



Universidade Federal da Bahia
Instituto de Matemática
Escola Politécnica

Mestrado em Mecatrônica

**MONITORAMENTO ELETRÔNICO DA MISTURA
AR / COMBUSTÍVEL EM MOTORES DE
COMBUSTÃO INTERNA CICLO OTTO**

JÚLIO CÉSAR CHAVES CÂMARA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Salvador

20 DE DEZEMBRO DE 2006

Universidade Federal da Bahia
Instituto de Matemática
Escola Politécnica

JÚLIO CÉSAR CHAVES CÂMARA

**MONITORAMENTO ELETRÔNICO DA MISTURA
AR / COMBUSTÍVEL EM MOTORES DE
COMBUSTÃO INTERNA CICLO OTTO**

Trabalho apresentado ao Programa de Mestrado em
Mecatrônica do Departamento de Engenharia Mecânica da
Universidade Federal da Bahia como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre em Mecatrônica.

Orientador: Ednildo Andrade Torres

Salvador
20 de Dezembro de 2006

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Bernadete Sinay Neves,
Escola Politécnica da UFBA

C649m Câmara, Júlio César Chaves
Monitoramento eletrônico da mistura ar/combustível em motores
de combustão interna ciclo Otto / Júlio César Chaves Câmara. –
Salvador, 2006.

170 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Ednildo Andrade Torres.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia,
Escola Politécnica, 2006.

1. Motores de combustão interna – Controle eletrônico. 2. I.
Torres, Ednildo Andrade. II. Universidade Federal da Bahia. Escola
Politécnica. III. Título.

CDD 20.ed.621.43

TERMO DE APROVAÇÃO

JÚLIO CÉSAR CHAVES CÂMARA

Monitoramento Eletrônico da Mistura Ar / Combustível em Motores de Combustão Interna Ciclo Otto

Dissertação aprovada como requisito parcial para a obtenção do grau de
Mestre em Mecatrônica, Universidade Federal da Bahia, pela seguinte
banca examinadora:

Ednildo Andrade Torres – Orientador _____
Doutor em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP
Universidade Federal da Bahia

Leandro Henrique Benvenuto _____
Doutor em Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas
Universidade Estadual de Campinas

Cristiano Vasconcellos Ferreira _____
Doutor em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina
Universidade Federal da Bahia

Salvador, 20 de Dezembro de 2006

AGRADECIMENTOS

À todos àqueles que contribuíram para a realização desse trabalho, em especial à equipe de Micro eletrônica do SENAI CIMATEC, pelo especial auxílio na elaboração de circuitos e interfaces de medição e à equipe da Ferramentaria por ceder precioso tempo de maquinário para preparação e instrumentação do motor utilizado nos experimentos.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	3
SUMÁRIO	4
RESUMO	6
ABSTRACT	8
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	12
LISTA DE TERMOS, ABREVIATURAS E SIGLAS.....	13
LISTA DE SÍMBOLOS.....	15
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	16
1.1 - Motivação.....	18
1.2 - Objetivo.....	19
1.3 - Estrutura do Trabalho.....	20
CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA	21
2.1 – Antecedentes históricos do Motor de combustão Interna Ciclo Otto	21
2.2 – Funcionamento de um Motor de Combustão Interna	23
2.3 – Partes de um MCI.....	24
2.4 - Formação da mistura em um MCI	25
2.5 - Determinação da mistura ideal para um MCI ciclo Otto.....	26
2.6 - Faixas de mistura admissíveis por um motor a gasolina	26
2.7 - Emissões de Gases em um Motor de combustão Interna	27
2.7.1 - Gases não poluentes	28
2.7.2 - Gases poluentes.....	29
2.8 - Controle das emissões em motores de Combustão interna.....	30
2.8.1 - Conversores Catalíticos	31
2.9 - Métodos de Monitoramento da queima em um motor de combustão interna.....	35
2.9.1 – 1º Modelo - Monitoramento da quantidade de oxigênio nos gases de escape	35
2.9.2 – 2º Modelo - Monitoramento da mistura pela análise da pressão de combustão.....	48
2.9.3 – 3º Modelo - Monitoramento da mistura pela análise da corrente iônica.....	50
CAPÍTULO 3 - TERMODINÂMICA DA COMBUSTÃO EM UM MCI.....	57
3.1 - Termodinâmica da Combustão.....	57
3.1.1 - Reação entre o combustível e o ar	58
3.1.2 - Coeficiente de excesso de ar.....	58
3.1.3 - Produtos da combustão.....	59
3.1.4 - Combustão incompleta.....	59
3.2 - Combustão em um motor de combustão interna (mci)	59
3.2.1 - Períodos da Combustão	59
3.2.2 - Desenvolvimento da Pressão no Interior dos Cilindros	61
3.2.3 - O Avanço de ignição ideal.....	64
3.2.4 - Situações adversas da combustão	66
3.3 - Estequiometria para a gasolina	68
3.3.1 - Queima de carbono para dióxido de carbono	69
3.3.2 - Queima incompleta do carbono, gerando monóxido de carbono com a deficiência de oxigênio na reação	69
3.3.3 - Produção de Dióxido de Carbono a partir da queima de Monóxido de Carbono	70
3.3.4 - Produção de vapor d'água	70

3.3.4 - Formação do Dióxido de Enxofre	71
3.3.5 - Produção de Dióxido de Nitrogênio	71
3.3.6 - Relação ar combustível teórica para a combustão	73
3.3.7 - Queima teórica da gasolina pura	74
3.3.8 - Queima teórica da gasolina Brasileira	74
CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA	77
4.1 – Materiais	77
4.2 – Métodos	79
4.2.1 - Simulação de misturas ricas e pobres	80
4.2.2 - Instrumentação do motor	83
4.2.3 - Acessórios de controle do experimento	87
CAPÍTULO 5 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	89
5.1 - Verificação da razão ar combustível queimada pelo motor	89
5.2 - Monitoramento da combustão com o uso de sensor de oxigênio	91
5.3 – Efetividade do sensor em condições de falha na operação nos eletroinjetores	94
5.1 - Conclusões	100
5.2 - Oportunidades para desenvolvimento de estudos futuros	101
APÊNDICES	103
APÊNDICE I - SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO E IGNIÇÃO	104
I.1 - Carburador	104
I.2 - Alimentação controlada eletronicamente	105
I.2.1 - Formação da mistura pelo sistema de gerenciamento eletrônico	105
I.2.2 - Estratégias e parâmetros de operação de um sistema de gerenciamento de um motor de combustão interna	106
I.2.3 - Composição do sistema de gerenciamento eletrônico de alimentação	118
II – APÊNDICE 2 - FERRAMENTA COMPUTACIONAL EES	140
III – APÊNDICE 3 - AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE DOS DADOS	142
ANEXOS	151
A1 - ANEXO 1 - DESCRIÇÃO DO MOTOR UTILIZADO NO EXPERIMENTO	152
AII - ANEXO 2 - DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DE INSTRUMENTAÇÃO	154
AII.1 - Scanner automotivo	154
AII.2- Analisador de gases para motores	155
AII.3 - Osciloscópio Automotivo	156
AII.4 - <i>Pinout</i> (quadro de pinos da central) e simulador de inconvenientes	157
AII.5 - Manômetro de pressão de combustível	158
AII.6 - Calibrador de eletroinjetores	158
AII.7 - Bomba de combustível externa com tanque e controle de vazão e pressão	159
AII.8 - Multímetro	160
AIII - ANEXO 3 - DIAGRAMA ELÉTRICO	161
AIV – ANEXO 4 - CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO TERMOPAR	164
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	165

RESUMO

CÂMARA, Júlio César Chaves. Monitoramento Eletrônico da Mistura Ar / Combustível em Motores de Combustão Interna Ciclo Otto. Salvador. 170p. Dissertação do Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia, 2006.

Legislações ambientais restringem as emissões dos motores de forma rígida, em especial dos veículos automotores, o que exige dos fabricantes o desenvolvimento de tecnologias para redução das emissões de gases, entre elas o gerenciamento eletrônico.

Os sistemas de gerenciamento de motores visam um controle preciso da relação ar combustível admitida pelo motor e do sistema de ignição, permitindo que centelhas elétricas no momento e potência adequados sejam descarregadas pelas velas de ignição na mistura comprimida pelos pistões.

Para efetuar essa tarefa, os sistemas utilizam informações coletadas em diversos sensores que vão desde temperatura do motor, posição da borboleta de aceleração e vazão de ar admitida até quantidade de oxigênio presente nos gases de escapamento.

A principal limitação atual para a melhoria da eficiência do sistema e, por conseguinte, torná-lo apto a novos desafios de restrição de emissão de poluentes é a ausência de uma informação mais precisa do processo de combustão que ocorre no interior dos cilindros do motor.

Este trabalho descreve o sistema de gerenciamento eletrônico de motores, suas características e componentes e apresenta as soluções empregadas pela indústria para monitorar a combustão em motores, descrevendo as tecnologias empregadas, características e desafios encontrados.

O trabalho apresenta também os dados levantados em experimentos realizados em um motor instrumentado, demonstrando as características do sistema de monitoramento mais usado, através do uso de sensores de oxigênio.

As informações descritas demonstram as limitações dos sistemas de monitoramento atual e suas consequências ante à operação de um motor de combustão interna representativo.

Palavras chave:

Controle eletrônico de motores, controle da mistura ar combustível, sensor de oxigênio, sonda lambda.

ABSTRACT

CÂMARA, Júlio César Chaves. Electronic management of the Air/fuel ratio on Otto Cycle Internal Combustion Engine. Salvador. 170p. Mechatronics after-graduation Program Dissertation (Master Degree) - Bahia Federal University, 2006.

Environment requirements restricts engines emissions in a rigid form, in special the automobiles engines, which demands the manufacturers to development technologies for gas emissions reduction. One of them is the electronic management.

The engine management systems aim a necessary control of the air fuel ratio admitted by the engine and the system of ignition, allowing electric flashes in the spark plugs at an adequate moment and power into the chamber to burn the mixture compressed by the pistons.

To achieve this task, the systems use information collected in diverse sensors that go since temperature of the engine, position of the acceleration throttle and airflow admitted, until amount of present oxygen in the exhaust pipe gases.

The main current limitation for an efficiency improvement system and, therefore, to achieve new challenges of restriction at pollutants emission, is the absence of additional information from the combustion process that occurs in the interior of the engine cylinders.

This work describes the real engine electronic management system, its characteristics and components and presents the solutions used by the industry to management the combustion in engines, describing the used, characteristic technologies and joined challenges.

This work also presents the data raised in experiments carried through in an instrumented engine, demonstrating the characteristics of a common electronic management, through the use of oxygen sensors.

Key words:

- Electronic engine control, air/fuel mixture control, oxygen sensor, lambda sensor.

LISTA DE FIGURAS

Fig. 2.1 – Ciclo de trabalho de um motor ciclo Otto	24
Fig.2.2 - Curva de Hook	27
Fig. 2.3 – Eficiência do conversor catalítico versus relação ar combustível	31
Fig. 2.4 – Reações químicas que ocorrem em um conversor catalítico	32
Fig. 2.5 - Aspecto interno de um conversor catalítico	33
Fig. 2.6 – Eficiência do conversor catalítico versus temperatura de operação	34
Fig. 2.7 - Sensor de oxigênio típico	36
Fig. 2.8 – Princípio de funcionamento do sensor de oxigênio	38
Fig. 2.9 – Características de tensão gerada pelo sensor de oxigênio	39
Fig. 2.10 - Malha fechada monitorada pelo sensor lambda	40
Fig. 2.11 – Fator de correção da malha fechada	42
Fig. 2.12 – Transição de gasolina para álcool sendo monitorada em motor flexível	43
Fig. 2.13 – Variação de tensão ideal de um sensor de oxigênio	44
Fig.2.14 – Curva real de um sensor, onde se visualiza a histerese do mesmo	44
Fig. 2.15 – Alterações na temperatura determinam histereses diferentes	44
Fig. 2.16 – Influência na tensão gerada pelo sensor de oxigênio	45
Fig. 2.17 – Exemplo de sistema para detecção da pressão de combustão	49
Fig. 3.1 – As três fases da combustão em um motor ciclo Otto	61
Fig. 3.2 – Desenvolvimento da pressão no interior de um cilindro	62
Fig.3.3 – Curva da pressão do gás versus ângulo do virabrequim	63
Fig.3.4 – Influência do avanço de ignição na pressão no interior do cilindro	64
Fig. 3.5 – Seqüência de fotos onde se pode verificar o fenômeno da detonação	66
Fig. 3.6 – Zonas de pré-ignição	68
Fig. 4.1 - Motor utilizado no experimento	79
Fig. 4.2 – Localização do sexto cilindro facilita substituição da válvula injetora	80
Fig. 4.3 – Válvula injetora com vazão ampliada através de eletro erosão	81
Fig. 4.4 – Teste de vazão da válvula injetora retrabalhada com eletro-erosão	81

Fig. 4.5 – Teste de vazão com injetor obstruído	82
Fig.4.6 – A operação de substituição das válvulas injetoras foi facilitada	83
Fig. 4.7 – Sensores de Oxigênio – original e adicionais	85
Fig. 4.8 - Dissipador do sensor de oxigênio do cilindro seis e respectivo termopar	85
Fig. 4.9 – Bomba e controle de combustível	86
Fig. 4.10 – Manômetro de pressão de combustível	87
Fig. 4.11 – Analisador de gás com respectiva sonda instalada no escapamento	87
Fig. 5.1 – Balança foi utilizada para medir consumo de combustível	90
Fig. 5.2 – Medição da massa de ar admitida – sensor e respectivo valor captado	90
Fig. 5.3 – Gráfico com emissão de gases antes e após fechamento da malha	93
Fig. I.1 – Carburador	104
Fig. I.2 – Fator de multiplicação do tempo de injeção em função da temperatura	108
Fig. I.3 – Exemplo de sistema de controle de injeção de gasolina para partida a frio	109
Fig. I.4 – Enriquecimento devido a aceleração	110
Fig. I.5 – Exemplo de corte de injeção versus temperatura do motor	111
Fig. I.6 – Corte da injeção em rotações excessivas	113
Fig. I.7 – Circuito de controle de combustível em malha fechada	115
Fig.I.8 – Exemplo de interface entre o sistema de Climatização	115
Fig. I.9 – Sistema Imobilizador e sua interface	116
Fig.I.10 – Interface entre transmissão e sistema de gerenciamento do motor	117
Fig. I.11 – Exemplo de luz piloto de varia no sistema de gerenciamento	118
Fig. I.12 – Bomba de combustível	119
Fig. I.13 – Aspecto do combustível saindo do Bico injetor	120
Fig. I.14 – Sistema de alimentação de combustível	120
Fig. I.15 – Borboleta de aceleração	121
Fig. I.16 - Sensor de vazão mássica e respectivos fios aquecidos	122
Fig. I.17 – Circuito esquemático do sensor de massa de ar	123
Fig. I.18 – Sensor de rotação e sinal característico	124
Fig. I.19 – Sensor de fase do motor	125
Fig. I.20 – Efeito Hall	125
Fig. I.21 – Funcionamento do sensor de fase	126
Fig. I.22 - Sensor de temperatura da água do motor	126
Fig. I.23 - Potenciômetro sensor da posição da borboleta de aceleração	128
Fig. I.24 – Sinais do sensor de detonação x pressão no cilindro	128
Fig. I.25 – Sensor de oxigênio	129
Fig. I.26 – Formas de onda simplificadas em um sistema de controle	130
Fig. I.27 - Formação da mistura e posicionamento dos injetores	131

Fig. I.28 – Sistema monoponto e fenômeno da condensação com motor frio	132
Fig. I.29 – Injetor típico e suas partes internas	132
Fig. I.30 – Bobinas de ignição	134
Fig. I.31 – Faixa ideal de trabalho da vela de ignição	135
Fig. I.32 – Alterações no consumo de combustível e emissão de gases	135
Fig. I.33 - Funcionamento da Ignição DIS com bobina dupla	138
Fig. I.35 – Central eletrônica de gerenciamento do motor Bosch Motronic M 2.8.1	139
Fig. II.1 – Tela do EES utilizado nos cálculos	140
Fig. A1.1 – Motor utilizado no experimento	152
Fig. All.1 – Scanner utilizado no experimento	154
Fig. All.2 - Analisador de gases utilizado no experimento	155
Fig. All.3 - Osciloscópio utilizado	156
Fig. All.4 - Simulador de inconveniente e <i>pinout</i> utilizado	157
Fig. All.5 - Manômetro de combustível utilizado	158
Fig. All.6 - Equipamento para calibração dos eletroinjetores	159
Fig. All.7 - Bomba externa de combustível	159
Fig. All.8 - Multímetro utilizado nos experimentos	160

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Tabela com principais constituintes do ar	57
Tabela 4.1 – Principais características do Motor utilizado no experimento	78
Tabela 5.2 – Relação ar combustível encontrada.....	90
Tabela 4.3 - Tempo necessário para operação do sensor em duas temperaturas ambiente	92
Tabela 5.4 – Valores medidos com Analisador de gases conectado no escape geral	95
Tabela 5.5 – Valores medidos com Analisador em condição de vazão baixa	96
Tabela 5.6 – Valores medidos com Analisador de gases em condição de vazão excessiva.....	97
Tabela 5.7 – Valores medidos com Analisador de gases no sexto cilindro.....	98
Tabela I.1 - Estratégia em função da posição da Borboleta de aceleração.....	127
Tabela A1.1 – Especificações do motor	153
Tabela AII.2 – Medições efetuadas pelo analisador de gases do experimento.....	155

LISTA DE TERMOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

APMS – Antes do Ponto morto superior

BMEP - *Break Mean Effective Pressure* (pressão média efetiva). Representa a pressão média teórica necessária sobre os pistões de um motor sem atrito (com as mesmas dimensões e velocidade) para produzir a mesma potência de saída do motor em consideração;

BSCF - *Brake Specific Fuel Consumption*, ou Consumo de combustível específico. Representa a razão entre a quantidade de combustível consumida pelo motor e a potência fornecida pelo mesmo;

DASH POT – estratégia de fechamento gradual do fornecimento de ar ao motor durante o fechamento da borboleta. Visa reduzir trancos e melhorar os índices de emissões de gases poluentes emitidos;

ddp – Diferença de potencial

EGR - *Exhaust Gas recirculation*, ou sistema de recirculação de gases de escapamento;

Flex – motor apto a rodar, com funcionamento perfeito e sem necessidade de adaptações, com gasolina brasileira ou álcool puros ou em qualquer proporção;

EES – Engineering Equation Solver. Trata-se de um software utilizado para solução de equações;

FMEA - *Failure Mode And Effects Analysis* ou Análise dos Modos e Efeitos das Falhas;

Gasohol – gasolina que possui álcool em sua composição. É um termo usualmente utilizado para a gasolina brasileira;

HEGO – *Heated Exhaust gas oxygen* sensor ou sensor de oxigênio aquecido. Tipo de sensor de oxigênio que possui acoplado uma resistência elétrica de aquecimento para redução do tempo de operação do sensor;

MCI – Motor de combustão interna

Misfire – situação em que ocorre falha na combustão devido a problemas na formação da mistura ou falha no sistema de ignição.

Mistura pobre – mistura ar combustível com excesso de ar;

Mistura Rica – Mistura ar combustível com deficiência de ar;

NTC – Coeficiente negativo de temperatura. Refere-se a materiais semicondutores que diminuem a resistência elétrica com o aumento da temperatura e vice-versa;

OBD – *On board Diagnosis* ou Diagnóstico a bordo. Norma que estabelece padrões para realização de diagnósticos em sistemas de controle de motor;

PMI – Ponto morto inferior

PMS – Ponto morto superior

PROCONVE – Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos. Regulamento governamental que rege as emissões de gases permitidas para automóveis em comercialização no Brasil;

LISTA DE SÍMBOLOS

λ - lambda – fator de excesso de ar;

T_b – tempo base de injeção de combustível;

C_L - fator de correção de malha fechada;

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Nos mais de 100 anos de evolução do motor de combustão interna, um dos fatores que mais têm preocupado pesquisadores, fabricantes e governos é a emissão de poluentes para a atmosfera. A queima incompleta de combustível efetuada nos motores de veículos tem sido um dos maiores responsáveis por diversos problemas ambientais e de saúde da população global.

Legislações ambientais restringem as emissões dos motores de forma bastante rígida, em especial dos veículos automotores, o que exige dos fabricantes o uso de dispositivos de redução de emissão de gases de forma a possibilitar o funcionamento dos motores com o mínimo de emissões possível. O uso de conversores catalíticos nos sistemas de escapamento contribuiu para a redução na emissão de gases, na medida em que convertem parte dos gases poluentes em outros gases não poluentes ou menos agressivos.

Normas estabelecidas pelo PROCONVE (Programa de Controle da poluição do Ar por Veículos) estabelecem limites às emissões que se tornam cada vez mais rígidos com o passar dos anos, demandando constantes investimentos em tecnologias de controle de emissões nos motores de combustão interna.

Para o funcionamento eficaz do catalisador, e para melhorar ainda mais o nível de emissões, foram desenvolvidos sistemas eletrônicos de controle de alimentação e ignição de motores, de forma a garantir um ajuste mais eficiente da mistura ar combustível durante o funcionamento do motor.

Para que o controle seja realmente efetivo, é necessário um controle restrito de diversos parâmetros de funcionamento, o que de fato só é possível com o uso de um sistema de gerenciamento eletrônico baseado em um controlador microprocessado, que compõe um sistema eletrônico de gerenciamento do motor.

Uma das funções do sistema de controle de um motor utilizado em dias atuais é garantir uma dosagem da mistura do ar combustível próxima à relação estequiométrica (mistura ideal), e mantê-la assim pelo maior tempo possível, permitindo que o conversor catalítico funcione de maneira correta e duradoura. De fato, o controle da razão estequiométrica da mistura ar combustível admitida é uma forma eficiente de conter as emissões dos gases.

O controle da mistura pode ser feito por diversas formas, sendo a mais comum o uso de um sensor de oxigênio que monitora os gases de escape, fazendo com que o sistema de controle atue em malha fechada fazendo a correção da mistura.

De forma mais completa, um monitoramento da combustão em si se revela bem mais rico, na medida em que diversos fatores podem ser levantados, não só a razão ar combustível. No entanto, diversos desafios são impostos a esse tipo de monitoramento, passando de desafios tecnológicos até desafios de custo, uma parte bastante importante no competitivo setor automotivo mundial.

Independente do tipo de monitoramento escolhido, um dos fatores mais relevantes é que os dispositivos utilizados devem exercer pouca ou nenhuma influência no processo de funcionamento do motor, garantindo que não produzam qualquer prejuízo ao desempenho e durabilidade do equipamento.

1.1 - Motivação

Desde a crise do petróleo na década de 70, o desenvolvimento de motores tem focado na economia de combustível e redução dos gases poluentes. A introdução de sistemas de gerenciamento eletrônico, notadamente a partir da década de 80, tem ajudado nessa tarefa, antes desempenhada por dispositivos meramente mecânicos e de baixa efetividade.

Basicamente toda a limitação encontrada na tarefa de melhorar os índices de economia de combustível e poluição dos motores esbarra na disponibilidade de informações precisas do processo de combustão no interior dos cilindros do motor. Em um cenário onde crescentes e desafiadoras metas são impostas por legislações antipoluição, e a própria demanda dos consumidores por motores mais econômicos e menos agressivos ao meio ambiente, uma eficiente supervisão do processo de combustão em si está se tornando cada vez mais necessária.

Pesquisadores da indústria de motores têm buscado soluções para aumentar a eficiência dos sistemas de controle eletrônico de motores, seja no desenvolvimento de novos sensores, seja no processamento das informações captadas. O desenvolvimento de centrais de controle e softwares mais avançados permitiu o desenvolvimento de sensores virtuais, com conseqüente redução de custo e aumento da confiabilidade.

O desenvolvimento de pesquisas nessa área na Bahia é algo bastante raro tendo em vista a pouca infra-estrutura laboratorial existente. O desenvolvimento de experimentos mostrou-se um importante estímulo, não só para executar o trabalho em si, mas para viabilizar futuros experimentos com a bancada experimental desenvolvida.

A apresentação de artigo na área – Congresso da SAE de 2005 – foi um agente motivador para a conclusão do trabalho e abertura de perspectivas futuras de estudos.

1.2 - Objetivo

De forma geral, esse trabalho tem como objetivo avaliar as emissões dos gases de combustão de um Motor de Combustão interna controle eletrônico utilizando sensores de oxigênio.

Como desdobramento desse objetivo macro, podemos citar os seguintes objetivos específicos:

- Estudar o desempenho do sensor de oxigênio (sonda lambda);
- Avaliar o controle da relação ar/combustível em motores ciclo Otto;
- Desenvolvimento de uma bancada experimental de controle das emissões de um Motor de Combustão interna;
- Avaliar o comportamento de um Motor de Combustão Interna com controle de emissões com o uso de sensores de oxigênio, perante situações adversas de funcionamento que interessem nas emissões.

1.3 - Estrutura do Trabalho

Além deste primeiro Capítulo, que apresenta o tema do estudo e seus objetivos, a dissertação é composta por mais quatro capítulos, dois apêndices, três Anexos e as referências bibliográficas.

O presente estudo avalia os sistemas de controle da relação ar combustível em motores de combustão interna. Para uma compreensão do tema, inicialmente são apresentados, no Capítulo 2, os aspectos gerais sobre um motor de combustão interna, seu funcionamento e formação da mistura.

Com o intuito de permitir um maior aprofundamento nos aspectos referentes à Termodinâmica da combustão em motores, foi desenvolvido o Capítulo 3, que abrange esse tema.

No capítulo 4 é descritos a metodologia dos experimentos realizados, os materiais e equipamentos empregados para sua execução. Com base nos dados e avaliações realizadas nesse, são descritos no capítulo 5 os resultados e conclusões dos experimentos, bem como as oportunidades para futuros experimentos.

Três apêndices fazem parte desse trabalho, sendo que o primeiro descreve com detalhes as características e funcionamento do sistema de controle de motores modernos. O segundo anexo trata do programa desenvolvido em EES (*Engineering Equation Solver*) para os cálculos das relações ar combustível dos experimentos realizados. No último apêndice são analisados os erros experimentais nas medições efetuadas.

Complementando o trabalho existem três Anexos, com a descrição do motor e equipamentos utilizados, calibração efetuada nos instrumentos e o diagrama elétrico do sistema de controle de motor utilizado.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 – Antecedentes históricos do Motor de combustão Interna Ciclo Otto

Segundo [MARTINS, 2005, p.17], “pode-se dizer que o motor de combustão interna teve início com a invenção das armas de fogo, pois nestas a energia térmica da explosão transformava-se em trabalho”. Na realidade, as primeiras tentativas de desenvolvimento de um motor ocorreram na segunda metade do século XVII, com o uso da pólvora para movimentar um pistão dentro de um cilindro. Relatos e documentos históricos demonstram em esquema, datado de 1508, onde Leonardo da Vinci propunha a elevação de peso por meio de fogo.

Na evolução do motor, Denis Papin - ajudante de Christian Huygens que havia idealizado o motor à pólvora – propôs o funcionamento da máquina a vapor, que foi seguidamente evoluída por Thomas Savery, Thomas Newcomen e James Watt. A máquina a vapor propiciou a Revolução Industrial da segunda metade do Século XVIII.

Em 1759, Henry Hood propôs a utilização de ar quente ao invés de vapor, idéia essa executada por George Caley em 1807. Outros motores a ar, que operavam por combustão externa (o combustível era queimado externamente aos cilindros), foram desenvolvidos, onde se pode destacar os motores de Robert Stirling desenvolvido no ano de 1816 e o modelo de John

Ericson de 1826. Os motores a ar apresentavam um melhor rendimento por operarem com pressão superior aos motores a vapor.

Segundo [STONE, 1999], o início da exploração comercial do Petróleo por Drake em 1859 impulsionou o uso de combustíveis líquidos, o que facilitou o armazenamento e contribuiu de forma decisiva para o desenvolvimento dos motores de combustão interna.

Em 1876, Otto patenteou um motor silencioso que operava em quatro tempos de funcionamento. O novo motor promovia a compressão prévia o que incrementou bastante o seu rendimento. Beau de Rochas também desenvolveu estudos de motores que realizam a compressão da mistura ar combustível.

Pouco após o motor de Otto, motores de dois tempos foram desenvolvidos por Robson em 1877.

A necessidade de motores leves e de alta rotação foi percebida por Daimler, que patenteou o seu motor de 2 cilindros em “V” que atingia 1.000 rpm [STONE, 1999].

Akroyd Stuart e Rudolf Diesel foram responsáveis pelo desenvolvimento do motor por ignição a compressão, onde não existia centelha elétrica para inflamar a mistura. Os motores Diesel, como são hoje denominados, apresentavam excelente rendimento embora necessitassem de um complexo sistema de injeção em alta pressão de combustível, problema que só foi resolvido eficientemente por Bosch, na década de 20.

O desenvolvimento de motores foi acompanhado pelo respectivo desenvolvimento dos sistemas auxiliares que o acompanham, onde se pode destacar [MARTINS, 2005]:

- O sistema de alimentação de combustível desenvolvido por Maybach em 1892, que foi o precursor dos carburadores;
- O sistema de ignição por alta tensão desenvolvido por Robert Bosch em 1902, que substituiu a ignição por chama, onde o controle do início da chama era precário;
- Sistema de distribuição por válvulas, comes e balancins desenvolvidos por Morey do exército americano em 1826;
- E o sistema de arrefecimento a água, desenvolvido também por Morey.

Segundo [MARTINS, 2005], mesmo mais de 100 anos decorridos após a invenção do motor de combustão interna, o seu desenvolvimento continua em ritmo crescente, sendo que

entre os anos 20 e 60 ocorreu um desenvolvimento no rendimento semelhante ao que ocorreu nos últimos cinco anos. Importantes desenvolvimentos ocorreram no campo da emissão de poluentes, onde os motores atuais, graças ao controle eletrônico e outros dispositivos, emitem cem vezes menos poluentes de há três décadas.

2.2 – Funcionamento de um Motor de Combustão Interna

O motor de combustão interna ciclo Otto, alvo desse estudo, tem o seu ciclo de trabalho definido em quatro tempos que se completam com duas voltas completas da árvore de manivelas.

Segundo [WILDNER, 2004], os quatro tempos de um motor ciclo Otto podem ser assim definidos:

- Admissão – se caracteriza pela entrada da mistura ar combustível através da válvula de admissão provocada pelo movimento do pistão do PMS (ponto morto superior) ao PMI (ponto morto inferior). Nessa etapa, a válvula de admissão permanece aberta e a de escapamento fechada;
- Compressão – com as válvulas fechadas, o pistão comprime a mistura ao se mover do PMI ao PMS. Pouco antes de chegar ao PMS, um vela de ignição promove uma centelha elétrica, que provocará o início da combustão da mistura admitida na fase anterior, com conseqüente elevação da pressão;
- Expansão – A queima da mistura provoca uma elevação da pressão no cilindro, o que promove o deslocamento do pistão para o PMI, realizando trabalho. Durante essa fase as válvulas permanecem fechadas. O tempo de expansão também é denominado de tempo motor;
- Exaustão – em um deslocamento do PMI ao PMS com a válvula de escapamento aberta, o pistão expulsa os gases queimados do cilindro para a atmosfera.

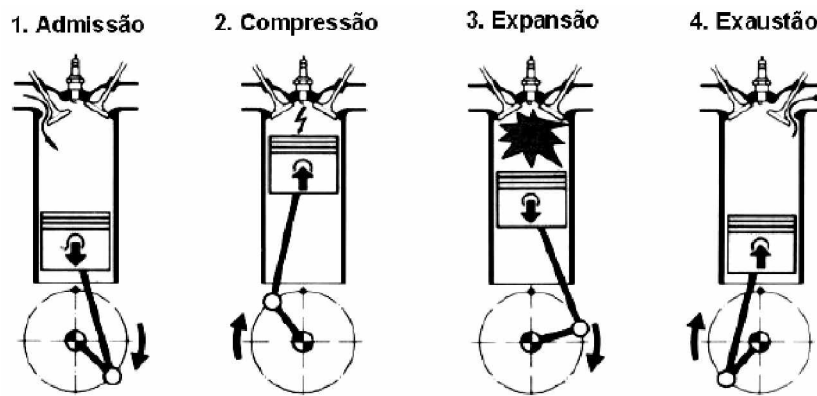


Fig. 2.1 – Ciclo de trabalho de um motor ciclo Otto. [MILHOR, 2002]

Ao chegar ao PMS, um novo ciclo se processa, de forma que duas voltas completas do virabrequim são necessárias para completar um ciclo de trabalho. O ciclo completo pode ser visualizado na Fig. 2.1.

2.3 – Partes de um MCI

Um motor de combustão interna possui, em sua composição cinco subsistemas principais:

Bloco do motor – abriga os cilindros. Possui mancais para fixação do eixo virabrequim, galerias de lubrificação e refrigeração e furos para fixação de componentes do próprio motor ou auxiliares. Em geral é produzido em ferro fundido, sendo que modernamente ligas de alumínio têm sido utilizadas, com vantagens em termos de redução de peso e melhores características em temperaturas elevadas;

Cabeçote – local onde são montadas as válvulas, seus eixos de acionamento e as velas de ignição. Geralmente de alumínio, possui numerosas galerias de refrigeração, uma vez que contém as câmaras de combustão, onde elevadas temperaturas são atingidas com a queima de combustível;

Conjunto móvel – é composto pelos pistões, bielas, eixo virabrequim e volante. Tem a função de transformar o movimento linear dos pistões em movimento rotativo da árvore de manivelas, que possui em um de suas extremidades um disco de inércia, denominado volante do motor;

Cárter – Situado na parte inferior do motor, tem como função captar e armazenar o óleo do sistema de lubrificação;

Sistema de lubrificação – possui uma bomba acionada pelo próprio motor que bombeia lubrificante aos diversos pontos do motor, o que refrigera, lubrifica, limpa e contribui para a vedação da compressão dos pistões;

Sistema de arrefecimento – faz circular um fluido refrigerante (geralmente uma mistura de água e aditivos) para manter a temperatura do motor dentro dos limites estabelecidos pelo fabricante;

Sistema de alimentação – é responsável pela formação da mistura ar combustível consumida pelo motor. Alvo desse estudo, esse sistema possui sensores e atuadores de forma a determinar a quantidade ideal de combustível que deve ser fornecida ao motor em cada instante de funcionamento;

Sistema de ignição – presente nos motores ciclo Otto, promove centelhamentos elétricos nos cilindros de forma a inflamar a mistura ar combustível comprimida pelos pistões no momento correto.

2.4 - Formação da mistura em um MCI

Um motor de combustão interna, para que funcione adequadamente, necessita de um sistema que forneça a quantidade combustível adequada a cada regime de funcionamento, garantindo economia de combustível, confiabilidade, bom rendimento e baixos índices de emissões de gases poluentes. Esse controle pode ser mecânico ou eletrônico.

No Apêndice I são descritos os dois métodos de controle, onde o Gerenciamento Eletrônico é o atual e utilizado por todas as montadoras de automóveis. Sob esse aspecto são descritos as estratégias de funcionamento, sensores, atuadores e mecanismos de controle de emissões utilizados pela indústria.

Independente do sistema utilizado, algumas premissas devem ser atendidas:

- O Método não deve acarretar grandes modificações na configuração do motor;
- Deve se garantir que o os dispositivos utilizados não interfiram no rendimento e performance do motor;

- O sistema deve ser viável, considerando-se nesse item aplicabilidade, confiabilidade e custo.

2.5 - Determinação da mistura ideal para um MCI ciclo Otto

De acordo com [PELLIZA, 2003], a ótima razão ar combustível para determinada carga e rotação de um motor, consiste naquela em que se consegue o torque desejado, com o menor consumo de combustível consistente com a operação normal e confiável. O autor [RIBBENS, 2003] complementa fazendo referência à importância de se manter sob controle as emissões de gases poluentes, qualquer que seja o regime de funcionamento do motor.

A relação ar combustível admitida pelo motor não é constante, mas dependente de diversos fatores. Diversas situações podem fazer com que um motor, operando em uma mesma rotação e carga, apresente relação ar combustível diferente de outro, igual, nas mesmas condições.

Uma mistura estequiométrica corresponde a uma combinação ar combustível que resulte em uma combustão perfeita, ou seja, onde todo o hidrogênio e carbono do combustível são convertidos após o processo de queima em dióxido de carbono e água. A gasolina brasileira, que contém cerca de 20% de álcool em sua composição, possui uma relação estequiométrica de 13,8:1. No capítulo 3 são detalhados os cálculos para se encontrar a relação ar combustível.

2.6 - Faixas de mistura admissíveis por um motor a gasolina

Segundo [WILDNER, 2004], um motor ciclo Otto a gasolina pode operar com relações ar combustíveis que variem de 8:1 a 20:1, ou seja, em uma situação de mistura rica em combustível à pobre, passando pela razão estequiométrica. É possível se avaliar a relação existente entre potência e consumo específico operando o motor com a borboleta totalmente aberta em rotação constante, condição essa alcança com o auxílio de um dinamômetro. Os resultados obtidos seguem um padrão que pode ser visualizado na chamada Curva de Hook (Fig. 2.2), que demonstra a relação entre o consumo específico (bsfc) e a pressão média efetiva (bmep).

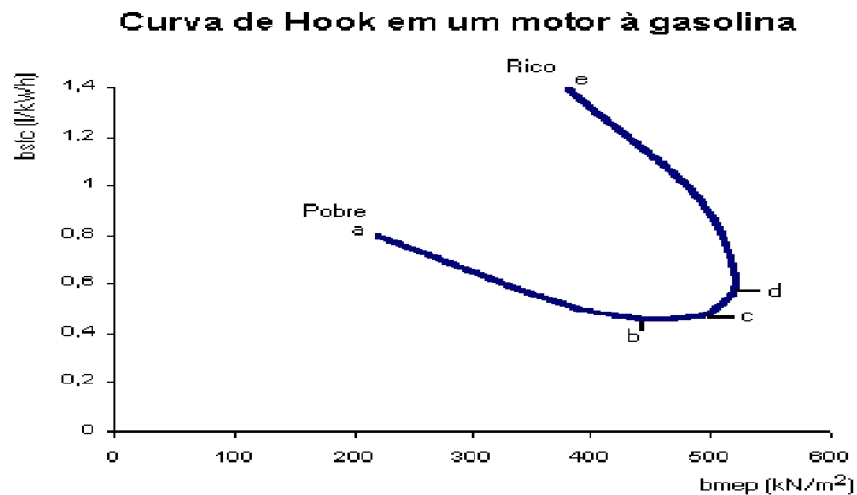


Fig.2.2 - Curva de Hook [WILDNER,2004]

Para operações visando economia de combustível e com bom rendimento (melhor relação de trabalho produzido por unidade de combustível consumido), a razão ideal é próxima a 13,8:1 para motores operando com gasolina brasileira (também chamada gasohol por conter álcool). Para maiores potências, como ultrapassagens e subidas de montanhas, uma relação mais rica é exigida.

Durante a fase de aquecimento o motor exige uma mistura ligeiramente enriquecida. A condensação de combustível nas paredes do coletor torna difícil a manutenção da suavidade de funcionamento com misturas empobrecidas [SINGER; KIRCHSTETTER e outros, 1999]. O calor de vaporização do combustível contribui para esse enriquecimento, notadamente em motores movidos a Etanol [VOLPATO; FAIÃO e THEUNISSEN, 2005].

2.7 - Emissões de Gases em um Motor de combustão Interna

Um motor de combustão interna real não consegue efetuar a queima completa do combustível. Segundo [MARTINS, 2005] diversos fatores ocasionam a queima incompleta do combustível, dentre eles:

- Tempo reduzido para a reação entre o combustível e o oxigênio do ar;
- A mistura ar combustível não é formada perfeitamente, deixando locais com excesso de oxigênio e outros com falta, tornando a queima no interior da câmara de combustão heterogênea;

- O ar admitido contém outros elementos além do oxigênio (Nitrogênio e outros gases em menor proporção);
- O combustível não é puro;
- A chama tem contato com superfícies resfriadas no interior dos cilindros;
- A geometria da câmara de combustão não permite que todo o seu volume seja atingido pela frente de chama resultante da centelha da vela de ignição. Um exemplo são os pequenos espaços formados entre os pistões, anéis de segmento e cilindro;
- Variações de carga, rotação, temperatura do ar e do próprio motor provocam alterações na combustão, demandando o fornecimento de misturas fora da razão estequiométrica.

Em um funcionamento hipotético de um motor ideal, seria consumida uma mistura ar combustível estequiométrica - que é aquela que mantém a proporção ideal entre os reagentes para a ocorrência de uma queima completa. Nessa hipotética combustão completa, os únicos subprodutos resultantes da queima da gasolina são o dióxido de carbono, Água e Nitrogênio.

A mistura real proporciona uma queima não ideal, produzindo outros subprodutos, muitos dos quais tóxicos e com emissão restrita pelo PROCONVE – Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores [BRASIL, 2002].

Pelo fato do Brasil utilizar combustíveis exclusivos (etanol hidratado e gasolina mais 20% de etanol anidro) são produzidos poluentes singulares. Os aldeídos, por exemplo, são considerados um poluente “tipicamente brasileiro”, tendo seus limites máximos estabelecidos a partir de 1992 [AMARAL, 2000].

2.7.1 - Gases não poluentes

Os gases do escapamento de um motor são compostos por 99% de gases não poluentes, que em sua maioria não trazem problemas à saúde. Segundo [BOSCH, 1999], esses gases podem ser assim descritos:

- Nitrogênio – parte integrante do ar que respiramos, não participa como fonte de energia na queima – 71%;
- Vapor d’água – compõe cerca de 9% dos gases de escape;
- Dióxido de carbono (CO₂) – compõe cerca de 18% dos gases eliminados. Apesar de não ser considerado poluente, é um dos responsáveis pelo Efeito estufa, contribuindo de forma significativa para a elevação da temperatura global [HEISLER, 2002];

- Oxigênio e gases inertes – cerca de 1% dos gases do escapamento. Corresponde ao oxigênio que não reagiu com o combustível durante a queima e os outros gases que compõe o ar atmosférico em reduzida quantidade, tais como argônio, hélio etc. [PELLIZA, 2003].

2.7..2 - Gases poluentes

Apesar de comporem apenas 1% dos gases expelidos, são extremamente danosos à saúde e ao meio ambiente, o que os torna indesejados e alvo de restrito controle pelas legislações ambientais ao redor do mundo, são eles [SZWARCFITER, 2004]:

- Monóxido de carbono – inodoro e incolor, o CO é extremamente tóxico. Respirá-lo em uma concentração de 0,3% em volume mata em minutos. O gás se combina aos glóbulos vermelhos do sangue, impedindo o transporte de oxigênio. A eficiência dos catalisadores e sistemas de gerenciamento de motores atuais elimina até 99% do CO emitido [MARTINS, 2005];
- Óxidos de Nitrogênio – representados genericamente por NO_x, são formados pela oxidação do Nitrogênio atmosférico, em temperaturas próximas a da combustão de combustíveis, e pela oxidação de compostos de Nitrogênio presentes no próprio combustível [CÓNSUL e outros, 2003]. Combinados com o vapor d'água na atmosfera, os NO_x podem formar o ácido nítrico. Esses elementos, além de nocivos à saúde, são fatores responsáveis pela formação de chuva ácida;
- Hidrocarbonetos – correspondem ao combustível não queimado, ou queimado parcialmente. Formam fuligem – aquela substância que escurece os tubos de descarga dos carros;
- Compostos de enxofre – o enxofre, não totalmente eliminado na produção da gasolina, pode provocar a formação de compostos que, combinados ao vapor d'água, se transformam em ácidos sendo nocivos à saúde e danificando o escapamento e causando o envenenamento do catalisador, uma vez que os metais nobre desses são susceptíveis a reações com compostos de enxofre que podem causar a desativação dos catalisadores [ZOTIN, 1999] ;
- Aldeídos (CHO) – são voláteis cancerígenos e provocam irritações nas vias respiratórias. São especialmente gerados através da queima do álcool puro (etanol) ou do álcool anidro presente à gasolina. Segundo [RANGEL e CARVALHO, 2002], os veículos que rodam com gasohol (Gasolina com álcool) emitem álcool não queimado, especialmente quando frios. Os veículos automotores leves são responsáveis por grande

parte das emissões de aldeídos presentes na atmosfera urbana, uma vez que emitem aldeídos primários pelo gás de escape, além de óxidos de nitrogênio e hidrocarbonetos, que são formadores de aldeídos secundários [AMARAL, 2000].

2.8 - Controle das emissões em motores de Combustão interna

De acordo com [MURGEL e BRANCO, 2005], a expansão das metrópoles aliado à grande demanda por transportes, vem criando problemas de qualidade do ar que poderão inviabilizar o atual modelo de uso de veículos. O surgimento de programas governamentais tais como o “rodízio” em São Paulo, o “hoy no circula” no México é um claro sinal de que mudanças conceituais e de tecnologias estão sendo demandas nos veículos, nos combustíveis e nos sistemas de transporte.

Os efeitos tóxicos agudos dos gases de exaustão são conhecidos desde o advento das máquinas de combustão interna. Essas máquinas libertam quantidade suficiente de poluentes para causar a morte por intoxicação quando funcionando em ambientes fechados, ou para provocar efeitos danosos ao meio ambiente, como o aquecimento da Terra, a chuva ácida e o efeito estufa. A concentração destes compostos, acima de níveis aceitáveis, interfere diretamente na qualidade de vida dos habitantes das grandes cidades, pois estes poluentes afetam o metabolismo celular e, conseqüentemente, a saúde do indivíduo [ZOTIN e outros, 1999].

A partir da década de 70, visando minimizar a presença desses poluentes na atmosfera, alguns países estabeleceram legislações restritivas às emissões de CO, NO_x e hidrocarbonetos. Evoluções nos motores, sobretudo no sistema de alimentação de combustível e ignição, promoveram substanciais avanços na redução das emissões, mas o uso de conversores catalíticos tornou possível se atingir níveis mais rigorosos. Esses equipamentos promovem reações químicas de modo a transformar parte dos gases poluentes em gases menos poluentes ou de pouca agressividade ao meio ambiente [RANGEL e CARVALHO, 2002].

Para garantir uma correta operação do equipamento, faz-se necessário um controle rigoroso da mistura ar combustível, uma vez que a eficiência de conversão dos gases cai de forma significativa em caso de mistura rica ou pobre, conforme se vê no gráfico da Fig. 2.3. Segundo [RANGEL e CARVALHO, 2002], a conversão global não é determinada apenas pela atividade dos catalisadores para promover essas reações, mas também pela disponibilidade dos agentes redutores e oxidantes.

Um controle efetivo da mistura queimada só pode ser atingida com a aplicação de dispositivos eletrônicos de controle e monitoramento do motor e sua combustão, conforme veremos ao longo desse trabalho.

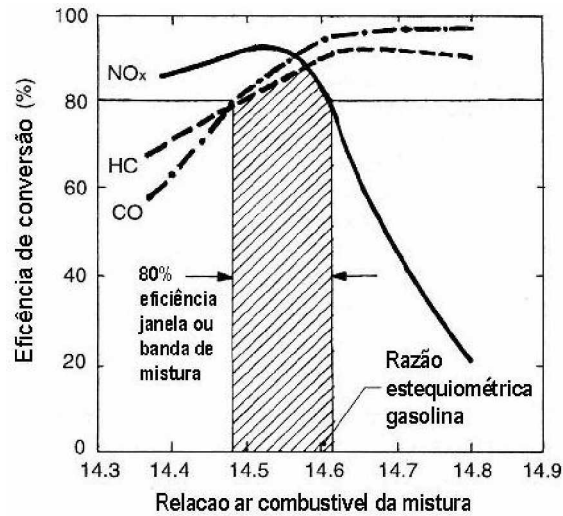


Fig. 2.3 – Eficiência do conversor catalítico versus relação ar combustível - adaptado de [HEISLER,2002]

2.8.1 - Conversores Catalíticos

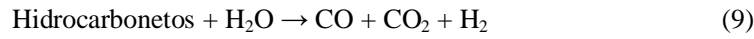
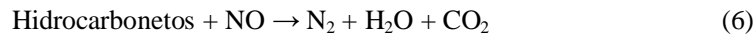
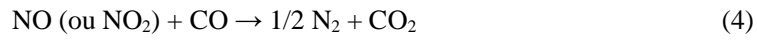
A função básica dos conversores catalíticos é de propiciar a transformação química de alguns gases poluentes em dióxido de carbono, água e Nitrogênio.

De acordo com [HEISLER, 2002], as principais reações químicas promovidas no interior do conversor catalítico, que podem ser visualizadas na Fig. 2.4, são:

- Oxidação do monóxido de carbono e de hidrocarbonetos para formar dióxido de carbono e água – equações (1) a (3);
- Redução dos Óxidos de Nitrogênio a Nitrogênio – equações (4) a (6).

Outras reações também podem ocorrer, de acordo com a descrição de [RANGEL e CARVALHO, 2002]:





Uma vez que os catalisadores conseguem remover três substâncias indesejáveis –NO_x, CO e Hidrocarbonetos, os mesmos são freqüentemente chamados de conversores catalíticos de três vias ou triplo efeito.

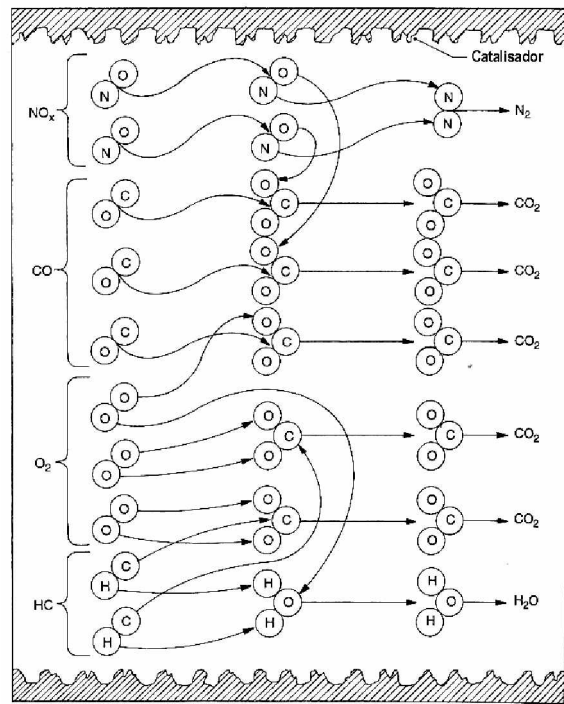


Fig. 2.4 – Reações químicas que ocorrem em um conversor catalítico – adaptado de [HEISLER,2002]

Para cumprir devidamente o seu papel, os catalisadores devem desempenhar as seguintes funções, segundo [DE NEVERS, 1995]:

- Promover a transformação de pelo menos 90% do CO, HC e NOx;
- Deve ser composto por uma embalagem compacta, fácil de ser instalada em um automóvel compacto;
- Deve começar a operar o mais rápido possível após a partida;
- Não deve promover aquecimento excessivo do painel corta fogo ou assoalho do veículo;
- Durabilidade superior a 100.000 Kms;
- Deve exercer uma contrapressão mínima no sistema de escapamento, de modo a não prejudicar a operação e rendimento do motor;
- Deve estar apto a processar as pequenas quantidades de enxofre presentes na gasolina, evitando transformá-las em elementos demasiadamente tóxicos, como o SO₃.

As reações químicas demorariam muito tempo ou até mesmo não ocorreriam em sua plenitude devido ao tempo reduzido em que permanecem no sistema de escapamento. Para acelerar esse processo são utilizados elementos químicos catalisadores, que são substâncias que aumentam as taxas de reações químicas sem, no entanto, sofrerem mudanças permanentes em sua composição.

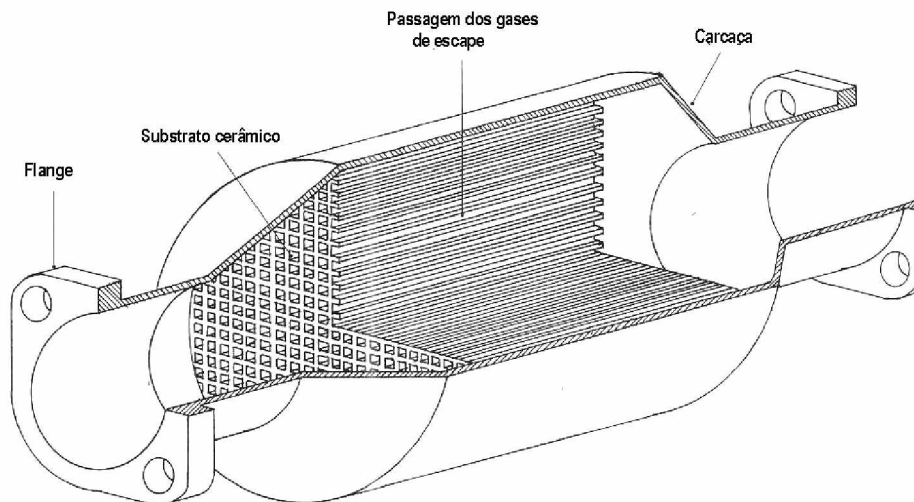


Fig. 2.5 - Aspecto interno de um conversor catalítico - adaptado de [HEISLER,2002]

Nos conversores catalíticos automotivos mais comuns, são utilizados substratos com basicamente dois metais nobres em sua composição: o ródio e o paládio [ZOTIN e outros, 1999]. O primeiro consegue acelerar a redução dos óxidos de Nitrogênio em situações de mistura estequiométrica ou ligeiramente enriquecida. O último acelera a oxidação dos hidrocarbonetos e do monóxido de carbono, bastando estar submetido a uma mistura estequiométrica ou ligeiramente pobre.

Para que essas reações possam ocorrer com a maior parte dos gases, o conversor catalítico deve ter uma grande área de contato com os gases. Isso é obtido graças ao arranjo de colméia, conforme se pode visualizar na Fig. 2.5. Outra condição para a correta operação do conversor é que o mesmo esteja operando em uma temperatura superior a 300 graus Celsius. Nessas condições, a eficiência de conversão para monóxido de carbono é superior a 98%, e em torno de 95% para hidrocarbonetos [HEISLER, 2002]. Em temperaturas menores a eficiência de conversão dos gases é bastante reduzida, conforme se pode visualizar no gráfico da Fig. 2.6.

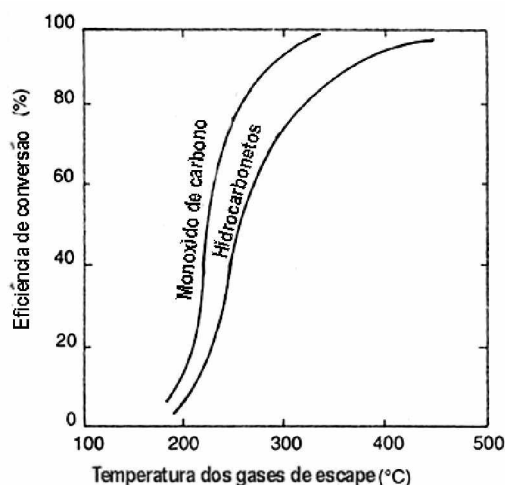


Fig. 2.6 – Eficiência do conversor catalítico versus temperatura de operação - adaptado de [HEISLER,2002]

Durante a operação normal de um motor, os gases de escape podem variar de 350 graus em marcha lenta a 900 graus Celsius em condições momentâneas de carga total no motor em altas rotações. Segundo [RANGEL e CARVALHO, 2002], o catalisador deve ser projetado para operar nessa ampla faixa de temperatura, sabendo que se o mesmo for submetido a excesso de temperatura durante períodos mais longos poderão ocorrer danos ao substrato, com conseqüente redução na vida útil do componente.

A eficiência de conversão também está intimamente ligada à situação da mistura ar combustível. Misturas ricas e pobres, enfim fora da razão estequiométrica, provocam redução na eficiência de conversão, conforme se pode visualizar no gráfico da Fig. 2.3. Para que exista uma efetiva redução na emissão de poluentes pela ação do conversor catalítico, é imprescindível que o mistura ar combustível seja controlada adequadamente. Esse controle, conforme veremos posteriormente, é bastante efetivo quando realizado eletronicamente por intermédio de sensores que fornecem o *feedback* da queima de combustível pelo motor [BALLUCHIT e outros, 1999].

Nos primeiros sistemas de controle eletrônico de motores, para um ajuste fino da mistura e, conseqüentemente uma menor emissão de gases, era feito um ajuste em um potenciômetro com o uso de um analisador de gases. Esse ajuste, também denominado de ajuste de CO, não era muito efetivo, pois desconsiderava os diversos variantes que ocorrem durante a operação do motor, tais como: diferentes temperaturas, pequenas variações na composição do combustível, diversas situações de rotação e carga e até mesmo pequenos desajustes que ocorrem naturalmente com o desgaste e uso de um motor. A natureza oscilatória da relação ar combustível no sistema de exaustão levava a significativas variações na composição química dos gases de escapamento, prejudicando as conversões efetuadas no conversor catalítico [RANGEL e CARVALHO, 2002].

Para automatizar esse ajuste foi necessário o uso de sensores para monitoramento da queima, dando assim subsídios para que o sistema de controle intervenha no controle da mistura ar combustível, buscando manter a mistura próxima da estequiométrica na maior parte do tempo de operação do motor. Além de proporcionar máximo aproveitamento do combustível, o gerenciamento da mistura ar combustível minimiza os níveis de emissões gasosas, com o aumento da eficiência da queima e melhor operação do conversor catalítico [MENNA, 2004].

2.9 - Métodos de Monitoramento da queima em um motor de combustão interna

Com o intuito de garantir uma melhor eficiência na queima dos gases em um motor de combustão interna, com conseqüente menor emissão de gases poluentes, foram desenvolvidos pelos fabricantes de motores componentes e sistemas de suporte ao controle eletrônico do motor, como forma de fornecer informações precisas de como está ocorrendo a queima nas câmaras de combustão do motor.

Vamos descrever aqui alguns desses sistemas e métodos, com suas principais características:

2.9.1 – 1º Modelo - Monitoramento da quantidade de oxigênio nos gases de escape

Bastante utilizado pela indústria automobilística, esse método utiliza-se basicamente de um ou mais sensores de oxigênio, sensor esse ilustrado na Fig. 2.7. Também conhecido como sonda lambda, o dispositivo gera um sinal elétrico para que a unidade de comando possa variar a quantidade de combustível injetado, garantindo uma mistura ar / combustível ideal, o que reduz o nível de emissão de gases poluentes [MORAES, 2003]. O sensor tem como princípio de

operação a avaliação da diferença de concentração de oxigênio entre a atmosfera e os gases no interior da tubulação de escapamento [RIBBENS, 2003].



Fig. 2.7 - Sensor de oxigênio típico

Em geral, motores de 4 cilindros, que correspondem à configuração mais comum em automóveis, possuem um único sensor de oxigênio, que é responsável pela avaliação dos gases expelidos por todos os cilindros.

Com a instituição de normas antipoluição mais rigorosas, alguns países passaram a exigir que se avaliasse a correta operação do conversor catalítico, de forma a garantir que os índices de emissões sejam mantidos mesmo após o uso e desgaste do veículo [YUN e SON, 2002]. Essa nova exigência fez surgir o sistema de Diagnóstico de Bordo II (OBD – *On Board Diagnostics II*). Esse mecanismo de monitoramento veio a complementar o OBD I que permitia que se realizasse uma verificação completa do sistema com o uso de computadores de diagnóstico. Nesse novo sistema, um segundo sensor de oxigênio está presente após o conversor catalítico. Segundo [YUN e SON, 2002], a função desse dispositivo é avaliar a qualidade da conversão dos gases, alertando o motorista através de uma luz espia caso o equipamento não esteja funcionando adequadamente – o que pode ser indicativo de desajuste do motor ou necessidade de troca do conversor.

Motores com maior número de cilindros, em especial aqueles com configuração dos cilindros em V, tais como os V6 e V8, podem possuir um sensor de oxigênio para cada banco de cilindros, formando na maior parte dos casos um par de sensores. Essa configuração garante maior eficiência, pois consegue avaliar os conjuntos de cilindros individualmente. Caso exista mais de um catalisador e o veículo seja destinado a mercados com maior rigor no controle de emissões (OBD II), torna-se necessário utilizar mais um par de sensores, nesse caso um após cada conversor catalítico.

Algumas montadoras inserem no software de controle do motor uma rotina que determina uma redução no rendimento do motor, caso se detecta falha ou deficiência nos sistemas de controle de emissões. Agindo assim se limita as emissões do motor em condições críticas e força o condutor a conduzir o veículo ao reparo o quanto antes, uma vez que o mesmo ficará com o desempenho comprometido [RIBBENS, 2003].

2.9.1.1 - Funcionamento dos sensores de oxigênio

O funcionamento da sonda lambda baseia-se nas propriedades elétricas de um material cerâmico de gerar uma diferença de potencial elétrico quando submetido a diferentes concentrações de oxigênio. O sensor de oxigênio envia uma tensão elétrica que varia em função da condição da mistura queimada. A maioria dos sensores de oxigênio de Zircônio para aplicação automotiva referenciam misturas pobres para tensões elétricas abaixo de 450 milivolts e acima de 450 mV para misturas ricas em combustível. O valor de aproximadamente 450 milivolts corresponde a uma mistura ideal, que o sistema de controle eletrônico objetiva alcançar na maior parte do funcionamento do motor [BROWN, 2004].

Segundo [HEISLER, 2002], o sensor lambda consiste de elemento ativo de Óxido de Ítrio (Y_2O_3) parcialmente estabilizado com Zircônio (ZrO_2), que é ativado pela diferença de concentração de oxigênio entre as camadas externa e interna. Como dito anteriormente, quanto maior a diferença na concentração de oxigênio, maior será a tensão gerada pelo sensor. Os eletrodos interno e externo consistem de tiras condutivas de platina *cermet*¹ resistentes a altas temperaturas e de alta aderência, que são fixos com alta pressão em um selo de anel metálico, grampeado em uma manga de junção. A pressão de contato é produzida por um disco mola.

¹ Combinação heterogênea microscópica de um componente metálico e de um componente cerâmico

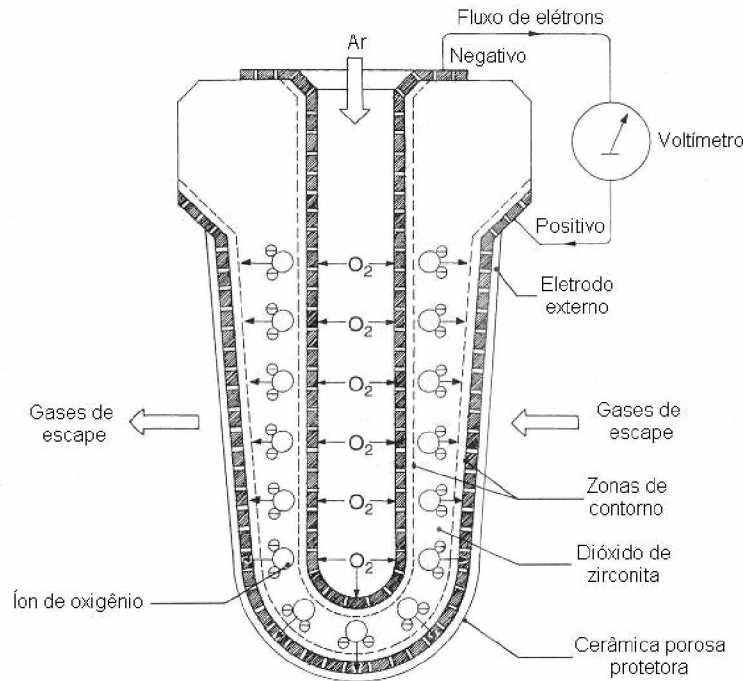


Fig. 2.8 – Princípio de funcionamento do sensor de oxigênio – adaptada de [HEISLER, 2002]

Quando a mistura de ar-combustível está rica, há muito pouco oxigênio livre dentro dos gases de escape para reagir como uma provisão de oxigênio para alimentar as reações químicas do catalisador. Porém o oxigênio fica disponível por esvaziamento da zona de contorno externa do eletrólito sólido de oxigênio, causando a migração de um grande número de íons negativamente carregados do eletrodo interno rico em oxigênio, que é exposto à atmosfera para o eletrodo externo tão logo seja atingida a temperatura de condução do sólido – acima de 280°C. Com a migração de íons, uma diferença de potencial é formada entre o eletrodo interno e o externo, tensão essa que é proporcional à quantidade de íons que migrarem. O funcionamento do sensor pode ser visualizado na Fig. 2.8.

Ainda segundo [HEISLER, 2002], quando a mistura ar combustível está pobre em relação à estequiométrica, o oxigênio em excesso nos gases de escape oxidará o monóxido de carbono e hidrocarbonetos na redondeza do eletrodo de platina exterior, em preferência aos íons de oxigênio que se difundem pelo eletrólito cerâmico. Isto resulta em muito pouca tensão que é gerada entre os eletrodos externo e interno.

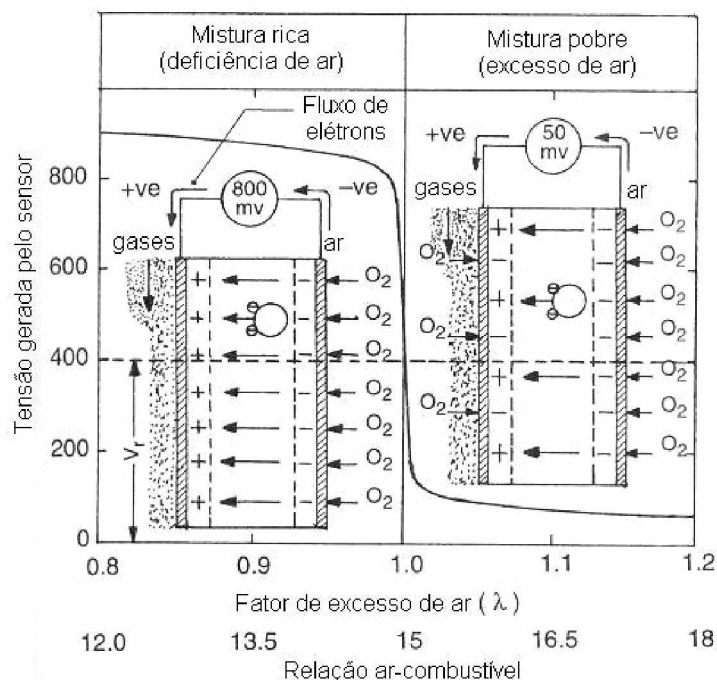


Fig. 2.9 – Características de tensão gerada pelo sensor de oxigênio – adaptada de [HEISLER, 2002]

A magnitude da tensão gerada é dependente da diferença na concentração de oxigênio entre as regiões de limite interna e externa. Esse valor por sua vez, é uma medida do conteúdo de oxigênio dentro dos gases de escape a qualquer momento e, dessa forma, relaciona diretamente a razão ar-combustível que é queimada nos cilindros, conforme ilustra a Fig. 2.9.

2.9.1.2 - Controle em malha fechada com o uso do sensor de oxigênio

Segundo [MIANZO; PENG e HASKARA, 2001], o sistema de controle do motor utiliza o sinal de tensão proveniente do sensor de oxigênio para efetuar a correção na razão ar-combustível fornecida para o motor, mantendo-a o maior tempo possível estequiométrica, melhorando assim os níveis de emissão de poluentes – Fig. 2.10.

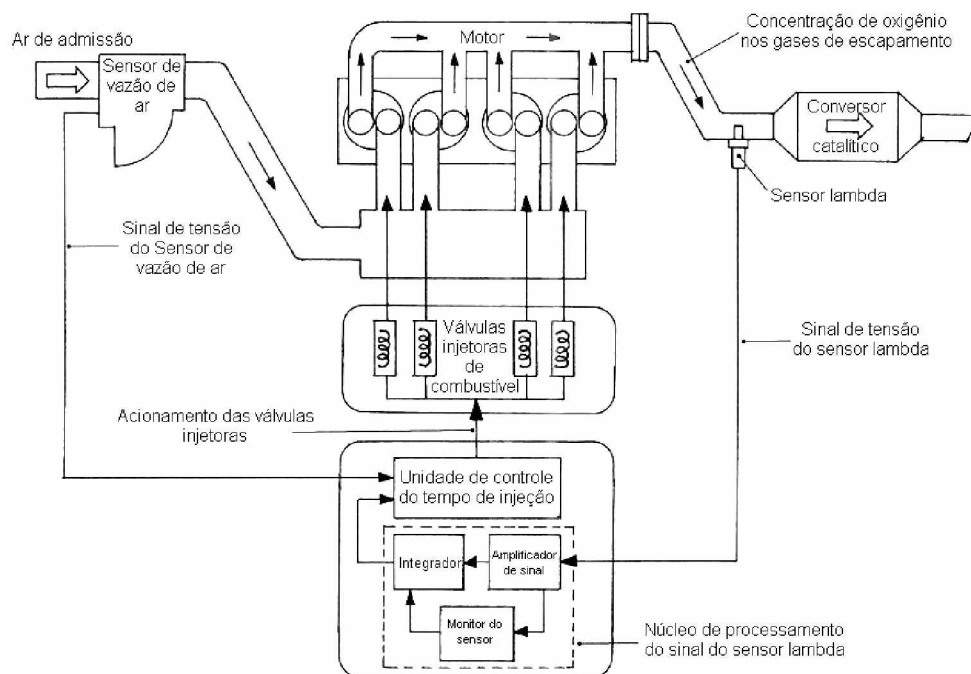


Fig. 2.10 - A central de controle do motor opera em malha fechada monitorando o sensor lambda – adaptada de [HEISLER, 2002]

Durante a fase de aquecimento do motor, o sistema de controle operará em malha aberta até que o sensor lambda, devidamente aquecido, inicie a geração de sinais válidos. Enquanto o sistema estiver em malha aberta, o tempo de injeção de combustível será igual ao tempo base T_b . O tempo base de injeção depende da medição de algumas variáveis tais como carga e temperatura do motor, dentre outras. Uma vez que qualquer sistema físico é susceptível a mudanças nas condições de operação (como por exemplo, composição do combustível) ou tempo (por exemplo, desgaste dos componentes do motor), a operação em malha aberta deve ser por um menor tempo possível, de forma a garantir a baixa emissão de poluentes [RIBBENS, 2003].

A malha fechada é ativada quando o sensor lambda está corretamente aquecido, o que pode ser percebido pelo envio de tensões válidas, ou seja, que cheguem próximos a 1,0 Volts, nas situações de mistura rica corriqueiras de um motor em fase de aquecimento.

O fornecimento de combustível ao motor é feito por válvulas injetoras acionadas eletricamente. O acionamento das mesmas se dá por pulsos provenientes da central de controle do motor, que determina o tempo de injeção ideal para cada condição do motor. O sistema de controle ajusta continuamente esse tempo de injeção, de acordo com diversos parâmetros de

funcionamento do motor e em função do fator de correção da malha fechada operada por monitoramento do sensor lambda [RIBBENS, 2003].

Um algoritmo significativo do controle do tempo de injeção, pode ser expresso pela seguinte fórmula:

$$T(n) = T_b(n) \times [1 + C_L(n)]$$

Onde,

- $T_b(n)$ é o pulso básico de injeção, calculado pela central com base na massa de ar admitida pelo motor e a relação ar combustível desejável para aquela situação de funcionamento;
- $C_L(n)$ é o fator de correção da malha fechada.

Para uma condição de malha aberta, uma vez que o sensor lambda não é monitorado, $C_L(n)=0$. Para malha fechada, portanto com monitoramento da concentração de oxigênio nos gases de escape, C_L é dado por:

$$C_L(n) = \alpha I(n) + \beta P(n)$$

- $I(n)$ é a parte integral da correção da malha fechada;
- $P(n)$ é a parte proporcional da correção da malha fechada;
- α e β são constantes e dependentes das características do sensor.

A contribuição proporcional do fator corresponde ao desvio do valor esperado (estequiometria). Os termos combinados se modificam em ciclos computacionais descritos na Fig. 2.11. Nessa figura as regiões de mistura rica e pobre (relativamente à estequiometria) são representadas. Durante períodos de mistura pobre, o fator de correção é incrementado para cada ciclo computacional, ao passo em que é decrescido em misturas ricas.

Uma vez estabelecido o fator de correção ele é armazenado na memória RAM da central de controle, que a utilizará na próxima vez que definir o tempo de injeção, ou seja, no próximo tempo de admissão.

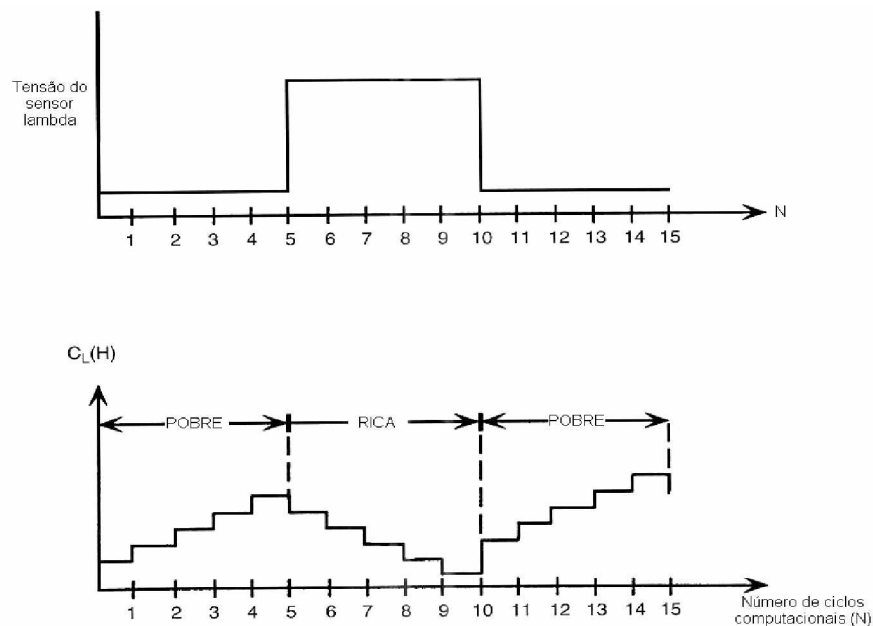


Fig. 2.11 – fator de correção da malha fechada – adaptada de [RIBBENS, 2003]

O fator de correção é monitorado pela central de controle de forma que opere dentro de certos limites. Se alterações grandes no tempo base de injeção forem requisitados, pode ser indicativo de problemas tais como: pressão de combustível incorreta, problemas nos eletroinjetores, entrada falsa de ar nos cilindros, combustível inadequado, falha no sensor de vazão de ar ou sensor *lambda* com problemas. Nesse caso, uma luz de advertência de anomalia no sistema acende no painel de instrumentos, alertando que o sistema necessita de verificações [FIAT, 1996].

Modernamente, sistemas têm utilizado o fator proporcional para identificar alterações na composição de combustível que interferem na relação ar combustível que deve ser fornecida ao motor. Essa estratégia é utilizada nos motores flexíveis (que operam com qualquer mistura de álcool e gasolina no tanque) para identificar a proporção de álcool presente no combustível e permitir alterações na relação ar combustível, que vão desde 9:1 (teórica) para combustível álcool puro a até 13,8:1 para situações com gasolina nacional pura no tanque. Conforme se pode visualizar na Fig. 2.12, o sistema de gerenciamento de um motor flexível permite grande alteração na relação ar combustível admitida em um curto intervalo de tempo, viabilizando assim a operação com diferentes misturas de combustíveis [MONTANARI e DAMASCENO, 2004]

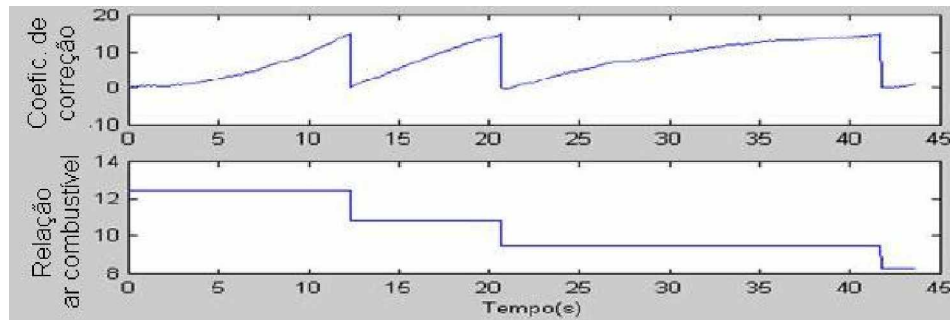


Fig. 2.12 – Transição de gasolina para álcool sendo monitorada em motor flexível – adaptada de [MONTANARI e DAMASCENO, 2004]

2.9.1.3 - Características desejáveis dos sensores de oxigênio

Segundo [HEISLER, 2002], um sensor de oxigênio para que opere perfeitamente em um sistema de controle da mistura em malha fechada, deve ter as seguintes características principais:

- Permitir mudança abrupta na diferença de potencial na estequiometria;
- Mudança rápida na tensão em caso de alterações na concentração de oxigênio nos gases de escape;
- Garantia de diferenças significativas de tensão elétrica para os casos de misturas ricas e pobres;
- Estabilidade nos níveis de tensão com respeito às alterações na temperatura dos gases de escape.

2.9.1.4 - Características de modificação de tensão nos sensores de oxigênio

Um sensor para aplicações em sistemas de controle tem que possuir suas características de sinais bastante conhecidas e consideradas, de forma a garantir um controle em malha fechada realmente efetivo.

Um sensor ideal para controle em malha fechada das características do controle de uma mistura ar combustível, deve possuir as características demonstradas na figura 2.13 abaixo, de acordo com [RIBBENS, 2003].

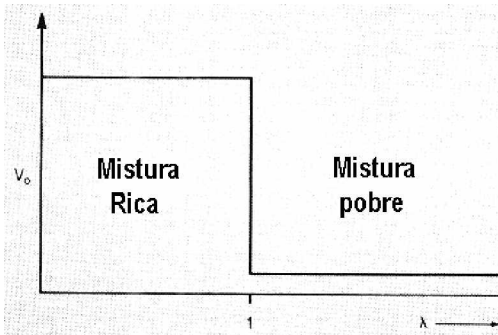


Fig. 2.13 – Variação de tensão ideal de um sensor de oxigênio – adaptado de [RIBBENS, 2003]

Em situações reais, variando a relação ar combustível lentamente próxima da razão estequiométrica e, utilizando-se um sensor de oxigênio real, obtém-se uma curva bastante diferente – Fig. 2.14. Pode-se observar que a tensão gerada na mudança de mistura pobre para rica difere da tensão de rica para pobre. Essa diferença é devido à histerese do sensor, que é uma característica importante do mesmo.

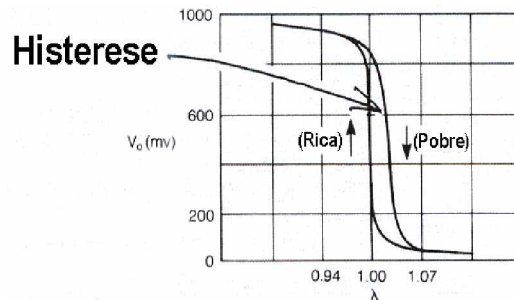


Fig.2.14 – Curva real de um sensor, onde se visualiza a histerese do mesmo – adaptado de [RIBBENS, 2003]

Ainda com relação à histerese do sensor, experimentos conduzidos por [RIBBENS, 2003] demonstram que variações na temperatura provocam alterações significativas nos intervalos de mudança de tensão, conforme se vê no gráfico da fig. 2.15.

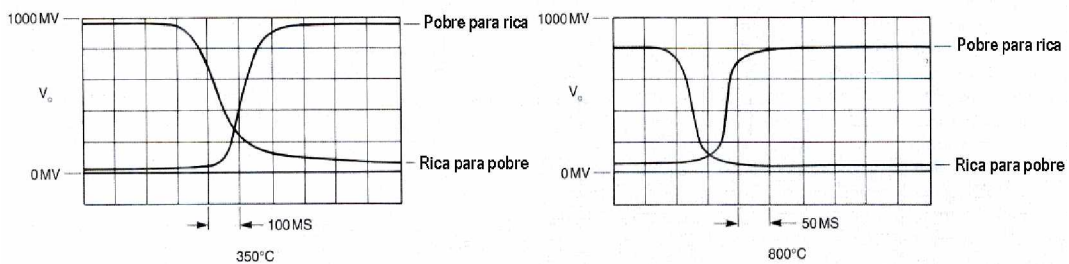


Fig. 2.15 – Alterações na temperatura determinam histereses diferentes – adaptado de [RIBBENS, 2003]

2.9.1.5 - Influência da temperatura em sensores de oxigênio

Além de variações na histerese, conforme visto anteriormente, alterações na temperatura podem tornar as tensões geradas inviáveis de serem utilizadas para fins de controle. No gráfico da Fig. 2.16, pode-se visualizar que a tensão gerada para misturas ricas ($\lambda=0,95$) e pobres ($\lambda=1,05$) varia substancialmente conforme existam variações na temperatura do sensor, de forma que em temperaturas abaixo de 300 graus os dados gerados pelo sensor não são adequados.

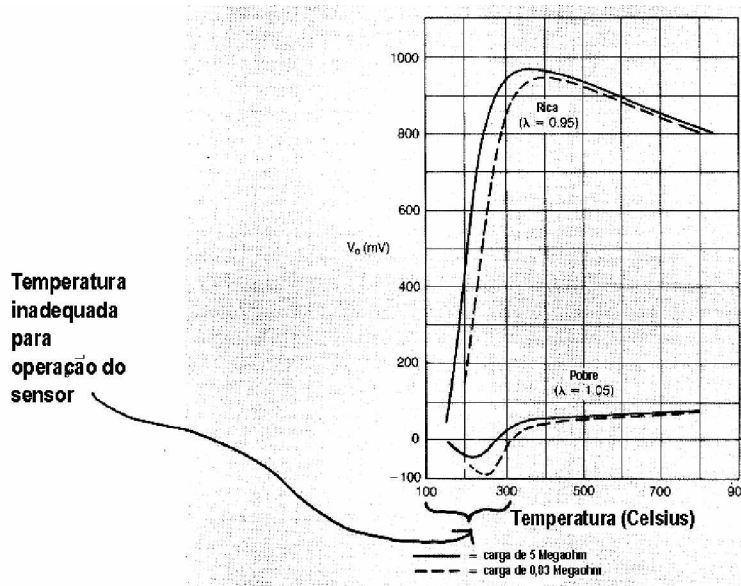


Fig. 2.16 – A temperatura tem influência considerável na tensão gerada pelo sensor de oxigênio – adaptada de [RIBBENS, 2003]

No mesmo gráfico da Fig. 2.16 pode-se verificar que alterações na carga que o sensor é submetido provoca alterações no valor de tensão. Dessa forma, cada sensor deve ser rigorosamente escolhido e, em caso de substituição, deve-se utilizar um de mesmas características, caso contrário o uso de cargas diferentes determinará medidas distintas que irão influir decisivamente na confiabilidade do sinal gerado.

Como forma de evitar que um sensor frio forneça uma diferença de potencial inconsistente com a razão ar combustível queimada, o sistema de controle do motor deve operar em malha aberta de ajuste da mistura ar combustível enquanto o sensor estiver frio. Nessa situação de aquecimento o motor opera com uma mistura mais rica que o nas condições de operação normais. Tão logo a central de controle receba uma diferença de potencial informando

mistura rica, a central de controle fecha a malha, passando a usar essa tensão como ajuste da relação ar combustível [RIBBENS, 2003].

2.9.1.6 - Sensores de oxigênio com aquecimento elétrico

Para evitar que o motor opere por muito tempo fora da razão estequiométrica quando frio, é necessário que o sensor de oxigênio se aqueça rapidamente, permitindo assim o fornecimento de uma diferença de potencial adequada à medição, propiciando a operação do sistema em malha fechada [RIBBENS, 2003].

O uso de um elemento de aquecimento incorporado ao sensor foi a solução empregada. Alimentado pelo sistema elétrico, o sensor é aquecido em pouco menos de um minuto. O fornecimento de corrente elétrica ao aquecedor pode ser controlado pela central de controle, que o faz geralmente em condições de partida a frio.

O HEGO (*Heated Exhaust gas oxygen*, ou sensor de oxigênio dos gases de escapamento aquecido) viabiliza uma redução na janela de operação do motor sem ajuste fino da mistura. Em suma, o uso de sensores aquecidos possibilita as seguintes vantagens na operação [HEISLER,2002]:

- Redução no tempo de pré-aquecimento;
- Menor dependência da temperatura dos gases de exaustão;
- Menor variação nas condições de operação durante a vida útil do sensor;
- Maior liberdade para projetos de motor com menor preocupação com relação às temperaturas dos gases de exaustão;
- Maior flexibilidade na localização do sensor;
- Marcha lenta mais estável;
- Possibilidade de uso de um único sensor em motores com cilindros em “V”.

O próprio autor [HEISLER,2002] ressalta que algumas dessas vantagens são anuladas por necessidades de operação do conversor catalítico, como já discutido anteriormente. A temperatura dos gases de exaustão, por exemplo, tem influência direta não só na operação do sensor de oxigênio, como também determina a eficiência de conversão dos gases poluentes.

2.9.1.7 - Sensores de oxigênio de banda larga

Segundo [BOSCH, 1999] e [DENTON, 2000], com o desenvolvimento de motores que operem com misturas pobres para redução de consumo, foi necessário o desenvolvimento de sensores de oxigênio que fossem capazes de realizar leituras de misturas de razões estequiométricas que variam de 12:1 a 22:1. Essa grande faixa de variação possibilita também a aplicação em motores flexíveis (que podem operar em qualquer proporção de mistura entre gasohol e álcool hidratado), tornando desnecessário o uso de sensores adicionais para identificação do combustível queimado [MONTANARI e DAMASCENO, 2004].

Condensado o que foi descrito até esse momento, o monitoramento através do sensor de oxigênio apresenta vantagens que garantem a sua existência e vasta aplicação:

- O sensor é bastante conhecido e produzido em larga escala, o que torna seu fornecimento fácil para as montadoras e o mercado de reparação [SONDA LAMBDA, 1998];
- A localização do sensor no escapamento e o fato do mesmo possuir dimensões reduzidas, torna a sua presença praticamente inerte ao funcionamento do motor, não provocando interferência à operação do motor [SONDA LAMBDA, 1998];
- O sensor gera uma diferença de potencial de baixa corrente e razoável amplitude, o que garante um fácil processamento, uma vez que é um sinal analógico que praticamente indica duas situações bastante claras e distintas – tensões da ordem de 800 mV para misturas ricas, e da ordem de 200 mV para pobres [HEISLER, 2002].

O monitoramento através da concentração de oxigênio nos gases de escape apresenta algumas desvantagens:

- O elemento de zirconita presente no sensor só opera corretamente quando aquecido. Dessa forma o sistema fica inoperante durante o início da fase de aquecimento do motor, situação extrema de qualquer motor e que necessita de um controle melhor das emissões. Para minimizar o problema, aquecedores foram acrescentados ao sensor, visando reduzir o tempo de aquecimento [STONE, 1999];
- Histerese do sensor – conforme comentado anteriormente, o sensor de oxigênio não modifica a diferença de potencial gerada abruptamente quando ocorre mudança na situação da mistura. Essa mudança obedece a uma histerese, que por sua vez é alterada em função da temperatura do sensor [RIBBENS, 2003];
- O sensor de oxigênio opera em um ambiente extremamente hostil, seja por temperaturas extremas, seja por estar sujeita a carbonização e choques térmicos. Essa característica

torna a vida útil do sensor algo a ser considerado. Algumas montadoras, temendo que o desgaste natural do sensor provoque prejuízos ao desempenho do conversor catalítico e níveis de emissão do veículo, determinam a substituição regular do mesmo no plano de manutenção do motor, fato singular entre todos os sensores do sistema de gerenciamento do motor [BOSCH, 2005];

- Um motor de vários cilindros pode apresentar diferentes condições de queima em cada um dos seus cilindros. Segundo estudos reportados em [SHIMASAKI e outros, 1993], diferenças de até 7% na mistura admitida pelos diversos cilindros de um motor podem ocorrer. Dessa forma, para uma maior precisão, é demandado o uso de um sensor por cilindro, o que raramente é feito por razões de custo e dificuldade no processamento de informação. Um motor que apresente um injetor parcialmente obstruído, por exemplo, terá toda sua performance alterada, uma vez que o sensor de oxigênio avaliará os gases de todos os cilindros determinando um enriquecimento em todos os cilindros, mesmo os que estão recebendo a quantidade adequada de combustível. Esse fato será demonstrado no capítulo que trata das análises dos experimentos realizados;
- O monitoramento da mistura ocorre instantes após a queima – essa demora na leitura reduz a eficiência do sistema, uma vez que o comportamento de um motor pode ser alterado a cada instante de seu funcionamento, com conseqüentes variações na concentração de oxigênio nos gases de escape [DENTON, 2000]. Com o intuito de reduzir esse tempo, e aquecer o sensor mais rapidamente, os fabricantes têm optado por sua instalação o mais próximo do motor possível. Mesmo assim, a complexa geometria do coletor de escapamento, bem como o fluxo bastante turbulento dos gases queimados que também enfrentam a contrapressão de todo o sistema de escapamento, torna a medição um tanto imprecisa;
- O custo do sensor é elevado. Num mercado extremamente competitivo, qualquer dólar economizado na produção de um veículo trará vantagens frente aos concorrentes quando da definição do preço. Sua substituição também demanda custos consideráveis, podendo passar de 400 dólares a unidade em alguns modelos;
- A falha no sensor geralmente é silenciosa, provocando desajustes na mistura ar combustível que culminará em danos ao conversor catalítico, elevação nos índices de emissões e alterações no desempenho e consumo de combustível. Para evitar esse tipo de problema, podem ser instalados sensores após os conversores catalíticos. Nesse caso tem-se a questão da elevação do custo e maior complexidade no processamento de sinais [DENTON, 2000].

2.9.2 – 2º Modelo - Monitoramento da mistura pela análise da pressão de combustão

A pressão de combustão é um dado extremamente rico de avaliação da combustão. Segundo [SHIMASAKI, KANERIRO, BABA e outros, 1993], com o uso de informações tais como: posição do pistão no cilindro (obtida pelo sensor de rotação e referência), momento da centelha e pressão interna se obtém os subsídios necessários a elaboração de um Diagrama de Pressão e Volume, com interessantes resultados para avaliação da performance da queima no interior dos cilindros de um motor de combustão interna, por intermédio da determinação da pressão média efetiva.

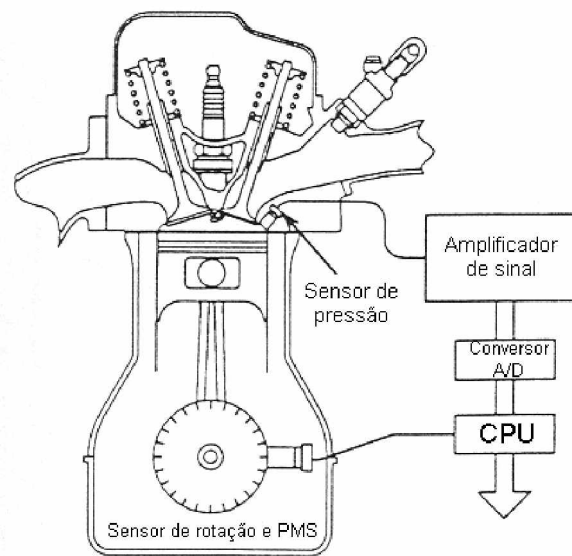


Fig. 2.17 – Exemplo de sistema para detecção da pressão de combustão – adaptada de [SHIMASAKI e outros, 1993]

O uso desse método se demonstrou bastante interessante para avaliações científicas, mas apresenta certas dificuldades de operacionalização na prática, onde alguns aspectos devem ser considerados [SHIMASAKI, KANERIRO, BABA e outros, 1993]:

- Em qualquer que seja o sistema utilizado para monitorar a queima em um motor, os dispositivos envolvidos devem exercer pouca ou nenhuma influência na operação normal do motor, sob pena de prejudicar o funcionamento do mesmo através da presença de corpos estranhos no interior dos cilindros;
- Para a medição da pressão torna-se necessário a instalação de um sensor na câmara de combustão. Além das dificuldades técnicas em se posicionar esse sensor de tal maneira que não se altere muito o formato da câmara prejudicando a combustão, o mesmo pode

se tornar, após carbonização, em um ponto quente gerador de pré-ignição, que é extremamente prejudicial ao motor;

- Os sensores que avaliam a pressão na câmara de combustão possuem custo elevado, o que é agravado pelo fato da necessidade de se instalar um sensor por cilindro. Isso é requerido, pois se deve avaliar o comportamento individual e as pequenas variações de comportamento da queima, que naturalmente ocorrem devido a sutis diferenças de temperatura, desgastes e carbonização decorrentes da operação do motor.
- A boa performance do sensor requer condições especiais de operação, com temperatura e umidade sob controle, o que se revela algo complexo considerando a durabilidade e confiabilidade requeridos por um automóvel.

Diante dessas características, esse tipo de monitoramento ainda não está difundido, concentrando-se primordialmente no campo científico e em bancadas de testes de motores, onde a durabilidade e destinação dos testes demandam e permitem esse tipo de avaliação [ERIKSSON, 1995].

2.9.3 – 3º Modelo - Monitoramento da mistura pela análise da corrente iônica

2.9.3.1 - Processo de geração de íons

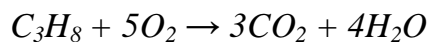
Segundo [ERIKSSON, 1995], ao ser ionizado pela frente de chama, o gás se torna condutor no interior da câmara de combustão, gerando íons.

Para que essa ionização seja medida, é necessário que se aplique um campo elétrico, criando assim uma corrente de ionização que é fortemente influenciada pela temperatura, que por sua vez está intimamente ligada à pressão interna do cilindro. Os resultados obtidos com o levantamento dessa corrente são informações ricas em dados sobre a pressão e o processo de combustão em si.

2.9.3.2 - Formação de íons

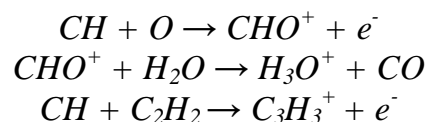
Conforme [ERIKSSON, 1995], mesmo considerando que as reações químicas envolvidas em um processo de combustão são bastante complexas, podemos simplificar o processo

considerando que moléculas C_xH_y reagem com moléculas de oxigênio, gerando CO_2 e água, para um processo de queima completa. Pode equacionar:



De fato, segundo [TAYLOR b, 1988], devido às temperaturas elevadas e à grande rapidez com que ocorrem a combustão nas misturas ar-combustível, é bastante complexo a observação dos processos químicos envolvidos. Pode-se identificar os compostos envolvidos antes e após a combustão, mas evidências experimentais reforçam que diversos compostos intermediários são formados entre as etapas inicial e final. Métodos experimentais com o uso de laser podem identificar diversos desses compostos.

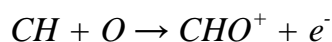
Analisando os estudos de [ERIKSSON, 1995], podemos verificar que algumas etapas intermediárias podem ser identificadas. Nessas etapas, moléculas são ionizadas pelo calor e são recombinadas em formas mais estáveis. Essas reações formam íons, conforme pode ser visto nos exemplos abaixo:



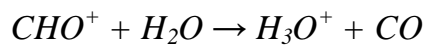
Ainda segundo [ERIKSSON, 1995], outros íons também são formados em reações intermediárias mais elementares, e que também são responsáveis por transportar a corrente iônica. Uma considerável quantidade de H_3O^+ e $C_3H_3^+$ é gerada e seu tempo residual de permanência é relativamente longo até que se recombinem para compostos mais estáveis.

De acordo com [GLAVMO, SPADAFORA e BOSCH, 1999], dois processos são responsáveis pela maior parte da formação de íons:

Ionização química – ocorre durante reações exotérmicas quando a energia gerada é grande o suficiente para ionizar os produtos da reação. A reação formadora de íons mais conhecida é:



H_3O^+ é também um íon dominante nas reações. Sua formação se dá da seguinte forma:



Ionização térmica – uma vez que a temperatura aumenta na câmara de combustão, elétrons livres adicionais são produzidos. A temperatura também afeta a taxa de recombinação dos íons.

2.9.3.3 – Uso da corrente iônica como dado para gerenciamento do motor

De acordo com [DE NEVERS, 1995], o uso da detecção da corrente de ionização em sistemas de gerenciamento de motores modernos tem se restringido à detecção de detonação e falha na combustão. No entanto, pesquisas vêm sendo feitas objetivando o seu uso para determinação da relação ar combustível, torque, estabilidade na combustão e determinação da pressão no interior dos cilindros.

Para analisar a corrente iônica, geralmente é utilizado um sensor dedicado. Eletrodos com diferentes potenciais elétricos são instalados na câmara de combustão e detectam a distribuição de íons nos gases de combustão, avaliando a corrente iônica resultante.

Como obstáculo, esse método requer instalação de novos sensores, além do tratamento e análise dos dados se mostrarem complicados e imprecisos, uma vez que diversos fatores interferem diretamente nesse tipo de análise [SHIMASAKI, KANERIRO, BABA entre outros, 1993].

O fenômeno da corrente de ionização tem seu comportamento influenciado por diversos fatores. Podemos citar como itens principais que afetam a corrente de ionização em um motor de combustão interna [ERIKSSON, 1995]:

- Temperatura – o grau de ionização, e conseqüentemente a corrente de ionização, depende da temperatura. A temperatura também influencia na recombinação desses íons, o que proporciona alteração no tempo até que ocorra novamente um equilíbrio elétrico;
- Atuação do sistema de recirculação de Gases de Escapamento (EGR de *Exhaust Gas recirculation*) - o sistema de recirculação de gases de escape promove uma redução na temperatura da câmara de combustão, com conseqüente redução nas emissões de óxidos

de Nitrogênio. A atuação do EGR promove redução na corrente de ionização com a redução na temperatura. Outra influência é percebida quando os gases recirculados atingem o sensor, com conseqüente alteração nos valores medidos, uma vez que a atmosfera estará contaminada pelos gases de exaustão, com características de ionização bastante diferentes da mistura ar combustível originalmente medida;

- Composição do combustível – mudanças nas características do combustível afetam a corrente de ionização, uma vez que determinam alterações na cadeia de hidrocarbonetos formada. Aditivos que são inseridos na gasolina também exercem influência, como compostos antidetonantes, detergentes ou até mesmo corantes químicos de identificação;
- Relação ar combustível – misturas próximas à razão estequiométrica tendem a gerar correntes de ionização maiores, sendo que o pico é identificado quando $\lambda = 1$. Em misturas pobres ($\lambda > 1$) a corrente sofre uma queda em seu valor, provavelmente devido a uma redução na temperatura da chama. Já em misturas ricas os valores tendem a decrescer até um corte no nível de sinal, quando λ for aproximadamente igual a 1/1.6, ponto de maior formação de hidrocarbonetos não queimados;
- Tempo de queima - o tempo de combustão do combustível, que também é influenciado pelo tipo de combustível, influi na corrente de ionização, na medida em que a combinação entre as cargas após a frente de chama faz com que a corrente diminua. Uma vez que a concentração de íons reduza, a recombinação também se torna mais lenta. A corrente iônica é verificada até mesma na exaustão;
- Correntes de fuga – a resistência do sensor que mede a corrente iônica (que pode ser a própria vela de ignição) é modificada ao longo do funcionamento do motor. Partículas que se agregam ao sensor, como carbonização resultante da queima, promovem alterações na resistência do sensor, com conseqüentes alterações na corrente de ionização aferida;
- Carga do motor – O sinal da corrente de ionização é incrementado com o aumento da carga do motor. Isso decorre do aumento da temperatura e maior presença de reagentes no interior da câmara de combustão do motor;
- Umidade – é o fator externo com maior influência na corrente de ionização. Uma vez que o ar participa da combustão, incrementos na presença de água alteram a quantidade e tipos de íons modificando a corrente de ionização;
- Detonação e pré-ignição – essas situações indesejáveis de queima também provocam variações na distribuição de íons, sendo que existem motores que utilizam desse procedimento como forma de detectar detonação sem o uso de sensores de detonação piezoelétricos específicos para esse fim. Esses motores já estão no mercado e o sistema

tem se mostrado bastante eficaz, garantindo avanços de ignição bem mais precisos. Estudos relatados em [SHIMASAKI, KANERIRO, BABA e outros, 1993] demonstram que um avanço de ignição corretamente estabelecido pode aumentar a eficiência de um motor em até 5%, ao mesmo tempo em que incrementa em até 10% a potência do mesmo;

- Desgaste ou desajuste na vela de ignição – responsável pelo centelhamento e conseqüente disparo do processo de queima que resulta na frente de chama, a vela de ignição altera as características da centelha em razão de fatores como desgaste, folga nos eletrodos e contaminação por resíduos da própria combustão.

Enfim, o Método de análise da corrente iônica, embora apresente dados extremamente ricos, deve transpor os desafios de interpretação que essa gama de variáveis impõe, além das dificuldades técnicas de instalação de sensores já citadas.

2.9.3.4 - Monitoramento da corrente iônica usando a vela de ignição

O Método anterior pode ter os problemas de instalação dos sensores eliminados com o uso da própria vela de ignição como sensor. De fato, a vela de ignição não é propriamente um sensor, mas efetivamente está em contato direto com a câmara de combustão, passando a ser um importante observador de todo o processo de queima. “A vela de ignição já está presente no motor de ignição por centelha, eliminando a necessidade potencial de se realizar qualquer modificação no cabeçote e câmara de combustão, eliminando gastos adicionais que resultaria da instalação de um novo equipamento” [NIELSON e ERIKSON, 1998]

O uso das velas apresenta também a vantagem de já estarem instaladas em todos os cilindros, permitindo uma análise individual sem necessidade de alteração considerável no arranjo da câmara de combustão, muito embora um outro desenho de vela deva ser requerido, pois a mesma deixa de ser um mero atuador, para se tornar um atuador / sensor, com importante função de retro-alimentar o sistema de informações acerca das condições de queima que ela mesma foi responsável pelo início.

Uma vez que elevadas tensões estão envolvidas no processo, são utilizados diodos de alta tensão, que são de custo elevado e propensos a falhas. Esse problema deve ser melhor estudado, pois um tipo de falha bastante comum desse tipo de componente é o curto circuito. Nesse caso teremos um crítico problema em termos de FMEA, uma vez que um diodo em curto provoca o

colapso no sistema de ignição, com a conseqüente parada do motor [SHIMASAKI, KANERIRO, BABA e outros, 1993].

Diversos parâmetros podem ser avaliados utilizando o método descrito anteriormente, entre os quais podemos especialmente citar: detonação, fase do motor, estimativas da mistura e pressão, bem como ausência e qualidade da queima [SHIMASAKI, KANERIRO e BABA, 1993]. De fato, a montadora sueca SAAB patenteou um Sistema denominado ION que atua avaliando o status da queima, servindo de base para determinação do avanço de Ignição ideal e alertando a Central de Controle sobre a eminência da ocorrência de detonação ou de falhas na queima (*misfire*).

Segundo [SHIMASAKI, KANERIRO e BABA, 1993], a medição da corrente iônica é feita aplicando-se uma tensão elétrica de algumas centenas de Volts através dos eletrodos da Vela de Ignição, sendo que a corrente de ionização é medida no secundário da bobina de ignição.

Uma vez que uma tensão elétrica aplicada à vela é necessária para avaliação, deve-se atentar para que o sistema de ignição seja capaz de permitir centelhamentos de alta energia curtos, de forma que a duração da centelha não interfira na fase de medição.

2.9.3.7 - Interpretação das informações contidas na corrente de ionização

Como já foi discutido, os dados contidos na corrente de ionização são extremamente ricos. Segundo [SHIMASAKI e outros, 1993], o uso de redes neurais é uma solução, devido a sua boa característica em reconhecimento de padrões gráficos.

Nas redes neurais, a idéia é realizar o processamento de informações tendo como princípio a capacidade de aprendizado. Assim, uma rede neural pode ser interpretada como um esquema de processamento capaz de armazenar conhecimento baseado em aprendizagem (experiência) e disponibilizar este conhecimento para a aplicação em questão. As redes neurais são criadas a partir de algoritmos projetados para uma determinada finalidade.

De forma resumida [SHIMASAKI e outros, 1993] cita as seguintes vantagens no uso das redes neurais:

- Utilizam exemplos como aprendizado para responder mais rapidamente a estímulos;
- Permitem análises estatísticas;
- Funcionam relativamente bem mesmo na presença de ruídos e sinais fracos.

2.9.3.8 – Desenvolvimento de uma sonda lambda virtual

A caracterização do sinal de tensão da vela de ignição, através do uso de redes neurais, permite o desenvolvimento de uma sonda lambda virtual. Esta teria funcionalidade similar à convencional, com a vantagem da não necessidade de um sensor físico instalado no veículo.

Estudos realizados por [Howlett, Zoysa e Walters, 2002] mostraram que um sensor lambda virtual pode ser possível, desde que a relação ar combustível fique estequiométrica, ou com desvios de até 10%, com o motor com rotação e cargas fixas.

Para que o sensor lambda possa ser efetivamente substituído por um virtual, melhoramentos são necessários, especialmente sobre dois aspectos:

- Aprimorar a estimativa da mistura, uma vez que o catalisador necessita da estequiometria com 1% de erro;
- Variações na rotação e carga devem ser consideradas e admitidas.

Análises matemáticas mais complexas da física dos fenômenos físico-químicos que ocorrem em um motor, além de uma maior leitura dos dados em um motor real tornam-se necessárias para o desenvolvimento de um sensor de oxigênio virtual.

A criação de um sensor de oxigênio virtual de baixo custo e de alta confiabilidade é um desafio para futuros estudos e desenvolvimentos na indústria de motores. As crescentes exigências das normas de emissões podem apontar para uma situação futura de inviabilidade do uso de sensores de oxigênio físicos da forma como hoje existem. Como será visto nesse trabalho, pequenos problemas no motor podem resultar em um descontrole das emissões, uma vez que o sensor atual não se mostra capaz de observar a combustão de modo mais adequado.

CAPÍTULO 3

TERMODINÂMICA DA COMBUSTÃO EM UM MCI

3.1 - Termodinâmica da Combustão

Normalmente os combustíveis são queimados com o ar atmosférico, que é composto por inúmeros componentes, mas considera-se a mistura indicada na tabela 13.1.

Gás	% (volume)	Massa molar	% (molar)
O ₂	20,95	31,998	20,95
N ₂	78,09	28,012	79,05
Argônio	0,93	38,948	
CO ₂	0,03	40,009	
Ar	100	28,962	

Tabela 3.1 – Tabela com principais constituintes do ar. Adaptado de [MARTINS,2005]

Nos cálculos de combustão efetuados nesse trabalho, será considerado o ar constituído por 21% de Oxigênio e por 79% de Nitrogênio, de forma que para cada mole de Oxigênio haverá:

$$\frac{1 - 0,2095}{0,2095} = 3,773 \text{ moles de Nitrogênio}$$

Para cálculo da massa molar do ar, que é de 28,962 kg/kmol, será considerado uma massa molar do Nitrogênio de 28,16 kg/kmol [MARTINS, 2005].

3.1.1 - Reação entre o combustível e o ar

Na reação entre o combustível e o ar, o Nitrogênio também deve ser considerado, pois em volume, o ar contém 79,05% de Nitrogênio e 20,95% de Oxigênio.

Desse modo, a percentagem mássica de Oxigênio no ar será:

$$\frac{m_{O_2}}{m_{ar}} = \frac{M_{O_2}}{M_{ar}} \times 0,2095 = \frac{31,998}{28,962} \times 0,2095 = 0,232$$

Ou seja, 1 kg de ar contém aproximadamente 0,232 kg de O₂.

3.1.2 - Coeficiente de excesso de ar

Uma mistura é considerada estequiométrica, quando todo o combustível é queimado com o uso de todo o ar disponível. Em situações onde a mistura for pobre em combustível, ocorrerá excesso de ar, ao passo em que a deficiência de ar é característica de misturas ricas.

Para se detectar o quanto uma mistura ar combustível desvia do valor estequiométrico, define-se um coeficiente lambda (λ) como indicativo da relação entre a mistura ar-combustível empregada e a mistura estequiométrica [MILHOR, 2002], de forma que:

$\lambda = 1 \rightarrow$ mistura estequiométrica;

$\lambda > 1 \rightarrow$ mistura pobre em combustível;

$\lambda < 1 \rightarrow$ mistura rica em combustível.

Segundo [MARTINS, 2005], o lambda pode ser calculado da seguinte maneira:

$$\lambda = \frac{\left(\frac{m(ar)}{m(comb)}\right)_{real}}{\left(\frac{m(ar)}{m(comb)}\right)_{esteq}} = \frac{\left(\frac{A}{F}\right)_{real}}{\left(\frac{A}{F}\right)_{esteq}} = \frac{\left(\frac{mf}{mar}\right)_{esteq}}{\left(\frac{mf}{mar}\right)_{real}} = \frac{\left(\frac{F}{A}\right)_{esteq}}{\left(\frac{F}{A}\right)_{real}}$$

onde F = combustível (*fuel*) e A = Ar.

3.1.3 - Produtos da combustão

Quando a combustão de hidrocarbonetos é completa, os resíduos da queima são vapor de água (H₂O) e gás carbônico (CO₂). A presença de Enxofre provoca a formação de dióxidos desse elemento químico (SO₂).

3.1.4 - Combustão incompleta

Em um motor de combustão interna a combustão não é completa, e outros resíduos são gerados, como Monóxido de Carbono (CO), Hidrocarbonetos (HC) e Óxidos de Nitrogênio. Os Hidrocarbonetos são gerados especialmente devido às paredes internas do motor que resfriam a camada de mistura carburada, tornando mais lenta a combustão.

Os Óxidos de Nitrogênio são formados por sua vez devido a elevadas pressões e temperaturas que o Oxigênio e o Nitrogênio do ar atingem no interior do motor.

3.2 - Combustão em um motor de combustão interna (mci)

3.2.1 - Períodos da Combustão

Segundo [HEISLER, 1995], a combustão em um motor ciclo Otto, se processa em três fases:

- Período de atraso;
- Período de elevação da pressão (propagação da chama);
- Período pós-combustão.

Período de atraso – essa fase compreende o momento em que uma centelha elétrica cruza os eletrodos das velas e o instante em que uma chama é formada, liberando a energia em forma de calor que irá realizar a combustão da mistura ar combustível admitida pelo motor. O momento em que essa fase se encerra pode ser visualizado no gráfico da Fig. 3.1, onde a elevação de pressão com combustão se desgarra do gráfico da pressão em ciclo motor, sem combustão.

A duração dessa fase, segundo [STONE, 1999] é de tipicamente 1-2 ms, o que corresponde a 15-30° do virabrequim com o motor a 2.500 rpm. A variação desse tempo depende de diversos fatores que também influenciam o momento em que a centelha é gerada (avanço de ignição):

- Temperatura da chama gerada pela vela de ignição;
- Propriedades do combustível;
- Pressão e temperatura ao qual a mistura ar combustível foi comprimida;
- Relação ar combustível admitida;
- Perfeição com que a mistura foi preparada.

Período de Propagação da chama – compreende a formação da frente de chama até o pico máximo de pressão no interior dos cilindros, que geralmente ocorre entre 10 e 20° após o Ponto Morto Superior (PMS). Essa pressão gerada no interior dos cilindros será melhor detalhada posteriormente.

Essa fase da combustão em um MCI é responsável pela efetiva realização de trabalho pelo motor, sendo bastante importante o seu correto posicionamento frente aos ângulos do virabrequim, de forma a aproveitar ao máximo a energia resultante do aumento da pressão no interior dos cilindros de um MCI.

A duração da propagação da chama é relativamente constante com relação ao ângulo do virabrequim. Essa informação é chave no momento de se determinar as curvas de avanço de ignição em função da rotação do motor. Um motor que funcione mais rápido necessitará maior antecedência na centelha, de modo que o pico máximo de pressão aconteça em um momento adequado. Segundo [MARTINS, 2005], a duração da propagação da chama depende da riqueza da mistura ar combustível queimada, além de outros fatores como rotação do motor, geometria da câmara de combustão, posição da vela de ignição e da própria velocidade da combustão que, por sua vez é dependente da temperatura, turbulência e combustível que está sendo queimado.

Período de Pós-combustão – após a frente de chama atingir as paredes dos cilindros, ainda existe cerca de 25% da mistura a ser queimada [HEISLER, 1999]. Nessa fase da combustão a pressão já passou pelo seu máximo valor e o movimento de descida do pistão faz com que a pressão decaia, tornando mais difícil a reação do oxigênio com a gasolina.

Uma das características dessa etapa é a grande perda de energia para os componentes do motor, energia essa dissipada para o sistema de arrefecimento, lubrificação ou em forma de calor para os gases de escape.

O gráfico da Fig. 3.1 ilustra as três fases da combustão, onde se pode verificar nesse exemplo que o momento da centelha ocorre 20° antes do PMS e pico de pressão a cerca de 16° após o PMS.

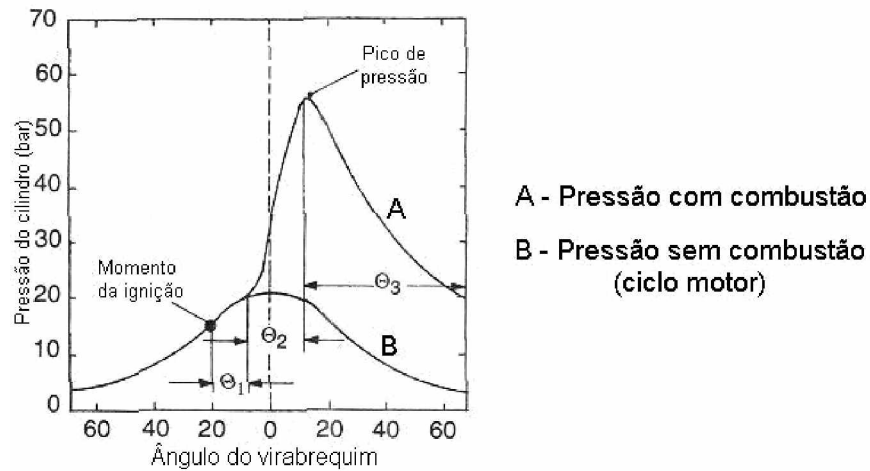


Fig. 3.1 – As três fases da combustão em um motor ciclo Otto – adaptada de [HEISLER, 1995]

3.2.2 - Desenvolvimento da Pressão no Interior dos Cilindros

Dentro dos cilindros de um motor de combustão interna, uma centelha elétrica proveniente de uma vela de ignição promove a queima da mistura ar combustível admitida, iniciando o processo de combustão propriamente dito.

A combustão promove a elevação da temperatura e pressão no interior do cilindro que, sendo empurrado para baixo, tem seu movimento retilíneo transformado em rotacional por intermédio do eixo de manivelas (virabrequim).

Essa pressão é influenciada por diversos fatores, sendo que o próprio deslocamento descendente do pistão contribui fortemente para a sua redução após o momento de pressão máxima decorrente da combustão ocorrida naquele cilindro.

Segundo [Taylor a, 1988], uma informação de interesse especial é o trabalho feito sobre o pistão dividido pelo volume do deslocamento do mesmo. Essa quantidade tem as dimensões de pressão e corresponde à pressão constante que se fosse exercida sobre o pistão durante todo o deslocamento motor do PMS ao PMI, forneceria trabalho idêntico ao realizado pelo ciclo. É conhecida como *pressão média efetiva*.

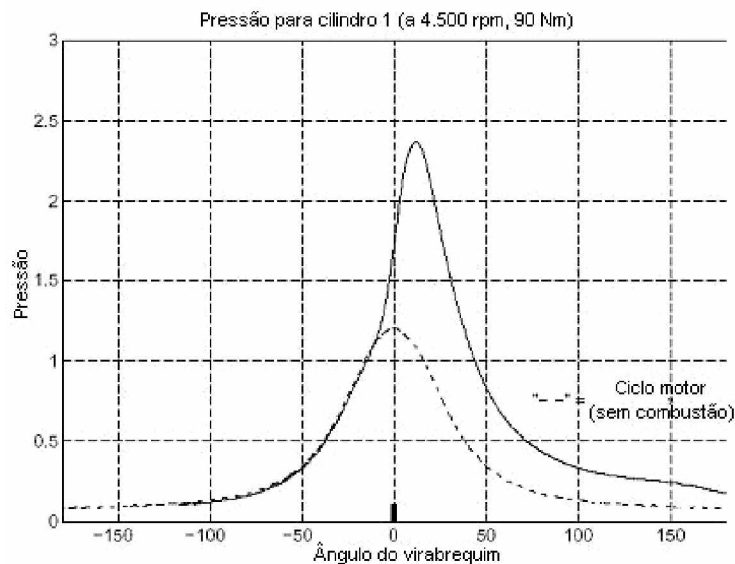


Fig. 3.2 – Desenvolvimento da pressão no interior de um cilindro, com e sem combustão – adaptada de [ERIKSSON, 1995]

No gráfico da Fig. 3.2, pode-se visualizar a pressão no interior de um cilindro, onde o tracejado corresponde a pressão sem a ocorrência de combustão. Desse gráfico é possível extrair importantes informações [ERIKSSON, 1995]:

- A aproximadamente 15° antes do ponto morto superior (representado pelo ângulo zero do virabrequim), nota-se que o gráfico da pressão com combustão se destaca, determinando uma elevação da pressão;
- Ao ultrapassar o PMS, a pressão continua a crescer, devido a combustão que ainda está ocorrendo;

- A pressão máxima é atingida entre 10 e 20° depois do ponto motor superior. Nesse ponto a combustão está praticamente completa, e o movimento de descida do pistão acompanha a expansão do volume, com conseqüente queda na pressão;
- Com relação à transferência de trabalho, nota-se que enquanto o gráfico com combustão supera o gráfico sem combustão, trabalho está sendo transferido para o motor. Por outro lado, nos tempos de exaustão, admissão e compressão, é necessário fornecer trabalho ao sistema;
- Embora a pressão entre 15° antes e o PMS seja superior ao do ciclo motor, sem combustão, essa mesma pressão demandará trabalho para que a fase de compressão vença essa resistência até atingir o PMS, representando perdas por bombeamento.

Ainda segundo [ERIKSSON, 1995], fica evidente que é desejável a maior pressão possível após o ponto Morto Superior, de forma a aproveitar ao máximo a energia oriunda da queima. Essa pressão também deve ter seu comportamento tal que a força seja aproveitada ao máximo, considerando o ângulo formado pelo conjunto biela e virabrequim. Esse ângulo influi na decomposição das forças, determinando as forças resultantes que irão efetivamente rotacionar o virabrequim e as que irão provocar vibrações indesejáveis à operação do motor.

O ângulo de máximo aproveitamento varia de acordo com projeto do motor, mas segundo [NIELSEN e ERIKSSON, 1998] esse ângulo fica situado entre 10 e 20° após o PMS. O gráfico da Fig. 3.3 ilustra como ocorre a transformação da pressão no cilindro em torque no virabrequim em função do ângulo.

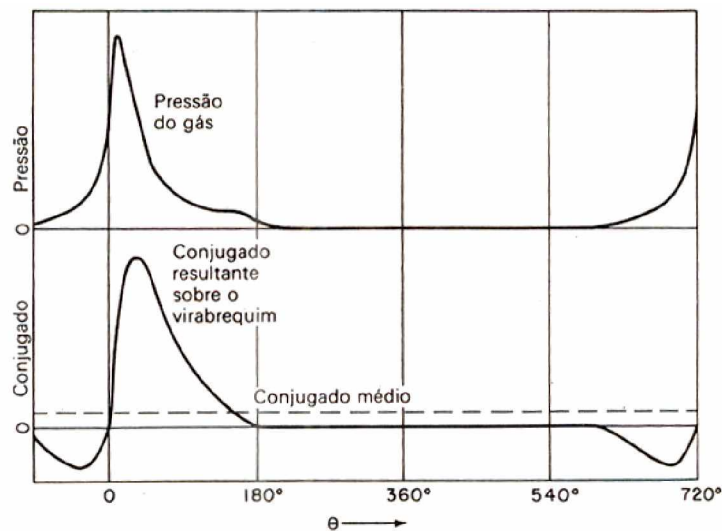


Fig.3.3 – Curva da pressão do gás versus ângulo do virabrequim com conjugado resultante – [TAYLOR b, 1988]

Fica também evidente a importância da pressão interna do cilindro na quantidade de trabalho gerado pelo motor em cada ciclo, de forma que o seu conhecimento pode trazer informações ricas de como obter o máximo rendimento de um motor [ERIKSSON, 1995].

Conforme se verifica no gráfico da Fig. 3.4, o momento de geração da centelha na vela de ignição promove substanciais alterações na evolução da pressão no interior, de forma que o controle do avanço de ignição é vital para se atingir um padrão ideal de pressão, visando o melhor rendimento com o mínimo risco de situações de queima irregular, como detonação, que além de perda de rendimento provocam danos aos componentes e mecanismos do motor.

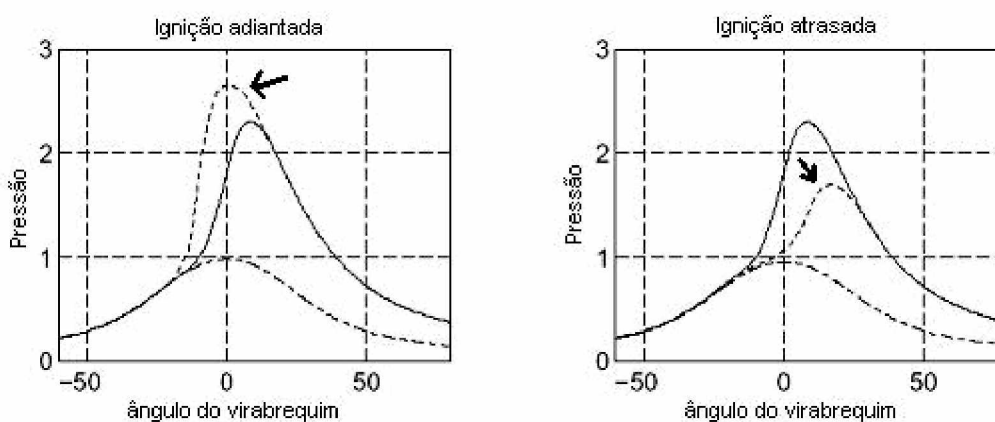


Fig.3.4 – Influência do avanço de ignição na pressão no interior do cilindro -
Adaptada de [ERIKSSON, 1995]

3.2.3 - O Avanço de ignição ideal

Segundo [MORAES, 2003], a combustão deve ocorrer perto do PMS para que se obtenha o máximo de torque e potência, desse modo, o instante em que a centelha é gerada é importante para o rendimento do motor. Devido às etapas de combustão descritas anteriormente, a centelha elétrica ocorre antes do pistão chegar no PMS, ou seja, na fase final de compressão. Devido a essa antecedência, o momento em que a centelha é gerada é denominado avanço de ignição, sendo medido em graus APMS, ou seja, antes do ponto morto superior. O momento em que a centelha deve ser gerada na vela de ignição, de modo a que se obtenha o máximo de rendimento com segurança, depende de uma série de fatores:

- Rotação do motor – segundo [DENTON, 2000], rotações elevadas tornam o tempo de trajeto do pistão menor. Dessa forma, existe um tempo menor para o cilindro dissipar o

calor da combustão. O aumento da velocidade do motor é superior ao aumento da velocidade de combustão [MORAES, 2003], exigindo aumentar o avanço de ignição para permitir uma queima eficiente da mistura;

- Relação ar combustível admitida pelo motor – misturas pobres utilizadas em condições de baixa carga queimam em velocidades menores comparadas a situações de mistura rica. Desse modo, cargas altas - misturas ricas - demandam um atraso na ignição, o que corresponde a um avanço menor [MORAES, 2003];
- Composição do combustível – segundo [MARTINS, 2005], as características do combustível determinam a taxa de compressão a que podem ser submetidos sem o risco da ocorrência de detonação. Essas características, representadas pela octanagem do combustível, influem no avanço de ignição na medida em que combustíveis de maior octanagem permitem um maior avanço de ignição, garantindo maiores pressões após a combustão, ao passo que combustíveis de menor octanagem exigem um avanço mais conservador. Modernamente, sensores detectam a condição de detonação, proporcionando um controle do avanço em tempo real, o que garante um alto rendimento sem a ocorrência de detonação [RIBBENS, 2002];
- Temperatura do ar – segundo [MARTINS, 2005], a elevação na temperatura torna a combustão mais rápida, o que na prática aumenta a pressão, o que por sua vez propicia a ocorrência da detonação. Nesse caso temperaturas do ar mais elevadas demandam um atraso na ignição, ou seja, um avanço menor;
- Umidade do ar – segundo [MARTINS, 2005], o aumento da umidade da mistura reduz a velocidade de chama e a temperatura máxima da combustão. De fato, em experimentos desenvolvidos por [NIELSEN e ERIKSSON, 1988] o aumento da umidade na mistura reduziu a velocidade da combustão, com conseqüente queda na potência e eficiência do motor, uma correta modificação no ângulo de ignição pode reduzir essas perdas.

Os motores mais atuais possuem sensores que medem a maioria desses itens, informações essas submetidas à central de gerenciamento eletrônico que define o melhor avanço de ignição para cada instante de funcionamento do motor [RIBBENS, 2003].

O controle do sistema de ignição pode ser bastante aprimorado por intermédio do levantamento direto, ou por intermédio de algoritmos, da pressão nos cilindros. Esse importante dado pode ajudar a corrigir fatores que são de difícil medição, como a umidade relativa do ar admitido, por exemplo. Esses fatores podem tornar o controle da ignição e do próprio motor mais preciso, com menor consumo de combustível e menor emissão de poluentes [NIELSEN e ERIKSSON, 1998].

3.2.4 - Situações adversas da combustão

Determinadas condições de operação do motor podem dar origem a situações indesejáveis de queima, na qual podem ocorrer problemas tais como: perda de rendimento, consumo elevado, maior emissão de gases poluentes e redução na vida útil do motor [MORAES, 2003].

Dois fenômenos merecem ser estudados mais detalhadamente - a detonação e a pré-ignição - visto que influenciam bastante o processo de combustão.

3.2.4.1 - Detonação

Quando ocorre a centelha da vela, uma frente de chama é formada, elevando rapidamente a pressão no interior da câmara de combustão. A detonação ocorre quando essa elevação provoca uma nova onda de pressão em algum local, devido ao surgimento da queima da mistura [MORAES, 2003]. A elevação de pressão provoca o surgimento de pontos de combustão, conforme se pode ver na seqüência da Fig. 3.5.

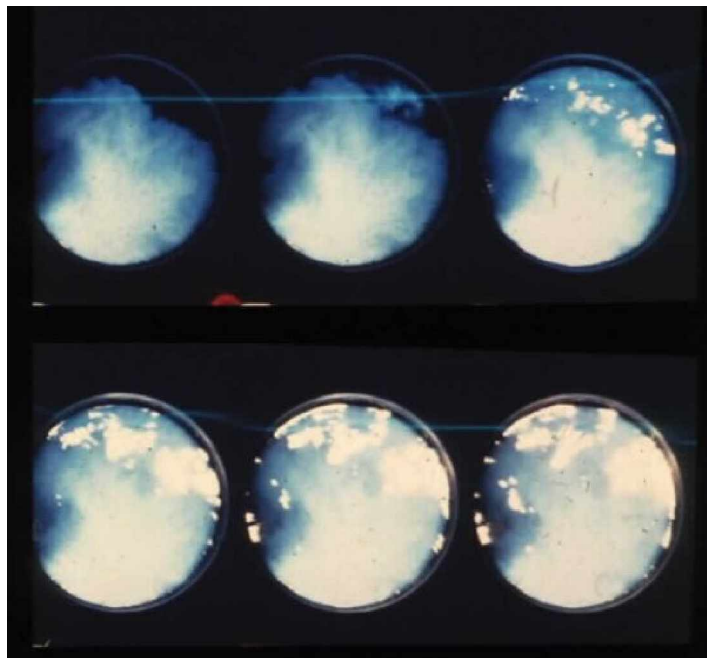


Fig. 3.5 – Sequência de fotos onde se pode verificar o fenômeno da detonação -

<http://www.mech-eng.leeds.ac.uk/res-group/combustion/activities/knock.html> - 09/06/2006

Segundo [TAYLOR b, 1988] a detonação decorre da auto-ignição do gás na extremidade, que é aquela parte da mistura ar combustível admitida que ainda não foi atingida pela frente de

chama. A elevação da pressão e temperatura devido à expansão dos gases queimados é tamanha que provoca o fenômeno.

Esse fenômeno indesejável traz prejuízos à queima devido aos esforços desordenados gerados no interior do cilindro, que podem inclusive gerar ruídos metálicos, denominados batidas de pino. Esses ruídos decorrem de vibrações nas paredes dos cilindros, provocadas pelas intensas ondas de pressão da mistura.

A intensidade e frequência desse ruído dependem da intensidade do fenômeno, temperatura e geometria do motor. Sistemas eletrônicos de gerenciamento de motor se utilizam dessa característica para, por intermédio de sensores apropriados acoplados ao bloco do motor, detectar a ocorrência do fenômeno [MORAES, 2003].

A detonação pode ser causada por combustível inadequado, temperatura muito elevada ou sistema de ignição regulado inadequadamente. É possível eliminar ou atenuar a detonação atrasando a ignição. Nesse caso a pressão no interior dos cilindros é ligeiramente menor, o que acaba por impedir a formação de novas frentes de chama.

Se permanecer durante longos períodos, além da queda no rendimento e ruído, o fenômeno da detonação traz sérios danos ao motor, em especial aos pistões.

3.2.4.2 - Pré-ignição

Segundo [TAYLOR a, 1988], pré-ignição é a ignição da carga admitida (ar + combustível) antes de ocorrer a centelha. Também denominada ignição de superfície, a principal fonte de pré-ignição são superfícies quentes, ou seja, a presença de um ponto quente no interior da câmara, dando origem a uma frente de chama independente da centelha da vela de ignição.

A pré-ignição tem geralmente as origens em impurezas de carvão e válvulas ou velas incorretas. Um motor carbonizado costuma apresentar problemas de pré-ignição na medida em que o carvão depositado na cabeça do pistão, válvulas e sedes de válvulas agem como pontos quentes, dando origem a frentes de chama anteriores à combustão provocada pela vela de ignição [MARTINS, 2005].

O fenômeno é muito confundido com a detonação, embora tenha características e momento de ocorrência bastante distintos. No entanto, segundo [TAYLOR a, 1988], quando se tem detonação severa e prolongada, os pontos da vela ou as partículas de carbonos podem ser

aquecidos a ponto que provoquem a pré-ignição. Esse fenômeno pode ser ilustrado no gráfico da Fig. 3.6, onde se verifica as zonas de pré-ignição em função da taxa de compressão e relação ar combustível.

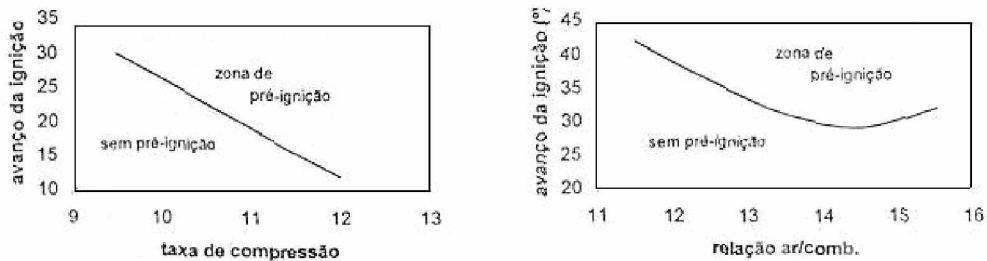
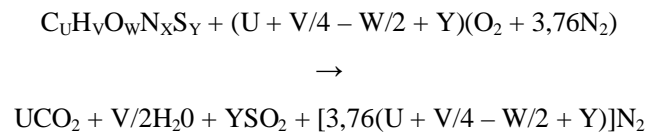


Fig. 3.6 – Zonas de pré-ignição [MARTINS,2005]

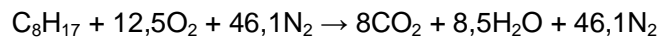
3.3 - Estequiometria para a gasolina

Segundo [HEISLER, 2002], combustão é uma reação química onde uma substância (combustível) reage rapidamente com o oxigênio para a produção de calor e luz. Nessas reações ocorrem a oxidação do carbono e do hidrogênio, e compostos com esses elementos são formados.

Segundo [STREHLOW, 1984] numa combustão, temos a equação genérica:

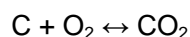


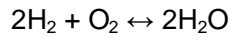
De acordo com [MILHOR, 2002], admitindo-se a gasolina como composição média de hidrocarbonetos representada por C_8H_{17} e supondo o ar composto por 21% de O_2 e 79% de N_2 , tem-se que:



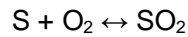
Se considerarmos a queima completa de uma mistura de gasolina e ar, teremos como subprodutos da queima Dióxido de carbono, água e Nitrogênio. A relação de peso ar combustível calculada é denominada relação teórica.

Na combustão completa, a oxidação é representada por duas equações simples:



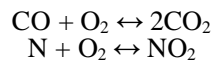


Se o combustível contiver Enxofre, esse se oxidará formando dióxido de enxofre:



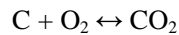
Na realidade, no entanto, os gases resultantes da combustão contêm produtos resultantes de uma queima incompleta, que são o Monóxido de carbono (CO), Hidrocarbonetos não queimados (HC) e dióxido de Nitrogênio (NO₂).

Esses elementos permitem a ocorrência de mais duas reações intermediárias:



3.3.1 - Queima de carbono para dióxido de carbono

Na ocorrência de um amplo suprimento de oxigênio, a reação seguinte ocorre:



Dessa equação conclui-se que um mol de carbono se combina com um mol de Oxigênio para produzir um mol de Dióxido de carbono. Inserindo as relativas massas atômicas, tem-se:

12 unidades de massa de carbono (12 x 1) + 32 unidades de massa de oxigênio (16 x 2)

↓

12 + (2 x 16) unidades de massa de dióxido de carbono

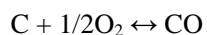
Dividindo a equação pela massa molecular do carbono (12), temos:



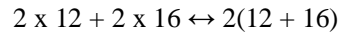
Daí, temos na base mássica:



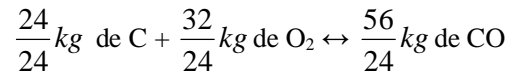
3.3.2 - Queima incompleta do carbono, gerando monóxido de carbono com a deficiência de oxigênio na reação



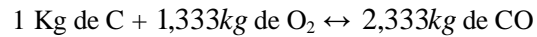
Para balancear essa equação, multiplicamos o Carbono e o Monóxido de carbono por 2, inserindo as relativas massas atômicas, temos:



Dividindo por 24:

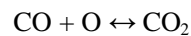


Daí temos na base mássica:

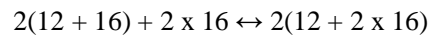


3.3.3 - Produção de Dióxido de Carbono a partir da queima de Monóxido de Carbono

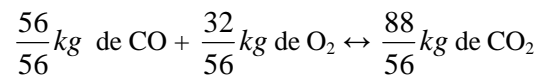
Quando o CO é exposto a Oxigênio adicional:



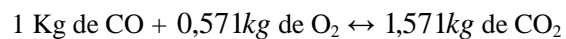
A equação pode ser balanceada multiplicando o Monóxido de carbono e o Dióxido de carbono por 2. Inserindo as relativas massas atômicas:



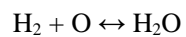
Dividindo por 56:



Daí, temos:



3.3.4 - Produção de vapor d'água



É possível balancear a equação multiplicando por 2 o Hidrogênio e a Água. Inserindo as relativas massas atômicas, temos:

$$2(2 \times 1) + 2 \times 16 \leftrightarrow 2(2 \times 1 + 16)$$

Dividindo a equação por 4:

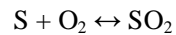
$$\frac{4}{4} \text{ kg de H}_2 + \frac{32}{4} \text{ kg de O}_2 \leftrightarrow \frac{36}{4} \text{ kg de H}_2\text{O}$$

Daí, temos:

$$1 \text{ kg de H}_2 + 8 \text{ kg de O}_2 \leftrightarrow 9 \text{ kg de H}_2\text{O}$$

3.3.4 - Formação do Dióxido de Enxofre

Quando o Enxofre é oxidado com uma quantidade suficiente de Oxigênio, temos a seguinte reação:



Inserindo as respectivas massas atômicas:

$$32 + 2 \times 16 \leftrightarrow 32 + (2 \times 16)$$

Dividindo a equação por 32:

$$\frac{32}{32} \text{ kg de S} + \frac{32}{32} \text{ kg de O}_2 \leftrightarrow \frac{64}{32} \text{ kg de SO}_2$$

Daí, temos:

$$1 \text{ kg de S necessita de 1 kg de O}_2 \text{ para produzir 2 kg de SO}_2$$

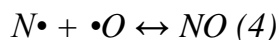
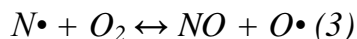
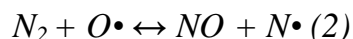
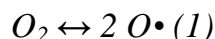
3.3.5 - Produção de Dióxido de Nitrogênio

Os óxidos de nitrogênio (representados genericamente por NO_x), emitidos pelas fontes de combustão, estão principalmente na forma de óxido nítrico (NO): menos de 5%, em geral, estão como dióxido de nitrogênio (NO₂).

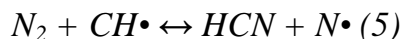
A formação desse compostos se dá com a oxidação do nitrogênio atmosférico, reação essa que ocorre em temperaturas próximas àquelas da queima de combustíveis ou com a oxidação de outros compostos de nitrogênio presentes no combustível. Segundo [CÓNSUL, THIELE e outros, 2003], três mecanismos de formação de NO_x são aceitos:

- Formação térmica de NO_x, também denominada mecanismo Zeldovich;
- Mecanismo de radicais livres;
- Oxidação dos compostos de nitrogênio presentes nos combustíveis.

O mecanismo proposto por Zeldovich considera a formação do óxido nítrico através das etapas descritas pelas equações (1) a (4). Essas reações são dependentes da temperatura e só são significativas em temperaturas superiores a 1500° C, que são típicas de câmaras de combustão de motores.



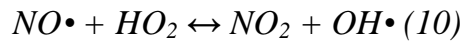
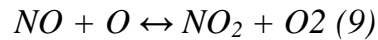
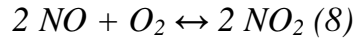
O mecanismo de radicais livres geralmente ocorre com concentrações altas de hidrocarbonetos. A formação se dá com o ataque do carbono ou radicais de hidrocarbonetos às moléculas de nitrogênio, de acordo com as equações (5) a (7).



O terceiro mecanismo decorre de moléculas nitrogenadas presentes nos combustíveis. Com a razão combustível/ar baixa, produz-se óxidos de nitrogênio, enquanto se a razão for elevada, são produzidos amônia e oxigênio. Em misturas ricas em hidrocarbonetos, os compostos de nitrogênio em fase gasosa são rapidamente convertidos a ácido cianídrico. Este é

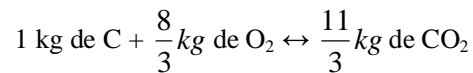
convertido a espécies aminas (NH_i) as quais são oxidadas a NO, ou convertidas a nitrogênio por reações com NO ou outras espécies NH_i .

Independente do mecanismo formador, ao chegar à atmosfera a espécie NO é convertida a NO_2 através das reações (8) a (10).



3.3.6 - Relação ar combustível teórica para a combustão

A queima dos elementos individuais de um combustível pode ser resumida na seguinte equação:



Daí que o Carbono requer $8/3$ vezes sua própria massa de oxigênio para produzir o CO_2 .



De onde se conclui que o Hidrogênio, por sua vez, requer 8 vezes sua própria massa de Oxigênio para produzir água.



O enxofre, por sua vez necessita sua própria massa de oxigênio para produzir SO_2 .

Desse modo, na queima completa de 1 kg de combustível reagem C kg de carbono, H kg de Hidrogênio, S kg de Enxofre e O kg de Oxigênio.

Portanto:

- O_2 requerido para queimar C kg de carbono = $8/3 C$
- O_2 requerido para queimar H kg de carbono = $8 H$
- O_2 requerido para queimar S kg de carbono = $1 S$

Na soma, o total de Oxigênio requerido é:

$$\frac{8}{3}C + 8H + S - O$$

Ignorando a baixa concentração de outros elementos, o ar contém 23% de massa em Oxigênio e 77% em Nitrogênio. Assim, a queima teórica de 1kg de combustível pode ser expressa pela seguinte relação Ar Combustível (A/C) em base molar:

$$A/C = \frac{100}{23} \left(\frac{8}{3}C + 8H + S - O \right)$$

3.3.7 - Queima teórica da gasolina pura

Considerando a gasolina pura como o Hidrocarboneto C_8H_{18} , podemos calcular a relação ar combustível estequiométrica.

$$\text{Massa molecular do } C_8H_{18} = (8 \times 12) + (18 \times 1) = 114$$

$$\text{Fração de carbono por massa} = \frac{96}{114} = 0.8421$$

$$\text{Fração do Hidrogênio por massa} = \frac{18}{114} = 0.1579$$

$$A/C = \frac{100}{23} \left(\frac{8}{3}C + 8H \right) = \frac{100}{23} \left(\frac{8 \times 0.8421}{3} + 8 \times 0.1579 \right) = \frac{100}{23} (2,2456 + 1,2632)$$

$$A/C_{\text{teórica}} = 15,255:1$$

Essa relação também é conhecida como razão estequiométrica, considerando uma queima completa com gasolina pura.

3.3.8 - Queima teórica da gasolina Brasileira

No Brasil, álcool é adicionado à gasolina em uma proporção de 20-25 \pm 1 % em volume. Na época em que esse trabalho foi elaborado, a ANP – Agência Nacional do Petróleo, estabelecia uma composição de 20% de álcool na gasolina.

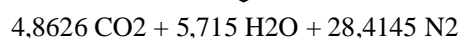
A presença de álcool na gasolina modifica as equações feitas anteriormente, de forma que a razão estequiométrica é modificada. Para o cálculo da estequiometria para o gasohol (como é conhecida a gasolina com álcool), serão feitas as seguintes considerações:

- A gasolina será considerada um hidrocarboneto com 8 carbonos – o intuito é simplificar a equação, uma vez que a gasolina real é uma complexa mistura de hidrocarbonetos de proporções bastante variáveis. Segundo [FERREIRA, 2004], a gasolina é uma mistura complexa de compostos químicos diferentes, portanto não possui uma fórmula definida. A composição da mesma depende das condições de refino e do tipo de petróleo que a gerou. Essa especificação pode variar de um país para o outro. Além disso a gasolina pode conter aditivos como álcoois e éteres para melhorar o seu desempenho, minimizar o desgaste mecânico e reduzir as emissões de poluentes;
- O ar é composto apenas por Nitrogênio e Oxigênio, desprezando-se outros gases.

Considerando a densidade da mistura gasolina álcool E20 (20% de álcool) de 0,75 kg/l e a respectiva proporção 80/20 entre os combustíveis, em uma amostra de 1 litro, teríamos:

0,60 kg de gasolina – 0.5263 moles

0,15 kg de álcool – 0.3261 moles



$$\frac{7,55705 \times 4,76 \times 28,84}{(0,5263 \times 114) + (0,3261 \times 46)} = \frac{1037}{75} = 13,82 \text{ kg ar / kg gasohol}$$

Os cálculos foram efetuadas com o uso da ferramenta computacional EES – Engineering Equation Solver, que está melhor detalhado no Apêndice II.

Segundo [MONTANARI e DAMASCENO, 2004] a relação ar combustível estequiométrica para o gasohol E22 (22% de álcool) é de 13,4:1. Considerando a presença de 2% a mais de álcool, pode-se atestar a coerência do valor encontrado para a amostra examinada.

A estequiometria é bastante importante para a operação do motor, pois quando a mistura está estequiométrica, o rendimento do mesmo é otimizado com um melhor controle dos poluentes emitidos nos gases de escape. Para representar a estequiometria é utilizado:

$$\lambda = \frac{Ar / \text{combustível}_{real}}{Ar / \text{combustível}_{estequiométrico}}$$

Conforme veremos no capítulo de conversores catalíticos, misturas pobres propiciam redução nas emissões de hidrocarbonetos não queimados e monóxido de carbono. Isso decorre do excesso de oxigênio que está disponível nos gases de escapamento. Por outro lado, misturas pobres tendem a gerar índices elevados de óxidos de nitrogênio, uma vez que ocorre elevação na temperatura adiabática da chama [RANGEL e CARVALHO, 2002]. Misturas ricas em combustível, ou seja, com deficiência em oxigênio determinam por sua vez elevadas emissões de monóxido de carbono e hidrocarbonetos e uma menor emissão de óxidos de Nitrogênio.

Dessa forma, busca-se a razão estequiométrica que proporciona, na média, uma baixa emissão de poluentes, com alta eficiência do conversor catalítico.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA

Os experimentos realizados em um motor com gerenciamento eletrônico visam demonstrar o sistema de controle da combustão com o uso de sensores de oxigênio, suas vantagens e limitações.

4.1 – Materiais

Para elaboração dos experimentos, foi utilizado um motor ciclo Otto de 6 cilindros equipado com Sistema de Controle eletrônico de Motor Bosch Motronic 2.8, com injeção de combustível seqüencial fasada, através de sensor de fase instalado no eixo comando de válvulas. O sistema de ignição utilizado é do tipo Direto, através do uso de 3 bobinas incorporadas em um mesmo corpo, com ignições ocorrendo em pares nos cilindros gêmeos 1-6, 2-5 e 3-4, de acordo à ordem de queima apresentada pelo motor. A tabela 4.1 ilustra os principais dados do motor, uma ficha técnica completa pode ser encontrada no Anexo AI.

Fabricante	General Motors do Brasil
Modelo	Chevrolet Powertech 4.1 SFI
Combustível	Gasohol (Gasolina a 20% Álcool)
Número e disposição dos cilindros	6 cilindros dispostos em linha
Sistema de controle	Injeção e Ignição eletrônicos e

	integrados. Modelo Bosch Motronic, versão software 2.8
Relação de compressão	8,5:1
Potência máxima	168 CV a 4.500 rpm
Torque Máximo	29,1 m.kgf a 3.500 rpm
Alimentação de combustível Injeção Pressão da linha	Multiponto Seqüencial fasada 3.0 bar em relação ao coletor
Controle de emissões de gases de escape	Catalisador de 3 vias. Mistura controlada através de sensor de oxigênio aquecido eletricamente.

Tabela 4.1 – Principais características do Motor utilizado no experimento

A escolha do motor foi feita com base nos seguintes critérios:

- Motor equipado com sistema de gerenciamento eletrônico moderno;
- Controle da relação ar combustível através de sensor de oxigênio;
- Disponibilidade de literatura técnica;
- Disponibilidade de computador de diagnóstico com interface de comunicação com a central de gerenciamento do motor;
- Disponibilidade de peças de reposição e de componentes para comparação e aferição de instrumentos;
- Disponibilidade de um motor completo como reserva;
- Facilidade de instrumentação;
- Equipamento possui seis cilindros, de forma que alterações promovidas na queima de um cilindro provocam pouca alteração no comportamento dinâmico do motor, evitando dessa maneira a inserção de variáveis no experimento.

O motor escolhido cumpre todos esses pré-requisitos, além de ser de pouco uso e de estar instalado em uma prática plataforma de fixação juntamente com seus agregados – escapamento, sistema de alimentação e admissão. Os equipamentos e instrumentos utilizados para instrumentação e controle do motor estão descritos no Anexo AII.



Fig. 4.1 - Motor utilizado no experimento

Para a verificação da situação da queima da mistura pelo motor, foi instalado no sistema de escape, um analisador digital multigás, onde se pôde avaliar a real situação da mistura considerando-se a regulagem de pressão de combustível imposta ao tubo distribuidor de combustível dos eletroinjetores.

Um motor de combustão interna eletronicamente controlado, como o utilizado no experimento, possui estratégias que permitem alterações no tempo de injeção de forma a garantir que a mistura ar combustível fica próxima da razão estequiométrica na maior parte do tempo possível. O monitoramento é efetuado por intermédio de um sensor de oxigênio localizado no sistema de escape. Dessa forma, qualquer alteração transitória na pressão de combustível fará com que o sistema prontamente reaja, alterando o tempo de injeção para mais ou para menos em relação a um valor pré-calculado.

Para que não ocorresse risco de superaquecimento do propulsor durante o experimento, uma vez que o mesmo fica estático, foram realizadas alterações em seu sistema de arrefecimento, com a inserção de um novo eletro ventilador de alta velocidade que permaneceu acionado enquanto o motor estava sendo utilizado.

O monitoramento constante da temperatura da água e do óleo também se fez necessário, como forma de prevenção contra temperaturas excessivas que pudessem a vir a causar danos ao sistema.

4.2 – Métodos

4.2.1 - Simulação de misturas ricas e pobres

Com o intuito de avaliar o comportamento do sensor de oxigênio e do sistema de controle da mistura ar combustível em circuito fechado, foram promovidas alterações na quantidade de combustível fornecida ao sexto cilindro do motor.

A escolha desse cilindro específico foi de mera conveniência, uma vez que sua posição facilita o acesso à respectiva válvula injetora de combustível, que teve seus parâmetros modificados para o teste, além da maior facilidade para inserção de um sensor de oxigênio individual para esse cilindro. Qualquer outro cilindro escolhido certamente traria o mesmo resultado, uma vez que todos os parâmetros do motor são ajustados de forma que misturas de iguais características sejam fornecidas a cada um dos seis cilindros do motor [HEISLER, 1995].



Fig. 4.2 – Localização do sexto cilindro facilita substituição da válvula injetora

De posse de duas válvulas injetoras sobressalentes de igual tipo, foram realizadas modificações, com objetivo de dispor de duas válvulas – uma com uma vazão de combustível superior ao projetado e outra com uma obstrução, garantindo uma vazão inferior ao projeto.

4.2.1.1 - Válvula injetora com excesso de vazão

Com o uso de uma máquina de usinagem por eletro erosão, foi realizado o desbaste em um dos orifícios de saída do injetor, promovendo um aumento da vazão do mesmo conforme se verifica na Fig. 4.3.



Fig. 4.3 – Válvula injetora com vazão ampliada através de eletro erosão

Para aferir o impacto do retrabalho da válvula na vazão, a válvula injetora foi submetida a um teste comparativo de vazão com outras três válvulas originais, de sorte que foi constatada uma vazão média 45% superior à original, conforme se pode verificar na Fig. 4.4.

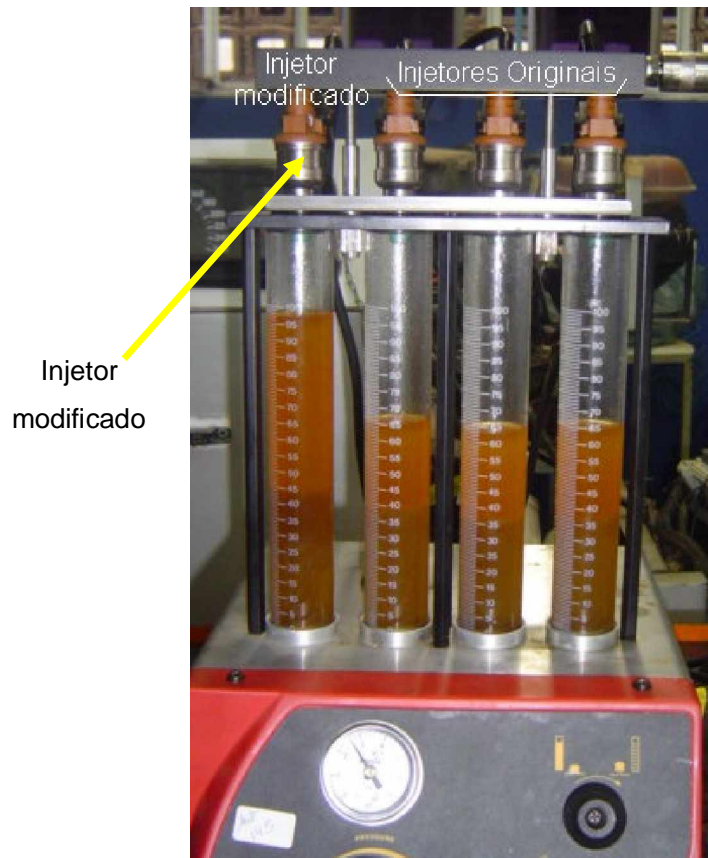


Fig. 4.4 – Teste de vazão da válvula injetora retrabalhada com eletro-erosão

4.2.1.2 - Válvula injetora obstruída

Uma vez que o sistema opera com pressões da ordem de 3,0 bar, optou-se por se criar uma obstrução na entrada da válvula injetora para provocar uma menor vazão. Essa obstrução foi realizada com a aplicação de cola quente na entrada da válvula, o que provocou uma perda média de 50% na vazão dessa válvula injetora em relação às originais, conforme se verifica no teste ilustrado na Fig. 4.5.

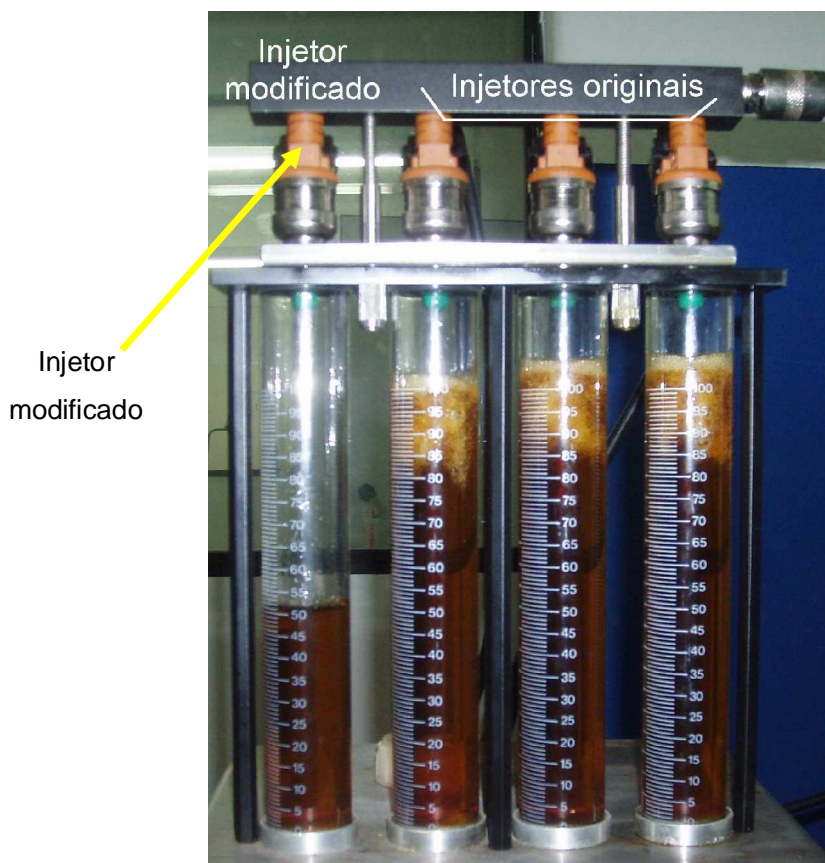


Fig. 4.5 – Teste de vazão com injetor obstruído

Uma vez preparada as duas válvulas injetoras, uma para cada situação que se deseja simular (mistura rica e mistura pobre em combustível), bastava efetuar a substituição da válvula injetora original pela modificada para que se realizasse o experimento desejado.

A substituição da válvula injetora foi facilitada pela arquitetura do motor. Uma vez aguardado o tempo de esfriamento do motor, bastava descarregar o sistema de combustível, remover parte da carenagem do motor e efetuar a substituição, operação de cerca de 30 minutos.

Ao instalar a válvula injetora de teste foram substituídos os anéis de vedação (*O-Rings*), evitando o risco de vazamento de combustível e entrada falsa de ar externo.



Fig.4.6 – A operação de substituição das válvulas injetoras foi facilitada pela arquitetura do motor

4.2.2 - Instrumentação do motor

O motor utilizado no experimento já dispõe de alguns sensores que realizam o seu monitoramento junto ao sistema eletrônico que o controla. Para leitura e captura de dados desses sensores, foi utilizado um Simulador de inconvenientes e um Scanner de comunicação. Esses sensores são:

- Sensor de rotação e posição do PMS (Ponto morto superior) – fornece por intermédio de pulsos elétricos, subsídios para a determinação da posição do pistão do primeiro cilindro e a determinação da rotação do motor. É um sensor indutivo que fica próximo a uma roda fônica acoplada ao eixo virabrequim do motor;
- Sensor de fase – fornece pulsos que indicam quando o primeiro cilindro está em fase final de compressão, o que é indicativo de necessidade de centelha elétrica. Fornece subsídios para o sequenciamento da injeção de combustível, de modo que as válvulas injetoras são acionadas conforme a ordem de queima do motor;
- Sensor de temperatura da água – é um termistor NTC (coeficiente negativo de temperatura) que modifica sua resistência em função da temperatura do líquido de arrefecimento do motor;

- Sensor de temperatura do ar – é um termistor NTC que modifica sua resistência em função da temperatura do ar de admissão. Permite correções na mistura ar combustível em função de alterações na densidade do ar e a escolha do avanço de ignição mais adequado a cada temperatura do ar, evitando a ocorrência de detonação;
- Sensor de vazão mássica de ar – informa ao sistema de controle a quantidade de ar admitida pelo motor em cada instante;
- Sensor da posição da borboleta de aceleração – é um potenciômetro que varia sua resistência em função da posição do acelerador;
- Sensor de oxigênio – fornece uma referência sobre a quantidade de oxigênio que sai pelos gases de escapamento, permitindo ao sistema eletrônico a realização de controle fino sobre a mistura ar combustível admitida pelo motor.

Além dos sensores originais, foram instalados alguns sensores adicionais com o intuito de instrumentar melhor o motor, permitindo o levantamento de informações complementares essenciais ao experimento, conforme se vê na Fig. 4.7. São eles:

- Temperatura do óleo – trata-se de um termopar que possibilita um controle mais rigoroso da temperatura do motor, evitando situações de superaquecimento. O sensor do fabricante Bosch tem o formato de uma vareta de medição de nível de óleo do cárter, tendo sido instalado no lugar da vareta original do motor.
- Sensor de oxigênio Banco A – foi instalado um sensor de oxigênio adicional logo após a junção do coletor de escapamento dos cilindros 1 a 3. Esse sensor permite monitorar a mistura queimada por esses três cilindros;

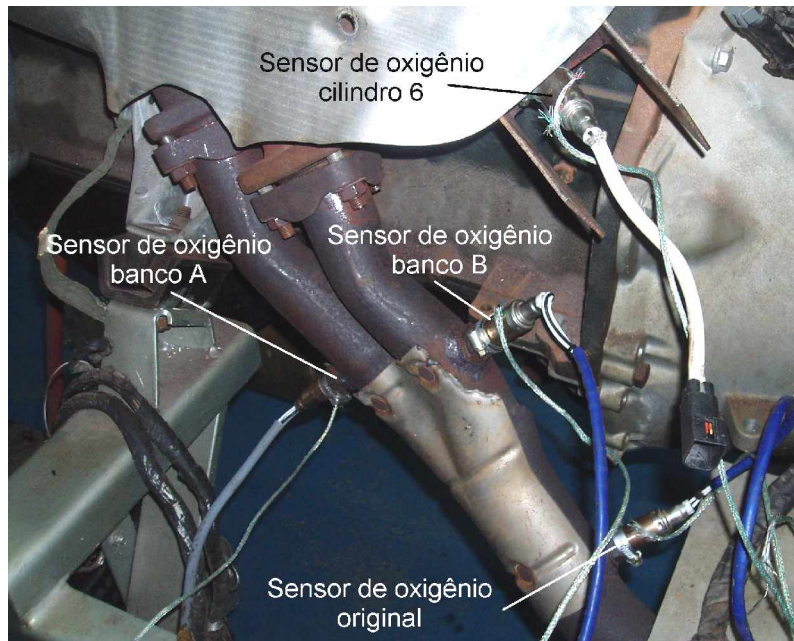


Fig. 4.7 – Sensores de Oxigênio – original e adicionais

- Sensor de oxigênio Banco B – foi instalado um sensor de oxigênio adicional logo após a junção do coletor de escapamento dos cilindros 4 a 6. Esse sensor permite monitorar a mistura queimada por esses três cilindros;
- Sensor de oxigênio Cilindro 6 – foi instalado um sensor de oxigênio adicional individual para o sexto cilindro, o qual teve seus parâmetros de injeção de combustível modificados ao longo dos experimentos. Uma vez que o local onde o mesmo foi instalado apresenta temperatura elevada, foi instalado um dissipador de calor, como forma de garantir uma sobrevida ao sensor durante sua operação – Fig. 4.8;

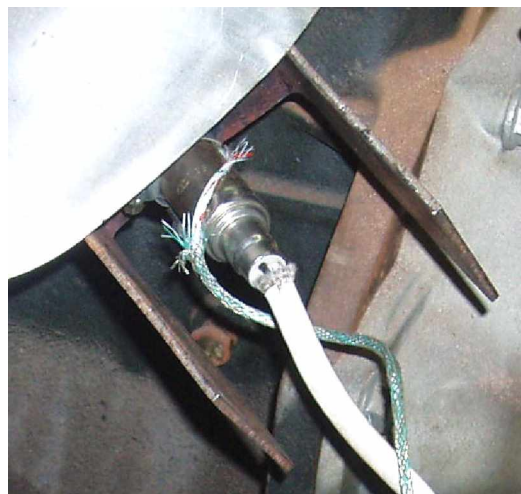


Fig. 4.8 - Dissipador do sensor de oxigênio do cilindro seis e respectivo termopar

- Tempo de injeção do cilindro 6 – para confirmar que o tempo de injeção permanece igual entre os seis cilindros, foi instalado um osciloscópio que mede em forma de gráfico o tempo de injeção dos cilindros 1 e 6.
- Sensores de temperatura dos sensores de oxigênio – cada sensor de oxigênio foi monitorado através de um termopar específico, de forma que sua temperatura de operação pudesse ser monitorada. A instalação dos termopares se deu através de um pequeno furo realizada com uma broca de forma que o sensor se projetasse o máximo possível para o interior do sensor no duto de escapamento;
- Medidor de consumo e controle de combustível – equipamento que, munido de uma bureta graduada e acoplado a uma balança permite monitorar o consumo de combustível e controlar a pressão de alimentação. Para instalação do mesmo, foi criada uma alimentação de tensão derivada do controle do motor. Dessa forma evita-se a detecção de falhas eletrônicas, uma vez que a bomba de combustível original do motor foi substituída pelo dispositivo;



Fig. 4.9 – Bomba e controle de combustível

- Pressão de combustível – instalado na linha de entrada de combustível, o manômetro permite monitorar o correto funcionamento da bomba de combustível e do sistema externo de controle de pressão;



Fig. 4.10 – Manômetro de pressão de combustível

- Gases emitidos – foi instalada uma sonda no sistema de escapamento conectada a um analisador multigás – Fig. 4.11. O equipamento fornece subsídios para o cálculo do lambda e determinação do real estado da mistura, com intuito de comprovar os valores medidos pelos sensores de oxigênio.



Fig. 4.11 – Analisador de gás com respectiva sonda instalada no escapamento

4.2.3 - Acessórios de controle do experimento

Para a realização do experimento foram consideradas algumas variáveis de controle previamente estabelecidas para melhor interpretação e monitoramento dos dados. As variáveis são as seguintes:

Acessórios do motor - O sistema de admissão, escapamento e linhas de combustível foram mantidos os mais fiéis possíveis ao original do veículo, de modo a que não se insira nos experimentos variações devido a contrapressões de descarga ou perdas de carga na linha de admissão. Nesse sentido foram utilizados abafadores e catalisador originais inclusive com relação à distância e temperaturas de operação. Um compressor de ar condicionado foi instalado

no trem de correias, de modo a que seja mantido a carga de acessórios originais, bem como a bomba de direção hidráulica original foi mantida, sendo que nesse caso foi necessário realizar um circuito fechado com óleo de modo que a mesma não seja danificada pela falta de fluido;

Velas, cabos e bobinas de ignição – foram utilizados componentes originais, novos e corretamente calibrados de acordo com as especificações contidas no manual de reparação do motor [GM DO BRASIL b, 1997];

Combustível – foi utilizado como combustível para o experimento gasolina C (Comum) adquirida em posto da rede de abastecimento. Para evitar qualquer alteração que poderia ser provocada por diferentes composições de combustível, foi utilizada a mesma amostra em todos os testes, eliminando quaisquer riscos com adulteração e contaminação. Considerou-se a validade de 3 meses para o combustível, após o qual o mesmo seria adequadamente descartado;

Temperatura de operação – antes da realização dos testes, o motor foi aquecido até a temperatura normal de operação (92 a 95° C), evitando alterações no tempo de injeção e ângulo de ignição motivados por alterações na temperatura medida pelo sensor de temperatura do motor. Para uma maior confiabilidade foi instalado um termopar para confrontar os valores medidos pelo termistor do motor, os quais foram acessados com o uso de um Scanner de comunicação com o sistema eletrônico de controle do motor;

Temperatura e carga do motor - o motor funcionou durante todo o tempo de testes em condições de marcha lenta (900 ± 50 rpm) e sem carga. Somente foram admitidas as cargas normais ao funcionamento do motor, tais como: bomba d'água do fluido refrigerante do motor, bomba de óleo, alternador, trem de válvulas e bomba de direção e compressor de ar condicionado rodando com a embreagem eletromagnética desligada. O controle da marcha lenta se deu automaticamente através do controle do atuador de marcha lenta que opera um desvio calibrado no corpo da borboleta do sistema de admissão de ar;

Pressão de combustível - a pressão diferencial de combustível (linha de combustível x coletor de admissão) foi fixada em 3,0 bar, que é a pressão especificada pelo fabricante, durante todos os testes.

CAPÍTULO 5

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 - Verificação da razão ar combustível queimada pelo motor

5.1.1 – Descrição

Esse experimento foi realizado com o intuito de checar qual a relação ar combustível efetivamente fornecida ao motor pela central eletrônica de controle, com o motor aquecido e com circuito de controle com sonda lambda em malha fechada.

5.1.2 - Considerações

Nesse experimento foram feitas as seguintes considerações:

- Foram utilizados todos os sensores originais e instalados nas posições recomendados pelo fabricante do motor;
- O tempo de operação do motor foi registrado pelo Scanner de comunicação com a central de controle.

Para a execução do experimento, o kit de reservatório graduado e bomba de combustível foi instalada sobre uma balança digital – Fig. 5.1. Com o motor aquecido e em funcionamento, a balança foi tarada, ou seja, foi zerada para descontar o peso atual.



Fig. 5.1 – Balança foi utilizada para medir consumo de combustível

Com o monitoramento do sensor de vazão mássica de ar, foi verificada após 15 minutos de funcionamento a vazão mássica de ar admitido pelo motor – Fig. 5.2. Da mesma forma foi verificado o peso do conjunto reservatório / bomba.



Fig. 5.2 – Medição da massa de ar admitida – sensor e respectivo valor captado

5.1.3 – Dados coletados

Com os dados coletados foram calculados a relação ar combustível em $\text{kg}_{\text{ar}} / \text{kg}_{\text{gasolina}}$.

Amostra	Tempo de funcionamento (seg)	Massa de combustível consumido	Massa de ar admitido (kg)	Relação ar combustível encontrada
Teste 1	900	0,512	7,2	13,96
Teste 2	901	0,52	7,2	13,75
Teste 3	899	0,515	7,1	13,79
Teste 4	901	0,515	7,0	13,59
Teste 5	900	0,52	7,2	13,85
Média	900,2	0,5164	7,12	13,79
desvio	0,837	0,004	0,076	0,136
Média				13,79

Tabela 5.1 – Relação ar combustível encontrada para quinze minutos de funcionamento do motor

5.1.4 - Análise dos resultados do experimento 5.1

A média encontrada de 13,79:1 se situa bastante próxima da calculada no Capítulo 3, que foi de 13,8:1, o que demonstra que o motor do experimento está em boas condições, conseguindo manter a mistura bem próxima da razão estequiométrica, sendo esse o objetivo do sistema eletrônico de controle.

Esse resultado também reforça a necessidade de se manter o motor em perfeitas condições, com componentes originais e gasolina de boa qualidade. Só dessa forma a central de controle poderá garantir que a queima de combustível se dê na melhor forma possível.

5.2 - Monitoramento da combustão com o uso de sensor de oxigênio

5.2.1 – Descrição

Esse experimento foi realizado com o intuito de verificar a operação dos sensores de oxigênio, suas características e deficiências.

5.2.2 - Influência da temperatura na operação do sensor de oxigênio

Para duas diferentes temperaturas ambiente, onde o motor foi deixado por 24 horas para estabilização da temperatura, foi avaliado o tempo necessário para que o sensor de oxigênio inicie sua operação, ou seja, o sistema de controle da relação ar combustível entre em malha fechada. Foram medidos também os gases emitidos antes e após a malha fechada, para averiguar a importância de um circuito em malha fechada para controle das emissões de gases do motor.

Nesse experimento foram feitas as seguintes considerações:

- A posição de instalação do sensor foi a recomendada pelo fabricante do sistema de gerenciamento eletrônico do motor, em orifício que também segue as especificações originais do equipamento;
- Foi considerado sensor operacional, o momento em que a central de controle indica que a malha foi fechada, situação essa detectada quando o sensor gera uma tensão superior à indicada para razão estequiométrica, denunciando uma condição de mistura rica;
- Foram realizadas medições com sensor de oxigênio com e sem aquecimento elétrico, para avaliação da efetividade do dispositivo;

- Um sensor de temperatura termopar tipo K foi instalado no local de medição do sensor de oxigênio, para avaliação de sua temperatura de operação;
- Foram checadas as temperaturas ambiente, do motor e temperatura do sensor de oxigênio. Essa análise teve como objetivo validar a uniformização da temperatura entre os diversos dispositivos;
- Foi instalado um analisador multigás na saída do escapamento, sendo avaliado aqui três gases: CO, CO₂, e HC, sendo os dois primeiros em % Vol e o último em ppm;
- O tempo de operação do motor foi registrado pelo Scanner de comunicação;
- Para atingir a temperatura ambiente de 23° C, o motor permaneceu durante 24 horas em uma sala climatizada antes da partida;
- Os valores de temperatura foram corrigidos de acordo com a calibração do termopar, disponível no Anexo.

5.2.3 - Dados encontrados

Temperatura ambiente 31° C				
Sem pré-aquecimento			Com pré-aquecimento	
Dia	Tempo (segundos)	Temperatura	Tempo (segundos)	Temperatura
1	78	281	35	301
2	77	278	37	298
3	82	293	32	285
Média	79	284	35	295
desvio	2,2	6,5	2,1	6,9

Temperatura ambiente 23° C				
Sem pré-aquecimento			Com pré-aquecimento	
Dia	Tempo (segundos)	Temperatura	Tempo (segundos)	Temperatura
1	92	281	41	301
2	89	278	39	298
3	95	293	40	285
Média	92	284	40	295
desvio	2,4	6,5	0,8	6,9

Tabela 5.2 - Tempo necessário para operação do sensor em duas temperaturas ambiente

5.2.4 - Análise dos resultados do experimento 5.2

Pode-se verificar na Tabela 5.2 que, em média, o sensor de oxigênio com aquecimento entrou em operação 48 segundos mais rápido que o similar sem aquecimento, uma redução expressiva de 133% no tempo de prontidão para operação, o que demonstra a efetividade do aquecedor.

Pode-se verificar que a influência da queda na temperatura ambiente é significativamente menor no caso do sensor aquecido. Em temperaturas muito baixas, o qual não foi possível simular devido a não disponibilidade de laboratório com temperatura nessas condições, o tempo necessário para operação aumentará, sendo que nesse caso o aquecedor elétrico passa a ter importância ainda maior no sentido em que impede que o sensor tenha sua temperatura muito reduzida em condição de chuva ou neve, o que acarretaria em malha aberta, prejudicando o controle de emissões.

No que tange as emissões, é notável a redução das emissões tão logo se feche a malha de controle do tempo de injeção em função da concentração de oxigênio nos gases, conforme se pode verificar no gráfico da Fig. 5.3. Vale salientar que as emissões continuam mais altas que o especificado para o motor mesmo após a entrada em operação do sensor de oxigênio. Essa situação era esperada, pois o motor atinge a temperatura operacional alguns minutos após a partida, portanto em todas as amostras feitas o motor estava em fase de aquecimento, característico por operar em misturas ar combustível fora da razão estequiométrica.

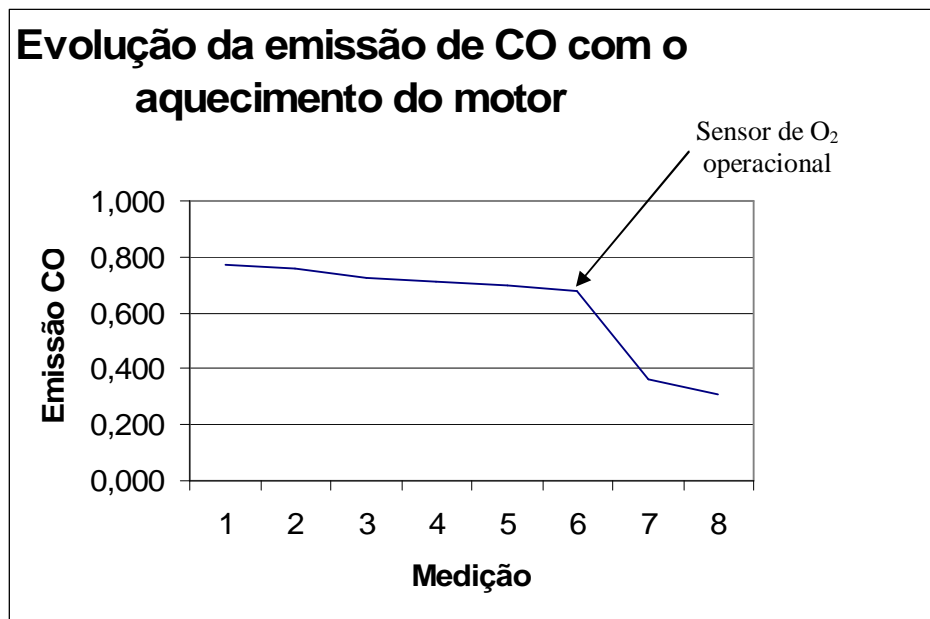


Fig. 5.3 – Gráfico com emissão de gases antes e após fechamento da malha (6) de controle do sensor lambda

5.3 – Efetividade do sensor em condições de falha na operação nos eletroinjetores

5.3.1 – Descrição

Esse experimento foi realizado com o intuito de verificar a operação dos sensores de oxigênio, suas características e deficiências. Nessa etapa foram avaliadas três situações:

- Motor em condições normais;
- Motor com um eletroinjetor obstruído parcialmente;
- Motor com um eletroinjetor com vazão excessiva, devido à erosão dos orifícios.

Após a operação com componentes originais e em boas condições, o motor de seis cilindros utilizados operou com um dos seus cilindros com fornecimento de combustível alterado artificialmente sem que a central eletrônica de controle pudesse identificar alterações específicas nesse cilindro. A opção pelo sexto cilindro se deu devido à localização facilitada, de forma que qualquer outro cilindro teria comportamento similar nos experimentos, uma vez que o tempo de injeção é idêntico em todos os cilindros.

Para comparar, foram efetuados inicialmente medições com o motor com os seis injetores originais e com vazões corretas. Um analisador de gases foi instalado para aferir as emissões do motor em temperatura operacional. Para medição individual no sexto cilindro foi aberto um furo no coletor de escapamento do sexto cilindro para conexão da sonda do analisador.

Dois eletroinjetores de especificações iguais aos originais foram submetidos a alterações para simular esses dois fenômenos. No primeiro caso, a entrada de combustível na válvula foi obstruída com cola quente, simulando uma perda de vazão de cerca de 50%. No segundo caso, um dos furos de saída teve seu diâmetro alterado utilizando uma máquina de usinagem por eletroerosão, o que resultou em um aumento de 45% na vazão.

Os injetores modificados foram aferidos em medidor de vazão específico para esses componentes, conforme foi descrito no Item 4.2.1. De posse dos injetores modificados foi dado prosseguimento ao experimento, que foi efetuada em três grupos de medições: em condições normais, com um injetor obstruído instalado no sexto cilindro e com um injetor com vazão excessiva instalado no sexto cilindro.

5.3.2 – Considerações

- Foi instalado um analisador de gases para avaliar as emissões de gases;
- Foi feito o cálculo do fator lambda para checagem do dado calculado pelo analisador de gases. Para isso foi utilizado o EES;
- Foi utilizado o sensor de oxigênio aquecido instalado em local recomendado pelo fabricante;
- Inicialmente foram feitas medições com os seis eletroinjetores originais;
- Foi feita a substituição do eletroinjetor do cilindro seis pelo eletroinjetor obstruído. Foram então realizadas medições na saída geral do escape e na saída do escape do sexto cilindro;
- Foi feita a substituição do eletroinjetor do cilindro seis pelo eletroinjetor com vazão excessiva. Foram então realizadas medições na saída geral do escape e na saída do escape do sexto cilindro;
- Foram realizadas também medições diretas no sexto cilindro para as três condições.

5.3.3 - Dados encontrados:

Para o motor em condições normais, ou seja, com os injetores originais, os seguintes dados foram levantados:

Condições do motor	Lambda calculado pelo analisador de gases	Lambda calculado com o uso do EES	O2	CO2	CO	HC
Operação normal medição 1	1,002	1,003	0,20	15,24	0,145	61
Operação normal medição 2	1,002	1,003	0,25	15,19	0,227	56
Operação normal medição 3	1,003	1,004	0,31	15,12	0,283	62
Operação normal medição 4	1,004	1,005	0,34	15,09	0,292	59
Operação normal medição 5	1,001	1,001	0,17	15,32	0,145	57
Média	1,0024	1,0032	0,254	15,192	0,2184	59
desvio	0,0011	0,0015	0,0716	0,0926	0,0715	2,5495

Tabela 5.4 – Valores medidos em 5 amostras com Analisador de gases conectado no escape geral para motor em condição normal de funcionamento

O Lambda indicado foi checado com o uso da ferramenta computacional EES *Engineering Equation Solver*, que está detalhado no Apêndice II. Os gases foram medidos pelo

analisador e a situação da malha foi verificado com o uso de um Scanner conectado à central eletrônica do motor. A temperatura do motor se manteve entre 92 e 95°C durante o teste, temperatura considerada operacional pelo manual do motor testado [GM b, 1997]

Para a condição com o uso do injetor parcialmente obstruído, ou seja, com vazão de combustível abaixo do padrão no sexto cilindro, os seguintes dados foram levantados na saída geral do escapamento:

Condições do motor	Lambda calculado pelo analisador de gases	Lambda calculado com o uso do EES	O2	CO2	CO	HC	tensão sensor Oxigênio do cil 6	tensão sensor Oxigênio Bc 1-3	tensão sensor Oxigênio Bc 4-6	Tensão no sensor de oxigênio original
Injetor 6 obstrução medição 1	1,122	1,166	4,09	11,68	1,337	717	0,088	0,61	0,12	0,45
Injetor 6 obstrução medição 2	1,118	1,145	3,81	12,38	1,305	611	0,086	0,65	0,23	0,45
Injetor 6 obstrução medição 3	1,083	1,104	3,02	13,05	1,283	493	0,125	0,69	0,34	0,45
Injetor 6 obstrução medição 4	1,103	1,131	3,45	12,03	1,332	475	0,18	0,63	0,2	0,45
Injetor 6 obstrução medição 5	1,056	1,084	2,54	13,18	1,203	479	0,237	0,74	0,32	0,45
Média	1,0964	1,126	3,382	12,464	1,292	555	0,1432	0,664	0,242	0,45
desvio	0,027	0,033	0,618	0,645	0,054	106,536	0,065	0,052	0,090	0,000

Condição da mistura ar combustível ■ Pobre em combustível (excesso de ar)
■ Rica em combustível

Tabela 5.5 – Valores medidos em 5 amostras com Analisador de gases para motor em condição de vazão baixa no sexto cilindro com motor aquecido

No gráfico da fig. 5.4, pode-se visualizar com maior clareza as medições para o motor nessas condições.

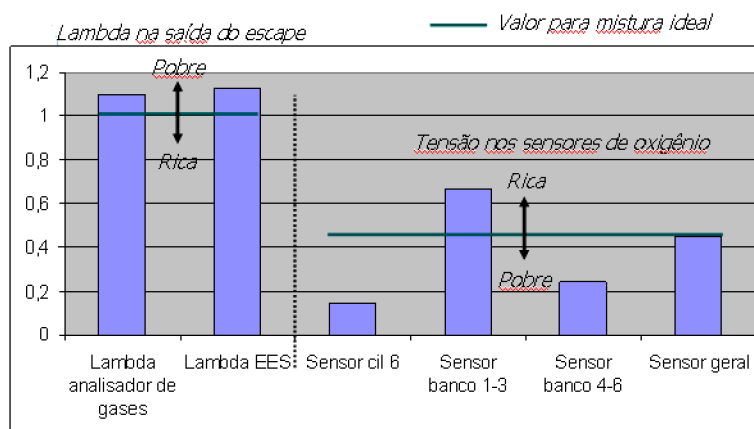


Fig. 5.4 – Gráfico com valores medidos para motor com sexto cilindro com vazão baixa de combustível

Para a condição com o uso do injetor do sexto cilindro com vazão excessiva, os seguintes dados foram levantados na saída geral do escapamento:

Condições do motor	Lambda calculado pelo analisador de gases	Lambda calculado com o uso do EES	O ₂	CO ₂	CO	HC	tensão sensor Oxigênio do cil 6	tensão sensor Oxigênio Bc 1-3	tensão sensor Oxigênio Bc 4-6	Tensão no sensor de oxigênio original
Injetor 6 excesso medição 1	0,989	0,992	0,41	15,42	0,72	468	0,793	0,41	0,68	0,45
Injetor 6 excesso medição 2	0,979	0,9996	0,27	16,44	0,418	459	0,815	0,37	0,73	0,45
Injetor 6 excesso medição 3	0,985	1,008	0,58	15,34	0,632	468	0,82	0,32	0,71	0,45
Injetor 6 excesso medição 4	0,979	0,9996	0,27	16,44	0,418	459	0,85	0,2	0,72	0,45
Injetor 6 excesso medição 5	0,995	0,9974	0,31	15,47	0,612	462	0,83	0,33	0,7	0,45
Média	0,9854	0,99932	0,368	15,822	0,56	463,2	0,8216	0,326	0,708	0,45
desvio	0,007	0,006	0,132	0,566	0,136	4,550	0,021	0,079	0,019	0,000

Condição da mistura ar ■ Pobre em combustível (excesso de ar)
■ Rica em combustível

Tabela 5.6 – Valores medidos em 5 amostras com Analisador de gases para motor em condição de vazão excessiva no sexto cilindro com motor aquecido

No gráfico da fig. 5.5, pode-se visualizar com maior clareza as medições para o motor nessas condições.

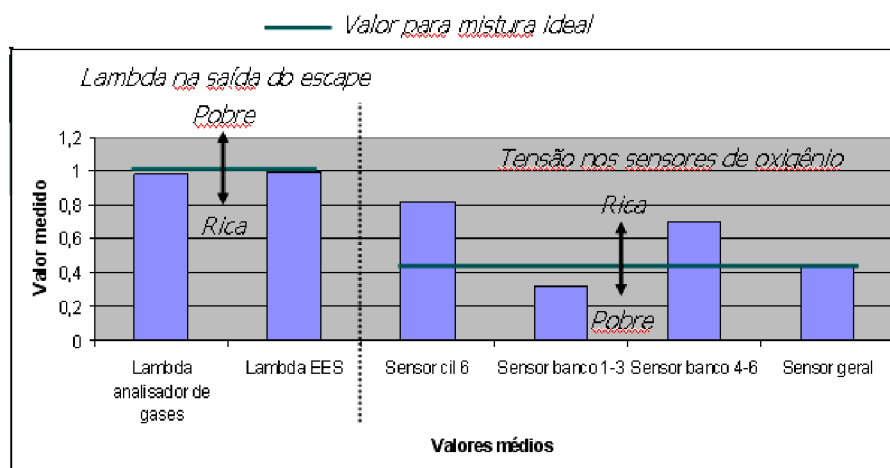


Fig. 5.5 - Gráfico com valores medidos para motor com sexto cilindro com vazão excessiva de combustível

Com o intuito de avaliar as emissões do sexto cilindro, a sonda do analisador de gases foi instalada em um furo realizado no coletor de escapamento do sexto cilindro. Os seguintes dados foram encontrados para as três situações – injetor original, obstruído e com vazão excessiva:

Condições do motor		Lambda calculado pelo analisador de gases	Lambda calculado com o uso do EES	O2	CO2	CO	HC
Injetor Original	Medição 1	1	1,001	0,17	15,32	0,145	57
	Medição 2	1,005	1,006	0,28	15,24	0,156	63
	Medição 3	1,003	1,002	0,25	15,26	0,291	58
	Medição 4	0,999	0,999	0,13	15,33	0,134	61
	Medição 5	1,004	1,005	0,34	15,08	0,291	60
	Média	1,0022	1,0026	0,234	15,246	0,2034	59,8
	Desvio	0,003	0,003	0,084	0,100	0,080	2,4
Injetor Obstruído	Medição 1	> 2	2,929	14,35	4,57	0,171	2017
	Medição 2	> 2	2,486	13,46	4,95	0,701	2675
	Medição 3	> 2	2,529	13,59	4,92	0,637	2635
	Medição 4	> 2	2,485	13,47	4,96	0,702	2680
	Medição 5	> 2	2,469	13,36	4,95	0,724	2674
	Média	>2	2,5796	13,646	4,87	0,587	2536,2
	Desvio	-	0,197	0,402	0,168	0,235	290,8
Injetor com excesso vazão	Medição 1	0,913	0,9271	2,16	8,55	7,92	544
	Medição 2	0,918	0,9229	2,11	8,51	8,06	520
	Medição 3	0,899	0,917	2,03	8,46	8,21	538
	Medição 4	0,909	0,916	2,00	8,48	8,19	547
	Medição 5	0,899	0,904	1,97	8,4	8,927	543
	Média	0,9076	0,9174	2,054	8,48	8,2614	538,4
	Desvio	0,008	0,009	0,079	0,056	0,390	10,8

Tabela 5.7 – Valores medidos em 5 amostras com Analisador de gases conectado ao escapamento do sexto cilindro. A escala lambda do equipamento (Maximo de 2) foi ultrapassada om injetor obstruído

Da mesma que forma que nos experimentos anteriores, os dados podem ser melhor visualizados no gráfico da Fig. 5.6.

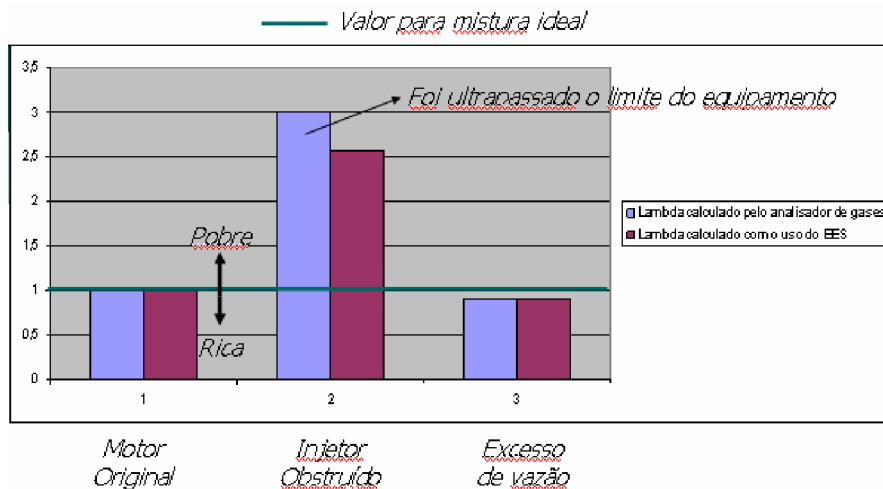


Fig. 5.6 - Gráfico com valores medidos no sexto cilindro em três situações

5.3.4 – Análise dos resultados do experimento 5.3

Os dados coletados com o motor original, ou seja, sem modificações em suas válvulas eletroinjetoras de combustível, demonstrou a eficiência do sistema no controle das emissões, o que pode ser verificado com a manutenção do lambda próximo a um (mistura estequiométrica) nos cinco ciclos de aquecimento efetuados para levantamento dos dados, conforme se vê na tabela da Fig. 5.4.

Da mesma forma, o gráfico da fig. 5.6 demonstra que o sexto cilindro efetua uma queima com a mistura próxima da relação estequiométrica e com os níveis de emissões semelhantes aos do geral do motor.

Com a modificação nos injetores nota-se que a central de gerenciamento do motor atua na sua única forma de verificação da condição de queima – o único sensor de oxigênio disponível na saída geral dos gases de escapamento. Percebe-se que um injetor obstruído provoca uma mistura empobrecida nesse cilindro e no banco formado pelos cilindros 4 a 6 (informação contida no sensor de oxigênio adicional instalado).

Ao perceber o empobrecimento da mistura causado, o sistema de controle do motor aumenta o tempo de injeção, de forma que todos os cilindros passarão a operar com mistura fora do ideal, com o objetivo inalcançável de atingir a estequiometria. O resultado é um aumento considerável na emissão de poluentes, como se pode verificar nas tabelas, com claro prejuízo ao consumo de combustível, à operação dos catalisadores e conseqüentemente ao meio ambiente.

A longo prazo, uma operação nessas condições trará prejuízos à durabilidade do motor, com contaminação do óleo lubrificante e depósito de resíduos de queima nas câmaras de combustão.

De forma semelhante pode-se verificar que apenas um injetor com vazão excessiva pode comprometer todo o controle de emissão de gases do motor, uma vez que a central realiza a correção da mistura pela média dos gases emitidos pelos seis cilindros do motor. De forma semelhante ao injetor obstruído, o sistema de controle do motor diminui o tempo de injeção, buscando a estequiometria perdida pela anomalia que o sistema não tem condições de caracterizar com precisão.

Em ambas as situações nota-se um aumento nas emissões, o que decorre do fato do motor estar operando com uma relação estequiométrica fora da ideal, o que prejudica de forma geral o processo de queima.

Os dados levantados demonstraram a importância da operação do sensor de oxigênio, retroalimentando a central de controle do motor de modo que o tempo de injeção seja otimizado para reduzir ao mínimo as emissões de poluentes. Por outro lado, os mesmos dados mostram que o controle pode se revelar frágil quando realizado em único ponto de coleta de gases, uma vez que uma anomalia em um injetor não poderá ser identificada com maior precisão.

5.1 - Conclusões

O sistema de controle eletrônico de motores que faz uso do sensor de oxigênio é o tipo mais comum de controle utilizado pela indústria automobilística. A totalidade dos modelos de automóveis com motores a gasolina álcool ou *flex* comercializados no Brasil possuem esse tipo de controle, de forma que se consiga um controle da emissão de gases poluentes para atendimentos aos níveis de emissão estabelecidos pelo CONAMA.

Os experimentos realizados em um motor com esse sistema demonstram que o uso do sensor de oxigênio localizado em um único ponto possui as seguintes características:

- Sinal elétrico de fácil processamento;
- Permite que o sistema opere o motor de maneira a conter os gases poluentes;
- Sensor demanda tempo para aquecimento, não entrando em operação de prontidão;

- O sensor avalia a média dos cilindros, sendo que se um ou mais cilindros estiverem com problemas na formação da mistura (tais como mistura rica ou pobre), não é possível realizar avaliação individual;
- O sensor faz a medição momentos após a queima ter sido realizada, o que provoca um maior tempo para a correção da mistura.

De fato, os experimentos comprovaram que uma válvula injetora defeituosa pode determinar prejuízos a formação da mistura em todos os cilindros, o que foi evidenciado com os níveis de emissão de poluentes bastante alterados nessas situações.

Com a necessidade de motores com emissões de poluentes cada vez menores, uma solução mais adequada para monitoramento da queima se torna interessante. Outras alternativas de monitoramento ou até mesmo sensores de oxigênio mais eficientes deverão ser buscados como forma de melhor monitorar a queima de combustível em um motor ciclo Otto. O modelo atualmente utilizado possui deficiências que dificultarão ou tornaram inviável o uso de sensores de oxigênio de forma a atender essas necessidades.

5.2 - Oportunidades para desenvolvimento de estudos futuros

Com o intuito de coletar maior número de dados, alguns experimentos poderão ser efetuados no futuro como continuidade a esse trabalho. Como oportunidade para futuros desenvolvimentos pode citar:

- Execução de alguns testes em bancada dinamométrica com bancada de teste de emissões para levantamento dos dados em outros regimentos de rotação e carga;
- Utilização de uma câmara frigorífica para avaliação do tempo de prontidão do sensor de oxigênio em temperaturas mais baixas;
- Instrumentação do motor para levantamento da pressão e corrente iônica nos cilindros para verificação de outras formas de monitoramento da queima;
- Desenvolvimento de modelos matemáticos e software para cruzamento das informações dos novos sensores para determinação da condição da mistura queimada em cada cilindro;
- Desenvolvimento de um sistema de controle do motor próprio, de forma a possibilitar o controle total do motor durante o experimento.

Os experimentos realizados no motor escolhido para esse trabalho poderão ser utilizados em outras avaliações, tais como outros motores ou outros tipos de combustível, uma vez que o tipo utilizado é bastante representativo. Os estudos aqui descritos também poderão servir de subsídios a outras dissertações de mestrado e teses de doutorado, uma vez que o monitoramento da queima em motores de combustão interna é alvo de diversas equipes de pesquisadores de montadoras e fornecedores de sistemas de controle, sendo um amplo campo para novos desenvolvimentos e aperfeiçoamentos.

APÊNDICES

APÊNDICE I

Sistema de Alimentação e Ignição em Motores de Combustão Interna Ciclo Otto

I.1 - Carburador

O carburador é um dispositivo mecânico responsável pela formação da mistura de ar e combustível que será fornecida e queimada pelo motor em seus diversos regimes de funcionamento. O funcionamento do carburador é baseado na mecânica dos fluidos: o ar aspirado pelos pistões passa pelo difusor (uma região onde ocorre um estreitamento da passagem) arrastando consigo uma quantidade de combustível que estava previamente armazenado na cuba [BOSCH, 1996].

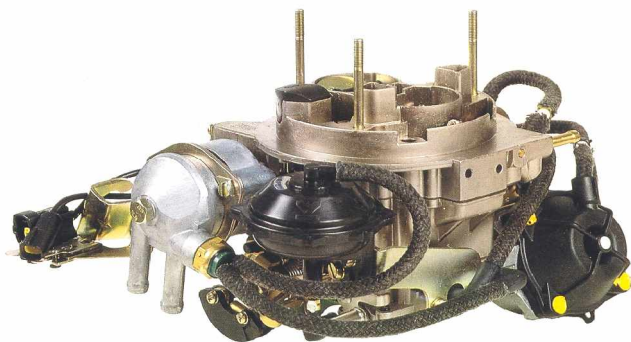


Fig. I.1 – Carburador [VOLKSWAGEM DO BRASIL LTDA, 1994]

Ao acionar o acelerador, uma válvula borboleta é movimentada, permitindo maior passagem ao ar atmosférico aspirado pelo motor. Esse artifício define a potência ou o torque que se deseja do propulsor naquele momento.

Muito embora bastante semelhantes no funcionamento e sistemas existentes, os carburadores podem ser convencionais ou com monitoramento eletrônico. Os do último tipo possuem dois dispositivos elétricos que controlam a rotação de marcha lenta e o dispositivo afogador, para partida a frio [HEISLER, 2002].

Segundo [TOYOTA, 1997], por ser um dispositivo mecânico, o carburador não possui meios de verificar a condição de queima no interior do motor, possuindo apenas ajustes básicos. Essas limitações impedem que atendam às rígidas normas de controle de emissão nacionais e internacionais.

Atualmente, não existem mais automóveis sendo fabricados com esse dispositivo no Brasil, sendo que até motocicletas estão gradativamente substituindo o controle mecânico da mistura ar combustível pelo controle eletrônico [PROCONVE, 1998].

I.2 - Alimentação controlada eletronicamente

O gerenciamento eletrônico dos motores surgiu da necessidade de se produzir motores que poluíssem cada vez menos, imposição de severas leis de proteção ambiental em todo o mundo. Aliado à questão ambiental, a maior precisão na formação da mistura ar combustível e no controle da ignição trouxe outras vantagens [SZWARCFITER, 2004]:

- Melhor rendimento;
- Menor consumo de combustível;
- Maior confiabilidade;
- Menor necessidade de manutenção;
- Partidas mais fáceis a qualquer temperatura;
- Facilidade na manutenção.

O sistema é constituído por vários sensores que monitoram constantemente as condições do motor e a rotação e carga a que ele está submetido. Essas informações chegam a uma central de controle, que calculará a quantidade de combustível que deve ser fornecido para que se forme uma mistura ideal para cada regime de funcionamento do motor. A central determinará também o momento ideal de centelhamento nas velas. Todos os cálculos e decisões da central são executados por intermédio dos atuadores, que são comandados eletricamente. Todo esse controle visa o melhor rendimento possível, dentro das emissões de gases poluentes permitidos por lei e mantendo o consumo contido [FIAT, 1996].

Atualmente todos os automóveis novos a álcool ou gasolina comercializados no Brasil são equipados com motores gerenciados eletronicamente. As motocicletas também vêm, gradualmente, incorporando esse sistema de controle [BRASIL, 2002].

I.2.1 - Formação da mistura pelo sistema de gerenciamento eletrônico

Em um motor de ciclo Otto, o sistema calcula a quantidade de combustível ideal em função da quantidade de ar admitida. Essa tem relação direta com o ângulo da borboleta,

expressa em função do quão pressionado o pedal de acelerador for pelo motorista. Sistemas com controle eletrônico da borboleta, também conhecido como Borboleta eletrônica, possibilitam um certo controle também da quantidade de ar admitida, muito embora essa seja fortemente dependente do pedal do acelerador [BOSCH, 1999].

O ângulo da borboleta, embora tenha relação com a quantidade de ar admitido pelo motor, não é uma informação suficiente para o cálculo da quantidade de ar admitido. Para determinar esse valor corretamente, faz-se necessário a medição da vazão mássica de ar admitida pelo motor em cada instante do seu funcionamento. Os tipos mais comuns de medição são:

- Medição por densidade x velocidade – um sensor avalia a pressão absoluta no interior do coletor de admissão, enquanto outro avalia a temperatura do ar admitido. Esses dados determinam a densidade do ar que, juntamente com uma área de corpo de borboleta conhecida, a rotação e a eficiência volumétrica do motor (volume de ar admitido por rotação em relação ao volume dos cilindros), são suficientes para determinação da vazão mássica com razoável precisão [RIBBENS, 2003];
- Sensor MAF de película aquecida – esse tipo de sensor consta de uma ponte de Wheaststone, que possui algumas de seus elementos resistivos submetidos ao fluxo de ar. A passagem do ar provoca o resfriamento de um desses elementos, o que desequilibra a ponte, provocando uma passagem de corrente maior por um elemento aquecedor, que procura reaquecer a película. Um circuito eletrônico dedicado transforma esse desequilíbrio da ponte em uma tensão elétrica que é proporcional à vazão mássica de ar que flui pelo sensor [HEISLER, 2002].

A informação da quantidade de ar admitida é ponto chave para que o sistema de controle então determine a quantidade de gramas de combustível que deverá ser fornecido ao motor. Essa informação é repassada ao motor por intermédio da operação das válvulas injetoras de combustível através do acionamento de pulsos representados pelo tempo de injeção determinado pelo sistema.

I.2.2 - Estratégias e parâmetros de operação de um sistema de gerenciamento de um motor de combustão interna

i Tempo de Injeção

O tempo de injeção é o parâmetro principal do sistema de injeção, sendo o principal parâmetro calculado pelo sistema de gerenciamento.

Na prática, o tempo de injeção corresponde ao tempo em que a válvula injetora – que é responsável por injetar combustível no coletor de admissão do motor - permanece acionada, ou seja aberta. O tempo de injeção base de um motor pode ser alterado em função de alguns fatores [FIAT, 1996]:

- Pressão absoluta do coletor de admissão e/ou quantidade de ar admitido;
- Temperatura do ar aspirado;
- Tensão da bateria;
- Fator de adaptação;
- Empobrecimento da mistura ar combustível em desaceleração;
- Correção imposta pelo sistema malha fechada, monitorado pelo sensor de oxigênio;
- Enriquecimento da mistura em aceleração;
- Situações transitórias, como alterações na composição do combustível, por exemplo.

ii Capacidade de Auto-adaptação

A central de controle do motor está provida com uma função de auto-adaptação da mistura. Essa tem a tarefa de memorizar os desvios entre mapeamento de base e correções impostas pelo sensor de oxigênio que podem aparecer de maneira persistente durante o funcionamento. Estes desvios (devido ao envelhecimento dos componentes do sistema e do motor) são memorizados, permitindo uma adaptação do funcionamento do sistema às progressivas alterações do motor e dos componentes em relação às características do motor quando era novo [VOLKSWAGEM, 2000].

A auto-adaptação permite também ao motor funcionar com combustíveis com pequenas variações na composição, como a alteração na percentagem de álcool na gasolina, por exemplo. O monitoramento da queima, efetuado pelo sensor de oxigênio, percebe as mudanças na combustão, promovendo as alterações necessárias para o correto funcionamento do motor.

Modernamente, motores flexíveis, capazes de operar com quaisquer proporções de álcool e gasolina, ampliaram bastante essa capacidade [MONTANARI, Gino; DAMASCENO, Fernando, 2004].

iii Funcionamento a frio

Durante baixas temperaturas, o combustível evapora com dificuldade e ocorre condensação do mesmo nas paredes do coletor de admissão. Esse fenômeno faz com que apenas uma parte do combustível injetado, efetivamente faça parte do processo de queima. É notado também um ligeiro aumento na viscosidade do lubrificante, o que dificulta a rotação dos componentes móveis do motor [FIAT, 1996].

A central de controle reconhece esta condição e corrige o tempo de injeção com base na informação recebido do sensor de temperatura do líquido de arrefecimento. Conseqüentemente:

- Com o motor em temperaturas baixas, o eletroinjeter fica aberto por mais tempo (a dosagem de combustível aumenta) e a mistura é enriquecida;
- À medida que o motor for aquecendo, a mistura será corrigida, sendo empobrecida até a dosagem ideal da temperatura normal de operação.

Segundo [BOSCH, 1999], o tempo base de injeção é multiplicado por um fator que depende da temperatura durante a fase de aquecimento do propulsor. Esse fator tende a se igualar a unidade, tão logo o motor atinja a temperatura normal de operação, conforme se visualiza na Fig. I.2.

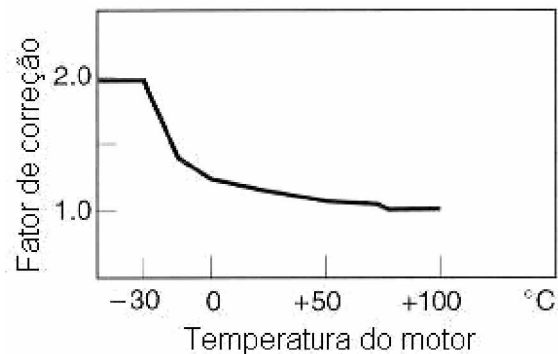


Fig. I.2 – Fator de multiplicação do tempo de injeção em função da temperatura do motor – adaptada de [BOSCH, 1999]

Motores que operam à álcool ou flexíveis que estejam queimando esse combustível vegetal, possibilitam uma injeção suplementar de gasolina para partida a frio, quando em temperaturas baixas, conforme se verifica no exemplo da Fig. I.3. O maior poder calorífico da gasolina juntamente com sua maior facilidade de evaporação, facilita a partida e as primeiras revoluções do motor [GM b, 1995].

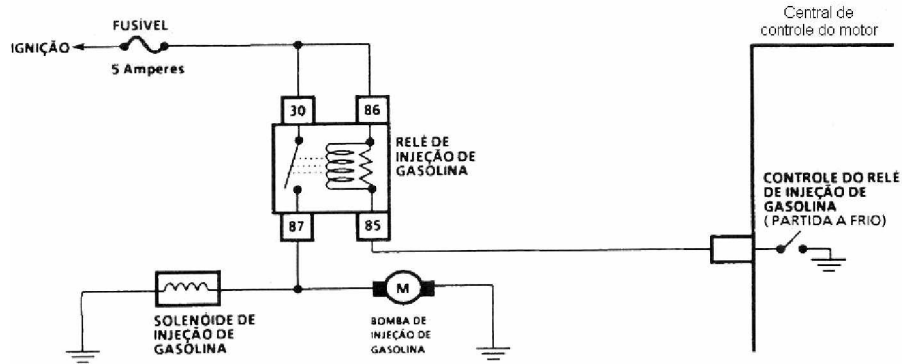


Fig. I.3 – Exemplo de sistema de controle de injeção de gasolina para partida a frio de motores à álcool utilizado pela General Motors – adaptado de [b, 1995]

Uma outra função, denominada antifogamento, reduz o enriquecimento para tempos de partida longa em situações de motor afogado – excesso de combustível admitido. Essa condição é automaticamente ativada, caso se efetue a partida com acelerador totalmente pressionado para que ocorra uma redução no tempo de injeção, com o fornecimento ao motor de uma mistura ar combustível de cerca de 20:1, o que provoca rapidamente o “desafogamento” do motor [GM b, 1995, p.16] .

iv Funcionamento em aceleração

Nesta fase, a quantidade de combustível fornecida ao motor é aumentada adequadamente, de forma a se obter o torque solicitado pelo condutor. A ativação dessa estratégia é executada através das informações provenientes dos seguintes sensores [FIAT, 1996]:

- Potenciômetro da borboleta aceleradora;
- Sensor de pressão absoluta ou medidor de vazão mássica de ar;
- Sensor de rotações e PMS.

Segundo [HEISLER, 2002], o sistema de gerenciamento eletrônico do motor consegue captar a velocidade com que o acelerador foi pressionado, determinando assim enriquecimentos proporcionais à mistura, evitando qualquer excitação na resposta do motor, independente da solicitação de potência exigida do motor.

[TOYOTA, 1997] complementa, informando que em situações de aceleração rápida a partir da marcha lenta, pulsos adicionais de combustíveis garantem uma rápida resposta do motor, conforme se vê na Fig. I.4.

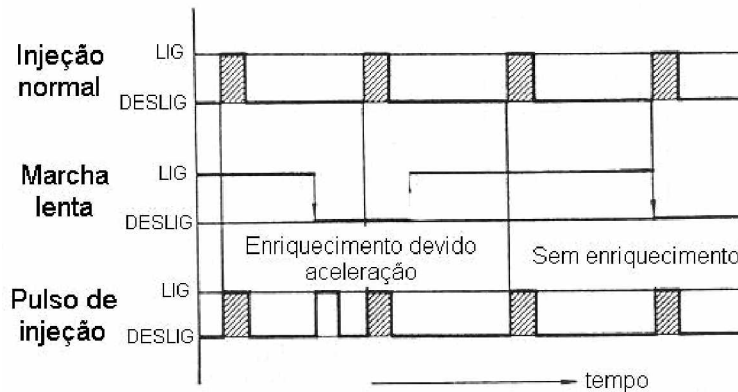


Fig. I.4 – Enriquecimento devido a aceleração – adaptada de [TOYOTA, 1997]

v Funcionamento em desaceleração

Esta fase é reconhecida pelo gerenciamento Eletrônico quando o sinal do potenciômetro da borboleta aceleradora, de um valor de tensão elevado, passa para um valor mais baixo. Durante esta fase de utilização do motor, acontece a sobreposição de duas estratégias [FIAT, 1996]:

- Regime transitório negativo para manter estequiométrica a quantidade de combustível fornecida ao motor, garantindo uma menor emissão de gases poluentes com funcionamento adequado do conversor catalítico;
- *Dash pot* – (fechamento gradual da borboleta) - com intervenção no atuador de marcha lenta para queda controlada na aceleração, evitando emissão elevada de poluentes e trancos indesejáveis no veículo.

Quando o sinal do sensor do ângulo de abertura da borboleta de aceleração indica uma diminuição do ângulo de abertura e a rotação for elevada, o sistema de gerenciamento, agindo sobre o atuador de marcha lenta do motor, diminui de maneira gradual a quantidade de ar que passa através de um desvio da borboleta (*by-pass*). Agindo assim, a desaceleração devido ao freio motor é gradual, evitando trancos.

vi Corte da injeção (*cut-off*) em Freio motor

A estratégia de corte do combustível em situações de freio motor é efetuada quando se é reconhecido alguns valores de rotação, velocidade, posição da borboleta de aceleração e temperatura do motor, a saber [FIAT, 1996]:

- Rotação – a rotação do motor elevada (acima de 1.600 rpm em média);
- Velocidade do veículo – o veículo deve estar em movimento;
- Borboleta do acelerador – o sensor de posição da borboleta deve indicar borboleta fechada;
- Temperatura do motor – Segundo [TOYOTA, 1997], alguns sistemas de controle do motor modificam o ponto de corte e retomada da injeção de combustível em função da temperatura do motor, conforme se vê no gráfico da Fig. I.5. Outros não promovem o corte enquanto o motor estiver em fase de aquecimento, de forma a garantir um maior controle do motor durante a fase crítica de aquecimento.

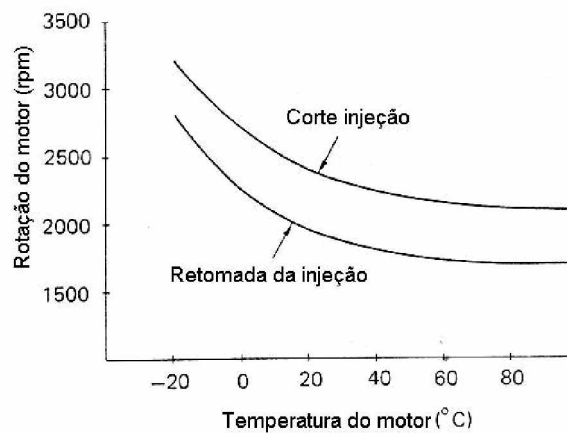


Fig. I.5 – Exemplo de corte de injeção versus temperatura do motor do Toyota Corolla – Adaptada de [TOYOTA, 1997]

O corte de combustível em freio motor, através do estabelecimento do tempo de injeção igual a zero milissegundos, não é total, em especial nos motores mais novos. As rígidas normas de controle de emissões determinam que os injetores continuem a injetar com um tempo de injeção extremamente baixo, mas acima de zero [DENTON, 2000].

A pequena quantidade de combustível que penetra as câmaras de combustão, ajuda a consumir parte do oxigênio aspirado pelo motor, que em elevadas temperaturas se associaria ao Nitrogênio, formando uma quantidade indesejável de óxidos de Nitrogênio, prejudiciais ao meio ambiente.

Ao serem atingidos os valores mínimos de rotação e velocidade, o sistema de controle do motor reassume os valores adequados de tempo de injeção, impedindo que o motor apague por falta de combustível, ou falhe caso o condutor imprima uma retomada de velocidade.

Caso a queda de rotação seja muito rápida – se o condutor pressionar a embreagem, por exemplo – a estratégia é imediatamente suprimida, evitando que o motor apague [BOSCH, 1999].

vii Funcionamento em plena carga

Durante o funcionamento em plena carga, a mistura é enriquecida para permitir que o motor forneça a potência máxima (que é alcançada fora da relação estequiométrica) e para impedir o aquecimento excessivo do conversor catalítico [HEISLER, 2002].

Segundo [FIAT, 1996], a condição de plena carga é detectada através dos valores fornecidos pelos sensores de posição da borboleta e de pressão absoluta do coletor ou vazão mássica de ar.

viii Controle da marcha lenta

O controle da marcha lenta é efetuado pelo sistema de gerenciamento através do respectivo atuador de marcha lenta que atua sobre uma derivação (*by-pass*) da borboleta, controlando a quantidade de ar passante pela derivação.

O controle da marcha lenta é efetuado para compensar a potência absorvida pelos diversos acessórios, garantindo um regime de rotação o mais constante possível [VOLKSWAGEM, 2000].

O sistema se baseia em algumas informações para estabelecer a rotação ideal de marcha lenta [BOSCH, 1999]:

- Temperatura do motor – motor frio exige rotação um pouco mais elevada bem como mistura rica para que possa funcionar correta e suavemente;
- Velocidade do veículo – a rotação de marcha lenta com o veículo em movimento pode ser ligeiramente maior, numa estratégia de preparação para retomadas de velocidade;
- Funcionamento do câmbio automático – uma vez selecionada uma marcha, o conversor de torque da transmissão automática demanda determinada carga no motor, que deve ser corrigida pelo sistema;
- Cargas de acessórios – direção hidráulica, compressor do ar condicionado e alternador representam cargas ao motor que podem influenciar a marcha lenta. O sistema,

detectando o uso ou influência desses dispositivos, corrige a rotação para compensar essas cargas extras;

- Tensão da bateria – em caso de tensão muito baixa, a marcha lenta pode ser aumentada ligeiramente para permitir uma melhor eficiência do alternador.

ix Proteção contra rotações excessivas

Ao ser projetado um motor, leva-se em consideração o balanceamento de suas peças, a sua adequada lubrificação e a frequência natural das molas de acionamento de suas válvulas para determinar o regime máximo de rotações. Exceder esse limite em nada trará de benefícios ao desempenho, aumentando grandemente o risco de quebra do motor [TAYLOR b, 1988].

Aproveitando o recurso de controle do motor, está inserida no software de controle de alguns modelos, uma estratégia de corte de combustível como proteção contra rotações prejudiciais ao motor [BOSCH, 1999].

Tão logo seja atingida a rotação programada, o tempo de injeção é drasticamente reduzido, provocando uma flutuação característica na rotação, o que impede o motor superar o regime de giros máximo. Quando as rotações voltarem a um valor "não crítico", é restabelecido o controle normal dos tempos de injeção, em função da solicitação do motor. Essa estratégia pode ser melhor visualizada na Fig. I.6.

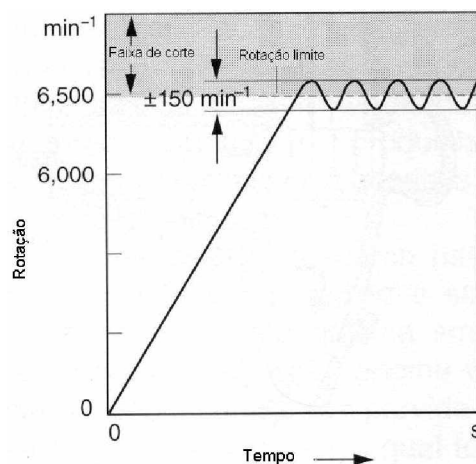


Fig. I.6 – Corte da injeção em rotações excessivas – Adaptada de [BOSCH, 1999]

Essa estratégia não impede, no entanto, que rotações excessivas sejam atingidas durante reduções de marchas inadequadas, onde a própria inércia do veículo tende a girar o motor através do sistema de transmissão.

x Correção barométrica

A pressão atmosférica varia em função da altitude, determinando uma variação tal da eficiência volumétrica, que é necessário corrigir a mistura (tempo base de injeção).

A correção do tempo de injeção estará em função da variação de altitude e será atualizada automaticamente pelo sistema, cada vez que o motor for ligado e em determinadas condições de posição da borboleta e de número de rotações (tipicamente borboleta aberta a baixas rotações, onde o motor exerce pouca influência na pressão do coletor) [FIAT, 1996].

Motores que possuem sensores de vazão mássica de ar, semelhantes aos utilizado pelo motor dos experimentos desse trabalho, não necessitam de tal correção, uma vez que o dispositivo efetivamente mede a massa de ar admitida pelo motor [HEISLER, 2002].

xi Controle dos gases da combustão – sensor de oxigênio

O sistema de controle Eletrônico do motor deve garantir uma dosagem da mistura de ar combustível próxima à relação estequiométrica e a manter assim pelo maior tempo possível, para que o conversor catalítico funcione de maneira correta e duradoura [HEISLER, 2002].

Para verificar as condições de queima do motor, um sensor avalia a quantidade de oxigênio existente nos gases de escape. De posse dessa informação é possível determinar se a mistura queimada está rica ou pobre, podendo então ser feitas pequenas correções para que o motor trabalhe a maior parte do tempo com mistura estequiométrica [FIAT, 1996].

O sensor de oxigênio utilizado pelo sistema de gerenciamento do motor permite que o mesmo opere em malha fechada de correção da mistura ar combustível durante a maior parte das situações de operação do motor, conforme se pode visualizar na Fig. I.7.

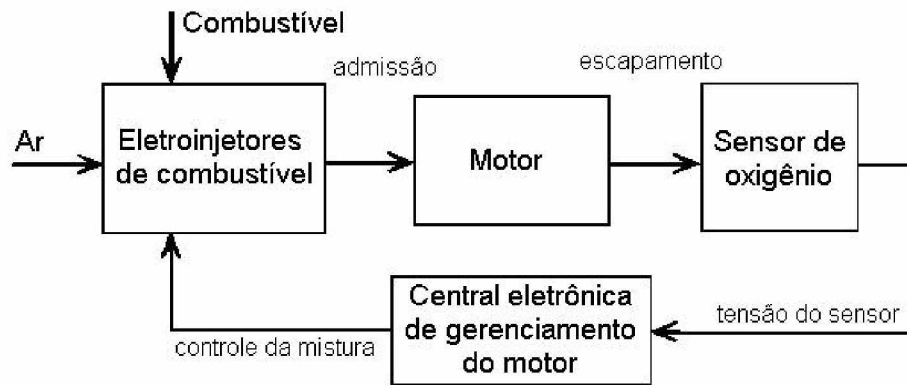


Fig. I.7 – Circuito de controle de combustível em malha fechada com o uso de sensor de oxigênio – adaptada de [RIBBENS, 2003]

Xii Interface com o sistema de climatização

Existe uma comunicação com o sistema de climatização (ar condicionado) a fim de estabilizar a marcha lenta para controlar as absorções de potência causadas pela ativação do compressor do sistema – Fig. I.8.

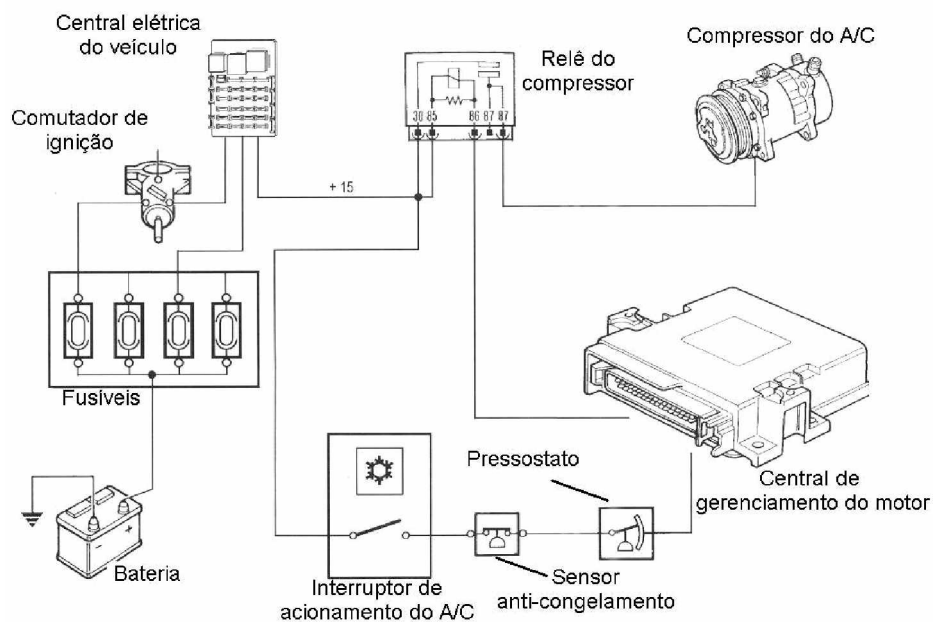


Fig.I.8 – Exemplo de interface entre o sistema de Climatização e o gerenciamento do motor do FIAT Palio – adaptada de [FIAT, 1996]

Com informações tais como: carga do motor, temperatura do líquido de arrefecimento, ângulo da borboleta e pressão do refrigerante do sistema, o sistema é capaz, se necessário, de

desligar o compressor para garantir uma potência extra em uma ultrapassagem, ou para conter um superaquecimento do motor [FIAT, 1996].

xiii Interface com o sistema Anti-furto

O gerenciamento eletrônico do motor admite a inclusão de dispositivos de bloqueio de funcionamento. O tipo mais comum é realizado graças à presença de um módulo imobilizador junto ao cilindro de ignição. Este é capaz de se comunicar com a central e com uma chave eletrônica, provida de um transmissor próprio para enviar um código de reconhecimento [FIAT, 1996].

Toda vez que a chave de ignição for inserida no contato é verificado pelo módulo imobilizador se a mesma é válida. Caso positivo é enviado à central de controle do motor um sinal de reconhecimento criptografado, autorizando a ativação do sistema de injeção. Dessa forma, o sistema impede que pessoas não autorizadas efetuem a partida do motor, inibindo o furto – Fig. I.9.

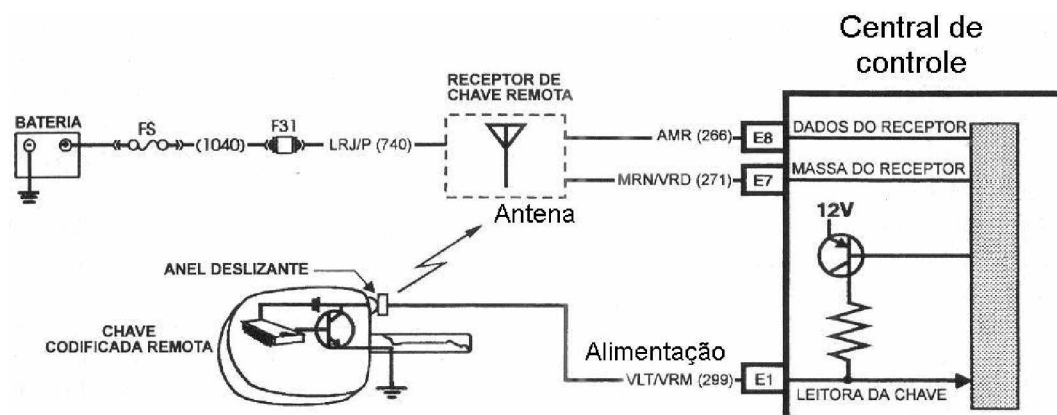


Fig. I.9 – Sistema Imobilizador e sua interface entre a chave de partida e a central de Controle – adaptada de [GM, 1999]

Veículos mais sofisticados possuem chave com emissor de raios infravermelhos que, se não possuírem uma frequência reconhecida por uma central de controle, permite o bloqueio do comutador de ignição, impedindo que a chave seja girada [MERCEDES-BENZ, 2004].

xiv Interação com o sistema de Transmissão automática

Os veículos equipados com transmissão automática possuem uma interface de dados entre a central de controle do motor e a central eletrônica de controle da transmissão. Alguns modelos possuem uma única central de gerenciamento que controla os dois sistemas. Nesse último caso a

central de controle é denominada PCM – *Powertrain Control Module*, ou Módulo de Controle do trem de força.

De uma forma ou de outra, existe uma interface visando uma perfeita sintonia entre as trocas e seleções de marchas e o funcionamento do motor – Fig. I.10.

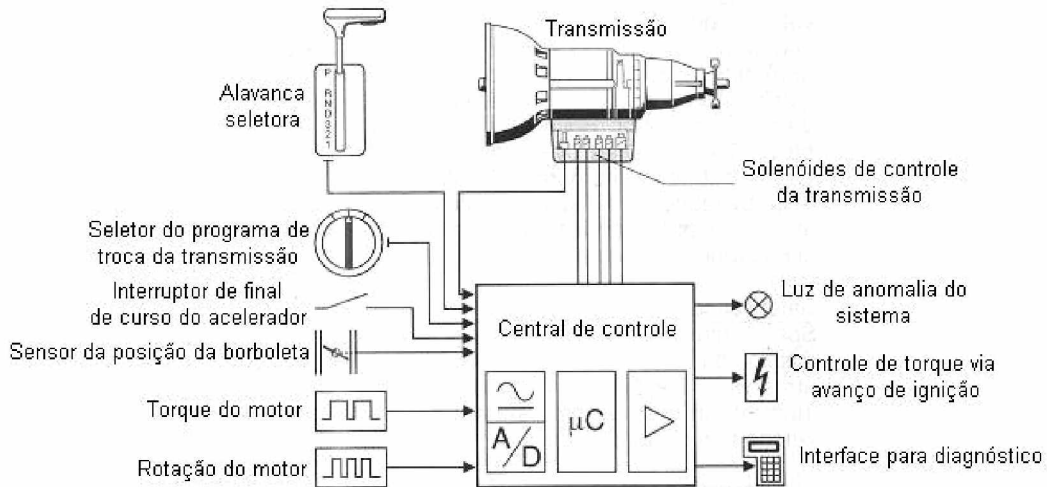


Fig.I.10 – Interface entre transmissão e sistema de gerenciamento do motor – adaptada de [BOSCH, 1996]

O módulo de controle do motor envia ao controle da transmissão sinais relativos à velocidade do veículo, rotação do motor e posição da borboleta do acelerador [GM, 1997].

Por sua vez, a central da transmissão encaminha solicitações de controle de torque durante a mudança de marchas. O controle de torque visa uma redução na potência para a realização de trocas suaves e que garantem maior durabilidade do câmbio e conforto aos passageiros. A redução de potência se dá através de alteração no avanço da ignição tão logo ocorre a solicitação oriunda da transmissão [GM, 1997].

xv Controle de sobre-alimentação

Em motores sobrecarregados, é realizado um controle da pressão de sobre-alimentação, evitando que pressões excessivas possam vir danificar o motor.

Com informações de carga do motor, rotação e temperatura, o sistema de gerenciamento determina a atuação de uma válvula elétrica que, por sua vez, pilota uma válvula de controle de

sobre-pressão (*waste gate*), determinando uma queda de rotação do turbo compressor, com conseqüente controle na sobre-pressão. [VOLKSWAGEM b, 2000].

xvi Autodiagnose

Durante todo o funcionamento do motor, o sistema de gerenciamento avalia valores inconsistentes aferidos pelos seus sensores ou busca por falhas nos atuadores e sensores. É possível ativar, através de um equipamento denominado Scanner, cada um dos atuadores, verificando a sua eficiência, assim como efetuar leitura das parâmetros de funcionamento e cancelamento de códigos de falha [TOYOTA, 1997].

O funcionamento anormal de sensores e atuadores é avisado ao condutor através da lâmpada piloto de avaria do sistema no quadro de instrumentos – Fig. I.11. Ao mesmo tempo um código de falha com respectivo histórico é gravado na memória do sistema para facilitar a manutenção.



Fig. I.11 – Exemplo de luz piloto de avaria no sistema de gerenciamento – adaptada de [GM a, 1995]

Na ocorrência de falha em algum sensor, a central de controle ativa estratégias de reconstrução dos sinais para garantir o funcionamento do motor a um nível aceitável, sem prejudicar demasiadamente o funcionamento. Assim, é possível levar o veículo até a um ponto de assistência para as reparações necessárias [FIAT, 1996].

I.2.3 - Composição do sistema de gerenciamento eletrônico de alimentação

O sistema de Gerenciamento eletrônico do motor é constituído dos seguintes subsistemas [BOSCH, 1999]:

- Sistema de alimentação de combustível;
- Sistema de admissão do ar;
- Sensores;
- Atuadores;
- Sistema de ignição;
- Sistema de controle de emissões.

i - Sistema de Alimentação de combustível

É responsável por conduzir, com pressão adequada e controlada, o combustível do motor até os eletroinjetores. O combustível excedente deve ser retornado ao tanque de combustível.

Segundo [FIAT, 1996], os componentes básicos desse subsistema são:

- Bomba de combustível – situada dentro do tanque de combustível, é acionada eletricamente através de um relê acionado pela central de controle. A bomba de combustível é refrigerada e lubrificada pelo próprio combustível e conta com um pré-filtro instalado no pescador de combustível.

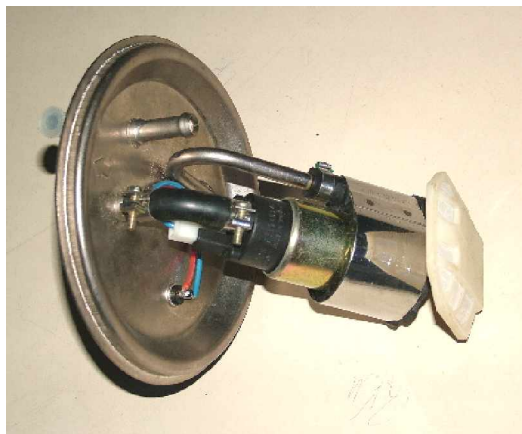


Fig. I.12 – Bomba de combustível

- Filtro – retém as impurezas, impedindo que danifiquem os eletroinjetores e o próprio motor;
- Tubo distribuidor – encarregado de distribuir o combustível aos eletroinjetores;

- Eletroinjetores – também denominados válvulas injetoras ou simplesmente bicos injetores, são acionados pela central de controle e permitem que uma quantidade determinada de combustível seja admitida por cada cilindro - Fig. I.13.



Fig. I.13 – Aspecto do combustível saindo do Bico injetor

- Válvula reguladora de pressão – atua de forma a garantir que a diferença de pressão entre o coletor de admissão (onde estão encaixados os eletroinjetores) e a linha de combustível seja constante. Dessa forma a central de controle tem a garantia de cada milissegundo de eletroinjetor acionado corresponde a uma quantidade conhecida de gramas de combustível injetadas.

Na Fig. I.14 pode-se visualizar um desenho esquemático do subsistema de alimentação de combustível, com seus componentes.

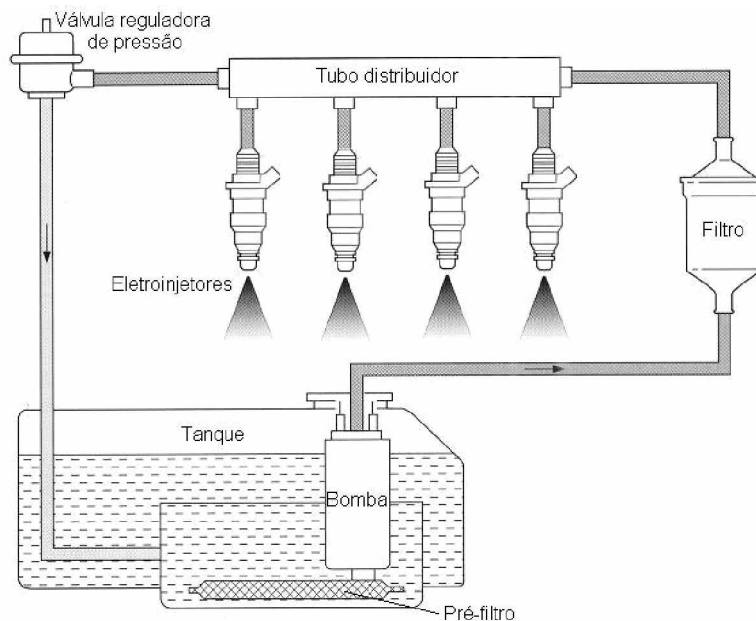


Fig. I.14 – Sistema de alimentação de combustível – adaptada de [BOSCH, 1999]

ii Sistema de admissão de ar

Contempla todos os componentes responsáveis pelo fornecimento de ar ao motor. Possui os seguintes componentes básicos [STONE, 1999]:

- Filtro de ar – promove a contenção de impurezas e partículas atmosféricas prejudiciais ao motor;
- Tubulações;
- Válvula borboleta de aceleração – obstruir a entrada de ar, controlando a quantidade de ar que o motor pode admitir. É comandada pelo pedal do acelerador;



Fig. I.15 – Borboleta de aceleração

- Coletor de admissão – conduz o ar admitido aos cilindros do motor. Abriga nas extremidades os eletroinjetores de modo a permitir que, antes de entrar nos cilindros, se inicie a formação da mistura ar combustível.

Alguns sistemas de admissão possuem dispositivos de pré-aquecimento do ar. A sua função é facilitar a vaporização do combustível em temperaturas mais baixas e durante a partida a frio [BOSCH, 1999].

Conforme veremos posteriormente, alguns sensores e atuadores do sistema de gerenciamento do motor estão instalados no subsistema de admissão de ar. Esses dispositivos serão bordados posteriormente.

iii Sensores do sistema de gerenciamento

Para a determinação da relação ar combustível mais adequada a cada regime de operação do motor, o sistema de gerenciamento eletrônico do motor necessita monitorar diversos parâmetros de seu funcionamento. De posse dessas informações são efetuados cálculos para determinação do tempo de injeção e avanço de ignição ideal [BOSCH, 1999].

Descreveremos os principais sensores e suas funções:

iii.a Sensor de vazão mássica do ar admitido

Tem como função informar a quantidade de ar admitida pelo motor. Segundo [MILHOR, 2002], a medida direta da massa de ar admitida é realizada por intermédio de um elemento quente – Fig. I.16. À medida que o ar passa pelo elemento aquecido, que deve permanecer a uma temperatura constante entre 100 e 200° C acima da temperatura do ar, ocorre uma troca de calor entre o elemento e o ar. Para que a temperatura do elemento quente fique constante é necessária uma variação da corrente elétrica que circula por ele. Essa variação é a base da medida do sensor.

O elemento aquecido é componente de uma ponte de *Wheastone*, que desequilibrada promove uma variação de tensão, que é a saída de sinal do sensor, conforme se pode ver no circuito da Fig. I.17.

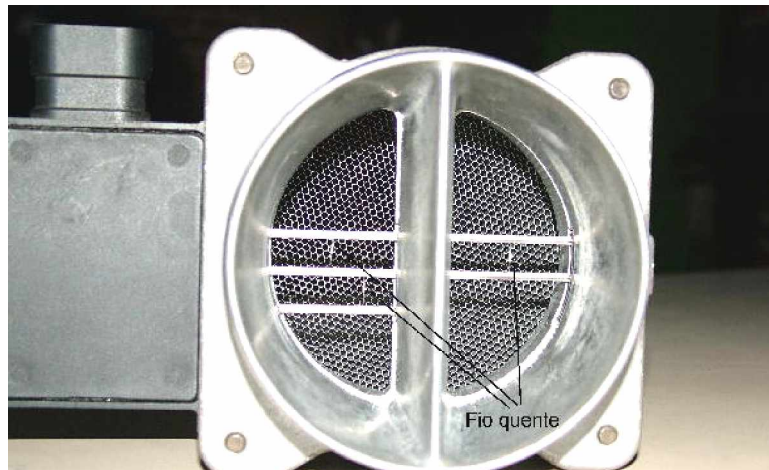


Fig. I.16 - Sensor de vazão mássica e respectivos fios aquecidos

Ainda segundo [MILHOR, 2002], o sensor de vazão mássica, que é o tipo utilizado no motor do experimento realizado, apresenta vantagens sobre os sensores volumétricos e de rotação-velocidade. Além de não possuírem elementos mecânicos que possam gerar perda de carga, o cálculo da massa de ar admitido é direto, não necessitando correções ou processamentos devido às alterações de altitude e pressão atmosférica.

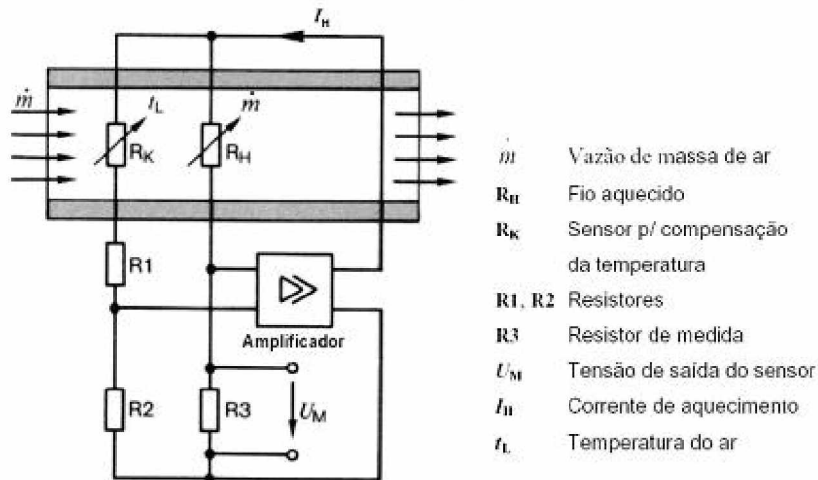


Fig. I.17 – Circuito esquemático do sensor de massa de ar [MILHOR, 2002]

O sensor de vazão mássica de ar é vital para que o sistema de controle determine a quantidade de combustível que deve ser misturada à quantidade de ar que o motor está consumindo a cada instante, em função das diversas condições de operação do motor e razão ar combustível especificada.

iii.b Sensor de rotação e referência

Segundo [MILHOR, 2002], esse sensor tem como função informar a posição da árvore de manivelas (virabrequim) e a rotação do motor. Essas informações também são vitais para determinação do momento de abertura dos bicos e de centelha no sistema de ignição.

O tipo de sensor de rotação mais comum é o indutivo ou relutância magnética. Trata-se de um encapsulamento contendo um ímã permanente e um enrolamento elétrico (indutor). Situado próximo de uma roda dentada (denominada roda fônica), ele tem funcionamento baseado na força eletromotriz gerada devido à variação de fluxo magnético no indutor. A tensão gerada é proporcional à rotação do roda fônica.

Para que seja identificada a posição do virabrequim, existe uma falha correspondente a falta de dois dentes. Com um número total conhecido, 60 dentes na maioria dos casos, a central interpreta a modificação no sinal do sensor como referência para a chegada do pistão do primeiro cilindro ao PMS [VOLKSWAGEM b, 2000]

Na Fig. I.18 pode-se visualizar as partes internas do sensor e o gráfico de tensão gerada.

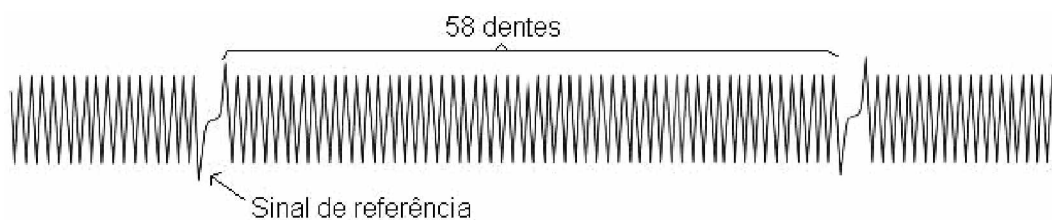
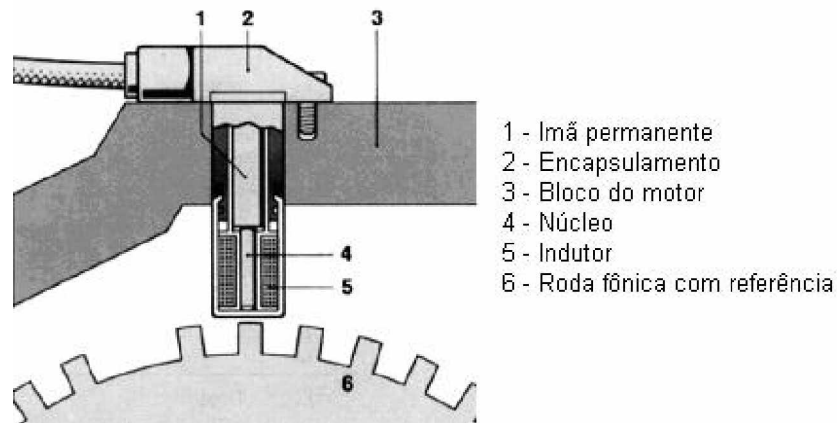


Fig. I.18 – Sensor de rotação e sinal característico – adaptada de [ROBERT BOSCH GMBH, 1999]

iii.c Sensor de fase da ignição

Localizado no comando de válvulas, esse sensor é responsável pela fasagem da injeção, ou seja, por identificar qual tempo que o primeiro cilindro está realizando.

Ao chegar ao ponto morto superior, a central de controle precisa identificar se o cilindro está em fase final de compressão (necessitando ignição) ou em fase final de escape, na qual é necessário injetar o combustível. O sensor de rotação e referência, explicado anteriormente, não fornece subsídios a essa resposta. Para essa identificação um sensor é acoplado ao comando de válvulas - que gira à metade da rotação do virabrequim - e permite identificar a fase do motor [VOLKSWAGEM b, 2000].

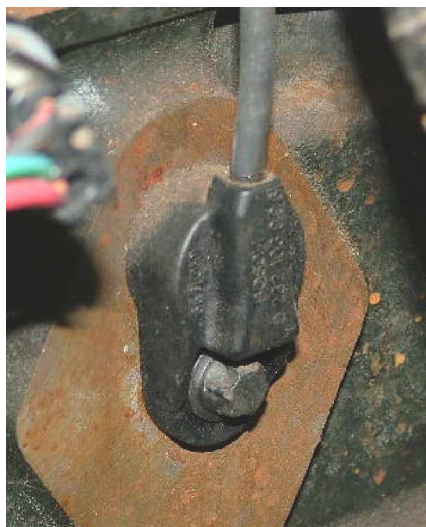


Fig. I.19 – Sensor de fase do motor

O sensor de fase pode ser indutivo ou por efeito Hall. Os do primeiro tipo têm funcionamento semelhante ao sensor de rotação descrito anteriormente. Em um sensor de efeito Hall, existe uma placa condutora chamada Célula Hall.

Segundo [DENTON, 2000], o efeito hall foi detectado pela primeira vez pelo Doutor E.H. Hall em 1879. Se um determinado tipo de cristal percorrido por uma corrente elétrica é submetido a um campo magnético perpendicular, ocorrerá a formação de uma diferença de potencial entre os dois lados do condutor. Essa ddp é proporcional ao campo magnético e à corrente elétrica que percorre o material. A Fig. I.20 ilustra efeito Hall.

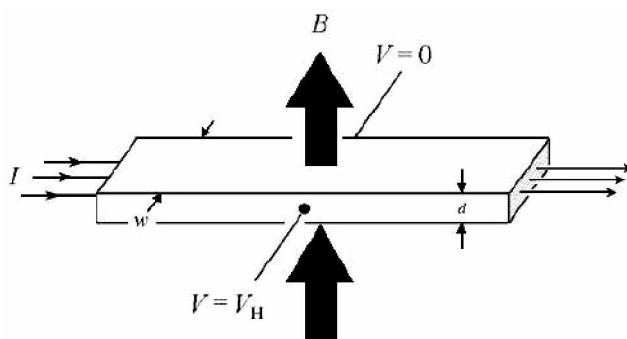


Fig. I.20 – Efeito Hall [MILHOR, 2002]

No caso do sensor propriamente dito, o campo magnético é gerado por um ímã permanente e a corrente é fornecida ao sensor. Um sistema acoplado ao eixo de comando de válvula faz com que o ímã seja descoberto ou coberto, provocando variações na tensão elétrica gerada – Fig. I.21.

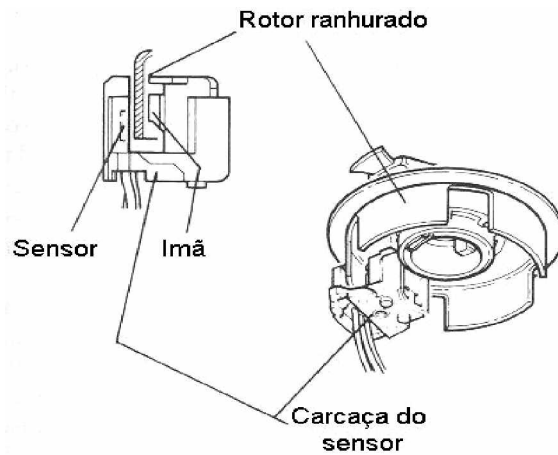


Fig. I.21 – Funcionamento do sensor de fase – adaptada de [DENTON, 2000]

iii.d Sensor de temperatura do motor

É responsável pela informação da temperatura do motor, que pode ser aferida através da temperatura do fluido de arrefecimento em motores refrigerados a água e através do óleo, em motores com arrefecimento a ar.

O sensor de temperatura do motor está instalado junto à válvula termostática. É composto por um corpo de latão com um elemento resistivo constituído por um termistor do tipo NTC (Coeficiente de temperatura negativo). A resistência do mesmo diminui com o aumento da temperatura [FIAT, 1996].



Fig. I.22 - Sensor de temperatura da água do motor

Para fins de medição, a tensão de referência é de 5,0 Volts. Um circuito interno na central de controle do motor fornece essa alimentação através de um divisor de tensão. À medida que o

motor se aquece, a queda na resistência do sensor faz com o valor de tensão cai. Essa tensão é monitorada pela central de controle, que pode através de algoritmos internos determinar que temperatura corresponde a cada tensão medida [GM b, 1995].

iii.e Sensor de temperatura do ar de admissão

De características semelhantes ao sensor de temperatura do motor, é um termistor do tipo NTC, que avalia a temperatura do ar admitido. Serve para corrigir o avanço de ignição e para permitir o cálculo da massa de ar admitido no tempo, para os sistemas que não possuem sensor de vazão mássica [FIAT, 1996].

iii.f Sensor da posição da borboleta de aceleração

Segundo [MILHOR, 2002], a função desse sensor é informar a posição angular da borboleta de aceleração, permitindo que o sistema de gerenciamento efetue uma das estratégias descritas na Tabela. I.1 .

Estado da borboleta de aceleração	Estratégia
Borboleta Fechada	Marcha lenta
	<i>Cut-off</i> * - corte da injeção
	<i>Dash-pot</i> ** - desaceleração gradual
Velocidade de abertura da borboleta	Aceleração rápida
Totalmente aberta	Plena carga
Parcialmente aberta	Carga parcial
Ângulo da borboleta	Definição do avanço de ignição***

* Estratégia que corta a injeção de combustível durante as desacelerações – borboleta fechada e rotações altas;

** Impede a súbita queda de pressão no coletor durante desacelerações;

*** Utilizado como valor de carga do motor para os sistemas que não possuem sensor de pressão no coletor.

Tabela I.1 - Estratégia em função da posição da Borboleta de aceleração [MILHOR, 2002]

O sensor da posição da borboleta é um potenciômetro mecanicamente acoplado à borboleta de aceleração – Fig. I.23. Um circuito divisor de tensão é responsável por fornecer uma relação linear entre o ângulo de abertura da borboleta e a tensão de saída do sensor.



Fig. I.23 - Potenciômetro sensor da posição da borboleta de aceleração

iii.g Sensor de detonação

Consiste de um transdutor piezelétrico acoplado ao bloco do motor. No caso da ocorrência de vibrações provenientes de detonação, o sensor enviará um sinal elétrico à central de controle. Um algoritmo dedicado trata esse sinal, diferenciando situações de detonação de queima normal e identificando em qual cilindro ocorreu o fenômeno [GM a, 1995].

Uma vez detectada a detonação, a central de gerenciamento eletrônico do motor promove alterações no avanço de ignição, de modo a evitar que o fenômeno ocorra [RIBBENS, 2003].

As características do cristal piezelétrico utilizado no sensor permitem que ao sofrerem deformações decorrentes das vibrações da detonação, um sinal de tensão seja gerado, conforme se vê na Fig. I.24, onde estão representadas duas situações: queima normal e queima com ocorrência de detonação, juntamente com o gráfico da elevação da pressão no cilindro.

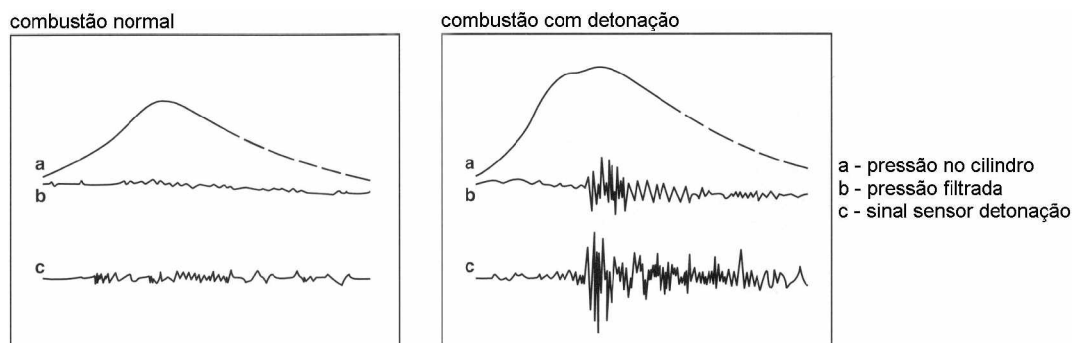


Fig. I.24 – Sinais do sensor de detonação x pressão no cilindro – adaptada de [BOSCH, 1999]

Para o controle efetivo da detonação, existe uma rotina no software de gerenciamento do motor que observa o momento em que as detonação ocorreram. A detonação ocorre após o PMS e dura de 3 a 5 ms. Essas informações servem para filtrar ruídos indesejados e identificar qual cilindro ocorreu detonação. Dessa forma a correção no ponto de ignição pode ser efetuada de forma individualizada [GM a, 1995].

iii.h Sensor de oxigênio

Acoplado ao sistema de escapamento, detecta a presença de oxigênio nos gases de escapamento em relação ao ar atmosférico – Fig. I.25. Com essa informação é feito um controle em malha fechada da mistura ar combustível, de modo a garantir a maior eficiência do conversor catalítico e, por conseguinte, um maior controle das emissões de poluentes [GM a, 1995].



Fig. I.25 – Sensor de oxigênio

Segundo [MILHOR, 2002], o sensor de oxigênio opera baseado no princípio de uma célula galvânica para concentração de oxigênio com eletrólito de estado sólido.

O sensor é constituído de um corpo cerâmico de dióxido de zircônio e estabilizado com óxido de ítrio, encapsulado em metal. As faces em ambos os lados é composta por uma fina camada de platina permeável a gás.

Ainda segundo [MILHOR, 2002], o material cerâmico se torna condutor a uma temperatura de cerca de 350° C. Se houver diferença de concentração de oxigênio entre as extremidades do sensor, será gerada uma diferença de potencial proporcional a essa diferença. Como uma das extremidades está no interior do escapamento e a outra em contato com o ar atmosférico e, considerando que a quantidade de oxigênio nos gases de escapamento é

fortemente influenciada pela razão ar combustível recebida pelo motor, o sinal gerado age como informação de feedback da mistura admitida, permitindo um controle em malha fechada, conforme ilustra a Fig. I.7.

A tensão gerada pelo sensor é proporcional à diferença de concentração de oxigênio. Dessa forma a tensão varia de cerca de 100 milivolts para uma mistura pobre, ou seja muito oxigênio nos gases de escapamento, até cerca de 900 milivolts, em uma mistura rica, com baixa concentração na exaustão do motor [HEISLER, 2002].

O sistema em malha fechada faz com que a tensão do sensor fique oscilando, de forma que, na média, é buscada a mistura ideal, garantindo alta eficiência do conversor catalítico. Na fig. I.26 pode-se ver um conjunto de gráficos que demonstra mais claramente a malha fechada, onde se pode verificar o sistema enriquecendo a mistura quando o sensor de oxigênio detecta mistura pobre e vice-versa [RIBBENS, 2003].

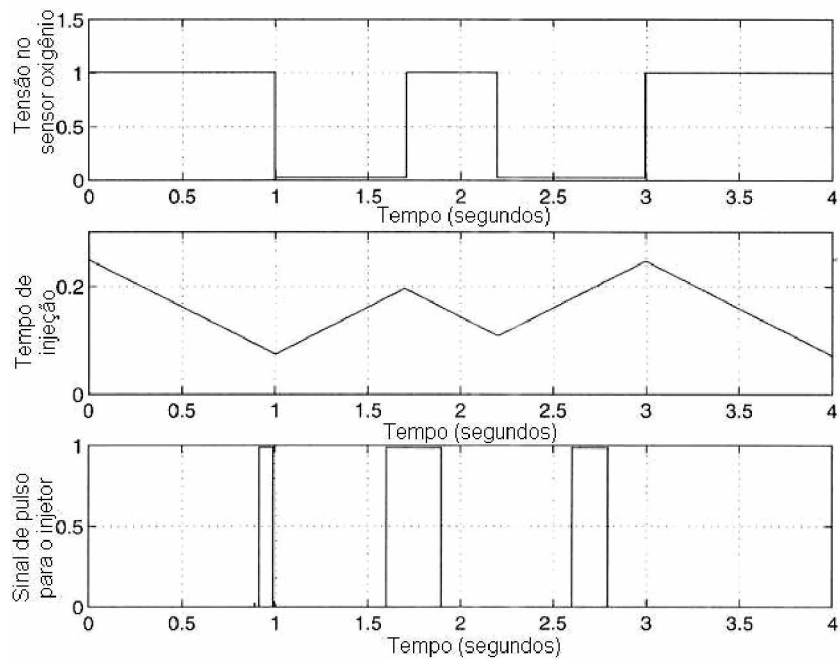


Fig. I.26 – Formas de onda simplificadas em um sistema de controle de combustível em malha fechada – adaptado de [RIBBENS, 2003]

iv Atuadores do sistema de Gerenciamento do Motor

São comandados pela central eletrônica que, com os cálculos realizados com as informações dos sensores, permitem que o motor opere com a maior eficiência possível [BOSCH, 1999].

iv.a Relê da bomba de combustível

Responsável por acionar a bomba elétrica de combustível. Uma vez que a bomba consome uma corrente elétrica relativamente alta, a mesma é acionada por intermédio de um relê. Dessa forma a central comuta correntes menores e com maior segurança, garantindo uma maior confiabilidade e menores dimensões e temperaturas de operação da central de controle [GM b, 1995].

Um relê é basicamente uma chave elétrica que é comutada por intermédio do eletromagnetismo de uma bobina. A bobina faz parte do sistema acionador, sendo completamente isolada eletricamente dos contatos que comutam a bomba elétrica.

iv.b Eletroinjetores

São responsáveis por injetar a quantidade de combustível que o motor necessita em cada instante. Os sistemas de gerenciamento de motor atuais possuem um injetor para cada cilindro, sendo denominados multiponto. Os injetores situam-se no final do coletor de admissão próximos às respectivas válvulas de admissão, dessa forma o coletor de admissão conduz praticamente somente ar, conforme se pode visualizar na Fig. I.27.

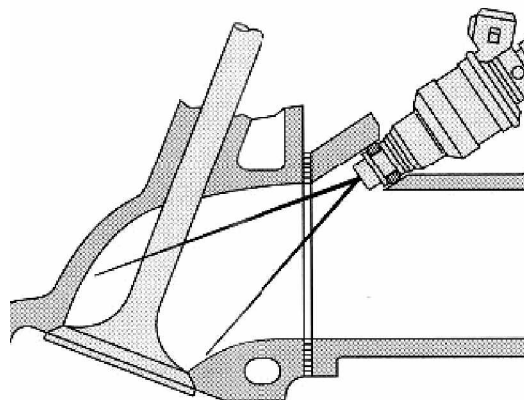


Fig. I.27 - Formação da mistura e posicionamento dos injetores em sistemas multiponto

[BOSCH, 1999]

Sistemas mais antigos possuíam apenas um injetor, acima do corpo da borboleta, em uma região central. O coletor de admissão, nesse caso, era responsável por conduzir a mistura formada por ar e combustível até os cilindros [DENTON, 2000]. Segundo [BOSCH, 1999], esses sistemas - denominados monoponto - apresentam problemas de condensação de combustível no coletor em condições de baixa temperatura. O fenômeno pode ser melhor visualizado na Fig. I.28.

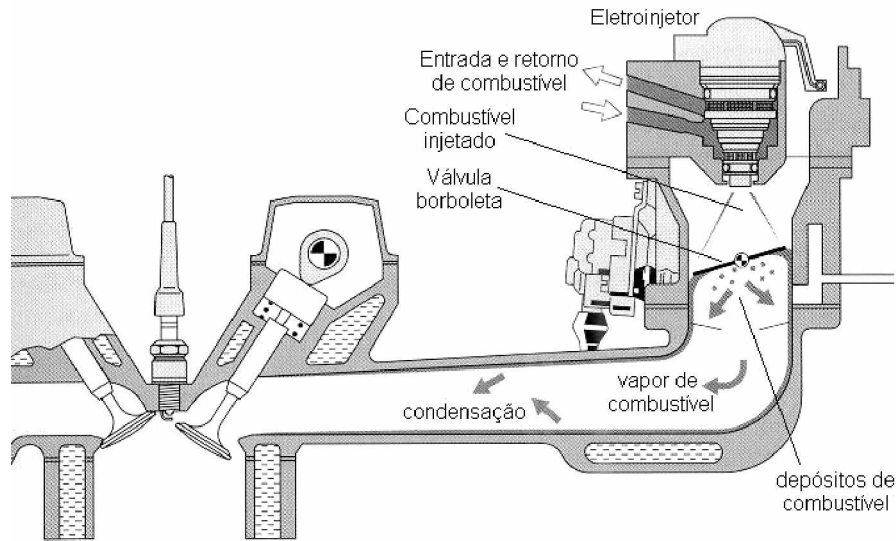


Fig. I.28 – Sistema monoponto e fenômeno da condensação com motor frio – adaptado de [BOSCH, 1999]

Comandados diretamente pela central de controle eletrônico do motor, os eletroinjetores são válvulas de agulhas acionadas por intermédio de um eletroímã. Uma mola fecha a válvula quando a mesma é desenergizada. Na Fig. I.29 pode-se visualizar as partes internas de um eletroinjeter.

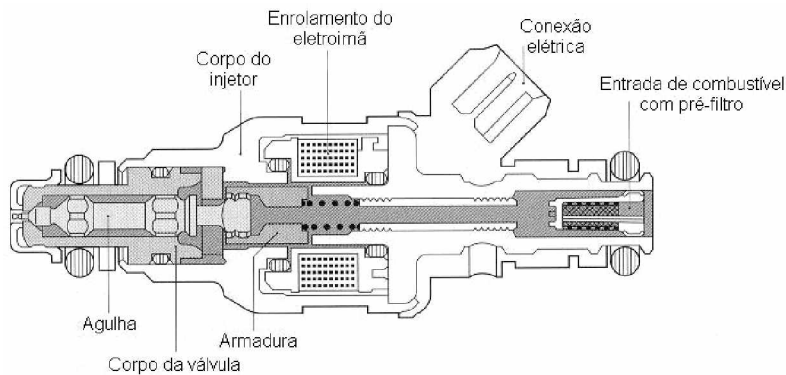


Fig. I.29 – Injetor típico e suas partes internas – adaptada de [BOSCH, 1999]

O tempo em que os eletroinjetores são acionados é medido em milissegundos. Esse tempo, como visto anteriormente, é denominado tempo de injeção.

v Sistema de Ignição

Ao sistema de ignição cabe a importante tarefa de inflamar a mistura ar-combustível no momento correto, gerando a combustão que irá efetivamente funcionar o motor. O sistema transforma os 12V da bateria em algumas dezenas de milhares de volts, suficientes para transpor a distância existente entre os eletrodos das velas de ignição.

Em um motor composto por vários cilindros, a queima ocorre de acordo a uma ordem de queima estabelecido no projeto, durante o desenvolvimento do motor.

Segundo [HEISLER, 2002] outra importante tarefa do sistema de ignição é otimizar a geração da centelha elétrica, através de um avanço de ignição adequado a cada situação de rotação e carga do motor.

v.a Principais componentes do sistema de ignição

De acordo com [MARTINS, 2005], os principais componentes de um sistema de ignição, são:

- Bateria – carregada pelo alternador, a bateria alimenta não só o sistema de ignição, como também todos os demais componentes elétricos do veículo. A bateria é um acumulador que armazena energia elétrica em forma de energia química;
- Bobina de ignição – é um transformador que eleva uma tensão contínua pulsante, permitindo transformar uma corrente contínua em pulsos de alta tensão que serão conduzidos às velas de ignição – Fig. I.30. Modernamente, a(s) bobina(s) são acionadas pela central de gerenciamento do motor. Em motores mais antigos, as bobinas eram acionadas por um contato elétrico instalado dentro do distribuidor (platinado) [MARTINS, 2005];

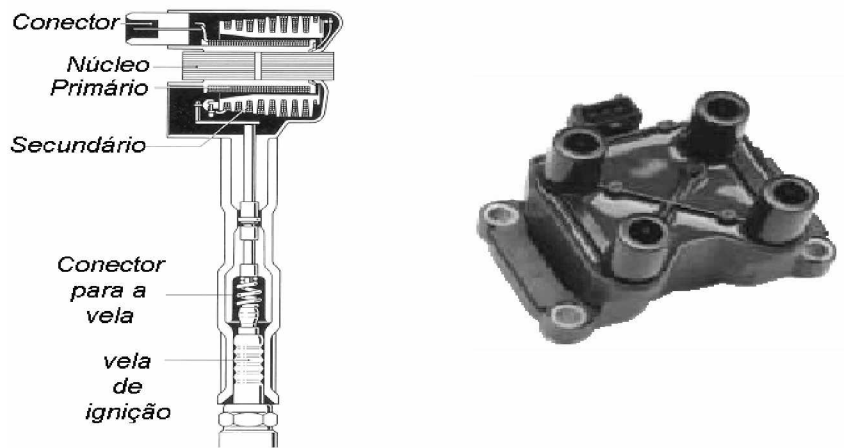


Fig. I.30 – Bobinas de ignição – adaptada de [BOSCH, 1999]

- Distribuidor – como o próprio nome indica, realiza a distribuição da alta tensão gerada pela bobina às respectivas velas de cada cilindro, segundo a ordem de queima do motor. Uma peça denominada rotor gira internamente ao distribuidor, fazendo a distribuição da corrente elétrica. Não existe contato físico entre as partes, a alta tensão consegue transpor a pequena distância existente entre os contatos. Modernamente o distribuidor foi substituído por bobinas de ignição duplas ou individuais, em um sistema denominado Sistema de Ignição Direta ou Ignição estática, devido ao fato de não possuir componentes móveis no trajeto de alta tensão [BOSCH, 1999];
- Cabos de vela – são cabos especialmente resistentes à alta tensão e às altas temperaturas existentes no compartimento do motor. Conduzem a alta tensão do distribuidor às velas. Existem alguns cabos de vela que são resistivos, essa característica visa eliminar interferências eletromagnéticas produzidas pela alta tensão (faísca). Essas interferências podem prejudicar o funcionamento dos componentes eletrônicos do veículo, tais como: rádio, unidade de comando da injeção eletrônica, etc.[DENTON, 2000];
- Vela de ignição - a função da vela de ignição é conduzir a alta voltagem elétrica para o interior da câmara de combustão, convertendo-a em faísca para inflamar a mistura ar/combustível. A vela de ignição deve trabalhar numa faixa de temperatura entre 500 a 850° C nas condições normais de uso – conforme se vê na Fig. I.31. Portanto a vela deve ser escolhida para cada tipo de motor de tal forma que alcance a temperatura de 500 ° C (temperatura de autolimpeza) na ponta ignífera em baixa velocidade e não ultrapassar 850° C em velocidade máxima [BOSCH, 1999].

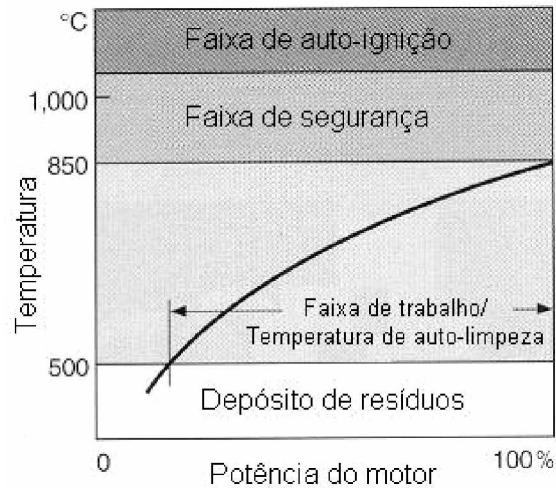


Fig. I.31 – Faixa ideal de trabalho da vela de ignição – adaptado de [BOSCH, 1999]

v.b Avanço da ignição

Segundo [DENTON, 2000], o momento em que a centelha elétrica é gerada em relação à posição do pistão provoca significativa diferença no resultado da queima, especialmente devido às diferentes pressões atingidas em função desse ângulo. Alterações nas emissões de gases e no consumo de combustível podem ser observadas quando o ponto de ignição é alterado para um mesmo regime de funcionamento do motor, conforme se pode verificar na Fig. I.32.

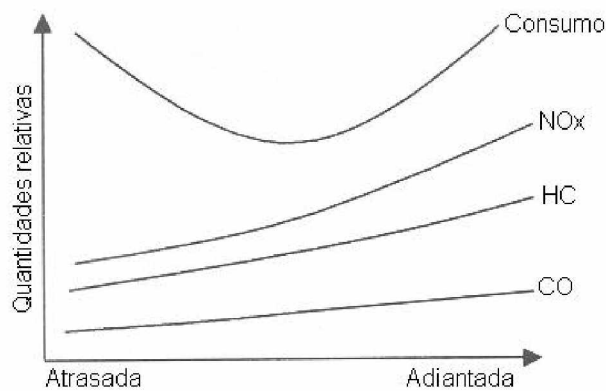


Fig. I.32 – Alterações no consumo de combustível e emissão de alguns gases com alteração no ângulo de ignição – adaptado de [DENTON, 2000]

O ângulo de ignição é controlado pelo sistema eletrônico de controle do motor, em função de diversos parâmetros, tais como:

- Temperatura do motor;
- Temperatura do ar de admissão;
- Rotação;
- Carga;
- Situações de controle de detonação e controle de torque;
- Entre outros.

Segundo [MILHOR , 2002], a determinação do ângulo de ignição ideal para cada situação de carga e rotação é definida em bancadas dinamométricas, durante a calibração do motor. Os dados levantados formam o chamado mapa de ignição, que é uma curva tridimensional com o avanço ideal para cada situação do motor. Essa informação fica memorizada na central de gerenciamento do motor.

v.c Tipos de sistemas de ignição

Um motor de combustão interna pode possuir sistemas de ignição com controles mecânicos, eletrônicos ou integrados ao gerenciamento eletrônico do motor.

Devido ao escopo desse trabalho tratar de sistemas modernos, será apresentado apenas o sistema de ignição estática integrado ao Gerenciamento do Motor, que inclusive é o tipo utilizado nos motores automotivos atuais.

v.d Ignição estática

Também denominado sistema de Ignição Direta – DIS (*direct ignition system*), tem como principal característica a ausência de distribuidor. São utilizadas bobinas individuais ou bobinas para cada dois cilindros. O sistema de ignição direta, por não possuir peças móveis, também é denominado sistema de ignição estática [DENTON, 2000].

As bobinas DIS enviam a corrente de alta tensão diretamente às velas através dos cabos de vela. O momento e avanço da centelha são determinados pelo módulo de gerenciamento eletrônico do motor, com base nas seguintes informações:

- Rotação e carga do motor;
- Fase do motor;
- Temperatura do líquido de arrefecimento;

- Temperatura do ar de admissão.

Uma vez que no sistema não há a intermediação do distribuidor entre a bobina e as velas, apresenta as seguintes vantagens:

- Alta precisão no ponto de ignição, característica importante para um bom rendimento do sistema e um baixo nível de emissões;
- Grande isolamento do sistema, o que determina alta resistência a umidade;
- Baixa manutenção, uma vez que não necessita de ajuste do ponto de ignição e não possui rotor.

Segundo [DENTON, 2000] , o sistema de ignição direta ou estática apresenta custo mais elevado, devido à maior complexidade do gerenciamento do sistema. A necessidade de uso de sistemas mais precisos e confiáveis, os elevados níveis de produção e a menor manutenção, no entanto, fazem com que esse sistema seja cada vez mais utilizado.

v.e Bobinas duplas com Centelha perdida

Esse sistema de ignição direta tem cada bobina alimentando as velas de dois cilindros – Fig. I.33. Nesse caso, as duas centelhas são geradas em cilindros gêmeos, ou seja, enquanto um encontra-se ao final da compressão necessitando efetivamente da faísca, o outro estará ao final do escapamento, onde ocorrerá a centelha perdida, e vice-versa. A diferente razão dielétrica dos gases determina uma centelha com maior intensidade do cilindro que efetivamente estiver necessitando da centelha (final da compressão) [DENTON, 2000].

Esse sistema garante uma boa eficiência com um menor custo em relação ao sistema que possui bobinas individuais.

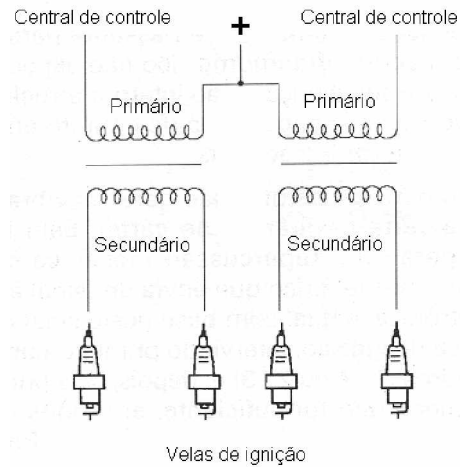


Fig. I.33 - Funcionamento da Ignição DIS com bobina dupla, centelha perdida – adaptado de [FIAT, 1996]

vi Central eletrônica do gerenciamento

É a central de processamento de todo o sistema de gerenciamento. Segundo [BOSCH, 1999], a central incorpora funções e algoritmos para processar os sinais de entrada recebidos dos sensores. Esses sinais constituem entrada para cálculos que determinarão os sinais de controle dos atuadores, o que é realizado através de estágios (*drivers*) de saída adequados.

Segundo [MENNA, 2004], as centrais de gerenciamento tiveram uma evolução significativa em sua capacidade de processamento. No início da década de 80, as unidades de controle utilizadas em veículos eram gerenciadas por microprocessadores de 8 bits e controlavam apenas as funções mais básicas do motor como razão ar-combustível e temporização da ignição. No início da década de 90, algumas dessas unidades de controle já utilizavam microprocessadores de 16 bits e seu uso se propagou para outros sistemas veiculares como transmissão e freios ABS. Ao longo da década de 90 até os dias de hoje, unidades de controle mais complexas com microprocessadores de 32 bits, vêm sendo utilizadas para controlar sistemas completos de *powertrain* e chassis. Essas unidades de controle executam algoritmos mais sofisticados e, em alguns casos, operam via rede com outras centrais, integrando todo o funcionamento do sistema eletro-eletrônico do veículo.

De forma simplificada a central eletrônica possui as seguintes partes [GM a, 1995]:

- Estabilizador de tensão – fornece a corrente elétrica em tensão constante para a alimentação do sistema a partir dos 12 Volts disponível;

- Conversores de sinais – permitem a conversão de sinais analógicos em sinais digitais e adequam os sinais recebidos pelos sensores para níveis compatíveis com o sistema de processamento;
- Memórias – armazenam o software que roda no sistema, armazenam dados do veículo onde o motor instalados e são utilizadas pelo processador;
- Processador – executa todos os cálculos e operações necessárias ao funcionamento do sistema de controle;
- Estágios (*drivers*) de saída – são acionados pelo processador para que acionem os atuadores. Permite que o processador comande atuadores de corrente considerável, como a bobina de ignição por exemplo, com total segurança.



Fig. I.35 – Central eletrônica de gerenciamento do motor Bosch Motronic M 2.8.1

II – APÊNDICE 2

Ferramenta computacional EES - Engineering Equation Solver V 7.011

Tela desenvolvida para os cálculos

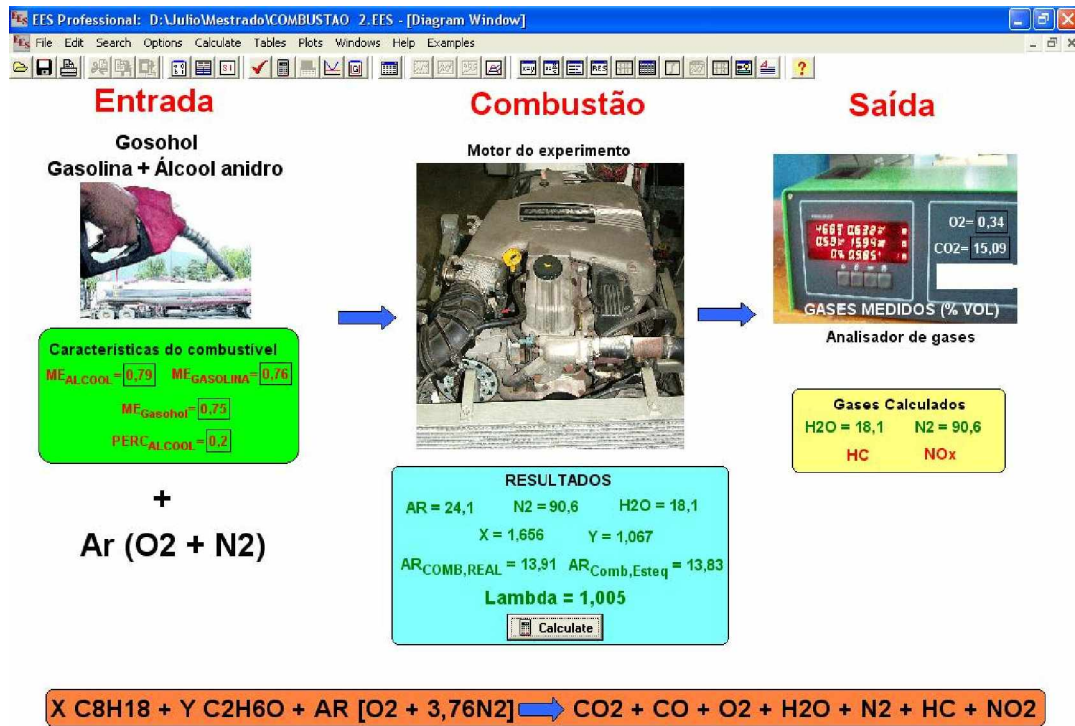


Fig. II.1 – Tela do EES utilizado nos cálculos ao longo do desenvolvimento do trabalho

Equações químicas e matemáticas utilizadas para os cálculos com o uso do ESS

{HIPÓTESES ASSUMIDAS:

PROPORÇÃO ENTRE A GASOLINA E O ÁLCOOL É DE 80/20

A GASOLINA APRESENTA 8 CARBONO, COMO ILUSTRA A FÓRMULA MOLECULAR AO LADO: C₈H₁₈

}

{ME_{GASOLINA} = 0,76

ME_{ALCOOL} = 0,79}

8*X + 2*Y = CO₂ + CO { BALANÇO DE CARBONOS }

(114 * X)/(ME_{GASOLINA}*PERC_{GASOLINA}) = (46 * Y)/(ME_{ALCOOL}*PERC_{ALCOOL})

H₂O = ((18*X)+(6*Y))/2,0

$$AR = (2 \cdot CO_2 + CO + 2 \cdot O_2 + H_2O - Y) / 2,0$$

$$N_2 = AR \cdot 3,76$$

$$AR_COMB_REAL = (AR \cdot 4,76 \cdot 28,84) / (X \cdot 114 + Y \cdot 46)$$

{ ESTEQUIOMÉTRICO
}

$$PERC_GASOLINA = 1 - PERC_ALCOOL$$

$$\{PERC_ALCOOL = 0,2\}$$

$$\{ME_Gasohol = 0,75\}$$

$$X_Esteq = (ME_Gasohol \cdot Perc_Gasolina) / 114,0$$

$$Y_Esteq = (ME_Gasohol \cdot Perc_Alcool) / 46,0$$

$$CO_2_Esteq = X_Esteq \cdot 8 + Y_Esteq \cdot 2$$

$$H_2O_Esteq = (18 \cdot X_Esteq + 6 \cdot Y_Esteq) / 2$$

$$AR_Esteq = (2 \cdot CO_2_Esteq + H_2O_Esteq - Y_Esteq \cdot 1) / 2$$

$$AR_Comb_Esteq = (AR_Esteq \cdot 4,76 \cdot 28,84) / (X_Esteq \cdot 114 + Y_Esteq \cdot 46)$$

$$\Lambda = AR_COMB_REAL / AR_Comb_Esteq$$

III – APÊNDICE 3

Avaliação da Confiabilidade dos Dados Experimentais

Neste Apêndice é feita a análise dos experimentos realizados tendo como referência a metodologia de avaliação da incerteza de medição como proposta por [Dietrich, 1991] e [Link, 1997 e 2002]. O objetivo é avaliar a incerteza de medição de cada experimento e sua influência sobre as conclusões do trabalho.

Segundo [Link, 1997], a incerteza de medição é um parâmetro associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando.

[Link, 2002] ressalta que toda medição envolve de certa maneira ensaios, ajustes, condicionamentos e a observação de indicações de um ou mais instrumentos. Esse conhecimento é utilizado para obter o valor de uma grandeza (mensurando) a partir de grandezas de entrada ($X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$) por meio de uma função f . Tal condição pode ser visualizada na Figura III.1.

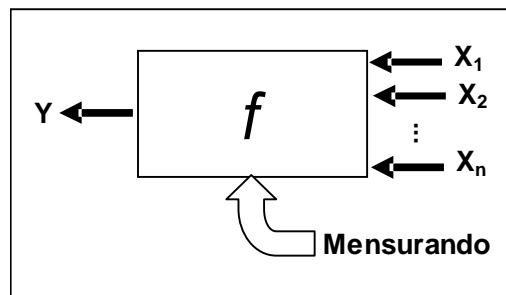


Figura III.1: modelo sintético de uma medição – adaptado de [LINK, 2002]

A escolha desta metodologia se deve à sua vasta utilização em medições industriais e científicas em todo o mundo e pelo fato de ser um método bastante reconhecido.

A metodologia adotada levará em consideração as mais importantes contribuições para a incerteza dos resultados em cada experimento, incluindo, pelo menos, a influência das características do equipamento, seus erros de medição, de erros aleatórios e outros. Como proposto por [Link, 1997], cada contribuição à incerteza dos resultados será considerada como um desvio-padrão. Inicialmente, será calculada a incerteza do Tipo A a partir do desvio-padrão

experimental calculado em função das n repetições efetuadas em cada experimento. Em seguida, as demais contribuições (do tipo B), sobre as quais não há dados suficientes para o cálculo de um desvio-padrão experimental, serão tratadas como desvios-padrão de funções probabilísticas teóricas. Para tanto, será escolhida uma função que melhor se adapte ao comportamento da variável em questão e às informações disponíveis sobre sua variação.

As várias contribuições para a incerteza total dos resultados serão então combinadas conforme a expressão para propagação de erros. A seguir serão calculados os graus de liberdade efetivos de uma distribuição *t-student* aproximada para a combinação obtida, mediante a fórmula de Welch-Satterthwaite [Dietrich, 1991]. Por fim, pode ser obtida a incerteza expandida para um certo enquadramento probabilístico. Para medições de caráter geral é razoável adotar um nível de confiabilidade de 95% [Link, 1997 e Lira, 2001].

III.1 MEDIÇÃO DA RAZÃO AR-COMBUSTÍVEL

Para o cálculo da razão ar-combustível, há três variáveis importantes. Primeiramente, a medição é realizada a um intervalo fixo de cerca de 900 s. Como o desvio-padrão experimental das medições de tempo é de 0,09% do valor teórico de referência (900 s), é razoável afirmar que a sua variação é desprezível para o experimento. O valor final da razão é calculado pela expressão:

$$R_{a/c} = \frac{M_{ar}}{M_{comb}}.$$

Inicialmente, serão aqui consideradas três contribuições predominantes para a medição de ambas as massas, com correlação linear: incerteza padrão tipo A (erros aleatórios), incerteza padrão devida aos erros do instrumento e incerteza padrão devida ao incremento digital do instrumento.

Para a incerteza do tipo A, têm-se:

$$U_a = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

onde σ é o desvio-padrão experimental e n é o número de medições realizadas (LINK, 2002) Para ambas as medições de massa $n = 5$.

Assim:

$$Ua_{ar} = \frac{0,089}{\sqrt{5}} = 0,04$$

$$Ua_{comb} = \frac{0,004}{\sqrt{5}} = 0,0016$$

No caso da medição da massa de ar, esta foi feita diretamente no scanner. Já para a medição da massa de combustível, foi utilizada uma balança. Para ambos os casos não estão disponíveis dados sobre a calibração dos instrumentos (erros sistemáticos e incerteza do processo de calibração). Sendo assim, será adotado o valor de um incremento digital, como proposto por [Link, 1997] e [Schoeler, Veiga e Fidelis, 1998], utilizando-se uma distribuição de probabilidade do tipo retangular. Portanto, para distribuições retangulares a incerteza padrão é:

$$U_i = \frac{ID}{\sqrt{3}}$$

, então:

$$Ub_1 = \frac{0,001}{\sqrt{3}} = 0,0006$$

para ambos os casos.

A incerteza de medição devida ao incremento digital dos equipamentos é dada por:

$$Ub_2 = \frac{ID}{\sqrt{12}} = \frac{0,001}{\sqrt{12}} = 0,0003$$

A incerteza combinada será agora calculada da seguinte forma:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) \quad (\text{LINK, 2002})$$

Como adotou-se uma correlação linear entre as três contribuições de incerteza, tem-se:

$$u_c^2 = u_A^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2$$

e, então:

$$u_{c_{ar}}^2 = 0,04^2 + 0,0006^2 + 0,0003^2$$

$$u_{c_{ar}} = 0,04 \text{ kg}$$

$$u_{c_{comb}}^2 = 0,0016^2 + 0,0006^2 + 0,0003^2$$

$$u_{c_{comb}} = 0,0017 \text{ kg}$$

Pode-se agora calcular o número de graus de liberdade efetivos para cada combinação [FULLER, 1987] e [LINK, 2002]

$$v_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^2 \frac{u_{d_i}^4}{v_i}}$$

$$v_{eff_{AR}} = \frac{0,004^4}{\frac{0,004^4}{4}} = 4$$

$$v_{eff_{comb}} = \frac{0,0017^4}{\frac{0,0016^4}{4}} = 5$$

Aqui será considerado o enquadramento de 95% para a incerteza dos resultados. Portanto, para a massa de ar o valor do coeficiente t-student é 2,57 e para a massa de combustível é 2,78 [LINK, 1997]. Por fim é possível calcular ambas as incertezas expandidas para 95% por:

$$u = u_c \cdot t$$

Então:

$$u_{ar} = 0,04 \cdot 2,78 = 0,1112 \text{ kg}$$

$$u_{comb} = 0,0017 \cdot 2,57 = 0,0044 \text{ kg}$$

Como o objetivo é verificar a incerteza da medição da razão de ar-combustível, é preciso observar a correlação entre a medição do ar e a medição do combustível, como proposto genericamente por [Link, 1997]:

$$u_c^2(R) = C_1^2 u^2(M_{ar}) + C_2^2 u^2(M_{comb}),$$

Onde:

$$C_1 = \frac{\partial f}{\partial M_{ar}} = -M_{comb}^{-1}$$

$$C_2 = \frac{\partial f}{\partial M_{comb}} = -M_{ar} \cdot M_{comb}^{-2}$$

Portanto:

$$u_c^2(R) = \frac{1}{M_{comb}^2} u^2(M_{ar}) + \frac{M_{ar}^2}{M_{comb}^4} u^2(M_{comb})$$

Recombinando-se as incertezas calculadas acima para um número infinito de graus de liberdade e 95% de enquadramento, tem-se:

$$u_c^2(R) = \frac{1}{(0,5164^2)} 0,1112^2 + \frac{7,12^2}{0,5164^4} 0,0044^2 = 0,0602$$

$$u_c(R) = 0,245$$

Considerando o coeficiente t-student igual a 2,00:

$$u(R) = 2 \cdot 0,245 = 0,5$$

o que representa cerca de 3,6% frente ao valor médio da razão ar-combustível. Concluindo, o valor médio obtido para a razão ar combustível é pouco afetado pela incerteza de medição, possuindo boa confiabilidade.

III.2 Medições para avaliação da Influência da temperatura na operação do sensor de oxigênio

Neste conjunto de medições é preciso avaliar as incertezas na medição das temperaturas (ambiente e sensor) e do tempo.

A medição do tempo foi efetuada diretamente no scanner e as medições de temperatura foram realizadas com um termopar. Novamente, serão consideradas três incertezas padrão para o tempo (incerteza padrão tipo A, incerteza padrão devida aos erros do instrumento e incerteza padrão devida ao incremento digital do instrumento). Para a temperatura, existem dados relativos à calibração do instrumento, que serão empregados na avaliação (incerteza de medição da calibração e erros do instrumento), além da incerteza padrão devida ao incremento digital do instrumento.

Avaliando-se a medição do tempo e temperatura, têm-se algumas constatações. Para a incerteza do tipo A, têm-se:

$$Ua = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

onde σ é o desvio-padrão experimental e n é o número de medições realizadas. Para ambas as medições $n = 3$.

Assim, para o caso do tempo será considerado o maior desvio-padrão encontrado = 3,0. Para a temperatura, o maior desvio-padrão é 9,8:

$$Ua_{tempo} = \frac{3,0}{\sqrt{3}} = 1,732$$

$$Ua_{temperatura} = \frac{9,8}{\sqrt{3}} = 5,658$$

No caso da medição do tempo, não há dados suficientes sobre a situação de calibração do instrumento. Sendo assim, será adotado o valor de um incremento digital, como proposto por [LINK, 1997], utilizando-se uma distribuição de probabilidade do tipo retangular. Portanto, para distribuições retangulares a incerteza padrão é:

$$Ui = \frac{ID}{\sqrt{3}}$$

, então:

$$Ubtempo_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,577$$

Para o termopar, a incerteza da calibração é 0,58 °C e o maior erro apresentado é 11 °C (para 95%). Portanto, há aqui dois componentes de incerteza:

$$Ubtemperatura_1 = \frac{0,58}{2} = 0,29 \quad e$$

$$Ubtemperatura_2 = \frac{11,0}{\sqrt{3}} = 6,35$$

Considerando agora a incerteza padrão devida ao incremento digital dos equipamentos, têm-se:

$$Ubtempo_2 = \frac{1}{\sqrt{12}} = 0,289$$

$$Ubtemperatura_3 = \frac{1}{\sqrt{12}} = 0,289$$

A incerteza combinada será agora calculada como anteriormente:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i)$$

Como adotou-se uma correlação linear entre as três contribuições de incerteza, tem-se:

$$u_c^2 = u_A^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + \dots$$

e, então:

$$u_{c_{tempo}}^2 = 1,732^2 + 0,577^2 + 0,289^2$$

$$u_{c_{tempo}} = 1,848 \quad s,$$

para a temperatura:

$$u_{\text{temperatura}}^2 = 6,35^2 + 0,29^2 + 5,5^2 + 0,289^2$$

$$u_{\text{temperatura}} = 8,41 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Pode-se agora calcular o número de graus de liberdade para cada combinação:

$$v_{\text{eff}} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^2 \frac{u_{a_i}^4}{v_i}}$$

$$v_{\text{eff}_{\text{tempo}}} = \frac{1,848^4}{\frac{1,732^4}{2}} = 3$$

$$v_{\text{eff}_{\text{temperatura}}} = \frac{8,41^4}{\frac{5,658^4}{4}} = 20$$

Aqui será considerado o enquadramento de 95% para a incerteza dos resultados. Portanto, para a medição de tempo o valor do coeficiente t-student é 3,18 e para a temperatura é 2,09 [LINK, 1997]. Por fim é possível calcular ambas as incertezas expandidas para 95% por:

$$u = u_c \cdot t$$

Então:

$$u_{\text{tempo}} = 1,848 \cdot 3,18 = 5,9 \text{ s,}$$

aproximadamente 6% do valor medido.

$$u_{\text{temperatura}} = 8,41 \cdot 2,09 = 17,6 \text{ } ^\circ\text{C,}$$

aproximadamente 20% do valor medido.

Evidentemente, a incerteza na medição de temperatura se mostrou bastante elevada, principalmente em função da variação acentuada das medidas nos diferentes dias dedicados à

medição. Entretanto, para os fins a que se destina, a identificação da importância do aquecimento do sensor, a variação de 20% pode ser aceitável.

III.3 Medições para avaliação da Efetividade do sensor em condições de falha na operação nos eletroinjetores

Neste conjunto de medições utilizando o analisador de gases, foi utilizado um equipamento Bosch, cujos dados de desempenho metrológico não estão disponíveis. Em qualquer das medições de gases realizadas neste experimento, sempre foi realizada a validação dos dados por meio do cálculo teórico do *lambda*, conforme apresentado no Capítulo 3, comparando-o ao valor informado no analisador de gases. Na tabela 5.4, pode-se verificar que os valores de *lambda* na situação normal de trabalho do motor aproxima-se bastante do valor teórico da mistura ideal = 1 e a diferença entre os valores obtidos diretamente no analisador de gases e aqueles calculados não ultrapassa 0,1%. Nas demais medições realizadas a máxima diferença ultrapassou levemente a 4%, o que garante excelente nível de confiabilidade aos experimentos.

ANEXOS

A1 - ANEXO 1

Descrição do Motor utilizado no experimento, segundo [GM DO BRASIL b, 1997]



Fig. A1.1 – Motor utilizado no experimento

As especificações e dados técnicos do motor utilizado estão disponíveis na tabela .

Fabricante	General Motors do Brasil
Modelo	Chevrolet Powertech 4.1 SFI
Combustível	Gasohol (Gasolina a 20% Álcool)
Número e disposição dos cilindros	6 cilindros dispostos em linha
Sistema de controle	Injeção e Ignição eletrônicos e integrados. Modelo Bosch Motronic, versão software 2.8
Diâmetro dos cilindros	98,4 mm
Curso do êmbolo	89,7 mm
Cilindrada total	4.093 cm³
Relação de compressão	8,5:1
Potência máxima	168 CV a 4.500 rpm
Torque Máximo	29,1 m.kgf a 3.500 rpm
Fluxo dos gases	Convencional, à esquerda do cabeçote

Cabeçote	Único, em Ferro fundido com 12 Válvulas, sendo 6 de admissão e 6 de escapamento
Alimentação de combustível Injeção Pressão da linha	Multiponto Seqüencial fasada 3.0 bar em relação ao coletor
Sistema de ignição Tipo Vela de ignição Ordem de queima	Ignição Direta por centelha perdida, três bobinas no mesmo corpo.
Emissão de CO	1,2 g/Km (Máximo)
Peso do conjunto motor com óleo	112 Kgs
Sistema de distribuição	Comando de válvulas único no bloco. Válvulas acionadas por varetas e balancins.
Sistema de arrefecimento	Trocador de calor água-ar, sistema selado com sistema de recuperação de água via reservatório de expansão. Duplo ventilador para resfriamento do trocador de calor.
Controle de emissões evaporativas	Canister com sistema de purga acionado eletronicamente através de eletroválvula
Controle de emissões de gases de escape	Catalisador de 3 vias. Mistura controlada através de sensor de oxigênio aquecido eletricamente.
Controle de emissão de gases do cárter	Purga mecânica dos gases do cárter com válvula PCV (Válvula de pressão positiva do cárter).

Tabela A1.1 – Especificações do motor

AII - ANEXO 2

Descrição dos equipamentos de instrumentação utilizados nos experimentos

AII.1 - Scanner automotivo

Equipamento que possibilita a comunicação em tempo real com a Central de controle do motor, possibilitando a leitura de dados coletados pelos sensores, controle paralelo dos atuadores, alteração de parâmetros de funcionamento, exibição de intervalos de leituras em forma de gráficos, exibição de falhas e realização de testes no sistema.

Com o equipamento, que possui interface para comunicação com PC é possível captura de dados importantes para a realização dos experimentos, a saber:

- Rotação do motor;
- Temperatura da água e do ar;
- Vazão mássica de ar admitida pelo motor;
- Avanço de ignição;
- Posição da borboleta de aceleração;
- Tempo de injeção;
- Carga estimada imposta ao motor;
- Fases de ignição e injeção;
- Situação da relação ar combustível queimada – fator lambda;
- Correções impostas por alterações na composição do combustível;
- Tensão da bateria;
- Controle da marcha lenta;



Fig. AII.1 – Scanner utilizado no experimento

Especificações do equipamento

- Fabricante: Hewlett Packard EUA
- Modelo: Tech 2 Z1090A
- Interfaces: OBD2 – para comunicação com a central do motor; RS232 e PCMCIA
- Acessórios: cabo OBD, cartão memória com drivers para comunicação com veículos Chevrolet.

AII.2- Analisador de gases para motores

Equipamento eletrônico com interface para PC que permite a leitura dos gases emitidos por motores de combustão interna ciclo Otto. Com o equipamento é possível se medir a quantidade de oxigênio nos gases de escape e o fator *lambda*, informação esta que para os fins experimentais substitui a informação fornecida pelo sensor de oxigênio originalmente instalado no motor.

As medições efetuadas pelo equipamento podem ser verificadas na Tabela 20.3 abaixo.

Grandeza	Descrição	Unidade de medida	Faixa coberta pelo equipamento
CO	Monóxido de carbono	% em volume	0 - 10,00%
HC	Hidrocarbonetos	ppm	0 - 9999 ppm
CO2	Dióxido de carbono	% em volume	0 - 18%
O2	Oxigênio	% em volume	0 - 21%
n	Rotação do motor	rpm	0 - 9990
T	Temperatura do motor	graus Celsius	0 - 150 °C
λ calculado	Relação lambda	-	0,500 - 2.000

Tabela AII.2 – Medições efetuadas pelo analisador de gases do experimento



Fig. AII.2 - Analisador de gases utilizado no experimento

Especificação do Equipamento:

Fabricante: Bosch Alemanha;

Modelo: 008.55

Validade da calibração: Janeiro/07

AII.3 - Osciloscópio Automotivo

Permite a captura e leitura de dados elétricos, como tensão, corrente, resistência e temperatura no tempo. O modelo escolhido possui capacidade para realizar leituras de até 50 KV, importante para realizar leituras nos sistemas de ignição, onde o secundário pode atingir tensões superiores a 40KV. Possui interface com PC e possui diversos acessórios e pontas de prova para aplicação dedicada a motores.



Fig. AII.3 - Osciloscópio utilizado

Especificações do equipamento

- Fabricante: Bosch Alemanha
- Modelo: MOT 251
- Unidades de medição: Tensão, corrente, resistência, temperatura
- Taxa de amostragem:
- Acessórios:
 - Medidor indutivo para correntes acima de 400A;

- Medidor ótico para medição de rotação do motor;
- 6 medidores indutivos para tensões de secundário de ignição;
- 1 sensor de temperatura;
- 4 pontas de prova para medição de tensão, corrente e resistência;
- Impressora;
- Interface RS 232.

AII.4 - Pinout (quadro de pinos da central) e simulador de inconvenientes

Permite, uma vez conectado entre a central eletrônica do motor e o chicote elétrica de ligação com os sensores e atuadores do sistema, que se conecte o multímetro ou osciloscópio para a realização de medidas em qualquer componente, sem exercer influência no funcionamento do motor ou necessidade de intervenção física no chicote elétrico, eliminando o risco de inserção de resistências e interferências indesejáveis e que podem provocar erros na medição.

O equipamento também dispõe de uma década resistiva, o que permite simular sensores e atuadores, além de permitir que qualquer atuador ou sensor possa desconectado através dos 55 pinos do equipamento.

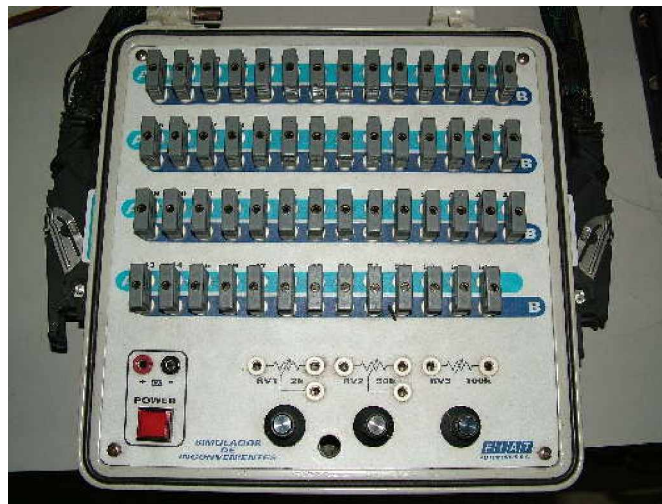


Fig. AII.4 - Simulador de inconveniente e *pinout* utilizado

Especificações do equipamento

- Fabricante: FIAT Automóveis S/A Brasil
- Modelo: simulador de Inconvenientes 55 pinos
- Acessórios: cabo para Bosch Motronic 55 pinos

AII.5 - Manômetro de pressão de combustível

Adequado para conferência da pressão de combustível fornecida ao tudo distribuidor de combustível, permitindo regulagem através de válvulas para controle paralelo da mistura ar combustível admitida pelo motor.



Fig. AII.5 - Manômetro de combustível utilizado

Especificações do equipamento:

Fabricante: Bosch Brasil;

Medição: pressão de combustível de 0,1 a 10 bar;

Acessórios: conectores, flanges, engates rápidos e válvulas de controle.

AII.6 - Calibrador de eletroinjetores

Equipamento que afere a vazão dos eletroinjetores. Promove a limpeza e confere se a vazão está correta de acordo com os manuais de reparação. Eletroinjetores com vazão diferente da especificada fornecem erros ao experimento, uma vez que a quantidade de combustível calculada não corresponderia a que foi efetivamente fornecida ao motor quando a central de controle acionar os bicos.



Fig. AII.6 - Equipamento para calibração dos eletroinjetores

Especificação do equipamento

- Fabricante: Alfatest Brasil
- Modelo: Multijet PP
- Interfaces: drivers para 4 eletroinjetores, driver para acionamento de cuba de ultrasom, driver para acionamento de lâmpada estroboscópica.

AII.7 - Bomba de combustível externa com tanque e controle de vazão e pressão

Permite que se exerça controle sobre o fornecimento de combustível ao motor, controlando a pressão de fornecimento e avaliando o consumo de combustível.



Fig. AII.7 - Bomba externa de combustível

Especificação do equipamento

- Fabricante: Plana Brasil

- Modelo: CAS-1000
- Características: bomba elétrica de combustível flexível de 6 bar, bureta graduada, chave de acionamento e válvulas para controle de retorno;
- Acessórios: mangueiras, flanges, conectores, engates rápidos, válvulas, fusível e conectores elétricos.

AII.8 - Multímetro

Utilizado para medições diversas de tensão e resistência.



Fig. AII.8 - Multímetro utilizado nos experimentos

Especificações do equipamento

- Fabricante: Fluke EUA
- Modelo: Fluke True RMS 85 III
- Características:
 - Escala automática e manual;
 - Medição de corrente até 10A;
 - Tensão AC e DC de até 1000 volts;
 - Teste de continuidade;
 - Capacitância e frequência de até 200khz.

AIII - ANEXO 3

Diagrama elétrico do Sistema de gerenciamento do Motor utilizado

O diagrama da Fig. 20.45 ilustra todos os dispositivos – sensores, atuadores, alimentação, interfaces e aterramentos – e a respectiva central de gerenciamento eletrônico com a numeração dos pinos do conector. Características do sistema:

- Sistema: Bosch Motronic M 2.8
- Versão do Software do sistema de gerenciamento: M 2.8.1

Diagrama elétrico 1/3

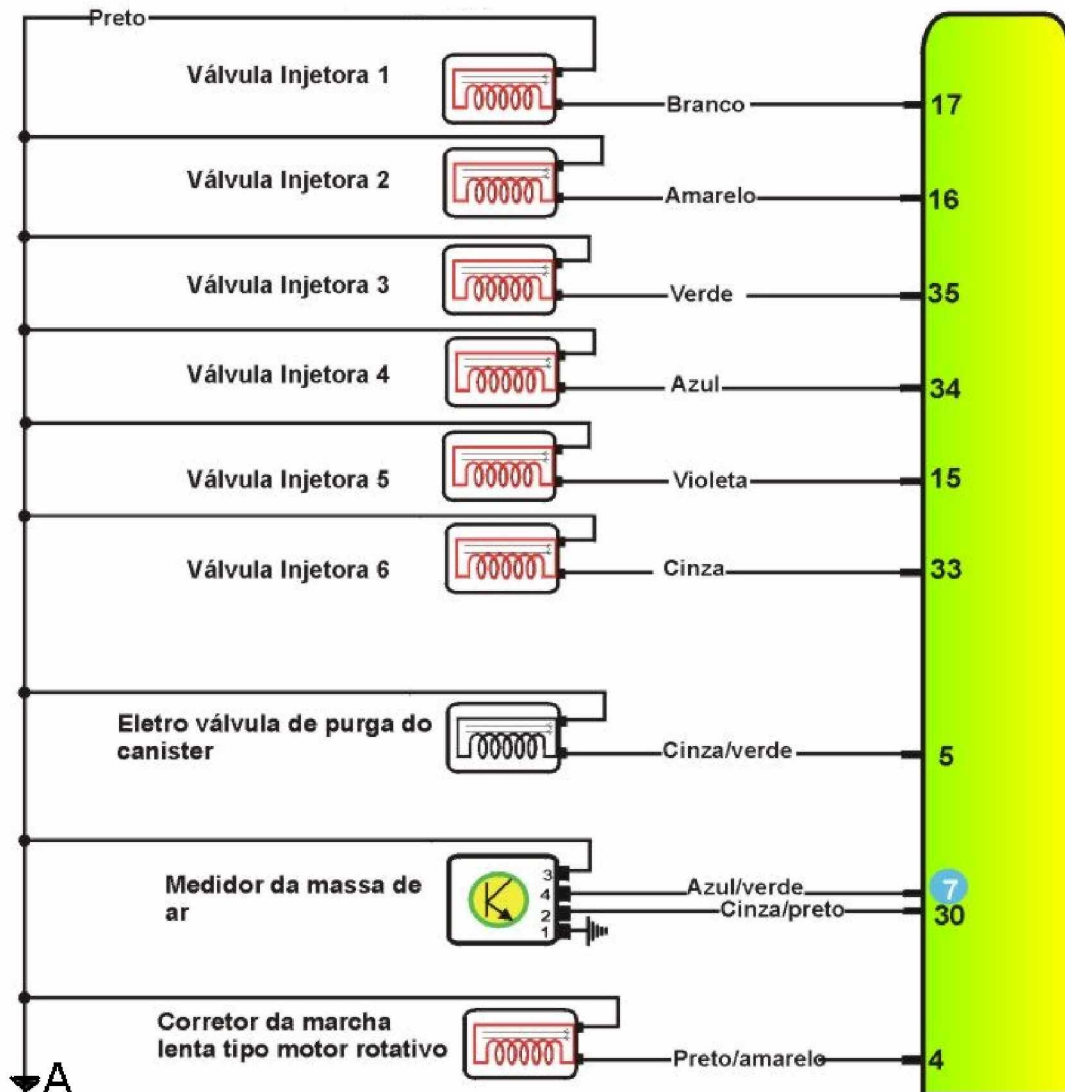


Diagrama elétrico 2/3

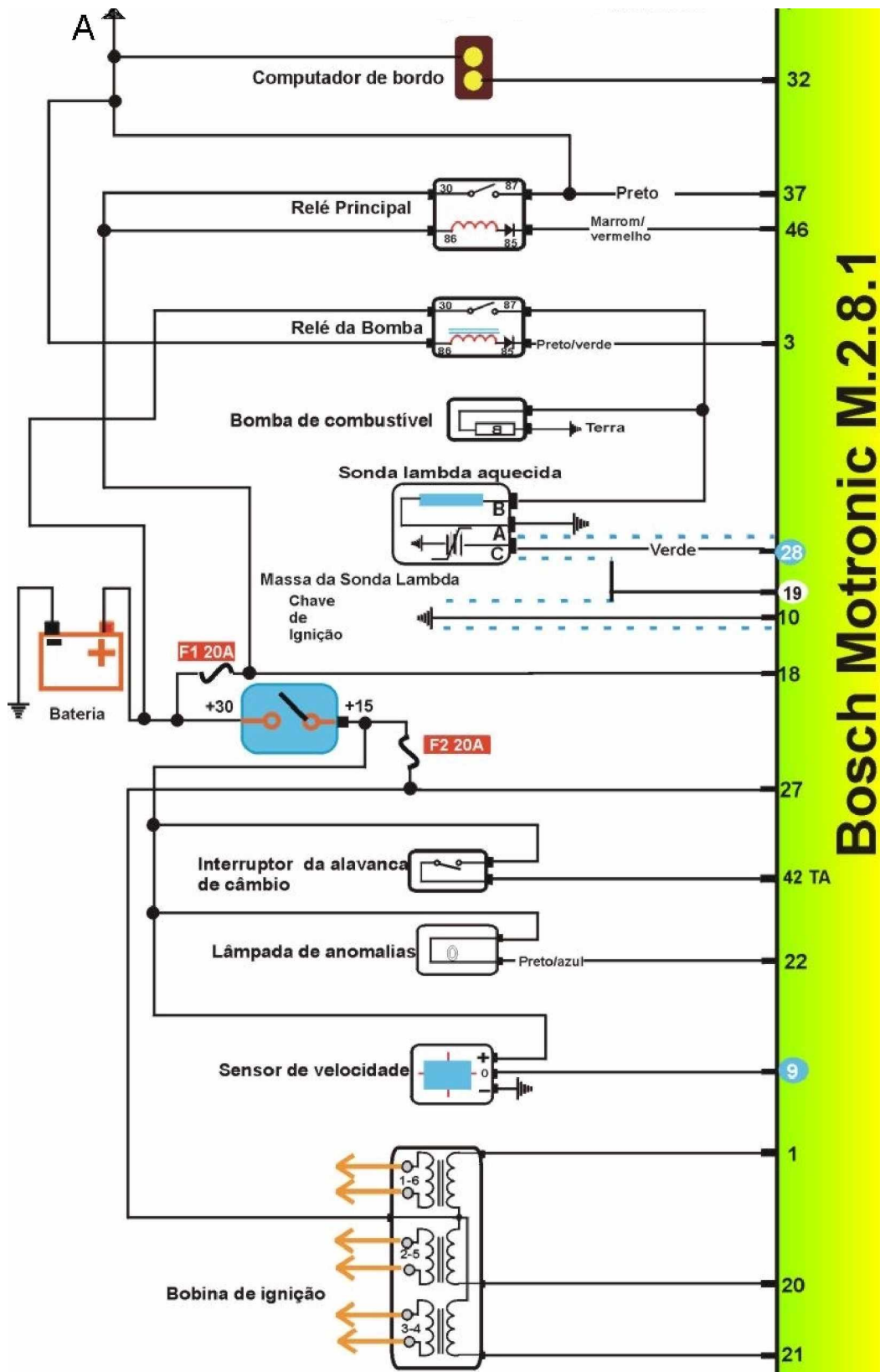


Diagrama elétrico 3/3

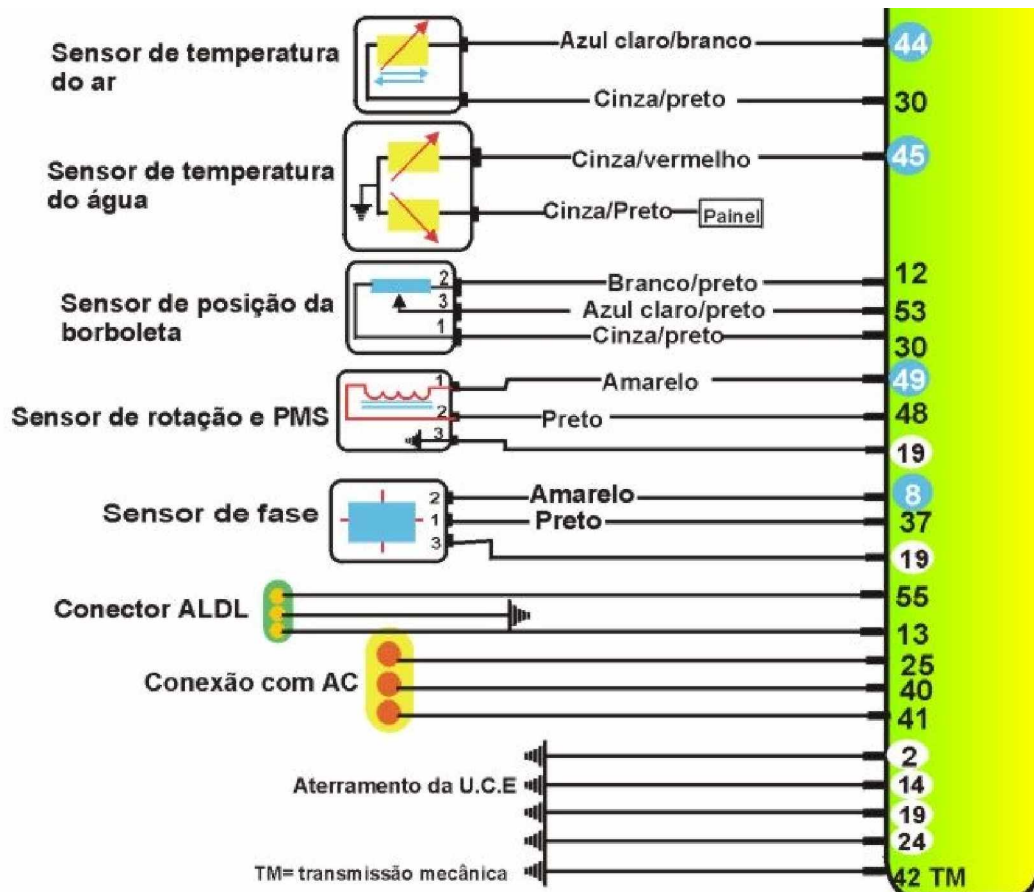


Fig. 20.45 – Esquema elétrico do Sistema de Gerenciamento do motor utilizado no experimento

AIV – ANEXO 4

Certificado de calibração do termopar utilizado no experimento

A calibração foi efetuada nos laboratórios do SENAI CIMATEC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT & INMETRO. Guia para Expressão da Incerteza de Medição. Terceira edição brasileira. Rio de Janeiro, 2003;
- AMARAL, Rinaldo Antunes. Influência de parâmetros geométricos e de funcionamento do motor nas emissões de aldeídos por um veículo a álcool. Dissertação para obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica. PUC Minas, 2000. 88p;
- ANDERSON, Ingemar – Cylinder Pressure and ionization Current Modeling for Spark Ignited Engines – Division of Vehicular Systems, department of Electrical Engineering, Linkopings universitet, Sweden, 2002;
- BALLUCHIT, A.; BENVENUTI, L.; BENEDETTO, M.D.; CARDELLINO S.; ROSSI C.; VINCENTELLI, S. Hybrid Control of the Air-fuel ratio in Force Transients for Multi-point Injection Engines. University of California, EUA, 1999;
- BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA. RESOLUÇÃO No 297, DE 26 DE FEVEREIRO DE 2002. Brasília, 2002. 10p;
- BROWN, Warwick. Defining Engine Closed-Loop Control for Individual Cylinder Signaturing. Monash University. Austrália, 2004, 50p;
- CHOLLET, H. M., Mecânicos de Automóveis, O Motor e seus Acessórios. Hemus: São Paulo, 1996,402p;

CÓNSUL, Julia; THIELE, Daniel; VESES, Renato; BAIBICH, Ione; DALLAGO, Rogério. Decomposição catalítica de óxidos de nitrogênio. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003. 9p;

DE NEVERS, N., Air Pollution Control Engineering, McGraw-Hill, 1995;

DENTON, Tom – Automobile Electrical and Electronic Systems. 2.ed. Reino Unido: Arnold, 2000;

DIETRICH, C. F. Uncertainty, Calibration and Probability. 2ª Edição, Adam-Hilger, Bristol. 1991;

ERIKSON, Lars – Methods for Current Interpretation to be used in Ignition Control. Tese de Doutorado, Alemanha, 1995;

Eriksson, Lars – Spark-Advance Control by Ion-sensing and Interpretation – Linköping University, 1998;

FERREIRA, Sílvia M. Relação entre a espessura real e aparente da gasolina com etanol e da gasolina pura em colunas de laboratório. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2003. 119p;

FIAT TREINAMENTO ASSISTENCIAL. Sistema de Injeção/Ignição IAW-1AB. Betim, 1996. 66p;

FULLER, W. A. Measurement Error Models. John Wiley, New York, 1987;

GLAVMO, Magnus; SPADAFORA, Peter; BOSCH, Russell. Closed Loop Start of Combustion Control Utilizing Ionization Sensing in a Diesel Engine. SAE 1999-01-0549, 1999. 7p;

GM DO BRASIL - Novo Omega BCM. General Motors do Brasil: São Caetano do Sul, 1999. 136p;

GM DO BRASIL a – Sistema de Injeção Eletrônica Motronic M 2.8.1, General Motors do Brasil. São Caetano, 1997. 91p;

GM DO BRASIL a. Sistema de Controle do Motor B22NZ. General Motors do Brasil, São Caetano do Sul, 1995. 62p;

GM DO BRASIL b – Motor Powertech 4.1 SFi, General Motors do Brasil. São Caetano, 1997. 182p;

GM DO BRASIL b. Sistema EFI. General Motors do Brasil. São Caetano, 1995. 197p;

GM DO BRASIL c. Injeção Eletrônica 64T. General Motors do Brasil. São Caetano, 1997. 141p;

HEISLER, Heinz – Advanced Engine Technology . Reino Unido: SAE International, 2002. 794p;

HOWLETT, R.J.; ZOYSA, M.M.; WALTERS, S.D– Monitoring Internal Combustion Engines by Neural Network Based Virtual Sensing – Transfrontier Centre for Automotive research, University of Brighton, Moulsecoomb, Brighton, UK, 2002;

HOWLETT, R.J.; ZOYSA, M.M.; WALTERS, S.D.; HOWSON, P.A. – Neural Network Techniques for Monitoring and Control of Internal Combustion Engines – Transfrontier Centre for Automotive research, University of Brighton, Moulsecoomb, Brighton, UK;
<http://www.mech-eng.leeds.ac.uk/res-group/combustion/activities/knock.html> - figura fenômeno da detonação. Acessado dia 09/06/2006;

ISIS Project, Signal Interpretation and Control in Combustion Engine;

LINK, W. Metrologia Mecânica: Expressão da Incerteza de Medição. Edição: INMETRO, IPT, SBM e Mitutoyo. Rio de Janeiro, 1997;

LIRA, F. A. Metrologia na Indústria. Editora Érica, São Paulo, 2001.

MARTINS, Jorge. Motores de Combustão Interna. 1.ed. Portugal: Publindústria Edições Técnicas, 2005. 437p;

MENNA, Gustavo Covizzi - Simulador de Ambiente Automotivo para Injeções Eletrônicas. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, 2004. 178p;

MERCEDES-BENZ. Módulos Eletrônicos Classe C. Daimler Chrysler do Brasil: São Bernardo do Campo, 2004.54p;

MIANZO, Larry; PENG, Huei; HASKARA, Ibrahim – Transient air-fuel Ratio Preview control of a drive-by-wire internal combustion Engine. Universidade de Michigan, EUA, 2001. 5p;

MILHOR, Carlos Eduardo. Sistema de Desenvolvimento para Controle Eletrônico dos Motores de Combustão Interna Ciclo Otto. Dissertação apresentada à escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. Orientador: Prof. Dr. Luis Carlos Passarini. São Carlos, 2002. 88p;

MONTANARI, Gino; DAMASCENO, Fernando. SFS – Software Flexfuel Sensor. São Paulo: Magneti Marelli, 2004.9p;

Moraes, José Eduardo Barbosa. Módulo Experimental para determinação da octanagem de combustíveis. Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia. UFRGS, 2003. 78p;

MURGEL, Gabriel; BRANCO, Fábio Cardinale. Perspectivas futuras das tecnologias e combustíveis para veículos. São Paulo, AEA, 2005. 10p;

NIELSON, Lars and ERIKSON, Lars, An Íon Sense Engine Fine-Turner. Suíça, 1998;

PELLIZA, Giovanni. Análise de Veículos convertidos para o uso do combustível Gás Natural. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Dissertação de Mestrado. Rio Grande do Sul, 2003. 139p;

PONTES, Luiz. O combustível Automotivo no Brasil Qualidade e Preço. Por que tanta confusão? Salvador: SBPC/Labjor, 2002. 8p;

PROCONVE, Ibama. Programa de controle da poluição do ar por veículos automotores. 2.ed. Brasília: IBAMA, 1998. 181p;

R.J.Howlett, P.A.Howson, S.D.Walters, N.Pashley, Determination of Air Fuel Ratio in Automotive Ignition System Using Neural Networks;

RANGEL, Maria e CARVALHO, Marly. Impacto dos Catalisadores automotivos no controle da qualidade do ar. Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2002. 13p;

RIBBENS, William B. – Understanding Automotive Electronics. Sixth Edition. SAE R-350, 2003. 470p;

ROBERT BOSCH GMBH. Automotive Handbook. 4.ed. Alemanha: SAE International, 1996. 892p;

ROBERT BOSCH GMBH. Gasoline-engine management. Alemanha: SAE International 1.ed., 1999. 370p;

ROBERT BOSCH. Períodos de verificação e intervalos de substituição para sondas lambda. Robert Bosch: Portugal, 2005. 1p;

RobertBosch, GmdH, 1996 – Automotive handbook – SAE International 4st edition;

SCHOELER, N., VEIGA, C. N. & FIDELIS, G. C. Qualificação e Certificação de Instrumentos de Medição. Apostila de curso, Fundação CERTI. Florianópolis, 1998;

SHIMASAKI, Yuichi; KANERIRO, Masaki; BABA, Shigeki; MARUYAMA, Shigeru; HISAKI, Takashi. Spark Plug Voltage Analysis for Monitoring Combustion in as Internal Combustion Engine. SAE Paper 930461, 1993. 21p;

SINGER, Brett; KIRCHSTETTER, Thomas; HARLEY Robert; KENDALL, Gary e HESSON, James M. A Fuel-Based Approach to Estimating Motor Vehicle Cold-Start Emissions. University of California, Berkeley, California. 1999. 11p;

SONDA LAMBDA. Produção Robert Bosch Ltda. Campinas: 1998. 1 videocassete (15 min), VHS, son., color;

STONE, Richard. Introduction to Internal Combustion Engines. 3.ed. Pasadena/EUA: SAE International, 1999. 641p;

STREHLOW, R. A. Combustion Fundamentals. New York, McGraw-Hill, 1988, 554p;

SZWARCFITER, Lila. Opções para o aprimoramento do controle de emissões de poluentes atmosféricos por veículos leves no Brasil: uma avaliação do potencial de programas de inspeção e manutenção e de renovação acelerada da frota. Tese de Doutorado. UFRJ, 2004. 275p;

TAYLOR a, Charles F. – Análise dos Motores de Combustão Interna – Volume 1;

TAYLOR b, Charles F. – Análise dos Motores de Combustão Interna – Volume 2;

TOYOTA. Electronic Fuel Injection. Toyota motor Corporation. Japão, 1997. 125p;

VOLKSWAGEM DO BRASIL LTDA a. Conhecimentos Básicos sobre os Sistemas de Gerenciamento Eletrônico de Motores. São Bernardo do Campo, 2000. 24p;

VOLKSWAGEM DO BRASIL LTDA b. Gerenciamento Eletrônico do Motor Motronic, 2000. 39p;

VOLKSWAGEM DO BRASIL LTDA. Carburadores. São Bernardo do Campo, 1994. 22p;

VOLPATO, Orlando; FAIÃO, Clemente; THEUNISSEN, Frans. A estratégia de desenvolvimento do multifuel: gasolina, álcool e gás natural veicular. AEA, São Paulo, 2005. 14p;

WILDNER, Fabiano Disconzi. Estudo experimental do ponto de ignição e da variação de pressão para diferentes combustíveis. Universidade federal do rio grande do sul, Departamento de engenharia mecânica, 2004. 25p;

YUN, Seung; SON, Geon; LEE, Kwi. A study on a catalytic converter OBD before light-off. Institute for advanced Engineering. Korea, 2002. 7p;

ZOTIN, Fátima; NORONHA, Fábio; APPEL, Lúcia. A desativação dos catalisadores automotivos. UERJ, Rio de Janeiro, 1999. 6p.