



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

ESTUDO COMPARATIVO DE EMISSÕES DE POLUENTES EM MOTORES QUATRO
TEMPOS UTILIZANDO SISTEMAS DE CARBURAÇÃO E INJEÇÃO ELETRONICA

Walter de Aguiar Amazonas Neto

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Marcelo José Colaço

RIO DE JANEIRO
AGOSTO DE 2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Departamento de Engenharia Mecânica
DEM / POLI / UFRJ

ESTUDO COMPARATIVO DE EMISSÕES DE POLUENTES EM MOTORES QUATRO TEMPOS
UTILIZANDO SISTEMAS DE CARBURAÇÃO E INJEÇÃO ELETRONICA

Walter de Aguiar Amazonas Neto

PROJETO FINAL SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO MECÂNICO.

Aprovado por:

Prof. Marcelo José Colaço, D.Sc. (Orientador)

Prof. Albino José Kalab Leiroz, Ph.D.

Prof. Helcio Rangel Barreto Orlande, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
AGOSTO DE 2013

de Aguiar Amazonas Neto, Walter

Estudo Comparativo de Emissões de Poluentes em Motores Quatro Tempos Utilizando Sistemas de Carburação e Injeção Eletrônica./ Walter de Aguiar Amazonas Neto. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2013.

VII, 42 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Marcelo José Colaço, D.Sc.

Projeto de Graduação – UFRJ/ POLI/ Engenharia Mecânica, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 42.

1. Emissão de poluente. 2. Sistema de Carburador. 3. Sistema de Injeção Eletrônica. 4. Motores quatro tempos. I. Colaço, Marcelo José *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Engenharia Mecânica. III. Título

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado à possibilidade de estar nessa grande Universidade e a força sem a qual eu não teria terminado este curso.

À minha família, em especial aos meus pais, Maria Emilia Oliveira dos Santos Amazonas e Walter de Aguiar Amazonas Filho, e meu irmão, Vinicius Oliveira dos Santos Amazonas, cujos ensinamentos, carinho e suporte me ajudaram a formar o homem que hoje sou.

Ao meu orientador, Marcelo José Colaço, o qual sem seus ensinamentos esse trabalho não seria possível.

Ao Sr. Eng. Nauberto Rodrigues Pinto, cujo suporte dentro do LMT foi imprescindível para o sucesso dos experimentos.

Ao Professor Albino J. K. Leiroz pelo auxílio nos teste de emissão de poluentes.

À minha namorada e eterna amiga Priscila dos Santos cujo carinho e ouvido sempre me ajudaram nos momentos mais difíceis.

A todos os meus Amigos e familiares que sempre estiveram lá para me ajudar: Diogo Luiz Ferreira, Flavia da Costa Moreira, Rafael Miranda do Nascimento, André Côrtes, Emmanuele Penha, Payla Christian, Carlos Magno de Aguiar Amazonas Ramos, Michelle de Aguiar Amazonas Ramos, Manoel José dos Santos Filho, Magnólia Galvão de Mello Amazonas, Leonardo Soutto Mayor de Figueiredo, Vander Apollinario e a todos os outros que caminham ao meu lado.

RESUMO

Neste trabalho é analisado o impacto do sistema de alimentação de combustível sobre as emissões de poluentes em motores de ignição interna por centelha. Para os testes foi utilizada gasolina comum adquirida sempre no mesmo posto. Foram analisados os principais gases emitidos pelo sistema de exaustão para quantificar os diversos poluentes emitidos pelo motor utilizando o sistema de carburação e o sistema de injeção eletrônica em rotações diversas.

ABSTRACT

In this paper we analyze the impact of the fuel supply system on pollutant emissions in internal combustion spark ignition engines. For testing we used gasoline bought always in the same gas station. We analyzed the main gases emitted by the exhaust pipe to quantify the various pollutants emitted by the engine using the carburetion system and fuel injection system in various rotations.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	ii
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABELAS	ix
1 Introdução	1
2 Revisão Teórica	1
2.1 Motores de Combustão Interna – Ciclo Otto.....	1
2.2 Sistema de Alimentação por Carburador	3
2.3 Sistema de Alimentação por Injeção Eletrônica	4
2.4 Emissões de Poluentes no Processo de Combustão	6
2.4.1 Emissões de NO _x	8
2.4.2 Emissões de CO	9
2.4.3 Emissões de CO ₂	9
2.4.4 Emissões de HC	9
3 Aparato Experimental	10
3.1 Motor Honda 196cc	10
3.2 Carburador de Corpo Simples	12
3.3 Injeção Eletrônica de Combustível.....	13
3.3.1 Sensor de Temperatura de Óleo	14
3.3.2 Sensor de Temperatura do Ar de Admissão.....	16
3.3.3 Sonda Lambda do Tipo <i>Wideband</i>	17
3.3.4 Sistema de Bombeamento de Combustível	18
3.3.5 TBI – Throttle Body Injection.....	21
3.3.6 Modulo de Injeção Eletrônica – Megasquirt 2	22
3.4 Analisador de Emissões	24
3.4.1 Unidade de Controle	25
3.4.2 Unidade de Análise de Gases	25
3.4.3 Sonda.....	26
4 Procedimento Experimental	27
4.1 Procedimento para Ajuste do Motor para o Teste de Emissões com o Sistema de Carburador	27

4.1.1	Teste de emissão de poluentes com o sistema carburado	28
4.2	Procedimento para Ajuste do Motor para o Teste de Emissões com o Sistema de Injeção Eletrônica.....	28
4.2.1	Teste de emissão de poluentes com o sistema de injeção eletrônica	35
5	Resultados	35
5.1	Emissões de Gases de Escapamento.....	36
6	Conclusão	40
	Referências Bibliográficas	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Etapas do ciclo Otto. (HEYWOOD, 1988)	3
Figura 2.2 - Corte transversal de um carburador. (WIKIPÉDIA)	4
Figura 2.3 – Curva típica de emissões (HEYWOOD, 1988)	7
Figura 3.1 – Foto do conjunto motor/base de fixação.....	11
Figura 3.2 – Foto do sistema de controle de nível de combustível	12
Figura 3.3 – Vista lateral do carburador de corpo simples	13
Figura 3.4 – Vista frontal do carburador de corpo simples.....	13
Figura 3.5 – Sensor de temperatura do óleo MTE-4053.....	15
Figura 3.6 – Sequência de montagem do sensor MTE-4053.....	15
Figura 3.7 – Sequência de montagem do sensor MTE-4053.....	16
Figura 3.8 – Sensor de temperatura de ar MTE-5061.....	17
Figura 3.9 – Curva característica da sonda lambda Wideband.....	18
Figura 3.10 – Bomba de combustível e seu respectivo suporte	18
Figura 3.11 – Filtro de combustível.....	19
Figura 3.12 – Regulador de pressão.....	20
Figura 3.13 – Desenho esquemático da linha de alimentação de combustível.....	20
Figura 3.14 – Corpo de injeção.....	21
Figura 3.15 – Corpo de injeção já adaptado no motor	22
Figura 3.16 – Visão interna do modulo megasquirt 2.....	23
Figura 3.17 – Desenho esquemático de instalação da Megasquirt (BOWLING&GRIPPO, manual de instalação)	23
Figura 3.18 – Testo 350 XL	24
Figura 3.19 – Unidade de controle.....	25
Figura 3.20 – Unidade de análise de gases	26
Figura 3.21 – Sonda.....	26
Figura 4.1 – Módulo de condicionamento de sinal.....	29
Figura 4.2 – TunerStudio MS.....	30
Figura 4.3 – Tela de entrada de dados para o cálculo do RequiredFuel	31
Figura 4.4 – Características da injeção.....	32
Figura 4.5 – Tabela com metas de relações ar-combustível.....	33
Figura 4.6 – Tabela de eficiência volumétrica.....	34
Figura 4.7 – Assistente VE Analyse Live	34

Figura 5.1 – Concentração de O ₂ nos gases de descarga	37
Figura 5.2 – Emissões de CO ₂	38
Figura 5.3 – Emissões de NO _x	38

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Índices de emissões de poluentes para veículos automotores leves ciclo Otto pelo programa PROCONVE.....	8
Tabela 3.1 – Especificações do motor Honda 196cc.....	11
Tabela 3.2 – Relações de temperatura/resistência para o sensor MTE-4053	14
Tabela 3.3 – Relações de temperatura/resistência para o sensor MTE-5061	16
Tabela 3.4 – Dados Técnicos do analisador de gases (TESTO INC. 2003)	24
Tabela 5.1 - % O ₂ nos gases de escape	36
Tabela 5.2 – Resultados do teste de emissões.....	39

1 Introdução

No desenvolvimento dos motores de combustão interna, não por acaso, com o intuito de se conseguir melhores eficiências do consumo de combustíveis e menores índices de emissões de poluentes, um dos pontos onde mundialmente se investiu uma grande quantidade de esforços foi nos sistemas de alimentação, nos mais variados tipos adotados pela indústria.

No Brasil, no campo regulamentar, foi criado o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) através da Resolução CONAMA n° 18, de 06 de junho de 1986, que dentre seus principais objetivos está a instituição de regras que promovam a redução da emissão de poluentes por veículos automotores e o desenvolvimento tecnológico nacional. Nesse programa, para se atingir seus objetivos, foram previstas metas de emissões que os fabricantes deveriam atender em determinadas fases, o que os obrigava a promover uma melhora contínua do desenvolvimento da tecnologia empregada nos motores utilizados no Brasil, tanto de ciclo Otto quanto de ciclo Diesel.

Uma das medidas utilizadas para atingir essas metas foi a substituição dos sistemas de alimentação por carburadores por sistemas gerenciados eletronicamente; as atualmente conhecidas injeções eletrônicas.

O objetivo deste trabalho é avaliar as emissões de poluentes emitidos por um motor de combustão interna de ignição por centelha, monocilindro, utilizando um sistema de carburador e, posteriormente, utilizando um sistema de injeção eletrônica de combustível. Para tal, foram feitos testes de emissões de poluentes utilizando ambos os sistemas em diversas rotações, usando gasolina comum adquirida em postos de combustível na cidade do Rio de Janeiro.

2 Revisão Teórica

2.1 Motores de Combustão Interna – Ciclo Otto

Os motores de combustão interna de ignição por centelha são máquinas térmicas utilizadas para conversão de energia química em trabalho mecânico.

Essa transformação se dá pela queima do combustível dentro da câmara de combustão.

Essas máquinas têm seu funcionamento descrito termodinamicamente pelo ciclo Otto. Este ciclo foi definido pelo engenheiro francês Alphonse Beau de Rochas em 1861 e posteriormente implementado pelo engenheiro alemão Nikolaus Otto em 1876 que, em sua homenagem, recebeu seu nome. Este ciclo, desenvolvido há mais de 100 anos atrás, pode ser utilizado para descrever a maioria dos motores automotivos fabricados nas últimas décadas.

A maioria dos motores que funcionam seguindo esse ciclo tem como característica a divisão de seu funcionamento em quatro tempos: admissão, compressão, expansão e exaustão.

- **Admissão:** Esse é o início do ciclo. Com o pistão no ponto morto superior do cilindro, é aberta a válvula de admissão e o pistão é impulsionado para baixo, pelo virabrequim, até o ponto morto inferior. Isso provoca uma diferença de pressão que faz o motor aspirar para dentro do cilindro uma quantidade de mistura ar-combustível;
- **Compressão:** A válvula de admissão se fecha e o pistão dessa vez é impulsionado para cima, comprimindo assim a mistura. Antes de o pistão chegar ao ponto morto superior, a combustão da mistura é iniciada por uma centelha liberada pela vela de ignição, acarretando em um grande aumento de pressão no interior do cilindro;
- **Expansão:** Quando o pistão chega ao ponto morto superior, devido a grande pressão e ao grande aumento de temperatura ocasionada pela ignição da mistura, este é empurrado para baixo pelos gases provenientes da combustão, fazendo com que o virabrequim do motor gire. Essa é a única etapa onde é gerada potência pelo motor;
- **Exaustão:** Após a expansão dos gases, com o pistão no ponto morto inferior, é aberta a válvula de descarga e o virabrequim empurra o pistão

para cima fazendo com que os gases provenientes da combustão sejam descartados.

Este ciclo pode ser melhor visualizado pela figura 2.1 onde estão representados todos os quatro tempos de funcionamento do ciclo Otto.

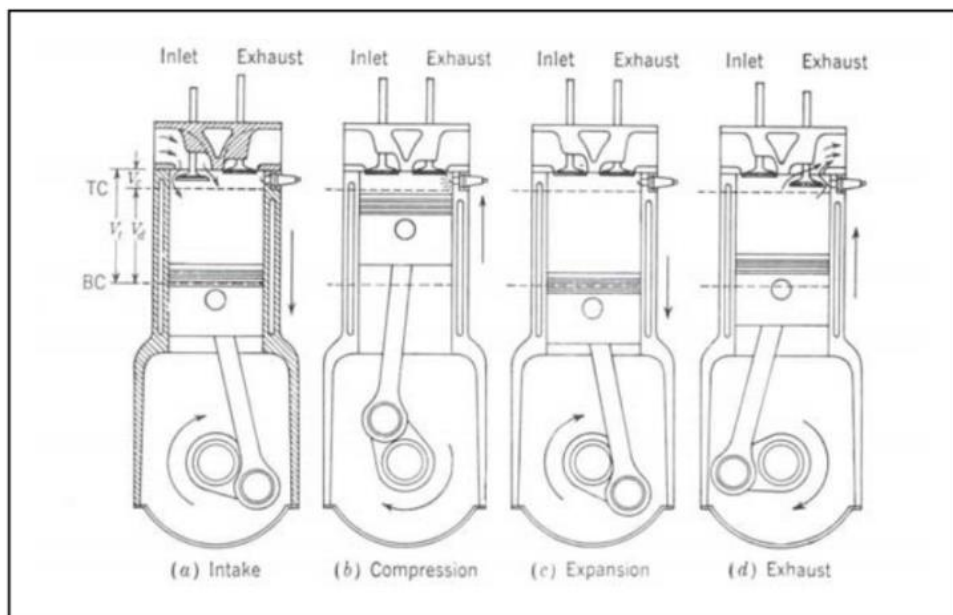


Figura 2.1 - Etapas do ciclo Otto. (HEYWOOD, 1988)

Em motores de combustão interna por centelha, a mistura ar-combustível normalmente é realizada pelos sistemas de alimentação em carburadores ou sistemas de injeção eletrônica, para só depois ser admitida pelo cilindro.

2.2 Sistema de Alimentação por Carburador

O carburador é um componente mecânico responsável por realizar a mistura do ar com o combustível para ser admitido pelo motor. Nele o fluxo de ar passa por um Venturi gerando uma diferença de pressão entre o reservatório de combustível, popularmente conhecido como “cuba”, e o ar que está passando pelo Venturi. Essa diferença de pressão faz com que o combustível seja arrastado pelo circuito principal de alimentação e misturado com o ar.

A quantidade de ar que é admitida pelo carburador é controlada pela abertura da borboleta de aceleração, onde quanto mais aberta ela for maior é a quantidade de mistura admitida pelo motor e, conseqüentemente, maior é a quantidade de ar processada pelo carburador.

Para acelerações rápidas o mesmo possui uma bomba de combustível para esse fim. Nesse caso poderia acontecer uma falta de combustível por incapacidade de o sistema principal fornecer combustível em uma velocidade tão elevada. Uma quantidade extra de combustível é adicionada a mistura a fim de proporcionar uma aceleração rápida com a mistura adequada para o motor.

O nível de combustível dentro da cuba é controlado por um flutuador que quando o nível abaixa, abre a válvula agulha permitindo a entrada de mais combustível. Quando o nível se normaliza a válvula agulha é fechada e a passagem interrompida.

O funcionamento básico de um carburador está ilustrado na figura 2.2.

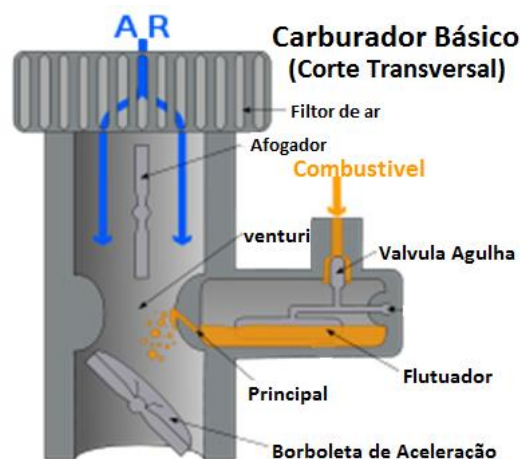


Figura 2.2 - Corte transversal de um carburador. (WIKIPÉDIA)

2.3 Sistema de Alimentação por Injeção Eletrônica

O sistema de injeção eletrônica de combustível consiste de uma central eletrônica que coleta informações de diversos sensores instalados no motor e de posse dessas informações calcula a quantidade de combustível que deve ser admitida pelo motor em determinada condição.

A injeção eletrônica utiliza a pressão do coletor de admissão, juntamente com a temperatura do ar sendo admitido, para calcular a massa de ar que é admitida pelo motor utilizando a lei dos gases ideais. Essa lei é dada pela equação 2.1.

$$PV = nRT \quad (2.1)$$

P = Pressão;

V = Volume;

n = número de mols;

R = Constante universal dos gases ideais;

T = Temperatura absoluta.

Se tivermos a eficiência volumétrica (VE), que é um valor que nos indica a relação entre a pressão do cilindro e a pressão no coletor de admissão, podemos calcular a massa de ar admitida (m) pelo cilindro de acordo com a equação 2.2, como informado pelo manual de instalação do módulo de injeção eletrônica Megasquirt usado neste projeto. Nesta equação a temperatura do ar de admissão é medida em Fahrenheit.

$$m = \frac{VE \times \text{pressão no coletor de admissão} \times \text{volume do cilindro}}{R \times (\text{temperatura do ar de admissão} - 32) \times \frac{5}{9} + 273} \times \text{massa molar do ar} \quad (2.2)$$

Sabendo a massa de ar sendo admitida pelo motor basta a injeção eletrônica manter uma relação ar combustível pré-determinada. Essa relação depende das condições de funcionamento do motor.

O combustível é pressurizado por uma bomba e o mesmo é entregue ao motor por eletroválvulas localizadas próximas as válvulas de admissão do motor. Esse sistema apresenta a vantagem de o combustível ser melhor pulverizado no ar e com isso se atinge uma melhor atomização da mistura ar-combustível. O sistema de injeção eletrônica também apresenta a vantagem de possuir um melhor controle da relação ar combustível de acordo com as condições de funcionamento do motor. Esse controle é importante para o controle de emissão de poluentes, como se verá nos tópicos a seguir.

2.4 Emissões de Poluentes no Processo de Combustão

Motores de combustão por centelha e a diesel são relevantes fontes de poluição urbana. Os gases de descarga de motores de ignição por centelha contém óxidos de nitrogênio, monóxido de carbono, dióxido de carbono, e compostos orgânicos que são hidrocarbonetos não queimados ou parcialmente queimados. Suas quantidades relativas dependem do projeto do motor e de suas condições de operação.

A gasolina e o diesel possuem enxofre em sua composição, sendo que a gasolina possui menores concentrações desse elemento. O enxofre pode ser oxidado ou queimado pra produzir o dióxido de enxofre, que pode se oxidar formando o trióxido de enxofre. Esta molécula pode se combinar com a água presente na atmosfera e vir a formar a chuva ácida.

O óxido de nitrogênio se forma nas altas temperaturas dos gases de combustão através de reações envolvendo o nitrogênio e o oxigênio. Quanto maior for a temperatura dos gases de combustão maior é a taxa de formação de óxido de nitrogênio, segundo HEYWOOD (1988).

O monóxido de carbono também se forma durante o processo de combustão. Em misturas ar-combustível rica em combustível não há oxigênio suficiente para transformar completamente todo o carbono presente na mistura em dióxido de carbono.

As emissões de hidrocarbonetos possuem diversas fontes. Durante a fase de compressão e combustão, devido ao aumento da pressão dentro do cilindro, parte da mistura ar-combustível é forçada para dentro de frestas e pequenos orifícios presentes dentro da câmara de combustão, como por exemplo, espaços entre os anéis de segmento dos pistões. Essa mistura não é queimada devido a esses espaços serem muito pequenos para frente de chama entrar. Essa mistura deixa esses espaços durante o processo de expansão e exaustão se tornando assim uma fonte de emissão de hidrocarbonetos.

Outra fonte muito importante de hidrocarbonetos é a camada de óleo lubrificante do motor que recobre as paredes do cilindro e os pistões. Esse óleo absorve parte dos hidrocarbonetos da mistura durante a admissão e depois os libera na exaustão. (HEYWOOD, 1988)

Uma das variáveis mais importantes para determinar as emissões em um motor de combustão interna por centelha é a relação ar/combustível. A figura 2.3 mostra que misturas mais pobres em combustível tendem a promover menores emissões de poluentes até que a mistura se torna tão pobre que a ignição não apresenta falhas e o funcionamento do motor se torna errático. Nessa situação as emissões de hidrocarbonetos aumentam devido a não combustão da mistura, cujo fenômeno é chamado de *misfire*.

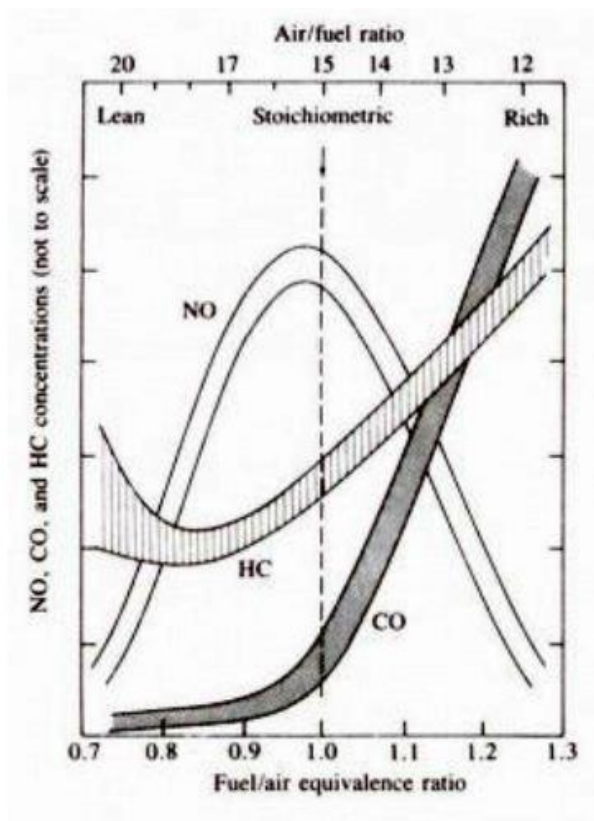


Figura 2.3 – Curva típica de emissões (HEYWOOD, 1988)

No Brasil, o CONAMA criou o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) com o intuito de promover o controle das emissões de todos os veículos fabricados no Brasil. Isso se daria por metas que os fabricantes deveriam atender em várias fases do programa para poderem ter seus motores homologados para serem vendidos no Brasil. A tabela 2.1 mostra as diversas fases do programa.

Tabela 2.1 – Índices de emissões de poluentes para veículos automotores leves ciclo Otto pelo programa PROCONVE

Poluentes	LIMITES					
	Fase L-1	Fase L-2	Fase L-3	Fase L-4	Fase L-5	Fase L-6
Monóxido de carbono (CO em g/km)	24	12	2	2	2	1,3
Óxidos de Nitrogênio (NOx em g/km)	2,00	1,40	0,60	0,25	0,12	0,08
Hidrocarbonetos (HC em g/km)	2,10	1,20	0,30	0,16	0,05	0,05
Aldeídos totais (HCO em g/km)	-	0,15	0,03	0,03	0,02	0,02
Datas de Exigência	1988	1992	1997	2005 (40%) 2006 (70%) 2007 (100%)	2009	2014 * 2015 **

* Otto Novos Modelos

**Otto 100%

2.4.1 Emissões de NO_x

Óxido nítrico (NO) e dióxido de nitrogênio (NO₂) são normalmente agrupados como emissões de NO_x, apesar de a maior parte dessas emissões serem compostas de óxido nítrico. A principal fonte de formação de NO dentro do cilindro é a oxidação de nitrogênio atmosférico presente na mistura. No entanto, se o combustível contiver valores significativos de nitrogênio em sua composição, ele pode se tornar uma fonte adicional de NO.

Os fatores mais importantes que influenciam a formação de NO dentro de um motor de ignição por centelha são a relação ar/combustível, a fração de gases residuais do ciclo passado dentro do cilindro, o tempo de ignição e as altas temperaturas dentro do cilindro. As propriedades do combustível influenciam diretamente as condições dos gases queimados. Combustíveis com teores de nitrogênio elevados aumentam a produção de NO_x, que é um poluente diretamente ligado com a formação de chuvas ácidas e a formação do fenômeno chamado *smog*. (HEYWOOD, 1988)

2.4.2 Emissões de CO

Emissões de monóxido de carbono em motores de combustão interna por centelha são basicamente controladas pela manutenção da relação ar/combustível da mistura. Misturas ricas em combustível aumentam consideravelmente a concentração de CO nos gases de exaustão no sistema de escape dos motores. Já misturas pobres em combustível apresentam concentrações muito reduzidas, da ordem de 10^{-3} de fração de molar, segundo HEYWODD (1988).

Como motores de combustão por centelha normalmente operam com misturas entre estequiométrica e rica em combustível, dependendo da condição de operação, emissões de CO devem ser controladas, já que o monóxido de carbono se trata de um gás inodoro e incolor, que em concentrações relativamente baixas já é capaz de provocar a morte por asfixia.

2.4.3 Emissões de CO₂

O dióxido de carbono é um dos produtos da combustão completa do combustível ou da oxidação do CO. O CO₂ é um dos gases da atmosfera que absorve a radiação infravermelha. Ele é naturalmente produzido pelos seres vivos, mas a concentração deste gás na atmosfera vem aumentando consideravelmente desde a revolução industrial. Ele está intimamente ligado ao efeito estufa e o aquecimento global que vivenciamos hoje em dia.

2.4.4 Emissões de HC

Os hidrocarbonetos não queimados são a consequência da combustão incompleta de combustíveis compostos de hidrocarbonetos. Os níveis de hidrocarbonetos nos gases de descarga são normalmente especificados em termos de parte por milhão de átomos de carbono.

A composição dos combustíveis influencia diretamente a composição e a concentração de hidrocarbonetos nos gases de escape. Combustíveis contendo

altas concentrações de aromáticos e olefinas produzem maiores concentrações de hidrocarbonetos reativos. (HEYWOOD, 1988)

As emissões de hidrocarbonetos são diretamente proporcionais a mistura ar combustível. Misturas mais pobres em combustível tendem a reduzir as emissões de hidrocarbonetos em motores de ignição por centelha. Suas emissões devem ser controladas, pois vários hidrocarbonetos estão relacionados com a formação do fenômeno *smog*, causam irritações das vias respiratórias e olhos, estão relacionados com alguns tipos de câncer e possuem mau cheiro.

3 Aparato Experimental

Nesta seção serão apresentados os equipamentos e acessórios utilizados para realização do trabalho em tela.

3.1 Motor Honda 196cc

O motor utilizado foi um motor Honda com cilindrada de 196 cm³, que equipava as motos CBX Strada 200. Esse motor foi fabricado pela Honda Brasil para equipar esta motocicleta de 1994 até 2002, quando este modelo foi descontinuado.

É um motor monocilindro, com refrigeração a ar, quatro tempos, com comando de válvulas no cabeçote e duas válvulas por cilindro. A ignição é controlada eletronicamente e é do tipo CDI (ignição por descarga capacitiva). A partida é feita por um motor elétrico. Esse motor originalmente possuía um sistema de alimentação de combustível por carburador de corpo simples com válvula de controle de passagem de mistura ar/combustível do tipo guilhotina.

Esse motor possui uma razão de compressão de 9,0:1, rende 19 cv a 8.500 RPM de potência e possui torque de 1,7 Kgf.m a 7.000 RPM. As características principais desse motor se encontram na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Especificações do motor Honda 196cc

ITEM	DESCRIÇÃO
Cilindro	Monocilindro
Refrigeração	À Ar
Partida	Motor elétrico
Comando de válvula / Válvulas por cilindro	Comando de válvula no cabeçote com duas válvulas no cabeçote
Diâmetro do pistão	63,5 mm
Curso do virabrequim	62,2 mm
Volume deslocado	196,9 cm ³
Taxa de compressão	9,0:1

O motor está montado sobre uma base de metal que esta fixada sobre uma mesa de madeira, tornando o conjunto móvel. Acoplado diretamente ao eixo do motor há um dinamômetro. Porém, o mesmo não foi utilizado por não estar calibrado. Há um painel onde fica os controles do acelerador do motor, acionamento da injeção eletrônica, acionamento da ignição e controle de carga do dinamômetro. Na figura 3.1 pode se ver o conjunto do motor e sua base de fixação.

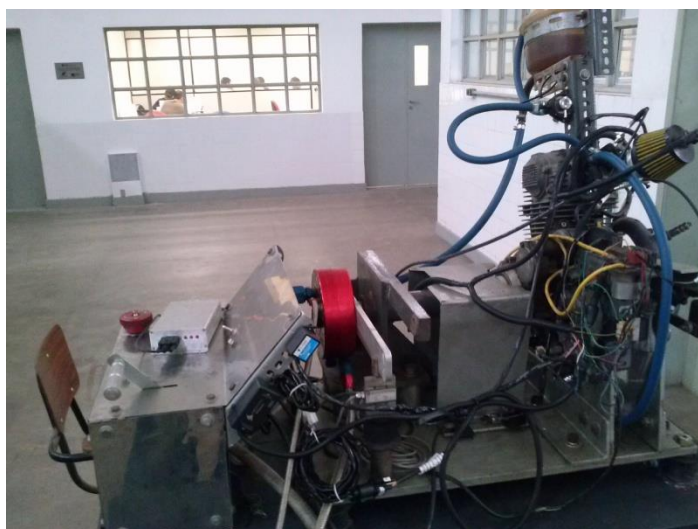


Figura 3.1 – Foto do conjunto motor/base de fixação

3.2 Carburador de Corpo Simples

O carburador utilizado para os testes de emissão de poluentes foi o carburador original fornecido pela Honda do Brasil para esse tipo de motor. Trata-se de um carburador de corpo simples com válvula de controle da passagem ar/combustível do tipo guilhotina. Esse carburador apresenta um Venturi de 26 mm de diâmetro.

O controle do nível de combustível dentro da cuba deste carburador se faz por um flutuador que, ao chegar ao nível apropriado, fecha uma válvula do tipo agulha que não permite a entrada de combustível. Caso o nível abaixe novamente, esse flutuador abre a válvula agulha liberando novamente a passagem de combustível. A figura 3.2 é uma foto do sistema utilizado pelo carburador.

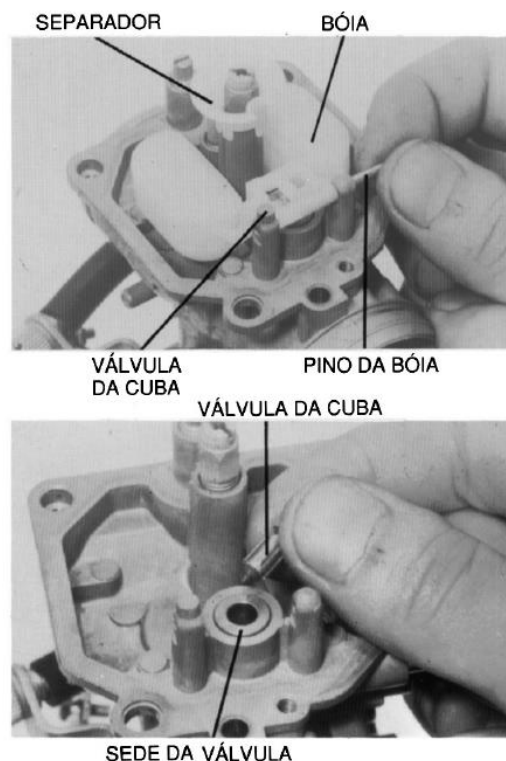


Figura 3.2 – Foto do sistema de controle de nível de combustível

O venturi é responsável por provocar um aumento da velocidade do ar que passa pelo carburador, gerando uma diferença de pressão entre a cuba e a

passagem de ar do carburador, o que faz com que o combustível se desloque pelo sistema principal de alimentação e, pelo arrasto aerodinâmico, realiza a pulverização do combustível. Nas figuras 3.3 e 3.4 podem-se ver fotos do carburador utilizado para os testes.



Figura 3.3 – Vista lateral do carburador de corpo simples



Figura 3.4 – Vista frontal do carburador de corpo simples

3.3 Injeção Eletrônica de Combustível

Foi adotado para o teste comparativo de emissões de poluentes um sistema de injeção eletrônica com bico injetor próximo a válvula de admissão do motor.

Para que o sistema funcione, foram adaptados sensores de temperatura do óleo do motor, temperatura do ar de admissão, pressão do coletor de admissão, sonda lambda do tipo *wideband* seu módulo de condicionamento de sinal, e o corpo da injeção, que é onde se encontram a borboleta de aceleração e o bico injetor.

Para que o combustível chegue pressurizado até o bico injetor, também foi adaptada à bancada uma bomba de combustível elétrica e um regulador de pressão de combustível, assim como suas respectivas mangueiras.

Para gerenciar todos esses itens foi adotado um módulo *megasquirt2*. A descrição de todos esses itens será feita nos próximos tópicos.

3.3.1 Sensor de Temperatura de Óleo

Para monitorar a temperatura do óleo do motor foi adotado um sensor da marca MTE-Thompson código MTE-4053. Esse sensor tem as suas relações entre temperatura e resistência demonstradas pela tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Relações de temperatura/resistência para o sensor MTE-4053

Temperatura (°C)	Resistência (Ohms)
20	2400
40	1200
60	600
80	330
100	200

Esse sensor foi instalado diretamente no bujão de drenagem do carter do motor para garantir o seu total contato com o óleo do reservatório. O sensor pode ser visto na figura 3.5.

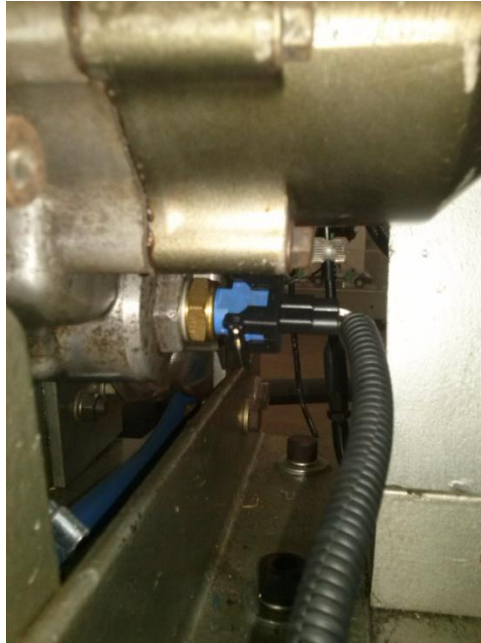


Figura 3.5 – Sensor de temperatura do óleo MTE-4053

Para essa adaptação foi feito um furo na parte central do bujão de drenagem do motor e utilizou-se uma porca por dentro do bujão para prender o sensor. Para vedação foi utilizada uma arruela que foi fornecida juntamente com o sensor. Essa montagem pode ser vista na figura 3.6 e 3.7.



Figura 3.6 – Sequência de montagem do sensor MTE-4053



Figura 3.7 – Sequência de montagem do sensor MTE-4053

3.3.2 Sensor de Temperatura do Ar de Admissão

Para monitorar a temperatura do ar de admissão foi adotado um sensor da marca MTE-Thompson código MTE-5061. Esse sensor tem as suas relações entre temperatura e resistência demonstradas pela tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Relações de temperatura/resistência para o sensor MTE-5061

Temperatura (°C)	Resistência (Ohms)
20	2500
50	826
80	322

Esse sensor foi adaptado no filtro de ar de admissão do motor. Foi feito um furo na parte central do filtro de ar e o sensor ficou fixo ao filtro por pressão com a borracha. Essa adaptação pode ser vista na figura 3.8.



Figura 3.8 – Sensor de temperatura de ar MTE-5061

3.3.3 Sonda Lambda do Tipo *Wideband*

Foi utilizada uma sonda Lambda BOSCH LSU 4.2 e uma unidade condicionadora de sinal da marca ODG tipo RAPTOR. Essa sonda lambda é do tipo planar de ZrO_2 . Esse conjunto permite fazer a leitura da proporção de oxigênio nos gases de escape do motor e se obter o fator lambda em uma faixa que varia de lambda 0,65 até 1,30 com uma precisão de 0,005. A curva característica desse conjunto pode ser vista na figura 3.9

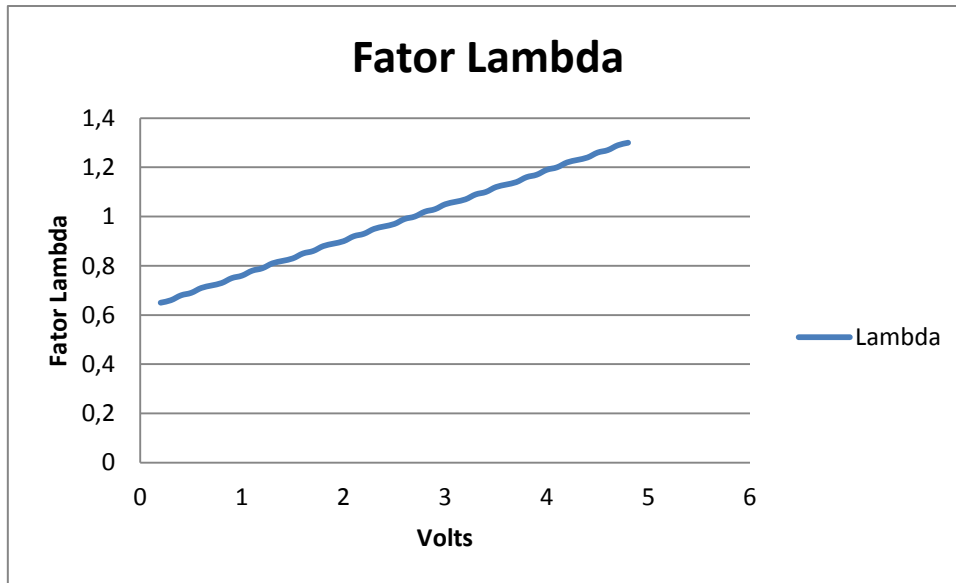


Figura 3.9 – Curva característica da sonda lambda Wideband

3.3.4 Sistema de Bombeamento de Combustível

Para bombear o combustível do reservatório até o bico injetor foi utilizada uma bomba elétrica do fabricante Magneti Marelli modelo WB101. Essa bomba possui uma vazão de 60 L/h a uma pressão de 3 bar. Essa bomba foi fixada a bancada através de um suporte próprio como pode ser visto na figura 3.10.



Figura 3.10 – Bomba de combustível e seu respectivo suporte

Após passar pela bomba, o combustível é filtrado pelo filtro da marca Metal Leve, de código KL582, para evitar a passagem de impurezas do combustível que poderiam danificar o bico injetor. Esse filtro pode ser visto na figura 3.11.



Figura 3.11 – Filtro de combustível

Para o controle da pressão da linha de combustível foi utilizado um regulador de pressão da marca LP código LP47560/204, que mantém a pressão na linha de combustível estável em 3 bar em relação a atmosfera. O regulador de pressão pode ser visto na figura 3.12. Este regulador de pressão nada mais é do que uma membrana que possui em suas costas uma mola onde, quando a pressão na linha de combustível atinge um determinado valor, essa membrana se desloca empurrando a mola e assim permitindo a passagem do combustível pelo duto de retorno.

Este modelo possui uma tomada de vácuo que poderia ser conectada diretamente ao coletor para manter um diferencial de pressão em relação ao coletor de admissão constante. Porém se optou por manter essa tomada de vácuo desligada para facilitar a montagem. Sendo assim a diferença de pressão que esse regulador está controlando é em relação à atmosfera do ambiente.

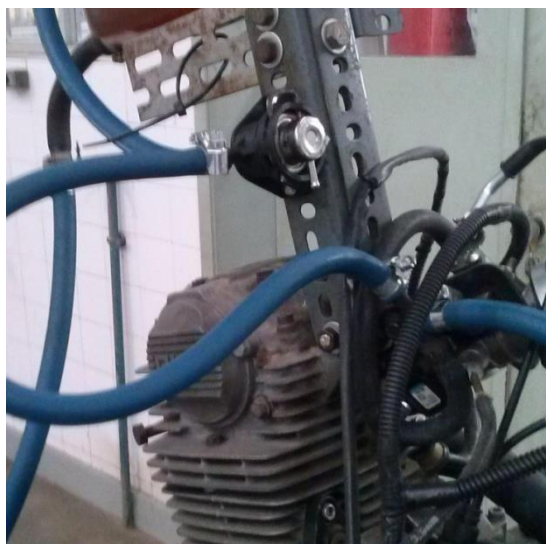


Figura 3.12 – Regulador de pressão

Dessa forma se tem que o combustível é bombeado de seu reservatório pela bomba elétrica, sendo posteriormente filtrado e então encaminhado para o bico injetor. Existe um regulador de pressão para garantir que a pressão na linha de combustível seja mantida sempre a 3 bar em relação a atmosfera. O excesso de combustível é retornado ao reservatório por uma linha de retorno conectada ao regulador de pressão de combustível. O funcionamento da linha de alimentação de combustível pode ser mais bem visualizado no desenho esquemático da figura 3.13.

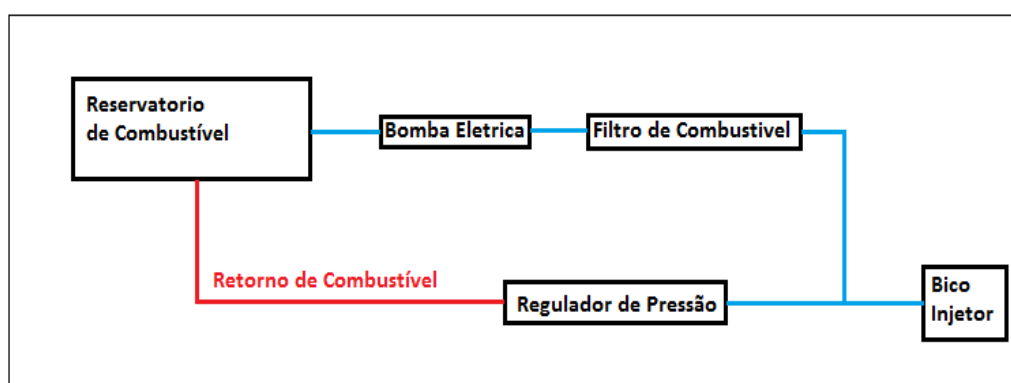


Figura 3.13 – Desenho esquemático da linha de alimentação de combustível

3.3.5 TBI – Throttle Body Injection

A TBI, throttle body injection ou corpo do acelerador da injeção, utilizado para adaptação foi um modelo que originalmente era utilizada pela moto Kasinski Comet 250 Gtr. Essa TBI possui em seu corpo um bico injetor que fica voltado para o duto de admissão do motor. Esse corpo de injeção possui uma borboleta de aceleração de 27,5 mm de diâmetro. Ela possui uma tomada de vácuo posterior a borboleta de aceleração que permite a medição da pressão do coletor de admissão. Essa TBI pode ser vista na figura 3.14.



Figura 3.14 – Corpo de injeção

Esse corpo de injeção foi adaptado aparafusando se o mesmo diretamente no motor utilizado para os testes. Essa TBI já adaptada no motor pode ser vista na figura 3.15.



Figura 3.15 – Corpo de injeção já adaptado no motor

3.3.6 Módulo de Injeção Eletrônica – Megasquirt 2

Foi selecionado para o controle do sistema de injeção eletrônica o módulo megasquirt2 com a placa na versão 3.0. Esse módulo tem a possibilidade de poder ser utilizado numa grande variedade de projetos. Ele pode fazer tanto o controle do sistema de injeção de combustível quanto do sistema de ignição. Porém, no caso em questão, ele foi utilizado somente para o controle do sistema de alimentação.

Esse módulo possui seu projeto aberto a comunidade e, portanto o mesmo possui todos os layouts das placas e códigos das firmwares disponíveis para alteração. Ele possui um processador MC9S12 de 16 bits e 24 MHz. Na figura 3.16 pode se ter uma visão interna do módulo.

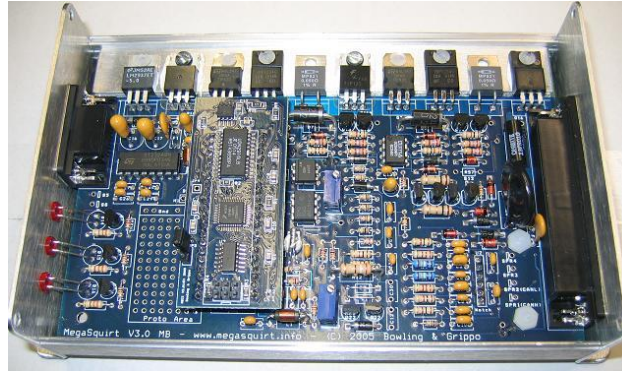


Figura 3.16 – Visão interna do módulo MegaSquirt 2

A ligação de todos os sensores e atuadores foi feita utilizando o esquemático de instalação fornecida pelo fabricante do módulo. Esse esquemático pode ser visto na figura 3.17.

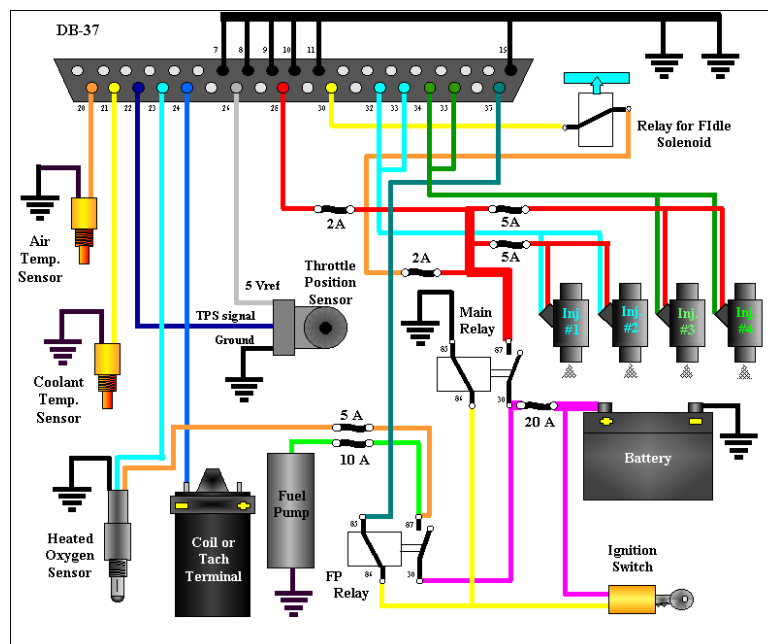


Figura 3.17 – Desenho esquemático de instalação da MegaSquirt (BOWLING&GRIPPO, manual de instalação)

O módulo possui integrado à sua placa um sensor Motorola MPX4250AP que foi conectado por meio de uma tubulação própria a tomada de vácuo do corpo de injeção. Esse sensor permite ao módulo a leitura da pressão do coletor de admissão do motor.

3.4 Analisador de Emissões

O analisador utilizado durante os testes foi o modelo Testo 350 XL, que pode ser visto na figura 3.18.



Figura 3.18 – Testo 350 XL

Esse analisador de gás se divide basicamente em três partes: a unidade de controle, unidade de análise de gases e a sonda. A tabela 3.4 mostra a faixa de medição e a precisão que os gases que serão analisados nesse estudo são medidos por este aparelho.

Tabela 3.4 – Dados Técnicos do analisador de gases (TESTO INC. 2003)

Sensor	O ₂ (%)	CO (ppm)	CO ₂ (%)	NO _x (ppm)
Faixa de Medição	0 a 25	0 a 10000 ppm	0 a 100	0 a 3000 ppm
Precisão	±0,8%	±10 ppm (0 – 99 ppm) ±5% ppm (100 – 1999 ppm)	±0,8%	±5 ppm (0 – 99 ppm) ±5% ppm (100 – 1999 ppm)

		±10% ppm (2000 – 10000 ppm)		±10% ppm (2000 – 3000 ppm)
--	--	-----------------------------------	--	----------------------------------

Para análise dos gases de escape pelo equipamento, sua sonda foi introduzida diretamente na saída do cano de descarga do motor em questão.

3.4.1 Unidade de Controle

A unidade de controle é onde todos os dados coletados pela unidade analisadora são exibidos. Essa unidade permite a impressão destes dados. A figura 3.19 mostra a unidade de controle.



Figura 3.19 – Unidade de controle

3.4.2 Unidade de Análise de Gases

Esta unidade é onde ficam localizados todos os sensores, bombas e eletrônicos para realizar a análise dos gases provenientes da descarga do motor.

Esse equipamento é capaz de medir O₂, CO, NO, NO₂, SO₂, H₂S e HC. A figura 3.20 mostra a unidade de análise de gases.

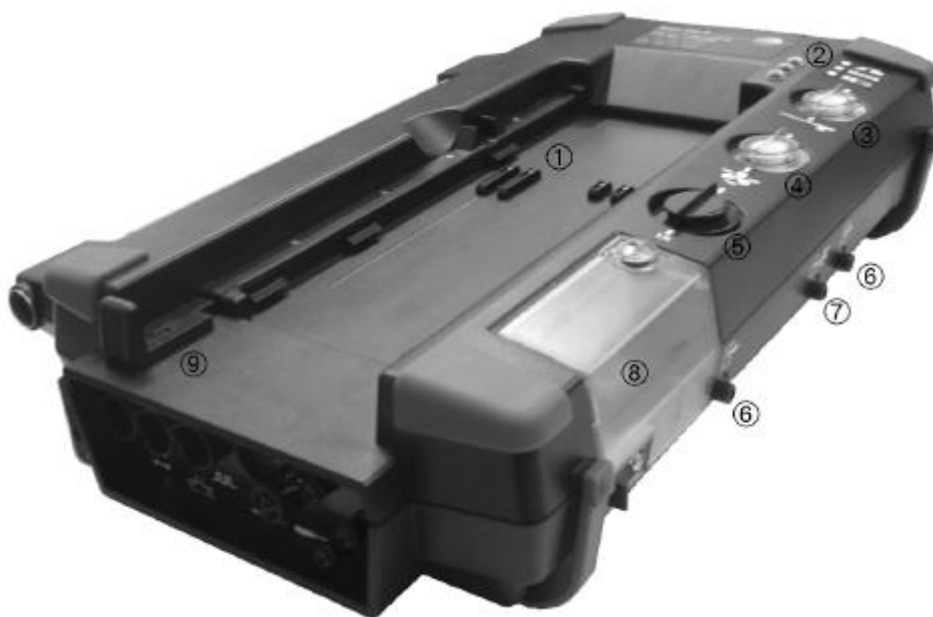


Figura 3.20 – Unidade de análise de gases

3.4.3 Sonda

A sonda retira amostra dos gases da descarga do motor para serem analisados pela unidade analisadora. Ela possui um termopar para medir a temperatura dos gases sendo analisados. A figura 3.21 mostra a sonda utilizada pelo equipamento.



Figura 3.21 – Sonda

4 Procedimento Experimental

Para os testes de emissão de poluentes foram adquiridas gasolina do tipo comum no Posto Boliche localizado na Avenida Santa Cruz, 170 em Realengo.

Inicialmente foi feito o teste com o motor utilizando o sistema de carburação, em três rotações diversas. De posse dos dados deste teste, passou-se para a adaptação do sistema de injeção eletrônica.

Após a correta parametrização do sistema de injeção, repetiram-se os testes de emissão nas mesmas três rotações.

4.1 Procedimento para Ajuste do Motor para o Teste de Emissões com o Sistema de Carburador

Para garantir o correto funcionamento do motor com o sistema carburador foi feita uma revisão do carburador, com a troca da válvula agulha, que se encontrava travada e a substituição do o'ring de vedação da cuba.

Foi feita uma limpeza de todas as peças do carburador com gasolina e passou-se ar comprimido pelos dutos do carburador para garantir que nenhum duto se encontrava obstruído.

Após essa limpeza e remontagem, foi feita a regulagem do sistema de marcha lenta garantindo que o motor mantivesse a rotação de 1500 ± 100 RPM em condição de marcha lenta.

Nesta etapa dos testes de emissão foi utilizado o módulo de injeção eletrônica megasquirt2 para monitorar a rotação do motor e a temperatura do óleo. Para se obter o sinal de rotação do motor, este foi captado diretamente do sinal positivo da bobina de ignição.

O sensor de temperatura do óleo MTE-4053 foi adaptado ao bujão de drenagem do carter também nesta fase, para se garantir que o motor se encontrava na temperatura correta de funcionamento durante os testes. A temperatura do óleo do motor em todos os testes se encontrava em temperaturas superiores a 71° C e a maior temperatura atingida foi a de 101° C. Durante a

adaptação deste sensor se procedeu a troca completa do óleo do motor. Utilizou-se o óleo Mobil Super Moto 4T 20W-50 API SF.

4.1.1 Teste de emissão de poluentes com o sistema carburado

Inicialmente deixou-se o motor em funcionamento em marcha lenta até que o mesmo atingisse a sua temperatura de funcionamento. Isso é obtido se garantindo que a temperatura do óleo no Carter se encontrava em temperaturas superiores a 71° C.

Com o motor previamente aquecido foi acoplada a sonda do Testo 350 XL diretamente na saída do cano de descarga do motor de teste. Então se realizou a leitura das emissões de poluentes pelo motor em condição de marcha lenta, que neste motor é a 1500 ± 100 RPM. Após essa leitura se repetiu o procedimento experimental com o motor em rotações de 3500 ± 100 RPM e 4500 ± 100 RPM. Essas rotações foram selecionadas com o intuito de se traçar as curvas características de emissões de cada tipo de poluentes por este motor. Estes testes foram realizados sem carga no dinamômetro.

4.2 Procedimento para Ajuste do Motor para o Teste de Emissões com o Sistema de Injeção Eletrônica

Inicialmente se procedeu a adaptação da sonda lambda no cano de descarga do motor. Para tal, se aproveitou um furo já presente no cano de descarga para tal fim. Na figura 4.1 pode se ver o módulo de condicionamento de sinal ODG Raptor fixado a lateral do painel de controle do motor.



Figura 4.1 – Módulo de condicionamento de sinal

Posteriormente se fez a adaptação da TBI diretamente ao motor. A TBI utilizada possui o mesmo diâmetro do duto de admissão do motor se fazendo necessária somente a refuração da base da mesma para correta fixação ao motor.

Após a adaptação da TBI foi feita a instalação das linhas de combustível. Foi feita a instalação da bomba elétrica e do regulador de pressão de combustível, assim como suas respectivas mangueiras. Para garantir que nenhuma mangueira se rompesse durante o funcionamento foi utilizado mangueira para injeção eletrônica que resistem até 10 BAR de pressão. Todas as conexões foram fixadas utilizando braçadeiras de pressão.

Com esses itens adaptados se iniciou as ligações do chicote elétrico fornecido pelo fabricante. Para tal, se seguiu as orientações presentes no manual fornecido pelo fabricante BOWLING & GRIPPO, como se pode ver na figura 3.17. Todas as emendas de fios foram corretamente protegidas com fita isolante e os fios foram agrupados e protegidos dentro de dutos plásticos do tipo “espaguete”.

Com toda a parte física da adaptação do sistema de injeção eletrônica concluída iniciou-se a parametrização do módulo de controle. Para sua realização, foi utilizado o programa TunerStudio MS na versão 2.0.6. Na figura 4.2 pode- se ver a tela inicial do programa.

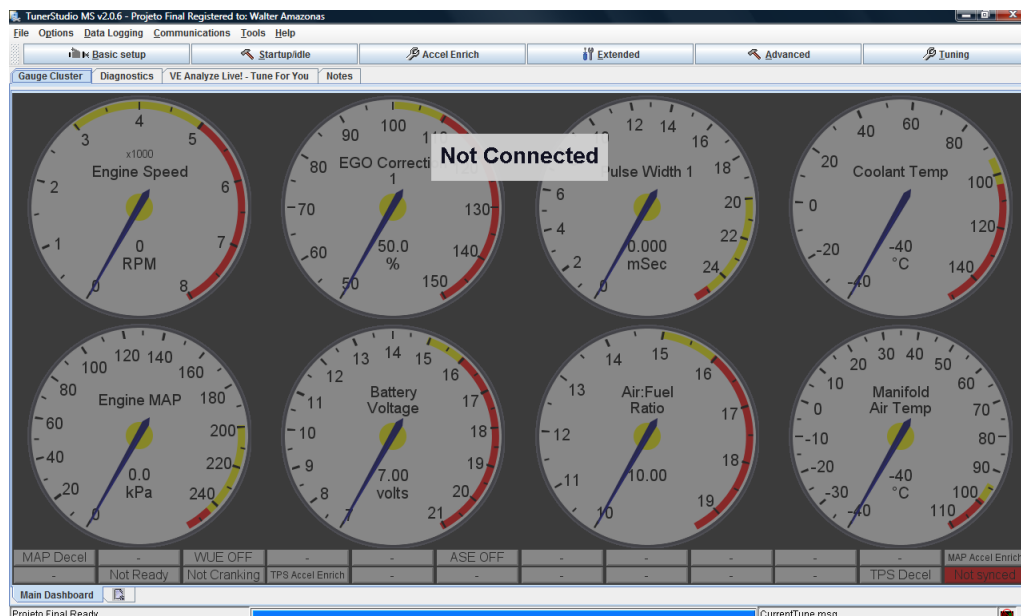


Figura 4.2 – TunerStudio MS

O início da parametrização se dá pelo cálculo, pelo próprio programa, da quantidade teórica de combustível que o motor necessitaria para poder realizar um ciclo de funcionamento. Isso se dá pela entrada de alguns dados básicos do motor, como cilindrada, vazão dos injetores, número de cilindros e relação estequiométrica do combustível a ser utilizado, como se pode ver na figura 4.3. Nesta etapa foi considerado o valor de 14,7:1 como sendo o valor para relação ar-combustível como estequiométrica para gasolina. Esse valor foi retirado do manual de instalação do módulo de injeção eletrônica e seria o valor para gasolina padrão americana.

Para que a mistura se mantenha correta para o combustível nacional, durante a fase de acerto do mapa de injeção de combustível deve-se acertar os valores de eficiência volumétrica do motor de modo que a relação ar/combustível se mantenha dentro dos valores corretos. Para isso utiliza-se das leituras da sonda lambda como parâmetro para correções.

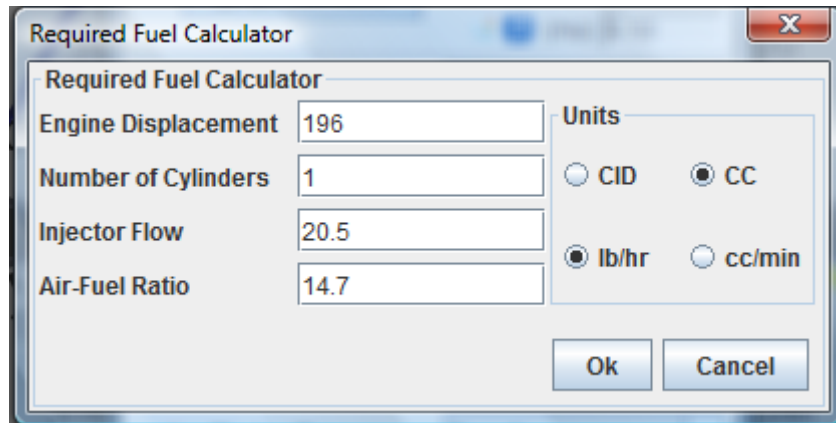


Figura 4.3 – Tela de entrada de dados para o cálculo do RequiredFuel

Com este cálculo realizado pelo programa, então se entra com as características da injeção eletrônica a ser utilizada. Este calculo é feito seguindo a equação 4.1.

$$Req\ Fuel \times 10 = \frac{36000000 \times CID \times AirDen}{NCyl \times AFR \times InjFlow} \times \frac{1}{DividePulse} \quad (4.1)$$

ReqFuel = Tempo de injeção de décimos de milissegundos;

CID = Deslocamento do pistão em polegadas cubicas;

AirDen = Densidade do ar com o MAP de 100 kPa, temperatura do ar de 70° F, e pressão barométrica de 30 In Hg;

NCyl = Numero de cilindros;

AFR = Relação ar – combustível;

InjFlow = Vazão dos injetores em libras por hora;

DividePulse = Numero de injeções por ciclo do motor.

A densidade do ar nas condições estipuladas pelo fabricante pode ser calculado pela equação 4.2.

$$AirDen = 1,2929 \times \frac{273,13}{T+273,13} \times \frac{MAP}{101,325} \quad (4.2)$$

AirDen = Densidade do ar (kg/m³);

MAP = Pressão do coletor de admissão (kPa).

Com esses dados, o programa já é capaz de calcular um mapa básico de injeção de combustível que será o suficiente para que o motor dê a partida. Essa tela de entrada de dados pode ser vista na figura 4.4.

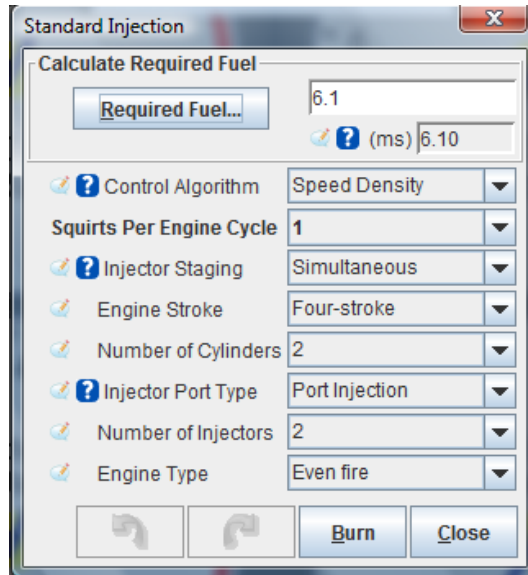


Figura 4.4 – Características da injeção

Para que o módulo seja capaz de interpretar corretamente os valores da sonda lambda, deve se calibrar corretamente esse sensor. Para isso existe a função *calibrate AFR table* dentro da aba *tools* do programa. Nesta opção deve-se selecionar qual módulo condicionador de sinal se está usando para que o módulo possa corretamente interpretar o sinal que está recebendo. Como a opção do condicionador ODG Raptor não está disponível, tem-se que entrar manualmente com a curva fornecida pelo fabricante. Para isso, selecionam-se a opção *custom linear WB* e digitam-se os valores iniciais e finais fornecidos pelo fabricante, que o módulo irá interpolar os demais pontos de funcionamento do condicionador.

Deve-se em seguida informar ao módulo quais serão os valores da relação ar-combustível que o mesmo deverá tentar manter nas mais diversas condições de funcionamento. Essa entrada de dados se dá pela *AFR Table 1*, que está representada na figura 4.5. Para os testes de emissões, se optou por tentar deixar a mistura o mais próximo da estequiométrica possível em todas as condições de funcionamento do motor para tentar minimizar as emissões de HC e de CO.

Somente foi feita a exceção para a situação de marcha lenta pois nessa condição o motor não conseguia funcionar com relações ar-combustível superiores a 12,5:1.

The screenshot shows a software window titled 'AFR Table 1'. It contains a table with throttle position (%) on the y-axis and RPM on the x-axis. The table is divided into two sections: a top section for throttle positions from 100.0% to 30.0% and a bottom section for RPM values from 500 to 6000. The top section has 12 columns of air-fuel ratios, with the first five columns showing a constant value of 12.5 and the remaining seven columns showing a constant value of 14.7. The bottom section shows the RPM values for each column.

Throttle (%)	500	800	1100	1400	2000	2600	3100	3700	4300	4900	5400	6000
100.0	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7
95.0	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7
85.0	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7
80.0	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7
75.0	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7
70.0	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7
60.0	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7
55.0	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7
50.0	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7
45.0	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7
35.0	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7
30.0	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7

Figura 4.5 – Tabela com metas de relações ar-combustível

Neste momento, o motor já se encontra apto a funcionar com a injeção eletrônica. Para se otimizar o funcionamento do motor, e por consequência as emissões de poluentes, se deve proceder o ajuste da tabela de eficiência volumétrica do motor. Essa tabela dentro do programa se chama *VE table*, que pode ser vista na figura 4.6, e o seu ajuste é experimental. Deve-se alterar seus valores de forma a se obter os valores da relação ar-combustível desejada para determinada condição de funcionamento sem que seja necessária a atuação do módulo no parâmetro de auto correção pela sonda lambda.

	501	801	1101	1401	2001	2601	3101	3700	4300	4900	5400	6000	6500	7000	7200	7500
10...	78	85	90	95	99	101	104	109	95	88	87	82	80	78	76	50
98.0	76	84	89	94	98	100	103	108	93	79	84	81	79	77	75	50
95.0	75	83	88	93	97	99	102	100	94	77	73	80	78	76	74	50
90.0	74	82	87	92	99	99	84	78	76	70	86	79	77	75	73	50
85.0	74	81	86	92	100	93	78	67	60	72	78	78	76	74	72	50
80.0	72	78	82	88	89	90	85	76	63	61	80	73	71	80	80	50
75.0	68	70	73	79	81	83	73	60	53	56	76	82	81	79	77	50
70.0	65	67	72	73	75	78	65	50	47	58	76	78	76	74	72	50
65.0	61	62	43	41	31	35	35	35	43	55	74	74	72	70	68	50
60.0	57	58	36	32	32	31	30	29	38	55	75	70	68	66	64	50
55.0	52	52	35	29	29	28	24	27	35	59	76	71	69	67	65	50
50.0	48	46	29	29	28	25	28	36	40	68	72	68	67	65	63	50
45.0	43	42	32	29	28	53	51	54	56	70	73	67	65	63	61	50
40.0	38	37	44	44	52	57	64	66	64	70	70	66	64	62	60	50
35.0	29	29	38	38	46	51	52	56	59	64	65	62	60	58	58	50
30.1	26	26	34	34	40	46	50	55	57	60	61	60	59	59	58	50

Figura 4.6 – Tabela de eficiência volumétrica

Para facilitar esta parte da parametrização do módulo, o programa *TunerStudio MS* possui um assistente chamado *VE Analyse Live*, que pode ser visto na figura 4.7, que tem a função de alterar os valores da tabela de eficiência volumétrica de acordo com os valores pré-programados na tabela de relação ar-combustível.

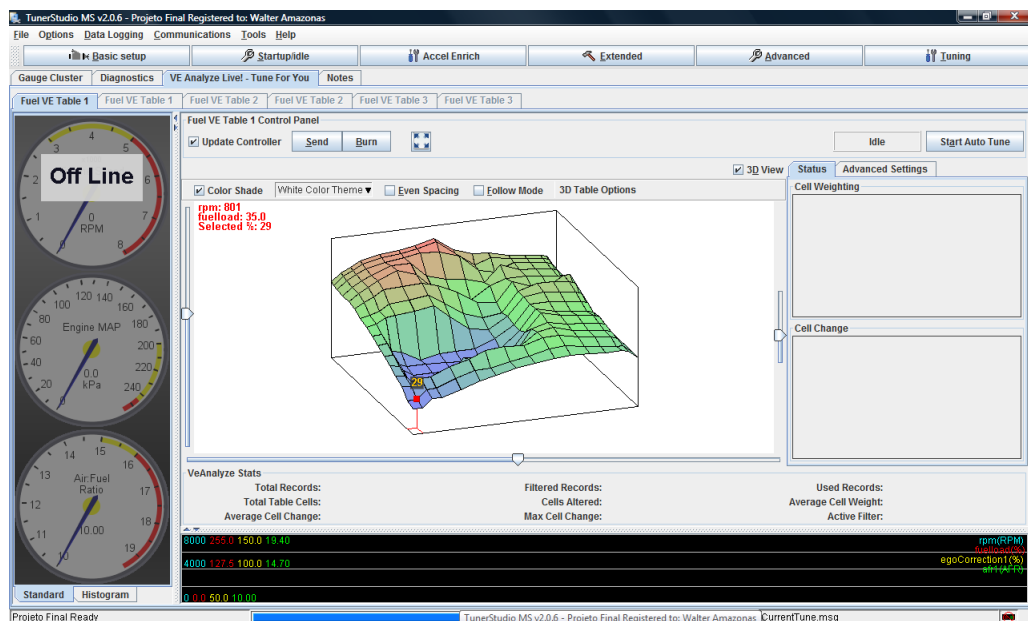


Figura 4.7 – Assistente VE Analyse Live

Para isso se faz necessário que o motor esteja em funcionamento e que se coloque o motor para operar nas condições mais variadas possíveis. Esse analisador irá comparar as respostas obtidas pela sonda lambda dos valores da relação ar/combustível reais do motor em funcionamento com os valores esperados da tabela ar/combustível, e irá alterar os valores da tabela de eficiência volumétrica, para mais ou para menos, de acordo com a necessidade verificada, de modo que, quando o motor estiver em funcionamento, ele esteja sempre com a mistura o mais próxima possível do valor da relação ar/combustível esperada.

4.2.1 Teste de emissão de poluentes com o sistema de injeção eletrônica

O procedimento experimental para o teste de emissão de poluentes com o sistema de injeção eletrônica foi semelhante ao teste realizado com o sistema de carburador. Inicialmente deixou-se o motor em funcionamento em marcha lenta até que o mesmo atingisse a sua temperatura de funcionamento. Isso é obtido se garantindo que a temperatura do óleo no Carter se encontre em temperaturas superiores a 71° C.

Com o motor previamente aquecido foi acoplada a sonda do Testo 350 XL diretamente na saída do cano de descarga do motor de teste. Então se realizou a leitura das emissões de poluentes pelo motor em condição de marcha lenta, que neste motor é a 1500 ± 100 RPM. Após essa leitura se repetiu o procedimento experimental com o motor em rotações de 3500 ± 100 RPM e 4500 ± 100 RPM. Estes testes foram realizados sem carga no dinamômetro.

5 Resultados

Nesta seção serão apresentados os resultados dos experimentos de emissões de poluentes por ambos os sistemas.

Para todos os testes se garantiu a temperatura do óleo do motor superior a 71° C. A gasolina utilizada era do tipo comum, proveniente do mesmo posto de combustível anteriormente mencionado, reduzindo-se assim variações na qualidade do combustível.

5.1 Emissões de Gases de Escapamento

Uma das principais vantagens do sistema de injeção eletrônica é o melhor controle sobre a relação ar-combustível. O sistema de injeção eletrônica com o uso da sonda lambda tem o conhecimento da quantidade de oxigênio presente nos gases de escape, podendo assim alterar a quantidade de combustível a ser injetada.

Nos testes com o sistema de injeção eletrônica optou-se por tentar manter essa relação sempre o mais próximo possível da relação estequiométrica, e isso pode ser percebido pela maior quantidade de oxigênio presente nos gases de descarga. Isso pode ser observado na tabela 5.1.

Tabela 5.1 - % O₂ nos gases de escape

RPM	O ₂ Carburador (%)	O ₂ Injeção (%)
1500 ±100	11,59 ± 0,09	22,40 ± 0,18
3500 ± 100	12,55 ± 0,10	21,79 ± 0,17
4500 ± 100	14,45 ± 0,12	21,87 ± 0,17

Nessa tabela percebe-se uma tendência do sistema de carburador de fornecer menos combustível ao motor a medida que se aumenta a rotação do mesmo, fato este não observado no sistema de injeção eletrônica. A quantidade de oxigênio na mistura de gases no sistema de injeção eletrônica se mantém mais estável. Estas tendências podem ser melhor visualizadas no gráfico presente na figura 5.1.

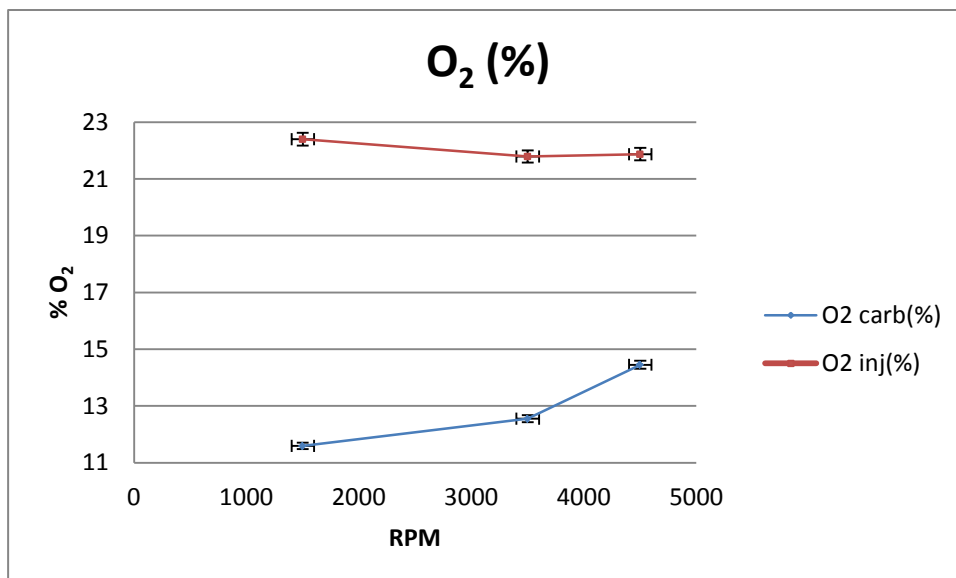


Figura 5.1 – Concentração de O₂ nos gases de descarga

Um dos principais poluentes a ser verificado é o monóxido de carbono, CO, pois o mesmo é um gás inodoro e altamente tóxico, podendo levar ao óbito de animais e seres humanos em concentrações bem reduzidas.

Durante os testes com sistema de carburação as concentrações de CO foram superiores as capazes de serem medidas pelo equipamento Testo 350 XL, o que pode ser um indício que nesses testes as concentrações eram superiores a 10.000 ppm. Já com o sistema de injeção eletrônica foi obtido o valor máximo de 3.758 ppm de CO. De posse destes dados não é possível quantificar a redução obtida de emissões de CO pela adoção do sistema de injeção eletrônica.

O CO₂ é um dos principais componentes da combustão completa de hidrocarbonetos. Esse gás não é tóxico, porém é um dos gases formadores do efeito estufa, que leva ao fenômeno do aquecimento global.

Como o sistema de injeção eletrônica utilizado para os testes foi parametrizado para manter a mistura ar-combustível o mais próximo possível da estequiométrica, observam-se nas medições que os índices de CO₂ foram inferiores se comparados com o sistema de carburação. Na figura 5.2 observa-se essa tendência. Isso se explica pela menor quantidade de combustível admitida pelo motor e por uma mistura mais homogênea, o que facilita uma melhor combustão.

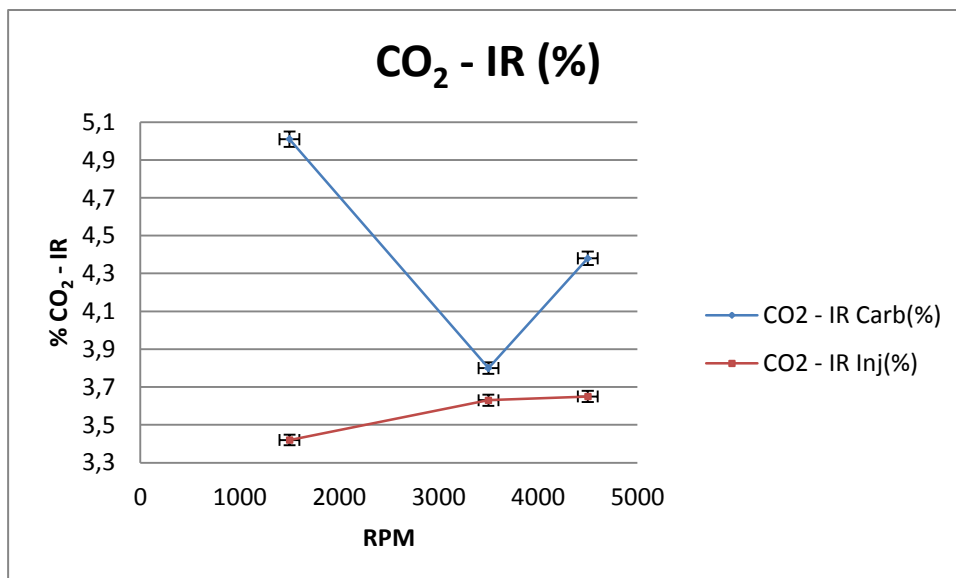


Figura 5.2 – Emissões de CO₂

O resultado esperado para as emissões de NO_x era um aumento devido a mistura estequiométrica. De acordo com HEYWOOD, as emissões de NO_x estão diretamente relacionadas com a relação ar-combustível sendo que o pico de emissões seria com misturas próximas a estequiométrica. Na figura 5.3 não se observa essa relação em todas as condições de operação.

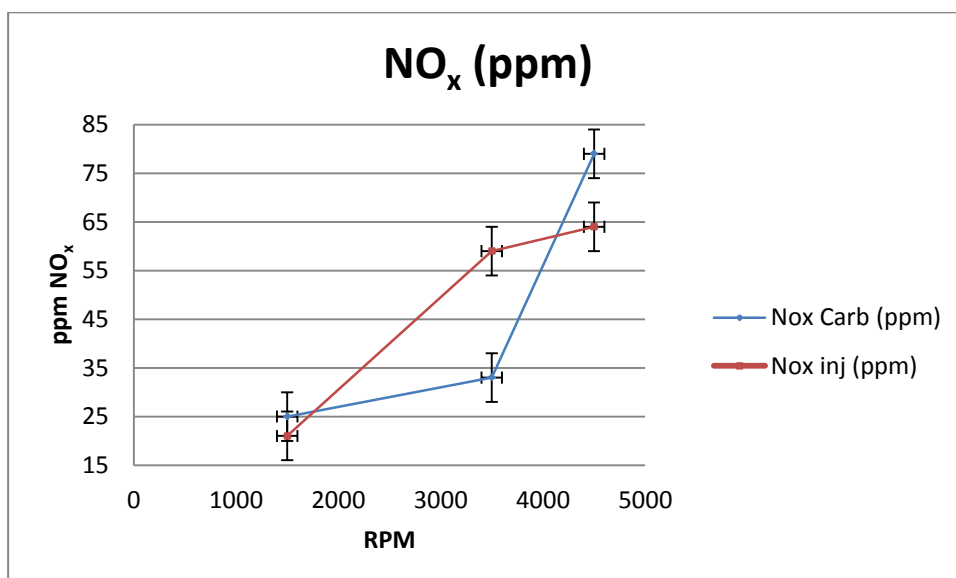


Figura 5.3 – Emissões de NO_x

Somente na condição do motor a 3500 RPM obteve-se o resultado esperado, sendo que nas demais condições as emissões com o sistema de carburação foram superiores. Para melhor compreender esses resultados de emissões de NO_x seria necessária a medição das temperaturas alcançadas dentro da câmara de combustão, já que a formação desses gases está intimamente ligada às temperaturas e pressões da combustão dentro do cilindro. Todos os resultados obtidos são apresentados na tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Resultados do teste de emissões

Teste com sistema de carburador						
carburador						
RPM	O ₂ (%)	CO (ppm)	CO ₂ - IR (%)	NO (ppm)	NO ₂ (ppm)	NO _x (ppm)
1500 ± 100	11,59 ± 0,09	(Fora da Escala)	5,01 ± 0,04	24 ± 5	0,2 ± 5	25 ± 5
3500 ± 100	12,55 ± 0,10	(Fora da Escala)	3,80 ± 0,03	33 ± 5	0 ± 5	33 ± 5
4500 ± 100	14,45 ± 0,12	(Fora da Escala)	4,38 ± 0,04	78 ± 5	0,2 ± 5	79 ± 5
Teste com sistema de injeção Eletrônica						
Injeção						
RPM	O ₂ (%)	CO (ppm)	CO ₂ - IR (%)	NO (ppm)	NO ₂ (ppm)	NO _x (ppm)
1500 ± 100	22,40 ± 0,18	(Fora da Escala)	3,42 ± 0,03	21 ± 5	0 ± 5	21 ± 5
3500 ± 100	21,79 ± 0,17	1158 ± 57,9	3,63 ± 0,03	59 ± 5	0 ± 5	59 ± 5
4500 ± 100	21,87 ± 0,17	3758 ± 375,8	3,65 ± 0,03	64 ± 5	0,2 ± 5	64 ± 5

Durante os testes, tanto com o sistema de carburador quanto com o sistema de injeção eletrônica, o controle da ignição foi deixado sob o comando do sistema de ignição original da Honda. O módulo de injeção eletrônica tem a capacidade de controlar o sistema de ignição desde que sejam feitas as devidas adaptações, porém, para evitar a influência da ignição sobre os testes, esta função não foi implementada.

O controle do sistema de ignição por parte da injeção eletrônica poderá trazer benefícios para as emissões de NO_x tendo em vista que menores avanços da ignição reduziram a temperatura máxima que a combustão ocorreria. Todavia, essas temperaturas menores durante a combustão poderiam acarretar em perda de potência e torque por parte do motor.

Por isso, para uma correta parametrização da ignição do motor, seria necessário um estudo mais aprofundado das emissões com o apoio do uso de um dinamômetro. Com o uso do dinamômetro seria possível a parametrização de tanto do mapa de injeção de combustível quanto do sistema de ignição de tal

forma que se maximize a potência e o torque do motor ao mesmo tempo em que as emissões de poluentes são minimizadas.

6 Conclusão

O experimento envolvendo sistemas de alimentação de combustível para motores de combustão interna por centelha foi realizado para analisar a influência dos sistemas de alimentação sobre as emissões de gases poluentes pelo motor. Os parâmetros de ajuste do sistema de carburação foram realizados de acordo com as recomendações do fabricante. Já o sistema de injeção eletrônica foi parametrizado para tentar manter a relação ar-combustível sempre o mais próximo possível da estequiométrica. Para reduzir a influência do combustível sobre os resultados, este foi adquirido sempre do mesmo fornecedor.

O sistema de injeção eletrônica influenciou as emissões dos diversos gases analisados nesse estudo, porém teve pouca influência sobre as emissões de NO_x por parte do motor.

Pelo fato de a mistura estar mais pobre em combustível no sistema de injeção eletrônica, pôde-se observar um aumento na quantidade de O_2 que saía pelo cano de descarga.

As emissões de CO com o sistema de carburação em todas as situações medidas foram superiores as capacidades de medição do analisador TESTO 350 XL. Somente na situação de marcha lenta o equipamento não foi capaz de medir as emissões do sistema de injeção eletrônica. Observou-se como esperado uma redução das emissões de CO por parte do motor. Porém, como não foi possível quantificar as emissões do sistema de carburação, não foi possível determinar o quanto as emissões foram inferiores.

Houve uma redução das emissões de CO_2 com a utilização do sistema de injeção eletrônica. Isso pode ser explicado pelo fato do sistema de injeção eletrônica ter sido parametrizado para que a mistura admitida pelo motor fosse a mais próxima possível da relação ar-combustível estequiométrica. Essas emissões não são consideradas como poluentes pelo fato de serem um dos principais produtos da combustão completa de hidrocarbonetos. Todavia as

emissões de CO são tóxicas. As emissões de CO₂ poderiam ser aumentadas em ambos os sistemas se fosse adotado o uso de um sistema de catalisador no sistema de escapamento, onde parte do CO seria convertido em CO₂. Se isso fosse adotado pelo fabricante, as emissões de CO poderiam ser minimizadas e ocorreria o aumento das emissões de CO₂.

A influencia do sistema de injeção eletrônica sobre as emissões de NO_x foi diversa do esperado pela teoria. Como esse tipo de emissão esta diretamente relacionada com as temperaturas máximas obtidas dentro da câmara de combustão não se pôde concluir qual é a relação entre o sistema de alimentação e as emissões desse poluente nesse motor em particular. Seria necessário um estudo mais aprofundado de como a queima ocorre dentro do cilindro. A implementação do controle de ignição por parte do modulo de injeção eletrônica provavelmente trará melhores nas emissões desse poluente.

É possível concluir que a adoção do sistema de injeção eletrônica beneficiou a redução das emissões de poluentes pelo motor em questão pelo fato de ser possível manter um controle mais apurado da relação ar-combustível admitido pelo motor.

Para melhoria dos experimentos, seria interessante a implementação do controle das curvas de ignição, para assim se estudar a influência desse sistema sobre as emissões de NO_x. O dinamômetro acoplado ao motor não se encontrava operacional e calibrado, podendo este ser objeto de futuros estudos para melhoria das curvas de potência e torque do motor, além de uma melhor parametrização do sistema de injeção eletrônica.

Referências Bibliográficas

HEYWOOD, 1988 J. B. Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, Estados Unidos da América.

VAN WYLEN, G.J.; SONNTAG. R. E.; BORGNAKKE, C. Fundamentos da Termodinâmica Clássica, Edgard Blücher, 4ª edição, São Paulo, 1995.

PROCONVE/PROMOT, 2013, Programas de Controle de Emissões Veiculares disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/areas-tematicas-qa/programa-proconve>>, acessado em: 05 de Mai. de 2013.

TESTO INC., 2003, Testo 350 XL/M Short Operation Instruction Manual, REV.11/03, disponível em: <<http://www.testo350.com> > acessado em: 20 Mai. 2013.

ODG, 2013, Tabela de Resposta da Sonda Lambda Wideband, disponível em: <http://www.odginstruments.com.br/pdfs/wideband_tabela_resposta.pdf> acessado em: 14 Mai. 2013.

ODG, 2013, Manual do Condicionador de Sinal da Sonda Wideband Raptor, disponível em: <http://odginstruments.com.br/pdfs/man_condicionador_raptor.pdf> acessado em: 14 Mai. 2013.

BOWLING & GRIPPO, 2012, Instalation Manual, disponível em: <<http://www.megasquirt.info/>> acessado em: 20 Mai. 2013.

BOWLING & GRIPPO, 2013, MS2 Extra Manual, disponível em: <<http://www.msextra.com/doc/index.html#ms2>> acessado em: 20 Mai. 2013.

MTE-THOMSON, 2010, Catalogo de Sensores de Temperatura, disponível em: <<http://www.mte-thomson.com.br/site/catalogo/catalogo-de-temperatura-2008/>> acessado em: 18 Mai. 2013.