa o percentual de energia térmica que está sendo convertido em energia mecânica nos pistões, esse rendimento indica a eficiência da combustão do combustível no motor, mostrado na equação 8.

$$\text{Rendimento Térmico} = \text{Potência Indicada} * \text{Potência Teórica}^{-1} \quad (\text{eq.8})$$

Onde o rendimento térmico é um número adimensional.

O rendimento termo-mecânico representa o percentual de energia térmica que está sendo convertido em energia mecânica no volante motor, também conhecido como rendimento global do motor, ou rendimento térmico efetivo. É a relação entre a potência medida em bancada dinamométrica e a potência “calorífica” entregue pelo combustível, mostrada na equação 9.

$$\text{Rendimento Global} = \text{Potência Efetiva} * \text{Potência Teórica}^{-1} \quad (\text{eq.9})$$

O rendimento global é um número adimensional.

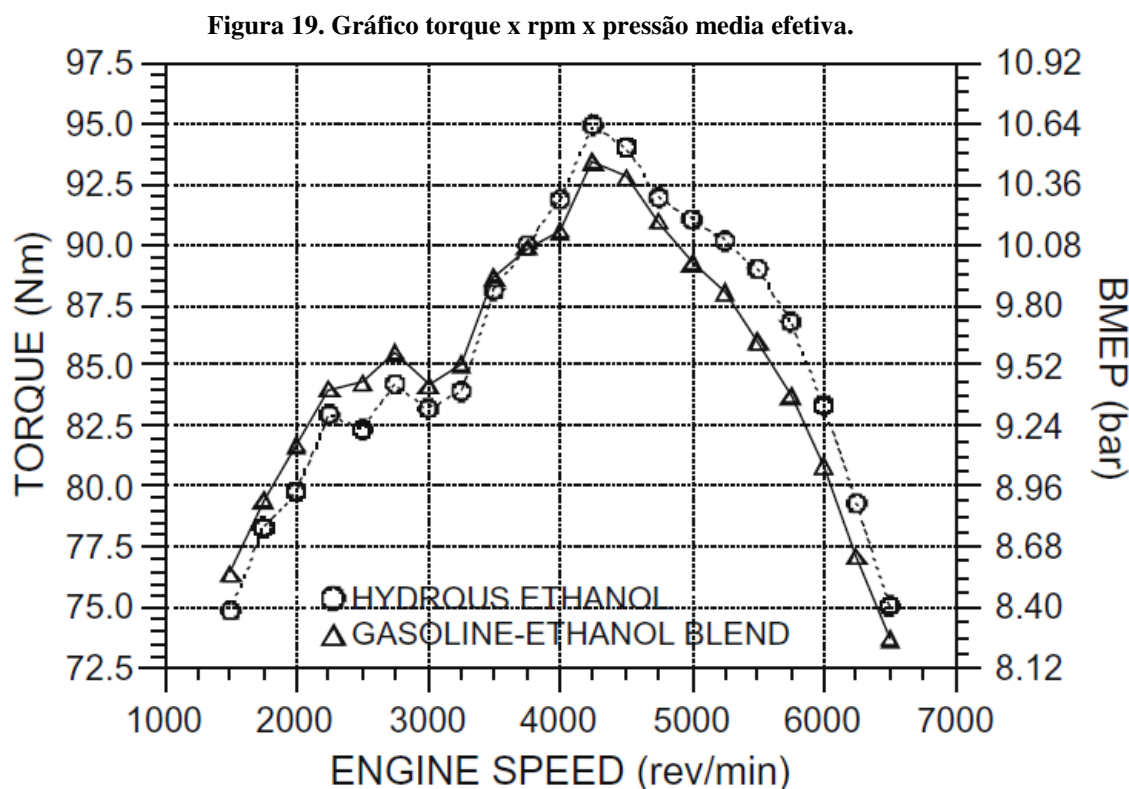
2.5 Estado da Arte (Motores com Sistema Flexfuel e GNV)

Os motores de combustão interna do ciclo Otto com a tecnologia flexfuel são objeto de pesquisa visando a otimização de seu funcionamento, como também a viabilidade da utilização de vários combustíveis diferentes, tanto de fontes fósseis como de origem renovável.

Segundo Melo (2007), os motores à combustão interna continuarão sendo, nos próximos anos, a principal forma de propulsão dos veículos, com as devidas mudanças tecnológicas, no sentido de atender as normas vigentes de redução das emissões de poluentes e de adequação ao uso de combustíveis alternativos. A partir do ano de 2000, houve um aumento de forma mais significativa das pesquisas para redução do consumo de combustível dos veículos, o que pode minimizar as emissões de dióxido de carbono e sua contribuição para o aumento do efeito estufa.

Delgado *et al.* (2007), em um artigo sobre as propriedades físico-químicas da gasolina brasileira, etanol e mistura de ambos os combustíveis, mostraram que quando o etanol é misturado a gasolina C a um aumento da octanagem nos índices *Research Octane Number* (ROM) e *Motor Octane Number* (MON), sugerindo que misturas de etanol na proporção de 40% a 60% com gasolina C são recomendadas para veículos flexfuel.

Costa *et al.* (2009), com um motor Otto com sistema flexfuel de origem FIAT modelo FIRE, com taxa fixa de 12:1 utilizando etanol e gasolina C, mostraram que em 3.250 rpm a pressão média efetiva (PME) no motor do veículo com gasolina C é 2,4% superior ao mesmo com uso de etanol, mas em 4.000 e 5.000 rpm o mesmo motor alimentado com etanol tem maior torque, como também maior PME diferença, chegando a 3,7% em relação a gasolina C. Isto é mostrado na Figura 19.

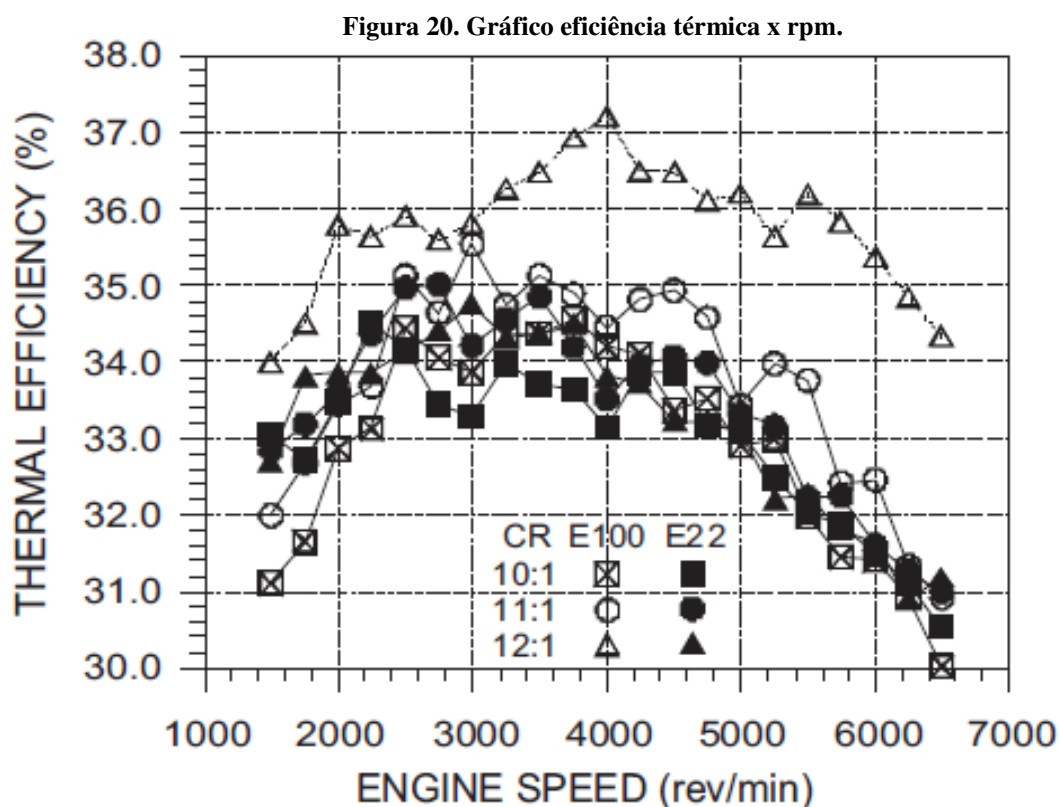


Fonte: Costa *et al.*, (2009).

O etanol tem um consumo específico de combustível maior em 54% comparado a gasolina C. Segundo Costa *et al.*, (2009), esta é a principal desvantagem do uso do etanol como combustível, como vantagem eles indicaram a menor emissão de poluentes.

Sodré (2010) testou um motor Fiat FIRE com sistema flexfuel, variando a taxa de compressão em 10:1, 11:1 e 12:1, utilizando etanol e gasolina C, mostrou que a taxa de compressão do motor é um parâmetro fundamental da tecnologia flexfuel. A taxa de compressão é limitada pela resistência a compressão do combustível; para a gasolina C o limite atingido foi em 12:1. O trabalho concluiu que quanto maior a taxa de compressão maior a potência do motor e menor o consumo de combustível tanto para o

etanol quanto para a gasolina, na Figura 20 é mostrado o gráfico de eficiência térmica do motor Fiat FIRE.



Fonte: Sodré, (2010).

O gráfico da figura 20 mostra que o etanol teve a maior eficiência térmica, mas com o uso de uma maior razão de compressão, esse dado indica que o etanol quando utilizado com baixas razões de compressão tem menor eficiência térmica, o que mostra um mal aproveitamento do combustível.

Baêta (2006) desenvolveu uma metodologia experimental para maximizar o desempenho de um motor multcombust vel ( lcool, gasolina e GNV) turboalimentado sem prejudicar a eficiência global do motor. Um turboalimentador, uma central eletrônica programável e um kit de conversão para GNV de 5^a gera o foram instalados no motor que foi calibrado para cada combustível controlando-se a pressão de turboalimenta o. Foram feitas medi es de pressão do cilindro para análise de parâmetros da combustão e de outras variáveis de desempenho do motor (potência, consumo, etc). O trabalho conclui que a aplica o da turboalimenta o mostrou-se

efetiva em permitir que se tire proveito das diferenças de propriedades entre os três combustíveis testados (álcool, gasolina e GNV). Foram obtidos desempenhos superiores com os combustíveis, sem variar a razão de compressão e sem prejuízo à eficiência global.

Com a introdução dos sistemas de alimentação flexfuel, o consumidor brasileiro exige cada vez mais veículos multicomcombustíveis (gasolina C, etanol e GNV). Essa temática é alvo de estudos de vários pesquisadores como também na indústria automobilística. Em 2005, a General Motors do Brasil lançou no mercado o Astra Multipower, veículo com a capacidade de funcionar com três combustíveis (gasolina C, etanol e GNV), baseado na introdução de um kit GNV de 5ª geração com sistema flexfuel. Em 2006, a Fiat lançou o Siena Tetrafuel avançando o estado da arte com a capacidade de funcionar com quatro combustíveis, os três citados mais a gasolina sem etanol, disponível em alguns mercados fora do país.

Burger *et al* (2007) estudaram a possibilidade do uso do GNV simultâneo com o etanol em um motor do ciclo Otto com taxa de compressão de 12:1 em dinamômetro de bancada. Mostraram que uso simultâneo de GNV e etanol em um motor de combustão interna se mostra viável quando se busca o compromisso entre consumo específico e eficiência térmica.

No Brasil, o uso do GNV está concentrado na aplicação em veículos leves, uma vez que aplicação em veículos pesados ainda encontra barreiras técnicas, comerciais e operacionais (MACHADO, 2003).

A pesquisa de Melo (2007) sobre a modelagem de um motor do ciclo Otto tipo flexfuel, funcionando com gasolina, álcool e gás natural mostram que os perfis de pressão no pistão do motor indicaram valores muito mais elevados com o uso do GNV do que com os outros combustíveis.

Amorim *et al.* (2005), realizou diversos estudos experimentais em um motor FIRE da Fiat, do tipo flexfuel, equipado com kit de GNV de 5ª geração e com uma central programável da injeção eletrônica temos:

- Amorim *et al.* (2005a), avaliaram o desempenho do motor em carga máxima, respeitando-se o valor de lambda informado pelo fabricante,

para gasolina, álcool e GNV. As calibrações do motor foram feitas para cada um dos combustíveis. Dentre os resultados, obtiveram-se diversas curvas otimizadas com a melhor relação entre torque, potência e consumo específico de cada um dos combustíveis.

- Amorim *et al.* (2005b), fizeram experimentos e ajustes de otimização para uso do GNV no motor FIRE, com diferentes valores de taxa de compressão (11:1, 12,5:1 e 15:1). O trabalho conclui que o desempenho do GNV com taxas de 12:5 e 15:1 é bem superior ao obtido com a taxa de 11:1. Não foram encontradas diferenças significativas entre o desempenho com taxas das taxas de 12,5:1 e 15:1, entretanto, a taxa 15:1 apresenta um menor consumo específico, o que se traduz maior eficiência energética.
- Amorim *et al.* (2005c) realizaram experimentos com gasolina C, álcool hidratado, mistura de 50% gasolina e 50% de álcool e GNV. O objetivo do trabalho era mostrar as diferenças de desempenho entre os combustíveis para uma taxa de compressão fixa de 11:1. O melhor resultado de potência foi obtido com o álcool hidratado, que apresentou o pior resultado de consumo. O GNV apresentou o melhor resultado de consumo específico entre os combustíveis testados.

O desenvolvimento dos motores do ciclo Otto com o sistema flexfuel combinado com GNV ainda carece de estudos, vários parâmetros de funcionamento dos motores ainda não estão otimizados para funcionar com diversos combustíveis diferentes, logo o rendimento termodinâmico para alguns energéticos não é privilegiado o que se reflete em baixo desempenho e alto consumo de combustível, quando utiliza energéticos diferentes da gasolina C. Outro aspecto observado é que nos trabalhos anteriores citados, foram utilizados sistemas de alimentação de GNV adaptados em motores flexfuel com pouco grau de integração com os sistemas do veículo, diferente do trabalho atual que utiliza um sistema integrado de fábrica com alto grau de integração entre os sistemas de alimentação líquidos e gasosos, como também a utilização de combustíveis comerciais nos ensaios, diferentemente dos outros trabalhos que utilizam combustível padrão.

De acordo com atual tendência, o uso de motores multicomcombustíveis possui aplicação crescente no mercado brasileiro.

Capítulo III

Materiais e Métodos

3. Materiais e Métodos

As atividades foram realizadas no Laboratório Experimental de Máquinas Térmicas (LEMT), da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica (UAEM), do Centro de Ciências e Tecnologia (CCT), da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) em Campina Grande-PB, e no Centro de Tecnologia do Gás e Energias Renováveis (CTGAS-ER), localizado na cidade de Natal no Rio Grande do Norte.

Os ensaios com o veículo tetrafuel ocorreram no laboratório automotivo do CTGAS-ER, nos meses de julho e agosto de 2011.

3.1 Materiais

3.1.1 Tipos de Combustíveis

Os combustíveis utilizados neste trabalho para os ensaios de potência máxima e consumo específico de combustível foram adquiridos de um posto de combustível comercial, no mês de agosto de 2011, na cidade de Natal, no Rio Grande do Norte. Os combustíveis adquiridos foram a gasolina C e o etanol.

O gás natural utilizado nos ensaios de potência máxima e consumo específico de combustível foi cedido pelo CTGAS-ER.

Foi realizada uma formulação da mistura de combustíveis em 50% em volume da gasolina C e do etanol. No Brasil, a gasolina sem etanol não é disponível aos consumidores comuns. Por esse motivo, a mistura de 50% em volume de etanol e gasolina C foi usada nos ensaios.

Para determinação da qualidade dos combustíveis líquidos utilizados (gasolina C e etanol) os mesmos foram analisados no Laboratório Experimental de Máquinas Térmicas (LEMT), na UFCG. Foram realizadas análises do teor de AEAC presente na gasolina, teor de água presente no AEHC, densidade e aspecto visual, de acordo com as normas da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

A Tabela 2 mostra as características dos combustíveis analisados.

Tabela 2. Características dos combustíveis analisados.

Características	Gasolina comum	Etanol (AEHC)	Padrão ANP
Aspecto	Límpido e isento de impurezas	Límpido e isento de impurezas	Conforme
Cor	Amarelo	Incolor	Conforme
Massa Específica a 20°C, kg/m ³	755	808	Conforme
Teor de AEAC, % vol	25%	-	Conforme
Teor de água no AEHC, % vol	-	4	Conforme

O gás natural veicular foi coletado e enviado para Laboratório de Qualidade do Gás do CTGAS-ER para efetuar análise físico-química, com o objetivo de conhecer as características do combustível.

3.2 Bancada Dinamométrica Experimental

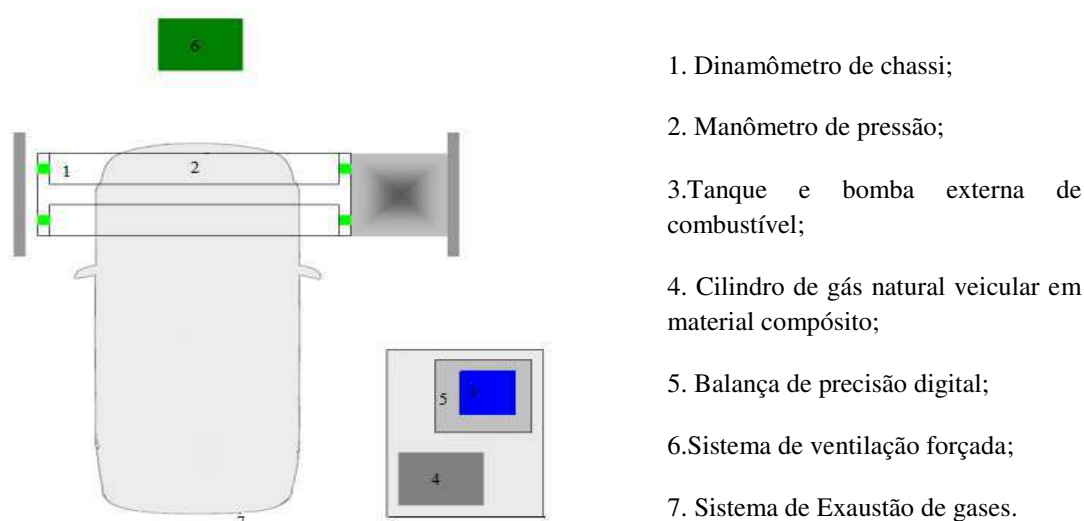
Para o ensaio de motores foi utilizado um aparelho denominado dinamômetro, este instrumento mede a potência dos motores ensaiados. Com isso, a medição de potência pode ser feita no eixo do motor. No caso dos dinamômetros de bancada, estes se subdividem em hidráulicos, elétricos, de correntes de Foucault e de ventilação, ou a grandeza pode ser medida na roda do automóvel quando se utiliza dinamômetro de chassi.

Para a realização desse trabalho de pesquisa e dos ensaios de potência máxima e medição do consumo de combustível, com o automóvel Siena Tetrafuel, foi necessário desenvolver uma metodologia experimental de ensaio, a partir da seleção de equipamentos disponíveis no CTGAS-ER.

A bancada de ensaio foi montada a partir do dinamômetro de chassi disponível no CTGÁS-ER. Foi teve-se o cuidado para que a disposição dos componentes ficasse próxima dos utilizadores, facilitando sua utilização durante os ensaios.

A disposição dos equipamentos usados e a montagem da estrutura de ensaios para potência máxima do veículo e consumo específico de combustível de veículos automotivos leves estão mostradas na Figura 21.

Figura 21. Disposição dos equipamentos de ensaio.



1. Dinamômetro de chassi;
2. Manômetro de pressão;
3. Tanque e bomba externa de combustível;
4. Cilindro de gás natural veicular em material compósito;
5. Balança de precisão digital;
6. Sistema de ventilação forçada;
7. Sistema de Exaustão de gases.

Fonte: adaptado de Laranja, 2010

A Figura 21 mostra a disposição dos equipamentos de ensaio do veículo no CTGAS-ER. A seguir, serão detalhados pela numeração da Figura 21 os equipamentos utilizados neste trabalho

(1) Dinamômetro de chassi

O dinamômetro de chassi, ou de potência, é um equipamento utilizado para realizar testes de potência do veículo. Este equipamento é capaz de realizar diversas simulações de uso em condições controladas de laboratório e ter reprodutibilidade dos resultados, diferentemente dos ensaios em campo, onde as condições climáticas interferem no resultado.

Nesse é permitida a utilização de vários modos de operação, sendo possível efetuar diferentes testes, como medir a potência da roda, força de tração, simulação de

rodagem, percurso e controle do tacômetro. Neste trabalho foi utilizada a função de desempenho do motor para realizar os ensaios de potência máxima do motor, e a função de simulação de rodagem para realizar os ensaios de consumo específico de combustível do veículo.

A Figura 22 mostra uma foto do dinamômetro de chassi, modelo FLA 203, do fabricante BOSCH, utilizado nos ensaios de potência do motor e consumo específico de combustível neste trabalho (no Anexo A as descrições técnicas do equipamento).

Figura 22. Dinamômetro de chassi modelo FLA 203 do fabricante BOSCH, no CTGAS-ER.



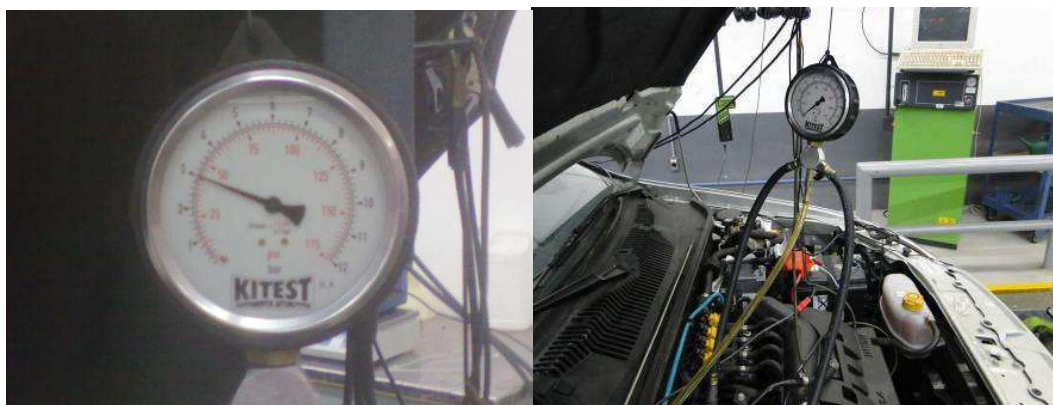
Fonte: arquivo do autor, 2011

(2) Manômetro de pressão

O manômetro de pressão tem a finalidade de medir a pressão da linha e verificar a vazão da eletrobomba de combustível. Neste trabalho, o manômetro foi utilizado para regular a pressão da linha em um valor de 3 bar, a mesma recomendada pelo fabricante do veículo, e desta forma simular uma espécie de retorno para o reservatório de combustível, pois os ensaios de consumo foram realizados através do método gravimétrico. Foi utilizado um sistema de bombeamento do combustível e uma balança de precisão para medir a massa de combustível consumido.

Na Figura 23 é mostrado o manômetro de combustível, utilizado nos ensaios de potência do motor e do consumo específico de combustível do veículo. No manômetro foram montadas as linhas de combustível da seguinte forma: na esquerda foi conectada a linha de pressão de combustível que vêm do reservatório de combustível original do veículo, a linha intermediária serviu como uma espécie de retorno que vai para o reservatório auxiliar utilizado nos ensaios, e a linha à direita foi conectada ao equipamento de medidor de consumo de combustível.

Figura 23. Manômetro de pressão e esquema de montagem dos testes no CTGAS-ER.



Fonte: arquivo do autor, 2011

(3) Tanque e bomba externa de combustível

O tanque e a bomba externa de combustível é um equipamento utilizado para socorrer nos casos em que a bomba elétrica de combustível do veículo estiver com problema. Este equipamento foi utilizado neste trabalho para alimentar o veículo com o combustível líquido a ser ensaiado, simulando um reservatório de combustível, onde

também há uma eletrobomba de combustível no seu interior. No dispositivo não tinha como controlar a pressão do combustível enviado para o motor do veículo, foi necessário utilizar um manômetro na linha de combustível de alta pressão, com a finalidade de estabelecer a pressão de trabalho recomendada pelo fabricante do automóvel, no caso em um valor de 3 bar (como mostrado no manômetro de pressão). No entanto, não alterou o sistema de alimentação de combustíveis líquidos original do veículo, simplesmente foi mudada a fonte de combustível líquido do veículo. Em vez do tanque principal do automóvel, foi utilizado o tanque e a bomba externa de combustível, mostrada na Figura 24.

Figura 24. Tanque e bomba externa de combustível.



Fonte: arquivo do autor, 2011

(4) Cilindro de gás natural veicular em material compósito

Para a medição do consumo de gás em modo gravimétrico foi necessário aferir a massa do combustível em uma balança. Como os cilindros de gás natural do veículo são fabricados em aço, isso faz que a massa dos mesmos seja elevada, inviabilizando seu uso em uma balança de precisão. A partir disso, o CTGAS-ER disponibilizou um cilindro reservatório de gás natural da empresa DYNECELL, confeccionado em alumínio e revestido com fibra de carbono e resina epóxi. A massa desse reservatório é reduzida, e viabilizando o uso de uma balança de precisão. A Figura 25 mostra o cilindro gás natural veicular em material compósito e alumínio.

Figura 25. Cilindro de gás natural veicular em material compósito e alumínio.



Fonte: arquivo do autor, 2011

(5) Balança de precisão digital

A balança de precisão digital é um instrumento que mede a massa de um corpo. A balança utilizada neste trabalho foi uma balança com calibração automática, capacidade máxima de 3200g e precisão 0,1g. Esta balança foi escolhida devido ao

método adotado para os ensaios de consumo de combustível ser gravimétrico, onde há necessidade de medir a massa do combustível ensaiado.

A Figura 26 mostra uma foto da balança de precisão digital, utilizada nos ensaios de potência do motor e consumo específico do veículo.

Figura 26. Balança de precisão digital.



Fonte: arquivo do autor, 2011

(6) Sistema de ventilação forçada

O sistema de ventilação forçada utilizado é um ventilador montado em um cavalete. O fluxo de ar mínimo recomendado é de 20.000 m³/h, devido às recomendações do fabricante do dinamômetro, evitando danos ao motor devido ao superaquecimento dos seus componentes. O melhor ajuste para refrigerar o veículo é direcionar o fluxo de ar para o radiador, ponto de aspiração de ar e parte inferior do veículo (cárter, escapamento e pneus), conforme manual de instrução do fabricante do dinamômetro de chassi.

A Figura 27 mostra sistema de ventilação forçada utilizado nos ensaios de potência do motor e consumo específico de combustível do veículo.

Figura 27. Sistema de ventilação forçada.



Fonte: arquivo do autor, 2011

(7) Sistema de Exaustão de Gases

Todo sistema de exaustão tem o objetivo de retirar os gases indesejáveis, filtrá-los e descartar na atmosfera. Todo local fechado que apresentem gases deve ter um sistema de exaustão. Os laboratórios automotivos ou centros de pesquisa da área devem ter um, pois qualquer ensaio com o veículo ligado resulta em emissões de poluentes, já equipado com catalisador para atenuar as emissões, pois o automóvel emite os principais gases que podem ser fatais, como por exemplo: hidrocarbonetos (HC),

monóxido de carbono (CO) e óxido de nitrogênio (NO_x). O sistema de exaustão utilizado foi o do laboratório automotivo do CTGAS-ER, que foi projetado para funcionar com dois veículos simultaneamente. Possui exaustores e filtros de gases e as mangueiras suportam altas temperaturas.

A Figura 28 mostra uma foto do sistema de exaustão do laboratório automotivo do CTGAS-ER utilizado nos ensaios de potência do motor e consumo específico do veículo.

Figura 28. Sistema de exaustão do laboratório automotivo do CTGAS-ER.



Fonte: arquivo do autor, 2011

Para a realização dos ensaios no dinamômetro o fabricante do equipamento recomenda colocar um dispositivo de aspiração no cano de escape a uma distância de aproximadamente 20 cm. Dessa forma, impede-se que haja uma restrição dos gases de descarga, serve também variar a pressão devida ao processo de aspiração dos gases. Para atender a esta recomendação, foi desenvolvido pela equipe técnica um adaptador

para o sistema. A Figura 29 mostra uma foto do adaptador interligado ao sistema de exaustão do Laboratório automotivo do CTGAS-ER.

Figura 29. Adaptador interligado ao sistema de exaustão do Laboratório automotivo do CTGAS-ER.



Fonte: arquivo do autor, 2011

3.3 Veículo Usado nos Ensaios

O veículo utilizado no trabalho é um automóvel de passeio, Fiat Siena tetrafuel 2009, com 7.828 km rodados, equipado com um motor Fiat FIRE de quatro cilindros em linha, oito válvulas com 1,4 L de deslocamento com sistema de injeção multiponto para combustíveis líquidos e gasosos, como mostra a Figura 30.

Figura 30. Fiat Siena tetrafuel.



Fonte: arquivo do autor, 2011

Este veículo foi apresentado ao mercado como um veículo *tetrafuel* pelo fabricante, isto é, que pode funcionar com quatro combustíveis diferentes, gasolina sem adição de etanol (disponível no MERCOSUL), gasolina com adição de etanol anidro carburante ou gasolina C em percentual de 18 a 25% (disponível no Brasil), etanol hidratado carburante (teor de água 6%) ou GNV.

A Tabela 3 mostra as principais informações técnicas sobre o veículo Siena Tetrafuel, com cilindrada de 1.4 L, utilizado nos ensaios.

Tabela 3. Informações Técnicas do Siena Tetrafuel.

SIENA TETRAFUEL	Gasolina com adição de álcool	Gasolina sem adição de álcool	Etanol	GNV
Taxa de compressão	10,5	10,5	10,5	10,5
Potência máxima	80,0 cv / 58,9 kW (5.500 rpm)	80,0 cv / 58,9 kW (5.500 rpm)	81,0 cv / 59,6 kW (5.500 rpm)	68,0 cv / 50,1 kW (5.500 rpm)
Ciclo	Otto	Otto	Otto	Otto
Número de cilindros	4	4	4	4
Número de válvulas por cilindro	2	2	2	2
Capacidade de combustível	48 litros	48 litros	48 litros	6,5 m ³ (cada cilindro) a pressão de 200 bar
Velocidade em 4° marcha	135 km/h	135 km/h	135 km/h	135 km/h

O sistema de alimentação do veículo tem uma única central eletrônica para gerenciar combustível líquido e gasoso, caracterizando um sistema de 6° geração. É um sistema inteligente, pois gerencia sem a intervenção do motorista a mudança de combustível líquido para gasoso, ou vice versa, de acordo com o regime de trabalho. Um fator diferencial é possuir eletroinjetores para o gás, onde o combustível é injetado diretamente no coletor de admissão do motor do veículo.

O desenvolvimento do Siena Tetrafuel diferenciou do Siena convencional, pois os componentes do motor foram preparados com tratamentos e revestimentos resistentes para o funcionamento com o GNV. O cabeçote do motor foi totalmente reprojetoado, as sedes de válvulas de admissão e de escapamento com maior inclinação, passam de 45° para 60°, e um novo coletor admissão foi desenvolvido para a instalação dos eletros injetores de gás. A carroceria foi reforçada em sua estrutura para receber os suportes e cilindros de GNV e a suspensão com molas específicas que mantém as condições estáticas e dinâmicas do veículo.

O desenvolvimento dessa nova versão do automóvel contemplou modificações não restritas somente à parte mecânica, mas também ao painel de instrumentos, como mostra a Figura 31. Outros veículos, quando adaptados para o GNV, não tem esse nível de integração de sistemas quando fazem modificações em oficinas especializadas.

Figura 31. Painel de instrumentos do Siena Tetrafuel.



Fonte: arquivo do autor, 2011

O canto esquerdo da Figura 31 mostra o marcador de combustível. Quando o veículo estiver funcionando com o GNV, aparecem as barras na vertical indicando o nível de gás natural nos cilindros. Se o nível de combustível gasoso for inferior a 20% nos cilindros, será visualizada no *display* a mensagem de “Atenção: pouco combustível”. Quando a autonomia do combustível líquido for inferior a 50 km e o nível de GNV for inferior a 20%, será visualizada no *display* a mensagem de “Atenção: autonomia limitada”.

3.3.1 Programação do Sistema Tetrafuel do Veículo

O veículo Siena Tetrafuel, diferentemente dos outros automóveis do mercado nacional, tem um grau de automação mais avançado no quesito gerenciamento de combustíveis.

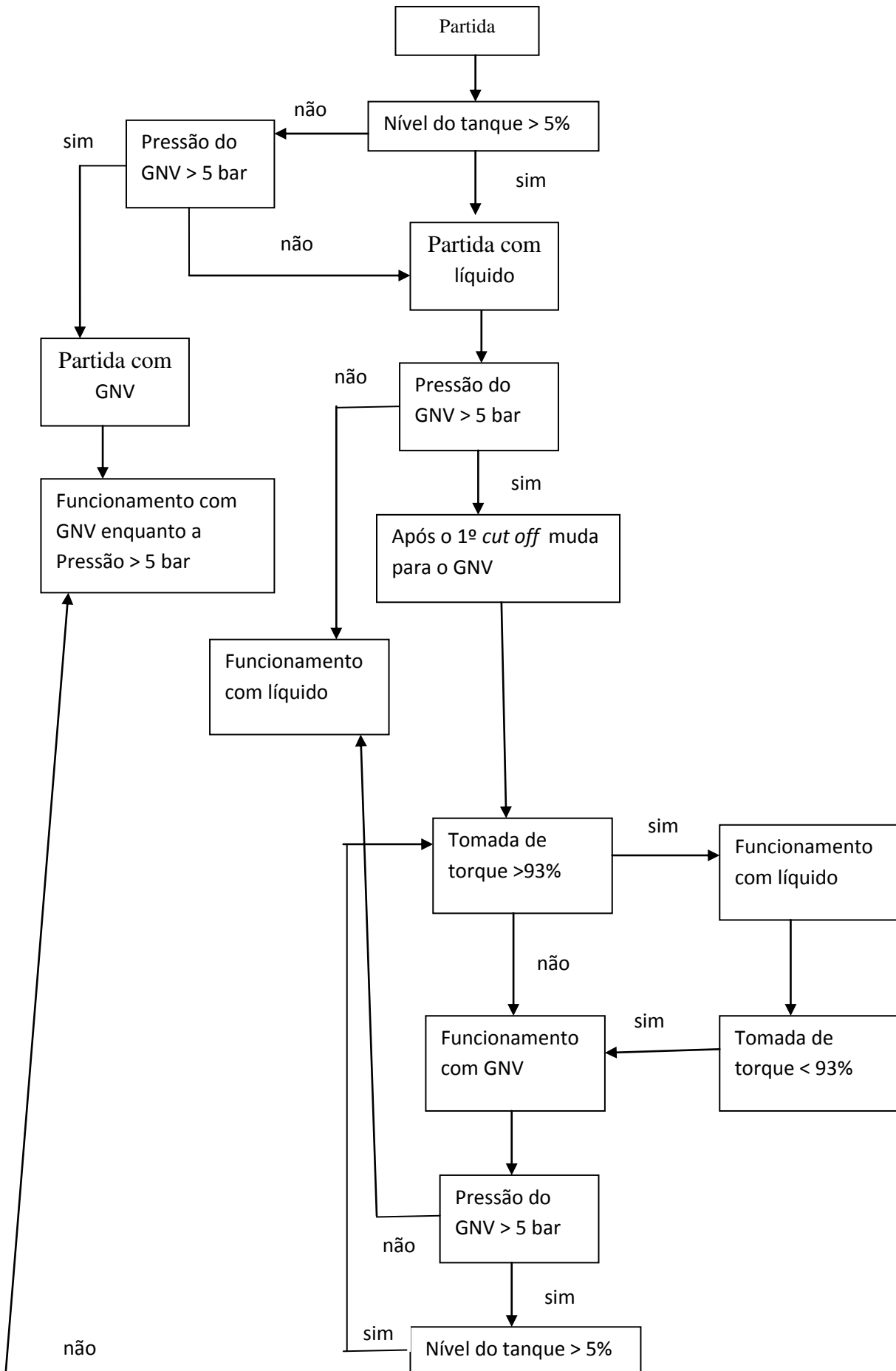
O Siena Tetrafuel sempre vai priorizar o combustível líquido para dar a partida e, em seguida, automaticamente, passará a utilizar o gás natural veicular. Na mudança de combustível, de combustíveis líquidos para gasoso, os eletroinjetores de combustível líquido são desligados, cortando o fornecimento para o motor. Com o combustível líquido cortado, os eletroinjetores do sistema de GNV entram em funcionamento.

Quando o motorista requisita maior potência do veículo como em uma aceleração, para evitar perda de desempenho do veículo, a central eletrônica faz a mudança, automaticamente, do funcionamento do GNV para o combustível líquido. Também toda vez que o motor do veículo for requisitado um torque mais elevado, nos casos de ultrapassagem ou subidas muito íngremes, principalmente se estiver com o ar condicionado ligado.

Com a diminuição da solicitação do motor de potência, o sistema retorna, automaticamente, para o funcionamento com GNV. Esta estratégia será desabilitada quando o combustível líquido entrar na reserva. O fluxograma da Figura 32 mostra a lógica de funcionamento do veículo.

O projeto do Siena Tetrafuel teve como ênfase o uso de GNV, logo o motorista do veículo pode manipular o sistema para funcionar com qualquer combustível. Na falta do combustível gasoso, o sistema passa a funcionar com o combustível líquido que estiver disponível no seu tanque.

Figura 32. Fluxograma de funcionamento do Sistema Tetrafuel do Siena.



3.4 Metodologia dos Ensaio

A metodologia dos ensaios experimentais foi desenvolvida com o objetivo de obter as curvas de potência máxima efetiva para cada combustível, como também as curvas de consumo de horário de combustível. A partir desses resultados, foi possível calcular o torque, consumo específico de combustível e o rendimento mecânico.

Os procedimentos dos ensaios deste trabalho foram realizados com o apoio dos técnicos do CTGAS-ER, seguindo referências normativas de acordo com as condições de trabalho do Laboratório Automotivo do CTGAS-ER.

3.4.1 Ensaio de Potência Máxima do Motor

A determinação do ensaio para medição de potência de um motor de um veículo em dinamômetro de chassi foi realizada conforme o Manual de Instruções do Dinamômetro de Chassi, modelo FLA 203, fabricante BOSCH e do manual do fabricante do veículo FIAT SIENA.

O ensaio de potência do motor de um automóvel leve tem o objetivo de determinar a sua curva de potência real em função da rotação, em dinamômetro de chassi. A precisão da bancada de teste é de aproximadamente 0,5% da potência máxima do dinamômetro (300 kW).

Para a operação do dinamômetro de chassi é preciso realizar 13 medidas de segurança que devem ser tomadas. Foram citadas 3 principais, o procedimento completo está descrito no anexo B:

- 1** Durante os testes, manter fechadas as portas e janelas do veículo para assim proteger o técnico contra eventuais corpos estranhos projetados do perfil do pneu, ou contra partícula que se soltam dos pneus;
- 2** Limitar a duração dos testes ao tempo de medição estritamente necessário;

3 A operação e a utilização da bancada dos ensaios são permitidas somente ao pessoal técnico competente e devidamente treinado.

Para iniciar os ensaios de potência máxima do motor do veículo, devem-se seguir 17 passos, com o auxílio de 2 técnicos mais o motorista do automóvel, foram citados 3 procedimentos principais, todos os procedimentos estão descrito no anexo C:

- ✓ Ligar o dinamômetro e escolher a opção de desempenho do motor;
- ✓ Colocar o aspirador de gases de escape no veículo (sistema de exaustão). A distância até o cano de escape é de aproximadamente 20 cm;
- ✓ Ligar o veículo e engatar a 1º marcha a uma velocidade de aproximadamente 5 km/h para ajustar o mesmo sobre o prisma de rolos e, em seguida, puxar o freio de estacionamento do veículo.

Como pode ser observado, para realização do ensaio de potência máxima para cada combustível são necessários cerca de 40 procedimentos de preparação do equipamento, como também a participação de 3 pessoas, em virtude da segurança e da precisão do ensaio.

Para a realização dos ensaios de potência máxima do motor do veículo, o software do dinamômetro de chassi precisa ter os parâmetros de entrada fornecidos para cada veículo ensaiado. O técnico deve escolher a opção de desempenho do motor na tela principal e seguir as operações abaixo:

- 1 Inserir os parâmetros do software relativos ao veículo:
 - ✓ Tipo de veículo: carro de passeio;
 - ✓ Tipo de tração: dianteira;
 - ✓ Tipo de bobina: RUV faísca dupla;
 - ✓ Tipo de transmissão: mecânica;
 - ✓ Tipo de correção de potência: correção conf. DIN.

2 Inserir os parâmetros do software relativos ao combustível. Estes parâmetros devem ser inseridos no software FLA203 BOSCH, de acordo com o combustível a ser ensaiado, conforme Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros de entrada do software do dinamômetro.

Parâmetros de entrada	Potência Nominal (kW)	Rotação Nominal (rpm)	Velocidade Máxima (km/h)
Gasolina comum	59	5500	135
Mistura de 50% em volume etanol/gasolina	60	5500	135
Etanol	60	5500	135
Gás natural veicular	50	5500	135

Os valores dos dados de entrada do dinamômetro de chassi foram arredondados, conforme consta na Tabela 4, pois a resolução do software não aceita casas decimais. Os valores reais dos parâmetros são os informado pelo fabricante do veículo, conforme a Tabela 4.

3.4.1.1 Execução do Ensaio de Potência Máxima do Motor

O ensaio de potência máxima do motor do veículo começa com o técnico iniciando o funcionamento do veículo em 1º marcha e, quando o motor do veículo atingir metade do número nominal de rotações, é realizado o mais rápido possível, a mudança para 4º marcha, por que nesse caso era a marcha com a relação mais próxima de 1:1, como específica o manual do dinamômetro. Em seguida, acelera até que o visor do dinamômetro mostre a mensagem para “desengatar”, quando deve-se colocar em o câmbio em neutro e tirar o pé do acelerador até a parada dos rolos. Este procedimento

deve ser executado no mínimo três (vezes), para obter um valor médio representativo para os ensaios em cada tipo de combustível.

3.4.2 Ensaio de Consumo Específico de Combustível

A determinação do consumo específico de combustível foi escolhida porque é um parâmetro utilizado para comparação da eficiência de motores diferentes ou utilizando combustíveis diversos. A partir do consumo volumétrico de combustível, que é medido como a vazão de mássica do combustível por unidade de tempo.

Um parâmetro mais útil é o consumo específico de combustível (C_{sc} a taxa de fluxo de combustível por unidade de potência). Mede quão eficientemente um motor está usando o combustível fornecido para produzir trabalho mecânico.

A realização da determinação dos ensaios de consumo volumétrico de combustível foi realizada da seguinte forma:

- ✓ O veículo Fiat Siena é posicionado no dinamômetro de chassi, modelo FLA 203, fabricante BOSCH;
- ✓ O combustível a ser ensaiado, líquido ou gasoso nos seus recipientes de armazenamento é colocado em uma balança, para medição de sua massa;
- ✓ O veículo é colocado em movimento a uma rotação constante. Foi realizado ensaios nas seguintes rotações 2.000, 3.000, 3.500, 4.000 e 5.000 em quarta marcha;
- ✓ É estabelecido um tempo de 120 segundos para há execução do ensaio.

A massa de combustível, consumida como o tempo de execução do ensaio, será registrada numa tabela com a forma da Tabela 5.

Tabela 5. Consumo horário de combustível.

Rotação rpm	Tempo s	Massa g
2.000	120	
3.000	120	
3.500	120	
4.000	120	
5.000	120	

As medidas de segurança para a realização dos ensaios de consumo específico de combustível foram as mesmas utilizadas para os ensaios de potência máxima do motor.

Para a medição do consumo específico de combustível, através do dinamômetro, o veículo deve ser levado à área de ensaios e devem ser executadas as seguintes operações:

- ✓ Quando o veículo não for ensaiado com gás natural veicular (GNV), o reservatório do combustível do veículo deve ser drenado totalmente, assegurando-se a sua completa limpeza, e reabastecido com o combustível a ser submetido ao ensaio. Neste trabalho, foram utilizados o tanque e a bomba externa de combustível como reservatório;
- ✓ Para os ensaios de veículos movidos a gás natural veicular, recomenda-se que a pressão mínima do cilindro no início do ensaio seja superior a 80 bar ou conforme a especificação do fabricante.

O dinamômetro de chassi deve ser aquecido de 15 minutos, à velocidade de 50 km/h, com um veículo não destinado ao ensaio, ou de acordo com instruções do fabricante do dinamômetro.

3.4.3 Cálculo do Consumo Específico de Combustível

A medição do consumo horário de combustível durante os ensaios foi efetuada pelo método gravimétrico, que consiste na medição direta da massa do combustível fornecido ao veículo durante os ensaios, em (gramas* segundos⁻¹), para cada rotação de ensaio, pela seguinte equação 10.

$$\text{Consumo horário} = \text{massa do combustível (g)} * \text{tempo do ensaio}^{-1} \text{ (s)} \quad (\text{eq.10})$$

Para o cálculo do consumo específico de combustível, o consumo volumétrico é dividido pela potência do motor em cada faixa rotação para cada energético utilizado no ensaio, como mostra a equação 5 na seção 2.4.3 Consumo Específico de Combustível.

$$C_{sc} = m(\text{g}) * [\text{Pot}(\text{kW}) * t(\text{h})]^{-1} \quad (\text{eq.5})$$

3.4.4 Cálculo do Torque do Motor

Para o cálculo do torque do motor e posteriormente a determinação da curva de torque em função da rotação do motor, para cada combustível ensaiado, teve como parâmetro os ensaios de potência máxima do motor. Com os valores de potência para cada rotação determinada foi calculado o torque pela equação 4.

$$\text{Torque} = 716,2 * \text{Pot}(\text{cv}) * N(\text{rpm})^{-1} \quad (\text{eq.4})$$

Para cada combustível foi calculado o torque nas rotações determinadas de 2.000, 3.000, 3.500, 4.000 e 5.000 rpm e preenchida a Tabela 6 com os valores obtidos.

Tabela 6. Torque x rpm.

Rotação rpm	Torque m - kgf
2.000	
3.000	
3.500	
4.000	
5.000	

Através dos valores obtidos e registrados na tabela 6, foi determinada a curva de torque versus rotação do motor do veículo para cada combustível ensaiado no dinamômetro.

3.4.5 Rendimento Global do Motor

A determinação do rendimento global indica a eficiência no uso do combustível na produção de trabalho mecânico no eixo do motor.

Para calcular o rendimento global do motor, é usada a seguinte razão, o quociente da potência máxima efetiva pela potencia máxima teórica definido na equação 9.

$$\text{Rendimento Global} = \text{Potência Efetiva} * \text{Potência Teórica}^{-1} \quad (\text{eq.9})$$

Onde η_{global} é um número adimensional menor que a unidade, logo sua multiplicação por 100% indica o valor do rendimento global do motor para cada combustível em %. Após os ensaios, os dados obtidos serão inseridos em uma tabela do tipo tabela 7 para mostrar, comparativamente, os valores obtidos.

Tabela 7. Rendimento Global para cada Combustível Testado.

Combustível	η_{global}
Etanol	
Gasolina C	
GNV	
Mistura	

Capítulo 4
Resultados e Discussão

4. Resultados e Discussão

Este capítulo apresenta os resultados experimentais e teóricos obtidos nos ensaios realizados com o Fiat Siena FIRE tetrafuel, seguidos de uma discussão sobre cada resultado obtido.

4.1 Resultados dos Ensaio de Potência do Motor

Neste capítulo, são apresentados os resultados dos ensaios de potência máxima teórica, potência máxima efetiva e da determinação da curva de potência efetiva do motor para cada energético utilizado nos ensaios com o motor Fiat FIRE tetrafuel em função da rotação.

4.1.1 Resultados do Cálculo de Potência Máxima Teórica

A tabela 8 apresenta os valores de potência máxima teórica resultante para a rotação 5.000 rpm do motor FIAT FIRE tetrafuel. Este valor de rotação foi escolhido porque foi o maior regime de rotações, no qual foi medido o consumo de combustível horário para cada energético utilizado nos ensaios. Para o cálculo da potência máxima teórica, foi utilizada a equação 1 (pagina 38).

Tabela 8. Potência máxima teórica.

Combustível	Potência teórica
Etanol	150,85 kW
Gasolina C	165,07 kW
GNV	166,52 kW
Mistura 50%	194,25 kW

Dentre os combustíveis analisados, a mistura de 50% em volume de etanol e gasolina C teve a maior potência máxima teórica fornecida ao motor FIAT FIRE tetrafuel, com o valor de 194,25 kW. Esse valor pode ser explicado porque a equação 1 da potência máxima teórica, é basicamente o produto do poder calorífico do combustível pelo seu consumo horário. Esse energético apresentou o maior valor de consumo horário de combustível (ver seção 5.2.1 Resultados do Consumo Horário de Combustível), logo, essa variável é diretamente proporcional à potência máxima teórica, justificando o seu maior valor.

O GNV apresentou o segundo maior valor de potência máxima teórica fornecida ao motor FIAT FIRE tetrafuel, com o valor de 166,52 kW. Devido, em grande parte, ao seu alto poder calorífico inferior (10.900 kcal/kg), esta variável é diretamente proporcional à potência máxima teórica, compensando o menor consumo horário de combustível.

A gasolina C apresentou valor de potência máxima teórica fornecida ao motor FIAT FIRE tetrafuel, com o valor de 165,07 kW. Ficando com o valor de potência máxima teórica abaixo do GNV, por causa da mistura de 25% de etanol anidro contida na gasolina C. Na gasolina pura tem uma quantidade de energia ou poder calorífico de 10.600 kcal/kg, na gasolina C com adição de etanol anidro tem um poder calorífico inferior reduzido para 9.550 kcal/kg em virtude de o etanol apresentar 6.400 kcal/kg de poder calorífico. Isso faz com que o valor da potência máxima teórica fornecida ao motor Fiat FIRE tetrafuel seja menor.

O etanol teve a menor potência teórica fornecida ao motor Fiat FIRE tetrafuel com o valor de 150,85 kW. Esse valor está relacionado com o menor poder calorífico inferior do combustível (6.400 kcal/kg) em comparação ao outros combustíveis.

Esse resultado de potência máxima teórica é importante para o cálculo do Rendimento Global do Motor (ver seção 5.4 Resultados do Cálculo do Rendimento Termomecânico do Motor).

4.1.2 Resultados dos Ensaio de Potência Máxima Efetiva

A Tabela 9 apresenta o resultado do ensaio de potência máxima efetiva do motor Fiat FIRE tetrafuel, para cada combustível testado no dinamômetro, com as respectivas rotações, onde ocorre o pico de potência para cada energético utilizado.

Tabela 9. Potência máxima efetiva obtida.

Combustível	Potência efetiva
GNV	50,2 kW a 5.290 rpm
Gasolina C	58,4 kW a 5.260 rpm
Etanol	59,3 kW a 4.940 rpm
Mistura 50%	60,5 kW a 5.280 rpm

Dentre os combustíveis analisados, a mistura de 50% em volume de etanol e gasolina C teve a maior potência máxima efetiva fornecida do motor FIAT FIRE tetrafuel, com o valor de 60,5 kW a 5280 rpm. O resultado pode ser explicado porque a mistura 50% em volume de etanol e gasolina C, tem 62,5% de etanol e 37,5% de gasolina em sua composição. Por essa razão, a mistura 50% de etanol e gasolina C se beneficia das propriedades antidetonantes do etanol, fato relatado por Silva *et al.* (2005). Por causa dessa propriedade o motor Fiat FIRE tetrafuel pode aumentar o avanço de ignição, sem haver detonação no mesmo, melhorando a potência máxima efetiva. A composição do combustível explica o maior valor encontrado para potência máxima efetiva. A mistura apresenta um maior poder calorífico em comparação com o etanol (7.975 kcal/kg contra 6.400 kcal/kg). Por esse motivo, a mistura de 50% entregava mais energia por unidade de volume ao motor FIAT FIRE tetrafuel.

O etanol apresentou a segunda maior potência máxima efetiva fornecida do motor FIAT FIRE tetrafuel como valor de 59,3 kW a 4.940 rpm. O resultado com etanol pode ser explicado porque o etanol apresenta melhor propriedades antidetonante. Por essa característica do combustível, pode-se afirmar que quando alimentado com o etanol, o sistema ignição pode trabalhar com um avanço maior da ignição, favorecendo a potência máxima efetiva. Outro fator que explica o valor de potência máxima efetiva é

que o etanol trabalha comparativamente com uma relação rica de ar/combustível, conforme observado por Owen (1995).

A gasolina C teve com resultado de potência máxima efetiva fornecida do motor FIAT FIRE tetrafuel o valor de 58,4 kW a 5.260 rpm. O valor de potência máxima efetiva é próximo ao resultado com etanol, cerca de 98%. Para explicar o fato de que a potência máxima efetiva da gasolina C e do etanol serem muito próximas, observamos o fato de que o motor FIAT FIRE tetrafuel apresenta uma razão de compressão de 10,5:1, o que é um valor adequado para gasolina C, mas é um valor baixo para o etanol. Segundo trabalhos de Costa *et. al.*, (2009) o etanol tem maior desempenho com valores maiores da razão de compressão.

O GNV apresentou o menor valor de potência máxima efetiva fornecida do motor Fiat FIRE tetrafuel, com o valor de 50,2 kW a 5.290 rpm. Esse valor mostra que o gás natural apresenta uma potência efetiva cerca de 15% inferior a da gasolina C. Como o etanol e a mistura de 50% de etanol e gasolina C, o GNV também perde desempenho com a razão de compressão de 10,5:1. Segundo Zareh (1998), os motores Otto alimentados com gás natural, tem melhor rendimento com razões de compressão na ordem de 12 a 13:1. O mesmo pesquisador afirma que a menor potência máxima efetiva desenvolvida pelo motor Fiat FIRE tetrafuel, com o uso do GNV, é devido à menor eficiência volumétrica com o uso do combustível gasoso. Essa variável pode ser definida como a massa de mistura fresca que passa no cilindro, em um curso de aspiração, dividida pela massa dessa mistura que encheria o espaço correspondente ao deslocamento do pistão, na densidade de admissão (TAYLOR, 1971).

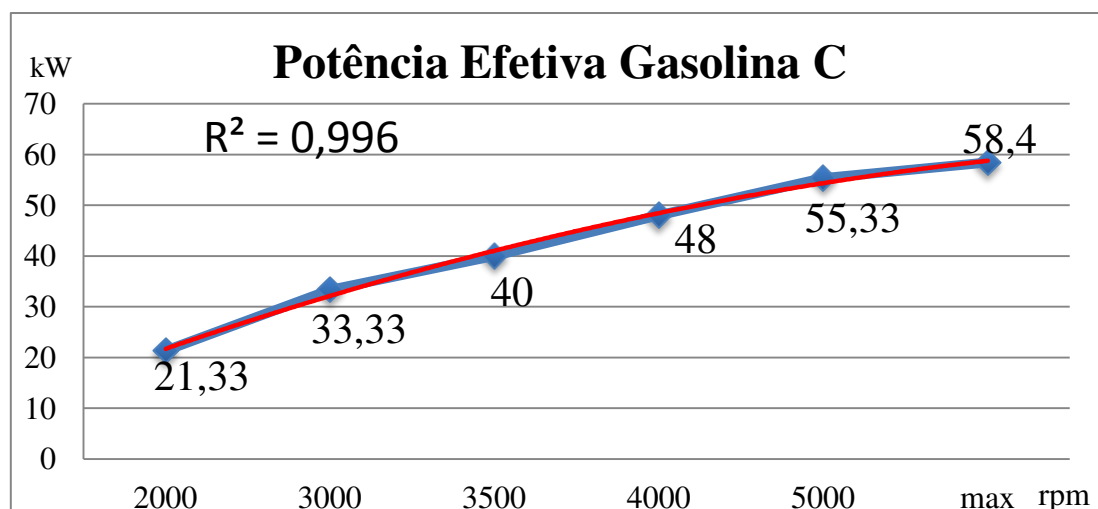
4.1.3 Determinação da Curva de Potência Efetiva do Motor

Os valores de potência máxima efetiva do motor Fiat FIRE tetrafuel, obtidos em cada faixa de rotação para cada combustível, são apresentados no apêndice A.

As Figuras 33 a 36 apresentam o gráfico de potência efetiva, obtida em função da rotação para cada combustível, usando os dados no apêndice A.

A Figura 33 apresenta o gráfico da curva de potência efetiva em função da rotação para a gasolina C.

Figura 33. Gráfico da potência efetiva da gasolina x rpm.

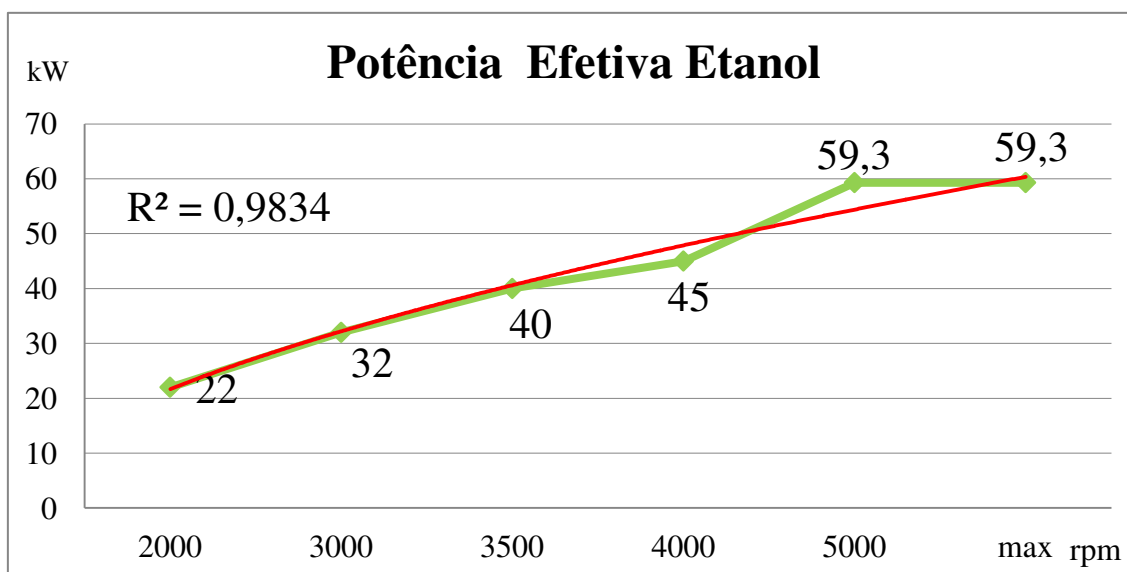


Fonte: arquivo do autor, 2011

Com esse combustível, o motor FIAT FIRE tetrafuel obteve uma curva de potência efetiva, com o melhor ajuste uma função polinomial, como observado no gráfico o valor de $R^2 = 0,996$. O maior valor de potência efetiva foi de 58,4 kW em 5.260 rpm.

A Figura 34 apresenta o gráfico da curva de potência efetiva obtida em função da rotação para o etanol.

Figura 34. Gráfico da potência efetiva do etanol x rpm

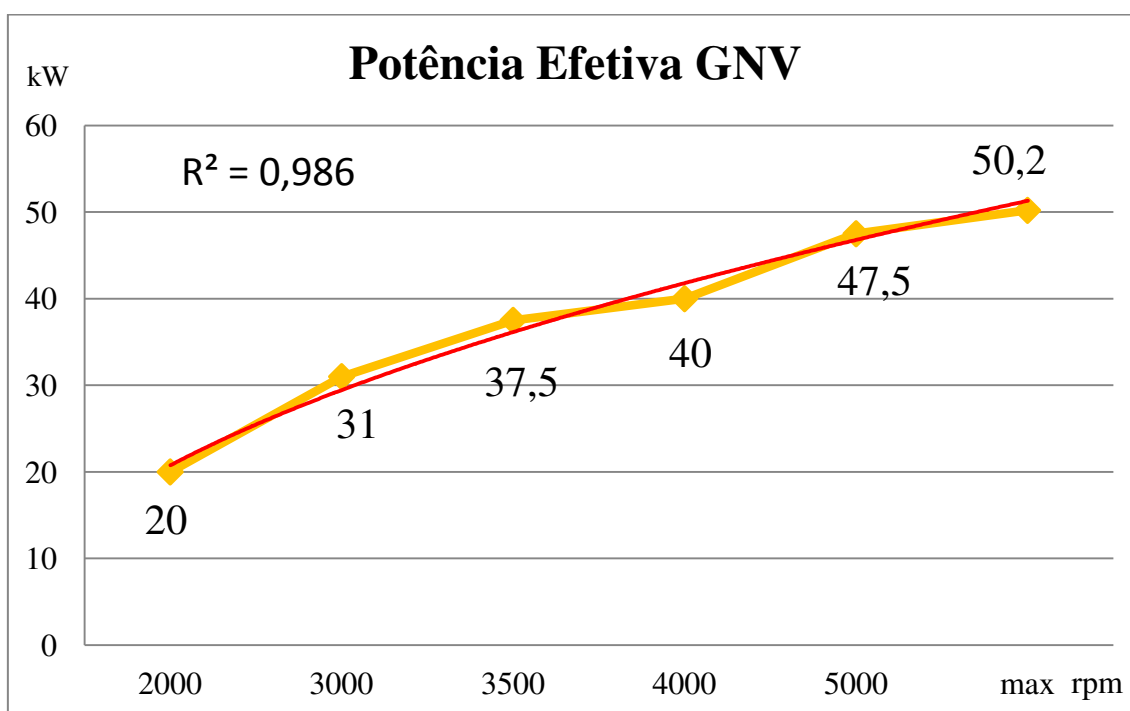


Fonte: arquivo do autor, 2011

Com esse combustível, o motor Fiat FIRE tetrafuel obteve uma curva de potência efetiva, com o melhor ajuste uma função potencial, com o valor de $R^2 = 0,9834$. Acima de 4000 rpm há um aumento da potência acima da linha de tendência (em vermelho no gráfico). É possível explicar essa elevação de potência efetiva devido ao etanol em rotações elevadas ter uma maior pressão de vapor, e com isso gerar uma maior pressão no cilindro, assim produzindo maior trabalho pelo pistão. Este fato foi estudado por Owen (1995). O valor máximo de potência efetiva foi de 59,3 kW em 4.940 rpm no dinamômetro.

A Figura 35 apresenta o gráfico da curva de potência efetiva obtida em função da rotação para o GNV.

Figura 35. Gráfico da potência efetiva do GNV x rpm.

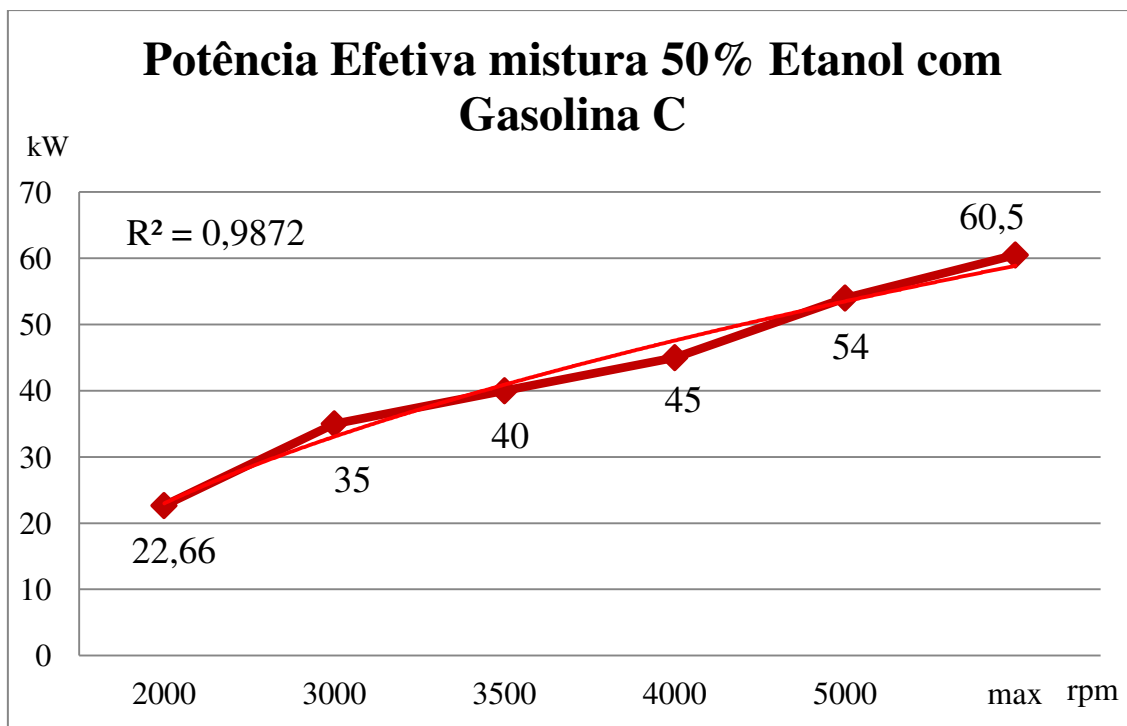


Fonte: arquivo do autor, 2011

Com esse combustível, o motor Fiat FIRE tetrafuel apresentou uma curva de potência efetiva, com o melhor ajuste uma função potencial, com o valor de $R^2 = 0,986$. Na rotação de 4.000 rpm houve uma elevação da potência efetiva abaixo da linha de tendência (linha vermelha no gráfico), que indica que nesse valor de rotação houve uma menor eficiência volumétrica do motor. O motor testado obteve uma potência efetiva máxima de 50,2 kW em 5.290 rpm no dinamômetro.

A Figura 36 apresenta o gráfico da curva de potência efetiva obtida em função da rotação para a mistura de 50% de etanol com gasolina C.

Figura 36. Gráfico da potência efetiva da mistura 50% etanol com gasolina x rpm.

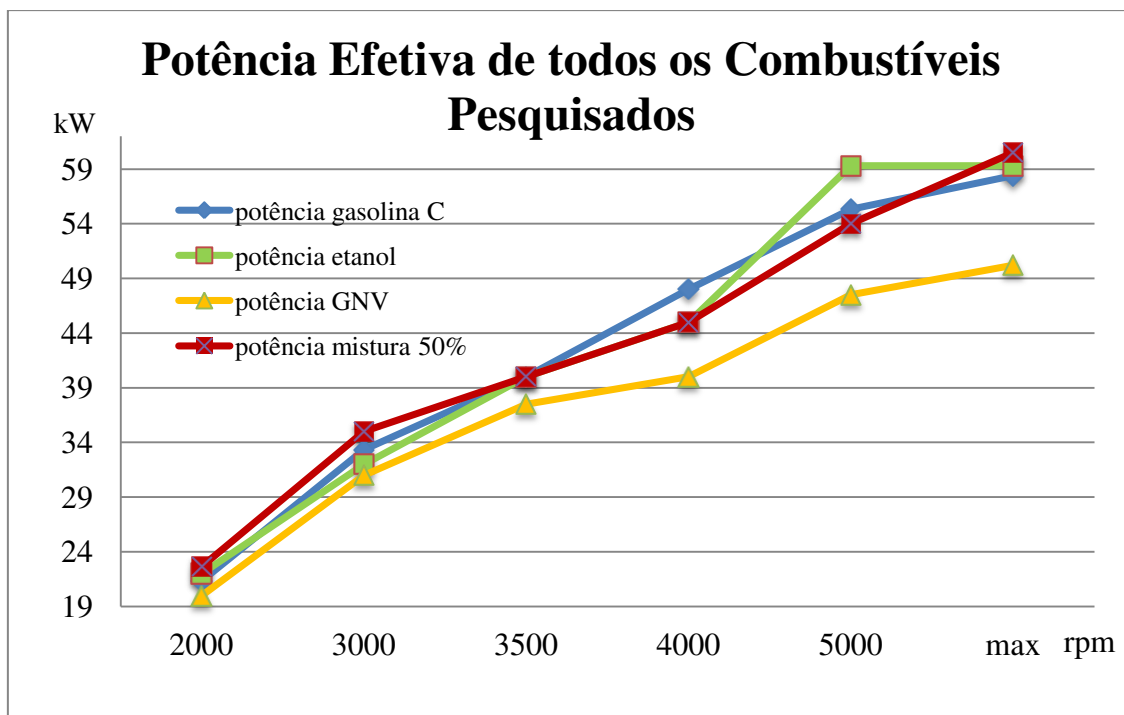


Fonte: arquivo do autor, 2011

Com esse combustível, o motor FIAT FIRE tetrafuel apresentou uma curva de potência efetiva, com o melhor ajuste uma função potencial, com o valor de $R^2 = 0,9872$. Na rotação de 4.000 rpm houve uma elevação da potência efetiva abaixo da linha de tendência (linha vermelha no gráfico), indicando que pode haver um ajuste não adequado do sistema de injeção de combustível do veículo para essa rotação. Pois o sistema flexfuel não trabalha com mapa de injeção para esse combustível (mistura de 50% de etanol com gasolina C) e sim com mapas para etanol e gasolina C. A partir disso, o ajuste do sistema de alimentação é feito por meio de interpolações dos mapas principais (mapas para etanol e gasolina C) e para adequar os parâmetros do motor (tempo de injeção e avanço de ignição) para a mistura de 50% de etanol com gasolina C. O motor obteve uma potência efetiva máxima de 60,5 kW em 5.280 rpm no dinamômetro, com há mistura de 50% de etanol com gasolina C.

A Figura 37 apresenta o gráfico das curvas de potência efetiva, obtidas em função da rotação de todos os combustíveis pesquisados.

Figura 37. Gráfico da potência efetiva em função da rotação de todos os combustíveis.



Fonte: arquivo do autor, 2011

A Tabela 10 mostra os valores em percentual da variação de potência efetiva do etanol, GNV e da mistura de etanol com gasolina em 50% de volume em relação à gasolina C.

Tabla 10. Variação de potência efetiva em relação à gasolina C.

Rotação (rpm)	Δ Etanol	Δ GNV	Δ mistura 50%
2.000	3,15%	-6,30%	6,30%
3.000	-4%	-7,00%	5,10%
3.500	0	-6,25%	0
4.000	-6,25%	-16,70%	-6,25%
5.000	7,20%	-14,20%	-2,40%
max	1,60%	-14,10%	3,60%

A partir dos dados da Tabela 10 e do gráfico da Figura 37, é possível concluir que a mistura de 50% de etanol e gasolina C tem uma potência efetiva a 2000 rpm de

22,66 kW. Comparando com o valor da potência efetiva da mistura de 50% de etanol e gasolina C com o da gasolina C, a mesma rotação mostra que essa potência é 6,30% maior. Esse resultado pode ser explicado pelo fato da mistura de 50% de etanol e gasolina C ter alto teor de etanol (62,5% de etanol e 37,5% de gasolina). Isso faz que a central eletrônica do sistema de injeção faça o enriquecimento da mistura ar/combustível. Esse procedimento feito pelo sistema de injeção é devido à mistura de 50% de etanol e gasolina C ter menor poder calorífico que a gasolina C (7.975 kcal/kg contra 9.550 kcal/kg).

Para o etanol, a partir dos dados da Tabela 10 e do gráfico da Figura 36, observa-se que o combustível tem uma potência efetiva a 2000 rpm de 22 kW. Comparando com o valor da potência efetiva da gasolina C, a mesma rotação mostra que essa potência é 3,15% maior. Esse fato pode ser explicado porque com o uso do etanol, a central eletrônica do sistema de injeção faz o enriquecimento da mistura ar/combustível devido ao baixo poder calorífico em relação à gasolina C. Fato este estudado por Li *et al.* (2003) quando adaptaram um motor de uma motocicleta originalmente alimentado com gasolina para uso com etanol. Os autores apresentaram como resultado um aumento no tempo de injeção de combustível em 62%, para compensar o menor poder calorífico do etanol, apresentaram também um aumento de potência de 5,4% em relação à gasolina.

O GNV apresentou, a partir dos dados da Tabela 10 e do gráfico da Figura 36, uma potência efetiva a 2.000 rpm de 20 kW. Comparando com o valor da potência efetiva da gasolina C, a mesma rotação mostra que essa potência é inferior a gasolina em 6,30%. Este fato pode ser explicado porque o motor FIAT FIRE tetrafuel tem uma razão de compressão de 10,5:1, valor considerado baixo para o GNV, indicando que com um maior valor na razão de compressão poderia aumentar a potência do motor FIAT FIRE tetrafuel. Como mostram trabalhos de Souza *et al.*, (2003) mantendo os parâmetros do motor Volkswagen AP originais para gasolina e comparando quando alimentado com GNV, teve uma redução no melhor resultado do ensaio de potência efetiva de 14,3% em relação à gasolina C, e atribuiu esse o valor da razão de compressão baixo para o GNV, como também o avanço de ignição pouco adiantado, pelo resultado inferior ao da gasolina C.

No regime intermediário de rotações do motor (de 3.000 a 4.000 rpm), a mistura de 50% de etanol com gasolina C apresentou uma potência efetiva a 3.000 rpm de 35 kW. Comparando esse valor da potência efetiva com o valor da gasolina C, a mesma rotação mostra que essa potência é 5,10% maior. Esse fato pode ser explicado porque com o uso da mistura de 50% de etanol e gasolina C, a central eletrônica do sistema de injeção faz o enriquecimento da mistura ar/combustível.

Na faixa de 3.500 e 4.000 rpm, a mistura 50% de etanol com gasolina C apresentou uma potência efetiva, respectivamente, de 40 e 45 kW. Comparando esses valores de potência efetiva com os da gasolina C, a mesma rotação mostra que essa potência é respectivamente igual para a rotação de 3.500 rpm e inferior em 6,25% para a rotação de 4.000 rpm. Esse fato pode ser explicado pelo menor poder calorífico da mistura 50% de etanol com gasolina C, sendo assim o sistema de alimentação do motor FIAT FIRE tetrafuel, mesmo enriquecendo a mistura não compensa o menor poder calorífico da mistura 50% de etanol com gasolina C.

O etanol no regime intermediário de rotações do motor (de 3.000 a 4.000 rpm), apresentou uma potência efetiva a 3.000 rpm de 32 kW. Comparando com o valor da potência efetiva da gasolina C, a mesma rotação mostra que essa potência é 4% inferior. Na faixa de 3.500 e 4.000 rpm, o etanol apresentou uma potência efetiva respectivamente de 40 e 45 kW. Comparando com o valor da potência efetiva da gasolina C, a mesma rotação mostra que essa potência é respectivamente igual em 3500 rpm e é inferior em 6,25% a 4.000 rpm. Esse resultado se dá pelo menor poder calorífico do etanol em comparação ao da gasolina C. Também se pode atribuir o valor da razão de compressão do motor FIAT FIRE tetrafuel ser baixo para o etanol. Logo isso faz com que o motor não aproveite todo poder do combustível. Costa *et al.*, (2009) em estudo com um motor FIAT FIRE de um litro, encontraram resultados em regime intermediário de rotações, indicando maior valor de potência efetiva da gasolina C, 2,4% em relação ao etanol, atribuindo o menor poder calorífico do etanol como causa da menor potência encontrada.

No regime intermediário de rotações de 3.000 a 4.000 rpm, o GNV apresentou uma potência efetiva a 3.000 rpm de 31 kW. Comparando com o valor da potência efetiva da gasolina C, a mesma rotação mostra que essa potência é 7% inferior. Na faixa

de 3500 e 4000 rpm o GNV apresentou uma potência efetiva respectivamente de, 37,5 e 40 kW. Comparando com o valor da potência efetiva da gasolina C, a mesma rotação mostra que essa potência é, respectivamente, 6,25 e 16,70% inferior. Esse valor pode ser explicado porque o motor FIAT FIRE tetrafuel, quando alimentado com o gás natural, tem uma menor eficiência volumétrica na aspiração de mistura ar/combustível. Em relação ao aumento da diminuição de potência efetiva, se dá com o aumento da rotação do motor, porque com o aumento da rotação há uma diminuição natural da eficiência volumétrica, pelo menor tempo de admissão da mistura ar/combustível. Também se pode atribuir o valor da razão de compressão do motor Fiat FIRE tetrafuel ser baixo para o GNV. Segundo Muños *et al.* (2000) em ensaio realizado com motor Honda 270 cm³, com o valor da razão de compressão original para gasolina obtiveram uma redução em 50% do valor de potência efetiva no motor com o uso do combustível gasoso.

No regime elevado de rotações (acima de 5.000 rpm até o regime de potência máxima), a mistura de 50% de etanol com gasolina C apresentou uma potência efetiva a 5.000 rpm de 54 kW. Comparando com o valor da potência efetiva da gasolina C, a mesma rotação mostra que essa potência é 2,4% inferior. O valor de potência efetiva ser inferior ao da gasolina C pode ser explicado pelo fato do motor ter uma razão de compressão baixa (10,5:1) para a mistura de 50% de etanol e gasolina C, o que faz com que o motor perca rendimento térmico, com isso não aproveita bem a energia do combustível. Cooney e WORM (2009) realizaram estudos variando a mistura de etanol na gasolina de E20 e E84, e variando a razão de compressão do motor de 8:1 a 16:1 indicaram que os melhores valores de potência eram obtidos com os valores maiores da razão de compressão, indicando um melhor aproveitamento do combustível.

Para o pico de potência da mistura de 50% de etanol e gasolina C, a mistura de 50% de etanol com gasolina C apresentou uma potência efetiva máxima de 60,5 kW a 5.260 rpm. Comparando com o valor do pico de potência efetiva da gasolina C, mostra que essa potência é 3,60% superior. Esse resultado é explicado porque em rotações mais elevadas, o aumento do avanço de ignição usado pelo motor FIAT FIRE tetrafuel compensa parte da perda de rendimento térmico causado pela razão de compressão do motor com valor de 10,5:1.

Para o etanol no regime elevado de rotações (acima de 5.000 rpm até o regime de potência máxima), o etanol apresentou uma potência efetiva a 5.000 rpm de 59,3 kW. Comparando com o valor da potência efetiva da gasolina C, a mesma rotação mostra que essa potência é 7,2% superior. Para o etanol valor do pico de potência foi de 59,3 kW a 4940 rpm. Comparando com o valor do pico de potência efetiva da gasolina C, mostra que essa potência é 1,60% superior. O resultado pode ser explicado porque o etanol tem velocidade de queima superior a da gasolina C, o que diminui as perdas de calor para as paredes do cilindro. Também se pode afirmar que o combustível tem uma resistência à compressão maior que a gasolina C, logo o sistema de ignição pode trabalhar com um avanço do ponto de ignição maior, favorecendo a potência do motor FIAT FIRE tetrafuel. A explicação para a diminuição da diferença de potência entre o etanol e gasolina C, se dá pelo fato de que, quando alimentado com etanol, o motor FIAT FIRE tetrafuel cortou alimentação aos 5.000 rpm, enquanto com gasolina C o corte foi aproximadamente, 5.300 rpm. Também contribuiu para a menor diferença de potência a razão de compressão baixa do motor. Costa *et al.*, (2009) encontraram valores semelhantes em um motor Fiat FIRE de um litro com o uso de etanol, obtiveram um valor de potência superior em 3,7% para o etanol em relação a gasolina C.

Para o GNV no regime elevado de rotações (acima de 5.000 rpm até o regime de potência máxima), o GNV apresentou uma potência efetiva a 5.000 rpm de 47,5 kW. Comparando esse valor da potência efetiva com o da gasolina C, a mesma rotação mostra que essa potência é 14,20% inferior. Para esse combustível, o valor do pico de potência foi de 50,2 kW a 5.290 rpm. Comparando esse valor do pico de potência efetiva com o da gasolina C mostra que essa potência é 14,10% inferior. O valor inferior de potência em relação à gasolina C é devido ao gás natural no processo de aspiração do motor se expandir. Com isso, há uma menor eficiência volumétrica do mesmo. Outra causa do valor inferior de potência em relação a gasolina C é o valor da razão de compressão ser muito baixa para o gás natural. Um trabalho de Souza *et al.*, (2003) mostra uma variação de potência de 36% para menos em relação à gasolina, devido ao sistema de alimentação de GNV ser tecnologicamente inferior ao utilizado nesse trabalho.

4.2 Resultados dos Ensaios de Consumo de Combustível

Nessa seção são apresentados os resultados obtidos dos consumos de combustível horário e específico para cada energético utilizado nos ensaios com o motor Fiat FIRE tetrafuel em função da rotação.

4.2.1 Resultado do Consumo Horário de Combustível

A Tabela 11 mostra os resultados do consumo horário de combustível para cada energético em função da rotação.

Tabela 11. Consumo horário de combustível para cada combustível em função da rpm.

Rotação (rpm)	Gasolina C (g/h)	Etanol (g/h)	GNV (g/h)	Mistura 50% (g/h)
2.000	4875,50	6750,68	3975,40	5850,59
3.000	8625,87	11401,15	6750,68	9150,93
3.500	9375,94	13501,36	8250,83	11026,12
4.000	11476,15	15376,54	11326,14	12526,23
5.000	14851,49	20252,03	13126,33	20927,10
Média	9840,99	13456,35	8685,87	11896,19

Como mostrado na Tabela 11, o consumo de combustível horário do etanol é em média 35% maior que o da gasolina C. Esse fato pode ser explicado pelo menor poder calorífico do etanol em relação à gasolina C, 6.400 kcal/kg contra 9.550 kcal/kg respectivamente. Outro fator que contribui para o maior consumo do etanol é a baixa razão de compressão, que diminui o aproveitamento térmico do combustível, elevando o gasto do mesmo. Li *et al.*, (2003) testaram o uso de etanol em um motor de motocicleta originalmente a gasolina, e obtiveram um aumento de 50% no consumo de combustível em relação a gasolina.

Para a mistura de etanol com gasolina 50% em volume, temos um consumo médio de 20% a mais em relação à gasolina C, semelhante ao etanol. O que explica o maior consumo de combustível é o menor poder calorífico da mistura em relação à gasolina C, 7.900 kcal/kg contra 9.550 kcal/kg, respectivamente. Como o motor tem baixa razão de compressão diminui o aproveitamento do maior octanagem do combustível e diminui o aproveitamento térmico do mesmo. Amirruddin, (2009)

também apresentou como resultado um aumento de 50% no consumo de combustível, quando utiliza misturas de etanol e gasolina em um motor Ford ZETEC.

O GNV apresentou um consumo de combustível em média 13,4% menor do que em relação à gasolina C. Devido o gás natural ter um poder calorífico ligeiramente maior que a gasolina C, 11.000 kcal/m³ contra 9.550 kcal/kg, respectivamente. Outro fator que contribui para o menor consumo de combustível se dá pela expansão do GNV, quando é admitido pelo motor. Com isso, há um menor rendimento volumétrico, levando uma menor quantidade de mistura a entrar no cilindro do motor FIAT FIRE tetrafuel.

4.2.2 Resultados do Consumo Específico de Combustível

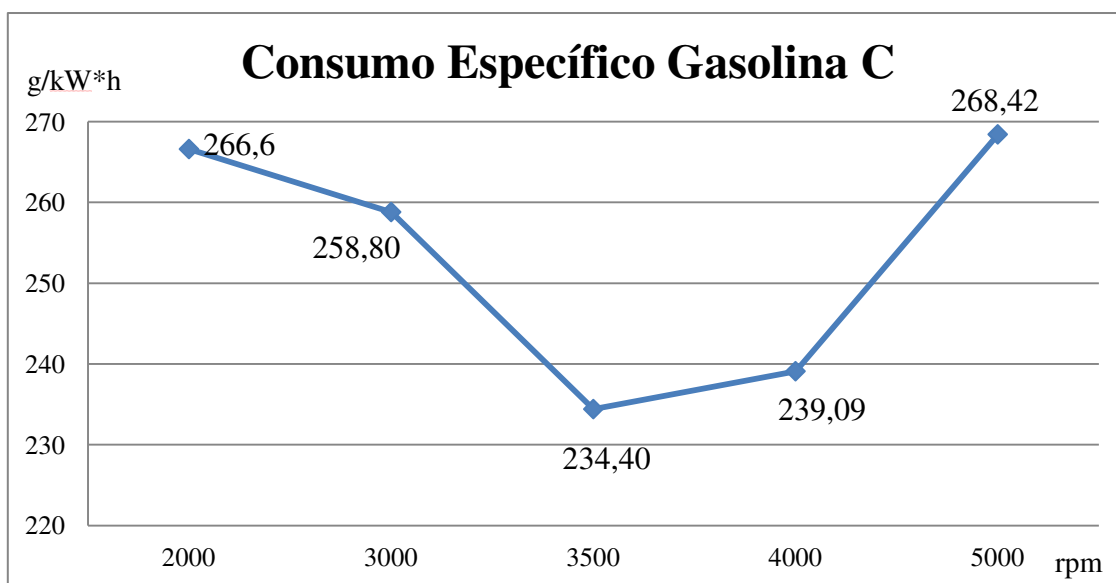
A partir dos valores de potência efetiva e do consumo horário de combustível obtidos em cada faixa de rotação, foi determinado o consumo específico de combustível do motor FIAT FIRE tetrafuel, para cada combustível ensaiado.

O consumo específico de combustível para cada energético em função da rotação é apresentado no Apêndice B.

As Figuras 38 a 41 apresentam o gráfico do consumo específico de combustível do motor Fiat FIRE tetrafuel, usando os dados do Apêndice B.

Para gasolina C, tem-se a Figura 38 com o gráfico da curva de consumo específico de combustível em função da rotação.

Figura 38. Gráfico do consumo específico de combustível para gasolina C x rpm.

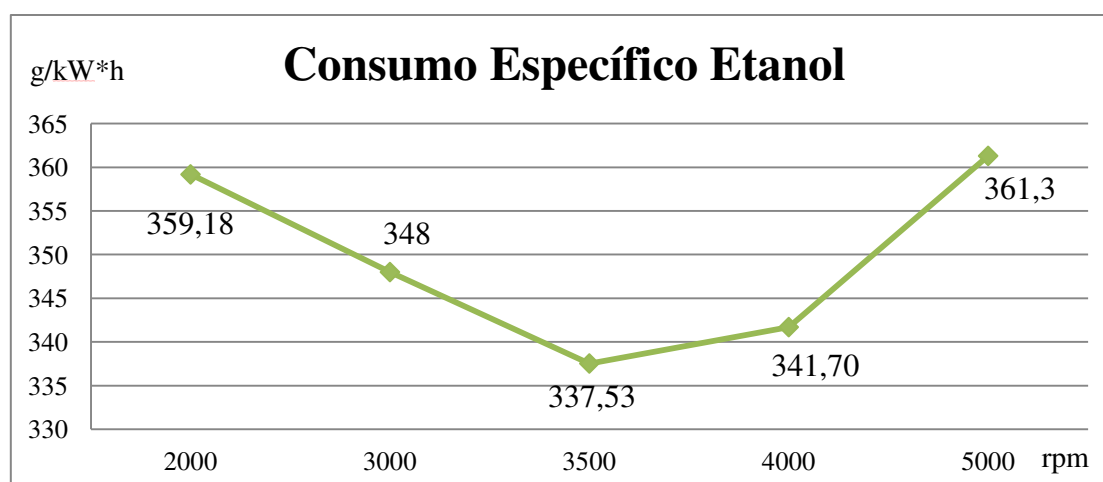


Fonte: arquivo do autor, 2011

Com esse combustível, o motor FIAT FIRE tetrafuel obteve um consumo específico médio de 245,86 g/kW*h. Com a gasolina C em 3000 rpm houve um aumento súbito do consumo específico de combustível com o valor de 258,80 g/kW*h. Como esperado nos regimes mais elevados de rotação, há um maior consumo específico de combustível com valor máximo de 268,42 g/kW*h, devido ao enriquecimento da mistura ar/combustível para produzir a máxima potência do motor.

Para o etanol, tem-se a Figura 39 com gráfico da curva de consumo específico de combustível em função da rotação.

Figura 39. Gráfico do consumo específico de combustível para o etanol x rpm.

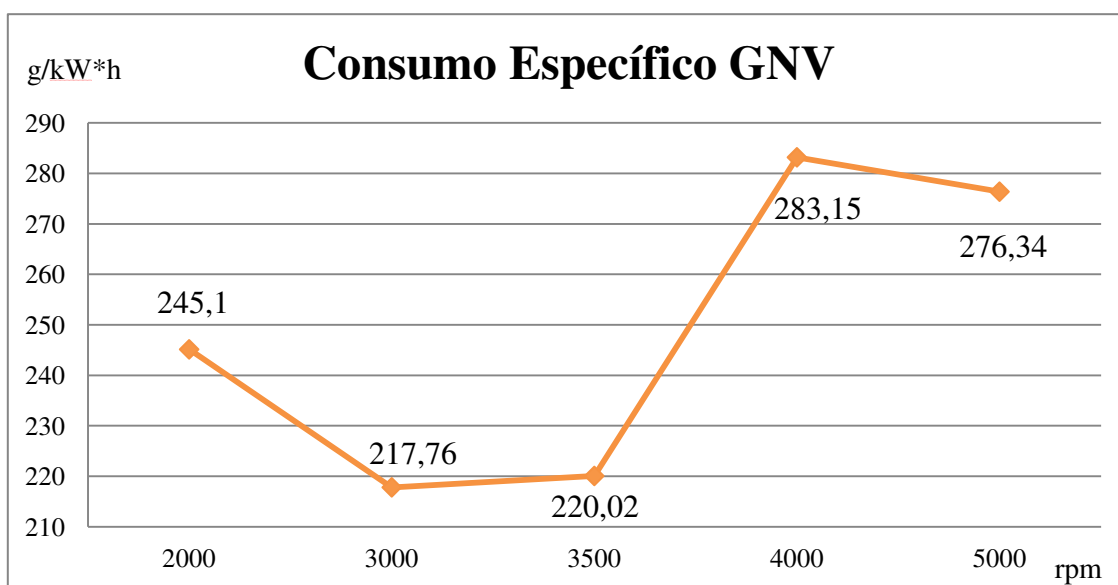


Fonte: arquivo do autor, 2011

Com esse combustível, o motor obteve um consumo específico médio de 349,54 g/kW*h. Em 5.000 rpm é onde há um maior consumo específico de combustível, com o valor de 361,30 g/kW*h, utilizando o etanol .

Para o GNV, a Figura 40 com o gráfico com a curva de consumo específico de combustível em função da rotação.

Figura 40. Gráfico do consumo específico de combustível para o GNV x rpm.

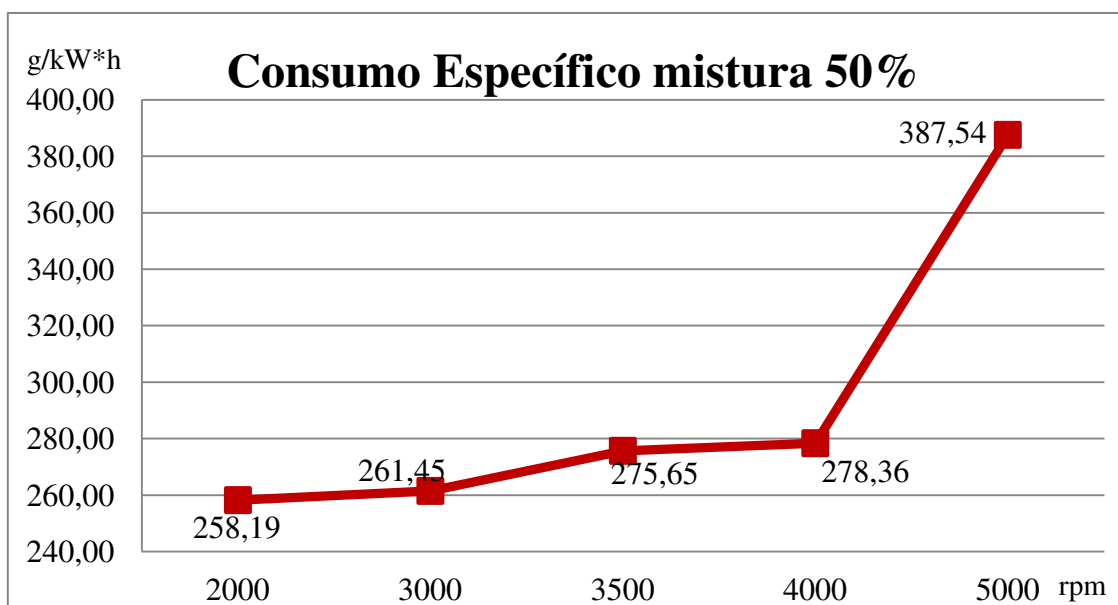


Fonte: arquivo do autor, 2011

Com esse combustível o motor obteve um consumo específico médio de 228,48 g/kW*h. Em 4000 rpm é onde há um maior consumo específico desse combustível, com o valor de 283,15 g/kW*h. A faixa de uso mais eficiente desse combustível é entre 2.000 a 3.000 rpm, pois apresenta o menor consumo específico.

Para a mistura de 50% de etanol com gasolina, a Figura 41, com o gráfico da curva de consumo específico de combustível em função da rotação.

Figura 41. Gráfico do consumo específico de combustível para mistura de 50% x rpm.

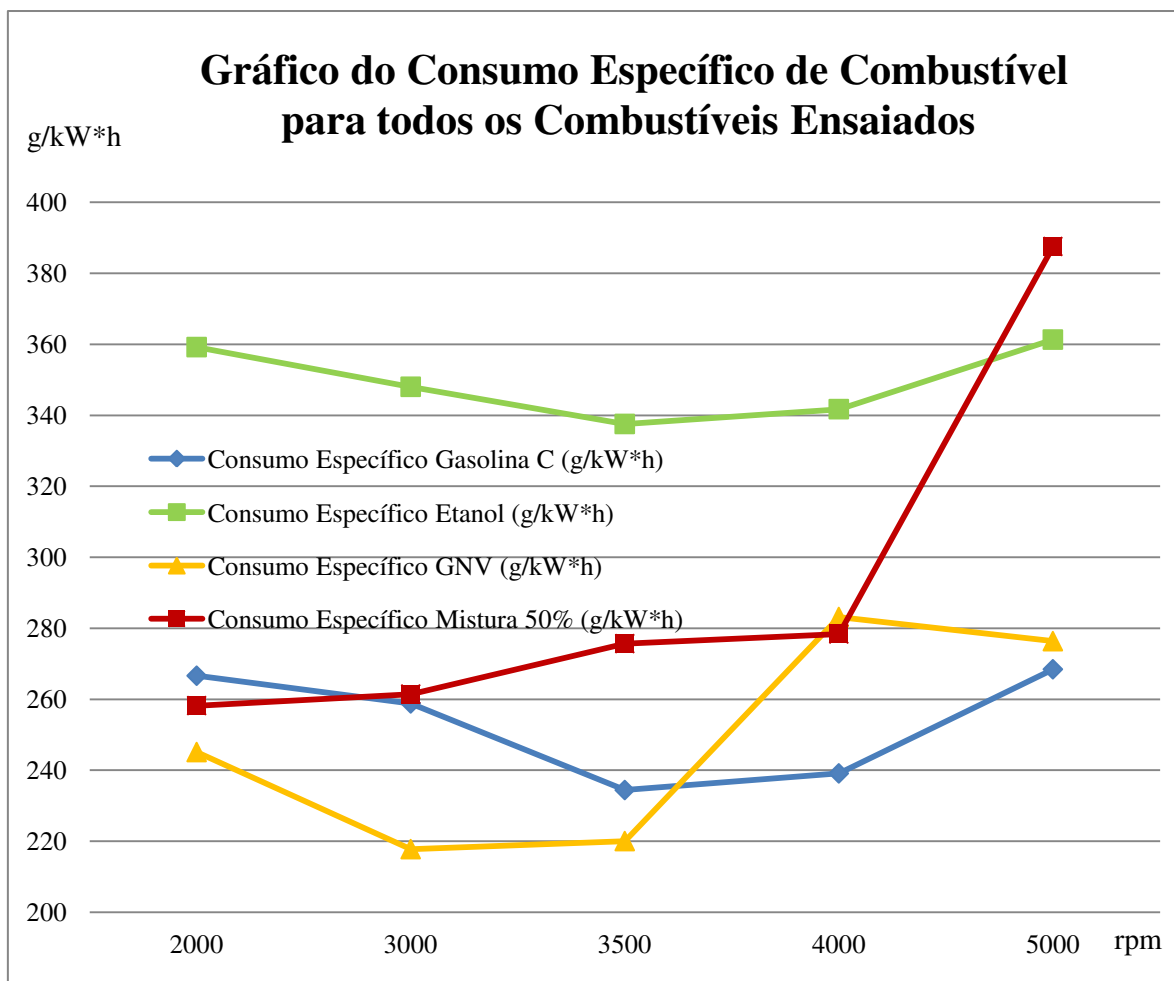


Fonte: arquivo do autor, 2011

Com esse combustível, o motor obteve um consumo específico médio de 292,24 g/kW*h. Como esperado nos regimes mais elevados, há um maior consumo específico de combustível com valor máximo de 387,54 g/kW*h. A faixa de uso mais eficiente do combustível é entre 2.000 a 3.000 rpm, pois apresenta o menor consumo específico de combustível.

A Figura 42 apresenta os gráficos de consumo específico de combustível do motor testado, para todos os combustíveis ensaiados, usando os dados da Tabela 13.

Figura 42. Gráfico do consumo específico de combustível pesquisados x rpm.



Fonte: arquivo do autor, 2011

As curvas de consumo específico para todos os combustíveis, como podem ser observadas, não apresentaram o comportamento teórico esperado, da seção 2.4.3, isso pode ser explicado pelo fato, que durante o ensaio de consumo horário em cada faixa de rotação não houve um controle preciso da posição da borboleta do acelerador.

Com os valores do Apêndice B é possível perceber que o consumo específico de combustível do etanol, é em média, 37% superior ao da gasolina C. Pode-se explicar o maior consumo de combustível com o uso do etanol pelos mesmos motivos que explicam o maior consumo horário: baixa razão de compressão do motor Fiat FIRE tetrafuel e menor poder calorífico do etanol em relação à gasolina C. Costa *et al.*, (2009) em estudos com um motor Fiat FIRE de um litro usando etanol, afirmou que o consumo específico de combustível é 54% superior ao da gasolina, e que a razão de compressão

era baixa para o etanol. Com isso o combustível não era bem aproveitado pelo motor FIAT FIRE.

Para a mistura de 50% em volume de etanol com gasolina C, tem-se um consumo específico de combustível de 18,4% maior em relação à gasolina C. A explicação para o maior consumo específico de combustível é semelhante ao etanol, baixa razão de compressão e menor poder calorífico em relação à gasolina C. Amirruddin (2009), em seu trabalho de pesquisa com motor Ford ZETEC 1.6L, apresentou resultados mostrando o aumento do consumo específico de combustível, com o maior percentual de etanol na mistura com gasolina.

Para o GNV, o consumo específico de combustível para o GNV foi cerca de 13% em média inferior ao da gasolina C. Pode-se explicar o menor consumo específico de combustível pelo fato do GNV ter apresentado o menor consumo horário de combustível, apesar do GNV ter produzido a menor potência efetiva entre os combustíveis testados.

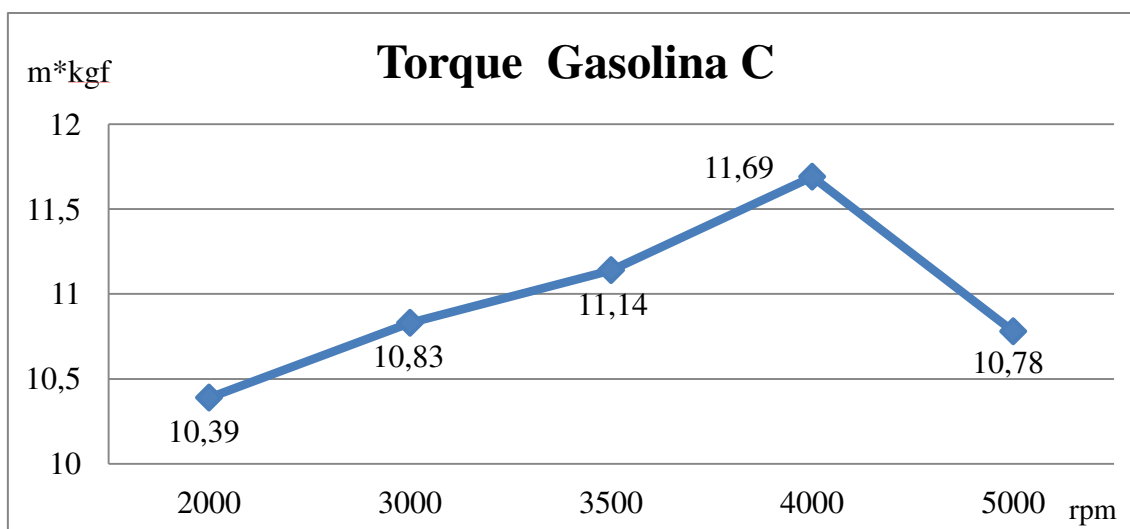
4.3 Resultados do Cálculo do Torque do Motor

A partir dos valores de potência efetiva e da rotação, foi determinado o torque do motor FIAT FIRE tetrafuel para cada faixa de rotação, onde a potência foi aferida para cada combustível. Com isso, determinou a curva de torque em função da rotação para cada energético utilizado.

As Figuras 43 a 46 apresentam o gráfico da curva de torque em função da rotação para cada energético do motor FIAT FIRE tetrafuel, usando os dados do Apêndice C.

Para gasolina C, a Figura 43 com o gráfico da curva de torque do motor em função da rotação.

Figura 43. Gráfico do torque da gasolina C x rpm.

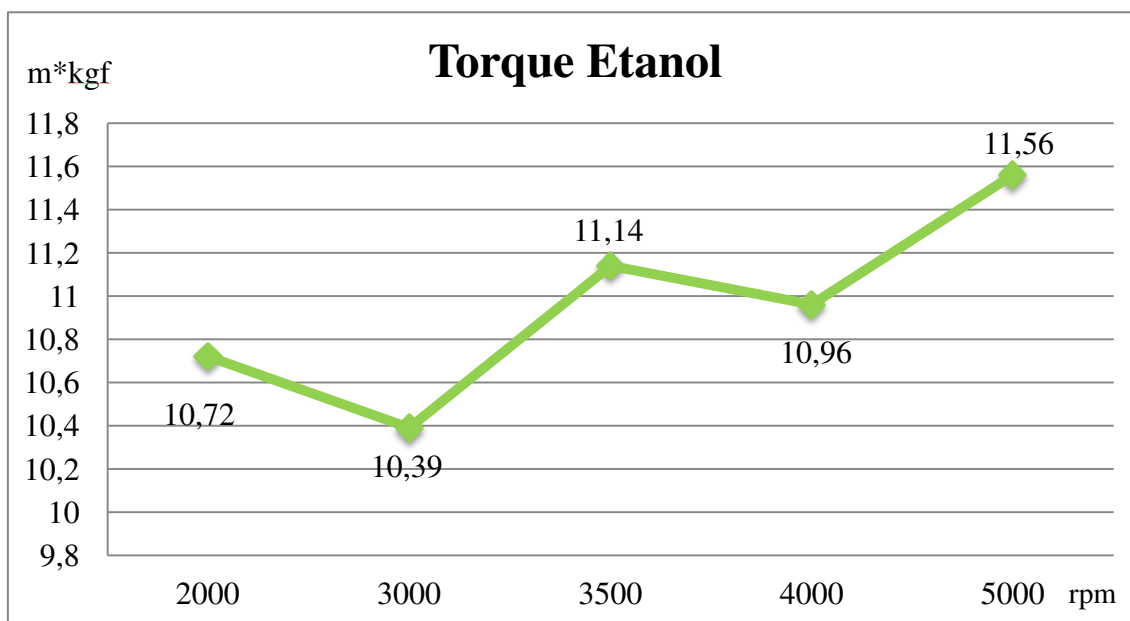


Fonte: arquivo do autor, 2011

Com esse combustível o motor obteve um torque médio de 10,97 m*kg. O valor máximo do torque foi em 4.000 rpm com 11,69 m*kg, logo após essa rotação o torque começa a diminuir.

Para o etanol, temos a Figura 44 com o gráfico da curva de torque do motor em função da rotação.

Figura 44. Gráfico do torque do etanol x rpm.

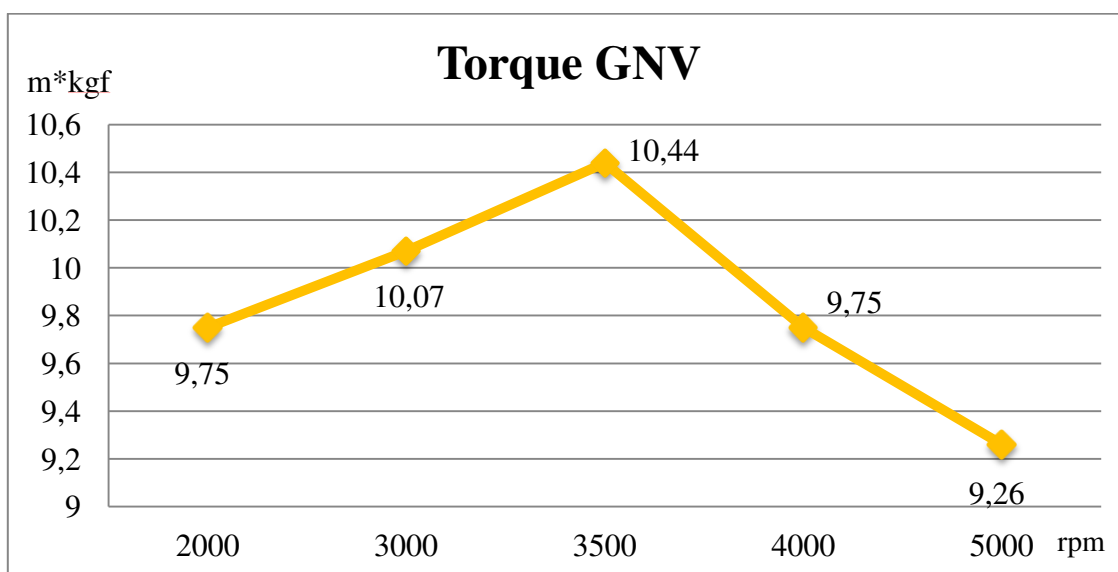


Fonte: arquivo do autor, 2011

Com esse combustível, o motor obteve um torque médio de 10,95 m*kg. O valor máximo do torque foi em 5.000 rpm com 11,56 m*kg. Na curva de torque do motor FIAT FIRE tetrafuel acima de 3.500 rpm há um aumento no valor do torque, pois o etanol em rotações elevadas do combustível é melhor utilizado pelo motor.

Para o GNV, temos a Figura 45 com o gráfico da curva de torque do motor em função da rotação.

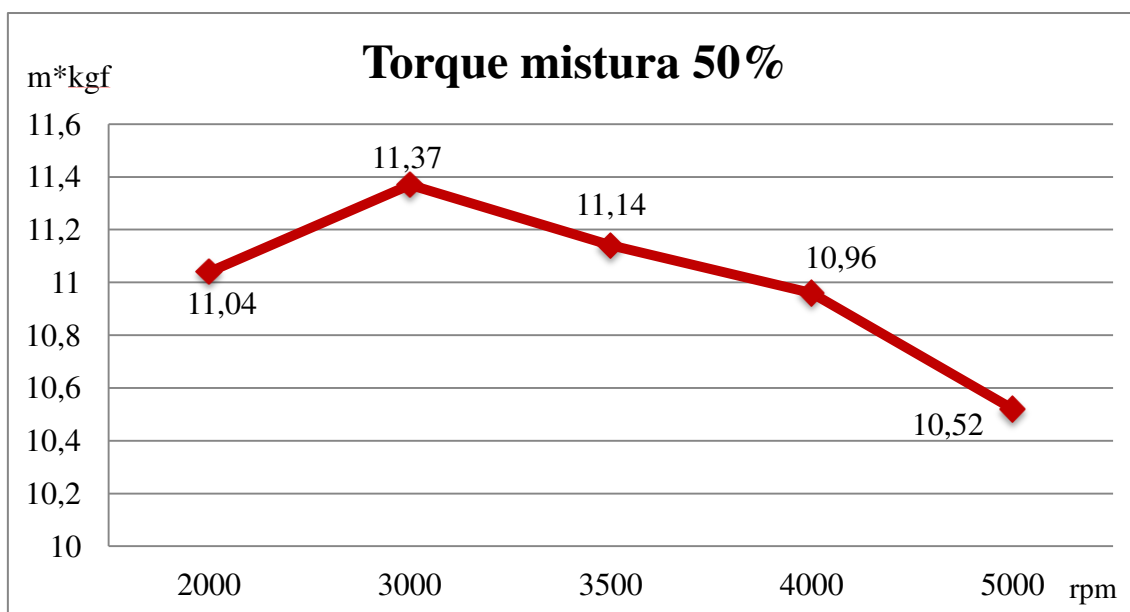
Figura 45. Gráfico do torque do GNV x rpm.



Fonte: arquivo do autor, 2011

Com esse combustível, o motor obteve um torque médio de 9,86 m*kg. O valor máximo do torque foi em 3.500 rpm com 10,44 m*kg. O torque máximo do GNV ocorre em uma rotação intermediária diferentemente da gasolina C e do etanol, que tem torque máximo em rotações mais altas, indicando que em maiores regimes de rotação o GNV não tem uma boa eficiência volumétrica.

Para a mistura de 50% de etanol com gasolina, temos a Figura 46 com o gráfico da curva de torque do motor em função da rotação.

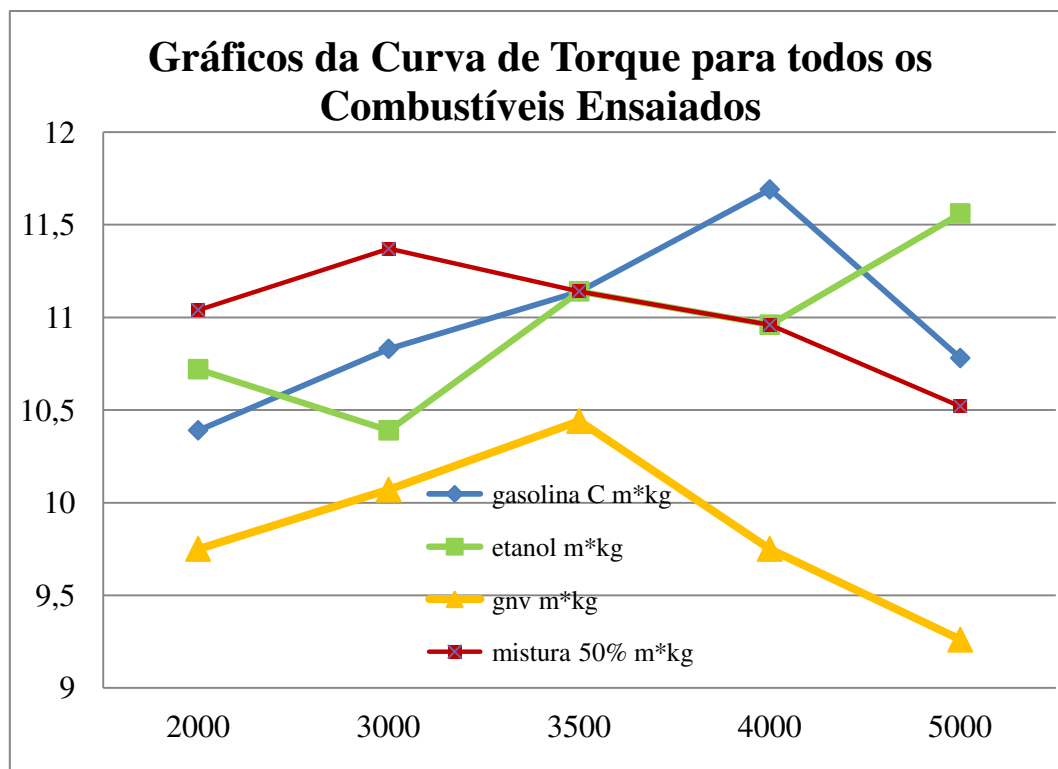
Figura 46. Gráfico do torque da mistura 50% x rpm.

Fonte: arquivo do autor, 2011

Com esse combustível o motor obteve um torque médio de 11,00 m*kg. O valor máximo do torque foi em 3.000 rpm com 11,37 m*kg. O torque máximo da mistura de 50% de etanol e gasolina C é em uma rotação baixa, diferentemente da gasolina C e do etanol, que tem o torque máximo em rotações mais altas.

A Figura 47 apresenta os gráficos da curva de torque do motor FIAT FIRE tetrafuel, para todos os combustíveis ensaiados, usando os dados da Tabela 14 (em Apêndice C).

Figura 47. Gráfico do torque em função da rotação de todos os combustíveis.



Fonte: arquivo do autor, 2011

Para a gasolina, o valor máximo do torque é de 11,69 m*kg a 4.000 rpm. Esse foi o maior valor de torque entres os combustíveis testados, mas acima desse regime de rotação o torque foi caindo. Esse fato explica a razão do combustível apresentar maior torque e também não apresentar a maior potência.

O etanol apresentou um pico de torque de 11,56 m*kg a 5.000 rpm, logo explica a segunda maior potência foi justamente na rotação de torque máximo. Diferente da gasolina C, o etanol tem maior torque em regimes de rotação mais elevados. Um dos fatores é a maior resistência a compressão do combustível. A partir disso, o sistema de ignição do motor FIAT FIRE tetrafuel pode trabalhar com ponto de ignição mais adiantados em relação à gasolina, explicando o maior torque em rotações mais altas.

A mistura de 50% de etanol e gasolina C apresentou um pico de torque de 11,37 m*kg a 3.000 rpm, logo na curva de torque com esse combustível é mais semelhante à curva de torque da gasolina C, com maior torque em rotações mais baixas.

O GNV apresentou um pico de torque de 10,44 m*kgf a 3.500 rpm, com isso a curva de torque com esse combustível é semelhante a da gasolina com maior torque em rotações mais baixas. Os fatores que explicam a menor potência também valem para o torque: baixa razão de compressão do motor FIAT FIRE tetrafuel, e baixa eficiência volumétrica com esse combustível.

4.4 Resultados do Cálculo do Rendimento Global do Motor

A partir dos valores de potência máxima efetiva e de potência máxima teórica, foi determinado o rendimento global do motor para cada combustível, e dessa forma foi possível determinar o combustível que foi utilizado com maior eficiência pelo motor Fiat FIRE tetrafuel.

A Tabela 12 mostra os valores de rendimento global obtido para cada combustível.

Tabela 12. Rendimento Global Obtido

Combustível	Rendimento Global Obtido
Etanol	39,32%
Gasolina C	35,38%
Mistura 50%	31,14%
GNV	30,15%

Os valores de rendimento obtidos mostraram uma maior eficiência térmica para o etanol. Esse fato deve-se a esse combustível ter uma menor perda de calor para as paredes do cilindro do motor Fiat FIRE tetrafuel, além do mesmo ter uma maior velocidade de combustão em relação a gasolina C. Outro fator que contribui para a maior eficiência do etanol é o maior avanço de ignição.

Segundo a literatura, o etanol, em geral, apresenta um rendimento térmico superior a gasolina C, confirmado nesse trabalho. De acordo com Costa *et al.*, (2009)

trabalho de pesquisa com um motor similar, Fiat FIRE, de um litro, o etanol apresentou uma eficiência de 37,8%, que é muito próximo do valor encontrado nesse trabalho.

A gasolina C teve o segundo maior valor de eficiência global, isso se deve ao acerto do sistema de alimentação de combustível, ponto de ignição adequando e tempo de injeção.

A mistura de 50% de etanol e gasolina C apresentou um valor de eficiência global inferior ao da gasolina C e do etanol. Pois o sistema trabalha com 2 mapas para combustível líquidos um para gasolina e outro para etanol, esse motivo explica porque a mistura de 50% de etanol e gasolina C, teve o rendimento inferior aos combustíveis líquidos, pois esse energético utilizava uma interpolação dos mapas de injeção e ignição de etanol e gasolina C.

O motor Fiat FIRE tetrafuel alimentado com GNV mesmo utilizando um kit de 6° geração teve o menor rendimento global. Isto pode se explicar pelo fato do motor ter uma razão de compressão muito baixa para esse combustível.

A Tabela 13 mostra um comparativo entre os combustíveis testados, em relação aos parâmetros avaliados. Para o combustível com melhor resultado é atribuída a classificação A e assim sucessivamente até o combustível com pior resultado com classificação D.

Tabela 13. Comparativo entre os combustíveis testados.

	Potência máxima	Torque máximo	Consumo específico de combustível	Rendimento global
Etanol	C	B	D	A
Gasolina	B	A	B	B
Mistura 50%	A	C	C	C
GNV	D	D	A	D

Capítulo 5
Conclusões

5. Conclusões

Os ensaios de potência máxima efetiva e consumo específico de combustível, realizados com diferentes combustíveis em dinamômetro de chassi no CTGAS-ER, atenderam aos objetivos propostos, possibilitando a obtenção de resultados conclusivos.

O rendimento global do motor FIAT FIRE obtido com o uso do etanol foi o melhor entre os combustíveis testados no trabalho. Seguindo-se a gasolina C e a mistura de 50% em volume de etanol e gasolina C. O GNV apresentou o pior rendimento global.

Para o ensaio de potência máxima efetiva do motor FIAT FIRE é possível concluir, que a mistura de 50% em volume de etanol e gasolina C, teve o melhor resultado dentre os combustíveis testados. Em seguida, o etanol. O GNV teve o menor valor de potência máxima efetiva. Por fim o motor testado com gasolina C, obteve potência próxima a do etanol e da mistura de 50% em volume de etanol e gasolina C.

No cálculo do torque, a gasolina C teve o maior torque entre os combustíveis testados. Seguindo-se o etanol e a mistura de 50% em volume de etanol e gasolina C. O menor valor de torque obtido ficou com o GNV.

Para o consumo específico de combustível, o GNV apresentou o menor consumo específico de combustível dentre os combustíveis testados. Seguido pela gasolina C. No etanol e na mistura de 50% em volume de etanol e gasolina C, os consumos específicos de combustível foram comparativamente os mais altos, como esperado.

Pelos resultados obtidos é possível concluir que o etanol apresentou o maior rendimento global, embora tenha o pior consumo específico de combustível. A gasolina C é o combustível com melhor acerto para o motor tetrafuel deste veículo testado, pois apresenta os melhores resultados em potência máxima efetiva e os menores resultados de consumo específico de combustível. O GNV apresentou o menor consumo específico de combustível, mas a o pior resultado em potência máxima efetiva e rendimento global. A mistura de 50% em volume de etanol e gasolina C obteve o melhor resultado

em potência máxima efetiva, e o mais baixo rendimento global, e elevado consumo específico de combustível.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- ✓ Realizar testes experimentais equivalentes aos realizado no CTGAS-ER em um veículo que tenha o kit de conversão de GNV adaptado por terceiros e comparar os resultados com os de um veículo tetrafuel de fábrica;

- ✓ Realizar testes experimentais e analisar os gases de descarga do veículo com sistema tetrafuel de fábrica e de outro adaptado por terceiros, testado para diferentes combustíveis;

- ✓ Analisar o desgaste do veículo com o uso dos 4 combustíveis testados.

REFERÊNCIAS

REFERÊNCIAS

- AMIRRUDDIN, A. K. **Effect of Gasohol Blends on a Four Cylinder, Port Fuel Injection Engine Performance.** *International Conference on Applications and Design in Mechanical Engineering*, Malaysia, 2009.
- AMORIM, R. J., BAÊTA, J. G. C., VALLE, R. M. **Experimental Analysis of Flexible Fuel Systems in Spark Ignition Engine**, *SAE 2005 Fuels & Lubricants Meeting & Exhibition*, 2005-01-2183, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, May. 2005a.
- AMORIM, R. J., BAÊTA, J. G. C., VALLE, R.M. **Performance Analysis of a CNG-Fuelled Flex Engine to Different Compression Ratios**”, *18th International Congress of Mechanical Engineering*, Ouro Preto, MG, Brasil. 2005b.
- AMORIM, R. J., BAÊTA, J. G. C., VALLE, R.M. **Analysis of an Otto cycle engine performance regarding alcohol concentration in gasoline and CNG usage**”, *18th International Congress of Mechanical Engineering*, Ouro Preto, MG, Brasil. 2005c.
- ARAÚJO, M. M., FERREIRA, F., NAPOLITANO, P., LEPSCH, F., **Sistema Flex Start.** Robert Bosch Ltda. 2009.
- BAÊTA, J. G. C. **Metodologia experimental para a maximização do desempenho de um motor multicomcombustível turboalimentado sem prejuízo à eficiência energética global.** Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 217p. (Tese, Doutorado em Engenharia Mecânica), 2006.
- BEM, A. J. D. **Análise de um motor ciclo Otto alimentado com álcool 75 INPM.** Dissertação de Mestrado, Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São Carlos - São Carlos, 2008.
- BIODIESELBR; **Proálcool - Programa Brasileiro de Álcool.** . Disponível em < <http://www.biodieselbr.com/proalcool/pro-alcool.htm> >, Acesso em julho de 2011.
- BURGER, P. R. B. et al. **Desempenho de um Motor Multicomcombustível Operando Simultaneamente com GNV e Álcool Etílico em Diferentes Proporções.** Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG. 95p, 2007.

COONEY, YELIANA, J.J. WORM, J. D. NABER, **Combustion characterization in an internal combustion engine with ethanol-gasoline blended fuels varying compression ratios and ignition timing**, Energy Fuel. 23,2009.

COSTA, R. C; SODRÉ, J. R. **Hydrous ethanol vs. gasoline-ethanol blend: Engine performance and emissions**. Pontifical University Catholic of Minas Gerais. Belo Horizonte, MG, Brazil. 2009.

DELGADO, A.S; REGINA, C.O.B; VALTER, J.F. **Properties of Brazilian gasoline mixed with hydrated ethanol for flex-fuel technology**. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE. NATAL. RN. 2006.

ECOBIOFUEL. <http://www.ecobiofuel.ie/the-very-first-ethanol-flex-fuel-vehicle-the-ford-model-t-1908/> Acesso em março de 2010.

FENABRAVE. **ANUÁRIO 2010**, p. 08, 2010.

FERREIRA, F. **Toda inovação contida no “Flex”**. Robert Bosch América Latina. 2009.

HEYWOOD, J. B. **Internal combustion engine fundamentals**. New York: McGraw-Hill, 1988.

LARANJA, G. C. **Desempenho de um veículo flex em bancada dinamométrica de chassi**. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFRN. NATAL. RN. 2010.

LI, Z., LIU, H., WANG, B., DENG, Z., XIAO, Z., WANG, C., GONG, Y. **Combustion and emissions of ethanol fuel (E100) in a small SI engine**, SAE Technical Paper 2003-01-3262. 2003.

MACHADO, P. R. **Avaliação de desempenho do óleo de soja como combustível para motores diesel**. Universidade Federal Santa Maria. Santa Maria. RS. 2003.

MELO, T. C. C. **Modelagem Termodinâmica de um Motor do Ciclo Otto tipo flex-fuel, Funcionando com Gasolina, Álcool e Gás Natural**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. RJ. 2007.

MUNÕZ, M., MORENO, F., MOREA-ROY, J., RUIZ, J., ARAUZO, J. **Low heating value gas on spark ignition engines.** Biomass e bioenergy. Vol 18, p. 431-439, 2000.

NIGRO, F.; Szwarc, A. **Etanol como Combustível Veicular: Perspectivas Tecnológicas e Propostas de Políticas Públicas.** Universidade de São Paulo. 2009.

OBERT, Edward F. **Motores de combustão interna.** Porto Alegre: Globo, 1971.

OWEN K, Coley T. **Automotive fuels reference book.** 2nd ed. USA: Society of Automotive Engineers, Inc.; 1995.

PELLIZA, G. **Análise de Veículos Convertidos para o uso do Combustível Gás Natural.** 123p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.

PULKRABEK, Willard W. **Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine.** New Jersey. 2003.

SANTOS, F. **Características e prestações dos motores alternativos.** Vila Real. UTAD. 1996.

SILVA, R., CATALUÑA, R., MENEZES, E, W., SAMIOS, D., PIATNICK, C. M. S., **Effect of additives on the antiknock properties and Reid vapor pressure of gasoline.** Fuel, 84:951–9. 2005.

SODRÉ, J. R. **Compression ratio effects on an ethanol/gasoline fuelled engine performance.** Pontifical University Catholic of Minas Gerais. Belo Horizonte, MG, Brazil. 2010.

SOUZA, J; MELEGARI, S; MACHADO, P.R . **Desempenho de um Motor Ciclo Otto Utilizando Biogás como Combustível.** UNIOESTE. Cascavel PR. 2003.

SZWARC, A.; **Novos Avanços em Tecnologia Flex Fuel.** Disponível em < <http://www.unica.com.br/opiniao/show.asp?msgCode={5CF2CC46-E369-4051-9030-2894C0352C22}> >, Acesso em julho de 2011.

TAYLOR, C. F. **Análise dos Motores de Combustão Interna,** São Paulo, Editora Edgard Blucher Ltda., 1971.

VALIANTE, D. Análise de Viabilidade Técnica, Econômica, Ambiental e Mercadológica da Instalação Original de Fábrica de Sistema de Conversão para uso de Gás Natural em Veículos Leves Movidos a Gasolina e/ou Álcool. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. São Paulo. SP. 2006.

VARELLA, C. A. A. Estimativa da potência dos motores de combustão interna. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. 2010.

ZAREH, A. Motores a Gás. Lubrificação, Rio de Janeiro, v. 81, n° 04, p. 2-4, 1998.

ANEXOS

ANEXO A

Dados técnicos do dinamômetro de chassi do CTGAS-ER.

Marca Bosch modelo FLA203

- Tensão: trifásico, corrente alternada (220 a 240 V) – (100 A 127 V);
- Tolerâncias: $\pm 10\%$;
- Frequência: bifrequência 50/60 Hz;
- Consumo de corrente: 22 A;
- Carga máxima por eixo: 3,5 ton;
- Diâmetro do rolo: 318 mm;
- Distância entre eixos dos rolos: 565 mm;
- Comprimento útil dos rolos: 2.200 mm;
- Dispositivo de segurança quando a plataforma de elevação estiver erguida: bloqueio dos rolos;
- Força máxima de elevação da plataforma: 20.000 N;
- Tamanho permitido de pneus para automóveis e caminhões leves: 10 – 18”;
- Altura necessária sobre o solo a 10 a 12” (incluindo o motorista): aproximadamente 145 mm;
- Altura necessária sobre o solo a 13” (incluindo o motorista): aproximadamente 125 mm;
- Tamanho permitido para motocicletas com dispositivo fixação: 10 – 24”;
- Sistema operacional: recarregável;
- Correção de potência: DIN 70020 ou EC 80/1269;
- Potência de frenagem do freio da corrente de Foucault: 25 kW a 20 km/h /150 kW a 130 km/h /260 kW a 260 km/h;
- Precisão da bancada de teste: $\pm 0,5 \% \pm 2 \text{ kW}$;
- Resolução do visor: 0,1 kW;
- Potência de aceleração (potência do motor): 0 – 300 kW;
- Velocidade de marcha: 0 – 260 km/h;

- Força máxima de tração: 6.000 N;
- Simulação de resistência dos rolos: 0 – 50 kW;
- Simulação de resistência aerodinâmica: 0 – 50 kW;
- Medição da pressão do ar: 700 – 1050 hpa;
- Medição da temperatura do ar aspirado: -20 a 120°C;
- Medição da rotação: 0 – 15.000 rpm;
- Medição da distância percorrida: 0 – 10 km;
- Classe de segurança: IP 41.

ANEXO B

Medidas de segurança descritas pelo fabricante do dinamômetro que devem ser tomadas para a operação do dinamômetro de chassi.

- 1 Durante os testes, manterem fechadas as portas e janelas do veículo para assim proteger o técnico contra eventuais corpos estranhos projetados do perfil do pneu, ou contra partícula que se soltam dos pneus;
- 2 Limitar a duração dos testes ao tempo de medição estritamente necessário;
- 3 Não entrar e nem sair do veículo durante a execução dos testes;
- 4 A operação e a utilização da bancada dos ensaios são permitidas somente ao pessoal técnico competente e devidamente treinado;
- 5 Isolar a área do local durante os testes, evitando a presença de pessoas a uma distância mínima de 2 m na frente, atrás e ao lado do veículo;
- 6 Utilizar EPI's durante os testes (bota, camisa manga longa, protetor auricular e óculos);
- 7 Durante os testes o volante deverá estar seguro. Os movimentos do volante para a direita ou à esquerda devem ser evitados, o mesmo se aplicando a variações de peso dentro do veículo. Não se apoiar no veículo;
- 8 Verificar alinhamento de direção e balanceamentos das rodas. Sempre que for realizar um novo ensaio deve-se verificar o aperto dos parafusos de fixação da roda;
- 9 Somente realizar os ensaios com os pneus em perfeitas condições;
- 10 Conferir possíveis vazamentos nas conexões do equipamento de medidor de combustível;
- 11 Conferir possíveis vazamentos nas conexões das mangueiras de combustível do veículo;

12 Conferir a pressão de trabalho no manômetro que deve sempre constar 3 bar;

13 O banco de provas de potência somente pode ser operado dentro das potências indicadas nos dados técnicos e nas velocidades máximas mencionadas no manual do equipamento. Devem ser observadas as indicações referentes a velocidades máximas admitidas para pneus, conforme especificado pelo fabricante do veículo ou dos pneus.

ANEXO C

Procedimento descritos pelo fabricante do dinamômetro para iniciar os ensaios de potência máxima do motor do veículo, seguir 17 passos, com o auxílio de 2 técnicos mais o motorista do automóvel.

- 1 O reservatório do combustível do veículo e do medidor de combustível deve ser drenado totalmente, assegurando-se da completa limpeza do reservatório, e reabastecido com o combustível para o ensaio;
- 2 Ligar o dinamômetro e escolher a opção de desempenho do motor;
- 3 Calibrar os pneus frios com a pressão indicada no manual do fabricante do veículo;
- 4 Verificar o nível do óleo do motor;
- 5 Verificar o nível da água do sistema de arrefecimento;
- 6 Conduzir o veículo sobre o prisma de rolos;
- 7 Colocar correntes de ancoragem no eixo traseiro do veículo;
- 8 Colocar o aspirador de gases de escape no veículo (sistema de exaustão). À distância até o cano de escape é de aproximadamente 20 cm;
- 9 Abrir o capô do veículo para ligar as conexões do dinamômetro de chassi;
- 10 Colocar a garra do sensor de rotação ao cabo de ignição de um dos cilindros;
- 11 Colocar o sensor de medição de temperatura do ar de aspiração no filtro de ar do veículo. Deve-se ter o cuidado para que o sensor não encoste em nenhuma superfície, assegurando que seja circulando pela corrente de ar;
- 12 Ligar o veículo e engatar a 1ª marcha a uma velocidade de aproximadamente 5 km/h para ajustar o mesmo sobre o prisma de rolos e em seguida puxar o freio de estacionamento do veículo;

13 Ajustar os rolos de guia do analisador de potência a uma distância de 0,5 a 1 cm dos pneus dianteiros do veículo;

14 Colocar as cunhas de segurança a uma distância de 4 a 5 cm em frente as rodas traseiras do veículo;

15 Funcionar o veículo até atingir a temperatura ideal de funcionamento do motor (aproximadamente 90°C); Funcionar o veículo até aquecer os pneus a uma temperatura superior a 40°C;

16 Colocar ventilador em frente do veículo que proporcione um fluxo de ar de pelo menos 20.000 m³/h, de tal forma que a corrente de ar seja direcionada ao radiador, ponto de aspiração de ar e parte inferior do veículo (cárter e escapamento);

17 Aquecer o banco de rolos do dinamômetro de chassi por um tempo de 15 minutos, à velocidade de 50 km/h, de acordo com instruções do fabricante do dinamômetro.

APÊNDICES

APÊNDICE A

**Resultados obtidos no dinamômetro de chassi no CTGAS-ER, em agosto de 2011,
para o ensaio de potência efetiva para cada faixa de rotação.**

Tabela. Potência efetiva obtida para cada faixa de rotação 1ª medição.

Rotação	Potência gasolina C		Potência GNV	Potência mistura
	(kW)	Potência etanol (kW)	(kW)	50% (kW)
2.000	21,00	21,00	22,00	23,00
3.000	34,00	33,00	32,00	35,00
3.500	39,00	41,00	37,00	38,00
4.000	46,00	44,00	41,00	47,00
5.000	55,00	60,00	46,50	53,00
Max	59,00 a 5.250 rpm	60,00 a 4.940 rpm	49,60 a 5.290 rpm	60,00 a 5.270 rpm

Tabela. Potência efetiva obtida para cada faixa de rotação 2ª medição.

Rotação	Potência gasolina C		Potência GNV	Potência mistura 50%
	(kW)	Potência etanol (kW)	(kW)	(kW)
2.000	21,00	22,00	19,00	22,00
3.000	32,00	32,00	29,00	35,00
3.500	41,00	41,00	37,00	40,00
4.000	48,00	46,00	38,00	42,00
5.000	55,00	60,00	48,00	54,00
Max	58,20 a 5.260 rpm	60,00 a 4.930 rpm	50,00 a 5.280 rpm	62,00 a 5.290 rpm

Tabela. Potência efetiva obtida para cada faixa de rotação 3ª medição.

Rotação	Potência gasolina C		Potência GNV	Potência mistura
	(kW)	Potência etanol (kW)	(kW)	50% (kW)
2.000	22,00	23,00	19,00	23,00
3.000	34,00	31,00	32,00	36,00
3.500	40,00	38,00	38,50	42,00
4.000	50,00	45,00	41,00	46,00
5.000	56,00	58,00	48,00	55,00
Max	58,00 a 5.270 rpm	58,00 a 4.950 rpm	51,00 a 5.300 rpm	59,50 a 5.280 rpm

Tabela. Potência efetiva obtida para cada faixa de rotação média geral.

Rotação	Potência gasolina C (kW)	Potência etanol (kW)	Potência GNV (kW)	Potência mistura 50% (kW)
2.000	21,33 ± 0,10	22,00 ± 0,11	20,00 ± 0,10	22,66 ± 0,11
3.000	33,33 ± 0,16	32,00 ± 0,16	31,00 ± 0,15	35,00 ± 0,17
3.500	40,00 ± 0,20	40,00 ± 0,20	37,50 ± 0,18	40,00 ± 0,20
4.000	48,00 ± 0,24	45,00 ± 0,22	40,00 ± 0,20	45,00 ± 0,22
5.000	55,33 ± 0,26	59,30 ± 0,29	47,50 ± 0,23	54,00 ± 0,27
Max a	58,40 a 5.260 rpm	59,30 a 4.940 rpm	50,20 a 5.290 rpm	60,50 a 5.280 rpm

APÊNDICE B

Resultados do Consumo Específico de Combustível para o motor Fiat FIRE tetrafuel, testado em agosto de 2011, para cada faixa de rotação.**Tabela. Consumo específico de combustível obtido para cada combustível em função da rotação.**

Rotação (rpm)	Gasolina (g/kW*h)	Etanol (g/kW*h)	GNV (g/kW*h)	Mistura 50% (g/kW*h)
2.000	228,57	306,84	198,76	258,18
3.000	258,80	356,28	217,76	261,45
3.500	234,39	337,53	220,02	275,65
4.000	239,08	341,70	283,15	278,36
5.000	268,41	341,51	276,34	387,53

APÊNDICE C

Resultados de Torque obtido do motor Fiat FIRE tetrafuel testado, em agosto de 2011, para cada faixa de rotação.

Tabela. Torque em Função da Rotação

Rotação (rpm)	Gasolina C (m*kgf)	Etanol (m*kgf)	GNV (m*kgf)	Mistura 50% (m*kgf)
2.000	10,39	10,72	9,75	11,04
3.000	10,83	10,39	10,07	11,37
3.500	11,14	11,14	10,44	11,14
4.000	11,69	10,96	9,75	10,96
5.000	10,78	11,56	9,26	10,52
Média	10,97	10,95	9,85	11,05