Serviço de Pós-Graduação EESC/USP
EXEMPLAR REVISADO
Data de entrada no Serviço: 21/10/03
Ass.: Nozareth

# UM ESTUDO DA ADAPTABILIDADE DOS SISTEMAS ELETRÔNICOS DE CONTROLE DE MALHA FECHADA PELO SENSOR DE OXIGÊNIO DE MOTORES CICLO OTTO À GASOLINA AO RECEBER ÁLCOOL ETÍLICO HIDRATADO COMO COMBUSTÍVEL ALTERNATIVO

EESC-USP Biblioteca Campus de S. Carlos

DEDALUS - Acervo - EESC
31100044261

Eng.º Armando José Dal Bem

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Luis Carlos Passarini

São Carlos

**2003**

Class. TESE-EESC
Cutt. 3772
Tombo T005/04
Sysno 1357426

Dal Bem, Armando José
D136e Um estudo da adaptalidade dos sistemas eletrônicos de controle de malha fechada pelo sensor de oxigênio de motores ciclo OTTO à gasolina ao receber álcool etílico hidratado como combustível alternativo/ Armando José Dal Bem. -- São Carlos, 2003.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 2003.
Área: Engenharia Mecânica.
Orientador: Prof. Dr. Luis Carlos Passarini

-.

1. Álcool combustível. 2. Sistema de controle eletrônico digital. 3. Conversão de motores. 4. Mistura álcool-gasolina.I. Título.

## FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **ARMANDO JOSÉ DAL BEM**

Dissertação defendida e julgada em 19-09-2003 perante a Comissão Julgadora:

APROVADO

Prof. Dr. **LUIS CARLOS PASSARINI (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO.

Prof. Dr. **ANTONIO CARLOS CANALE**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO.

Prof. Dr. **LEÔNIDAS HILDEBRAND JUNIOR**
(Universidade Bandeirante de São Paulo/UNIBAN)

Prof. Associado **JONAS DE CARVALHO**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica

Profa. Assoc. **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

*À minha esposa Célia e minha filha Ana Carolina,*
*que foram meu incentivo e entenderam os momentos de ausência.*

# AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Luis Carlos Passarini, pelos ensinamentos e orientações na trajetória desta dissertação.

Ao Prof. Dr. Leônidas Hildebrand Jr. e Engº Gilberto H. A . Koike, que colaboraram ativamente na realização do experimento.

Aos Srs. José Luiz Zanetti e Hermelindo Ruette de Oliveira, diretores da Virgolino de Oliveira S/A Açúcar e Álcool, que permitiram e incentivaram a realização desta pesquisa.

Aos colegas da Virgolino de Oliveira S/A Açúcar e Álcool pelo auxílio dedicado durante a realização deste projeto.

Aos professores e funcionários da Escola de Engenharia de São Carlos pela dedicação e apoio recebido.

A todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para a execução desta obra.

# SUMÁRIO

**LISTA DE FIGURAS**.....vi
**LISTA DE TABELAS**.....ix
**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**.....x
**LISTA DE SÍMBOLOS**.....xii
**RESUMO**.....xv
**ABSTRACT**.....xvi
**CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO**.....1
1.1– Objetivos.....4
**CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**.....5
2.1 – A história do álcool.....5
2.1.1 – As origens do álcool.....6
2.1.2 – A origem da cana-de-açúcar e sua introdução no Brasil.....8
2.1.3 – Datas relevantes ligadas à produção de álcool e açúcar.....9
2.1.4 – Síntese do processo de fabricação do álcool.....12
2.1.5 – O álcool etílico como combustível de motores ciclo Otto e como aditivo na gasolina.....13
2.1.6 – A importância do álcool para o Brasil e o mundo.....15
2.2 – Combustíveis.....19
2.2.1 – Poder calorífico.....20
2.2.2 – Poder antidetonante e o número de octano.....20
2.2.3 – Número de cetano.....21
2.2.4 – Volatilidade.....21
2.3 – Combustão.....22
2.3.1 – Característica do álcool etílico anidro carburante, álcool etílico hidratado carburante e gasolina.....23
2.3.2 – Relação ar/combustível (A/C).....24
2.3.2.1 – Relação ar/combustível para a gasolina.....26
2.3.2.2 – Relação ar/combustível para a gasolina comercial brasileira (gasohol).....27

2.3.2.3 – Relação ar/combustível para o álcool etílico hidratado carburante.....28
2.3.2.4 – Relação ar/combustível para o álcool etílico anidro carburante.....28
2.3.2.5 – Relação ar/combustível para uma mistura genérica de gasohol e álcool etílico hidratado carburante.....29
2.4 – Desempenho de motores.....30
2.4.1 – Rendimento global.....31
2.4.1.1 – Rendimento térmico.....31
2.4.1.2 – Rendimento indicado.....32
2.4.1.3 – Rendimento mecânico.....33
2.4.2 – Potência.....34
2.4.2.1 – Potência indicada.....34
2.4.2.2 – Potência absorvida pelas resistências passivas.....34
2.4.2.3 – Potência efetiva.....34
2.4.2.4 – Potência corrigida.....36
2.4.3 – Torque.....37
2.4.4 – Consumo específico.....37
2.5 – O problema com a partida a frio.....37
2.6 – Miscibilidade do álcool na gasolina.....38
2.7 – Fundamentos da teoria de sistemas de controle.....40
2.7.1 – Sistemas de malha aberta e malha fechada.....41
2.7.2 – Ações de controle dos sistemas realimentados.....44
2.7.2.1 – Ação de controle de duas posições ou liga e desliga (ON-OFF).....44
2.7.2.2 – Ação de controle proporcional (P).....46
2.7.2.3 – Ação de controle integral (I).....46
2.7.3.4 – Ação de controle derivativa (D).....47
2.7.2.5 – Ação de controle proporcional – mais – integral (PI).....47
2.7.2.6 – Ação de controle proporcional – mais – derivativa (PD).....47
2.7.2.7 – Ação de controle proporcional – mais integral – derivativa (PID).....48
2.8 – A evolução dos sistemas de controle da relação ar/combustível no motor ciclo Otto...49
2.8.1 – Sistema de controle do motor ciclo Otto com realimentação pelo sensor de oxigênio.....51
2.8.1.1 – Sistema monoponto.....52
2.8.1.2 – Sistema multiponto.....53
2.8.2 – Configuração de um sistema de controle eletrônico multiponto básico.....54
2.8.3 – Configuração básica de sistemas de controle automotivo.....55

2.8.3.1 – A autoadaptabilidade do sistema eletrônico....56
2.8.4 – Rotinas de funcionamento....56
2.8.4.1 – Partida e aquecimento do motor....56
2.8.4.2 – Funcionamento em aceleração....58
2.8.4.3 – Cruzeiro em malha aberta e malha fechada....58
2.8.4.4 – Desaceleração....58
**CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS....60**
3.1 – Ensaio rodoviário....61
3.1.1 – Característica da planilha....61
3.2 – Ensaio em bancada dinamométrica....63
3.2.1 – Ensaio com o motor a gasohol operando com sistema de controle sem alteração das características originais e com alimentação por misturas variadas da porcentagem de AEHC na gasolina....63
3.2.1.1 – Preparação da mistura de AEHC-Gasolina....64
3.2.2 – Ensaio com o motor a gasohol operando com sistema eletrônico de controle com alteração dos parâmetros da EPROM (chip) da ECU e com alimentação de combustível por AEHC puro....65
3.2.2.1 – Substituição da EPROM (chip)....66
3.2.3 – Descrição do ensaio experimental....72
3.2.3.1 – Componentes da bancada dinamométrica....72
3.2.3.2 – Determinação do torque do motor....73
3.2.3.3 – Determinação do consumo de combustível....77
3.2.3.4 – Determinação do ponto de ignição, tempo de injeção, rotação e pressão atmosférica....78
3.2.3.5 – Temperatura de bulbo úmido, bulbo seco e umidade relativa do ar....79
3.2.4 – Determinação do rendimento global....79
3.2.4.1 – Determinação do rendimento térmico....79
3.2.4.2 – Determinação do rendimento mecânico....79
3.2.4.3 – Determinação do rendimento indicado....80
**CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES....82**
4.1 –Ensaio rodoviário....82
4.1.1 – Avaliação do Golf 2.0 GLX....82
4.1.2 – Avaliação do Astra 2.0 16V....85
4.1.3 – Avaliação dos resultados do teste rodoviário....87
4.2 – Ensaio em bancada dinamométrica....87

4.2.1 – Resultados do tempo de injeção em função da rotação....88
4.2.2 – Resultados do avanço de ignição em função da rotação....90
4.2.3 – Resultados do torque em função da rotação....91
4.2.4 – Resultados da potência em função da rotação....92
4.2.5 – Resultados de consumo em função da rotação....93
4.2.6 – Resultados do rendimento global....93
4.2.6.1 – Rendimento térmico....94
4.2.6.2 – Rendimento mecânico....95
4.2.6.3 – Rendimento indicado....96
**CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO....99**
5.1 – Sugestão para trabalhos futuros....101
**ANEXOS....102**
ANEXO A – Relação ar/combustível para gasolina, gasohol, álcool etílico hidratado Carburante e álcool etílico anidro carburante....102
ANEXO B –Tabela de dados do motor Fiat Fiasa 1.0....103
ANEXO C – Princípio de funcionamento do carburador e suas principais funções....105
C.1 – Princípio de funcionamento dos carburadores....105
C.2 – Circuito de partida....106
C.3 – Circuito de aceleração brusca....106
C.4 – Circuito de marcha lenta....107
C.5 – Carburadores multicorpos....108
ANEXO D – Sensores e atuadores dos sistemas eletrônicos dos motores ciclo Otto....110
D.1 – Bomba elétrica de combustível....110
D.2 – Filtro de combustível....110
D.3 – Regulador de pressão....111
D.4 – Válvula de injeção de combustível ou injetor eletromagnético....112
D.5 – Sensores utilizados para medir a quantidade de ar....113
D.6 – Sensor de temperatura da água....115
D.7 – Motor de passo ou atuador de marcha lenta....116
D.8 – Potenciômetro de borboleta ou sensor de posição de borboleta....117
D.9 – Sensor de rotação....118
D.10 – Sensor de oxigênio ou sonda lâmbda....119
D.11 – Unidade de controle eletrônico (ECU)....119
D.12 – Válvula de ventilação do tanque....120
D.13 – Relé de comando....121

D.14 – Bobina de ignição....121
D.15 – Vela de ignição....122
D.16 – Canister....122
D.17 – Sensor de detonação (Sensor KS)....123
D.18 – Corpo de borboleta....124
ANEXO E – Dados dos veículos utilizados no teste rodoviário....125
E.1 – Veículo Golf 2.0 GLX....125
E.2 – Veículo Astra 2.0 16V....126
ANEXO F – Levantamento de dados do Golf 2.0 GLX....127
ANEXO G – Levantamento de dados do Astra 2.0 16V....128
ANEXO H – Dados médios extraídos do ensaio em bancada dinamométrica....130
ANEXO I – Dados para determinação do rendimento mecânico....133
ANEXO J – Dados para determinação do rendimento indicado....134
ANEXO K – Procedimento para construção do gráfico da figura 4.6....135

**BIBLIOGRAFIA REFERENCIADA....138**
**BIBLIOGRAFIA CONSULTADA....141**

# LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – Esquema de ciclos de um motor quatro tempos....2
FIGURA 2.1 – Alambique desenvolvido por Edmond Adam em 1801....7
FIGURA 2.2 – Moenda à tração humana....9
FIGURA 2.3 – Fluxograma de fabricação do álcool....12
FIGURA 2.4 – Automóvel movido a álcool, fabricado por volta de 1900....14
FIGURA 2.5 – Isotermas de miscibilidade....39
FIGURA 2.6 – Sistema de controle de malha aberta para um processo simples de troca de calor....41
FIGURA 2.7 – Sistema de controle de malha fechada para um processo de troca de calor....42
FIGURA 2.8 – Sistema de controle automático de um processo de troca de calor por pré-alimentação....43
FIGURA 2.9 – Controle automático de um processo de troca de calor por pré e realimentação combinadas....43
FIGURA 2.10 – Controle de temperatura liga-desliga de um aquário doméstico....44
FIGURA 2.11 – Diagrama de bloco de um sistema de controle....45
FIGURA 2.12 – Cronologia da aplicação dos sistemas de controle da relação A/C....50
FIGURA 2.13 – Esquema do sistema de injeção monoponto....53
FIGURA 2.14 – Esquema do sistema de injeção multiponto....53
FIGURA 2.15 – Componentes de um sistema de injeção eletrônica básico....54
FIGURA 2.16 – Representação do sistema de controle eletrônico do tipo speed-density em diagrama de bloco....55
FIGURA 3.1 – Fotografia da ECU contendo a EPROM do motor utilizado no experimento....66
FIGURA 3.2 – Fotografia dos equipamentos para reprogramação do chip....67
FIGURA 3.3 – Curva de ajuste do checksum....68
FIGURA 3.4 – Curva de avanço de ignição....69
FIGURA 3.5 – Curva de injeção....70

FIGURA 3.6 – Curva de injeção e avanço de ignição em marcha lenta....71
FIGURA 3.7 – Fotografia da bancada dinamométrica....73
FIGURA 3.8 – Fotografia da bomba centrífuga e conexão de saída em "Y"....74
FIGURA 3.9 – Fotografia da bancada dinamométrica com detalhe da célula de carga....75
FIGURA 3.10 – Gráfico de carga aplicada x resposta em tensão....76
FIGURA 3.11 – Fotografia da balança mássica e termômetro de bulbo úmido/bulbo seco...78
FIGURA 3.12 – Fotografia do scaner e multímetro....78
FIGURA 4.1 – Consumo de combustível x % de álcool na gasolina para Golf 2.0 GLX....73
FIGURA 4.2 – Consumo de combustível / $P_{ci}$ x % de álcool na gasolina Golf 2.0 GLX....84
FIGURA 4.3 – Consumo de combustível x % de álcool na gasolina para Astra 2.0 16V....86
FIGURA 4.4 – Consumo de combustível / $P_{ci}$ x % de álcool na gasolina Astra 2.0 16V....86
FIGURA 4.5 – Gráfico tempo de injeção x rotação....88
FIGURA 4.6 – Aumento da massa de combustível (%) x porcentagem de AEHC ao gasohol....89
FIGURA 4.7 – Gráfico avanço x rotação....90
FIGURA 4.8 – Gráfico avanço x emissões....91
FIGURA 4.9 – Gráfico torque x rotação....91
FIGURA 4.10 – Gráfico potência x rotação....92
FIGURA 4.11 – Gráfico consumo específico x rotação....93
FIGURA 4.12 – Gráfico rendimento mecânico x rotação....95
FIGURA 4.13 – Gráfico rendimento indicado x rotação....97
FIGURA 4.14 – Gráfico rendimento mecânico x rotação....98
FIGURA C.1 – Princípio de funcionamento do carburador elementar....105
FIGURA C.2 – Esquema do circuito de partida/afogador....106
FIGURA C. 3 – Esquema do circuito de aceleração brusca....107
FIGURA C.4 – Esquema do circuito de marcha lenta....108
FIGURA C.5 – Esquema do carburador duplo....109
FIGURA D.1 – Bomba elétrica de combustível....110
FIGURA D.2 – Filtro de combustível....111
FIGURA D.3 – Regulador de pressão....111
FIGURA D.4 – Válvula injetora eletromagnética de combustível....112
FIGURA D.5 – Medidor de fluxo de ar....113
FIGURA D.6 – Medidor de massa de ar....114
FIGURA D.7 – Sensor de temperatura do ar....114
FIGURA D.8 – Sensor de pressão absoluta....115

FIGURA D.9 – Sensor de temperatura da água....115
FIGURA D.10 – Esquema e foto do motor de passo....116
FIGURA D.11 – Atuador de marcha lenta....117
FIGURA D.12 – Potenciômetro de borboleta ou sensor de posição de borboleta....117
FIGURA D.13 – Sensor de rotação....118
FIGURA D.14 – Sensor de rotação....118
FIGURA D.15 – Sensor de oxigênio....119
FIGURA D.16 – Unidade digital de controle eletrônico....120
FIGURA D.17 – Válvula de ventilação do tanque....120
FIGURA D.18 – Relé de comando....121
FIGURA D.19 – Bobina de ignição....122
FIGURA D.20 – Vela de ignição....122
FIGURA D.21 – Canister....123
FIGURA D.22 – Sensor de detonação....124
FIGURA D.23 – Corpo de borboleta....124

# LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – Datas relevantes....9
TABELA 2.2 – Vendas de automóveis nacionais no Brasil....15
TABELA 2.3 – Empregos gerados no Brasil pelo setor sucroalcooleiro....16
TABELA 2.4 – Contribuição da agroindústria canavieira para a redução da taxa de $CO_2$ na atmosfera....18
TABELA 2.5 – Valoração de impacto das emissões devido ao uso do álcool anidro como aditivo à gasolina na região metropolitana de São Paulo em 1996....18
TABELA 2.6 – Característica físico-química de combustíveis....23
TABELA 2.7 – Participação de gasolina, AEAC e água na mistura gasohol-AEHC....40
TABELA 3.1 – Quantidade de AEHC e gasohol em função da % de álcool total....65
TABELA 3.2 – Dados do dinamômetro....74
TABELA 3.3 – Especificação do multímetro....75
TABELA 3.4 – Equivalência entre carga e tensão....76
TABELA 4.1 – Síntese do levantamento de dados do Golf 2.0 GLX....83
TABELA 4.2 – Síntese do levantamento de dados do Astra 2.0 16V....85

# LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/C – Relação ar/combustível
AEAC – Álcool etílico anidro carburante
AEHC – Álcool etílico hidratado carburante
ANP – Agencia Nacional do Petróleo
CIMA – Conselho Interministerial do Açúcar e Álcool
D – Controladores do tipo derivativo
ECU – Unidade de controle eletrônico ou eletronic control unit ou centralina
EPROM – Erasable programable read only memory
Etanol – Álcool etílico
Fº – Filho
Gasohol – Mistura combustível contendo 75% de gasolina e 25% de AEAC
Graus GL – Graus Gay Lussac
HC – Hidrocarbonetos
I – Controladores do tipo integral
IAA – Instituto do Áçúcar e Álcool
INPM – Instituto Nacional de Pesos e Medidas
IPVA – Imposto sobre propriedade de veículos automotores
M.P.F.I – Sistema de injeção com um injetor por cilindro ou multi point fuel injection
MEG – Mistura metanol-etanol-gasolina
Metanol – Álcool metílico
MTBE – Metil tércio butil éter
NE – Neto
NOx – Óxidos de nitrogênio
P – Controladores proporcionais
PD – Controladores do tipo proporcional-mais-derivativo
PDI – Controladores do tipo proporcional-mais-integral-maisderivativo
PI – Controladores do tipo proporcionais-mais-integral
Próalcool – Programa do Álcool

Proconve – Programa de controle da poluição do ar por veículos automotores
RT – Resistor térmico
S.P.I – Sistema de injeção com um único injetor ou single point injection
SCMA – Sistema de controle de malha aberta
SCMF – Sistema de controle de malha fechada
SOx – Óxidos de enxofre
TJ – Tempo de injeção

# LISTA DE SÍMBOLOS

$C$ – Carbono

$C_{11}H_{20}$ – Cetano

$C_{16}H_{35}$ – Alfa-metil-naftaleno

$C_2H_5OH$ – Álcool etílico

$C_7H_{16}$ – Heptano

$C_8H_{18}$ – Isoctano

$CH_4$ – Metano

$CO$ – Monóxido de carbono

$CO_2$ – Dióxido de carbono

Constante

$C_s$ – Consumo específico do motor

$C_{sasp}$ – Consumo específico do motor a álcool sem preparação

$C_{sgh}$ – Consumo específico do motor a gasohol

$f$ – fração de gasohol na mistura

$f_{AEHC}$ – fração de AEHC na mistura

$H$ – Hidrogênio

$H_2O$ – Água

$K$ – Razão entre os calores específicos, a volume constante e a pressão

$K_p$ – Sensibilidade proporcional ou ganho

$m$ – Massa

$M$ – Massa molecular

$Mt$ – Torque do motor

$n$ – Número de moles

$N_2$ – Nitrogênio

$Ne$ – Potência efetiva do motor

$Ne_c$ – Potência corrigida

$Ni$ – Potência indicada

$Ni_{(1)}$ – Potência indicada do primeiro cilindro

$Ni_{(2)}$ – Potência indicada do segundo cilindro

$Ni_{(3)}$ – Potência indicada do terceiro cilindro

$Ni_{(4)}$ – Potência indicada do quarto cilindro

$NO_2$ – Dióxido de nitrogênio

$O_2$ – Oxigênio

$^oC$ – Graus Celsius

$P_{ci}$ – Poder calorífico inferior do combustível.

$P_{ciAEAC}$ – Poder calorífico do AEAC

$P_{ciAEHC}$ – Poder calorífico inferior do álcool etílico hidratado carburante

$P_{cig}$ – Poder calorífico da gasolina

$P_{cigh}$ – Poder calorífico inferior do gasohol

$P_{cimistura}$ – Poder calorífico da mistura

Pi – Pressão atmosférica

$Q_m$ – vazão de ar aspirado

$Q_o$ – vazão de ar teórico

R – Fator de correção da mistura

T – Trabalho realizado pelo motor no ciclo teórico

$T_i$ – Trabalho realizado pelo motor no ciclo indicado

u(t) – Sinal de saída do controlador

V – Volume total dos cilindros

$\gamma_m$ – Massa específica da mistura mais resíduos

$\varepsilon(t)$ – Sinal de erro atuante

$\eta$ – Rendimento global para um motor

$\eta$ – Rendimento global para um motor

$\eta_0$ – Rendimento relativo para um motor

$\eta_i$ – Rendimento indicado para um motor

$\eta_{iasp}$ – Rendimento indicado para motor a álcool sem preparação

$\eta_{igh}$ – Rendimento indicado para motor a gasohol

$\eta_m$ – Rendimento mecânico para um motor

$\eta_{te}$ – Rendimento térmico para um motor

$\eta_{teasp}$ – Rendimento térmico para motor a álcool sem preparação

$\eta_{tegh}$ – Rendimento térmico para motor a gasohol

$\eta_v$ – Rendimento volumétrico para um motor

$\lambda$ – Fator lâmbda

$\mu$ – massa de ar necessário para a combustão de 1 Kg de combustível

$\rho$ – Taxa de compressão

# RESUMO

Traz um histórico da utilização do álcool como combustível no Brasil, mostrando suas vantagens ambientais, sociais e econômicas. Apresenta as propriedades físico-químicas do álcool etílico anidro e hidratado e suas reações de combustão, enfatizando a razão ar/combustível e comparando-o com a gasolina pura e a gasolina comercial brasileira. Utiliza as teorias existentes sobre motores de combustão interna quatro tempos, para demonstrar a influência da adição progressiva de álcool etílico hidratado na gasolina sobre o rendimento, torque, potência e consumo em um motor a gasolina. Utiliza o mesmo procedimento de análise para determinar a influência sobre os itens citados anteriormente, em um motor a gasolina operando com álcool etílico hidratado, sem sofrer alteração da taxa de compressão. Analisa a miscibilidade de misturas álcool etílico hidratado e gasolina. Descreve e analisa os resultados experimentais de rendimento, torque, potência e consumo de um motor a gasolina com sistema eletrônico de controle digital, operando com variadas proporções de mistura álcool etílico hidratado e gasolina, sem alteração de suas características originais. Repete o experimento anterior para o motor operando com álcool etílico hidratado com alteração das características originais da EPROM do sistema de controle eletrônico.

Palavra chave: álcool combustível, sistema de controle eletrônico digital, conversão de motores, mistura álcool-gasolina.

# ABSTRACT

A historical approach to alcohol application as a fuel in Brazil is given, showing its environmental advantages and disadvantages. Physic-chemical properties of hydrous and anhydrous ethylic alcohol are presented, as well as its combustion reactions, emphasizing the ratio air/fuel and comparing it to pure gasoline and Brazilian commercial gasoline. Utilizes the existing theories about internal combustion motors in four times, to demonstrate the influence of progressive addition of hydrous ethylic alcohol in gasoline upon efficiency, torque, potency and consumption in a gasoline motor. Utilizes the same analysis procedure to determine the influence upon the previously cited items, in a gasoline motor, operating with hydrated ethylic alcohol, without suffering a compression rate alteration. Analyzes the miscibility of hydrous ethylic alcohol and gasoline mixture. Describes and analyzes experimental results of efficiency, torque, potency and consumption of a gasoline motor with a digitally controlled electric system, operating with varied proportions of hydrous ethylic alcohol and gasoline mixture, with no alteration in its original characteristics. Repeats the previous experiment with a motor operating with hydrous ethylic alcohol with alterations of the original characteristics in the electric control system EPROM.

Key words: combustible alcohol, digital electric control system, motor conversion, alcohol-gasoline mixture

# CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

A humanidade evolui por quebra de paradigmas (Thomas Kuhn, 1998), por saltos quantitativos e não por uma evolução progressiva e continua.

Esse conceito pode ser perfeitamente aplicado na engenharia. Até o ano de 1765 o homem utilizava, fundamentalmente, a energia animal para movimentar aparatos primitivos e para sua locomoção. Os moinhos de ventos e rodas d'água eram as primeiras formas de aproveitamento da energia da natureza que não a animal. A combustão, no cotidiano da humanidade, tinha simplesmente função na culinária, aquecimento de ambientes, guerras, enfim nada relacionada com a produção de energia mecânica.

Porém no ano de 1765 James Watt realizaria uma invenção importante: *a máquina a vapor*. Com ela, rapidamente seguem a evolução das máquinas têxteis, marcenarias e tantas outras. Nascia o que mais tarde seria chamado da era industrial.

O homem já não mais navegaria movido pelos ventos, ou remos e o cavalo perderia sua importância. Navios e trens movidos a vapor eram os novos símbolos da tecnologia da mobilidade.

Pouco menos de 100 anos depois, em 1862, o físico Francês Alphonse Beau de Rochas propôs as condições necessárias para que um *motor de combustão interna a quatro tempos* funcionasse com um máximo de economia. Esse equipamento só viria a entrar em funcionamento em 1876 por Nikolaus Otto, que foi inclusive, quem determinou o ciclo teórico de quatro tempos sob o qual trabalha o motor de combustão interna de ignição por centelha. Em 1897 Rudolf Diesel inventa o *motor ciclo diesel*.

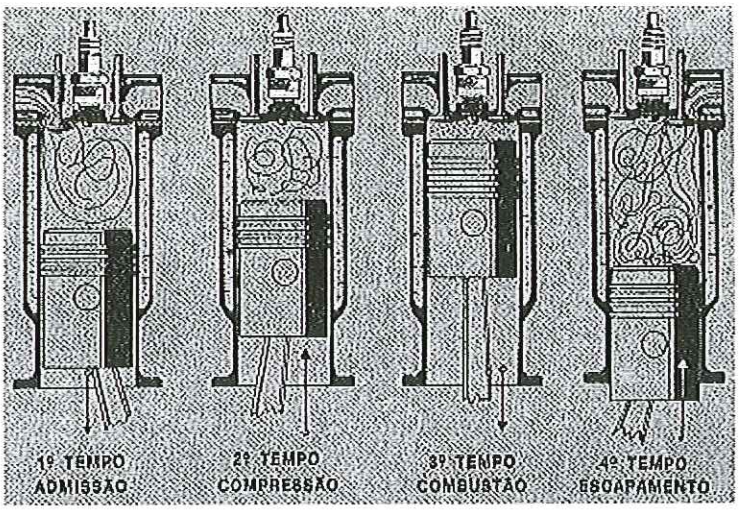



**FIGURA 1.1 – Esquema de ciclos do motor quatro tempos (METAL LEVE, 1985)**

Seus inventos seriam uns dos grandes engenhos da humanidade. Um equipamento compacto capaz de gerar energia suficiente para as necessidades do homem da época e da atualidade.

Compacto porque a energia do combustível é transformada dentro do próprio motor, ao contrario do engenho de Watt que necessitava de uma caldeira para, primeiro, extrair a energia do combustível e depois transformá-la em movimento no motor, propriamente dito.

O princípio era o mesmo, assim como os componentes principais. Pistões, bielas e árvore de manivelas faziam o movimento linear passar a rotativo.

Mas uma mudança foi fundamental, o combustível passou a ser necessariamente um fluído. A lenha ou carvão não representava uma boa opção nessa nova tecnologia. A taxa de energia já não seria mais obtida pela *dosagem manual* desses combustíveis em uma fornalha.

Surgiu a necessidade de um sistema mais refinado para o controle. Um sistema que dosasse o combustível para obter a potência solicitada pelo usuário, para cada regime de trabalho. Era preciso misturar ar e combustível na quantidade ideal para que a reação química acontecesse eficientemente.

Os primeiros sistemas de dosagem de ar/combustível consistiam de um tubo de Venturi simples, para provocar uma depressão e, conseqüentemente, a sucção do combustível diretamente do tanque. A variação da potência era realizada por um mecanismo de regulagem do ar. Esse sistema simples seria o precursor dos carburadores que evoluíram à medida que os motores tornavam-se maiores, mais exigentes e mais eficientes.

Os carburadores que se seguiram foram ganhando complexidade e componentes como: cuba, orifício para da regulagem da marcha lenta, injeção rápida de combustível, múltiplo estágio, até chegar aos carburadores eletrônicos.

Atualmente a eletrônica, a tecnologia dos microprocessadores, atuadores e sensores os mais variados passaram a fazer parte dos sistemas eletrônicos de controle possibilitando melhores rendimentos, potência específica, respostas precisas e de acordo com as exigências do usuário e das condições operacionais e mesmo climáticas.

O sistema eletrônico de controle, além de proporcionar tais benefícios, contribui, definitivamente, para a redução das emissões de gases poluentes, agindo de forma a produzir combustões otimizadas para cada regime de operação. Este fato é a principal mola, impulsionadora para seu uso, contrapondo o maior custo de implantação. O rigor da legislação ambiental atual vem exigindo essa redução e carburadores convencionais ou eletrônicos já não podem atender.

Um sistema mais complexo e que mantenha as condições de regulagem da mistura por período prolongado, ou seja, que possua uma estratégia de *autoadaptatividade*, absorvendo as variações da qualidade de combustível, variação do comportamento do motor durante seu uso e até as dispersões dos componentes na produção dos motores, torna-se necessário.

Porém, a autoadaptatividade do sistema de controle eletrônico gera um efeito colateral interessante ao admitir a alteração do tipo de combustível.

O Brasil, diferentemente da grande maioria dos países, apresenta uma condição peculiar na disponibilidade de combustíveis para motores ciclo Otto, por produzir o *álcool etílico (etanol) hidratado*, um combustível tão popular quanto à gasolina e igualmente difundido em todo o território, através de mais de 26.000 postos de abastecimento. Além do hidratado, para uso direto nos veículos a álcool, toda gasolina nacional utiliza o *álcool etílico (etanol) anidro* como aditivo antidetonante na proporção de 25%. A essa condição se juntam a sua extensão territorial e a logística de produção e distribuição provocando variações de preços, de ambos os combustíveis, que podem ser observadas ao longo do tempo e na diversificação de locais.

Além destes fatos, o álcool por ser um produto de origem agrícola, sofre a influência das condições climáticas, que interferem na quantidade produzida e conseqüentemente no mercado, acentuando essa variação de preço.

No passado o custo de produção do álcool hidratado era superior ao da gasolina. Do lançamento do Proálcool (programa de incentivo ao uso do álcool como combustível) até inicio da década de 90, o preço do etanol hidratado era controlado, mantendo-se em 65% do preço da gasolina. Essa porcentagem foi aumentando nos anos seguintes, ainda por ação governamental, fazendo-o perder a competitividade frente à gasolina, sob o ponto de vista do consumidor.

A competitividade do álcool hidratado é assegurada nas condições de preço de até 75% (PENIDO F$^{O}$, 1991) da gasolina. Este valor é resultado de questões técnicas em que, o menor poder calorífico do álcool tem, em contra-partida, um motor de melhor rendimento térmico.

Após a saída do governo no controle, a "lei de mercado" passou a reger os preços. Nas condições de custo de produção de álcool e no valor do barril de petróleo atuais, o preço do álcool tem variado, durante o ano de 2002 e 2003, entre 40% e 70% da gasolina, sendo assim altamente vantajoso.

Diante das condições de preços dos combustíveis, o consumidor tem procurado buscar uma relação de custo/benefício positiva, abastecendo seus veículos com variações de incremento desse combustível à gasolina ou realizando a conversão de seus veículos de gasolina para álcool. É fato que não se tem observado muito critério na elaboração da composição da mistura, ou nas conversões, levando-se em conta, somente, um razoável funcionamento do motor.

Nesse cenário econômico, a tecnologia de controles de sistemas aplicada no campo veicular tem evoluído, proporcionando, como foi relatado anteriormente, além de todos os benefícios ligados ao desempenho e dirigibilidade do veículo, a opção de uma certa flexibilidade no uso de combustíveis e suas misturas. Nos capítulos seguintes será discutido como isso é possível.

## 1.1 – OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é, a partir de uma conhecida prática encontrada no Brasil, de misturar variadas proporções de álcool na gasolina, estudar a autoadaptabilidade do sistema eletrônico de controle do motor e suas conseqüências no desempenho, determinando rendimentos, comportamentos ligados à curva de torque e potência, e as respostas do motor às exigências do usuário, ou seja, a dirigibilidade do veículo.

Uma outra prática encontrada é a substituição da EPROM que contém os mapas das centrais de injeção e ignição de motores a gasolina por outra, com mapas modificados. Este trabalho se propõe, também, a analisar as conseqüências dessa troca, no desempenho do motor.

# CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo a revisão bibliográfica será apresentada de acordo com a seqüência mostrada abaixo:

- História da utilização do álcool como combustível;
- Combustíveis, combustão e desempenho de motores ciclo Otto;
- O problema com a partida quando frio e miscibilidade do álcool na gasolina;
- Fundamentos da teoria de sistemas de controle;
- Sistemas de controles da relação A/C no motor ciclo Otto.

## 2.1 – A HISTÓRIA DO ÁLCOOL

A origem da produção de açúcar no Brasil remonta sua própria história. Produzido a partir da cana de açúcar, introduzida pelos Portugueses no século XVI, tornou-se o principal produto para a economia da época, originando o que mais tarde seria chamado de ciclo do açúcar.

O álcool, por sua vez, veio ter sua importância reconhecida muito mais tarde. Até o advento do Programa do Álcool (Proálcool), em 1975, sua produção era somente marginal, sendo utilizado, apenas, para fins industriais, farmacêuticos, domestico e perfumarias. A fabricação baseava-se na fermentação do mel não cristalizável (açúcares que não se aglutinam em cristais), proveniente como um subproduto da produção de açúcar.

A partir do Proálcool, os incentivos para substituição de parte da importação de petróleo por um combustível renovável e nacional tornaram o álcool de grande importância para o país. Crescia assim, a produção do álcool hidratado que viria movimentar uma frota de 4,5 milhões de veículos.

O álcool anidro, por sua vez, passou a ser adicionado à gasolina como um excelente aditivo antidetonante, em substituição ao chumbo tetraetila. Este tinha o grave inconveniente de ser um produto cancerígeno e na grande maioria dos países ele foi substituído pelo MTBE, que é um aditivo derivado do petróleo.

O álcool, um produto milenar, produzido inicialmente como bebida para o prazer humano passou a fazer parte da matriz energética do país.

Este capítulo tem o objetivo de contar sinteticamente sua história a fim de dar subsídios para se compreender o fenômeno das utilizações indiscriminadas de conversões de veículos de gasolina para álcool e vice-versa, ou os chamados "rabos de galo", os quais são adições de álcool hidratado à gasolina diretamente nos tanques dos veículos.

### 2.1.1 – AS ORIGENS DO ÁLCOOL

É muito difícil precisar quem primeiro começou a produzir o álcool. Segundo LEÃO (2002) vários povos antigos pareciam conhecer o processo, pois costumavam ferver certas infusões de plantas para delas extrair essências.

Os egípcios curavam várias moléstias inalando o vapor de líquidos aromatizados e fermentados, absorvidos diretamente do bico de uma chaleira rudimentar, num ambiente fechado (LEÃO, 2002).

Os gregos registraram processos de obtenção de *acqua ardens*, uma espécie de água com um certo teor alcoólico, que aparece no Tratado de Ciências (PLINIO, 23-79 d.C. apud LEÃO, 2002).

Também os primitivos indianos sabiam fazer preparados a partir da cana de açúcar. O médico Susruta, que teria vivido no século VI a.C., escreveu em seus manuscritos: o caldo da cana espremido serve de remédio e toma-se de mistura com outros; serve também para preparar *bebidas espirituosas e inebriantes* (LIPPMAN, 1941 apud LEÃO, 2002).

Alguns autores consideram que os primeiros álcoois derivavam do vinho, do qual foi extraída inicialmente a *"água de vida"*, cuja origem, por sua vez se perde no tempo.

"O vinho data da infância do mundo. Todos homens, menos aqueles que se convencionou chamar de selvagens, foram atormentados pelo apetite de bebidas fortes, que eles foram obrigados a procurar até os limites de seus conhecimentos" (DUJARDIN, 1990 apud LEÃO, 2002). LEÃO (2002) fala que o vinho não foi, no entanto, a bebida mais antiga consumida pela humanidade. A maioria dos arqueólogos concorda que o *hidromel* – mistura de água e mel – e a própria cerveja são mais antigos.

No antigo Egito, conhecia-se a arte de destilar e na China, há 2000 anos a.C., aproximadamente, foram encontradas fórmulas de destilação de "espíritos fortes" (os antigos chamavam de espírito a essência de qualquer substancia) através da fermentação do arroz, denominado *kiu*.

Até o final da Idade Média, a fabricação da cerveja e do hidromel era feita da seguinte forma: o mosto da cerveja fermentada, ou a solução de mel eram despejados em potes que, colocados uns sobre os outros, iam ao forno para aquecer o mosto. Ao mesmo tempo, para evitar sua perda e prevenir o derramamento do líquido quente, uma tina era colocada embaixo. É possível que, permanecendo um longo período com temperatura uniforme, a fermentação fosse acompanhada de destilação espontânea, pois o líquido condensava-se e pingava na tina.

A técnica da destilação foi sendo aprimorada e a variedade de bebidas multiplicou-se por volta de 1500 (LEÃO, 2002). Os irlandeses e escoceses fizeram o *whisky*, da cevada. Na China e Japão, fazia-se o *sake*, fermentado e destilado a partir do arroz e na Rússia, surgiu a *vodka* de centeio e trigo. Até hoje, a única base das bebidas alcoólicas é o etanol, destilado de líquidos fermentados.

Essa técnica de destilação simples, em alambiques, somente permitia obter um álcool de baixa graduação alcoólica, contendo um grande teor de água. Posteriormente, por processo de re-destilação conseguiam-se teores alcoólicos de até 85% a 90%, porém em condições econômicas desfavoráveis.

A partir de 1820, começou a surgir aparelhos de destilação contínua, montados superpostos em colunas, para a produção em escala industrial. Com a técnica de desidratação, rapidamente alcançou-se teor de 99,5 na escala Gay-Lussac. O álcool caminhava lentamente do consumo na forma de bebida para, também, ser utilizado como combustível.

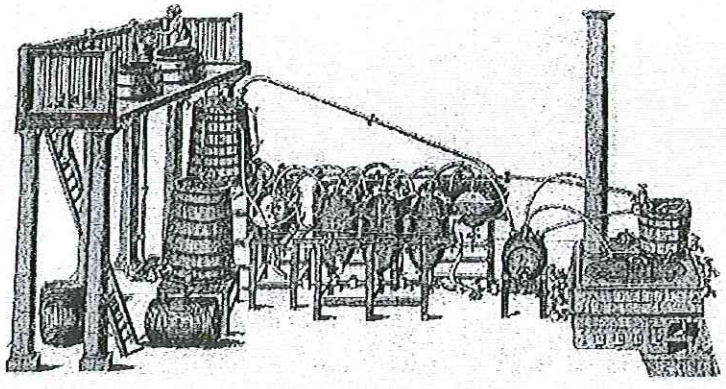


**FIGURA 2.1 – Alambique desenvolvido por Edmond Adam em 1801 (LEÃO, 2002)**

## 2.1.2 – A ORIGEM DA CANA-DE-AÇÚCAR E SUA INTRODUÇÃO NO BRASIL

A cana-de-açúcar era conhecida e apreciada pelas mais antigas civilizações. LEÃO (2002) afirma que sua origem, geralmente citada como sendo das planícies ao longo do rio Ganges, na Índia, é controvertida. Muitos estudiosos, segundo LEÃO (2002), afirmam que a cana de açúcar é proveniente da Melanésia – região da Nova Guiné e pelas pequenas ilhas Fidgi –, situada no Pacifico Sul, onde foi encontrada uma espécie primitiva (Saccharum robustum), chamada de *otaheite*. Ao que parece, a população que vivia nessas ilhas, há cerca de 2000 anos antes de Cristo, foi a primeira a aproveitar esta preciosa planta, que crescia em estado natural na região.

Ela aparece citada pela primeira vez em manuscritos dos hindus Charaka e Susruta por volta do ano 500 a.C., que mencionam o cultivo na Índia de mais de uma dúzia de variedade de cana. Por isso, considera-se esse o primeiro país a extrair seu suco natural e transformar aquele caldo em grandes torrões, que chamavam de *gur* (LEÃO, 2002).

Na China, calcula-se que sua introdução deva ter ocorrido posteriormente, talvez pouco antes do início da era cristã. O certo é que tanto os indianos como os chineses sabiam extrair da planta o xarope doce que era considerado uma fina especiaria e utilizado principalmente em pequenas doses como medicamento.

Desde então, o açúcar tornou-se um dos mais cobiçados prêmios dos conquistadores. Quando o almirante Nearco, por ordem do imperador Alexandre Magno, da Macedônia, desembarcou com sua frota na corte dos hindus, em 328 a.C., para explorar os mares das Índias, conheceu "um caniço que produzia uma espécie de mel sem o auxilio das abelhas", e trazendo-o, tornou-se conhecido também pelos povos do ocidente (LEÃO, 2002).

Coube aos navegantes a serviço dos reis da Espanha e Portugal o mérito da disseminação da planta que chegou nas Américas, na segunda viagem de Cristóvão Colombo, em 1493.

Com a descoberta do Brasil, em 1500, os portugueses trouxeram na "bagagem" as primeiras mudas de cana para serem cultivadas no Novo Mundo e pouco tempo depois, em 1516, construíram-se o primeiro engenho de açúcar.

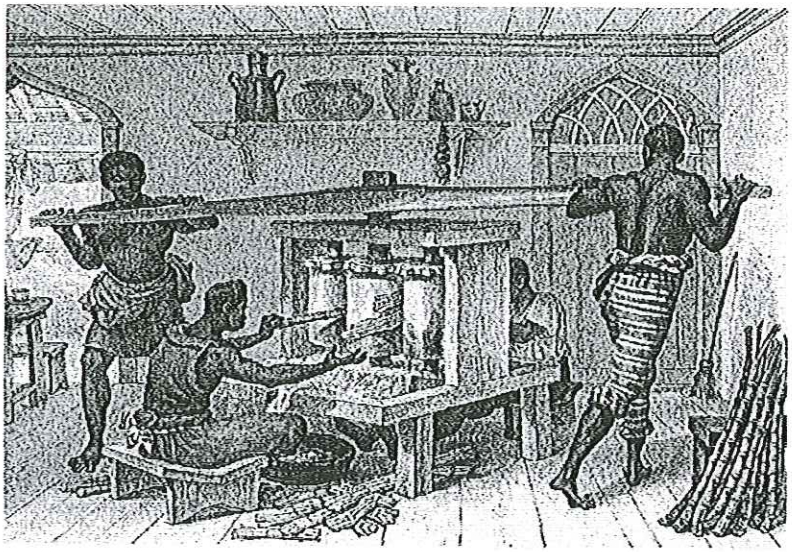


**FIGURA 2.2 – Moenda à tração humana: Ilustração de Jean B. Debret (LEÃO, 2002)**

### 2.1.3 – DATAS RELEVANTES LIGADAS À PRODUÇÃO DE AÇÚCAR E ÁLCOOL

O Brasil, ao longo de sua história, foi se identificando com os produtos da cana de açúcar. O final do século passado foi marcado por fatos importantes para sua expansão no Brasil, mas, também, por crises que abalaram o setor de forma dura. A formação do pró-álcool e a saída do governo do controle de cotas e preços são exemplos mais marcantes desses fatos.

Neste item, relacionam-se as datas mais relevantes e pitorescas, desde a origem da cana, passando pela sua evolução no Brasil, até os dias atuais.

**TABELA 2.1 – Datas relevantes (LEÃO, 2002)**

| DATA | EVENTO |
|---|---|
| Há 12000 anos | Domesticação da cana de açúcar na Nova Guiné e expansão na Polinésia. |
| Há 3000 anos | Expansão da cultura na Península malaia, na Indochina e Baía de Bengala. |
| Século VI a.C. | O médico indiano Surusta, que teria vivido nessa época, cita cerca de 185 vezes em seus manuscritos o açúcar (charkara) de cana-de-açúcar, que servia de remédio, preparação de alimentos e bebidas espirituosas. |
| Ano 328 a.C. | Os companheiros de Alexandre Magno em sua expedição à Índia (Generais Nearco e Onesícrito) conhecem a "cana que dá mel sem auxílio das abelhas" e contam que a bebida feita com ela embriaga as pessoas. |
| Século III | A fabricação do açúcar era conhecida em certas regiões do Norte da Itália, sobretudo para ser utilizada como remédio. |
| Ano 640 | Início da expansão da cultura da cana-de-açúcar no Mediterrâneo, com a chegada dos Árabes. |
| Século IX | Primeira descrição escrita do processo de cultura e fabrico de açúcar na Índia. |

| DATA | EVENTO |
|---|---|
| Ano 1170 | O álcool é preparado medicinalmente em diversos países da Europa |
| Ano 1176 | A existência de uma prensa para processar a cana (massara) é referida em Palermo na Itália. |
| Século XII | Primeira referencia ao emprego de uma roda vertical no equipamento para fabricar açúcar na China. |
| Ano 1425 | O infante D. Henrique de Portugal encomenda mudas de cana-de-açúcar na Sicília e mandou o Duque de Funchal plantar no seu campo na Ilha de Madeira. |
| Ano 1480 | Envio das primeiras mudas de cana da Ilha da Madeira para a Ilha Gran Canara (Canárias), por ordem do governador D. Pedro de Vera. |
| Ano 1490 | Primeira referencia ao açúcar em Cabo Verde, colônia portuguesa. |
| Ano 1493 | A cana-de-açúcar chega nas Américas na segunda viagem de Cristóvão Colombo. |
| Ano 1516 | Construção do primeiro engenho de açúcar em La Espaniola (São Domingos), por Gonzalo Eanes Veloza. |
| Ano 1532 | Martin Afonso de Souza traz as primeiras mudas de cana-de-açúcar para o Brasil e funda, dois anos depois na Capitania de São Vicente (atual estado de São Paulo) o Engenho do Governador. |
| Ano 1535 | O capitão Jerônimo de Albuquerque funda o Engenho de Nossa Senhora da Ajuda, próximo a Olinda. |
| Ano 1573 | Inicia-se a fabricação de açúcar na Alemanha e, logo depois, na Inglaterra. |
| Ano 1650 | Surgem inovações técnicas na fabricação do açúcar com o desenvolvimento do "trem Jamaicano" na ilha de Jamaica. |
| 1751 | Introdução da cana de açúcar na Lousiania nos Estados Unidos. |
| 1789 | Antoine Lavoisier publica seu *Traité Elémentaire de Chimie* no qual descreve a fermentação como a divisão do açúcar em álcool e gás carbônico. |
| 1801 | Achard fabrica pela primeira vez o açúcar, a partir da beterraba na Baixa Silésia. |
| 1802 | Os imigrantes chineses iniciam a fabricação de açúcar na Ilha Lanai, no Havaí. |
| 1806 | Introdução do uso do "trem jamaicano" no Brasil, marcando o início da modernização da fabricação do açúcar. |
| 1810 | O químico e físico francês Joseph Louis Gay-Lussac (1718-1850) deduz as equações da fermentação alcoólica. |
| 1811 | O imperador Napoleão estabelece o bloqueio continental e promove a fabricação de açúcar de beterraba. |
| 1815 | Começa a funcionar na Ilha de Itaparica (Brasil) o primeiro engenho a vapor de propriedade de Pedro Antonio Cardoso. |
| 1822 | Introdução da máquina a vapor nos engenhos da Lousiana, (USA). |
| 1823 | Primeiras experiências de cultivo de cana-de-açúcar em Port Macquarie (Austrália). |
| 1830 | Descoberta da caldeira de *vaccumm*, por Norbet Rillius, de New Orleans (USA) |
| 1834 | S. Casey, de Lebanon, Maine, registra nos Estados Unidos a primeira patente para a fabricação de álcool como combustível para iluminação. |
| 1838 | Início da fabricação de papel a partir do bagaço da cana, na Martinica. |
| 1854 | Louis Pasteur descreve o processo de fermentação microbiana no açúcar de beterraba. |
| 1876 | O engenheiro Nikolaus A. Otto (1832-1891) desenvolve o motor de combustão interna, de quatro tempos, para gasolina, álcool ou gás. |

| DATA | EVENTO |
|---|---|
| 1877 | É fundado o engenho central (separação entre industria e atividades agrícolas, onde as produtoras contratavam o fornecimento de cana por cinco anos) Quissamã (Macaé-RJ), o primeiro do Brasil, pelo Conde Araruama. |
| 1879 | Descoberta da sacarina (açúcar sintético-concorrente do açúcar natural) e início da sua comercialização. |
| 1902 | A *Exposição Mundial de Paris*, na França, promove o álcool como combustível. |
| 1904 | Instalada a destilaria nacional na Itália (província de Ferrara), primeira fábrica italiana de álcool a partir de melaço. |
| 1910 | Construção da Estação Experimental de Campos para desenvolvimento de variedades de cana. |
| 1920 | A empresa norte-americana Standart Oil Co. (New Jersey) produz o álcool isopropílico, o primeiro petroquímico comercial. |
| 1929 | Hans von Euler-Chelpin (1873-1964) e Arthur Harden recebem o prêmio Nobel de química de 1929 por suas investigações sobre a fermentação de açúcar e as enzimas fermentativas. |
| 1931 | Automóveis do serviço público no Brasil, em todos os níveis, teriam que usar álcool anidro na gasolina na proporção de 10%. |
| 1933 | A crise na lavoura açucareira obriga o governo brasileiro a intervir no setor, criando o Instituto de Açúcar e Álcool (IAA).<br>Construção da primeira destilaria. |
| 1939 | Os japoneses fabricam açúcar a partir da batata doce. |
| 1941 | Teor mínimo 20 % de álcool anidro na gasolina. |
| 1942 | IAA atribui cotas e preços para o álcool. |
| 1976 | O Brasil aposta na fabricação do álcool combustível em larga escala, lançando o Programa Nacional do Álcool. |
| 1979 | Lançamento dos primeiros carros movido a álcool hidratado no Brasil. |
| 1985 | Vendas de até 96% de carros a álcool ao mês. |
| 1989/1990 | Faltas localizadas do álcool com impacto na credibilidade. |
| 1991 | Fechamento do IAA. |
| 1990/1994 | Implantação do sistema MEG – metanol (5%); etanol (60%) e gasolina (35%) que permitiu atender a demanda do etanol hidratado.<br>Importação do metanol.<br>Queda acentuada de venda do carro a álcool.<br>Queda vertiginosa do preço do petróleo.<br>Lançamento do Carro popular a gasolina (já existia o GM Corsa a álcool que não foi lançado). |
| 1996 | Portaria 64 liberação de preços do setor. Portarias 294, 102 e 275 adiam até 1999 |
| 1997 | Quebra do monopólio do Petróleo.<br>Criação do Conselho Interministerial do Açúcar e Álcool (CIMA) |
| 1999 | Fim da intervenção do governo na política sucroalcooleira do Brasil |

## 2.1.4 – SÍNTESE DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO ÁLCOOL

Os tipos mais comuns de álcool eram o etílico (etanol), fabricado a partir de colheitas agrícolas, especialmente grãos, e o metílico (metanol), conhecido como álcool da madeira, que pode ser produzido a partir da madeira ou do petróleo.

No Brasil, a introdução e evolução da lavoura de cana de açúcar desvendaram, ao longo dos anos, a grande viabilidade dessa cultura como matéria prima para a produção do etanol.

Basicamente a cana de açúcar é composta por fibra, água, açúcares e pequenas quantidades de sais. O açúcar contido na cana está na forma de moléculas de sacarose, glicose e frutose. Somente da sacarose pode-se produzir o açúcar da forma como é consumido para os fins doméstico e industrial, ou seja, na forma de cristais. Os açúcares não *cristalizáveis* (glicose e frutose) podem ser utilizados na fabricação do álcool. Eles saem do processo do açúcar, como um subproduto, na forma pastosa chamada de *mel fermentecível*.

Além da glicose e frutose, o caldo extraído da cana também é utilizado, diretamente, para a fabricação do álcool. O fluxograma da figura 2.3 abaixo mostra, sucintamente, as fases de fabricação do açúcar e do álcool.

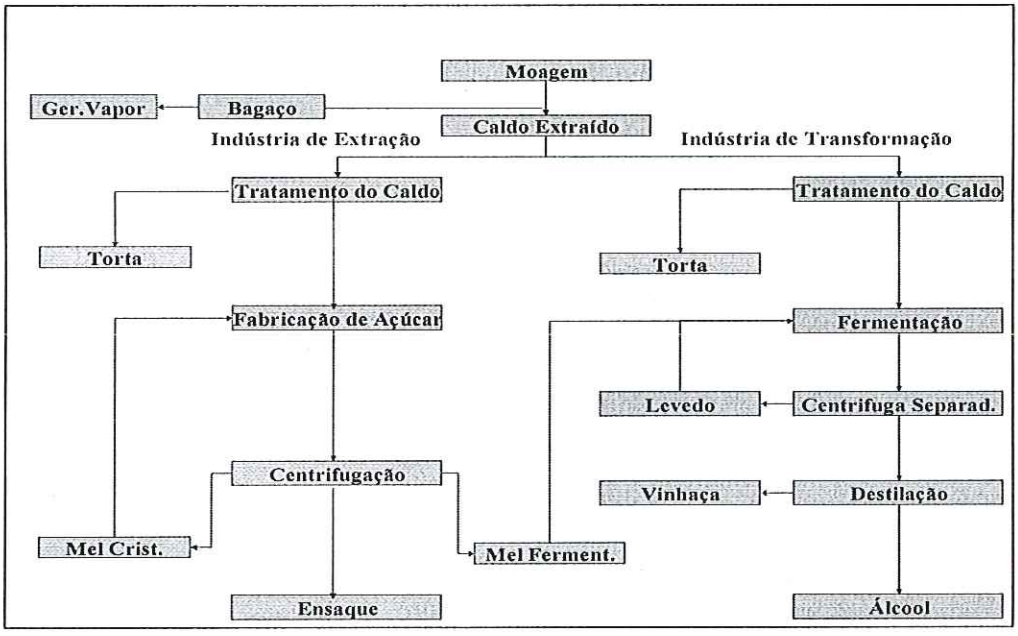



**FIGURA 2.3 – Fluxograma de fabricação de açúcar e álcool**

No critério de classificação, podemos colocar as usinas de açúcar como uma indústria de extração, uma vez que o açúcar já é produzido pela natureza, através da cana. Já

o álcool passa por um processo de fermentação e destilação e, conseqüentemente, podemos classificá-la como uma industria de transformação.

Na etapa da fermentação, a levedura é adicionada ao caldo da cana (e/ou açúcares não cristalizáveis), produzindo, através de seu *processo metabólico*, o álcool. O produto resultante, chamado mosto, contém, além do álcool, a água, matéria orgânica, sulfato de potássio e o próprio fermento.

A etapa seguinte consiste na separação do fermento, por centrifugação, o qual retorna ao processo de fermentação.

O produto, agora denominado vinho, é submetido ao processo de destilação simples, onde os vapores do álcool são condensados nas partes superiores das colunas da destilaria, resultando no álcool etílico hidratado que, como se sabe, é o álcool utilizado nos veículos, como carburante.

O subproduto da destilação, conhecido como "vinhaça", é transportado para as lavouras para uso como fertirrigação.

No processo de destilação simples não se consegue obter álcoois com teores maiores que o hidratado. Assim, o álcool etílico anidro é obtido por mais uma etapa de destilação do hidratado, porém com a adição de *etileno glicol*, que arrasta a água remanescente.

### 2.1.5 – O ÁLCOOL ETÍLICO COMO COMBUSTÍVEL DE MOTORES CICLO OTTO E COMO ADITIVO DA GASOLINA

A utilização do álcool como combustível não é uma idéia nova. Desde o final do século XIX já tinha sido aventada pelos cientistas, o seu uso. Quando surgiu o automóvel, os paises mais evoluídos já se viram com o problema de definir o tipo de combustível mais adequado. Nesse período a companhia Otto$Langen já produziu motores adaptáveis ao álcool.

Numerosos testes foram realizados na Europa e Estados Unidos durante os primeiros anos do século XX e constataram que álcool, embora tivesse menor poder calorífico que a gasolina, proporcionava uma compressibilidade maior, sem inflamar-se espontaneamente antes do momento oportuno (BOULLANGER, 1929 apud LEÃO, 2002).

LEÃO (2002) comenta que Henri Ford, em 1925, afirmou a um reporte do New York Times que o álcool etílico era o combustível do futuro.

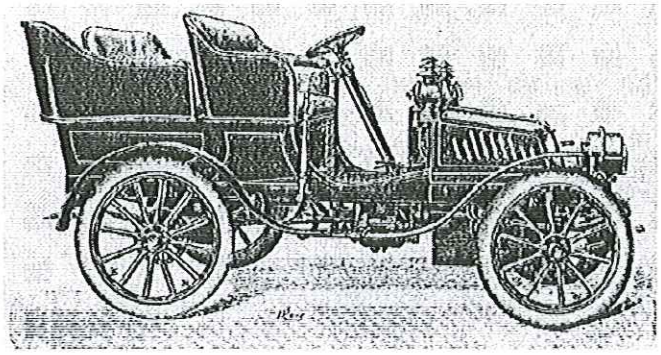


**FIGURA 2.4 – Automóvel movido a álcool, fabricado por volta de 1900 (LEÃO, 2002)**

Além disso, os primeiros defensores do álcool viram nele o potencial para revolucionar economias agrícolas, contribuindo para estabelecer o equilíbrio entre o meio rural e urbano.

Mas as dificuldades relacionadas com a produção, problemas técnicos ligados à partida a frio e corrosão em alguns componentes devido ao índice de acidez do álcool da época, abriram larga margem de vantagem para a gasolina e direcionaram as pesquisas, na obtenção de um álcool desidratado para ser adicionado a ela.

Thomas Midgley e Charles F. Kettering, da General Motors, nos anos que se seguiram à Primeira Guerra mundial, em 1922, buscavam soluções para o problema da detonação da gasolina quando submetida à elevação da taxa de compressão do motor, afirma LEÃO (2002). Suas pesquisas resultaram no aditivo chamado chumbo tetraetila, utilizado até a década de 80. Eles também concluíram, na época, a alta viabilidade do álcool como aditivo, mas como as dificuldades de produção ainda persistiam seu uso não chegou a concretizar-se.

No Brasil, quase 80 anos depois, com o advento do proálcool, o álcool para fins combustíveis, voltou a fazer parte das pesquisas. Renascia, assim o carro a álcool.

No início da produção em escala comercial, em 1979, o carro a álcool apresentava alguns problemas técnicos que logo foram sendo solucionados. Com eles, mais os incentivos financeiros, como preço do álcool a 65% da gasolina, IPVA (Imposto Sobre Propriedade de Veículos Automotores) reduzido, a melhor potência e torque por cilindrada, levaram as vendas deste tipo de veículo ao valor de 96% da soma total de todos os veículos, no ano de 1985, como pode ser visto na Tabela 2.2.

**TABELA 2.2 – Vendas de automóveis nacionais no Brasil (unidades)**

**(ANFAVE, 2003)**

| ANO | MOVIDOS A ÁLCOOL | MOVIDOS A GASOLINA | MOVIDOS A DIESEL | PARTICIPAÇÃO DO ÁLCOOL (%) |
|---|---|---|---|---|
| 1979 | 2271 | 826.462 | - | 0,3 |
| 1980 | 226.352 | 566.676 | - | 28,5 |
| 1981 | 128.679 | 318.929 | - | 28,7 |
| 1982 | 211.761 | 344.468 | - | 38,1 |
| 1983 | 538.401 | 70.098 | - | 88,5 |
| 1984 | 503.565 | 28.670 | - | 94,6 |
| 1985 | 578.177 | 23.892 | - | 96,0 |
| 1986 | 619.290 | 53.094 | - | 92,1 |
| 1987 | 387.176 | 23.084 | - | 94,4 |
| 1988 | 492.010 | 64.734 | - | 88,4 |
| 1989 | 345.598 | 220.984 | - | 61,0 |
| 1990 | 70.250 | 462.470 | 71 | 13,2 |
| 1991 | 129.939 | 453.642 | 291 | 22,1 |
| 1992 | 164.840 | 411.976 | 489 | 28,6 |
| 1993 | 227.289 | 622.137 | 1.136 | 26,7 |
| 1994 | 119.203 | 855.486 | 1.008 | 12,2 |
| 1995 | 32.808 | 1.073.783 | - | 3,0 |
| 1996 | 6.333 | 1.239.639 | - | 0,5 |
| 1997 | 924 | 1.360.182 | - | 0,1 |
| 1998 | 981 | 966.074 | - | 0,1 |
| 1999 | 9.851 | 888.733 | - | 1,1 |
| 2000 | 9.610 | 1.066.222 | - | 0,9 |
| 2001 | 14.979 | 1.161.578 | - | 1,3 |
| 2002 | 47.366 | 1.116..390 | - | 3,9 |

Paralelamente, o aditivo *chumbo tetraetila*, no Brasil, foi substituído pelo álcool anidro, em 1986. Esse aditivo já não mais atenderia aos requisitos de saúde, sendo considerado cancerígeno. Na maioria dos paises do restante do mundo ele foi substituído pelo MTBE, um produto derivado do próprio petróleo.

Nesse contexto, o Brasil tornava-se pioneiro: 4,5 milhões de veículos rodando com álcool puro e o restante da frota tendo-o como aditivo. Vencida as barreiras técnicas e de produção, o álcool se popularizou.

## 2.1.6 – A IMPORTÂNCIA DO ÁLCOOL PARA O BRASIL E O MUNDO

Além da questão econômica, citada no capítulo 1, o álcool tem, ainda, três componentes importantes que o faz estar na pauta de discussão do país.

*O primeiro é o estratégico*, por permitir a diminuição da dependência externa de petróleo e da balança de apagamentos, sendo o ponto principal em favor da criação do Proálcool no ano de 1975.

O álcool é uma fonte de energia proveniente do sol, sendo fixada à planta através da fotossíntese e, portanto, renovada a cada ciclo agrícola. Já o petróleo é uma mistura de inúmeros hidrocarbonetos, proveniente de matéria orgânica (também tiveram sua origem no sol) que foram armazenadas pela natureza sob condições apropriadas, por milhões de anos.

Segundo LEITE (2002) as reservas mundiais conhecidas de petróleo estão estimadas em 40 anos para os níveis de consumo atuais e 10 anos para o Brasil.

Por estarem concentradas nas áreas territoriais de poucos países, é um produto extremamente estratégico sob o ponto de vista econômico e geopolítico.

Atualmente o Brasil produz 1,50 milhões de barris de petróleo por dia, para um consumo de 1,84 milhões (ANP, 2002). A produção brasileira tem aumentado numa velocidade maior que o consumo e o álcool contribuiu significativamente para essa diferença.

Ao reduzir a dependência do petróleo importado, o Proálcool possibilitou ao país obter uma grande economia de divisas. Para um investimento total de US$ 11,28 bilhões, desde sua criação, tanto pelo setor público como pelo privado, o programa conseguiu economizar o valor, da ordem de US$ 33 bilhões. Cada barril equivalente de álcool produzido no período possibilita uma diminuição na dívida externa de US$75,60, desta forma, a economia de divisas obtida é de US$67,10 bilhões, considerando-se os juros pagos (CARVALHO, 1999 apud LEÃO, 2002).

*O segundo componente* está ligado ao fator social, uma vez que o setor sucroalcooleiro como um todo, gera um grande número de empregos diretos, mostrado na tabela 2.3.

**TABELA 2.3 – Empregos gerados no Brasil pelo setor sucroalcooleiro (FIPE/MB ASSOCIADOS, 2001 apud LEÃO, 2002)**

| ATIVIDADE | EMPREGOS DIRETOS | EMPREGOS INDIRETOS | TOTAL |
|---|---|---|---|
| Cana | 510.915 | 109.797 | 620.712 |
| Álcool | 50.867 | 421.580 | 472.447 |
| Açúcar | 51.226 | 395.990 | 447.216 |

*O terceiro* componente encontra forte pilar na questão ambiental. Os principais poluentes emitidos por um veículo são:

- **Monóxido de carbono (CO)** – indicador da atividade veicular, o monóxido de carbono é o principal e o mais conhecido dos poluentes emitidos na combustão dos veículos leves. Antes da implantação do *PROCONVE – Programa de Controle da poluição do Ar por Veículos Automotores*, em 1986, um veículo novo à gasolina emitia 22 gramas de monóxido de carbono (CO) por quilômetro rodado contra 16 gramas de um carro a álcool. De lá para cá essa emissão foi reduzida para 1,2 gramas para os carros a gasolina e 0,9 gramas para o carro a álcool (SZWARC, 1998).

- **Óxidos de Nitrogênio (NOx)** – carros a álcool e gasolina tem emissões similares (SZWARC, 1998).

- **Óxidos de Enxofre (SOx)** – componente natural do petróleo, o enxofre praticamente não está presente no álcool. Sua emissão nos carros a gasolina diminui muito com a adição de álcool (SZWARC, 1998).

- **Material Particulado (fuligem)** – a queima do álcool se dá de forma mais completa que a gasolina e a formação de partículas de carbono é praticamente inexistente (SZWARC, 1998).

- **Hidrocarbonetos (HC)** – a queima da gasolina resulta na emissão de uma grande quantidade de hidrocarbonetos como o benzeno, tolueno, xileno, 1-3 butadieno que são altamente tóxicos e reconhecidamente cancerígenos. A combustão do álcool apresenta uma quantidade e variedade significativamente menor dessas substancias e, conseqüentemente, menor agressividade ambiental (SZWARC, 1998).

- **Dióxido de Carbono ($CO_2$)** – formado em qualquer processo de combustão, o $CO_2$ não é considerado um poluente no nível mais baixo da atmosfera. Mas sua concentração em altas altitudes é responsável pelo conhecido *efeito estufa*. O álcool dá uma contribuição significativa na redução do efeito estufa, através da fotossíntese provocada pela área plantada de cana (SZWARC, 1998). A cana, que possui elevada capacidade fotossintética, absorve grandes volumes de gás carbônico, suplantando

aquele gerado pela queima da cana na colheita (pratica da queima da cana para facilitar a colheita), queima do bagaço nas caldeiras, na fermentação alcoólica, consumo de diesel nas operações agrícolas e também na queima de etanol em motores, como pode ser visto na tabela 2.4.

**TABELA 2.4 – Contribuição na agroindústria canavieira para a redução da taxa de $CO_2$ na atmosfera (MACEDO, 1998 apud LEÃO, 2002)**

| ATIVIDADE | QUANTIDADE DE $CO_2$ $10^6$t(equivalente)/ano |
|---|---|
| Uso de combustível fóssil na agroindústria | +1,28 |
| Emissões de metano (queima cana de açúcar)* | +0,06 |
| Emissões de $N_2O$ | +0,24 |
| Substituição da gasolina por álcool | -0,13 |
| Substituição de óleo combustível por bagaço (industria de alimentos e química) | -5,2 |
| Resultado líquido: seqüestro de carbono | -12,74 |

(*) Essas emissões estão sendo reduzidas gradualmente em obediência à legislação vigente

- **Aldeídos** – eles são formados, também, durante o processo de combustão e o álcool apresenta uma emissão superior à gasolina. Apesar disso ocorrer, o fato em si não é preocupante em função das quantidades emitidas serem pequenas e da ordem de 0,010 gramas por quilômetro rodado para o álcool e 0,007 gramas por quilometro rodado para a gasolina (SZWARC, 1998).

Ainda favoravelmente ao álcool, a sua adição à gasolina também resulta em efeitos positivos, com relação às emissões.

A tabela 2.5 mostra o efeito da simples adição de álcool anidro à gasolina.

**TABELA 2.5 –Impacto das emissões devido ao uso do AEAC como aditivo à gasolina na região metropolitana de São Paulo em 1996 (GEPLACEA, 1999 apud LEÃO, 2002)**

| COMBUSTÍVEL | MONOX. CARB. (CO) (1000 t/ano) | HIDROCARB. (HC) (1000 t/ano) | ÓX. DE NIT. (NOx) (1000 t/ano) |
|---|---|---|---|
| Gasolina | 2.127,5 | 181,5 | 62,2 |
| Gasolina + 5% Etanol | 1.978,6 | 176,0 | 63,4 |
| Gasolina + 22% Etanol | 1.276,5 | 108,9 | 68,4 |

Recentemente essa mesma questão ambiental tem provocado, em *nível mundial*, um movimento em favor do álcool. Esse movimento não vai necessariamente na direção do carro movido a álcool puro, mas sim na substituição do MTBE (produto adicionado à gasolina para aumentar a oxigenação e o poder antidetonante) da gasolina pelo álcool etílico anidro.

O MTBE (Metil-Terci-Butil-Éter) é um produto derivado do petróleo, fabricado a partir do metanol e isobuteno. Apesar de reduzir a fumaça (efeito da oxigenação), sua aceitação passou a ser questionada quando sua utilização foi vinculada à contaminação dos lençóis freáticos. As primeiras comprovações da contaminação foram divulgadas oficialmente pelo Laboratório Nacional Lawrence Livermore, da Califórnia (LEÃO, 2002).

Existem, ainda, muitas incertezas com relação aos riscos à saúde causado pela exposição crônica ao produto, mas sabe-se que, mesmo baixas concentrações de MTBE podem trazer à água um cheiro de "aguarrás", tornando-a imprópria para consumo. Outras pesquisas mostraram que o produto podia causar câncer em cobaias em laboratório, aumentando sua rejeição ao uso (LEÃO, 2002). Como alternativa vários estados norte-americanos, como Washington, Oregon, Colorado, Nevada, Arizona, Califórnia e Novo México já utilizam, principalmente, o etanol anidro como aditivo (LEÃO, 2002).

Todos os pontos citados anteriormente, ou seja, o mercado e suas variações de preços, a questão estratégica e as vantagens do álcool no quesito social e ambiental, sugerem que o desenvolvimento de um veículo que opere com ambos os combustíveis seria realmente interessante. No entanto, até que ponto os sistemas eletrônicos dos motores ciclo Otto poderiam se adaptar ao uso bi-combustível?

## 2.2 – COMBUSTÍVEIS

Combustível é toda substância química capaz de combinar quimicamente com outra em uma reação exotérmica, isto é, em que haja liberação de calor (PAGLIUSSO, 1984).

Segundo o estado físico, podemos classificá-los em líquidos, sólidos e gasosos. Aqui nos interessa os combustíveis líquidos, mais especificamente a gasolina e o álcool.

As principais propriedades dos combustíveis líquidos são:

### 2.2.1 – PODER CALORÍFICO

De acordo com PAGLIUSO (1984), poder calorífico é a quantidade de energia térmica liberada durante a queima de uma determinada massa de combustível. Assim, quanto mais alto for o poder calorífico maior a quantidade de energia que esse combustível possui. O poder calorífico é dividido, ainda, em superior e inferior:

- **Poder calorífico superior**
  É a quantidade de calor produzido por 1 kg de combustível, quando esse entra em combustão, em excesso de ar, e os gases de descarga são resfriados de modo que o vapor de água contido neles seja condensado.

- **Poder calorífico inferior**
  É a quantidade de calor produzido por 1 kg de combustível, quando esse entra em combustão, em excesso de ar, e os gases de descarga são resfriados até o ponto de ebulição evitando, assim, que a água contida na combustão seja condensada.

### 2.2.2 – PODER ANTIDETONANTE E O NÚMERO DE OCTANO

Segundo PENIDO F$^{Q}$ (1992) poder antidetonante é a capacidade que tem a mistura ar/combustível, de suportar elevados valores de compressão, sem que haja detonação.

Os combustíveis são classificados, segundo o poder antidetonante, pelo número de octano, ou octanagem. Quanto maior a octanagem maior o poder antidetonante.

Ao isoctano ($C_8H_{18}$), que tem um poder antidetonante elevado é atribuído o número "100", enquanto para o heptano ($C_7H_{16}$), que tem um baixo poder antidetonante é atribuído o número "0". Um combustível que fosse igual a uma mistura de 80% de isoctano e 20% de heptano, o número de octano desse combustível seria igual a 80.

A gasolina utilizada nos motores dos veículos, por exemplo, tem um número de octano de 78 a 85 dependendo de sua qualidade.

### 2.2.3 – NÚMERO DE CETANO

A principal exigência de um motor ciclo diesel, segundo JÓVAJ (1982) é a facilidade de inflamação do combustível. Esta propriedade se avalia pelo intervalo mínimo possível entre o instante que se começa a injetar o combustível e o instante que ele começa a entrar em combustão. Essa capacidade do combustível em iniciar a combustão é então quantificada pelo *número de cetano*. Quanto maior o número de cetano, menor será o retardo da ignição.

Ao cetano ($C_{16}H_{35}$), que é um hidrocarboneto parafênico com alta capacidade de queima (pequeno retardo de ignição), é atribuído o número "100" e ao Alfa-metil-naftaleno ($C_{11}H_{20}$), que é um hidrocarboneto com baixa capacidade de queima é atribuído o número "zero". Os demais combustíveis têm número de cetano determinados semelhantemente ao número de octanagem. O óleo diesel empregado em motores térmicos, por exemplo, tem o número de cetano compreendido entre 40 e 60.

### 2.2.4 – VOLATILIDADE

PENIDO F$^{Q}$ (1992) defini volatilidade como a porcentagem do combustível que se evapora a uma dada temperatura, quando a pressão atuante for de 0,1 MPa.

A volatilidade de um combustível é importante para um bom funcionamento de um motor. Seus efeitos podem ser sintetizados abaixo:

- **Volatilidade elevada significa:**
  - Perdas no reservatório por evaporação
  - Formação de bolhas de vapor no circuito de alimentação (*vapour lock*)
  - Formação de gelo em carburadores durante o inverno

- **Volatilidade baixa, por sua vez significa:**
  - Dificuldade na partida, que será tanto maior quanto menor a temperatura.
  - Alimentação não uniforme nos cilindros.
  - Diminuição da aceleração.
  - Maior tempo para que o motor atinja a temperatura normal de funcionamento.
  - Diluição dos óleos lubrificantes.
  - Maior formação de carbono nas câmaras de combustão e no céu do pistão.

## 2.3 – COMBUSTÃO

O processo de combustão constitui-se essencialmente na oxidação daqueles elementos, dentre os constituintes de um combustível, que são passíveis de serem oxidados.

Durante o processo de combustão, a massa de cada elemento permanece constante e, portanto, escrever as reações químicas e resolvê-las constitui-se basicamente na realização do balanço de massa entre reagentes e produtos.

As reações de combustão mais simples são aquelas envolvendo oxidação do carbono e a do hidrogênio. Para o carbono, tem-se a seguinte reação química:

$$C + O_2 \longrightarrow CO_2 \qquad (2.01)$$

Na combustão do hidrogênio o resultado da reação é a seguinte:

$$2H + O_2 \longrightarrow H_2O \qquad (2.02)$$

Quando um hidrocarboneto é queimado, ambos os elementos, carbono e hidrogênio são oxidados. Considere-se o metano ($CH_4$), o hidrocarboneto mais simples como exemplo, tem-se:

$$CH_4 + 2O_2 \longrightarrow 2H_2O + CO_2 \qquad (2.03)$$

Nota-se que o número de átomos do lado esquerdo das equações são iguais aos do lado direito. Na grande maioria dos processos de combustão, o ar, que é uma mistura gasosa, é utilizado como suprimento de oxigênio, introduzindo, portanto, novos elementos no processo. Na maioria dos cálculos, a composição do ar em base molecular é de 78% de nitrogênio, 21% de oxigênio e 1% de argônio.

O nitrogênio e o argônio não tomam parte da oxidação em situações normais. Nos processos em que se utiliza o ar como elemento fornecedor de oxigênio, o argônio é desconsiderado e a composição molar do ar passa a ser de 21% de oxigênio e 79% de nitrogênio. Assim para cada mol de $O_2$, 79/21 = 3,76 moles de $N_2$ estarão presentes.

Considerando novamente a combustão do metano, dessa vez com a utilização de ar como suprimento de oxigênio, a reação química agora será:

$$CH_4 + 2O_2 + 2 \,.\, 3{,}76N_2 \longrightarrow CO2 + 2H_2O + 7{,}52N_2 \qquad (2.04)$$

### 2.3.1 – CARACTERÍSTICAS DO ÁLCOOL ETÍLICO ANIDRO CARBURANTE, ÁLCOOL ETÍLICO HIDRATADO CARBURANTE E GASOLINA

A tabela a seguir mostra as características da gasolina, AEAC e AEHC:

**TABELA 2.6 – Características físico-química de combustíveis (Adaptado de PENIDO Fº, 1991)**

| PROPRIEDADE | GASOLINA | AEAC | AEHC |
|---|---|---|---|
| Fórmula química | $C_8H_{17}$ * | $C_2H_5OH$ | $C_2H_5OH$-$H_2O$ |
| Peso molecular (u.m.a) | 114 | 46,13 | 47,42 |
| Densidade a 20 °C (kg/l) | 0,73 | 0,79 | 0,81 |
| Relação Estequiométrica A/C ** | 15,12 | 10,46 | 8,72 |
| % Carbono em peso | 84 | 52 | 47 |
| % Hidrogênio em peso | 16,0 | 13,0 | 12,0 |
| % Oxigênio em peso | - | 35 | 34 |
| Início temperatura ebulição (°C) | 40,0 | 78,3 | 78,2 |
| Término temperatura ebulição (°C) | 250 | 78,3 | 78,2 |
| Calor latente de Vaporiz. (kcal/kg) | 90 | 216 | 237 |
| Temperatura de auto ignição (°C) | 367 | 550 | 580 |
| Poder calorífico inferior (kcal/kg) | 10500 | 6400 | 5952 |
| Calor combustão da mistura quimicamente correta (kcal/kg) | 0,860 | 0,815 | 0,815 |
| Índice octano método Research | 73 | 106 | 110 |
| Índice octano método Motor | 73 | 89 | 92 |
| Índice octano calculado | 73 | 158 | 162 |
| Fator de acréscimo do número de moléculas durante a combustão | 1,055 | 1,063 | 1,077 |
| Efeito de superalimentação | 1,68 | 7 | 9 |
| Graus GL (volume) | - | 99,5 | 95 |
| Graus INPM (peso) | - | 99,2 | 92,7 |

* OBERT (1968) - ver item 2.3.2.1

** Valores calculados pelo procedimento de cálculo do item 2.3.2 e colocados no anexo A

## 2.3.2 – RELAÇÃO AR/COMBUSTÍVEL (A/C)

Um parâmetro importante aplicado aos processos de combustão é a relação A/C. Ela é, normalmente, expressa em massa, embora por vezes seja utilizada a base molar.

PAGLIUSO (1984) chama de "ar teórico" a menor quantidade possível de ar, tal que possa fornecer o oxigênio necessário para a oxidação do carbono, hidrogênio, ou qualquer outro elemento oxidável no combustível, de forma completa. Quando se obtêm combustão completa utilizando o ar teórico, os produtos de combustão não contêm oxigênio livre. Reações desse tipo são também chamadas de *"Estequiométricas"*.

Nas aplicações praticas, a combustão completa dificilmente é obtida. Para otimização de uma reação de combustão utiliza-se uma quantidade de ar acima do ar teórico, chamada de "porcentagem do ar teórico". Dessa forma, 150 por cento de ar teórico quer dizer que 1,5 vez de ar teórico esta sendo fornecido. Ao examinar-se novamente a combustão do metano (equação 2.04), desta vez com 150% de ar teórico, obtêm-se:

$$CH_4 + 1{,}5\ .\ (2O_2) + 1{,}5\ .\ (2\ .\ 3{,}76N_2) \longrightarrow CO_2 + 2H_2O + O_2 + 11{,}28N_2 \qquad (2.05)$$

Quando a relação A/C se refere ao ar teórico é chamada de *relação A/C teórica ou estequiométrica.*

Para um caso em que a quantidade de ar fornecida à combustão seja menor que a teórica, a combustão é incompleta. Se a diferença entre a quantidade de ar fornecida e a quantidade de ar teórica for pequena, parte do carbono não terá o oxigênio necessário para reagir e formar o $CO_2$, e então algum CO estará presente nos produtos de combustão. Se esta diferença for mais elevada, algum hidrocarboneto poderá estar presente entre os produtos de combustão. Mesmo na combustão com excesso de ar, o monóxido de carbono (CO) pode estar presente em uma quantidade que varia com uma série de fatores, entre os quais: as condições do combustível, isto é, seu grau de divisão ou pulverização, se for sólido, ou sua atomização, caso seja líquido, a efetividade da mistura entre o combustível e o ar, a turbulência e outros.

JOVAJ (1982) define o fator de excesso de ar ou fator lâmbda como a relação entre a quantidade de ar admitida pelo motor e a quantidade de ar teórica para queimar todo o combustível.

$\lambda$ = Quantidade de ar admitida pelo motor / quantidade de ar teórico

O fator $\lambda$ também pode ser expresso, segundo RIBBENS (1992) como:

$\lambda$ = A/C real / A/C estequiométrica

Portanto:

$\lambda < 1$ → mistura rica (deficiência de ar);

$\lambda = 1$ → mistura estequiométrica;

$\lambda > 1$ → mistura pobre (excesso de ar).

Uma metodologia para se calcular a relação A/C é descrita por FERGUSON (1986). Essa metodologia calcula a relação A/C através do equacionamento dos coeficientes dos átomos dos componentes envolvidos na equação de combustão. Seja a equação de combustão genérica mostrada a seguir:

$$C_\alpha H_\beta O_\gamma N_\delta + \epsilon(0{,}21O_2 + 0{,}79N_2) \xrightarrow{\text{centelha}} \text{Energia} + \lambda_1 CO_2 + \lambda_2 H_2O + \lambda_3 N_2 \qquad (2.06)$$

em que:

$$\lambda_1 = \alpha \qquad (2.07)$$

$$\lambda_2 = \beta / 2 \qquad (2.08)$$

$$\epsilon = (\alpha + 0{,}25\beta - 0{,}5\gamma) / 0{,}21 \qquad (2.09)$$

$$\lambda_3 = \delta/2 + 0{,}79\epsilon \qquad (2.10)$$

Note que o $\lambda$ utilizado aqui não é o mesmo do fator de excesso de ar descrito anteriormente.

O princípio é juntar todos os átomos semelhantes dos diversos componentes químicos do combustível do lado esquerdo da equação em um único componente e, a partir daí determina-se os coeficientes.

A relação A/C, de acordo com FERGUSON (1986) fica:

$$A/C = [28{,}9644 \cdot (\alpha + 0{,}25\,\beta - 0{,}5\,\gamma)] / [0{,}21 \cdot (12{,}01\,\alpha + 1{,}008\,\beta + 16\,\gamma + 14{,}01\,\delta)] \qquad (2.11)$$

### 2.3.2.1 – RELAÇÃO AR/COMBUSTÍVEL PARA A GASOLINA

A gasolina é uma mistura de inúmeros hidrocarbonetos cuja propriedade, segundo OBERT (1968), pode ser aproximada pelo $C_8H_{17}$. PENIDO F$^{o}$ (1991) por sua vez, considera o $C_9H_{20}$ (nonano) como o hidrocarboneto que representa as propriedades da gasolina. Adotaremos aqui, o $C_8H_{17}$ como representante.

Assim, da fórmula química da gasolina calculam-se os coeficientes, pelas equações (2.07), (2.08), (2.09) e (2.10). Substituindo-se esses coeficientes na equação (2.06) tem-se a equação de combustão da gasolina:

$$C_8H_{17} + 58{,}33\,(0{,}21O_2 + 0{,}79N_2) \xrightarrow{\text{centelha}} \text{Energia} + 8{,}5H_2O + 8CO_2 + 46{,}08N_2 \qquad (2.12)$$

A relação A/C é calculada pela equação (2.11) e mostrado no Anexo A.

A maneira tradicional de se calcular a relação A/C é através da relação entre a massa de ar e a massa do combustível, a partir da equação de combustão. O cálculo é mostrado abaixo e será realizado somente para a gasolina, com exemplificação. Demais combustíveis, o cálculo da razão A/C será feito pelo método de FERGUSON (1986).

- **Calculo da massa do ar**

Para o cálculo da massa do ar considera-se a presença do argônio

$m(ar) = n(ar) \,.\, M(ar)$

$M(ar) = 0{,}21M(O_2) + 0{,}78M(N_2) + 0{,}01M(Ar)$

em que:

m(ar) = massa de ar;

n(ar) = número de moles do ar;

M(ar) = massa molecular.

O número de moles do ar é a soma do número de moles do oxigênio e do nitrogênio (número de moles é o coeficiente do componente químico), uma vez que o ar é uma mistura gasosa destes dois elementos.

$m(ar) = 58{,}33 \,.\, M(ar)$

- **Cálculo de massa da Gasolina**

$m(C_8H_{17}) = n(C_8H_{17}) \cdot M(C_8H_{17})$

$M(C_8H_{17}) = 8 \cdot M(C) \cdot 17M(H)$

em que:

$m(C_8H_{17})$ = massa da gasolina;

$n(C_8H_{17})$ = número de moles da gasolina;

$M(C_8H_{17})$ = massa molecular da gasolina;

M(C) = massa molecular do carbono;

M(H) = massa molecular do hidrogênio.

- **Cálculo da relação A/C**

$A/C = m(ar) / m(C_8H_{17})$

### 2.3.2.2 – RELAÇÃO AR/COMBUSTÍVEL PARA A GASOLINA COMERCIAL BRASILEIRA (GASOHOL)

Para o caso da gasolina comercial brasileira que é uma mistura de 75% de gasolina e 25% de álcool etílico anidro, chamada de gasohol, a junção dos átomos em um único componente fica:

$$0{,}75C_8H_{17} + 0{,}25C_2H_5OH = C_{6,5}H_{14,25}O_{0,25} \quad (2.13)$$

Assim, calculando-se coeficientes, pelas equações (2.07), (2.08), (2.09) e (2.10), substituindo-se na equação (2.06) e fazendo o equilíbrio de massa tem-se a equação de combustão do gasohol:

$$0{,}75C_8H_{17} + 0{,}25C_2H_5OH + 47{,}321(0{,}21O_2 + 0{,}79N_2) \xrightarrow{\text{centelha}} \text{Energia} + 7{,}125H_2O + 6{,}5CO_2 + 37{,}384N_2 \quad (2.14)$$

Ajustando o coeficiente do gasohol para base molar 1 tem-se:

$$C_8H_{17} + 0{,}333C_2H_5OH + 63{,}095\ (0{,}21O_2 + 0{,}79N_2) \xrightarrow{\text{centelha}} \text{Energia} + 9{,}500H_2O + 8{,}667CO_2 + 49{,}845N_2 \quad (2.15)$$

A relação A/C é calculada pela equação (2.11) e mostrado no Anexo A.

### 2.3.2.3 – RELAÇÃO AR/COMBUSTÍVEL PARA O ÁLCOOL ETÍLICO HIDRATADO CARBURANTE

O álcool etílico hidratado (AEHC) é uma mistura de 92,7% de álcool e 7,3% de água. A junção dos átomos em um único componente fica:

$$0{,}927C_2H_5OH + 0{,}073H_2O = C_{1{,}854}H_{5{,}708}O \quad (2.16)$$

Assim, calculando-se coeficientes, pelas equações (2.07), (2.08), (2.09) e (2.10), substituindo-se na equação (2.06) e fazendo o equilíbrio de massa tem-se a equação de combustão do AEHC:

$$0{,}927C_2H_5OH + 0{,}073H_2O + 13{,}243\,(0{,}21O_2 + 0{,}79N_2) \xrightarrow{\text{centelha}} \text{Energia} + 2{,}854H_2O + 1{,}854CO_2 + 10{,}457N_2 \quad (2.17)$$

Ajustando o coeficiente do AEHC para base molar 1 tem-se:

$$C_2H_5OH + 0{,}079H_2O + 14{,}286\,(0{,}21O_2 + 0{,}79N_2) \xrightarrow{\text{centelha}} \text{Energia} + 3{,}079H_2O + 2CO_2 + 11{,}280N_2 \quad (2.18)$$

A relação A/C é calculada pela equação (2.11) e mostrado no Anexo A.

### 2.3.2.4 – RELAÇÃO AR/COMBUSTÍVEL PARA O ÁLCOOL ETÍLICO ANIDRO CARBURANTE

O álcool etílico anidro (AEAC) é uma mistura de 99,2% de álcool e 0,8% de água. A junção dos átomos em um único componente fica:

$$0{,}992C_2H_5OH + 0{,}008H_2O = C_{1{,}984}H_{5{,}968}O \quad (2.19)$$

Assim, calculando-se coeficientes, pelas equações (2.07), (2.08), (2.09) e (2.10), substituindo-se na equação (2.06) e fazendo o equilíbrio de massa tem-se a equação de combustão do AEAC:

$$0{,}992C_2H_5OH + 0{,}008H_2O + 14{,}171\ (0{,}21O_2 + 0{,}79N_2) \xrightarrow{\text{centelha}} \text{Energia} + 2{,}984H_2O + 1{,}984CO_2 + 11{,}195N_2 \quad (2.20)$$

Ajustando-se o coeficiente do álcool para base molar 1 tem-se:

$$C_2H_5OH + 0{,}008H_2O + 3{,}000O_2 + 11{,}285N_2 \xrightarrow{\text{centelha}} \text{Energia} + 3{,}008H_2O + 2CO_2 + 11{,}285N_2 \quad (2.21)$$

A relação A/C é calculada pela equação (2.11) e mostrado no Anexo A.

### 2.3.2.5 – RELAÇÃO AR/COMBUSTÍVEL PARA UMA MISTURA GENÉRICA DE GASOHOL E ÁLCOOL ETÍLICO HIDRADATADO CARBURANTE

Para uma mistura qualquer de gasohol e AEHC a equação das frações de cada componente é dada por:

$$f \,.\, \text{gasohol} + (1 - f) \,.\, \text{AEHC} \quad (2.22)$$

em que:

f = fração de gasohol;

(1 – f) = fração de AEHC

Substituindo-se a equação (2.13) e (2.16) em (2.22) e realizando a junção dos átomos em um único componente tem-se:

$$f \,.\, (C_{6,5}H_{14,25}O_{0,25}) + (1 - f) \,.\, C_{1,854}H_{5,708}O = C_{1,854 + f\,.\,4,646}H_{5,708 + f\,.\,8,542}O_{1 - 0,75\,.\,f} \quad (2.23)$$

Assim, calculando-se coeficientes, pelas equações (2.07), (2.08), (2.09) e (2.10), substituindo-se na equação 2.06 a equação de combustão da mistura gasohol e AEHC fica:

$$C_{1,854+\,f.\,4,646}H_{5,708+\,f.\,8,542}O_{1-\,f.\,0,75} + (13,243 + f\,.\,34,079)\,.\,(0,21\,.\,O_2 + 0,78\,.\,N_2) \xrightarrow{\text{centelha}}$$
$$\text{Energia} + (1,854 + f\,.\,4,646)\,CO2 + (2,854 + f\,.\,4,271)\,H_2O + (10,330 + 26,582) \qquad (2.24)$$

A relação A/C é calculada pela equação (2.11) e fica:

$$A/C = (383,572 + f\,.\,987,136) / (44,020 + f\,.\,52,409) \qquad (2.25)$$

## 2.4 – DESEMPENHO DE MOTORES CICLO OTTO

Este item, de acordo com o objetivo traçado no início do trabalho, tem o papel de fazer uma comparação técnica do AEHC como combustível alternativo, em um motor originalmente construído para ser alimentado por gasohol, determinando o comportamento das principais características do motor.

O projeto de um motor, obviamente, contempla o tipo de combustível que irá ser queimado para gerar a energia. Diferentes tipos de combustível exigem diferentes relações A/C, ponto e curva de ignição, taxa de compressão, entre outros e a correta preparação do motor define o potencial de extração da energia desse combustível.

Neste item faz-se uma análise teórica da influência do tipo de combustível no desempenho do motor Fiat Fiasa 1.0, operando com gasohol e AEHC. No caso do AEHC a análise será realizada para a condição em que o motor *não foi preparado* para receber o novo combustível. Condição esta que, conforme citado anteriormente, tem sido uma pratica utilizada por muitos usuários de veículos.

A preparação do motor contempla principalmente a alteração na *taxa de compressão* que é uma mudança geométrica (alteração nas dimensões da câmara de combustão) na característica do motor e, portanto, de difícil irreversibilidade. As demais alterações são, relativamente, bem realizadas pela autoadptatividade do sistema eletrônico de controle e pela alteração da programação da EPROM do sistema de controle eletrônico.

A análise das influências será realizada sobre os seguintes quesitos:

- Rendimento global;
- Potência;
- Torque;
- Consumo específico.

### 2.4.1 – RENDIMENTO GLOBAL

PENIDO F$^{O}$ (1991) calcula o rendimento global $\eta$ de um motor pela expressão:

$$\eta = \eta_{te} \cdot \eta_{i} \cdot \eta_{m} \qquad (2.26)$$

em que:

$\eta_{te}$ = rendimento térmico;

$\eta_{i}$ = rendimento indicado;

$\eta_{m}$ = rendimento mecânico.

Ainda segundo PENIDO F$^{O}$ (1991), o rendimento global pode ser obtido pela seguinte expressão:

$$\eta = 632 / (C_s \cdot P_{ci}) \qquad (2.27)$$

em que:

$C_s$ = consumo específico [kg/(CV.h)];

$P_{ci}$ = poder calorífico inferior (kcal/kg).

#### 2.4.1.1 – RENDIMENTO TÉRMICO

Para PENIDO F$^{O}$ (1991) o rendimento térmico de um motor ciclo Otto é a relação entre o calor que efetivamente se transforma em trabalho útil e o calor equivalente ao trabalho que poderia ser obtido pela queima do combustível. Em outras palavras, rendimento térmico é a diferença entre a energia contida no combustível, que gera trabalho na fase de expansão dos gases de combustão e a energia gasta para comprimir a mistura ar/combustível. Ele é obtido pela expressão:

$$\eta_{te} = 1 - 1/\rho^{(K-1)} \qquad (2.28)$$

em que:

$\eta_{te}$ = rendimento térmico;

$\rho$ = taxa de compressão;

K = razão entre os calores específicos, a volume constante e a pressão constante.

### 2.4.1.2 – RENDIMENTO INDICADO

PENIDO F$^{O}$ (1991) define rendimento indicado como sendo a relação entre o trabalho realizado pelo motor no ciclo indicado (ciclo real representado no diagrama PV) e o trabalho realizado pelo motor no ciclo teórico. Ele é obtido pela expressão:

$$\eta_i = T_i / T \tag{2.29}$$

em que:

$\eta_i$ = rendimento indicado;

$T_i$ = trabalho realizado pelo motor no ciclo indicado;

T = trabalho realizado pelo motor no ciclo teórico.

PENIDO F$^{O}$ (1991) define, ainda, o rendimento termodinâmico como sendo o produto entre o rendimento térmico e o rendimento indicado.

O que PENIDO F$^{O}$ (1991) chamou de rendimento termodinâmico no item anterior é chamado de rendimento indicado por JOVAJ (1982). De acordo com JOVAJ (1982), o rendimento indicado é a relação entre o calor transformado em trabalho mecânico no ciclo indicado (ciclo real representado no diagrama PV) e o calor introduzido no motor com o combustível.

Por outro lado JOVAJ (1982) define o rendimento relativo, que é chamado de rendimento indicado por PENIDO F$^{O}$ (1991), como sendo:

$$\eta_o = \eta_i / \eta_{te} \tag{2.30}$$

em que:

$\eta_o$ = rendimento relativo;

$\eta_i$ = rendimento indicado de JOVAJ (1982) ou rendimento termodinâmico de PENIDO F$^{O}$ (1991);

$\eta_{te}$ = rendimento térmico.

Realizando aqui, também, um jogo de palavras, rendimento indicado de PENIDO Fº (1991) ou rendimento relativo de JOVAJ (1982) é a porcentagem do trabalho útil (trabalho extraído do combustível dependendo do rendimento térmico) que é transformado em trabalho mecânico no ciclo real. Os fatores que incidem sobre o rendimento indicado, segundo PENIDO Fº (1991), são:

- **Combustão incompleta**

  Ocasionado por ignição antecipada, atrasada ou incompleta.

- **Troca de calor**

  Durante a combustão é necessário retirar das paredes dos cilindros, uma certa quantidade de calor, para que não ocorra fusão dos componentes. Quanto maior for essa quantidade de calor, menor será o rendimento indicado.

### 2.4.1.3 – RENDIMENTO MECÂNICO

Rendimento mecânico é definido por OBERT (1968) como a relação entre a potência fornecida pelo motor e a potência indicada.

$$\eta_m = Ne / Ni \qquad (2.31)$$

em que:

$\eta_m$ = Rendimento mecânico;

Ne = Potência efetiva (CV);

Ni = Potência indicada (CV).

A potência efetiva e indicada será definida no item seguinte.

Lançando mão novamente do jogo de palavras, rendimento mecânico é porcentagem do trabalho mecânico do ciclo real que é transformado em trabalho mecânico no eixo do motor. Os fatores que influenciam no rendimento mecânico são, segundo PENIDO Fº (1991):

- Força de atrito que aparece entre os órgãos móveis;

- A potência absorvida pelos órgãos auxiliares (bomba d'água, bomba de óleo lubrificante, etc.);
- A potência absorvida no bombeamento (aspiração e expulsão dos gases de combustão).

## 2.4.2 – POTÊNCIA

A potência de um motor é uma de suas características mais importantes. Defini-se, para cada uma das etapas de transformação de energia do motor, um tipo de potência.

Faz-se aqui uma breve explicação sobre cada uma delas dando ênfase, somente, à potência efetiva que é a potência que será utilizada nos experimentos.

### 2.4.2.1 – POTÊNCIA INDICADA - Ni

OBERT (1968) defini a potência indicada como a potência total realmente desenvolvida no interior do cilindro. Ela é obtida pelo ciclo indicado.

### 2.4.2.2 – POTÊNCIA ABSORVIDA PELAS RESISTÊNCIAS PASSIVAS – Np

Segundo OBERT (1968) é a potência gasta para vencer o atrito das partes móveis como mancais, pistões, bombas de óleo e combustível e outras partes mecânicas e propiciar o bombeamento dos gases de escape e aspiração.

### 2.4.2.3 – POTÊNCIA EFETIVA - Ne

A potência efetiva é definida por PENIDO F$^{Q}$ (1991) como sendo a potência gerada no eixo do motor. Segundo PENIDO F$^{Q}$ (1991) a expressão matemática que determina a potência efetiva de um motor de combustão interna é:

$$Ne = 4{,}7444 \cdot 10^{-5} \cdot \eta_i \cdot \eta_{te} \cdot \eta_m \cdot \gamma_m \cdot \eta_v \cdot P_{ci} / (1+\mu \cdot R) \cdot V \cdot n \qquad (2.32)$$

em que:

Ne = potência efetiva do motor (CV);

$\eta_i$ , $\eta_{te}$ , $\eta_m$ = os rendimentos, indicado, térmico e mecânico, respectivamente;

$\gamma_m$ = densidade da mistura mais resíduos (kg/m$^3$);

$\eta_v$ = rendimento volumétrico;

$P_{ci}$ = poder calorífico inferior do combustível (kcal/kg);

$\mu$ = massa de ar necessário para a combustão de 1 kg de combustível;

R = fator de correção da mistura no caso do motor, durante o funcionamento, não ser alimentado por uma mistura estequiométrica. Os sistemas eletrônicos mantêm mistura estequiométrica e, portanto R = 1;

V = volume total dos cilindros (cilindrada) expressa em litros;

n = rotação expressa em rpm.

A potência efetiva dos motores é medida por aparelhos chamados dinamômetros, que medem o torque do motor em função da rotação. A potência então é dada pelo produto do torque pela rotação:

Ne = torque x rotação (2.33)

- **RENDIMENTO VOLUMÉTRICO**

JOVAJ (1982) define rendimento volumétrico como a relação entre o peso de ar que se encontra no cilindro no início da compressão e o peso teórico que poderia estar, nas condições atmosféricas de admissão. O rendimento volumétrico não é parte do rendimento global. Ele tem efeito somente sobre a potência do motor.

Se a aspiração fosse perfeita, todo espaço liberado pelo pistão ao se deslocar do ponto morto superior para o ponto morto inferior, seria ocupado pela mistura. Porém, devido aos fatores relacionados a seguir, o volume de ar admitido é sempre menor. Os fatores que influenciam no rendimento volumétrico, segundo PENIDO F$^{O}$ (1991) são:

- Perdas de carga no conduto de admissão;
- Tempos de abertura, fechamento e cruzamento de válvulas;
- Temperatura da mistura;
- Pressão barométrica;
- Porcentagem de gás queimado residual contido na mistura;
- Inércia da mistura.

A expressão que determina o valor do rendimento volumétrico é dada por PENIDO F$^{O}$ (1991) como sendo:

$$\eta_v = Q_m / Q_o \qquad (2.34)$$

em que:

$\eta_v$ = rendimento volumétrico;

$Q_m$ = vazão do ar aspirado ($m^3/h$) = grandeza medida por instrumento

$Q_o$ = vazão teórica máxima que o motor pode aspirar ($m^3/h$)

A vazão teórica máxima $Q_o$ por sua vez é calculado por:

$$Q_o = 0{,}030 \cdot n \cdot V \qquad (2.35)$$

em que:

n = rotação (rpm)

V = cilindrada total do motor em litros

Substituindo-se (2.35) em (2.34) tem-se

$$\eta_v = Q_m / (0{,}030 \cdot n \cdot V) \qquad (2.36)$$

### 2.4.2.4 – POTÊNCIA CORRIGIDA –$Ne_c$

PENIDO F$^{O}$ (1991) afirma que a potência de um motor está diretamente relacionada com as condições atmosféricas. Os fatores atmosféricos que influenciam na potência do motor são:

- Pressão barométrica;
- Teor de umidade do ar;
- Temperatura ambiente.

Segundo PENIDO F$^{O}$ (1991) a norma ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) MB-372, regulamenta que a correção de potência para motores ciclo Otto segue a expressão:

$$Ne_c = Ne \cdot 736 / Pi \cdot ((ta + 273)/303)^{1/2} \quad (2.37)$$

em que:

$Ne_c$ = potência corrigida pela ABNT (CV);

Ne = potência efetiva (CV);

Pi = pressão atmosférica (mmHg);

ta = temperatura ambiente (°C).

A ABNT não considera a umidade relativa do ar para correção da potência.

### 2.4.3 – TORQUE

O torque de um motor, de acordo com PENIDO F° (1991), pode ser obtido pela seguinte expressão:

$$Mt = 0{,}039 \cdot \eta_i \cdot \eta_{te} \cdot \eta_m \cdot P_{ci} / (1+ \mu \cdot R) \cdot \gamma_m \cdot \eta_v \cdot V \quad (2.38)$$

em que:

Mt = torque do motor (kgf.m)

Demais variáveis foram definidas no item 2.3.2.2.

### 2.4.4 – CONSUMO ESPECÍFICO

PENIDO F° (1991) diz que o consumo de combustível efetuado por um motor é inversamente proporcional ao poder calorífico do combustível e ao rendimento global e a expressão que relaciona essas variáveis é:

$$C_s = 632 / (\eta \cdot P_{ci}) \quad (2.39)$$

onde:

$C_s$ = consumo específico [kg/(CV.h)];

$\eta$ = rendimento global;

$P_{ci}$ = poder calorífico inferior (kcal/Kg);

## 2.5 – PROBLEMA COM A PARTIDA QUANDO FRIO

Um problema de se utilizar álcool combustível nos motores ciclo Otto é a dificuldade de partida quando a temperatura ambiente for menor que 10°C, diz PENDIDO Fº (1991). Isso acontece por causa de duas característica do álcool:

- Alto calor latente de vaporização que favorece a condensação do álcool no coletor, dificultando seu acesso à câmara de combustão, ou caso acesse, ele poderá estar na forma liquida não apresentando susceptibilidade à combustão.
- Baixa volatilidade e conseqüente dificuldade de início de combustão.

O problema foi sanado com o conhecido sistema de partida a frio que injeta gasolina quando a temperatura estiver abaixo do valor descrito.

## 2.6 – MISCIBILIDADE DO ÁLCOOL NA GASOLINA

Um ponto importante para ser avaliado nas misturas de AEHC no gasohol, que vem sendo realizada pelos usuários (rabo de galo) é a questão da miscibilidade.

Segundo PENIDO Fº (1991), o AEAC é miscível na gasolina em qualquer porcentagem, porém a presença de água acima de um determinado valor provoca a separação da mistura. Também, segundo ele, à medida que se aumenta à porcentagem de álcool ou a temperatura, a mistura se torna mais estável, ou seja, mais tolerante à água.

Um estudo realizado por TUFAILE NE et al (1993), objetivando levantar isotermas de miscibilidade entre gasolina pura, álcool anidro e água, fora conduzido em temperaturas de 0,4°C a 30,3°C conforme pode ser visualizado na figura 2.5.

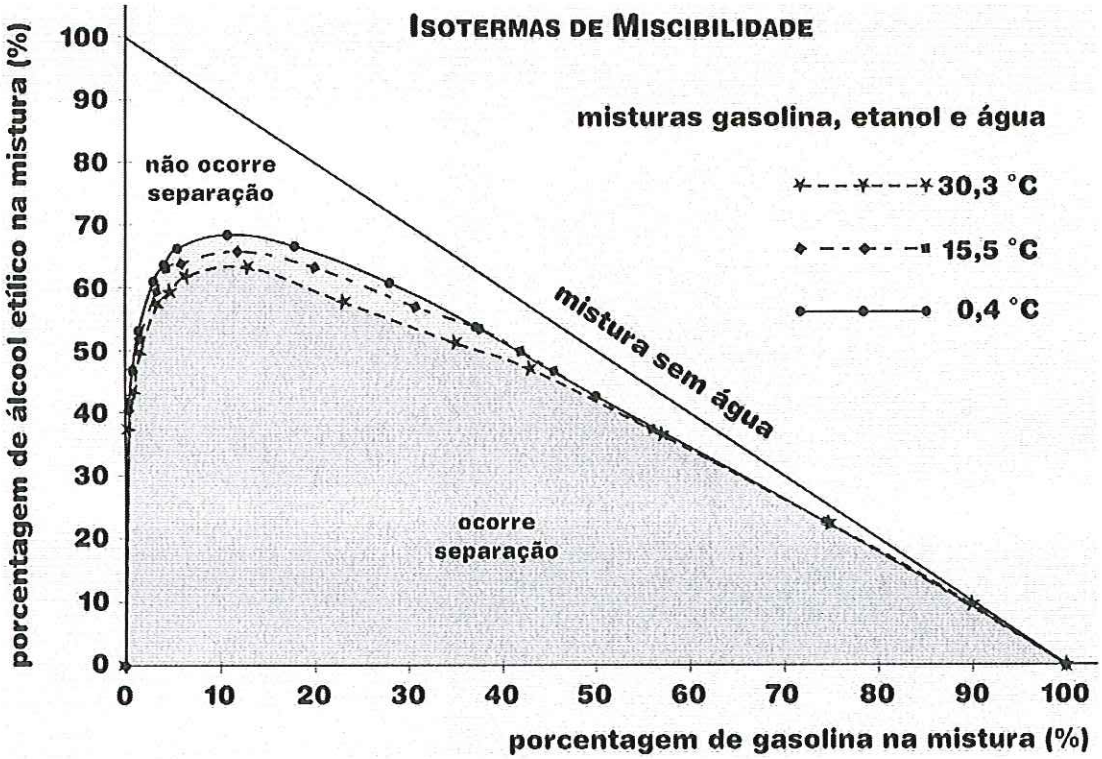



**FIGURA 2.5 – Isotermas de miscibilidade (Adaptado de TUFAILE et al, 1993)**

Segundo TUFAILE NE (1993) os pares: gasolina-álcool etílico anidro e álcool etílico anidro-água são completamente miscíveis, porém gasolina e água não o são.

A analise de estabilidade, a partir desse estudo, parte do princípio que a presença, ou não, de água na mistura é exclusivamente devido à água presente no AEHC quando adicionado à mistura. Assim a quantidade de água presente numa mistura AEHC – gasohol pode chegar no valor máximo correspondente ao AEHC puro (0% de gasohol). Nessa situação a quantidade de água é de 7,3% (ver Tabela 2.6).

Outra situação que se encontra no extremo oposto é quando a mistura está com gasohol puro. Neste caso a quantidade de gasolina é de 75% e, portanto, o gráfico somente pode ser avaliado até essa porcentagem. Nessas duas situações, conforme é de conhecimento prático e das afirmações citadas a mistura é estável.

Nas situações intermediárias, ou seja, em que a mistura possui os três componentes presentes (gasolina, AEAC e água) pode-se afirmar, pelo estudo de TUFAILE et al (1993) que a mistura continua estável, como pode ser mostrado lançando-se, como exemplo, os valores de gasolina, AEAC e água da Tabela 2.7, no gráfico da figura 2.5.

A determinação da quantidade de gasolina presente na mistura gasohol – AEHC, para a montagem da Tabela 2.7 é obtida pelo produto da porcentagem de gasohol, pela quantidade de gasolina presente no gasohol (75%).

Com relação ao AEAC deve-se notar que existe 25% contido no gasohol e 92,7% contido no AEHC. Assim, a quantidade de AEAC presente na mistura gasohol – AEHC é o produto da quantidade de gasohol por 25% mais o produto da quantidade de AEHC dessa mistura pela quantidade de AEAC presente no AEHC (92,7%).

Analogamente, a quantidade de água presente na mistura gasohol – AEHC é o produto da quantidade AEHC pela quantidade de água presente no AEHC (7,3%).

**TABELA 2.7 – Participação de gasolina, AEAC e água na mistura Gasohol - AEHC**

| MISTURA | GASOLINA (%) | AEAC (%) | ÁGUA (%) |
|---|---|---|---|
| 15% gasohol – 85% AEHC | 11,3 | 82,5 | 6,2 |
| 30% gasohol – 70% AEHC | 22,5 | 72,4 | 5,1 |
| 45% gasohol – 55% AEHC | 33,8 | 62.2 | 4,0 |
| 60% gasohol – 40% AEHC | 45,0 | 52,1 | 2,9 |

## 2.7 – FUNDAMENTOS DA TEORIA DE SISTEMAS DE CONTROLE

Neste item será apresentada uma síntese dos fundamentos da teoria de controles no intuito de fornecer subsídios ao entendimento de um sistema de controle automotivo. Antes, porém, é necessário ser definido alguns termos básicos. Segundo PASSARINI (1997), as definições básicas utilizadas na teoria de sistemas de controle distribuídos são as seguintes:

- Sistema de controle a malha fechada (SCMF) nome dado ao sistema de controle realimentado. Num SCMF a diferença entre a referência (sinal de entrada) e a medida da variável controlada (sinal realimentado 1), também chamada de sinal de erro atuante, é introduzido no controlador de modo a reduzir o erro e trazer a saída do sistema a um valor desejado. O termo controle a malha fechada sempre implica o uso de ação de controle realimentado a fim de reduzir o erro do sistema.

- Sistema de controle a malha aberta (SCMA) é aquele sistema em que a saída não tem nenhum efeito sobre a ação de controle. Em outras palavras, em um SCMA a saída não é medida nem realimentada para comparação com a entrada. Exemplo: máquina de lavar roupas.

- Sistema de controle robusto é um sistema de controle que é insensível a variações de parâmetros.

- Sistema de controle adaptativo é aquele sistema que tem a habilidade de se auto-ajustar ou automodificar de acordo com variações imprevisíveis nas condições de ambiente ou de estrutura. O próprio sistema de controle detecta variações nos parâmetros da planta e faz os ajustes necessários nos parâmetros do controlador a fim de manter um desempenho ótimo. Os sistemas de controle do motor têm uma capacidade de adaptação (não confundir com inteligência), que faz com que pequenas variações na qualidade do combustível sejam compensadas, melhorando o desempenho e a dirigibilidade.

- Sistema de controle com aprendizado é aquele sistema de controle que tem habilidade de aprender.

### 2.7.1 – SISTEMAS DE MALHA ABERTA E MALHA FECHADA

O sistema eletrônico de controle automotivo é um sistema do tipo "malha fechada" que sob certas condições de funcionamento opera em malha aberta e, portanto, dos sistemas citados no item anterior, o sistema de malha aberta e fechada será descrito a seguir.

O sistema mostrado na figura 2.6 é normalmente classificado como "malha aberta". Sistemas de controle de malha aberta são aqueles nos quais a informação sobre a variável controlada (nesse caso, a temperatura de saída do líquido) não é usada para ajustar nenhuma das entradas do sistema para compensar as variações nas variáveis do processo.

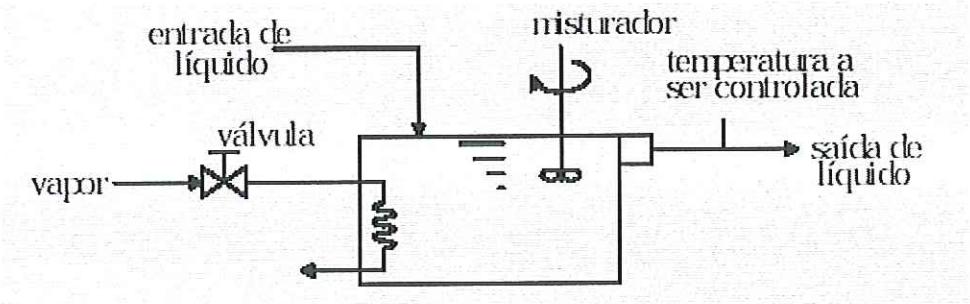



**FIGURA 2.6 – Sistema de controle de malha aberta para um processo simples de troca de calor (PASSARINI, 1997)**

Um sistema de controle malha fechada implica que a variável controlada é medida e o resultado dessa medida é utilizada para realimentar o sistema para manipular uma das variáveis do processo, como o calor no exemplo anterior.

A realimentação ou feedback pode ser feita através de um operador humano (controle manual) ou pelo uso de instrumentos (controle automático).

- Controle manual: um operador periodicamente mede a temperatura; se a temperatura, por exemplo, estiver abaixo do valor desejado, ele aumenta a vazão de vapor, pela abertura da válvula de vapor.

- Controle automático: um dispositivo sensor de temperatura é usado para produzir um sinal (elétrico, pneumático, mecânico, etc.) proporcional à temperatura medida. Esse sinal alimenta um controlador que a compara com um valor desejado pré-estabelecido, ou ponto de ajuste. Se existir alguma diferença, o controlador muda a abertura da válvula controladora de vapor para corrigir a temperatura (figura 2.7).

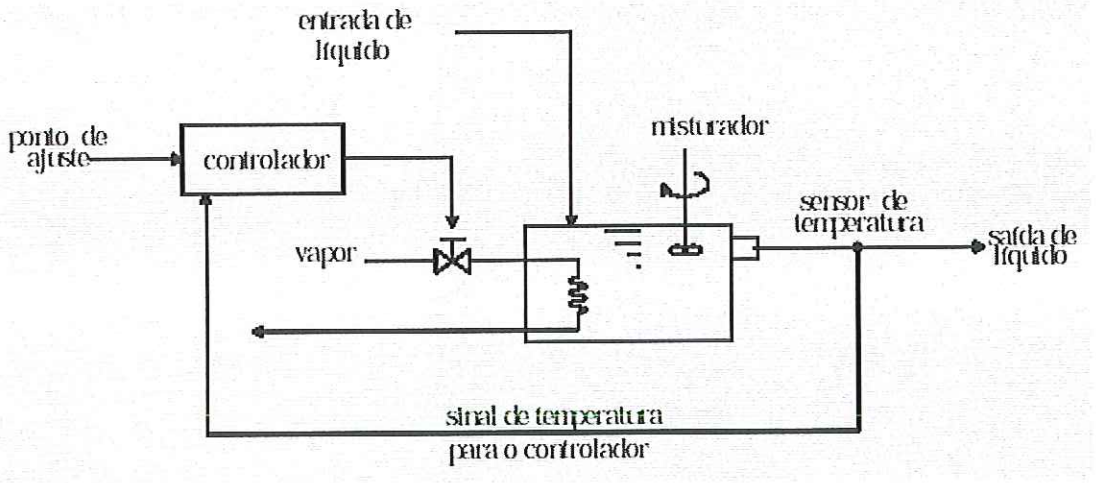



**FIGURA 2.7 – Sistema de controle de malha fechada para um processo de troca de calor (PASSARINI, 1997)**

Outro sistema utilizado para controlar alguma variável é o chamado controle por pré-alimentação ou feed foward control. Neste sistema, distúrbios do processo são medidos e compensados sem se esperar que uma mudança na variável controlada indique que um distúrbio ocorreu. O controle pré-alimentado é também útil onde a variável de controle final não pode ser medida.

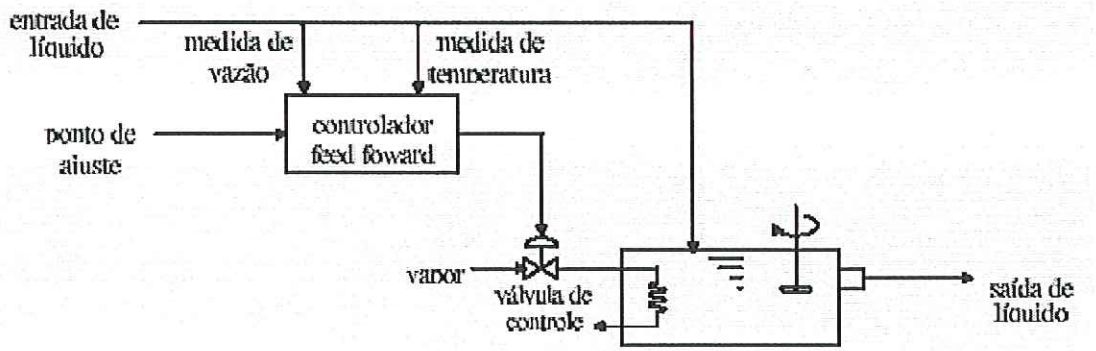



**FIGURA 2.8 – Sistema de controle automático de um processo de troca de calor por pré-alimentação (PASSARINI, 1997)**

No exemplo mostrado na figura 2.8, o controlador feed foward possui habilidade computacional: usa a taxa de vazão e temperatura medidas na entrada do líquido para calcular a taxa de vapor necessária para manter a temperatura desejada do líquido de saída. A equação resolvida pelo controlador relaciona:

- O calor contido no líquido de entrada.
- A vazão de vapor.
- A temperatura do líquido de saída.

De acordo com PASSARINI (1997), raros são os modelos e controladores perfeitos. Assim, é preferível uma combinação de controle pré e realimentado, como é mostrado na figura 2.9.

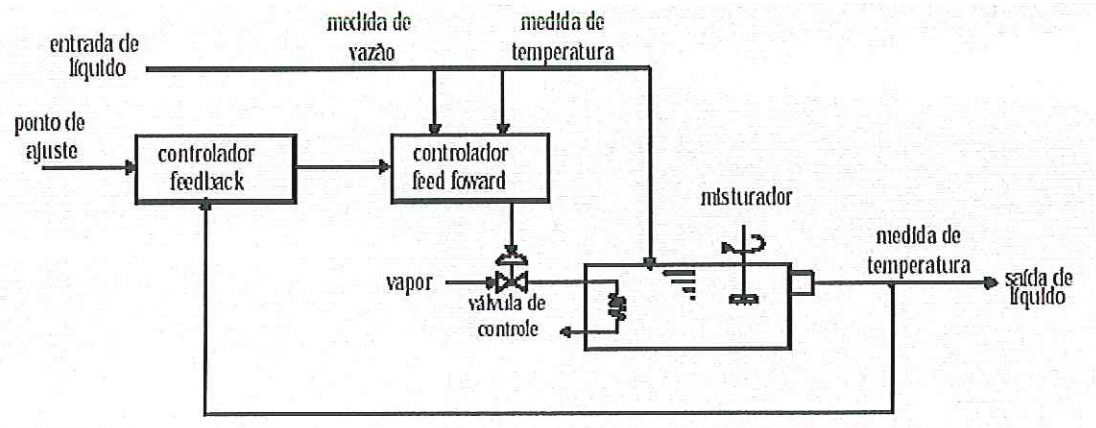



**FIGURA 2.9 – Controle automático de um processo de troca de calor por pré e realimentação combinadas (PASSARINI, 1997)**

## 2.7.2 – AÇÕES DE CONTROLE DOS SISTEMAS REALIMENTADOS

De acordo com a ação que o controlador executa, para manipular as variáveis do processo, eles são classificados como:

- Controladores de duas posições ou liga e desliga (ON-OFF)
- Controladores proporcionais (P)
- Controladores do tipo integral (I)
- Controladores do tipo derivativo (D)
- Controladores do tipo proporcional-mais-integral (PI)
- Controladores do tipo proporcional-mais-derivativo (PD)
- Controladores do tipo proporcional-mais-integral-mais-derivativo (PID)

### 2.7.2.1 – AÇÃO DE CONTROLE DE DUAS POSIÇÕES OU LIGA E DESLIGA (ON-OFF)

É o controlador comumente mais simples. Um exemplo é o termostato, que é um componente utilizado para controle de temperatura.

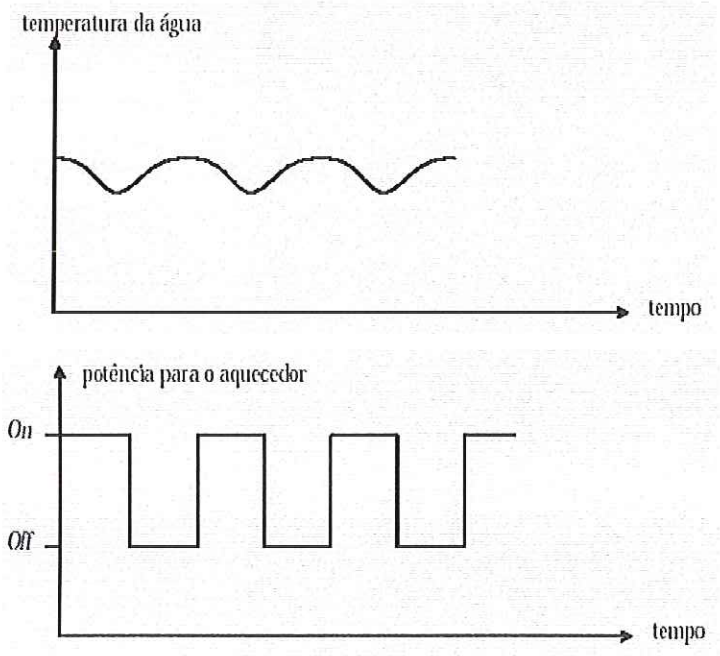



**FIGURA 2.10 – Controle de temperatura liga-desliga de um aquário doméstico (PASSARINI, 1997)**

Embora sejam baratos e extremamente simples, a natureza oscilatória do controle torna-os apropriados apenas para aquelas aplicações onde podem ser usados sozinhos e o controle preciso não é essencial.

Sejam as variáveis a seguir, definidas de acordo com a figura 2.11:

- **u(t) – sinal de saída do controlador**

  O sinal de saída do controlador é a informação que é enviada ao componente que atuará no sistema de controle para executar uma tarefa determinada.

- **ε(t) – sinal de erro atuante**

  O sinal de erro atuante é a diferença entre o valor que se deseja manter uma determina variável e valor em que ela se encontra.

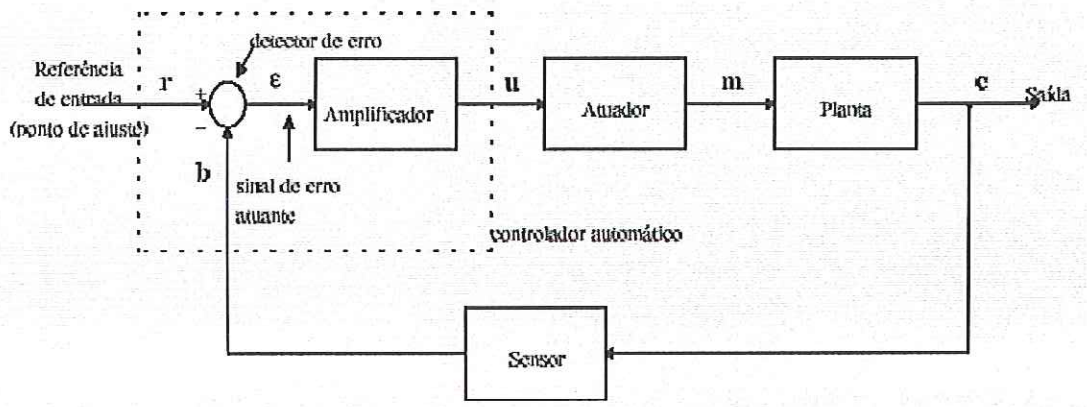



**FIGURA 2.11 – Diagrama de bloco de um sistema de controle (PASSARINI, 1997)**

Em um controle de duas posições, u(t) permanece ou em um valor máximo ou em um valor mínimo, dependendo de ε(t) ser positivo ou negativo, de modo que:

$$u(t) = \begin{cases} U_1 & \text{para } \varepsilon(t) > 0 \\ U_2 & \text{para } \varepsilon(t) < 0 \end{cases}$$

em que $U_1$ e U2 são constantes.

O valor mínimo de U2 usualmente ou é zero ou - U1.

### 2.7.2.2. AÇÃO DE CONTROLE PROPORCIONAL (P)

Nesse controlador, a relação entre a saída do controlador u(t) e o sinal de erro atuante, ε (t) é:

$$u(t) = K_p \, . \, \varepsilon \, (t) \tag{2.40}$$

em que $K_p$ é denominada sensibilidade proporcional ou ganho.

No controle proporcional, quanto maior a magnitude do erro atuante, maior é a ação corretiva aplicada.

A resposta possui um desvio máximo e existe um tempo significativo de oscilação. O período dessa oscilação é moderado. Para uma mudança mantida na perturbação, a variável controlada não retorna para seu valor original (valor desejado), mas permanece num novo valor de equilíbrio chamado de ponto de controle (control point). Essa diferença entre o valor desejado e o ponto de controle é chamada de desajuste (Offset ou droop). A razão para o offset com a ação proporcional pode ser vista se for lembrado que a ação de controle é proporcional ao erro.

### 2.7.2.3 – AÇÃO DE CONTROLE INTEGRAL (I)

O valor da saída do controlador u(t) é variado em uma taxa proporcional ao sinal do erro atuante ε(t):

$$du(t)/dt = K_i \, . \, \varepsilon \, (t) \tag{2.41}$$

ou

$$u(t) = K_i \int_0^t \varepsilon(t).dt \tag{2.42}$$

em que $K_i$ é uma constante ajustável.

Se o valor de ε(t) é dobrado, então o valor de u(t) varia duas vezes mais rápido. Para erro atuante nulo, o valor de u(t) permanece estacionário. A ação de controle integral é muitas vezes chamada de controle de restabelecimento (automatic reset).

### 2.7.2.4 – AÇÃO DE CONTROLE DERIVATIVA (D)

O valor da saída do controlador, u(t) é proporcional à derivada do erro atuante, ε (t). Esse tipo de controle não produz nenhuma ação corretiva para qualquer erro atuante constante, não importando sua magnitude e, portanto, essa ação de controle isoladamente não tem utilidade prática.

### 2.7.2.5 – AÇÃO DE CONTROLE PROPORCIONAL – MAIS – INTEGRAL (PI)

A ação de controle de controlador proporcional-mais-integral é definida pela seguinte equação:

$$u(t) = K_p.\varepsilon(t) + \frac{K_p}{T_i}\int_0^t \varepsilon(t).dt \qquad (2.43)$$

Com o controle proporcional, sempre resta um desajuste ou erro (offset). Entretanto com o controlador PI, a contribuição da ação integral não retorna a zero com o erro atuante, mas permanece no valor que ela atingiu naquele instante.

As desvantagens do controle PI são que ele fornece um aumento do máximo desvio, um tempo de resposta maior, e um período de oscilação maior do que aquele com apenas a ação proporcional. A ação de controle integral, embora remova o offset, pode resultar em uma resposta oscilatória com amplitude lentamente decrescente ou mesmo com amplitude crescente, ambas normalmente indesejáveis. Esse tipo de ação de controle é, portanto usada onde esses inconvenientes possam ser tolerados e um offset for indesejado. Essa ação de controle é uma freqüente combinação, especialmente onde as respostas de outros componentes no laço de controle forem rápidos.

### 2.7.2.6 – AÇÃO DE CONTROLE PROPORCIONAL – MAIS – DERIVATIVA (PD)

A ação de controle de um controlador proporcional-mais-derivativo é definida pela seguinte equação:

$$u(t) = K_p \,.\, \varepsilon\,(t) + K_p \,.\, T_d \,.\, d\varepsilon(t)/dt \qquad (2.44)$$

A presença do modo derivativo contribui para uma saída adicional, no elemento final de controle assim que qualquer mudança no erro atuante ocorra. Cessando a mudança no erro atuante, a ação derivativa não ocorrerá mais. O efeito disso é similar a ter um controlador proporcional com alto ganho quando a variável medida está mudando muito rapidamente, e baixo ganho quando a variável medida muda muito devagar. Devido a essa ação, a variável controlada exibe a menor oscilação e o desvio máximo menor. Ocorre à mesma quantidade de offset do que aquele com apenas controle proporcional e mesmo ganho proporcional. Entretanto, a adição da ação derivativa permite usar um maior ganho no controlador antes do sistema de controle se tornar instável. Isso significa que se pode obter um offset menor do que apenas com a ação proporcional. A ação derivativa quando adicionada ao controlador proporcional, possibilita obter um controlador de alta sensibilidade, é freqüentemente chamada controle de taxa ou antecipação, porque antecipa o erro atuante e inicia uma ação corretiva mais cedo (antes do erro atuante se tornar demasiadamente grande), tendendo a aumentar a estabilidade do sistema e é empregada onde oscilações excessivas devam ser eliminadas.

### 2.7.2.7 – AÇÃO DE CONTROLE PROPORCIONAL – MAIS – INTEGRAL – MAIS – DERIVATIVA (PID)

A ação de controle de um controlador proporcional-mais-integral-mais derivativo é definida pela seguinte equação:

$$u(s) = K_p.\varepsilon(t) + \frac{K_p}{T_i}\int_0^t \varepsilon(t).dt + K_p.T_d.\frac{d\varepsilon(t)}{dt} \qquad (2.45)$$

Esse é um compromisso entre as vantagens e desvantagens dos controles PI e PD. O offset é eliminado pela presença da ação integral e o modo derivativo reduz o desvio máximo e o tempo de oscilação, embora esse seja ainda, maior do que com apenas o controle PD.

Tais controladores são freqüentemente instalados mais por sua versatilidade e nem tanto porque a análise do sistema indicou a necessidade da presença de todos os três modos de controle.

## 2.8 – SISTEMAS DE CONTROLE DA RELAÇÃO AR/COMBUSTÍVEL NO MOTOR CICLO OTTO

As exigências de um usuário de um veículo com motor ciclo Otto durante a operação, com relação ao motor, recaem sobre mudanças na potência, requerida através da aplicação de uma ação sobre a borboleta de aceleração do veículo. A posição da borboleta de aceleração determina a quantidade de ar admitida pelo motor, sendo essa quantidade de ar, dependente, ainda, de fatores físicos como sua pressão e temperatura e da rotação do motor.

À quantidade de ar admitida pelo motor é necessário se adicionar o combustível de maneira a mais adequada, para depois emitir a centelha e propiciar a ocorrência da reação de combustão. O momento da emissão da centelha é fundamental para a otimização da operação do motor. Emissão da centelha retardada significa perda de desempenho. Emissão precoce pode significar pré-ignição e causar sérios danos ao motor.

A potência requerida pelo usuário está, ainda, inserida num regime de trabalho variando no tempo e sofrendo a influência de outros fatores como: carga, rotação e temperatura do motor.

Nesse contexto é que um sistema de controle deve executar suas funções, procurando a maneira mais adequada e acurada possível.

No passado a dosagem de combustível era realizada pelo carburador convencional, mas ele já não supria as necessidades advindas da evolução dos motores de combustão interna, as exigências ambientais e do condutor de um veículo atual. Seu principio de funcionamento e suais principais funções podem ser vistas no anexo C. Segundo PASSARINI (1993) o carburador convencional imperou soberano até o surgimento das legislações de emissões e economia. Em meados da década de 1950, começou a ser desenvolvido os primeiros sistemas mecânico de injeção de combustível para motores ciclo Otto de veículos automotivos, como pode ser visualizado pela figura 2.12, mas esse sistema não substituiu o carburador.

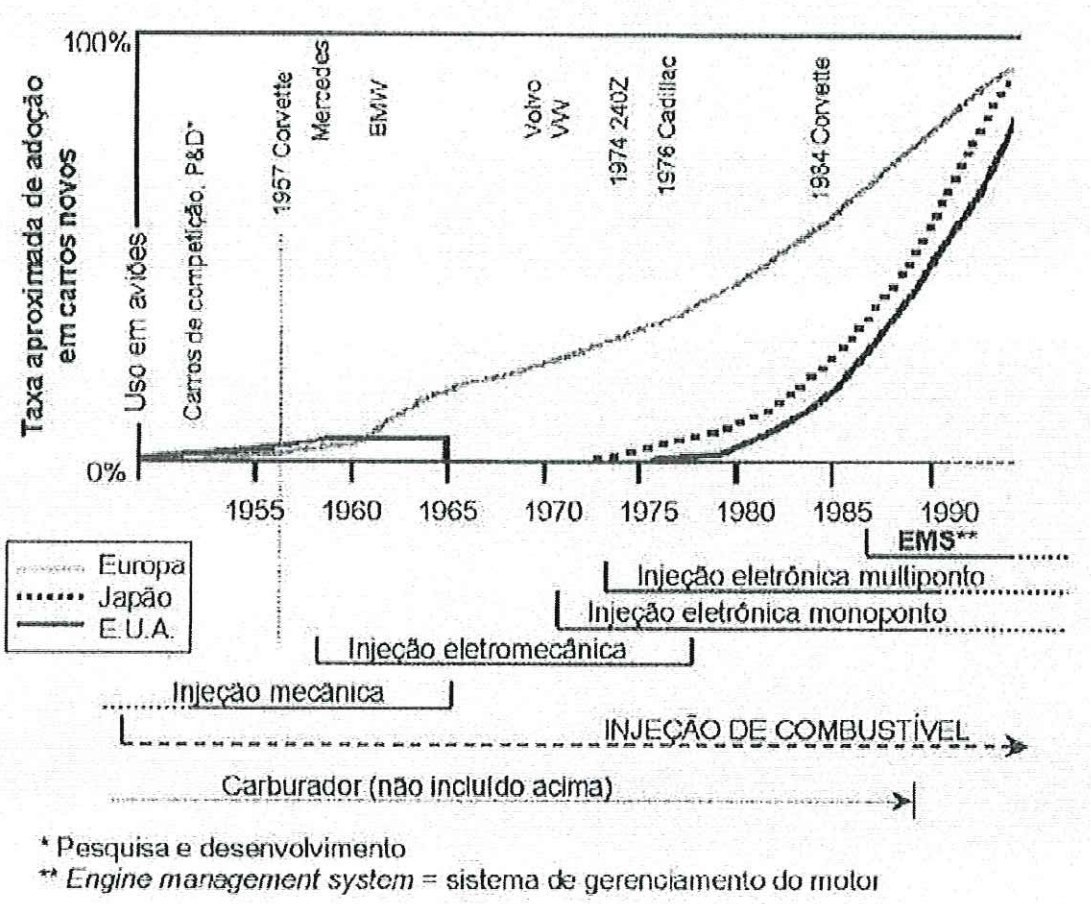



**FIGURA 2.12 – Cronologia da aplicação dos sistemas de controle da relação A/C (AMEY, 1995)**

Surgiria ainda, o carburador eletrônico, mas PASSARINI (1993) afirma, que o carburador eletrônico foi um aperfeiçoamento que logo foi abandonado por não resistir ao rigor das legislações e porque o grau de sofisticação que foi adquirindo tornava-o inviável economicamente.

No Brasil o carburador convencional cedeu espaço diretamente para o sistema de injeção eletrônico, sem passar pelo sistema mecânico, a pouco mais de uma década. Atendendo às exigências citadas anteriormente, esse sistema trouxe as seguintes vantagens:

- Melhor atomização do combustível (pressurizado)
- Redução do efeito retorno de chama no coletor de admissão
- Controle da mistura de forma mais acurada (relação ar/combustível)
- Redução da emissão de gases poluentes pelo motor
- Eliminação de ajustes de marcha lenta
- Melhor economia de combustível

- Eliminação do sistema afogador
- Facilidade de partidas a quente e frio do motor
- Melhor dirigibilidade

O objetivo desse capítulo é descrever um sistema básico de controle eletrônico de motores.

## 2.8.1 – SISTEMA ELETRÔNICO DE CONTROLE DO MOTOR CICLO OTTO COM REALIMENTAÇÃO PELO SENSOR DE OXIGÊNIO

O princípio básico de funcionamento de um sistema eletrônico de controle dos motores de combustão interna ciclo Otto consiste em sensores instalados em vários pontos do motor que enviam informações a uma unidade eletrônica. Essa unidade eletrônica processa os sinais e envia para os atuadores de modo a obter-se a resposta desejada do motor, nas condições mais variadas.

*Sensores* são componentes que convertem uma grandeza física em um sinal elétrico (Ribbens 1992). São exemplos de sensores de aplicação em motores automotivos, o sensor de temperatura, pressão, rotação, detonação, etc, que serão descritos nos itens à frente. As grandezas físicas são fundamentais para o processador calcular a quantidade de combustível e o ponto de ignição que inicia a combustão.

Já os *atuadores* são componentes que realizam o inverso dos sensores, ou seja, convertem um sinal elétrico em uma ação física. No caso dos motores a combustão interna ciclo Otto a ação física é a variação da quantidade de combustível fornecido e a variação do ponto de ignição, de acordo com o regime ótimo de operação. São exemplos de atuadores a válvula injetora eletromagnética, motor de passo, velas e bobinas de ignição, etc.

Será usado neste capítulo, para explicar o princípio de funcionamento de um sistema eletrônico de controle, os sistemas multiponto: Le-Jetronic e Motronic da Bosch e o G7 da Magneti Marelli, além do sistema monoponto Mono Motronic também da Bosch.

O sistema Le-Jetronic é analógico e, por esta característica, não dispõe de memória de adaptação (Anexo D.11) para arquivar as possíveis avarias que possam ocorrer, além de não possuir lâmpada de indicação de anomalia para o alerta ao condutor. Este sistema não possui, ainda, sonda lambda (Anexo D.10) e válvula de ventilação do tanque (Anexo D.12).

Sistemas analógicos usam sinais elétricos contínuos para representar quantidades físicas. Um exemplo simples é o marcador de combustível, em que a bóia do tanque percorre

um caminho contínuo, do ponto "vazio" ao "cheio" e no painel, o mostrador com seu ponteiro responde, também, de maneira contínua.

No sistema digital as variáveis físicas são representadas por um equivalente numérico usando a forma do sistema binário. Os circuitos que usam transistor, por exemplo, podem ser construídos para ter um ou dois estados estáveis que podem ser usados para representar o "zero" ou "um" num sistema numérico binário.

O sistema G7, Motronic e Mono Motronic, são sistemas digitais e conseqüentemente permite memória de adaptação e lâmpada de anomalia.

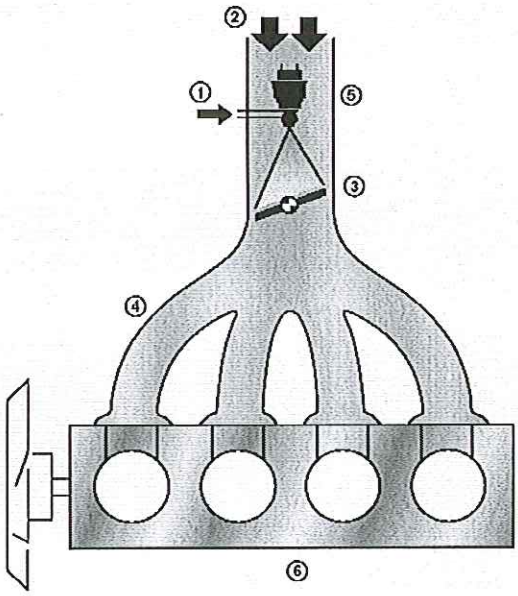
Na maioria dos veículos atuais, por não possuírem distribuidor, o controle do momento de ignição é comandado pelo sensor de rotação (Anexo D.9), instalado no volante do motor.

Esses sistemas utilizam variações de sensores que darão uma noção do funcionamento dos sistemas eletrônicos de combustível. Para melhor detalhamento dos sensores e atuadores ver Anexo D.

Os sistemas de injeção podem ser divididos, quanto ao tipo e quantidade de válvulas injetoras de combustível, em monoponto e multiponto.

#### 2.8.1.1 – SISTEMA MONOPONTO

A principal característica do sistema Monoponto é a existência de uma única válvula de injeção de combustível para todos os cilindros do motor, conforme mostrado na figura 2.13. Esta válvula está montada no corpo de borboleta (anexo D.18). O corpo da borboleta integra outros componentes que, no sistema multiponto, encontram-se "espalhados" pelo motor.



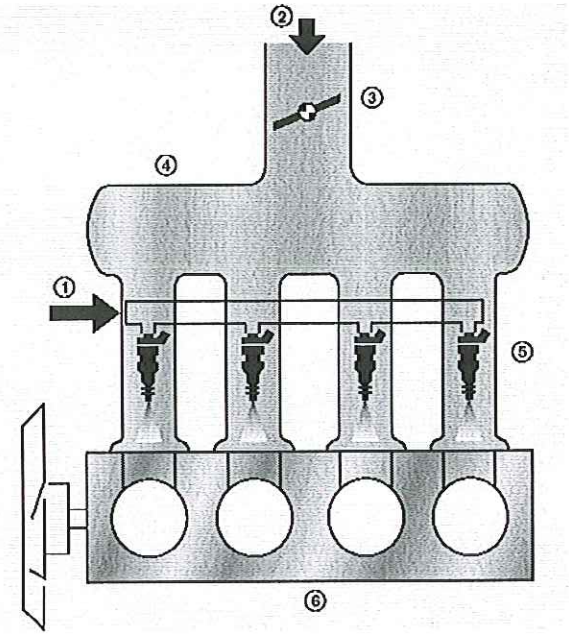

**LEGENDA**

1 – Entrada de combustível
2 – Entrada de ar
3 – Borboleta de aceleração
4 – Coletor de admissão
5 – Válvula injetora
6 – Motor

**FIGURA 2.13 – Esquema do sistema de injeção monoponto (BOSCH, 1998)**

### 2.8.1.2 – SISTEMA MULTIPONTO

O sistema multiponto utiliza uma válvula de injeção de combustível para cada cilindro do motor, conforme pode ser visto pela figura 2.14.




**LEGENDA**

1 – Galeria de distribuição de combustível (Entrada de combustível)
2 – Entrada de ar
3 – Borboleta de aceleração
4 – Coletor de admissão
5 – Válvulas injetora
6 – Motor

**FIGURA 2.14 – Esquema do sistema de injeção multiponto (BOSCH, 1998)**

## 2.8.2 – CONFIGURAÇÃO DE UM SISTEMA DE CONTROLE ELETRÔNICO MULTIPONTO BÁSICO

A figura 2.15 a seguir representa um esquema do sistema de injeção eletrônica fabricado pela Bosch do tipo multiponto e será utilizado para discriminar os componente.

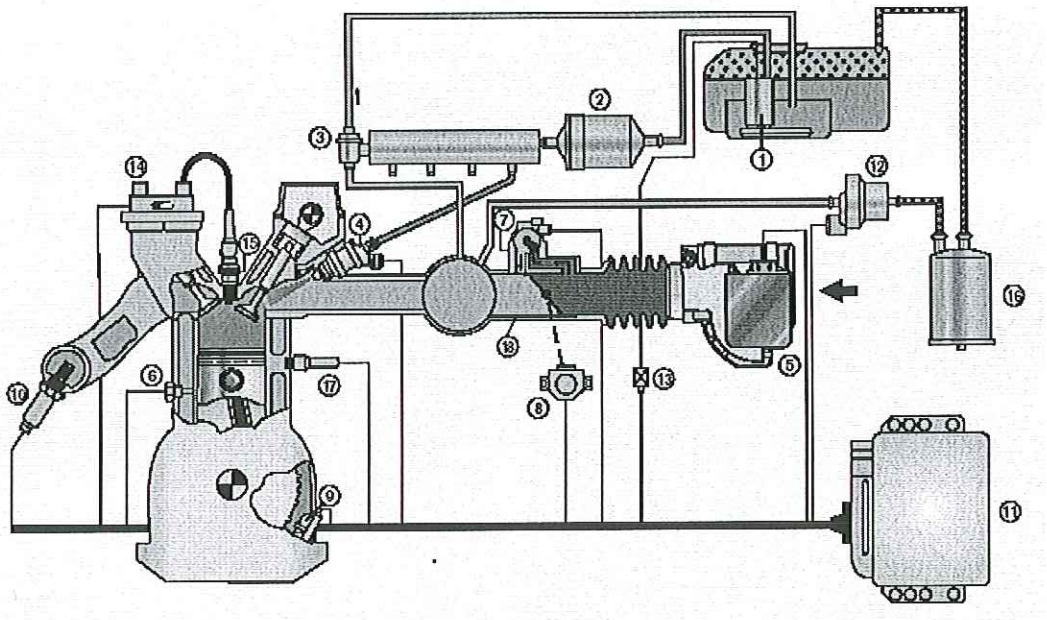


**FIGURA 2.15 – Componentes de sistema de controle eletrônico (BOSCH, 1998)**

**LEGENDA**

1 – Bomba de combustível
2 – Filtro de combustível
3 – Regulador de pressão
4 – Válvula de injeção ou injetor eletromagnético de combustível
5 – Medidor de fluxo de ar
6 – Sensor de temperatura da água
7 – Atuador de marcha lenta ou motor de passo
8 – Potenciômetro de Borboleta ou sensor de posição de borboleta
9 – Sensor de rotação
10 – Sonda lâmbda ou sensor de oxigênio
11 – Unidade de Comando Eletrônico (ECU)
12 – Válvula de ventilação do tanque
13 – Relé de comando
14 – Bobina de ignição
15 – Vela de ignição
16 – Canister
17 – Sensor de detonação
18 – Corpo de borboleta

### 2.8.3 – CONFIGURAÇÃO BÁSICA DE SISTEMAS DE CONTROLE AUTOMOTIVO

Nos sistemas de controle eletrônico de motores, especificamente, a ECU recebe as informações dos sensores (sensor de rotação, sensor de temperatura da água, sensor de pressão absoluta, etc.) e calcula a quantidade de ar necessário para a melhor combustão de acordo com o regime de operação. Executado esta fase de cálculo, a ECU comanda os atuadores (atuador de marcha lenta, velas, bobina e injetor eletromagnético) de modo a fornecer o combustível e centelha para que a combustão ocorra. Até aqui o sistema opera em malha aberta pré-alimentado

A fim de garantir que a correta mistura ar/combustível seja alcançada, é introduzido à sonda lâmbda (sensor de oxigênio nos gases de escape) para realimentar o sistema, corrigindo, assim, as variações indesejáveis nessa variável A/C, até então, determinada por cálculo. O sistema passa a operar em malha fechada.

Dos sensores relacionados no item anterior, outro que é utilizado para realimentar o sistema eletrônico é o sensor de detonação.

Assim, o sistema eletrônico de motores representado em diagrama de blocos, fica da forma como mostrado pela figura 2.16.

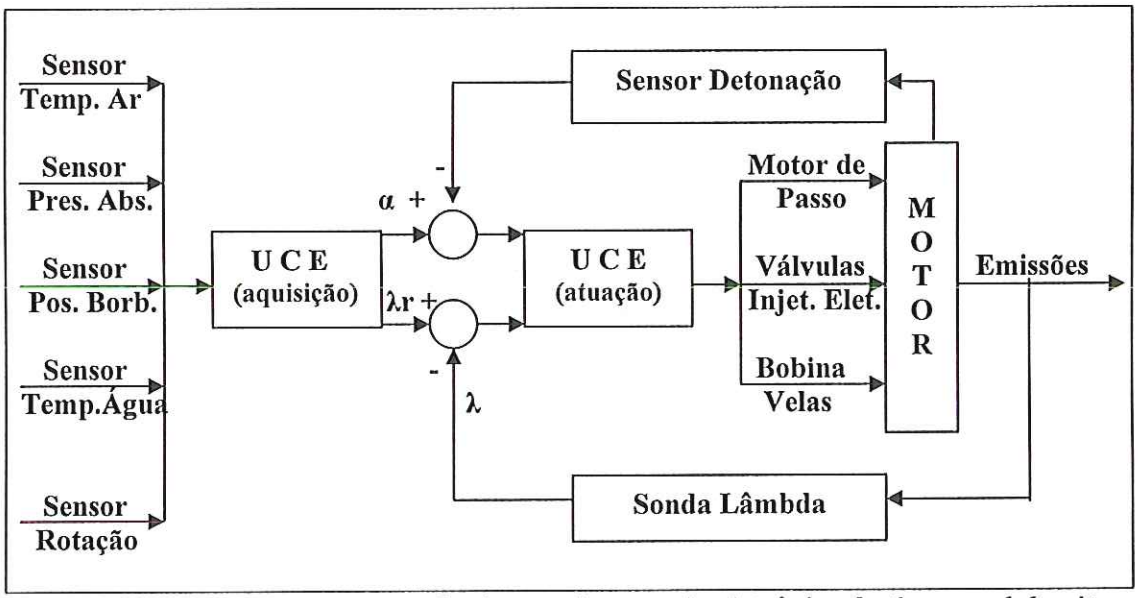



**FIGURA 2.16 – Representação do sistema de controle eletrônico do tipo *speed-density* em diagrama de bloco**

### 2.8.3.1 – A AUTOADAPTABILIDADE DO SISTEMA ELETRÔNICO

A autoadaptatividade do sistema eletrônico, de acordo com MATHIAS & SHOSHIMA (1993), age principalmente nos seguintes pontos:

- A autoadaptatividade aplicada na obtenção de uma relação ar/combustível (A/C) otimizada através da introdução de um sensor de oxigênio, ou sonda lâmbda, (ver item 2.82, 2.83 e Anexo D.10) na saída dos gases de escapamento para informar a necessidade de correção da mistura (A/C).

  RIBBENS (1992), salienta que o controle de combustível trabalhando em malha fechada é baseado em dois componentes críticos: sensor de oxigênio e válvula injetora eletromagnética (ver Anexo D.4). O sensor de oxigênio detecta a condição que se encontra os gases de escape, com relação à quantidade de oxigênio. A quantidade de oxigênio é relativamente baixa para misturas ricas e relativamente alta para misturas pobres. Essa condição de mistura rica, ou pobre é mostrada pelo fator de excesso de ar – $\lambda$ (ver item 2.3.2). De acordo com a condição que se encontra a mistura, o sensor de oxigênio envia um sinal elétrico para o controlador (ECU) que determina a válvula injetora eletromagnética corrigir a mistura (ver figura 2.16).
- A autoadaptatividade aplicada à ignição digital eletrônica – trabalha na prevenção da detonação do motor. Um sensor de detonação (ver item 2.8.2, 2.8.3 e Anexo D.17) detecta a ocorrência da detonação e o avanço de ignição é retardado em decrementos definidos até ser eliminado.
- A autoadaptatividade aplicada ao controle da marcha lenta – funciona através de um motor de passo acoplado a um obturador (ver item 2.8.2, 2.8.3 e Anexo D.7) com a função de variar a vazão de ar na marcha lenta.
- A autoadaptatividade da purga do canister – evita o lançamento do vapor de combustível do tanque na atmosfera. O canister (ver item 2.8.2, 2.8.3 e Anexo D.16), um componente carregado de carvão vegetal ativado, absorve os vapores quando o veículo está parado e devolve-os para o motor quando o mesmo está funcionando.

### 2.8.4 – ROTINAS DE FUNCIONAMENTO

Da partida inicial até atingir o regime de cruzeiro, o veículo passa pela operação em baixa temperatura e, freqüentemente, é posto em movimento ainda nessa fase de aquecimento. Em regime de cruzeiro o veículo é solicitado às diversas condições de temperatura e carga do motor, aceleração e desaceleração, além das condições externas ambientais como, umidade, temperatura e pressão do ar.

Em todas essas condições de operação o sistema de controle é solicitado a trabalhar e responder de forma a manter as condições ideais de operação.

Faz-se aqui uma breve descrição da atuação do sistema de controle eletrônico em operação durante as fases rotineiras de condução de um veículo.

#### 2.8.4.1 – PARTIDA E AQUECIMENTO DO MOTOR

A alimentação elétrica da bomba de combustível é comandada pela ECU através do relé. O funcionamento da bomba é ativado depois que a chave de ignição for colocada na posição II (posição I – destravamento da direção; posição III – acionamento do motor de partida) gerando, no sistema de alimentação de combustível, uma pressão de 1 bar. A chave de ignição permanece nessa posição, após a partida, com o retorno pela ação de mola.

Se não for efetuada a partida do motor e a chave permanecer na posição II, a ECU reconhece a condição parada, pelo sensor de rotação, e desernegiza o relé desligando a bomba de combustível. A bomba é também desligada quando a rotação do motor desce abaixo de um limite mínimo (abaixo da rotação de marcha lenta).

Iniciada a partida, ainda durante o tempo de tracionamento do motor, pelo motor de partida, o tempo de injeção é aumentado para produzir uma mistura rica, compensando as dificuldades de vaporização de combustível pela temperatura ambiente mais baixa.

Após a partida e durante a fase de aquecimento do motor, a ECU corrige, automaticamente, o tempo de injeção com base na temperatura do liquido de arrefecimento, empobrecendo a mistura até o valor ideal. Essa operação de enriquecimento da mistura e seu empobrecimento, para estabilizar o funcionamento do motor em temperaturas baixas, nos sistemas anteriores ao eletrônico, era realizado manualmente através do acionamento do afogador.

### 2.8.4.2 – FUNCIONAMENTO EM ACELERAÇÃO

Nesta fase a quantidade de combustível é adequadamente aumentado de acordo com a rapidez da solicitação de aceleração do usuário, em função dos sinais:

- Sensor de borboleta
- Sensor de pressão absoluta (MAP)
- Sensor de rotação

O tempo de injeção básico é aumentado por um fator, que é função da temperatura do liquido de arrefecimento, da velocidade de abertura da borboleta e do aumento da pressão absoluta no coletor de admissão.

Se ocorrer uma brusca variação do tempo de injeção quando a armadura (ver Anexo D.4) estiver fechada, a ECU reabre a válvula injetora eletromagnética (extra pulso) para poder compensar a mistura com a máxima rapidez.

Quando o regime de rotação é estabilizado na rotação/velocidade desejado (cessado a aceleração) o tempo de injeção retorna no nível normal (básico) para aquele regime.

Nos sistemas antigos (carburador) essa operação era propiciada pelo injetor de combustível (popularmente chamada de injeção rápida) que era um pistão interno ao carburador, ligado ao acionamento da borboleta de aceleração através de um sistema de mola. Esse sistema de mola possibilitava a injeção de combustível quando o pedal do acelerador era acionado com rapidez pelo usuário.

### 2.8.4.3 – CRUZEIRO EM MALHA ABERTA E MALHA FECHADA

A sonda lâmbda começa a entrar em operação quando sua temperatura atinge o valor de 300°C.

A temperatura *teórica* de combustão, quando estiver acontecendo em regime estabilizado e com a relação A/C próxima da estequiométrica é da ordem de 2650 °C (OBERT – 1968). Porém a temperatura *real* dos gases de combustão no regime transitório em que o motor está operando com mistura rica, é significativamente mais baixa. Além deste fato, as partes do motor em que os gases estão em contato, se encontram também abaixo da temperatura normal, extraindo calor e impedindo que, esses gases, atinjam a temperatura de ativação da sonda lâmbda.

Assim, neste regime de operação, a sonda lâmbda não está operante e, conseqüentemente, o sistema eletrônico de controle trabalha em malha aberta.

Passado a fase de aquecimento do motor e regularizada a relação ar/combustível, com conseqüente aumento da temperatura dos gases de combustão, a sonda lâmbda entra em operação e passa a fornecer a ECU os dados de presença, ou não, de oxigênio, para as possíveis correções. Inicia-se então, a operação do sistema eletrônico em malha fechada.

### 2.8.4.4 – DESACELERAÇÃO

A desaceleração do veículo é a condição em que a borboleta aceleradora está fechada e o regime de rotação do motor está ainda elevado.

Durante esta fase ocorre à sobreposição de duas estratégias:

- **Estratégia de regime transitório**

A ECU, imediatamente após receber a informação de desaceleração (borboleta de aceleração fechada e regime de rotação alto), ativa o procedimento de redução do tempo de abertura da válvula injetora eletromagnética. Fazendo somente a redução do tempo de abertura e não o fechamento completo do injetor eletromagnético, a E.C.U está garantindo uma mistura pobre com conseqüente redução dos consumos dos poluentes, como os hidrocarbonetos não queimados (HC) e óxido de carbono (CO) e, ao mesmo tempo, atenuando o efeito de freamento do motor.

- **Estratégia de *CUT-OFF***

Após o regime transitório a ECU retira o comando da válvula injetora eletromagnética, interrompendo qualquer alimentação ao motor (função Cut-Off) até que a rotação atinja o valor de aproximadamente 1500 rpm, abaixo da qual, a central deve ativar os impulsos de injeção novamente, já no novo regime, e evitar o desligamento do motor.

A função de *CUT-OFF* se torna operativa quando a temperatura da água de arrefecimento do motor for superior a 25°C e a rotação for superior a 1700 rpm.

# CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho, o estudo da adaptabilidade dos sistemas de controle do motor Ciclo Otto com sensor de oxigênio a gasolina utilizando álcool etílico hidratado como combustível alternativo foi desenvolvido seguindo-se duas linhas de atuação. São elas:

- Ensaio rodoviário.

  Ensaio realizado com a operação de dois veículos, originalmente a gasohol, Golf 2.0 (motor 4 cilindros em linha, 1984 $cm^3$, 2 válvulas por cilindro) e Astra 2.0 16V (motor 4 cilindros em linha, 1998 $cm^3$, 4 válvulas por cilindro), utilizando misturas variadas de AEHC a gasolina como combustível. Este ensaio visa à quantificação do desempenho do motor a gasohol submetido a diversas misturas de AEHC à gasolina.

- Ensaio em bancada dinamométrica.

  Ensaio realizado com a montagem de um motor FIAT FIASA 1.0 (motor 4 cilindros em linha, 994 $cm^3$, 2 válvulas por cilindro) a gasohol em bancada dinamométrica. O ensaio foi monitorado por instrumentos para permitir o levantamento de dados torque, consumo de combustível, avanço de ignição e tempo de injeção para o motor operando em duas situações distintas:

  - Com misturas variadas de AEHC a gasolina como combustível, sem modificação de suas características originais.
  - Apenas com AEHC como combustível, tendo sido feito à substituição da EPROM original por outra remapeada. Essa nova EPROM é semelhante àquelas encontradas comercialmente e que são oferecidas ao consumidor que requer este tipo de mudança.

Do torque, medido em função da rotação, foi determinado à potência e o rendimento mecânico. A determinação do rendimento mecânico foi realizada para o motor operando somente com gasolina comercial e EPROM original e motor operando com AEHC e EPROM remapeada. O decorrer dessas duas linhas de atuação é mostrado a seguir.

## 3.1 – ENSAIO RODOVIÁRIO

A *primeira linha de atuação* foi à adição progressiva de AEHC ao gasohol, diretamente ao tanque de combustível de dois veículos normais, em utilização e trajetos diários também normais, sem qualquer alteração das características do veículo.

Os veículos utilizados foram: um Golf 2.0 e um Astra 2.0. As características técnicas desses veículos são mostradas no Anexo E.

O objetivo dessa modalidade de teste é avaliar a dirigibilidade do veículo, a resposta ao consumo de combustível e o efeito sobre a partida a frio.

Entende-se por dirigibilidade, a avaliação subjetiva do comportamento do veículo em retomadas de velocidades, capacidade de vencer rampas, em movimento ou em saídas.

Como o único teste quantitativo à disposição do consumidor é o consumo de combustível, em km/litro, adota-se este tipo de avaliação durante esta etapa do trabalho.

Espera-se que um elevado número de quilômetros envolvidos em cada porcentagem de mistura dê uma confiabilidade estatística nos dados de consumo, levando-se em conta a variação das condições operacionais como tipo de rodovia, condições de tráfego, velocidades desenvolvidas (regime de operação), condições climáticas, etc. Os dados foram anotados em uma planilha para posterior realização de cálculos em outra planilha eletrônica.

### 3.1.1 – CARACTERÍSTICA DA PLANILHA

Para compilação dos dados foi desenvolvida planilha eletrônica para lançamento de dados como datas, quilometragem e abastecimentos de modo a permitir a realização de cálculos de consumo de combustível vinculados às porcentagens de álcool total da mistura, conforme Anexos F e G.

A porcentagem de álcool total misturado à gasolina é igual à quantidade de AEHC adicionado, mais a quantidade de AEAC já contido no gasohol dividido pelo total da mistura.

Fração Álcool Total (%) = [Quantidade AEHC (litros) + Quantidade AEAC presente no gasohol (litros)] / [Quantidade AEHC (litros) + Quantidade gasohol (litros)] . 100 % (3.01)

em que, por exemplo, admite-se que a fração de AEAC presente no gasohol é igual a 25%, ou 0,25.

Como exemplo, uma mistura de 25 litros gasohol e 10 litros de AEHC têm uma porcentagem de álcool total igual a:

Fração Álcool Total (%) = 10 (l) AEHC + 0,25 . 25 (l) gasohol / [10 (l) AEHC +25 (l) gasohol] . 100 %

Fração Álcool Total (%) = 46 %

Na planilha consta a porcentagem de álcool total do novo abastecimento e a porcentagem de álcool total existente no tanque após o novo abastecimento.

A porcentagem de álcool total existente no tanque após o novo abastecimento é calculada pela média ponderada entre a porcentagem de álcool total existente no tanque antes do abastecimento e a porcentagem de álcool total do novo abastecimento, como mostrado a seguir:

Fração Álcool Total Tanque (%) = {[Capacidade do Tanque (l) – Quantidade AEHC Novo Abastecimento (l) – Quantidade Gasohol Novo Abastecimento (l)] . Fração Álcool Total Tanque Antes do Abastecimento (%) + [Quantidade AEHC Novo Abastecimento (l) + Quantidade Gasohol Novo Abastecimento (l)] . Fração Álcool Total Novo Abastecimento (%)]} / Capacidade Tanque (l) . 100 % (3.02)

Como exemplo, suponha que, para um tanque com capacidade para 52 litros, cuja porcentagem de álcool total da mistura existente é igual a 30%, foi completado com 35 litros de uma nova mistura como a do exemplo acima (25 litros de gasohol e 10 litros de AEHC), então a nova porcentagem de álcool total fica:

Fração Álcool Total Tanque (%) = [(52 - 25 - 10) . 0,30 + (25 +10) . 0,46)] / 52 .100 %

Fração Álcool Total Tanque (%) = 41%

A planilha apresenta na sexta coluna, campo para marcação da porcentagem de álcool existente na gasolina comercial. Essa coluna é necessária, pois, por decreto governamental, ocorreu variação da porcentagem de álcool adicionado à gasolina comercial durante o período de teste, passando de 24% para 25%, depois para 20% e novamente 25%.

Nota-se ainda, no Anexo F e Anexo G, que os abastecimentos realizados em dois únicos postos específicos de abastecimento, forneceram combustível com 35 % de álcool adicionado à gasolina (gasolina comercial = 24% na época), durante um determinado período. Os resultados são mostrados no próximo capítulo.

## 3.2 – ENSAIO EM BANCADA DINAMOMÉTRICA

A *segunda linha de atuação* foi o estudo caracterizado pelo levantamento de dados em bancada dinamométrica em um motor FIAT FIASA 1.0 cujas características estão mostradas no Anexo B. O ensaio em bancada dinamométrica foi realizado em duas condições distintas descritas nos itens 3.2.1 e 3.2.2 a seguir.

### 3.2.1 – ENSAIO COM MOTOR A GASOHOL OPERANDO COM SISTEMA ELETRÔNICO DE CONTROLE SEM ALTERAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS ORIGINAIS E COM ALIMENTAÇÃO DE COMBUSTÍVEL POR MISTURAS VARIADAS DA PORCENTAGEM DE AEHC NA GASOLINA

Este ensaio visa o levantamento de dados de desempenho do motor em *plena carga*, tais como:

- Torque em função da rotação;
- Consumo de combustível em gramas/segundo;
- Avanço de ignição;
- Tempo de injeção;

Dos ensaios de consumo e torque, em função da rotação foram determinado:

- Potência;

- Rendimento global e seus componentes (rendimento térmico, rendimento indicado, rendimento mecânico) para motor operando com gasolina comercial (gasohol a 25%);
- Consumo específico.

### 3.2.1.1 – PREPARAÇÃO DA MISTURA DE AEHC-GASOLINA

A mistura foi preparada em recipientes de 4 litros, dosando-se a quantidade de gasohol e AEHC através de uma proveta de 1 litro, graduada com divisões de 0,01 litro. Após colocação das respectivas quantidades, a mistura foi homogeneizada por agitação e descanso.

Admitindo-se gasohol composto por 75% de gasolina e 25% de AEAC, a quantidade de AEHC a ser adicionada ao gasohol, em função das porcentagens a serem ensaiadas, são calculadas pela equação (3.1), reescrita a seguir:

Fração Álcool total (%) = [Quantidade de AEHC (l) + 0,25 . Quantidade de gasohol (l)] / 4 litros de mistura (3.03)

Sabendo-se ainda que:

Quantidade Gasohol (l) + Quantidade de AEHC (l) = 4 litros (3.04)

Substituindo-se (3.04) em (3.03) e reagrupando, tem-se:

Quantidade AEHC (l) = (4 . Fração Álcool total – 1) / 0,75 (3.05)

Como a porcentagem de Álcool total foi definida no item 3.1.1, das equações (3.04) e (3.05) constrói-se tabela 3.1.

**TABELA 3.1 – Quantidade de AEHC e gasohol em função da % de álcool total**

| ÁLCOOL TOTAL (%) | QUANTID. AEHC (litros) | QUANTID. GASOHOL (litros) |
|---|---|---|
| 25 | 0,00 | 4,00 |
| 35 | 0,53 | 3,47 |
| 45 | 1,07 | 2,93 |
| 55 | 1,60 | 2,40 |
| 65 | 2,13 | 1,87 |
| 75 | 2,67 | 1,33 |
| 85 | 3,20 | 0,80 |
| 95 | 3,73 | 0,27 |
| 100 | 4,00 | 0,00 |

### 3.2.2 – ENSAIO COM MOTOR A GASOHOL OPERANDO COM SISTEMA ELETRÔNICO DE CONTROLE COM ALTERAÇÃO DOS PARÂMETROS DA EPROM (CHIP) DA ECU E COM ALIMENTAÇÃO DE COMBUSTÍVEL POR AEHC PURO

Analogamente ao item anterior, este ensaio visa o levantamento de dados de desempenho do motor em *plena carga*, tais como:

- Torque em função da rotação;
- Consumo de combustível em gramas/segundo;
- Avanço de ignição;
- Tempo de injeção;

Do torque, em função da rotação foi determinado:

- Potência;
- Determinação do rendimento global e seus componentes (rendimento térmico, rendimento indicado, rendimento mecânico) para motor operando com AEHC puro;
- Consumo específico.

### 3.2.2.1 – SUBSTITUIÇÃO DA EPROM (CHIP)

O objetivo deste item é somente a de fornecer uma idéia geral do remapeamento de EPROM, não sendo o escopo do trabalho fazer qualquer aprofundamento nesta questão.

A EPROM – Erasable Programable Read Only Memory (Memória Programável Somente para Leitura) que vai montada dentro da ECU, conforme mostrado na figura 3.1, é um chip eletrônico onde estão gravados as calibrações (mapas), ou seja, os ajustes originais de fábrica que determinam como o motor deve se comportar para que os índices de gases poluentes sejam mantidos dentro de valores exigidos por lei.

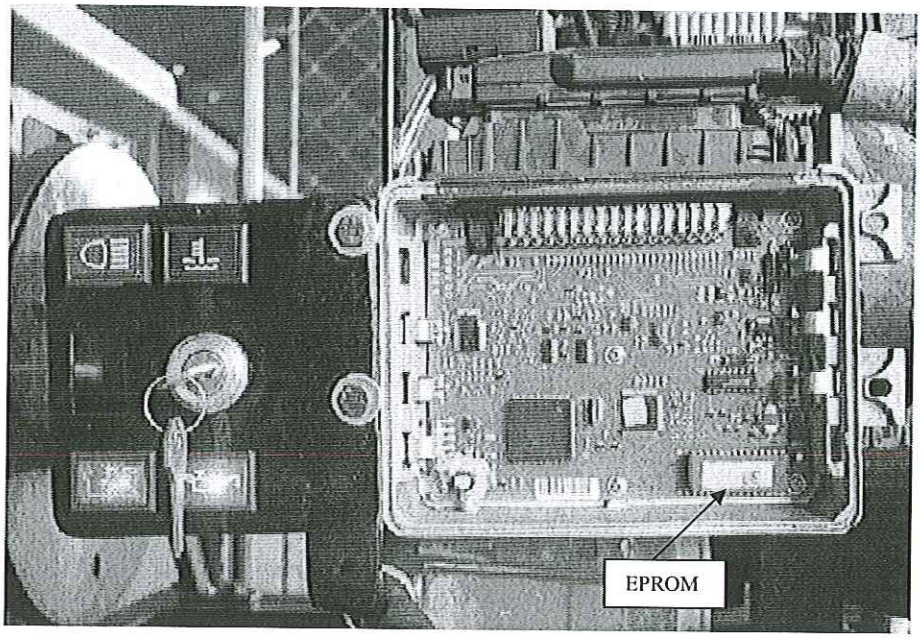



**FIGURA 3.1 – Fotografia da ECU contendo a EPROM do motor utilizado no experimento**

Para responder a solicitação do motorista, a ECU colhe as informações vindas dos vários sensores instalados no motor e as processa de acordo com o que está gravado na EPROM, ou seja, o motor será comandado segundo os padrões designados pela fábrica para as mais variadas condições de solicitação. A partir do processamento são enviados os sinais para os atuadores realizarem a injeção adequada de combustível para gerar a mistura A/C e liberar a centelha da vela no momento mais apropriado.

A reprogramação da EPROM é realizada por um equipamento que lê as informações originais e as transfere para a memória de um computador. Com os dados no computador, são identificados os mapas utilizados pela ECU na situação em que se deseja mudar o funcionamento do motor.

Para leitura e transformação dos dados contidos na EPROM é utilizado um software específico. Para a reprogramação da EPROM do motor ensaiado neste trabalho foi utilizado um programa de origem italiana chamado EPROM WIZARD 2.XX elaborado pela MECTRONIK.

A EPROM utilizada neste trabalho foi uma do tipo 27C512 e foi reprogramada para ser utilizada por um motor FIASA 1.0 a AEHC. Várias versões foram realizadas, a partir de modificações da EPROM original, alterando-se parâmetros, basicamente de injeção e ponto de ignição, de modo a obter uma melhor performance do veículo, com relação a acelerações, retomadas de velocidade e funcionamento estável nas varias rotações, para o novo combustível (AEHC). A dificuldade de se trabalhar na EPROM da ECU é que não se dispõe de informações sobre seu conteúdo. Geralmente combina-se o método da tentativa-e-erro com a troca de informações com outros usuários de programas semelhantes.

A programação final foi elaborada visando maximizar a potência do motor, tendência esta encontrada comercialmente. A figura 3.2 mostra uma fotografia dos equipamentos utilizados para a programação do chip.

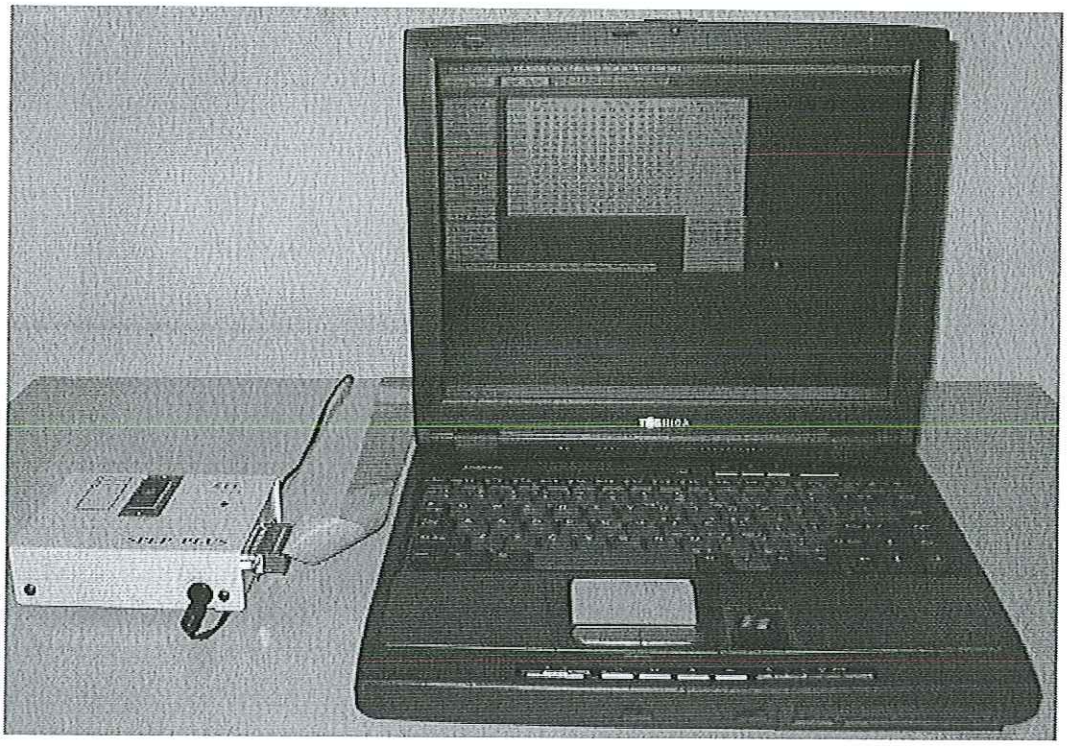


**FIGURA 3.2 – Fotografia dos equipamentos para reprogramação do chip**

Os parâmetros reprogramados da EPROM estão focados na injeção de combustível e no avanço de ignição. As curvas que representam esses parâmetros são mostradas nas figuras

subseqüentes. Cabe dizer que estas curvas se referem a EPROM 27C512 da ECU Magneti-Marelli IAW 1G7.5D. Para outras ECU's as formas, funções e endereços podem mudar consideravelmente.

- ***Curva de ajuste do checksum***

  A figura 3.3 representa a curva de ajuste do Checksum.

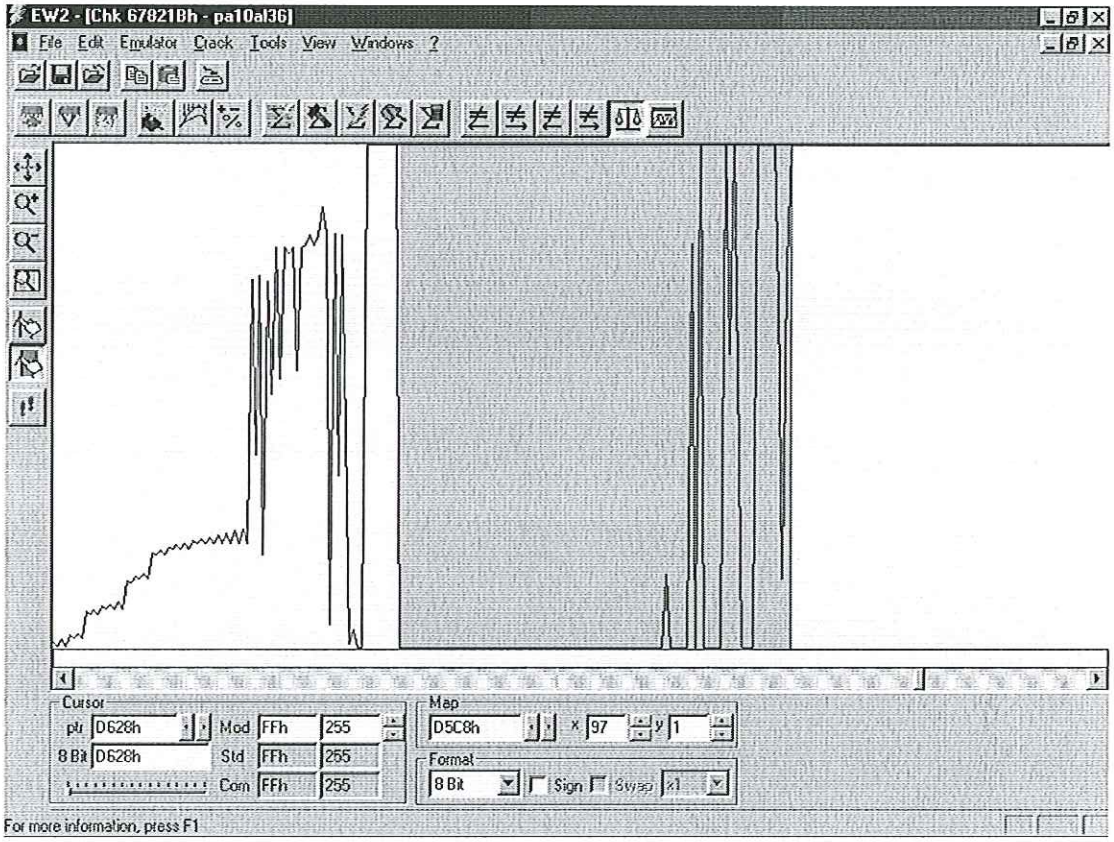



**FIGURA 3.3 – Curva de ajuste do checksum**

O checksum é um mecanismo de auto verificação, utilizado para garantir a integridade do sistema. Esse mecanismo utiliza uma comparação da área gráfica da EPROM com uma área padrão. Quando é realizada uma modificação qualquer essa área é alterada e fica diferente da área padrão. Portanto, se houver alguma alteração no conteúdo da EPROM, esse mecanismo, conferindo a área padrão com a remapeada, acusa a alteração através da indicação de falha do sistema de injeção. A falha de checksum pode apenas provocar o acendimento de uma luz no painel do veículo como pode também mobilizar o sistema fazendo-o assumir uma condição de emergência, na qual o condutor deverá efetuar os devidos reparos.

Assim "acertar" o checksum significa restabelecer a área gráfica da EPROM modificada buscando a autoverificação do sistema. O local da EPROM onde será realizada a compensação da área gráfica é determinado, o que também faz parte da compensação. O gráfico da figura 3.3, mostra a área sombreada como sendo uma correção do checksum da nova EPROM.

- ***Curva de ajuste do avanço de ignição (ponto)***

  A figura 3.4 mostra a curva de avanço de ignição.

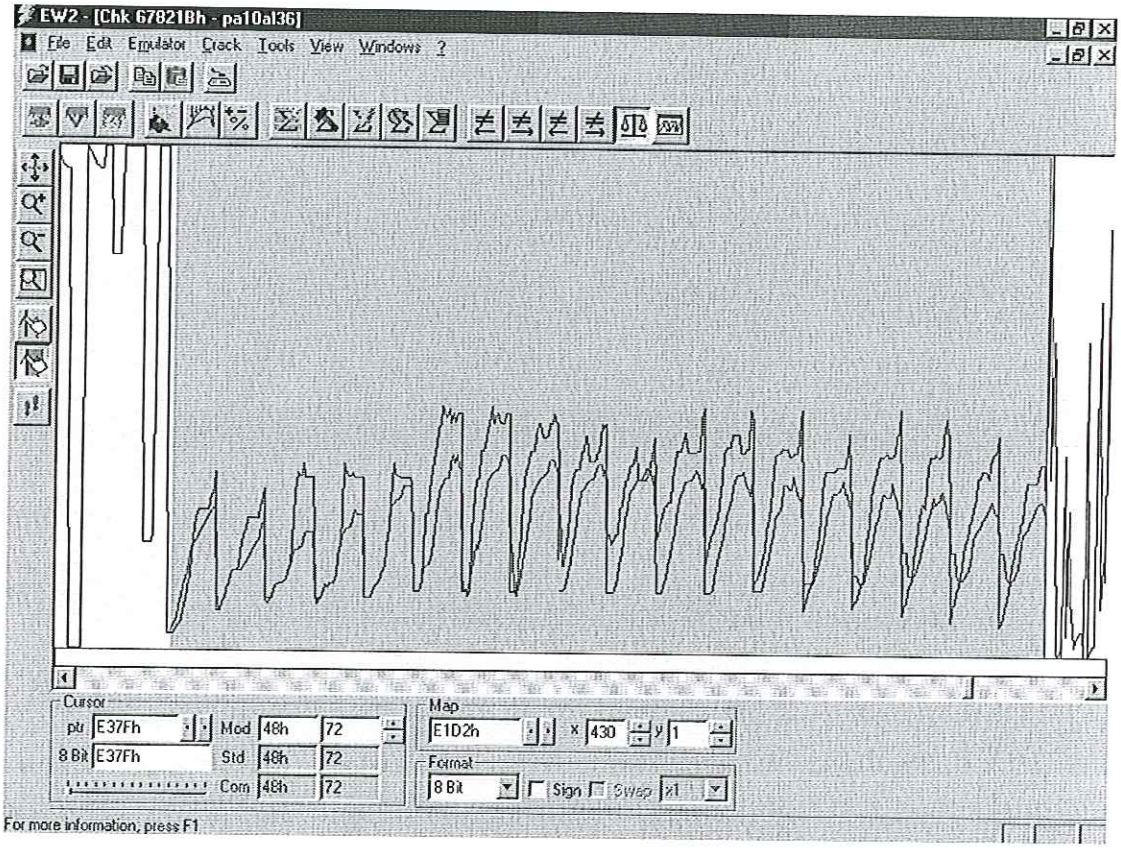



**FIGURA 3.4 – Curva de avanço de ignição**

**Curva inferior = original / Curva superior = remapeada**

Note que existem 18 elevações (que se parecem dentes) que relacionam o ponto de ignição com 18 medidas da pressão absoluta no coletor de admissão (MAP). Para cada elevação, nas rampas da esquerda para a direita (área sombreada), estão gravados 24 pontos que representam rotações de 0 a 8000 rpm. Quanto maior a ordenada do ponto, significa maior avanço da centelha.

Assim, a figura 3.4 mostra a elevação da curva original (inferior) para uma curva com ponto de ignição avançado (superior). No experimento o efeito de avanço do ponto pode ser notado pela sua medição com um aparelho chamado scaner.

- ***Curva de ajuste de injeção de combustível em cargas parciais***

  A figura 3.5 representa a curva de ajuste da injeção de combustível.

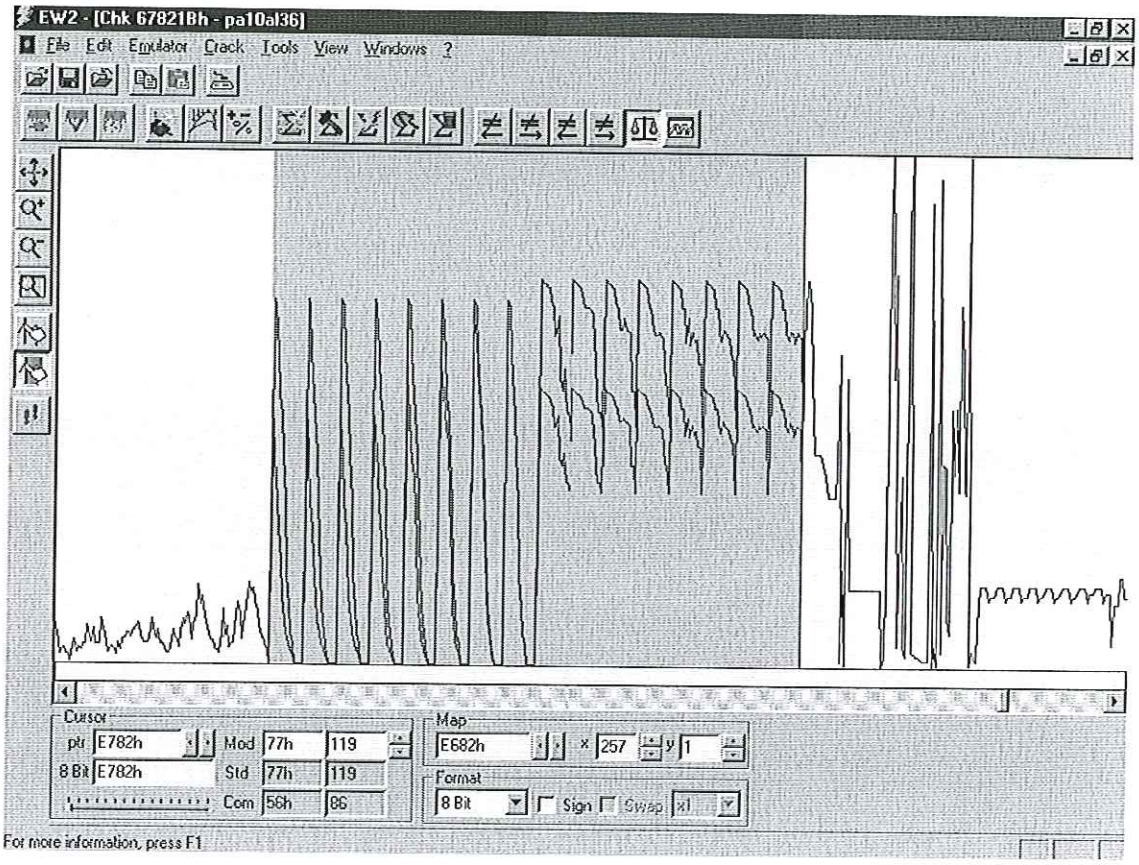



**FIGURA 3.5 – Curva injeção**

**Curva inferior = original / Curva superior = remapeada**

Do centro da figura para a direita da área sombreada, estão representadas rotações de 0 a 4000 rpm. Do centro da figura para a esquerda da área sombreada, estão representadas as rotações de 4500 a 8000. Portanto, cada saliência representa 500 rpm na curva.

Assim a figura 3.5 representa da quantidade de combustível a ser injetada no motor, sendo, a injeção original, mostrada pela curva inferior e a curva com a injeção alterada pela reprogramação, mostrada pela superior. O experimento permite verificar esse efeito através do tempo de injeção medido pelo scaner.

- *Curva de injeção e avanço da ignição em marcha lenta*

A figura 3.6 representa a curva de ajuste para o motor funcionando em marcha lenta.

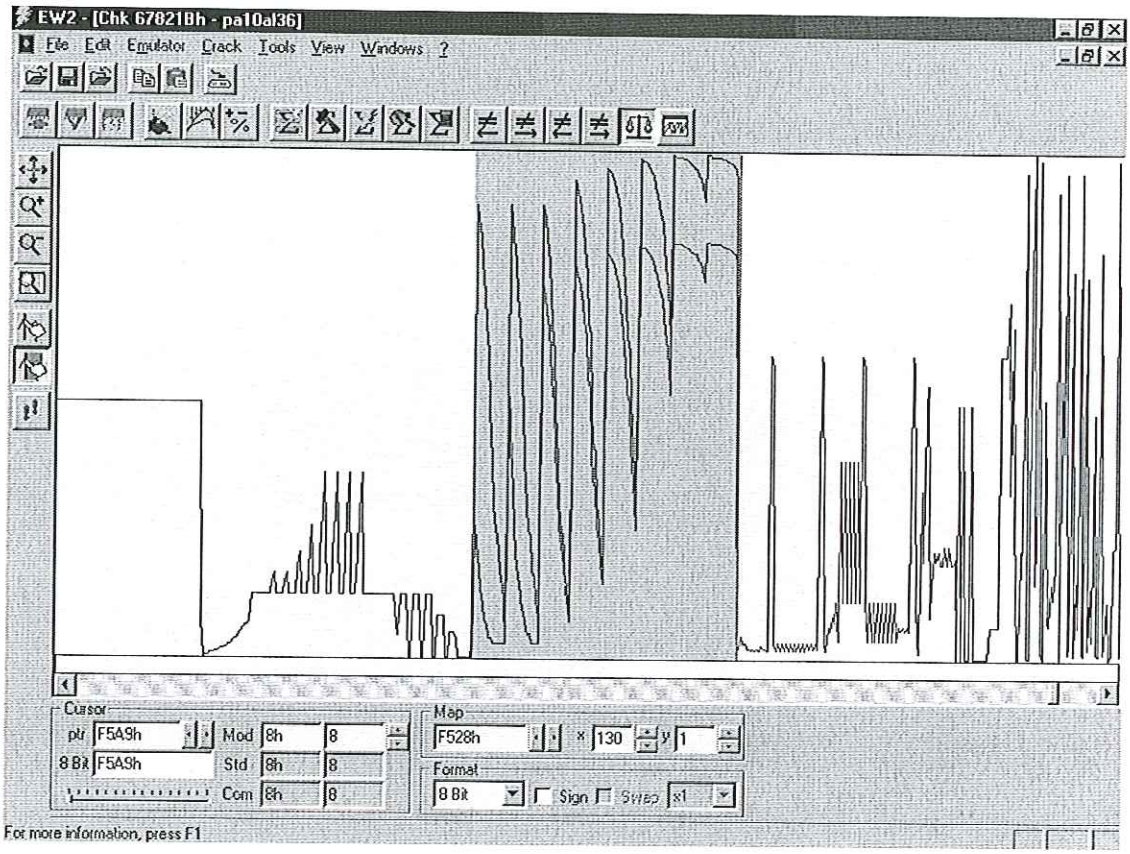



**FIGURA 3.6 – Curva de injeção e avanço de ignição em marcha lenta**
**Curva inferior = original / Curva superior = remapeada**

As curvas do gráfico onde ocorrem sobreposição de curvas (área sombreada) possui duas saliências a direita que representam o ajuste de avanço de ignição. As outras seis saliências à esquerda representam as curvas de injeção de combustível.

Analogamente ao item anterior as curvas superiores representam o ajuste de avanço e injeção na marcha lenta para a EPROM remapeada e as curvas inferiores a curva da EPROM original.

### 3.2.3 – DESCRIÇÃO DO ENSAIO EXPERIMENTAL

Este item descreve os procedimentos para realização do ensaio experimental dos itens 3.2.1 e 3.2.2, a partir da operação de um motor FIAT FIASA 1.0 em bancada dinamométrica, monitorado por alguns equipamentos que serão descritos à frente.

Os dados a serem levantados, descritos nos itens 3.2.1 e 3.2.2, ou seja, torque, consumo de combustível, avanço de ignição e tempo de injeção, foram realizados para rotações iniciando-se em 1000 rpm até 6000 rpm, com intervalos de 500 rpm. Os valores de 1000 rpm e 6000 rpm são respectivamente o milhar mais próximo do valor da rotação de marcha lenta e a da potência máxima.

Esses dados, com exceção ao rendimento mecânico, foram levantados para álcool total misturado à gasolina nos valores de 25%, 35%, 45%, 55%, 65%, 75% e 85% para a ECU do motor com EPROM original (características do motor a gasohol). O critério de álcool total é o mesmo utilizado no item 3.1.1. O rendimento mecânico foi levantado somente para o gasohol (gasolina comercial) a 25%.

Posteriormente a EPROM da ECU foi substituída e realizado o mesmo levantamento para AEHC puro, inclusive para o rendimentos mecânico.

Na troca de mistura tomou-se o cuidado de deixar o motor funcionando por determinado tempo de modo a ocorrer todo o consumo do combustível da mistura anterior remanescente na bomba, mangueiras e tubo distribuidor. Esse tempo de funcionamento é importante, também, para que a autoadaptatividade do sistema eletrônico do motor à nova mistura, fosse garantida.

O levantamento de dados foi realizado iniciando-se da maior rotação para a menor com três repetições. Para a repetição, voltava-se novamente a maior rotação.

Foram levantados dados de umidade relativa do ar, temperatura de bulbo seco e bulbo úmido e pressão atmosférica, com a finalidade de realizar a correção da potência e torque em função das condições atmosféricas. Apesar de ter sido levantada à umidade relativa e temperatura de bulbo úmido, eles não foram utilizados na correção, visto que a norma ABNT não contempla esses dados, conforme descrito no capítulo 2, item 2.4.2.4.

#### 3.2.3.1 – COMPONENTES DA BANCADA DINAMOMÉTRICA

O motor foi ensaiado em bancada montada sobre rodas, com fixação e suporte de todos os equipamentos envolvidos, ou seja:

- Motor instalado com filtro de ar, alternador, motor de partida, e demais componentes originais;
- Dinamômetro;
- Radiador e ventilador de arrefecimento acionado por energia elétrica da rede;
- Painel contendo chave de partida, luz de "espia" para pressão de óleo, temperatura, carga da bateria e falha de ignição;
- Bateria;
- Escapamento com silencioso;
- ECU Magnetti-Marelli IAW 1G6.5D.

A visualização da bancada é mostrada pela figura 3.7.

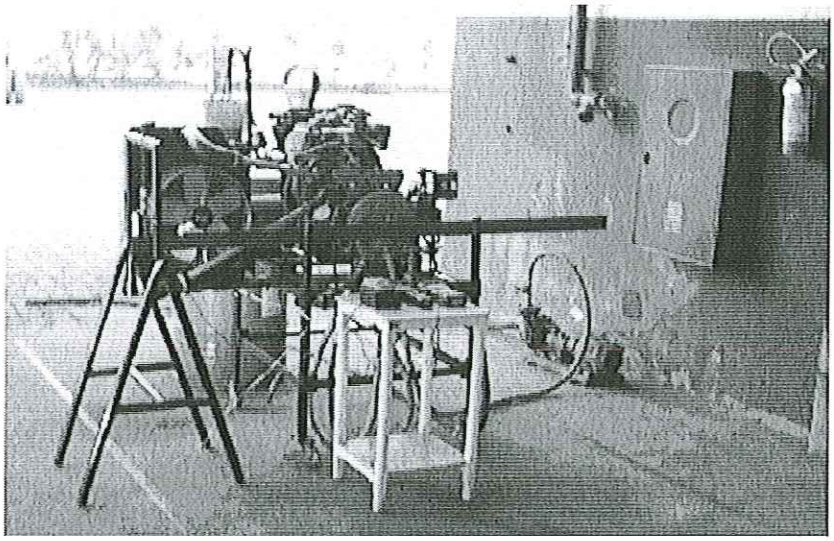


**FIGURA 3.7 – Fotografia da bancada dinamométrica**

O motor utilizado foi um motor Fiat FIASA 4 cilindros, 994 $cm^3$ com as características técnicas mostradas no Anexo B. O motor passou por uma revisão completa com substituição dos filtros, troca de óleo e limpeza das válvulas injetoras.

### 3.2.3.2 – DETERMINAÇÃO DO TORQUE DO MOTOR

A medida do torque do motor foi realizada com um dinamômetro com as características, segundo CELERE (1981), apresentadas na tabela 3.2.

**TABELA 3.2 – Dados do dinamômetro**

| DADOS GERAIS | ESPECIFICAÇÃO |
|---|---|
| FABRICANTE | Go Power |
| MODELO | DA 500 |
| VAZÃO (l/min) | 32 |
| PRESSÃO MÁXIMA (kgf/cm$^2$) | 1,75 |
| CAPACIDADE (CV) | 100 |

A fornecimento de água para o dinamômetro foi realizada por intermédio de bomba centrífuga marca Imbil, modelo Ita 32/560, número de série 04/1989 alimentada por reservatório de água com registro dosador, de modo a garantir vazão constante para uma operação adequada do sistema. Para esse experimento a vazão de alimentação para o dinamômetro foi de 19 litros/minuto.

Bomba d'água de deslocamento positivo não tem desempenho satisfatório, visto a grande sensibilidade desse dinamômetro à alimentação de água e a dificuldade de regular a vazão, para esse tipo de bomba. A figura 3.8 mostra um detalhe da bomba centrífuga e da conexão de saída em "Y".

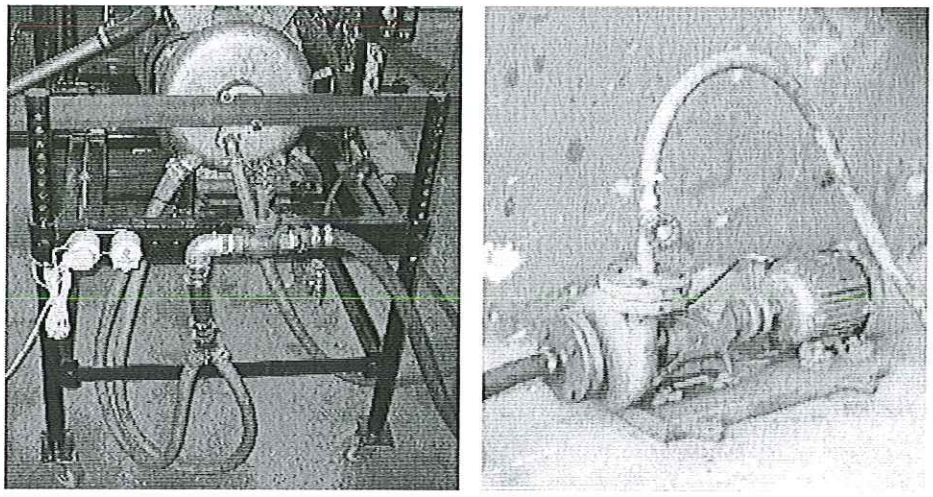


**FIGURA 3.8 – Fotografia da bomba centrífuga e conexão de saída em "Y"**

Optou-se pela descarga d'água do dinamômetro por descarte, evitando-se a recirculação em circuito fechado e, conseqüentemente, a necessidade de resfriamento. Foi utilizada duas saídas (esquerda – contrária à rotação do motor) de água do dinamômetro com junção em "Y" em um registro de esfera de 1 polegada para a regulagem de saída d'água.

Para leitura da carga dinamométrica, foi instalado um braço de 2,10 metros, eqüidistante do centro do dinamômetro, composto por um ponto de fixação para a célula de carga, a 1 metro desse mesmo centro. A célula de carga utilizada foi modelo SV-20, com capacidade máxima para 20 kg, fabricado pela ALFA-Instrumentos Eletrônicos Ltda.

A fotografia do arranjo de fixação da célula de carga é mostrada pela figura 3.9.

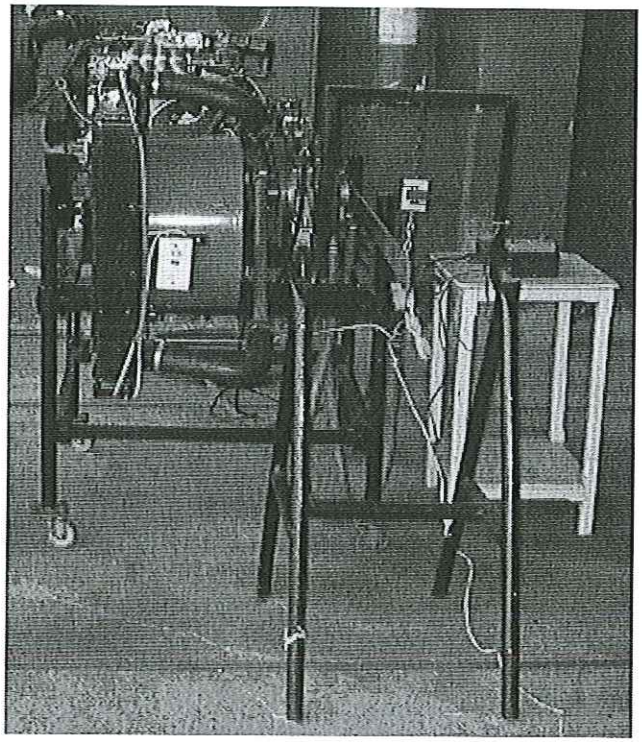


**FIGURA 3.9 – Fotografia do bancada dinamômetrica com detalhe da célula de carga**

A leitura da carga foi coletada por multímetro digital, modelo DT 830 B, fabricado pela PROFIELD (ver figura 3.11) através da tomada da voltagem. As especificações do multímetro operando com a função – voltagem – é mostradas na tabela 3.3.

**TABELA 3.3 – Especificações do multímetro**

| FAIXA DE OPERAÇÃO | RESOLUÇÃO | ACURÁCIA |
|---|---|---|
| 200 mV | 100 um | |
| 2000 mV | 1 mV | |
| 20 V | 10 mV | +/- 0,5% rdg +/- 2 digitos |
| 200 V | 100 mV | |
| 600 V | 1 V | |

A célula de carga responde com uma tensão linear à carga aplicada. Para calibração da célula de carga foi construída uma tabela através da aplicação de cargas conhecidas (medida por balança mássica), com 6 repetições de medidas, em função da resposta de tensão. A repetição das medidas foi realizada com a retirada completa da carga da célula, após nova aplicação.

Todas as respostas em tensão foram iguais para a mesma carga aplicada. Essa tabela pode ser visualizada pela tabela 3.4, a seguir.

**TABELA 3.4 – Equivalência entre carga e tensão**

| CARGA APLICADA (kgf) | RESPOSTA EM TENSÃO (mV) |
|---|---|
| 0 | 3,2 |
| 4 | 6,5 |
| 8 | 10,0 |
| 12 | 13,4 |
| 16 | 17,3 |
| 20 | 20,7 |

A equação da reta, construída a partir da Tabela 3.4, pelo método dos mínimos quadrados é mostrada no gráfico da figura 3.10 abaixo:

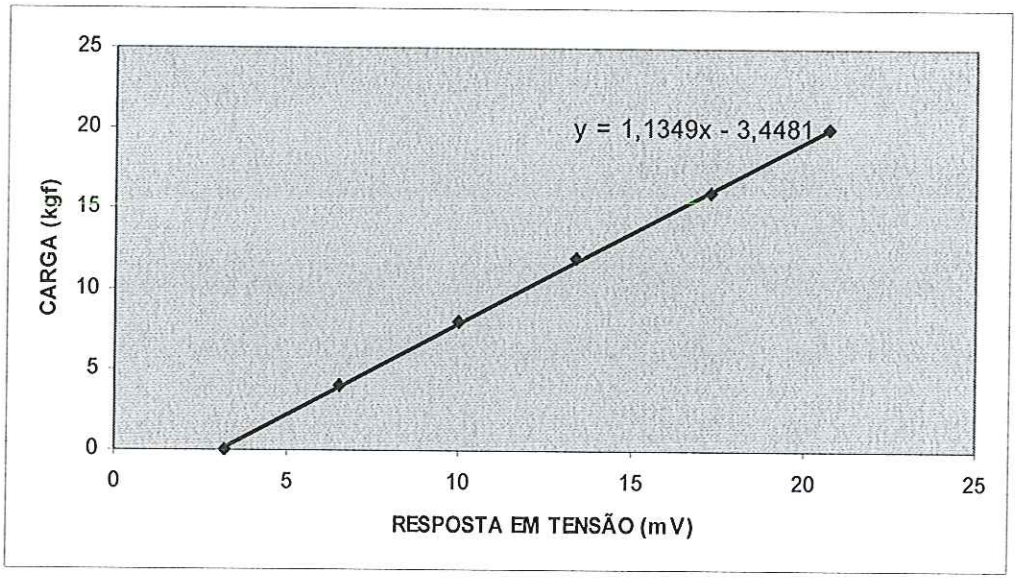



**FIGURA 3.10 – Gráfico de Carga Aplicada x Resposta em Tensão**

em que:

carga = força exercida pelo dinamômetro sobre a célula de carga (kgf)

tensão = tensão elétrica medida pelo voltímetro (mV)

Para carga em (N) a equação mostrada no gráfico se torna:

$$\text{Carga} = 11{,}1334 \cdot \text{Tensão} - 33{,}8259 \qquad (3.06)$$

### 3.2.3.3 – DETERMINAÇÃO DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

O consumo de combustível pode ser medido em base volumétrica ou mássica. Embora seja um método mais simples, a determinação do consumo em base volumétrica, segundo HILDEBRAND Jr (1998), não é totalmente aceito pelas sociedades e normas existentes por obter a massa ou peso de combustível de maneira indireta, ou seja, pelo valor da densidade. Desta forma optou-se por determinar o consumo de combustível através da medição direta da massa do combustível consumido no motor de testes.

A determinação do consumo de combustível foi realizada por medida da diferença de massa contida no recipiente, num determinado tempo, por uma balança mássica. Foi utilizada uma balança marca Filisola, para capacidade de 20 kg e divisão de 20 gramas, conforme mostrado na figura 3.11. O tempo de medição da diferença de massa para cada rotação e mistura, foi variável e superior a 1 minuto. Variável porque, para a obter uma boa visualização, era esperado pelo ponteiro da balança atingir um determinado ponto sobre a escala.

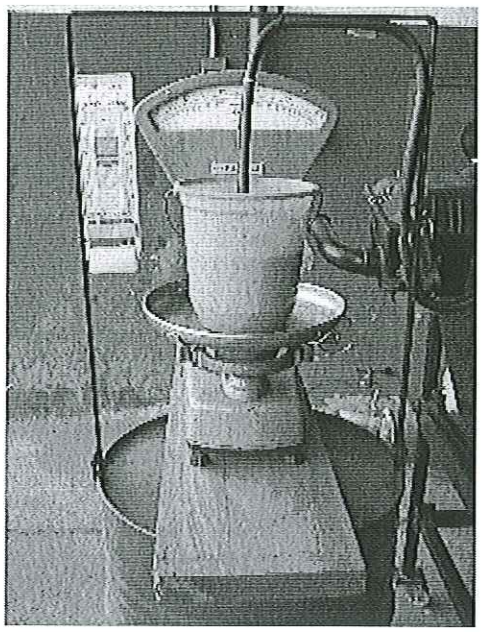


**FIGURA 3.11 – Fotografia da balança mássica e termômetro bulbo úmido/bulbo seco**

### 3.2.3.4 – DETERMINAÇÃO DO PONTO DE IGNIÇÃO, TEMPO DE INJEÇÃO, ROTAÇÃO E PRESSÃO ATMOSFÉRICA

Estes parâmetros foram monitorados por um scaner marca Alfatest, modelo Kaptor 2000 conforme figura 3.12. A pressão atmosférica é obtida pelo sensor MAP com o motor parado.

**FIGURA 3.12 – Fotografia do multímetro Profield modelo DT 830 B, medidor de vazão Texto-Term modelo 490 e scaner Alfatest modelo Kaptor 2000**

### 3.2.3.5 – TEMPERATURA DE BULBO ÚMIDO, BULBO SECO E UMIDADE RELATIVA DO AR

Esses dados foram medidos por um psichrometro instalado próximo ao filtro de ar. O psichrometro traz anexa uma tabela da umidade em função das temperaturas de bulbo seco e úmido. O aparelho pode ser visualizado na figura 3.11.

## 3.2.4 – DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO GLOBAL

O rendimento global é obtido, como citado no capitulo 2, pelo produto dos rendimentos térmico, mecânico e o indicado. Os procedimentos para a determinação de cada um desses rendimentos são mostrados a seguir.

### 3.2.4.1 – DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO TÉRMICO

A determinação do rendimento térmico será realizada por cálculo teórico, utilizando a equação (2.28) e os dados do motor FIAT FIASA mostrados no Anexo B.

### 3.2.4.2 – DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO MECÂNICO

A determinação do rendimento mecânico seguiu a método Morse. Segundo PENIDO F$^{Q}$ (1991) a metodologia do processo Morse, consiste em medir separadamente a potência absorvida pelas resistências passivas do motor para cada cilindro.

Tomando no caso o motor de 4 cilindros, a obtenção da potência absorvida pelo método Morse é feita do seguinte modo:

Inicialmente mede-se a potência efetiva do motor a uma determinada rotação. Em seguida desliga-se a ignição do primeiro cilindro (neste experimento desligou-se a ignição e a válvula injetora eletromagnética de combustível para, além de economizar combustível, evitar que a gasolina não queimada lava-se o cilindro) e mede-se a potência no dinamômetro, na mesma rotação a que foi medida a potência efetiva. A potência indicada no primeiro cilindro é igual à diferença entre a potência efetiva do motor com todos os cilindros com ignição e da potência com o primeiro cilindro sem ignição.

$$Ni_{(1)} = Ne - Ne_{(1)} \quad (3.07)$$

em que:

$Ni_{(1)}$ = potência indicada do primeiro cilindro

Ne = potência efetiva com os 4 cilindros

$Ne_{(1)}$ = potência efetiva do motor sem a ignição do primeiro cilindro (motor funcionando com 3 cilindros)

Procedendo da mesma maneira para os demais cilindros tem-se:

$$Ni_{(2)} = Ne - Ne_{(2)} \quad (3.08)$$

$$Ni_{(3)} = Ne - Ne_{(3)} \quad (3.09)$$

$$Ni_{(4)} = Ne - Ne_{(4)} \quad (3.10)$$

A potência indicada do motor será igual à soma das potências indicadas de todos os cilindros:

$$Ni = Ni_{(1)} + Ni_{(2)} + Ni_{(3)} + Ni_{(4)} \quad (3.11)$$

Da expressão (2.27),

$$\eta_m = Ne / Ni$$

obtêm-se o rendimento mecânico para o gasohol e AEHC, para cada rotação.

### 3.2.4.3 – DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO INDICADO

O rendimento indicado será determinado de uma maneira indireta. Partindo-se da eq. (2.26) e (2.2.7) e reagrupando, tem-se:

$$\eta_i = 632 / (\eta_{te} \cdot \eta_m \cdot C_s \cdot P_{ci}) \quad (3.12)$$

em que:

$C_s$ = consumo específico [kg/(CV.h)]

$P_{ci}$ = poder calorífico inferior (kcal/kg)

Como o consumo específico e o rendimento mecânico foram obtidos experimentalmente, o rendimento térmico foi obtido por cálculo e o poder calorífico é fornecido pela literatura, obtêm-se o rendimento indicado.

# CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados apresentados neste capítulo seguirão a ordem dada pelo capítulo 3, ou seja, serão divididos em dois grupos:

- Ensaio rodoviário
- Ensaio em bancada dinamométrica

## 4.1 – ENSAIO RODOVIÁRIO

Conforme relatado no capítulo 3, o ensaio rodoviário envolveu a utilização de dois veículos originalmente a gasohol em trajetos rodoviários, operando com misturas variadas de AEHC no gasohol.

Procuraram-se neste período do ensaio manter, apesar das dificuldades, um padrão de operação no tocante a velocidade, trajeto e carga do veículo. Essas condições desejadas são difíceis de serem alcançadas, pois a simples diferença ambiental e as condições de trânsito momentâneas interferem nos resultados. Porém, um grande número de quilômetros rodados pode minimizar o efeito indesejável e propiciar dados estatísticos confiáveis.

Seguindo esse objetivo são apresentados a seguir os dados realizados nos percursos rodoviários.

### 4.1.1 – AVALIAÇÃO DO VEÍCULO GOLF 2.0 GLX

Esse veículo foi operado sob avaliação, no período e km descritos na tabela 4.1.

**TABELA 4.1 – Síntese do levantamento de dados do Golf 2.0 GLX**

| | Data | Hodômetro |
|---|---|---|
| Início do levantamento | 19/02/02 | 158.361 |
| Fim do levantamento | 11/06/02 | 179.719 |
| Total | 112 Dias | 21.358 km |

Os resultados de consumo de combustível foram lançados em gráfico no intuito de fornecer uma curva de tendência em função da porcentagem de mistura AEHC e gasohol como pode ser visto na figura 4.1.

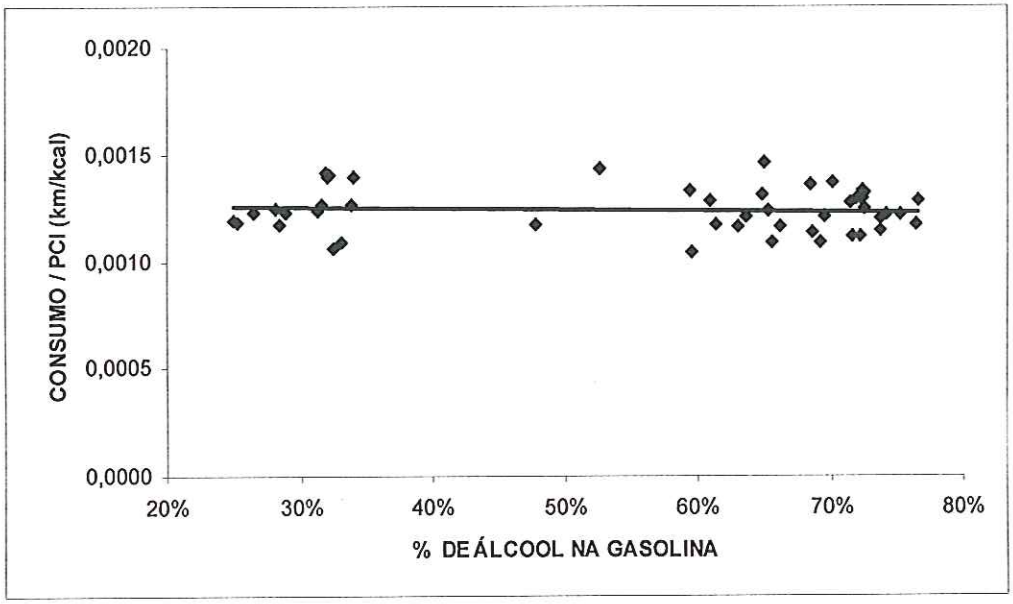



**FIGURA 4.1 – Consumo de combustível x % de álcool na gasolina para Golf 2.0 GLX**

O gráfico mostra uma tendência crescente de consumo de combustível com o aumento da porcentagem de AEHC no gasohol conforme o esperado, uma vez que há diminuição do poder calorífico da mistura. Porém, a mistura ao redor dos 35% chamou a atenção por, aparentemente, produzir um consumo mais baixo. Este ponto foi verificado na etapa seguinte durante os ensaios em bancada dinamométrica, para determinadas rotações, nessa mesma mistura.

A grande variação de consumos verificada pelo baixo valor de $R^2$ vem do fato de ocorrer grandes mudanças no padrão de operação do veículo como citado anteriormente. Essas mudanças no padrão estão relacionadas com as condições do transito, condições e tipo da estrada, condições climáticas, estado psicológico do motorista e carga do veículo. Mesmo

o elevado número de quilômetros não foi suficiente para uma boa correlação de consumo com porcentagem de mistura, ficando o resultado, limitado a curva de tendência.

Uma outra maneira de se avaliar os dados levantados nos ensaios rodoviários é através da relação entre o consumo e o poder calorífico da mistura em função da porcentagem de AEHC na gasolina, como mostrado na figura 4.2.

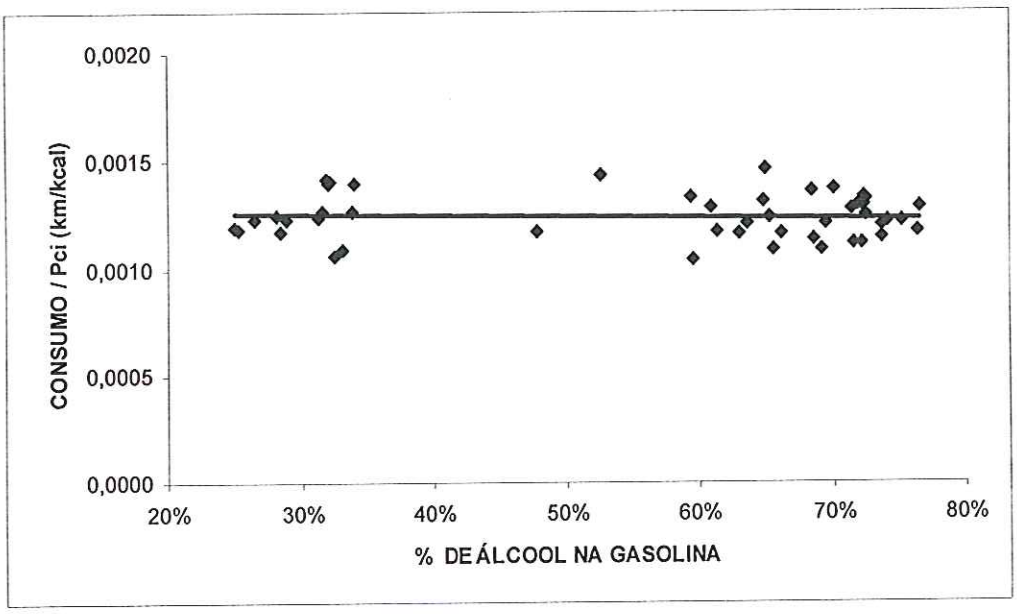



**FIGURA 4.2 – Consumo de combustível / $P_{ci}$ x % de álcool na gasolina Golf 2.0 GLX**

A figura 4.2 mostra que a reta que descreve a relação consumo por poder calorífico em função da % de álcool na gasolina é praticamente horizontal, o que demonstra uma certa capacidade de adaptação do sistema eletrônico de controle.

Sobre uma análise qualitativa do desempenho do veículo, com relação à chamada dirigibilidade, pôde-se notar uma perda de torque do motor com o aumento da porcentagem de mistura de álcool. A perda de torque é detectada pela necessidade de maiores aberturas da borboleta de aceleração para vencimento de rampas, principalmente no início do deslocamento do veículo (movimento do veículo a partir da condição "parado"), além de respostas mais lentas nas retomadas de velocidade.

Esses efeitos apresentam um certo "desconforto" para o motorista nas condições de mistura acima de 70%, principalmente o sentido nas saídas do veículo em rampas, onde é necessário um controle adequado entre aceleração e acionamento de embreagem para não ocorrer o afogamento do motor.

É possível que o "efeito de perda de torque" seja solucionado com um maior enriquecimento da mistura ou com o avanço da ignição. Porém, isso só pode ser realizado a partir da reprogramação da EPROM o qual será estudado e relatado no ensaio em bancada dinamométrica. A comprovação da perda de torque e seu devido dimensionamento também serão estudados e relatados na etapa seguinte.

Outro efeito avaliado com o uso diário do veículo foi o comportamento da partida a frio. Durante esse período atravessou-se parte do verão, o outono completo e parte do inverno, encontrando-se temperaturas de até 12°C. Notou-se, nesses dias de temperaturas baixas, partidas mais difíceis e demoradas e muitas vezes sendo necessário mais de um acionamento. Cabe lembrar que os veículos a gasohol não dispõem de sistema de partida a frio que é imprescindível nos veículos movidos a álcool.

### 4.1.2 – AVALIAÇÃO DO VEÍCULO ASTRA 2.0 16V

Esse veículo foi operado sob avaliação, no período e km descritos na tabela 4.2.

**TABELA 4.2 – Síntese do levantamento de dados do Astra 2.0 16V**

| | Data | Hodômetro |
|---|---|---|
| Início do levantamento | 08/06/2002 | 008 |
| Fim do levantamento | 21/02/2003 | 40.613 |
| Total | 258 Dias | 40.605 km |

Analogamente ao Golf, os resultados de consumo de combustível foram lançados em gráfico no intuito de fornecer uma tendência de consumo de combustível em função da porcentagem de mistura AEHC e gasohol como pode ser visto na figura 4.3.

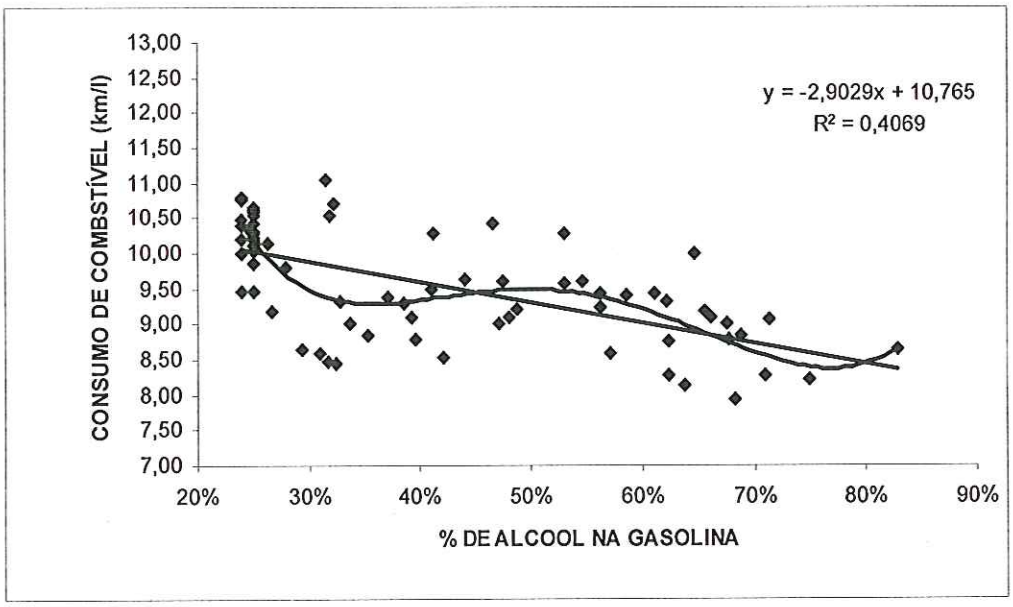



**FIGURA 4.3 – Consumo de combustível x % de álcool na gasolina para Astra 2.0 16V**

A aspecto qualitativo do gráfico de consumo do Astra é semelhante ao Golf.

O gráfico que relaciona o consumo e o poder calorífico da mistura em função da porcentagem de AEHC no gasohol é mostrado na figura 4.4.

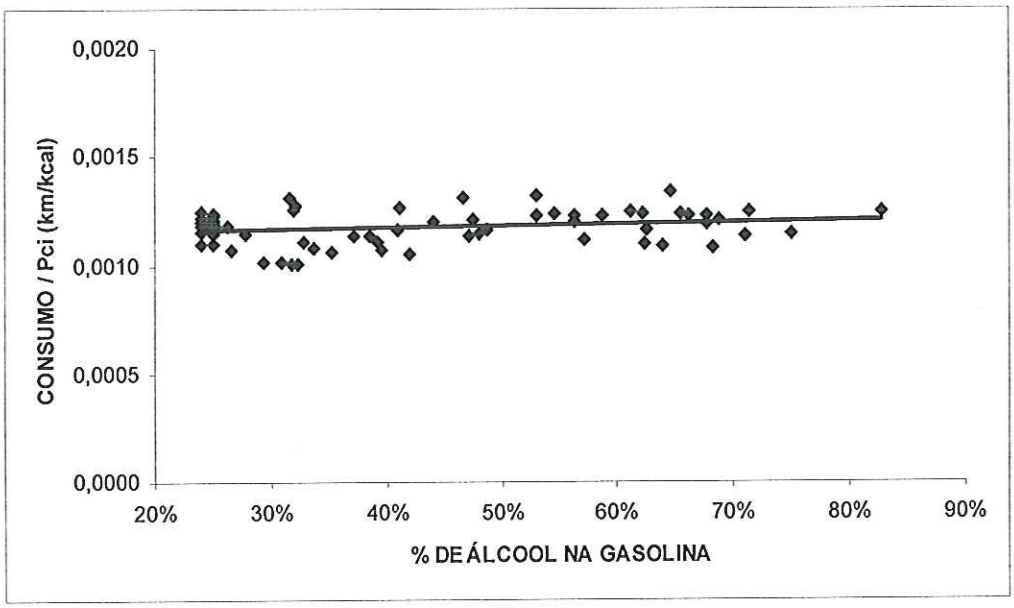



**FIGURA 4.4 – Consumo de combustível / $P_{ci}$ x % de álcool na gasolina Astra 2.0 16V**

O comportamento do gráfico também foi o de uma reta praticamente horizontal, confirmando a certa capacidade de adaptação do sistema eletrônico de controle.

O Astra teve um comportamento semelhante, também, ao Golf 2.0, com relação à dirigibilidade, porém notou-se uma menor sensibilidade à perda de torque.

Apresentou ainda, um outro ponto de diferenciação em relação ao Golf. No painel a lâmpada de aviso de falha de ignição acendeu, intermitentemente, para misturas superiores a 75 % de AEHC.

Com o aumento da quantidade de AEHC no gasohol a necessidade de ar vai se tornando menor (a relação A/C do AEHC é igual a 8,71 e do gasohol é igual a 14,21). Como a quantidade de ar que entra no motor só depende do ângulo de abertura da borboleta de aceleração, do rendimento volumétrico, da rotação e não do tipo de combustível, ela se mantêm em quantidade maior que o necessário para cada nova mistura. Por isso a sonda lâmbda acusa mistura pobre e o sistema se adapta corrigindo a mistura. Para corrigir a mistura é necessário injetar mais combustível, porém por algum motivo o sistema eletrônico de controle do motor do Astra não consegue executar a correção acima do valor de 75% de AEHC.

### 4.1.3 – SINTESE DOS RESULTADOS DO TESTE RODOVIÁRIO

A partir dos gráficos das figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 pode-se concluir que os sistemas eletrônicos de controle do motor adaptaram-se toda vez que foram solicitados, porém há casos, conforme foi verificado com o Astra 2.0, que a autoadaptabilidade é limitada.

Do ponto de vista do consumidor, verifica-se que há uma tendência do consumo crescer com a adição de AEHC ao gasohol com uma tendência a perda de torque e potência do motor.

## 4.2 – ENSAIO EM BANCADA DINAMOMÉTRICA

O Anexo H apresenta uma tabela contendo a média dos resultados das medições realizadas no motor Fiat FIASA 1.0.

O ensaio foi limitado a uma porcentagem de AEHC misturado ao gasohol a 75% devido ao fato do motor apresentar falhas no funcionamento para a próxima porcentagem de AEHC a ser ensaiada, proposta no capítulo 3, que era de 85%. Essas falhas são identificadas

como funcionamento irregular em baixas rotações, "estouros" na ignição e falhas nas acelerações rápidas.

Para uma rápida visualização da tabela do Anexo H, coloca-se os dados em forma de gráfico a seguir.

### 4.2.1 – RESULTADOS DO TEMPO DE INJEÇÃO EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO

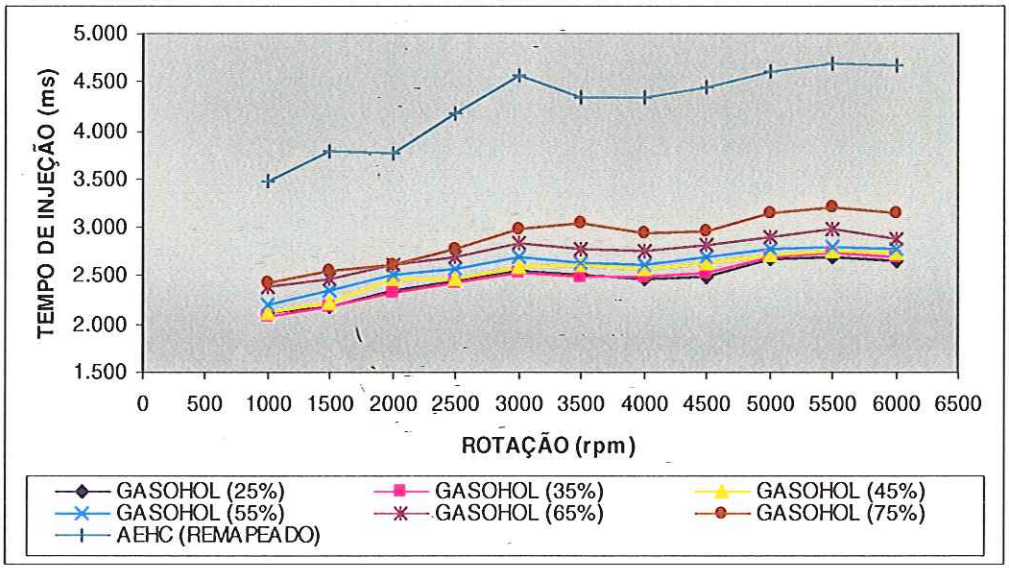



**FIGURA 4.5 – Gráfico Tempo de Injeção x Rotação**

O gráfico da figura 4.5 mostra que houve uma tendência a aumentar o tempo de injeção com o aumento da porcentagem de AEHC. Isso confirma a capacidade adaptativa do sistema em corrigir a mistura, aumentando a quantidade de combustível injetado. Essa capacidade de corrigir a mistura deve-se à sonda lâmbda que sinaliza mistura pobre ao detectar a presença de oxigênio nos gases de escape.

O teste rodoviário com o Astra 2.0 e o próprio teste de bancada mostram, no entanto, que essa capacidade de correção é limitada visto que para misturas superiores a 75% de AEHC provocaram falha da ignição (ver item 4.1.2) e funcionamento irregular.

No intuito de avaliar a capacidade de adaptação do sistema, foi construído o gráfico mostrado na figura 4.6.

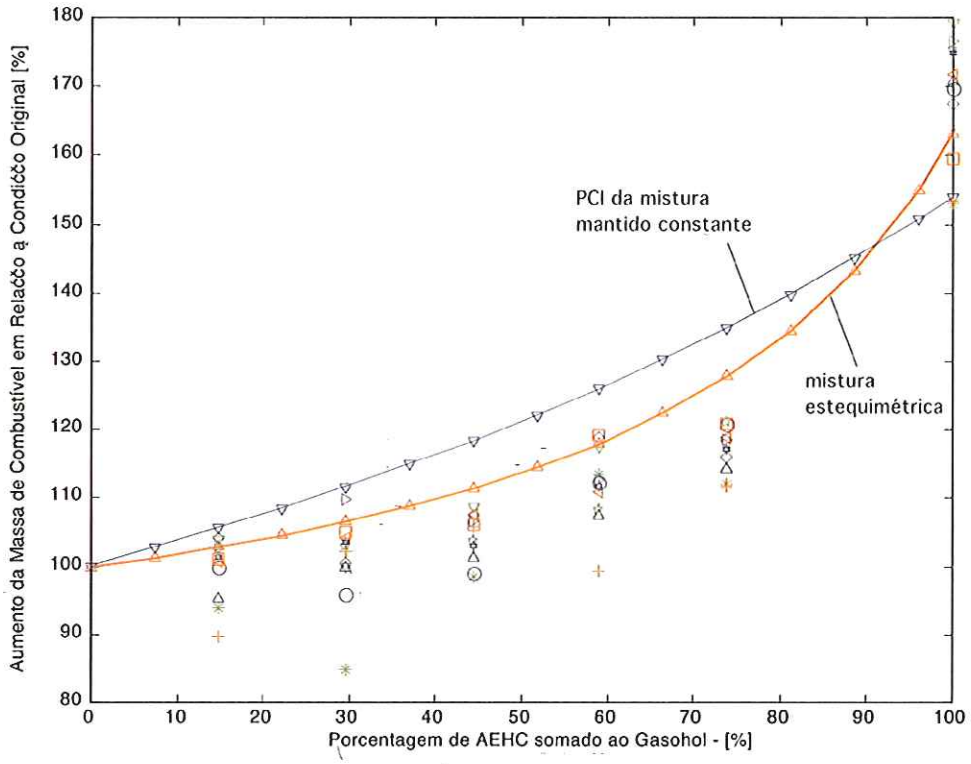



**FIGURA 4.6 – Aumento da massa de combustível (%) x Porcentagem de AEHC ao gasohol**

Note que no gráfico da figura 4.6, na abscissa é colocada a porcentagem de AEHC somado ao gasohol e não a porcentagem de álcool total da mistura como foi definido no capítulo 3. A curva construída com os triângulos com os vértices para baixo (triângulos em azul) representa misturas com massas de combustível aumentadas de maneira a manter o mesmo poder calorífico do gasohol (25%). O ponto de início da curva está sobre a ordenada com o valor de 100% que significa que a referência é realizada sobre a mistura de gasohol com 25%.

A curva construída com os triângulos com vértices para cima (triângulos em vermelho) representa misturas com massas de combustível aumentadas de modo a garantir a queima completa através da mistura estequiométrica.

A curva identificada pelos pontos " * " (pontos em cor verde) representa misturas com massas aumentadas de acordo com o tempo de injeção medido no experimento.

O procedimento para construção desse gráfico é apresentado no Anexo K.

Para uma adequada correção da mistura à curva identificada com os pontos " * " (pontos em cor verde) deveria coincidir, ou pelo menos estar mais próximas, das curvas identificadas com os triângulos. Como pode ser visualizado ela está abaixo das demais, indicando uma correção insuficiente.

Voltando a gráfico da figura 4.5, no caso do álcool puro nota-se que ocorreu um salto no tempo de injeção, que só é conseguido com o remapeamento da EPROM.

É interessante notar que o motor rodando com mistura gasohol com 35% de AEHC tem um comportamento muito semelhante quando funciona com mistura a 25%. Em rotações abaixo de 3500 rpm (correspondendo ao torque máximo), o tempo de injeção chega a ser até inferior, confirmando o resultado de consumo obtido no teste rodoviário.

### 4.2.2 – RESULTADOS DO AVANÇO DE IGNIÇÃO EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO

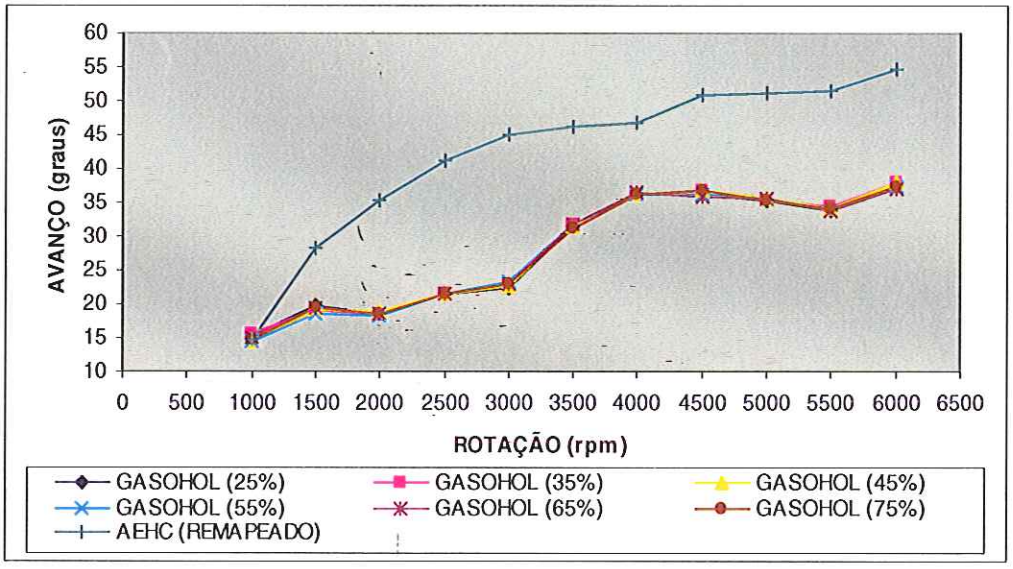



**FIGURA 4.7 – Gráfico Avanço x Rotação**

Como pode ser visto no gráfico da figura 4.7, só ocorreu alteração no avanço de ignição com a reprogramação da EPROM. Isso porque o sistema original trabalha com avanço máximo determinado para o gasohol, sendo a correção, executada quando ocorre a detonação.

A detonação é detectada pelo sensor de detonação (ver Anexo D – item D.17) e sua correção é realizada com o atraso do avanço de ignição. Como o álcool confere a mistura um poder antidetonante crescente com o aumento da porcentagem de AEHC não ocorre necessidade de correção.

O avanço máximo que neste caso foi determinado para o gasohol é função, segundo RIBBENS (1992), de um "equilíbrio" das variáveis mostradas no gráfico da figura 4.8, além, é claro, da limitação imposta pela detonação.

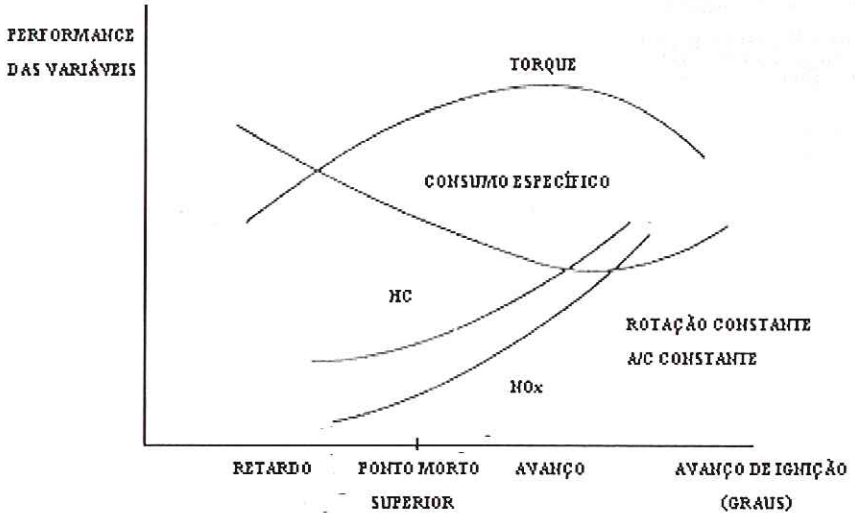



**FIGURA 4.8 – Gráfico Avanço x Emissões (Fonte: RIBBENS, 1992)**

### 4.2.3 – RESULTADOS DO TORQUE EM FUNÇAO DA ROTAÇÃO

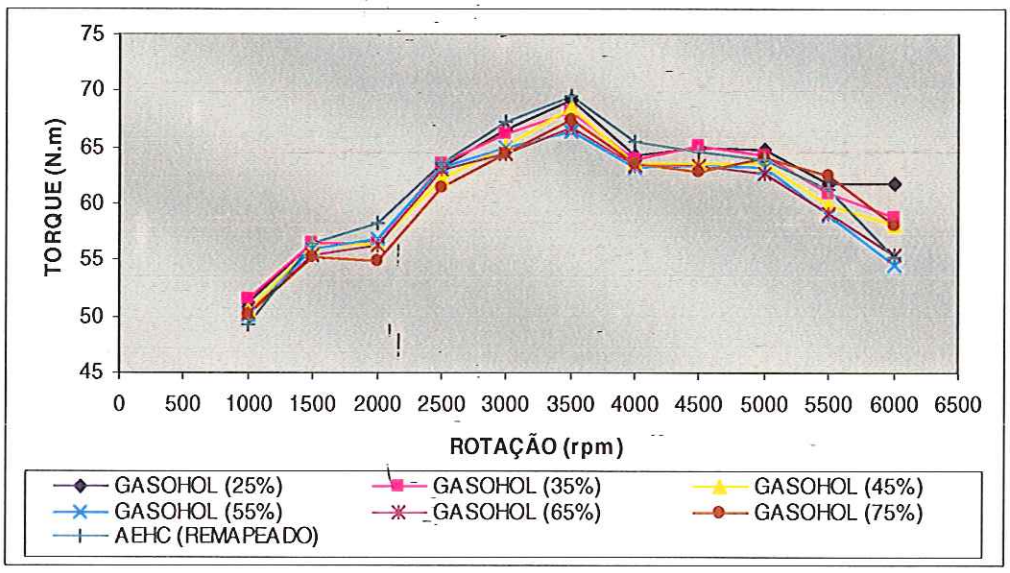



**FIGURA 4.9 – Gráfico Torque x Rotação**

A variação do torque em função do aumento da mistura, mostrada na figura 4.9, foi pequena e pode, por isso, ser melhor visualizada pela tabela do Anexo H. Vê-se que a variação foi, em geral, decrescente, ou seja, houve diminuição do torque com o aumento da mistura, confirmando a sensibilidade descrita no teste rodoviário. Nota-se ainda que as curvas para as variadas misturas seguiram um padrão semelhante à curva da mistura de 25%, mesmo para o sistema usando a EPROM remapeada e álcool puro.

Especificamente a utilização do álcool puro e EPROM remapeada mostrou um pequeno ganho de torque, na faixa de torque máximo, ao mesmo tempo em que mostrou uma pequena perda a 6000 rpm, em relação ao uso com gasolina pura. Olhando a figura 4.11 – Consumo Específico x Rotação pode-se observar aumento do consumo específico na faixa de torque máximo e diminuição na faixa de 6000 rpm, o que justifica a afirmação anterior.

### 4.2.4 – RESULTADOS DA POTÊNCIA EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO

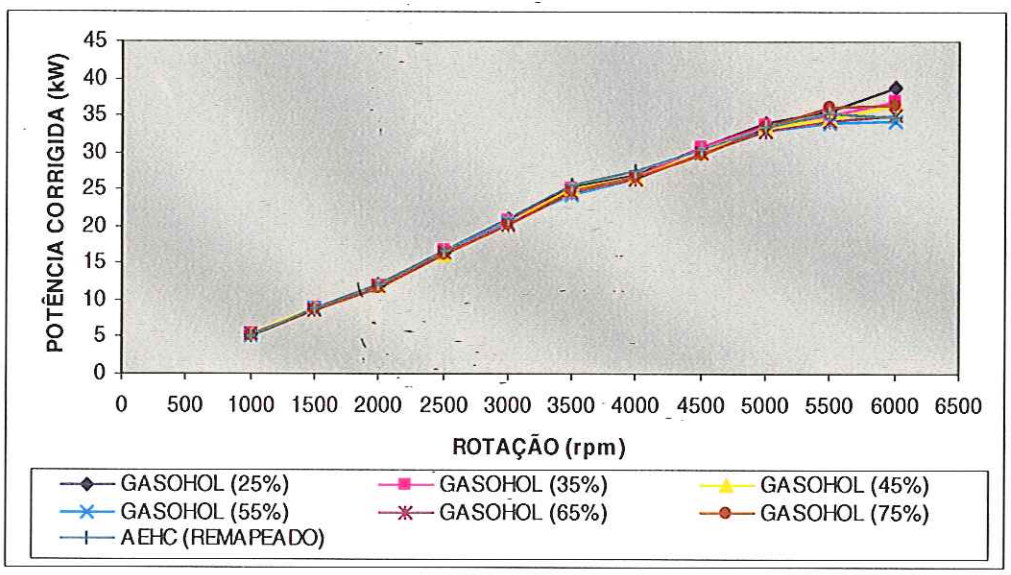



**FIGURA 4.10 – Gráfico Potência x Rotação**

A potência teve um comportamento semelhante ao torque, ou seja, teve uma pequena e decrescente variação com o aumento da mistura de AEHC na gasolina, tornando-se pouco mais pronunciada nas rotações superiores a 5000 rpm, mas manteve o mesmo padrão da curva para mistura 25%.

### 4.2.5 – RESULTADOS DE CONSUMO EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO

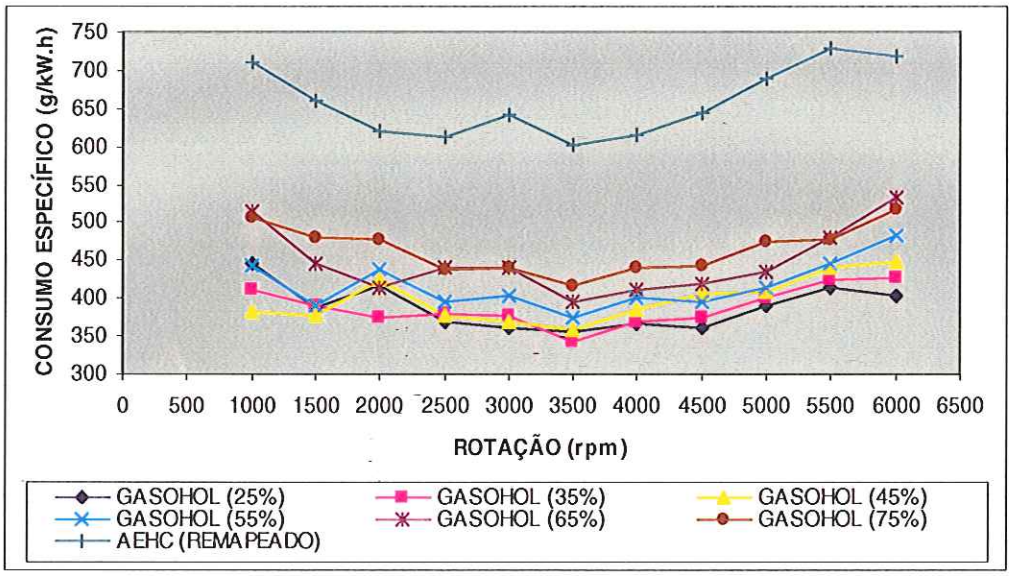



**FIGURA 4.11 – Gráfico Consumo Específico x Rotação**

O consumo específico de combustível em geral, apresentou um crescente aumento com a porcentagem de AEHC na mistura.

As curvas correspondentes a 45% e 55% de AEHC seguiram um mesmo padrão da curva de consumo original. As demais sofreram pequenas variações no padrão, principalmente para as rotações de 2000 rpm.

Chama a atenção à curva de 35% de AEHC que manteve um consumo menor que a original para as rotações de 1000, 2000 e 3500 rpm sendo levemente superior para as demais rotações. O teste rodoviário com o Golf 2.0 GLX também apresentou um consumo inferior para essa mistura de 35%. Esta mistura poderá ser explorada em trabalhos futuros.

### 4.2.6 – RESULTADOS DO RENDIMENTO GLOBAL

O rendimento global é variável em função da rotação, uma vez que ele é o produto, conforme equação (2.26), de outros rendimentos que também variam com a rotação.

### 4.2.6.1 – RENDIMENTO TÉRMICO

Como descrito no capítulo 3 o rendimento térmico é determinado por cálculo.

- **Determinação do rendimento térmico para motor a gasohol – $\eta_{tegh}$**

  Do anexo B, tem-se:

  $\rho = 9,35$

  De acordo com PENIDO F$^{Q}$ (1991) o K para a gasolina e AEHC é:

  K gasolina = 1,37;

  K AEHC = 1,34

Admitindo-se que o K AEAC seja aproximadamente igual ao K do AEHC, o K para o gasohol pode ser obtido pela ponderação das porcentagens da mistura Gasolina – AEAC.

Assim:

K gasohol = 0,75 . K gasolina + 0,25 . K AEHC = 0,75 . 1,37 + 0,25 . 1,34

Portanto,

K gasohol = 1,36.

Substituindo-se na equação (2.28) tem-se:

$\eta_{tegh} = 1 - 1/9,35^{(1,36-1)}$

$\eta_{tegh} = 0,55$

- **Determinação do rendimento térmico para motor a AEHC sem preparação – $\eta_{teasp}$**

  Como não houve alteração da taxa de compressão,

  $\rho = 9,35$

e do item anterior

K AEHC = 1,34

Substituindo-se na equação (2.28) tem-se:

$$\eta_{teasp} = 1 - 1/9{,}35^{(1{,}34-1)}$$

$$\eta_{teasp} = 0{,}53$$

### 4.2.6.2 – RENDIMENTO MECÂNICO

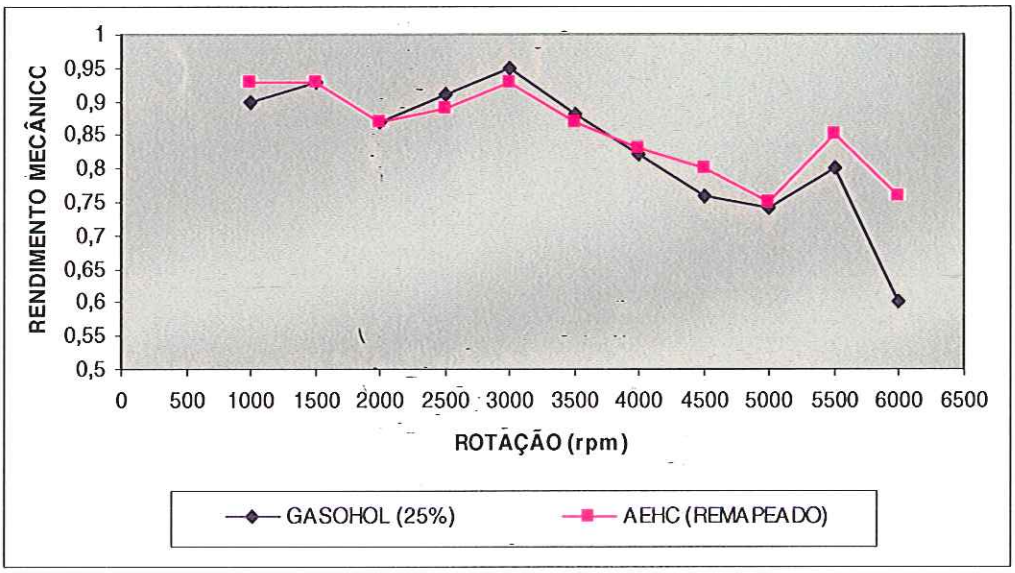



**FIGURA 4.12 – Gráfico Rendimento Mecânico x Rotação**

Segundo PENIDO Fº (1991) o rendimento mecânico de um motor está compreendido entre 60 e 90%, o que está coerente com a figura 4.12 acima.

Ainda, segundo PENIDO Fº (1991) o rendimento mecânico de um motor a gasolina é de 81% que é coerente com a média do rendimento mecânico medido no experimento, embora, na realidade o combustível usado nos veículos a "gasolina" é o gasohol. Entretanto, o rendimento mecânico do motor a gasohol deveria ser menor que o do motor a gasolina pura, em virtude da maior taxa de compressão o que pode significar que tenha ocorrido algum ganho de rendimento nos motores ao longo desses anos, desde PENIDO Fº (1991).

PENIDO Fº (1991) afirma também, que o rendimento mecânico de um motor não se altera somente com a mudança de combustível, se não se alterar a taxa de compressão. Mas pela figura 4.12, embora os valores das curvas têm um valor bastante próximo, nota-se uma diferenciação mais pronunciada para valores superiores a 5000 rpm, e neste caso deve-ser feita uma análise, visto a afirmação do autor. Na rotação de 5500 rpm e 6000 rpm vê-se que

o rendimento mecânico do motor a álcool foi superior ao gasohol. Observa-se ainda que nessas rotações o consumo específico sofreu queda (vide figura 4.11 e 4.5) bem como o torque (figura 4.9) e a potência (figura 4.10). Isso pode significar que o motor operou com mistura muito pobre, ou seja, a correção feita na EPROM foi insuficiente e o sistema eletrônico de controle não conseguiu adaptar-se. Segundo HILDEBRAND JR (1998), mistura pobre provocaria menor pressão no momento da centelha, o que significaria menor solicitação do motor e conseqüentemente maior rendimento mecânico.

Observa-se ainda que, nas rotações de 3000 rpm e 5500 rpm o rendimento mecânico atingiu valores mais elevados. Este fenômeno pode estar relacionado a algum tipo de ressonância do motor e poderá ser analisado em trabalhos futuros.

### 4.2.6.3 – RENDIMENTO INDICADO

- **Rendimento indicado para o motor a gasohol – $\eta_{igh}$**

  A equação (3.12) fica para o motor a gasohol:

  $$\eta_{igh} = 632 / (\eta_{tegh} \cdot \eta_m \cdot C_{sgh} \cdot P_{cigh})$$

  Da tabela 2.6, tem-se:
  $P_{ci}$ gasolina = 10500 kcal/kg;
  $P_{ci}$ AEAC = 6400 kcal/kg.

  Assim:
  $P_{cigh}$ = 0,75 . Pci da gasolina + 0,25 . $P_{ci}$ do AEAC = 0,75 . 10500 + 0,25 . 6400
  $P_{cigh}$ = 9475 kcal/kg;

  Do item 4.2.6.1, obtém-se:
  $\eta_{tegh}$ = 0,55;

Como $\eta_m$ e $C_{sgh}$ são funções da rotação, calculou-se o rendimento indicado e montou-se uma tabela mostrada no Anexo J. Do Anexo J construi-se o gráfico de rendimento indicado, em função da rotação, mostrado na figura 4.13.

- **Rendimento indicado para o motor a AEHC sem preparação– $\eta_{iasp}$**

  A equação (3.12) fica para o motor a AEHC sem preparação:

  $\eta_{iasp} = 632 / (\eta_{teasp} \cdot \eta_m \cdot C_{sasp} \cdot P_{ciAEHC})$

  Da tabela 2.6, tem-se:

  $P_{ci}$ AEHC = 5952 kcal/kg.

  Do item 4.2.6.1, obtém-se:

  $\eta_{teasp} = 0,53$;

Analogamente ao rendimento indicado para o gasohol, calcula-se o rendimento indicado para o motor a AEHC sem preparação e monta-se o Anexo J. Desse anexo construiu-se o gráfico de rendimento indicado, em função da rotação, mostrado na figura 4.13.

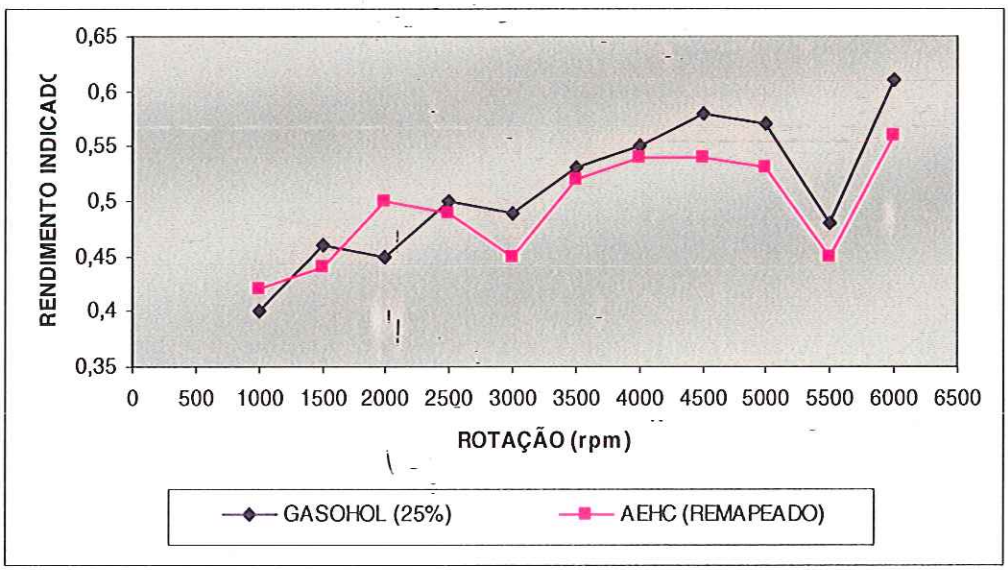



**FIGURA 4.13 – Gráfico Rendimento Indicado x Rotação**

❖ **Rendimento Global para o motor a gasohol**

Do produto dos resultados mostrados nos gráficos das figuras 4.12, 4.13 pelos respectivos valores dos rendimentos térmico do gasohol e AEHC, determina-se o rendimento global que pode ser visualizado pelo gráfico da figura 4.14.

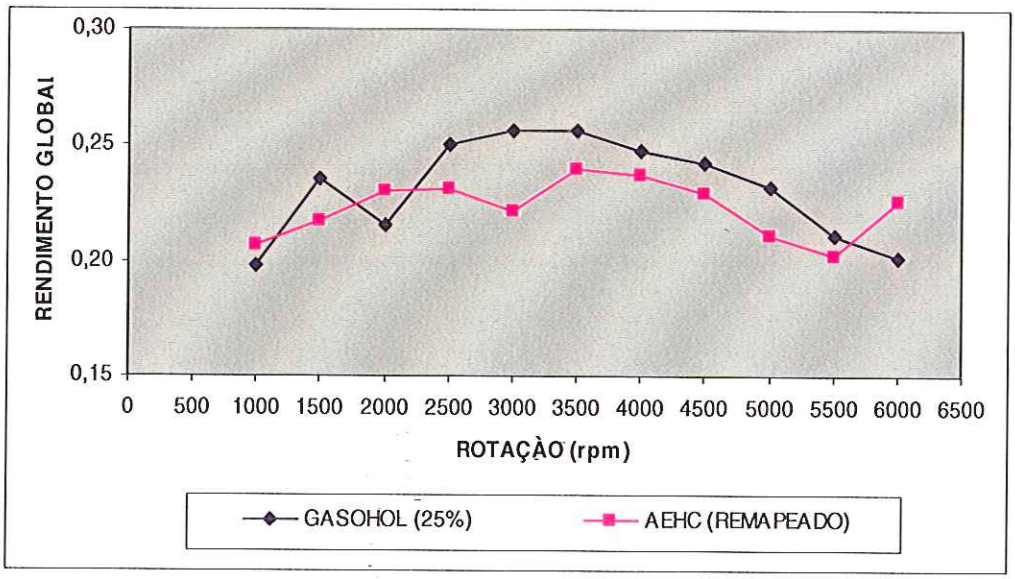



**FIGURA 4.14 – Gráfico Rendimento Mecânico x Rotação**

Os cálculos do rendimento global mostrados na figura 4.14 indicaram que a conversão do motor a gasohol a 25% para AEHC, através da troca da EPROM acarreta uma diminuição nos seus valores que chega a ser da ordem de 2 pontos percentuais.

# CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO

Retornando ao objetivo deste trabalho, as duas linhas de pesquisa adotadas, ou seja, o teste rodoviário com misturas variadas de AEHC no gasohol e o teste em bancada dinamométrica com essa mesma opção de variação de mistura e mais a conversão do motor através da substituição da EPROM, forneceram uma série de resultados técnicos bastante interessantes. Nitidamente observa-se que os sistemas eletrônicos de controle são capazes de se adaptar às variações de AEHC no combustível, pelo menos para misturas de até 75% de AEHC ao gasohol.

A autoadaptabilidade dos sistemas de controle eletrônico tem possibilitado, conforme citado no inicio do trabalho, a prática de misturas variadas de AEHC diretamente ao tanque dos veículos a gasohol e a conversões de motores a gasohol para AEHC, com a simples troca da EPROM original por uma modificada, ambas motivadas pelo fator econômico a favor do álcool. Essa prática, apesar de difícil quantificação, mostrou uma dimensão muito significativa, no tocante ao consumo de AEHC, visto que no ano de 2002/2003 o equilíbrio de oferta/demanda, que é baseado no histórico de consumo nacional de veículos, foi quebrado.

Reconhecendo essas práticas populares e sua "pressão econômica", vê-se neste ano de 2003 o lançamento, pela indústria automobilística nacional, de veículos chamados *"Flexible Fuel"*. Tais veículos foram projetados para operarem com qualquer relação AEHC/gasolina.

Pelo que se pode constatar neste trabalho, os veículos com sistemas de injeção eletrônica já possuem uma pré-disposição para serem *"flexible fuel"* uma vez que sua adaptabilidade permite corrigir a relação A/C para manter o fator de excesso de ar $\lambda$ em 1. O que garante o sucesso da adaptabilidade é a presença de uma ação de controle integrativa, caso contrário, o sistema se auto compensará, mas não garantirá $\lambda = 1$.

Outro ponto a ser destacado é o controle do avanço de centelha que garante, através de um sensor, que não ocorrerá detonação, fenômeno esse extremamente prejudicial à integridade do motor.

No tocante aos resultados técnicos dos ensaios experimentais podemos extrair as seguintes conclusões:

- **Com relação ao desempenho dos motores: torque e potência**

Os testes rodoviários não permitem extrair valores numéricos, com relação ao torque e potência, mas a sensibilidade do motorista mostra que ocorreram pequenas reduções, que são perfeitamente aceitáveis para misturas inferiores a 75%. Essas pequenas reduções foram comprovadas nos experimentos em bancada dinamométrica.

No caso do remapeamento da EPROM, os experimentos demonstraram uma "recuperação" dos valores do torque e potência originais.

- **Com relação ao desempenho dos motores: rendimento global**

Neste experimento foi realizada a determinação do rendimento global para o motor original a gasohol e para o motor operando com AEHC com EPROM remapeada. O rendimento global apresentou uma perda de 2 pontos percentuais para o motor com AEHC e EPROM remapeada (0,24 e 0,22, respectivamente para motor original e convertido). Se considerarmos que um motor projetado para operar com AEHC apresenta, segundo PENIDO $F^{Q}$ (1991) um rendimento superior ao motor a gasolina pura, em 7 pontos percentuais (0,34 para o motor a AEHC e 0,27 para gasolina pura) vê-se que o potencial de rendimento global não é explorado pela conversão. Com isso, o consumo de combustível dos motores convertidos, em relação ao motor especificamente projetado para o AEHC é maior.

- **Com relação ao consumo de combustível**

O fator de interesse, com relação ao consumo de combustível é, obviamente, o custo do km rodado.

Para o caso do experimento rodoviário com o Astra 2.0 16V, por exemplo, tomando-se a curva de tendência do gráfico e a limitação da mistura em 75% de álcool total (% de álcool na mistura considerando a quantidade de álcool já existente no gasohol) pelos fatores levantados nos experimentos, pode-se facilmente calcular o valor econômico limite do preço do AEHC em relação ao gasohol. Para esse cenário o consumo do Astra foi de 9,86 km/l operando com gasohol e 8,59 km/l operando com a mistura. Sabendo-se que 75% de álcool

EESC-USP Biblioteca Campus de S. Carlos

total é igual a uma mistura contendo 67% de AEHC e 33% de gasohol tem-se, como o limite de preço do AEHC em relação ao gasohol, o valor a seguir:

Valor do AEHC = 0,81 do valor do gasohol

Portanto, valores inferiores a este proporcionam um custo de quilometro rodado com a mistura menor que com gasohol.

A mesma análise teórica, pela estequiometria, pode ser realizada para o caso da conversão do motor, em que deve se manter a queima quimicamente correta. Neste caso o enriquecimento da mistura para o AEHC, como pode ser visto no gráfico da figura 4.6, deve ser de 63,1% e, portanto, esse deve ser o máximo valor monetário do AEHC em relação ao gasohol.

- **Com relação a miscibilidade do AEHC no gasohol**

O estudo da miscibilidade em laboratório, levantado pela revisão bibliográfica, mostrou que a mistura não apresenta qualquer problema de miscibilidade.

## 5.1 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros sugere-se pesquisar as questões ligadas a melhorias propiciadas pela reprogramação da EPROM. Como sugestão segue:

a) Um estudo de reprogramação da EPROM para se obter uma curva mais adequada para um menor consumo específico.
b) Um estudo de reprogramação da EPROM para se obter curvas mais adequada ao desempenho: torque e potência.
c) Um estudo de reprogramação da EPROM para utilizar o AEAC (álcool anidro) puro como combustível alternativo.
d) Um estudo da flexibilização de correção do ponto de ignição, com a finalidade de trabalhar no ponto máximo avançado anterior à detonação, para as variações do tipo de combustível.

# ANEXO A – RELAÇÃO AR/COMBUSTÍVEL PARA GASOLINA, GASOHOL E ÁLCOOL ETÍLICO HIDRATADO CARBURANTE

| COMBUSTÍVEL | A/C |
|---|---|
| GASOLINA ($C_8H_{17}$) | 14,92 |
| GASOHOL (0,75 . $C_8H_{17}$ + 0,25 . $C_2H_5OH$) | 14,21 |
| AEHC ($C_2H_5OH$) | 8,71 |
| AEAC ($C_2H_5OH$) | 8,98 |

# ANEXO B – TABELA DE DADOS DO MOTOR FIAT FIASA 1.0

FIAT Automóveis s.a.
Engenharia de Produto

PALIO 1.0 MPI GAS.
02/06/98

As informações contidas nesse documento estão sujeitas a atualização constante.
Em caso de impressão, destruir as cópias após consulta.

## Fiat Palio 1.0 mpi gas.

FICHA TÉCNICA - MY'98

**VERSÕES**

- **Palio EX, 994cc mpi gasolina, 3 / 5 portas**
- **Palio ED, 994cc mpi gasolina, 3 / 5 portas**
- **Palio EDX, 994cc mpi gasolina, 3 / 5 portas**

**MOTOR**

| DESCRIÇÃO | | 994cc mpi gasolina |
|---|---|---|
| **CARACTERÍSTICAS** | | |
| Número de cilindros | | 4 em linha |
| Posição | | transversal |
| Cilindrada total / unitária | | 994 cc / 248,6 cc |
| Diâmetro x Curso | | 76,0 x 54,8 mm |
| Ciclo - Tempos | | OTTO - 04 |
| Taxa de compressão | | 9,35 ± 0,15 : 1 |
| Distância entre eixos dos cilindros (mm) | | 83 - 91 - 83 |
| Aspiração | | natural |
| Bloco (material) | | ferro fundido |
| Cabeçote (material) | | alumínio |
| Número de mancais | | 05 |
| Tipo de pistões | | c/pino fixo |
| Número de anéis de segmento | | 03 por pistão |
| **PERFORMANCE** | | |
| Potência máxima | ABNT (CV / KW) | 61,0 / 44,9 |
| | DIN (CV / KW) | 60,4 / 44,4 |
| Regime de potência máxima | | 6000 rpm |
| Torque máximo | ABNT (Kgm / daNm) | 8,1 / 7,9 |
| | DIN (Kgm / daNm) | 8,0 / 7,8 |
| Regime de torque máximo | | 3000 rpm |
| Regime de marcha lenta | | 850 ± 50 rpm |
| **DISTRIBUIÇÃO** | | |
| Número de válvulas por cilindro | | 02 |
| Diâmetro de referência das válvulas | admissão | 36,0 mm |
| | escape | 28,0 mm |
| Eixo comando de válvulas | | 01 no cabeçote |
| Acionamento da distribuição | | correia dentada |
| Fases da distribuição | admissão (início / térm.) | 9,0° / 29,5° |
| | escape (início / térm.) | 38,5° / 0° |
| **IGNIÇÃO** | | |
| Tipo | | eletrônica digital |
| Fabricante / código | | MAGNETI MARELLI / MPI |
| Ordem de ignição | | 1 - 3 - 4 - 2 |
| Avanço estático | | 3° ± 3° a 850 ± 50 rpm |
| Velas / Abertura dos eletrodos | | NGK BKR6EKC / fixa |
| Bobina | | MAGNETI MARELLI / BAE 800AK ( 02 ) |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **ALIMENTAÇÃO** | | | |
| Injeção eletrônica | | | MAGNETI MARELLI / MPI - 1G7 |
| Unidade de comando | | | MAGNETI MARELLI / 1G7SD/10 |
| Corpo de borboleta | | | MAGNETI MARELLI / 38SXBF01 |
| Regulador de pressão | | | MAGNETI MARELLI / RMP67 |
| Válvulas de injeção | | | MAGNETI MARELLI / IWP023 |
| Sensor de temperatura do ar | | | JAEGER / ATS04 |
| Sonda lambda | | | NTK / OZA112 - A4 |
| Sensor de detonação | | | NTK / KNE03 |
| Bomba de combustível | | | MARWALL / ERJ241 |
| Filtro de ar | | | SOGEFI / a seco tipo caixa |
| **DISPOSITIVOS ANTI POLUIÇÃO** | | | |
| Conversor catalítico | | | Trivalente |
| Canister | | | SOGEFI / B31707 |
| Teor de CO em marcha lenta | | | < 0,5% |
| **LUBRIFICAÇÃO** | | | |
| Sistema | | | forçada c/ bomba de engrenagens |
| Filtro de óleo | | | full flow |
| Pressão de lubrificação | | | > 4.5 bar a 4000rpm e 100° C |
| **SISTEMA ELÉTRICO** | | | |
| Tensão | | | 12,0 V |
| Alternador | | | 65,0 A |
| | | | 85,0 A ( c/ ar condicionado ) |
| Bateria | | | 32,0 Ah / 40,0 Ah ( com ar condicionado ) |
| | | | 50,0 Ah ( com alarme eletrônico ) |
| Motor de partida | | | 0,80 KW |
| **ARREFECIMENTO** | | | |
| Sistema | | | a água com bomba centrífuga |
| Radiador de água | tubos | | em alumínio |
| | aletas | | em alumínio |
| | superfície radiante | | 14,4 dmÒ (base) |
| | | | 18,7 dmÒ (A/C) |
| | vaso de expansão | | incorporado ao radiador |
| Termostato | | | com by pass controlado |
| Refrigeração forçada | base | | 01 eletroventilador de 01 velocidade |
| | | liga | 92 ± 2° |
| | | desliga | 87 ± 2° |
| | A/C | | 01 eletroventilador de 02 velocidade |
| | | liga | 92 ± 2° (1ª vel.) ; 97 ± 2° ( 2ª vel.) |
| | | desliga | 87 ± 2° (1ª vel.) ; 92 ± 2° ( 2ª vel.) |

# ANEXO C – PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO CARBURADOR E SUAS PRINCIPAIS FUNÇÕES

## C.1 – PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DOS CARBURADORES

O princípio de funcionamento do carburador elementar consiste em um tubo de venturi dimensionado para provocar uma determinada depressão para um motor específico. No venturi, a depressão provocada, succiona o combustível por um tubo conectado a uma cuba que armazena uma quantidade determinada de combustível. Essa cuba é aberta à atmosfera e possui uma bóia que mantém um nível adequado de combustível para alimentar o tubo.

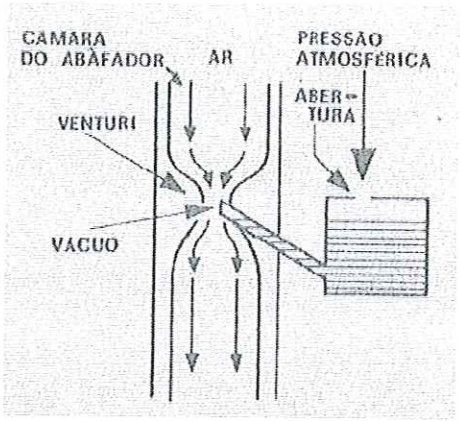



**FIGURA C.1 – Princípio de funcionamento do carburador elementar (PUGLIESE, 1976)**

À medida que os motores foram evoluindo, foram exigindo carburadores mais sofisticados para manter a mistura e resposta dentro de padrões otimizados. Neste item será relatado apenas, e sucintamente, algumas dessas evoluções, de modo a entender algumas funções que foram significativamente melhoradas nos sistemas eletrônicos. Dentre elas destaca-se:

## C.2 – CIRCUITO DE PARTIDA

Este circuito tem a finalidade de facilitar a partida e o funcionamento do motor quando em baixa temperatura. Os condutos de aspiração, por estarem a baixa temperatura, provocam a condensação de parte do combustível, empobrecendo demasiadamente a mistura, tornando-a insuficiente para dar a partida.

O circuito de partida mais comum é composto por uma válvula borboleta colocada acima do venturi, conforme figura C.2.

A válvula borboleta (afogador) ao fechar-se forma uma grande depressão dentro da garganta, aumentando o fluxo de combustível para dentro do cilindro. Esta válvula pode ser acionada por intermédio de cabo ou por sistema de molas e alavancas, comandada pelo calor do escapamento.

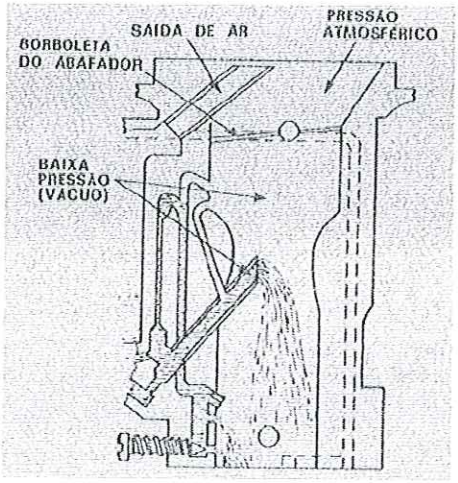



**FIGURA C.2 – Esquema do circuito de partida/afogador (PUGLIESE, 1976)**

## C.3 – CIRCUITO DE ACELERAÇÃO BRUSCA

Este sistema é encarregado de suprir as solicitações extras de combustível necessárias para enriquecer a mistura em atendimento a acelerações bruscas. O ato de acelerar o veículo com conseqüente abertura da borboleta de aceleração é acompanhado rapidamente pela entrada de ar no motor. O combustível, por sua vez, devido a sua maior inércia, não consegue se equivaler instantaneamente para a formação de uma mistura ideal para a combustão provocando uma aceleração inicial com falha.

Para solucionar este problema é necessária uma injeção extra e rápida de combustível que enriquecerá a mistura. Esse procedimento é realizado por uma bomba acionada pelo eixo do acelerador. Ela pode ser do tipo, pistão ou diafragma. Um esquema de uma bomba do tipo pistão é mostrado na figura C.3.

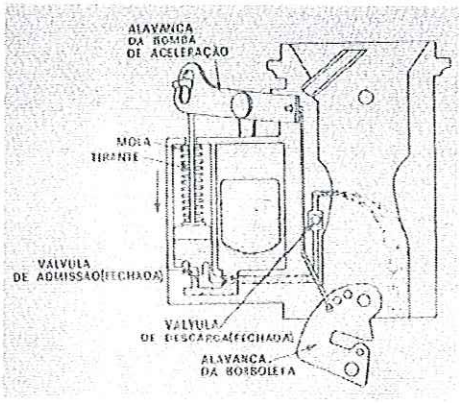



**FIGURA C.3 – Esquema do circuito de aceleração brusca (PUGLIESE, 1976)**

## C.4 – CIRCUITO DE MARCHA LENTA

Um motor funcionando em marcha lenta está com a borboleta de aceleração quase totalmente fechada. A depressão no *difusor* nesta circunstância é muito pequena, não sendo suficiente para provocar a sucção de combustível. Porém, no coletor, a depressão é elevada e, por intermédio de um "*by Pass*", o combustível é desviado do circuito principal para um canal auxiliar. Na saída deste canal é colocado um parafuso dosador em forma de agulha para controlar o fluxo de combustível (figura 5.4).

O ar necessário para a combustão é aspirado, parte pela borboleta e parte, através de um furo calibrado (giglê de ar da marcha lenta).

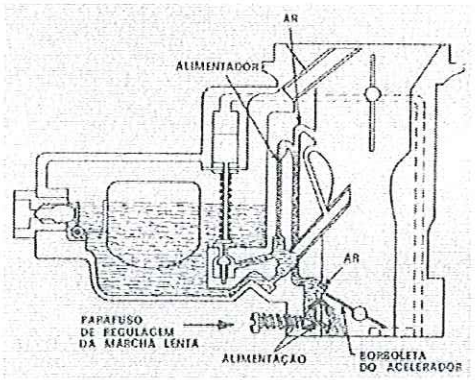



**FIGURA C.4 – Esquema do circuito de marcha lenta**
**(PUGLIESE, 1976)**

## C.5 – CARBURADORES MULTICORPOS

No mesmo princípio dos carburadores de um difusor, citados anteriormente, existem os carburadores multicorpos, que são formados por dois, três e até quatro venturis. As aberturas das borboletas podem ser feitas de maneira sincronizadas ou diferenciadas.

- **Abertura sincronizada**

Carburadores de abertura sincronizada são aqueles que todas borboletas abrem-se no mesmo instante e são acionadas pelo mesmo eixo. O ângulo de abertura de uma borboleta é igual a das outras, em todas as posições de aceleração.

- **Abertura diferenciada**

Carburadores multicorpo de abertura diferenciada são aqueles que as borboletas abrem-se uma depois da outra. O venturi primário tem o diâmetro menor que o secundário e é utilizado quando o motor funciona a baixo regime, enquanto o venturi secundário só entra em funcionamento em alta potência.

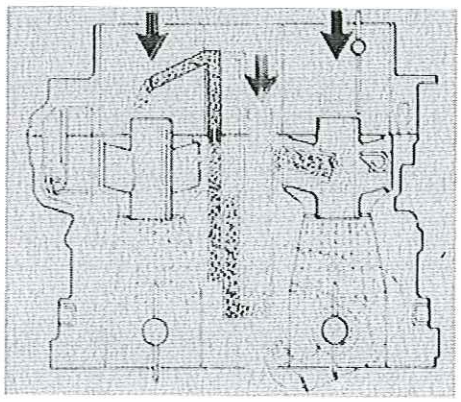


**FIGURA C.5 – Esquema do carburador duplo**

**(FIAT, 1985)**

# ANEXO D – SENSORES E ATUADORES DOS SISTEMAS ELETRÔNICOS DOS MOTORES CICLO OTTO

## D.1 – BOMBA ELÉTRICA DE COMBUSTÍVEL

A bomba elétrica de combustível é o componente que alimenta de combustível a válvula injetora eletromagnética a uma determinada vazão e pressão. Pode ser posicionada interna ou externamente ao tanque, dependendo do projeto do sistema de injeção. Quando interna, tem a vantagem de possuir baixo nível de ruído, trabalhar a uma menor temperatura e, no caso de vazamento, o mesmo ocorrer no próprio tanque.

Possui uma válvula de retenção no tubo de saída para garantir a pressurização da linha de combustível evitando o retorno ao tanque.

Tanto os constituintes plásticos quanto os metálicos são construídos em material resistentes à corrosão. Trabalha com pressões da ordem de 2,6 bar.

**FIGURA D.1 – Bomba elétrica de combustível (BOSCH, 1998)**

## D.2 – FILTRO DE COMBUSTÍVEL

A função do filtro de combustível é impedir que partículas sólidas cheguem à válvula injetora eletromagnética e ao regulador de pressão, pois são componentes extremamente sensíveis a impurezas.

Normalmente possui corpo em alumínio niquelado, ou plástico, com volume interno, área filtrante e malha especificados (ex. 300 cc, 1100 $cm^2$, <=10 $\mu$). É instalado entre a

bomba e o corpo de borboleta e possui seta indicativa de posição de montagem. Tem vida útil de 30000 km aproximadamente.

**FIGURA D.2 – Filtro de combustível (BOSCH, 1998)**

## D.3 – REGULADOR DE PRESSÃO

Tem como função à manutenção da pressão na linha de combustível. É importante que a pressão na válvula injetora eletromagnética permaneça constante, pois se houver variação, a central eletrônica não consegue regular a quantidade de combustível na mistura.

É um regulador que, quando a pressão é ultrapassada, ocorre à liberação de abertura para a tubulação de retorno, onde o combustível é encaminhado para o tanque de combustível.

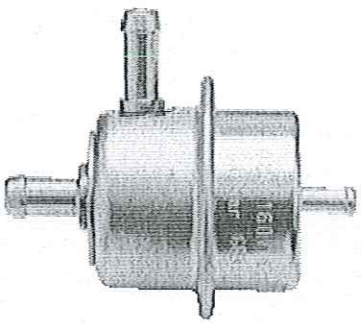


**FIGURA D.3 – Regulador de pressão (BOSCH, 1998)**

Os sistemas de injeção eletrônica possuem um componente chamado de ***amortecedor de pressão***, que não deve ser confundido com o regulador. O amortecedor de pressão tem a função de suavizar os golpes de combustível provocados pelo movimento de

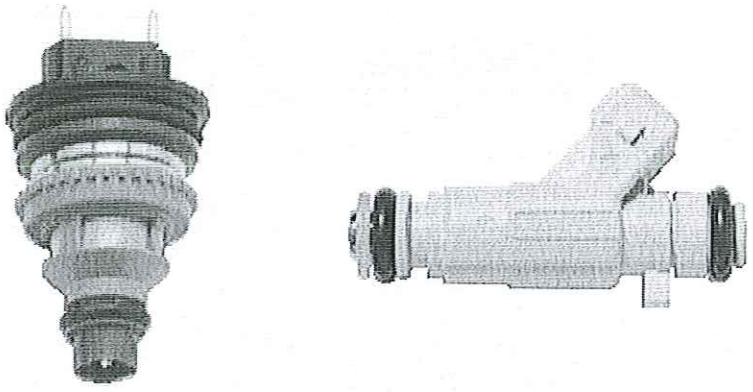
fechar das válvulas de injeção mais o fornecimento periódico de combustível que produzem oscilação e ruído.

## D.4 – VÁLVULA DE INJEÇÃO DE COMBUSTÍVEL OU VALVULA INJETORA ELETROMAGNÉTICA DE COMBUSTÍVEL

A válvula injetora é uma válvula eletromagnética, tipo "solenóide on-off" que, controla o volume de combustível enviado para o motor. Este volume é proporcional ao tempo de acionamento da válvula, conhecida como TJ.

A ECU após ter recebido informações dos diversos sensores sobre o funcionamento do motor define o tempo de injeção TJ, mandando um sinal à válvula de injeção, que possui em seu interior uma parte móvel chamada armadura que, ao se deslocar, libera a passagem de combustível. A armadura tem ainda a função de definir o perfil do spray injetado.

As válvulas injetoras apresentam alguns componentes e características técnicas importantes. São construídos em aço inox com elevada resistência e guarnições de borracha com alto teor de flúor para suportar o ataque químico do combustível. Possuem um filtro na entrada do combustível e devem apresentar, ainda, linearidade e repetibilidade na pulverização do combustível. As válvulas são peças de altíssima precisão, ocorrendo assim à necessidade de limpezas e revisões periódicas para evitar possíveis entupimentos.



(a) (b)

**FIGURA A.4 – Válvula Injetora eletromagnética de combustível**
**(a) – monoponto (b) – multiponto**
**(BOSCH, 1998)**

## D.5 – SENSORES UTILIZADOS PARA MEDIR A QUANTIDADE DE AR

A medição da massa de ar admitida se faz necessária para se determinar à quantidade de combustível a ser injetada para cada regime de rotação.

A quantidade de ar depende de dois fatores basicamente: densidade e volume de ar aspirado.

A densidade é função da temperatura e pressão do ar no coletor de admissão que são influenciados pela abertura que se encontra a borboleta naquele regime do motor. O volume de ar aspirado, por sua vez, é função do regime de rotação e volume dos cilindros do motor.

Assim, a determinação da quantidade de ar é realizada por sensores compostos, ou por combinação de sensores que captam essas variáveis. São eles:

- **MEDIDOR DE FLUXO DE AR**

A determinação da quantidade de ar admitida se baseia na medição da força produzida pelo fluxo de ar aspirado, que atua sobre a palheta sensora do medidor, contra a força de uma mola. Um potenciômetro transforma as diversas posições da palheta sensora em uma tensão elétrica, que é enviada como sinal para a unidade de comando. Os sistemas Mono Motronic, Lê-Jetronic e Motronic utilizam o medidor de fluxo de ar para a determinação dessa variável.

Alojado na carcaça do medidor de fluxo de ar encontra-se, também, um sensor de temperatura do ar.

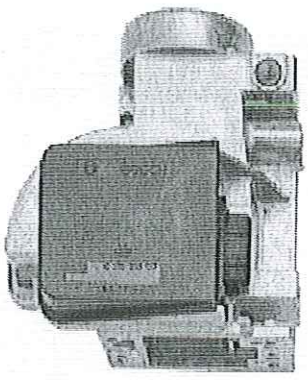


**FIGURA D.5 – Medidor de fluxo de ar (BOSCH, 1998)**

- **MEDIDOR DE MASSA DE AR**

O medidor de massa de ar está instalado entre o filtro de ar e a borboleta de

aceleração e tem a função de medir a corrente de ar aspirada. O princípio de funcionamento é baseado no anemômetro de fio quente, porém não possui o medidor de temperatura acoplado, necessitando uma instalação à parte, de modo a completar as variáveis para a determinação da quantidade de ar.

**FIGURA D.6 – Medidor de massa de ar (BOSCH, 1998)**

O sistema Magneti Marelli, entre outros, utiliza dois sensores para a determinação da densidade do ar: sensor de temperatura e sensor de pressão absoluta.

O volume de ar, entretanto, é calculado pela ECU em função da rotação do motor, volume dos cilindros (cilindrada) e pela curva de enchimento de cilindros (curva de enchimento é função da rotação). Por essa característica de determinação do volume de ar, esse sistema é chamado de "Speed Density (rotação – densidade)

- **SENSOR DE TEMPERATURA DO AR**

Tem a função de informar a ECU a temperatura a qual se encontra o ar aspirado pelo motor. É composto por um resistor térmico do tipo *NTC* (variação da resistência é inversamente à variação de temperatura). O elemento sensível é exposto ao fluxo de ar protegido, por uma cera de alta condutibilidade térmica e é fixado no corpo de borboleta. Apresenta um tempo de resposta menor que 10 segundos.

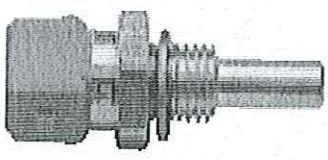


**FIGURA D.7 – Sensor de temperatura do ar (BOSCH, 1998)**

- **SENSOR DE PRESSÃO ABSOLUTA (SENSOR MAP)**

O sinal fornecido a ECU é uma variação de tensão, obtida através da deflexão de um elemento cerâmico devido à variação de pressão no coletor. Um dos lados do elemento é exposto a uma camada selada a baixa pressão e o outro, exposto à pressão do coletor de admissão.

O sensor apresenta-se encapsulado por material cerâmico.

**FIGURA D.8 – Sensor de pressão absoluta (BOSCH, 1998)**

## D.6 – SENSOR DE TEMPERATURA DA ÁGUA

Tem a função de informar a E.C.U a temperatura do líquido de arrefecimento do motor mesmo quando a válvula termostática estiver na posição fechada. O principio de funcionamento é o mesmo do sensor de temperatura de ar com resistor térmico NTC. Fica localizado no cabeçote do motor apresentando um tempo de resposta máximo da ordem de 40 segundos.

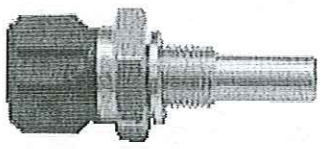


**FIGURA D.9 – Sensor de temperatura da água (BOSCH, 1998)**

## D.7 – MOTOR DE PASSO E ATUADOR DE MARCHA LENTA

Componentes que atuam no controle da passagem de ar para o motor do veículo (via by-pass), principalmente quando o mesmo se encontra na fase de marcha lenta. Este componente pode ser um motor de passo, ou o chamado atuador de marcha lenta.

A cada sinal de ECU o motor de passo efetua um movimento no rotor e este, através de uma rosca sem fim, move linearmente o obturador, controlando assim, a quantidade de ar aspirado pelo motor quando a borboleta está fechada.

A passagem de ar para o motor é feita através de um furo interligando o lado superior com o lado inferior da borboleta aceleradora, formando um by-pass.

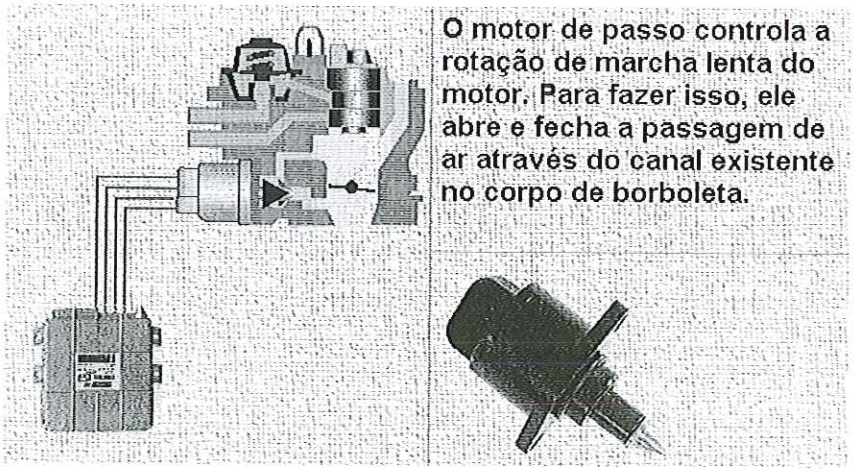



**FIGURA D.10 – Esquema e foto do motor de passo (FIAT TECH, 1996)**

O atuador de marcha lenta possui internamente duas bobinas (ímãs) e um induzido, onde está fixada uma palheta giratória que controla um "bypass" de ar. As diferentes posições do induzido juntamente com a palheta giratória permitem uma quantidade variável de ar na linha de aspiração.

**FIGURA D.11 – Atuador de marcha lenta (BOSCH, 1998)**

## D.8 – POTENCIÔMETRO DA BORBOLETA DE ACELERAÇÃO OU SENSOR DE POSIÇÃO DE BORBOLETA

Este sensor é um potenciômetro fixado ao corpo da borboleta de aceleração, de forma a ficar acoplado ao eixo de aceleração, com a função de informar a ECU a posição angular em que se encontra a borboleta. A posição angular significa o quanto de potencia é requerida do motor.

De acordo com o movimento de rotação do eixo, ocorre à variação da resistência elétrica do sensor, desta forma através da variação de tensão a ECU é informado que houve um movimento de aceleração das borboletas.

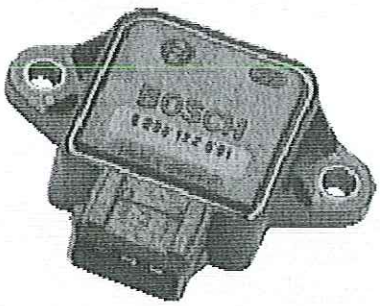



**FIGURA D.12 – Potenciômetro de borboleta ou Sensor de posição de borboleta (BOSCH, 1998)**

## D.9 – SENSOR DE ROTAÇÃO

Tem como função fornecer a ECU um sinal elétrico o qual possibilita a sincronização do sistema (tempo de injeção, avanço de ignição e outros parâmetros) com o ponto morto superior do motor.

O sinal gerado pelo sensor é obtido através da variação do fluxo magnético. Com a rotação do motor, os dentes da roda dentada passam defronte ao sensor e, este por sua vez, fornece um sinal de tensão a ECU a cada passagem do dente. Isto é possível devido à construção do sensor que possui internamente uma bobina.

O sensor de rotação é fixado ao bloco do motor de forma a ficar posicionado radialmente à roda dentada. A roda dentada é fabricada com material ferromagnético e possui externamente um perfil semelhante ao de uma engrenagem de dentes retos.

**FIGURA D.13 – Sensor de rotação (FIAT TECH, 1996)**

**FIGURA D.14 – Sensor de rotação (BOSCH, 1998)**

## D.10 – SENSOR DE OXIGÊNIO OU SONDA LÂMBDA

Este sensor informa a ECU a relação ar/combustível que esta sendo queimada pelo motor, através da concentração de oxigênio nos gases de escapamento do motor.

Existem atualmente dois tipos de sondas disponíveis: sonda de zircônio e sonda de titânio. Seu funcionamento baseia-se no princípio da condução. O material cerâmico e o eletrodo de platina começam a ser condutivo pelos íons de oxigênio à temperatura de 300°C, desta forma a concentração de oxigênio na sonda (dentro da tubulação do escapamento) difere da de oxigênio encontrado do lado de externo (fora da tubulação do escapamento), gerando uma tensão entre as duas superfícies.

**FIGURA D.15 – Sensor de oxigênio (BOSCH, 1998)**

## D.11 – UNIDADE DE CONTROLE ELETRÔNICO DIGITAL (ECU)

Neste item esta sendo descrito a unidade *digital* de controle que integra os sistemas Bosch Mono Motronic (monoponto), Bosch Motronic e Magneti Marelli G7 (multiponto). O sistema Le-Jetronic (mulitponto) é composto por uma unidade *analógica*, conseqüentemente não possui memória permanente e diagnose.

A unidade de controle eletrônico – ECU recebe dos sensores a informação das condições operacionais do motor, processa e envia os sinais aos atuadores, controlando as diversas situações de funcionamento (injeção, avanço de ignição, rotação, etc.).

A ECU efetua todo o controle do sistema correspondente através de programa específico e de tabelas de calibrações, as quais são preenchidas de acordo com cada tipo de aplicação (motor/veículo).

**Memória permanente** – Ela possui memória permanente, que conserva os parâmetros auto-adaptativos. Essa memória é mantida em *stand-by* por alimentação também

permanente da bateria. A memória pode ser apagada pela interrupção da corrente de alimentação da bateria.

**Diagnose interna** – A ECU possui internamente um sistema próprio de diagnose, ou seja, a cada determinado período de tempo, todos os sensores e atuadores são checados por ela. Uma vez detectada alguma anormalidade a ECU utiliza parâmetros pré-estabelecidos desativando os sensores defeituosos e acendendo uma luz de aviso no painel do veículo podendo, a mesma, voltar a apagar caso o sensor volte a funcionar.

**Diagnose externa** – É realizada por um aparelho conhecido por *check-up I*, que tem a função de comunicar-se com a ECU visualizando qualquer condição de funcionamento do motor e seus parâmetros e sensores, bem como erros nas entradas e saídas por sinais contidos na memória eprom.

**FIGURA D.16 – Unidade digital de controle eletrônico (BOSCH, 1998)**

## D.12 – VÁLVULA DE VENTILAÇÃO DO TANQUE

A válvula de ventilação permite o reaproveitamento dos vapores de combustível, que são formados no tanque. O reaproveitamento desses vapores impede que sejam liberados para a atmosfera contribuindo, assim, para a redução da poluição.

**FIGURA D.17 – Válvula de ventilação do tanque (BOSCH, 1998)**

## D.13 – RELÉ DE COMANDO

A alimentação elétrica da bomba de combustível é comandada pela ECU através do relé. A bomba é ativada depois que o comutador de ignição (chave de partida) for acionado e permanece, tanto na fase de partida como no funcionamento normal do motor, gerando, no sistema de alimentação, uma pressão de aproximadamente 1 bar. Se não for ativada a partida e a chave permanecer ligada, a ECU desenergiza o relé que para imediatamente a bomba de combustível.

**FIGURA D.18 – Relé de comando (BOSCH, 1998)**

## D.14 – BOBINA DE IGNIÇÃO

A bobina de ignição tem a função de transformar a tensão da bateria, aplicada ao enrolamento primário, em alta tensão, gerada no enrolamento secundário, que será transmitida às velas de ignição. A alta tensão transmitida gera nos terminais da vela uma centelha na fase de compressão do cilindro, para que ocorra a explosão.

Nos sistemas antigos o motor era composto somente por uma bobina e a distribuição da centelha para cada cilindro, era executada pelo distribuidor.

Nos sistemas atuais, as bobinas possibilitaram o aparecimento dos sistemas de ignição direta ou estática, ou seja, sistemas com uma bobina para cada vela, ou par de velas, eliminando dessa forma a necessidade do distribuidor. No caso de motores de 4 cilindros, por exemplo, existem sistemas que operam com duas bobinas (uma para cada dois cilindros – 1 e 4; 2 e 3) e o comando de emissão da centelha é realizado ao mesmo tempo para os dois cilindros pares, sabendo que um está na fase de compressão e o outro na fase de escapamento. Essa escolha tem a finalidade de baratear o conjunto sem a necessidade de utilização de 4 bobinas.

Outra opção é a utilização de bobinas "múltiplas" que, apesar de mais caras, enviam a corrente para cada cilindro de acordo com a ordem de explosão.

Em geral as bobinas são alimentadas pela tensão da bateria de 12 v e apresentam uma tensão de saída de 20000 v.

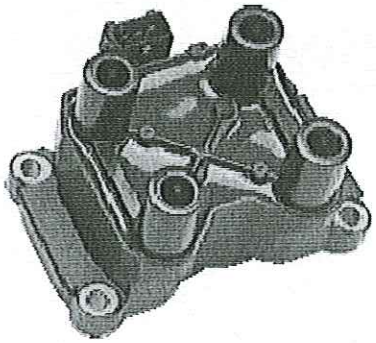


**FIGURA D.19 – Bobina de ignição (BOSCH, 1998)**

## D.15 – VELA DE IGNIÇÃO

É um componente bastante popular. Consiste de um pólo que é conectado à bobina, isolado, por um tipo de porcelana, da parte metálica que é fixada ao cabeçote. Os pólos são separados por uma distância calibrada chamada "gap"e ficam posicionados na câmara de combustão, onde o "salto" da corrente de alta tensão provoca o início da combustão.

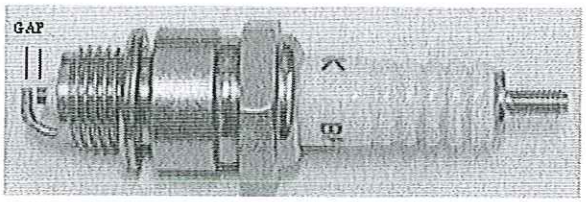



**FIGURA D.20 – Vela de ignição**

## D.16 – CANISTER

Componente constituído de carvão ativado e tem a função de filtrar os vapores de combustível, separando-os do ar que é lançado à atmosfera.

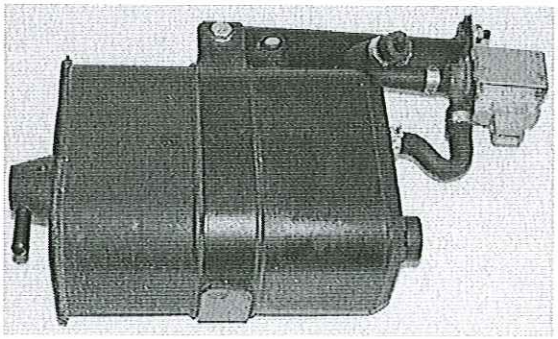


**FIGURA D.21 – Canister**

## D.17 – SENSOR DE DETONAÇÃO (SENSOR KS)

O sensor de detonação tem a função de identificar a ocorrência do fenômeno de detonação no motor e informar a ECU para que este ajuste o ponto de ignição. Estes sinais permitem que o motor funcione com o ponto de ignição o mais adiantado possível, conseguindo maior potência sem prejuízo para o motor.

A detonação ocorre com o aumento de temperatura na câmara de combustão, fazendo que a mistura A/C entre em autocombustão. A detonação gera a expansão dos gases num momento indesejado, originando um "golpe forte" na cabeça do cilindro, conhecido popularmente como "batida de pino".

Quando isto ocorre é gerado uma freqüência de ressonância. O sensor capita essa vibração, através de um diafragma de metal (amplificador mecânico) que oscila, causando um contato elétrico entre o disco e o pino integrado aos conectores. Este sinal é enviado a ECU, a qual irá retardar o avanço de ignição até eliminar a detonação.

O local de montagem do sensor depende da aplicação, no entanto, procura-se montá-lo no bloco do motor em uma posição próxima aos cilindros de forma que a detonação seja refletida o mais rápido possível. Dos sinais provenientes de sensores este é o mais complexo, devido à dificuldade de se isolar o ruído gerado pela detonação dos demais ruídos existentes no motor.

**FIGURA D.22 – Sensor de detonação (BOSCH, 1998)**

## D.18 – CORPO DE BORBOLETA

Componente mecânico que possui agregados sensores e atuadores elétricos/mecânicos para dosar a quantidade de ar do motor de acordo com a requisição de potência. No caso do sistema monoponto o injetor de combustível localiza-se neste componente, executando a alimentação de todo os cilindros.

O conjunto corpo de borboleta no sistema monoponto é um corpo em alumínio niquelado composto de dois sub conjuntos:

**Tampa** – faz parte do sistema de controle de combustível no caso do sistema monoponto. Estão localizados na tampa os canais de passagem de combustível, o regulador de pressão a válvula injetora.

**Corpo Inferior** – tem a função de controlar o fluxo de ar e otimizar o *spray* de combustível, no caso do monoponto. Compõe o corpo inferior, o eixo, borboleta de aceleração, alavanca de comando, sensor de posição de borboleta, atuador de marcha lenta/motor de passo por *by-pass* de ar e circuito de aquecimento por circulação do liquido de arrefecimento do motor.

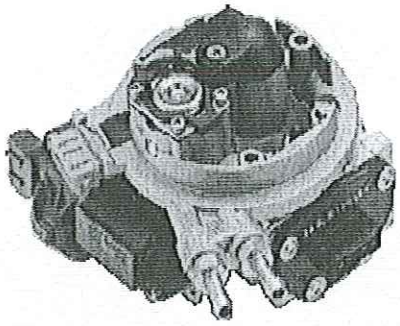


**FIGURA D.23 – Corpo de borboleta (BOSCH, 1998)**

# ANEXO E – DADOS DOS VEÍCULOS UTILIZADOS NO TESTE RODOVIÁRIO

## E.1 – VEÍCULO GOLF 2.0 GLX

**TABELA E.1 – Dados gerais do veículo Golf 2.0**

| DADOS GERAIS | ESPECIFICAÇÃO |
|---|---|
| Modelo | Golf GLX 2.0 8V |
| Ano de Fabricação | 1996 |
| Capacidade de carga | 444 kg |
| Tara | 1196 kg |
| Combustível original | Gasohol |
| Equipamentos opcionais | Ar condicionado/Direção hidráulica/Alarme |
| | Vidros elétricos |

**TABELA E.2- Dados gerais do motor do Golf 2.0**

| DADOS GERAIS | ESPECIFICAÇÃO |
|---|---|
| Tipo | 2.0 L |
| Número de cilindros | 4 em linha |
| Número de mancais principais | 5 |
| Ordem de ignição | 1-3-4-2 |
| Diâmetro interno do cilindro | 82,5 mm |
| Curso de êmbolo | 92,8 mm |
| Razão de compressão | 10,4:1 |
| Cilindrada | 1984 $cm^3$ |
| Rotação de marcha lenta | - |
| Potência máxima liquida | 85 kW (115CV) a 5400 rpm |
| Torque máximo líquido | 166 N.m (16,9 kgf.m) 3200 |
| Combustível | Gasohol |

## E.2 – VEÍCULO ASTRA 2.0 16V

**TABELA E.3 – Dados gerais do veículo Astra 2.0 16 V**

| DADOS GERAIS | ESPECIFICAÇÃO |
|---|---|
| Modelo | Astra 2.0 16 válvulas hatchback |
| Ano de Fabricação | 2002 |
| Capacidade de carga | 500 kg |
| Tara | 1180 kg |
| Combustível original | Gasohol |
| Equipamentos opcionais | Ar condicionado/Air bag/Direção hidráulica |
| | Alarme/Vidros elétricos |

**TABELA E.4- Dados gerais do motor do Astra 2.0 16 V**

| DADOS GERAIS | ESPECIFICAÇÃO |
|---|---|
| Tipo | 2.0L SFI 16V Transversal dianteiro |
| Número de cilindros | 4 em linha |
| Número de mancais principais | 5 |
| Ordem de ignição | 1-3-4-2 |
| Diâmetro interno do cilindro | 86 mm |
| Curso de êmbolo | 86 mm |
| Razão de compressão | 9,6:1 |
| Cilindrada | 1998 $cm^3$ |
| Rotação de marcha lenta | 700-800 rpm |
| Potência máxima liquida | 100 kW (136CV) a 5400 rpm |
| Torque máximo líquido | 18,8 N.m (19,2 kgf.m) |
| Combustível | Gasohol |

# ANEXOS F – LEVANTAMENTO DE DADOS DO GOLF 2.0 GLX

Capac. tanque: (CT) 55,0 Mistura inicial: (MI) 0,59

| MISTURA ALCOOL GASOLINA | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| DATA | DADOS DO ABASTECIMENTO | | | | | | | | CÁLCULOS | | | |
| | | LITROS | | | CARACT. | TANQ. CHEIO | | km | | | | |
| | LOCAL | ALCOOL | GASOLINA | HODÔM | GASOLINA (% ALC.) | SIM | NÃO | ENTRE ABAST. | km ROD | ALC/GAS Abastecim. | CONSUMO (km/L) | ALC/GAS Tanque |
| 19/02/02 | VO | 17 | 19 | 158.361 | 35,0% | X | | - | - | 65,7% | - | 63% |
| 21/02/02 | UC | 21 | 24,0 | 158.851 | 35,0% | X | | 490,0 | 490,0 | 65,3% | 10,89 | 65% |
| 23/02/02 | LEN | 15,0 | 15,0 | 159.219 | 24,0% | | X | 368,0 | - | 62,0% | - | 64% |
| 25/02/02 | VO | 22,7 | 23,9 | 159.513 | 35,0% | X | | 294,0 | 662,0 | 66,7% | 8,64 | 66% |
| 27/02/02 | UC | 17,0 | 19,9 | 160.032 | 35,0% | X | | 519,0 | 519,0 | 65,0% | 14,06 | 66% |
| 28/02/02 | COM | - | 29,9 | 160.273 | 24,0% | X | | 241,0 | 241,0 | 24,0% | 8,05 | 43% |
| 01/03/02 | COM | - | 18,2 | 160.705 | 24,0% | | X | 432,0 | - | 24,0% | - | 24% |
| 02/03/02 | COM | - | 35,6 | 160.811 | 24,0% | X | | 106,0 | 538,0 | 24,0% | 10,00 | 24% |
| 03/03/02 | COM | - | 20,0 | 161.010 | 24,0% | | X | 199,0 | - | 24,0% | - | 24% |
| 05/03/02 | VO | - | 38,2 | 161.330 | 35,0% | X | | 320,0 | 519,0 | 35,0% | 8,91 | 32% |
| 05/03/02 | LEN | - | 12,7 | 161.632 | 24,0% | | X | 302,0 | - | 24,0% | - | 32% |
| 06/03/02 | CAT | - | 19,3 | 161.893 | 24,0% | | X | 261,0 | - | 24,0% | - | 24% |
| 07/03/02 | UC | - | 39,0 | 161.980 | 35,0% | X | | 87,0 | 650,0 | 35,0% | 9,16 | 32% |
| 10/03/02 | LEN | - | 32,3 | 162.306 | 24,0% | | X | 326,0 | - | 24,0% | - | 29% |
| 12/03/02 | SP340 | - | 36,4 | 162.680 | 24,0% | X | | 374,0 | 700,0 | 24,0% | 10,19 | 24% |
| 12/03/02 | SP300 | - | 18,8 | 163.064 | 24,0% | | X | 384,0 | - | 24,0% | - | 24% |
| 13/03/02 | UC | - | 40,0 | 163.373 | 35,0% | X | | 309,0 | 693,0 | 35,0% | 11,79 | 32% |
| 17/03/02 | LEN | - | 38,8 | 163.798 | 24,0% | | X | 425,0 | - | 24,0% | - | 27% |
| 19/03/02 | VO | - | 31,5 | 164.105 | 35,0% | X | | 307,0 | 732,0 | 35,0% | 10,42 | 30% |
| 19/03/02 | LEN | - | 24,3 | 164.364 | 24,0% | X | | 259,0 | 259,0 | 24,0% | 10,65 | 30% |
| 22/03/02 | UC | - | 27,2 | 164.654 | 35,0% | X | | 290,0 | 290,0 | 35,0% | 10,66 | 29% |
| 24/03/02 | LEN | - | 35,3 | 165.134 | 24,0% | | X | 480,0 | - | 24,0% | - | 28% |
| 26/03/02 | VO | - | 35,8 | 165.491 | 35,0% | X | | 357,0 | 837,0 | 35,0% | 11,77 | 31% |
| 26/03/02 | BONFIM | - | 21,7 | 165.718 | 24,0% | X | | 227,0 | 227,0 | 24,0% | 10,45 | 31% |
| 27/03/02 | CAT | - | 11,8 | 166.205 | 24,0% | | X | 487,0 | - | 24,0% | - | 24% |
| 28/03/02 | CAT | - | 40,8 | 166.258 | 24,0% | X | | 53,0 | 540,0 | 24,0% | 10,25 | 24% |
| 31/03/02 | LEN | - | 11,8 | 166.516 | 24,0% | | X | 258,0 | - | 24,0% | - | 24% |
| 01/04/02 | UC | - | 38,4 | 166.855 | 35,0% | X | | 339,0 | 597,0 | 35,0% | 11,89 | 32% |
| 03/04/02 | VO | - | 35,6 | 167.232 | 35,0% | X | | 377,0 | 377,0 | 35,0% | 10,59 | 35% |
| 03/04/02 | VO | - | 7,4 | 167.318 | 35,0% | X | | 86,0 | 86,0 | 35,0% | 11,62 | 35% |
| 05/04/02 | VO | 20,9 | 18,0 | 167.712 | 35,0% | X | | 394,0 | 394,0 | 69,9% | 10,12 | 60% |
| 06/04/02 | LEN | 21,4 | 19,0 | 168.066 | 24,0% | X | | 354,0 | 354,0 | 64,3% | 8,76 | 66% |
| 09/04/02 | ITA | 19,8 | 15,6 | 168.392 | 24,0% | X | | 326,0 | 326,0 | 66,5% | 9,21 | 66% |
| 10/04/02 | ITA | 20,0 | 22,7 | 168.808 | 24,0% | X | | 416,0 | 416,0 | 59,6% | 9,75 | 61% |
| 11/04/02 | UC | 18,0 | 19,0 | 169.169 | 35,0% | X | | 361,0 | 361,0 | 66,6% | 9,76 | 64% |
| 11/04/02 | LEN | 17,0 | 19,4 | 169.491 | 24,0% | X | | 322,0 | 322,0 | 59,5% | 8,85 | 62% |
| 13/04/02 | UC | 19,0 | 23,0 | 169.871 | 35,0% | X | | 380,0 | 380,0 | 64,4% | 9,05 | 63% |
| 14/04/02 | LEN | 15,0 | 7,2 | 170.093 | 24,0% | X | | 222,0 | 222,0 | 75,3% | 9,98 | 69% |
| 16/04/02 | VO | 22,0 | 14,0 | 170.436 | 35,0% | X | | 343,0 | 343,0 | 74,7% | 9,53 | 75% |
| 16/04/02 | LEN | 25,0 | 9,8 | 170.725 | 24,0% | X | | 289,0 | 289,0 | 78,7% | 8,32 | 77% |
| 19/04/02 | UC | 22,0 | 18,9 | 171.057 | 35,0% | X | | 332,0 | 332,0 | 69,9% | 8,11 | 72% |
| 21/04/02 | LEN | 24,0 | 13,6 | 171.360 | 24,0% | X | | 303,0 | 303,0 | 72,5% | 8,06 | 72% |
| 23/04/02 | VO | 20,0 | 16,1 | 171.693 | 35,0% | X | | 333,0 | 333,0 | 71,0% | 9,22 | 72% |
| 24/04/02 | N | 20,0 | 0,0 | 172.105 | 24,0% | | X | 412,0 | - | 100,0% | - | 82% |
| 24/04/02 | UC | 22,0 | 23,1 | 172.270 | 35,0% | X | | 165,0 | 577,0 | 66,7% | 8,86 | 73% |
| 26/04/02 | UC | 28,3 | 16,0 | 172.655 | 35,0% | X | | 385,0 | 385,0 | 76,5% | 8,69 | 75% |
| 30/04/02 | LEN | 15,0 | 15,0 | 172.987 | 24,0% | | X | 332,0 | - | 62,0% | - | 69% |
| 01/05/02 | LEN | 11,1 | 0,0 | 173.043 | 24,0% | | X | 56,0 | - | 100,0% | - | 70% |
| 02/05/02 | VO | 20,1 | 10,0 | 173.307 | 35,0% | X | | 264,0 | 652,0 | 78,4% | 9,15 | 88% |
| 03/05/02 | VO | 24,0 | 19,0 | 173.694 | 35,0% | X | | 387,0 | 387,0 | 71,3% | 9,00 | 73% |
| 05/05/02 | LEN | 24,0 | 11,7 | 174.006 | 24,0% | X | | 312,0 | 312,0 | 75,1% | 8,74 | 74% |
| 07/05/02 | VO | 20,0 | 16,0 | 174.344 | 35,0% | X | | 338,0 | 338,0 | 71,1% | 9,39 | 72% |
| 07/05/02 | LEN | 0,0 | 27,8 | 174.604 | 24,0% | X | | 260,0 | 260,0 | 24,0% | 9,35 | 47% |
| 08/05/02 | UC | 20,0 | 17,4 | 174.878 | 24,0% | X | | 274,0 | 274,0 | 64,6% | 7,33 | 52% |
| 10/05/02 | UC | 28,1 | 12,1 | 175.253 | 24,0% | X | | 375,0 | 375,0 | 77,2% | 9,34 | 74% |
| 12/05/02 | LEN | 22,0 | 11,1 | 175.525 | 24,0% | X | | 272,0 | 272,0 | 74,5% | 8,21 | 76% |
| 13/05/02 | VO | 20,0 | 12,0 | 175.832 | 24,0% | X | | 307,0 | 307,0 | 71,5% | 9,59 | 73% |
| 15/05/02 | UC | 30,0 | 15,7 | 176.227 | 24,0% | X | | 395,0 | 395,0 | 73,9% | 8,64 | 73% |
| 20/05/02 | LEN | 15,0 | 15,0 | 176.546 | 24,0% | X | | 319,0 | 319,0 | 62,0% | 10,63 | 67% |
| 28/05/02 | LEN | 10,0 | 15,0 | 176.689 | 24,0% | | X | 143,0 | - | 54,4% | - | 59% |
| 29/05/02 | UC | 20,0 | 23,4 | 177.009 | 24,0% | X | | 320,0 | 463,0 | 59,1% | 6,77 | 58% |
| 30/05/02 | LEN | 20,0 | 10,0 | 177.259 | 24,0% | | X | 250,0 | - | 74,7% | - | 68% |
| 31/05/02 | UC | 15,0 | 13,9 | 177.487 | 24,0% | X | | 228,0 | 478,0 | 63,4% | 8,11 | 69% |
| 02/06/02 | LEN | 20,0 | 11,9 | 177.741 | 24,0% | X | | 254,0 | 254,0 | 71,8% | 7,97 | 68% |
| 03/06/02 | VO | 20,2 | 10,5 | 178.028 | 24,0% | X | | 287,0 | 287,0 | 74,0% | 9,35 | 73% |
| 03/06/02 | LEN | 15,1 | 10,9 | 178.287 | 24,0% | X | | 259,0 | 259,0 | 68,2% | 9,97 | 71% |
| 06/06/02 | UC | 20,0 | 14,8 | 178.577 | 24,0% | X | | 290,0 | 290,0 | 67,6% | 8,33 | 68% |
| 06/06/02 | LEN | 0,0 | 38,9 | 178.893 | 24,0% | X | | 316,0 | 316,0 | 24,0% | 8,12 | 37% |
| 09/06/02 | LEN | 0,0 | 44,5 | 179.362 | 24,0% | X | | 469,0 | 469,0 | 24,0% | 10,54 | 24% |
| 11/06/02 | VO | 20,0 | 12,0 | 179.719 | 24,0% | X | | 357,0 | 357,0 | 71,5% | 11,16 | 52% |

# ANEXO G – LEVANTAMENTO DE DADOS DO ASTRA 2.0 16V

Capac. tanque: (CT) 52,0 Mistura inicial: (MI) 0,24

| MISTURA ALCOOL GASOLINA | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| DATA | DADOS DO ABASTECIMENTO | | | | | | | | CÁLCULOS | | | |
| | | LITROS | | | CARACT. | TANQ. CHEIO | | km | | | | |
| | LOCAL | ALCOOL | GASOLINA | HODÔM | GASOLINA (% ALC.) | SIM | NÃO | ENTRE ABAST. | km ROD | ALC/GAS abastecim. | CONSUMO (km/L) | ALC/GAS Tanque |
| 08/06/2002 | LEN | - | 52,0 | 8 | 24,0% | X | | - | - | 24,0% | - | 24% |
| 11/06/2002 | VOTUP | - | 44,7 | 490 | 24,0% | X | | 482,0 | 482,0 | 24,0% | 10,78 | 24% |
| 13/06/2002 | S.CARL | - | 11,4 | 858 | 24,0% | | X | 368,0 | - | 24,0% | - | 24% |
| 14/06/2002 | UC | - | 40,8 | 1.037 | 24,0% | X | | 179,0 | 547,0 | 24,0% | 10,49 | 24% |
| 16/06/2002 | LEN | - | 16,1 | 1.318 | 24,0% | | X | 281,0 | - | 24,0% | - | 24% |
| 17/06/2002 | VO | - | 40,0 | 1.609 | 24,0% | X | | 291,0 | 572,0 | 24,0% | 10,19 | 24% |
| 19/06/2002 | UC | - | 36,9 | 1.992 | 24,0% | X | | 383,0 | 383,0 | 24,0% | 10,38 | 24% |
| 20/06/2002 | UC | - | 36,0 | 2.352 | 24,0% | X | | 360,0 | 360,0 | 24,0% | 9,99 | 24% |
| 22/06/2002 | LEN | - | 10,9 | 2.610 | 24,0% | | X | 258,0 | - | 24,0% | - | 24% |
| 25/06/2002 | VO | - | 49,0 | 2.963 | 24,0% | X | | 353,0 | 611,0 | 24,0% | 10,20 | 24% |
| 26/06/2002 | UC | - | 32,8 | 3.317 | 24,0% | X | | 354,0 | 354,0 | 24,0% | 10,78 | 24% |
| 28/06/2002 | UC | - | 38,2 | 3.679 | 24,0% | X | | 362,0 | 362,0 | 24,0% | 9,47 | 24% |
| 30/06/2002 | LEN | - | 12,3 | 3.967 | 24,0% | | X | 288,0 | - | 24,0% | - | 24% |
| 01/07/2002 | VO | - | 44,0 | 4.260 | 25,0% | X | | 293,0 | 581,0 | 25,0% | 10,33 | 25% |
| 03/07/2002 | V.ROB. | - | 5,3 | 4.771 | 25,0% | | X | 511,0 | - | 25,0% | - | 25% |
| 03/07/2002 | UC | - | 45,0 | 4.795 | 25,0% | X | | 24,0 | 535,0 | 25,0% | 10,63 | 25% |
| 06/07/2002 | UC | - | 34,5 | 5.122 | 25,0% | X | | 327,0 | 327,0 | 25,0% | 9,47 | 25% |
| 10/07/2002 | UC | - | 46,6 | 5.593 | 25,0% | X | | 471,0 | 471,0 | 25,0% | 10,11 | 25% |
| 11/07/2002 | ARAR | - | 10,8 | 6.040 | 25,0% | | X | 447,0 | - | 25,0% | - | 25% |
| 12/07/2002 | UC | - | 43,2 | 6.195 | 25,0% | X | | 155,0 | 602,0 | 25,0% | 11,17 | 25% |
| 14/07/2002 | LEN | - | 16,7 | 6.493 | 25,0% | | X | 298,0 | - | 25,0% | - | 25% |
| 16/07/2002 | VO | - | 46,0 | 6.796 | 25,0% | X | | 303,0 | 601,0 | 25,0% | 9,59 | 25% |
| 17/07/2002 | UC | - | 47,0 | 7.281 | 25,0% | X | | 485,0 | 485,0 | 25,0% | 10,31 | 25% |
| 19/07/2002 | LEN | - | 22,3 | 7.661 | 25,0% | | X | 380,0 | - | 25,0% | - | 25% |
| 22/07/2002 | VO | - | 41,6 | 7.932 | 25,0% | X | | 271,0 | 651,0 | 25,0% | 10,20 | 25% |
| 24/07/2002 | UC | - | 48,0 | 8.440 | 25,0% | X | | 508,0 | 508,0 | 25,0% | 10,58 | 25% |
| 25/07/2002 | UC | - | 26,0 | 8.701 | 25,0% | X | | 261,0 | 261,0 | 25,0% | 10,04 | 25% |
| 27/07/2002 | LEN | - | 11,1 | 9.168 | 25,0% | | X | 467,0 | - | 25,0% | - | 25% |
| 28/07/2002 | LEN | - | 22,3 | 9.230 | 25,0% | | X | 62,0 | - | 25,0% | - | 25% |
| 29/07/2002 | VO | - | 43,5 | 9.491 | 25,0% | X | | 261,0 | 790,0 | 25,0% | 10,28 | 25% |
| 30/07/2002 | LEN | - | 11,1 | 9.835 | 25,0% | | X | 344,0 | - | 25,0% | - | 25% |
| 31/07/2002 | VO | - | 47,0 | 10.097 | 25,0% | X | | 262,0 | 606,0 | 25,0% | 10,42 | 25% |
| 02/08/2002 | UC | - | 43,0 | 10.521 | 25,0% | X | | 424,0 | 424,0 | 25,0% | 9,86 | 25% |
| 04/08/2002 | LEN | - | 16,7 | 10.772 | 25,0% | | X | 251,0 | - | 25,0% | - | 25% |
| 06/08/2002 | VO | 15,0 | 24,0 | 11.102 | 25,0% | X | | 330,0 | 581,0 | 53,9% | 10,43 | 47% |
| 07/08/2002 | UC | 20,0 | 30,1 | 11.583 | 25,0% | X | | 481,0 | 481,0 | 54,9% | 9,60 | 55% |
| 09/08/2002 | CAT | - | 19,1 | 11.718 | 25,0% | X | | 135,0 | 135,0 | 25,0% | 7,06 | 44% |
| 14/08/2002 | CHAP | 10,0 | 10,2 | 12.039 | 25,0% | | X | 321,0 | - | 62,1% | - | 39% |
| 14/08/2002 | UC | 20,0 | 15,2 | 12.234 | 25,0% | X | | 195,0 | 516,0 | 67,7% | 9,32 | 66% |
| 16/08/2002 | UC | 20,0 | 20,0 | 12.584 | 25,0% | X | | 350,0 | 350,0 | 62,5% | 8,75 | 64% |
| 18/08/2002 | LEN | 22,4 | 11,2 | 12.878 | 25,0% | | X | 294,0 | - | 75,1% | - | 71% |
| 19/08/2002 | VO | 15,0 | 19,0 | 13.142 | 25,0% | X | | 264,0 | 558,0 | 58,1% | 8,26 | 64% |
| 20/08/2002 | VO | 15,0 | 12,0 | 13.412 | 25,0% | X | | 270,0 | 270,0 | 66,7% | 10,00 | 63% |
| 21/08/2002 | V. Rob. | 14,2 | 0,0 | 13.864 | 25,0% | | X | 452,0 | - | 100,0% | - | 76% |
| 22/08/2002 | UC | 36,4 | 10,0 | 13.936 | 25,0% | X | | 72,0 | 524,0 | 83,8% | 8,65 | 86% |
| 25/08/2002 | LEN | - | 19,5 | 14.277 | 25,0% | | X | 341,0 | - | 25,0% | - | 62% |
| 28/08/2002 | UC | 25,0 | 18,6 | 14.692 | 25,0% | X | | 415,0 | 756,0 | 68,0% | 11,98 | 61% |
| 31/08/2002 | UC | 14,7 | 10,0 | 14.888 | 25,0% | X | | 196,0 | 196,0 | 69,7% | 7,92 | 69% |
| 01/09/2002 | LEN | - | 11,9 | 15.105 | 25,0% | | X | 217,0 | - | 25,0% | - | 59% |
| 02/09/2002 | VO | 25,0 | 19,0 | 15.396 | 25,0% | X | | 291,0 | 508,0 | 67,6% | 9,09 | 61% |
| 03/09/2002 | LEN | 11,1 | 11,6 | 15.720 | 25,0% | | X | 324,0 | - | 61,7% | - | 65% |
| 04/09/2002 | UC | 20,0 | 16,5 | 15.940 | 25,0% | X | | 220,0 | 544,0 | 66,1% | 9,17 | 65% |
| 06/09/2002 | UC | - | 18,8 | 16.065 | 25,0% | X | | 125,0 | 125,0 | 25,0% | 6,65 | 51% |
| 08/09/2002 | LEN | 16,7 | 8,4 | 16.407 | 25,0% | | X | 342,0 | - | 75,0% | - | 49% |
| 09/09/2002 | VO | 20,0 | 22,0 | 16.697 | 25,0% | X | | 290,0 | 632,0 | 60,7% | 9,43 | 63% |
| 10/09/2002 | LEN | 11,2 | - | 16.993 | 25,0% | | X | 296,0 | - | 100,0% | - | 69% |
| 11/09/2002 | UC | 26,0 | 20,0 | 17.213 | 25,0% | X | | 220,0 | 516,0 | 67,4% | 9,02 | 71% |
| 13/09/2002 | UC | 31,2 | - | 17.423 | 25,0% | X | | 210,0 | 210,0 | 100,0% | 6,74 | 87% |
| 15/09/2002 | LEN | 11,1 | 8,3 | 17.677 | 25,0% | | X | 254,0 | - | 67,9% | - | 88% |
| 17/09/2002 | VO | 23,0 | 20,0 | 17.971 | 25,0% | X | | 294,0 | 548,0 | 65,1% | 8,77 | 66% |
| 17/09/2002 | LEN | 10,8 | - | 18.229 | 25,0% | | X | 258,0 | - | 100,0% | - | 72% |
| 18/09/2002 | UC | 25,0 | 18,9 | 18.454 | 25,0% | X | | 225,0 | 483,0 | 67,8% | 8,84 | 73% |
| 20/09/2002 | UC | 10,0 | 11,3 | 18.600 | 25,0% | X | | 146,0 | 146,0 | 60,3% | 6,86 | 65% |
| 22/09/2002 | LEN | 11,1 | -, | 18.821 | 25,0% | | X | 221,0 | - | 100,0% | - | 69% |
| 23/09/2002 | VO | - | 42,5 | 19.084 | 25,0% | X | | 263,0 | 484,0 | 25,0% | 9,02 | 39% |
| 24/09/2002 | LEN | - | 35,0 | 19.427 | 25,0% | X | | 343,0 | 343,0 | 25,0% | 9,79 | 25% |
| 26/09/2002 | UC | - | 28,7 | 19.718 | 25,0% | X | | 291,0 | 291,0 | 25,0% | 10,13 | 25% |
| 27/09/2002 | UC | 33,5 | - | 20.063 | 25,0% | X | | 345,0 | 345,0 | 100,0% | 10,30 | 73% |
| 30/09/2002 | VO | 27,5 | 20,0 | 20.587 | 25,0% | X | | 524,0 | 524,0 | 68,4% | 11,03 | 71% |
| 01/10/2002 | LEN | 5,6 | 5,6 | 20.903 | 25,0% | | X | 316,0 | - | 62,6% | - | 67% |

| MISTURA ALCOOL GASOLINA | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | DADOS DO ABASTECIMENTO | | | | | | | | CÁLCULOS | | | |
| | | LITROS | | | CARACT. | TANQUE CHEIO | | km | | | | |
| DATA | LOCAL | ALCOOL | GASOLINA | HODÔM | GASOLINA (% ALC.) | SIM | NÃO | ENTRE ABAST. | km ROD | % ALC/GAS no abast. | CONSUMO (km/l) | % ALC.GAS Total |
| 02/10/2002 | UC | - | 46,5 | 21.123 | 35,0% | X | | 220,0 | 536,0 | 35,0% | 9,30 | 38,4% |
| 04/10/2002 | UC | 21,5 | - | 21.298 | 35,0% | X | | 175,0 | 175,0 | 100,0% | 8,14 | 63,9% |
| 06/10/2002 | LEN | 10,6 | - | 21.517 | 25,0% | | X | 219,0 | - | 100,0% | - | 71,2% |
| 07/10/2002 | VO | 25,5 | 20,0 | 21.806 | 35,0% | X | | 289,0 | 508,0 | 71,4% | 9,06 | 71,4% |
| 08/10/2002 | S.CAR | 11,1 | 11,7 | 22.118 | 25,0% | | X | 312,0 | - | 61,5% | - | 67,1% |
| 09/10/2002 | BRAHMA | - | 11,7 | 22.297 | 25,0% | | X | 179,0 | - | 25,0% | - | 57,6% |
| 09/10/2002 | UC | - | 45,0 | 22.493 | 25,0% | X | | 196,0 | 687,0 | 25,0% | 8,64 | 29,4% |
| 12/10/2002 | LEN | 31,6 | 16,7 | 22.893 | 25,0% | X | | 400,0 | 400,0 | 74,1% | 8,28 | 70,9% |
| 13/10/2002 | LEN | 21,1 | 27,3 | 23.347 | 25,0% | X | | 454,0 | 454,0 | 57,7% | 9,39 | 58,6% |
| 15/10/2002 | VO | 10,0 | 21,0 | 23.666 | 25,0% | X | | 319,0 | 319,0 | 49,2% | 10,29 | 53,0% |
| 16/10/2002 | V. ROB | - | 49,1 | 24.117 | 25,0% | X | | 451,0 | 451,0 | 25,0% | 9,19 | 26,6% |
| 18/10/2002 | UC | - | 20,8 | 24.284 | 25,0% | X | | 167,0 | 167,0 | 25,0% | 8,01 | 25,9% |
| 20/10/2002 | LEN | - | 16,7 | 24.546 | 25,0% | | X | 262,0 | - | 25,0% | - | 25,6% |
| 21/10/2002 | VO | - | 35,0 | 24.809 | 25,0% | X | | 263,0 | 525,0 | 25,0% | 10,15 | 25,2% |
| 22/10/2002 | VO | - | 12,7 | 24.916 | 25,0% | X | | 107,0 | 107,0 | 25,0% | 8,43 | 25,2% |
| 23/10/2002 | UC | - | 44,7 | 25.392 | 25,0% | X | | 476,0 | 476,0 | 25,0% | 10,66 | 25,0% |
| 27/10/2002 | LEN | - | 43,4 | 25.757 | 25,0% | X | | 365,0 | 365,0 | 25,0% | 8,42 | 25,0% |
| 29/10/2002 | VO | - | 37,5 | 26.152 | 25,0% | X | | 395,0 | 395,0 | 25,0% | 10,53 | 25,0% |
| 01/11/2002 | LEN | 13,0 | 15,0 | 26.434 | 25,0% | | X | 282,0 | - | 59,8% | - | 43,8% |
| 08/11/2002 | LEN | 10,0 | 10,0 | 26.764 | 25,0% | | X | 330,0 | - | 62,5% | - | 51,0% |
| 12/11/2002 | LEN | 15,0 | 15,0 | 27.000 | 25,0% | | X | 236,0 | - | 62,5% | - | 57,6% |
| 14/11/2002 | LEN | 15,0 | 15,0 | 27.264 | 25,0% | | X | 264,0 | - | 62,5% | - | 60,4% |
| 15/11/2002 | RIB.PRE | 20,0 | - | 27.484 | 25,0% | X | | 220,0 | 1.332,0 | 100,0% | 10,41 | 75,7% |
| 21/11/2002 | LEN | 15,0 | 15,0 | 27.820 | 25,0% | | X | 336,0 | - | 62,5% | - | 68,1% |
| 25/11/2002 | LEN | 15,0 | 15,0 | 27.960 | 25,0% | | X | 140,0 | - | 62,5% | - | 64,9% |
| 28/11/2002 | JAU | 15,0 | 15,0 | 28.175 | 25,0% | | X | 215,0 | - | 62,5% | - | 63,5% |
| 04/12/2002 | LEN | 15,0 | 15,0 | 28.441 | 25,0% | | X | 266,0 | - | 62,5% | - | 62,9% |
| 05/12/2002 | LEN | 15,0 | 15,0 | 28.575 | 25,0% | | X | 134,0 | - | 62,5% | - | 62,7% |
| 16/12/2002 | LEN | - | 23,9 | 28.697 | 25,0% | X | | 122,0 | 1.213,0 | 25,0% | 6,97 | 45,3% |
| 17/12/2002 | VO | 8,0 | 25,0 | 29.015 | 25,0% | X | | 318,0 | 318,0 | 43,2% | 9,64 | 44,0% |
| 17/12/2002 | LEN | 8,4 | 15,8 | 29.277 | 25,0% | | X | 262,0 | - | 51,0% | - | 47,2% |
| 20/12/2002 | UC | 6,0 | 42,2 | 29.655 | 25,0% | X | | 378,0 | 640,0 | 34,3% | 8,84 | 35,3% |
| 23/12/2002 | LEN | 3,0 | 33,9 | 29.966 | 25,0% | X | | 311,0 | 311,0 | 31,1% | 8,44 | 32,3% |
| 23/12/2002 | VO | 2,0 | 24,0 | 30.253 | 25,0% | X | | 287,0 | 287,0 | 30,8% | 11,04 | 31,5% |
| 26/12/2002 | LEN | 3,0 | 36,4 | 30.591 | 25,0% | X | | 338,0 | 338,0 | 30,7% | 8,58 | 30,9% |
| 27/12/2002 | UC | 3,0 | 26,5 | 30.902 | 25,0% | X | | 311,0 | 311,0 | 32,6% | 10,54 | 31,9% |
| 29/12/2002 | LEN | 3,0 | 31,3 | 31.193 | 25,0% | X | | 291,0 | 291,0 | 31,6% | 8,48 | 31,7% |
| 30/12/2002 | VO | 2,5 | 22,0 | 31.455 | 25,0% | X | | 262,0 | 262,0 | 32,7% | 10,69 | 32,1% |
| 31/12/2002 | CAT | 4,2 | 35,6 | 31.826 | 25,0% | X | | 371,0 | 371,0 | 32,9% | 9,32 | 32,7% |
| 02/01/2003 | UC | 19,1 | 29,3 | 32.289 | 25,0% | X | | 463,0 | 463,0 | 54,5% | 9,57 | 53,0% |
| 06/01/2003 | LEN | 17,0 | 20,8 | 32.614 | 25,0% | X | | 325,0 | 325,0 | 58,7% | 8,59 | 57,2% |
| 07/01/2003 | VO | 12,5 | 18,0 | 32.902 | 25,0% | X | | 288,0 | 288,0 | 55,7% | 9,44 | 56,3% |
| 08/01/2003 | UC | 21,5 | 30,0 | 33.378 | 25,0% | X | | 476,0 | 476,0 | 56,3% | 9,24 | 56,3% |
| 12/01/2003 | LEN | 33,4 | 15,7 | 33.781 | 25,0% | X | | 403,0 | 403,0 | 76,0% | 8,21 | 74,9% |
| 15/01/2003 | VO | 23,0 | 12,0 | 34.096 | 25,0% | X | | 315,0 | 315,0 | 74,3% | 9,00 | 74,5% |
| 15/01/2003 | CASTE | 14,0 | 5,0 | 34.493 | 25,0% | | X | 397,0 | - | 80,3% | - | 76,6% |
| 16/01/2003 | LEN | 14,0 | 5,0 | 34.581 | 25,0% | | X | 88,0 | - | 80,3% | - | 77,9% |
| 17/01/2003 | UC | 8,0 | 41,1 | 34.860 | 25,0% | X | | 279,0 | 764,0 | 37,2% | 8,77 | 39,5% |
| 19/01/2003 | LEN | 3,0 | 11,0 | 35.122 | 25,0% | | X | 262,0 | - | 41,0% | - | 39,9% |
| 20/01/2003 | VO | 7,0 | 38,0 | 35.413 | 25,0% | X | | 291,0 | 553,0 | 36,7% | 9,37 | 37,1% |
| 22/01/2003 | LEN | 2,0 | 11,0 | 35.723 | 25,0% | | X | 310,0 | - | 36,5% | - | 37,0% |
| 23/01/2003 | UC | 15,0 | 33,3 | 36.001 | 25,0% | X | | 278,0 | 588,0 | 48,3% | 9,60 | 47,5% |
| 26/01/2003 | LEN | 4,0 | 10,0 | 36.274 | 25,0% | | X | 273,0 | - | 46,4% | - | 47,2% |
| 27/01/2003 | VO | 15,0 | 32,2 | 36.565 | 25,0% | X | | 291,0 | 564,0 | 48,8% | 9,22 | 48,7% |
| 28/01/2003 | VO | 4,0 | 10,0 | 36.885 | 25,0% | | X | 320,0 | - | 46,4% | - | 48,1% |
| 29/01/2003 | CAT | 4,0 | 10,0 | 37.137 | 25,0% | | X | 252,0 | - | 46,4% | - | 47,6% |
| 31/01/2003 | UC | 14,0 | 33,6 | 37.246 | 25,0% | X | | 109,0 | 681,0 | 47,1% | 9,01 | 47,1% |
| 02/02/2003 | LEN | 7,0 | 14,0 | 37.466 | 25,0% | | X | 220,0 | - | 50,0% | - | 48,3% |
| 04/02/2003 | MATÃO | 9,0 | 17,0 | 37.843 | 25,0% | | X | 377,0 | - | 51,0% | - | 49,6% |
| 05/02/2003 | LEN | 9,0 | 19,0 | 38.000 | 25,0% | | X | 157,0 | - | 49,1% | - | 49,3% |
| 07/02/2003 | UC | 13,0 | 30,0 | 38.318 | 25,0% | X | | 318,0 | 1.072,0 | 47,7% | 9,08 | 48,0% |
| 09/02/2003 | LEN | 7,0 | 14,0 | 38.543 | 20,0% | | X | 225,0 | - | 46,7% | - | 47,4% |
| 11/02/2003 | VO | 10,0 | 36,0 | 38.890 | 25,0% | | | 347,0 | 572,0 | 41,3% | 8,54 | 42,0% |
| 12/02/2003 | UC | 10,0 | 36,7 | 39.370 | 25,0% | | | 480,0 | 480,0 | 41,1% | 10,28 | 41,2% |
| 16/02/2003 | LEN | 6,0 | 21,0 | 39.703 | 20,0% | | X | 333,0 | - | 37,8% | - | 39,4% |
| 18/02/2003 | VO | 9,0 | 36,0 | 40.025 | 24,0% | X | | 322,0 | 655,0 | 39,2% | 9,09 | 39,2% |
| 18/02/2003 | LEN | 3,0 | 10,1 | 40.284 | 20,0% | | X | 259,0 | - | 38,3% | - | 39,0% |
| 21/02/2003 | UC | 11,0 | 37,9 | 40.613 | 24,0% | X | | 329,0 | 588,0 | 41,1% | 9,49 | 41,0% |

# ANEXO H – DADOS MÉDIOS EXTRAÍDOS DO ENSAIO EM BANCADA DINAMOMÉTRICA

| MISTURA | RPM | TEMPO INJEÇÃO (ms) | CONSUMO COMBUST. (g/s) | AVANÇO (graus) | TORQUE CORRIGIDO (N.m) | POTENCIA CORRIGIDA (kW) | CONSUMO ESPECÍFICO (g/kW.h) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CHIP GAS GAS. COM. 25% | 1000 | 2.109 | 0,66 | 15,3 | 51,2 | 5,4 | 446 |
| | 1500 | 2.185 | 0,96 | 19,8 | 56,4 | 8,9 | 388 |
| | 2000 | 2.340 | 1,37 | 18,5 | 56,4 | 11,8 | 416 |
| | 2500 | 2.442 | 1,69 | 21,5 | 63,2 | 16,5 | 368 |
| | 3000 | 2.543 | 2,10 | 22,5 | 66,5 | 20,9 | 362 |
| | 3500 | 2.513 | 2,50 | 31,5 | 69,2 | 25,3 | 355 |
| | 4000 | 2.472 | 2,73 | 36,2 | 64,3 | 26,9 | 365 |
| | 4500 | 2.487 | 3,08 | 36,3 | 65,0 | 30,7 | 362 |
| | 5000 | 2.671 | 3,65 | 35,3 | 64,7 | 33,9 | 389 |
| | 5500 | 2.699 | 4,08 | 33,8 | 61,7 | 35,5 | 414 |
| | 6000 | 2.651 | 4,33 | 37,5 | 61,7 | 38,8 | 402 |
| CHIP GAS MISTURA 35% | 1000 | 2.071 | 0,62 | 15,5 | 51,5 | 5,4 | 411 |
| | 1500 | 2.170 | 0,96 | 19,2 | 56,4 | 8,9 | 390 |
| | 2000 | 2.325 | 1,23 | 18,2 | 56,4 | 11,8 | 375 |
| | 2500 | 2.427 | 1,76 | 21,5 | 63,6 | 16,6 | 380 |
| | 3000 | 2.523 | 2,18 | 22,7 | 66,2 | 20,8 | 377 |
| | 3500 | 2.491 | 2,38 | 31,7 | 68,1 | 25,0 | 343 |
| | 4000 | 2.491 | 2,75 | 36,2 | 63,9 | 26,8 | 369 |
| | 4500 | 2.535 | 3,17 | 36,7 | 65,1 | 30,7 | 373 |
| | 5000 | 2.690 | 3,74 | 35,3 | 64,3 | 33,7 | 400 |
| | 5500 | 2.735 | 4,13 | 34,3 | 60,9 | 35,1 | 424 |
| | 6000 | 2.689 | 4,38 | 37,8 | 58,7 | 36,9 | 427 |
| CHIP GAS MISTURA 45% | 1000 | 2.115 | 0,56 | 14,3 | 50,5 | 5,3 | 381 |
| | 1500 | 2.227 | 0,92 | 19,2 | 56,1 | 8,8 | 376 |
| | 2000 | 2.460 | 1,40 | 18,7 | 56,5 | 11,8 | 424 |
| | 2500 | 2.465 | 1,70 | 21,5 | 62,1 | 16,3 | 377 |
| | 3000 | 2.590 | 2,10 | 22,7 | 65,1 | 20,5 | 370 |
| | 3500 | 2.607 | 2,50 | 31,5 | 68,5 | 25,1 | 358 |
| | 4000 | 2.571 | 2,84 | 36,3 | 63,6 | 26,7 | 384 |
| | 4500 | 2.629 | 3,38 | 36,7 | 63,6 | 30,0 | 406 |
| | 5000 | 2.715 | 3,78 | 35,5 | 63,6 | 33,3 | 408 |
| | 5500 | 2.765 | 4,23 | 34,0 | 59,9 | 34,5 | 441 |
| | 6000 | 2.733 | 4,55 | 37,8 | 58,0 | 36,5 | 449 |
| CHIP GAS MISTURA 55% | 1000 | 2.198 | 0,65 | 14,5 | 50,1 | 5,2 | 443 |
| | 1500 | 2.339 | 0,95 | 18,5 | 56,0 | 8,8 | 390 |
| | 2000 | 2.516 | 1,45 | 18,3 | 56,8 | 11,9 | 438 |
| | 2500 | 2.563 | 1,82 | 21,5 | 63,1 | 16,5 | 396 |
| | 3000 | 2.684 | 2,28 | 23,2 | 64,9 | 20,4 | 402 |
| | 3500 | 2.627 | 2,53 | 31,8 | 66,4 | 24,3 | 374 |
| | 4000 | 2.621 | 2,94 | 36,2 | 63,1 | 26,4 | 401 |
| | 4500 | 2.685 | 3,29 | 36,2 | 63,4 | 29,9 | 396 |
| | 5000 | 2.771 | 3,79 | 35,5 | 63,1 | 33,0 | 414 |
| | 5500 | 2.803 | 4,20 | 33,8 | 59,0 | 34,0 | 445 |
| | 6000 | 2.775 | 4,59 | 37,5 | 54,5 | 34,3 | 482 |
| CHIP GAS MISTURA 65% | 1000 | 2.379 | 0,75 | 15,0 | 50,3 | 5,3 | 515 |
| | 1500 | 2.471 | 1,08 | 19,3 | 55,5 | 8,7 | 446 |
| | 2000 | 2.607 | 1,36 | 18,5 | 56,3 | 11,8 | 415 |
| | 2500 | 2.685 | 2,01 | 21,5 | 63,0 | 16,5 | 439 |
| | 3000 | 2.831 | 2,47 | 23,0 | 64,5 | 20,2 | 439 |
| | 3500 | 2.772 | 2,69 | 31,7 | 66,7 | 24,4 | 396 |
| | 4000 | 2.763 | 3,03 | 36,5 | 63,3 | 26,5 | 411 |
| | 4500 | 2.809 | 3,47 | 36,0 | 63,3 | 29,8 | 418 |
| | 5000 | 2.907 | 3,96 | 35,5 | 62,6 | 32,8 | 435 |
| | 5500 | 2.973 | 4,56 | 33,8 | 59,2 | 34,1 | 481 |
| | 6000 | 2.886 | 5,16 | 37,0 | 55,5 | 34,9 | 532 |

| MISTURA | RPM | TEMPO INJEÇÃO (ms) | CONSUMO COMBUST. (g/s) | AVANÇO (graus) | TORQUE CORRIGIDO (N.m) | POTENCIA CORRIGIDA (kW) | CONSUMO ESPECÍFICO (g/kW.h) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CHIP GAS MISTURA 75% | 1000 | 2.429 | 0,74 | 14,8 | 50,1 | 5,2 | 507 |
| | 1500 | 2.558 | 1,16 | 19,3 | 55,3 | 8,7 | 481 |
| | 2000 | 2.622 | 1,53 | 18,5 | 54,9 | 11,5 | 477 |
| | 2500 | 2.785 | 1,96 | 21,5 | 61,4 | 16,1 | 438 |
| | 3000 | 2.973 | 2,48 | 22,8 | 64,4 | 20,2 | 441 |
| | 3500 | 3.052 | 2,86 | 31,3 | 67,4 | 24,7 | 416 |
| | 4000 | 2.951 | 3,25 | 36,3 | 63,6 | 26,6 | 439 |
| | 4500 | 2.952 | 3,65 | 36,7 | 62,9 | 29,6 | 443 |
| | 5000 | 3.137 | 4,42 | 35,3 | 64,0 | 33,5 | 475 |
| | 5500 | 3.205 | 4,78 | 34,2 | 62,5 | 36,0 | 478 |
| | 6000 | 3.138 | 5,23 | 37,3 | 58,0 | 36,4 | 517 |
| CHIP. ÁLC. ÁLCOOL PURO | 1000 | 3.478 | 1,01 | 14,7 | 49,2 | 5,2 | 709 |
| | 1500 | 3.784 | 1,63 | 28,2 | 56,4 | 8,9 | 661 |
| | 2000 | 3.769 | 2,10 | 35,2 | 58,2 | 12,2 | 620 |
| | 2500 | 4.179 | 2,83 | 41,2 | 63,5 | 16,6 | 613 |
| | 3000 | 4.566 | 3,76 | 45,0 | 67,3 | 21,1 | 641 |
| | 3500 | 4.331 | 4,27 | 46,3 | 69,5 | 25,5 | 603 |
| | 4000 | 4.346 | 4,69 | 46,7 | 65,4 | 27,4 | 616 |
| | 4500 | 4.435 | 5,44 | 50,8 | 64,6 | 30,5 | 643 |
| | 5000 | 4.605 | 6,40 | 51,3 | 63,9 | 33,4 | 689 |
| | 5500 | 4.681 | 7,14 | 51,5 | 61,3 | 35,3 | 728 |
| | 6000 | 4.679 | 6,91 | 54,7 | 55,2 | 34,7 | 717 |

# ANEXO I – DADOS PARA DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO MECÂNICO

| MISTURA | RPM | TORQUE (mV) | | | P. ATM. | T.B.S. | TORQUE | POT.OBS. | POT. COR | POT.IND. | POT. IND. | REND. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | PRI | SEG | TER | (mmHg) | (C) | (N.m) | (kW) | (kW) | (kW) | TOTAL (kW) | MEC. |
| | 1000 | 6,3 | 6,3 | 6,3 | 727 | 26 | 36 | 3,8 | 3,8 | 1,5 | 5,9 | 0,90 |
| | 1500 | 6,8 | 6,7 | 6,8 | 727 | 26 | 42 | 6,5 | 6,6 | 2,3 | 9,6 | 0,93 |
| | 2000 | 6,6 | 6,6 | 6,6 | 727 | 26 | 40 | 8,3 | 8,4 | 3,5 | 13,5 | 0,87 |
| CHIP GAS | 2500 | 7,2 | 7,2 | 7,1 | 727 | 26 | 46 | 12,0 | 12,1 | 4,4 | 18,2 | 0,91 |
| GAS. COM | 3000 | 7,4 | 7,4 | 7,5 | 727 | 26 | 49 | 15,4 | 15,5 | 5,4 | 22,1 | 0,95 |
| 25% | 3500 | 7,4 | 7,5 | 7,4 | 727 | 26 | 49 | 17,9 | 18,0 | 7,3 | 28,9 | 0,88 |
| PRIMEIRO | 4000 | 7,0 | 7,0 | 7,1 | 727 | 26 | 44 | 18,6 | 18,7 | 8,2 | 32,7 | 0,82 |
| CILINDRO | 4500 | 6,9 | 6,8 | 6,9 | 727 | 26 | 43 | 20,1 | 20,2 | 10,5 | 40,3 | 0,76 |
| | 5000 | 6,8 | 6,8 | 6,9 | 727 | 26 | 42 | 22,1 | 22,2 | 11,6 | 45,8 | 0,74 |
| | 5500 | 6,8 | 6,8 | 6,9 | 727 | 26 | 42 | 24,3 | 24,5 | 11,1 | 44,1 | 0,80 |
| | 6000 | 6,1 | 6,2 | 6,2 | 727 | 26 | 35 | 21,9 | 22,0 | 16,7 | 65,1 | 0,60 |
| | 1000 | 6,4 | 6,3 | 6,4 | 727 | 28 | 37 | 3,9 | 3,9 | 1,4 | | |
| | 1500 | 6,6 | 6,7 | 6,7 | 727 | 28 | 40 | 6,3 | 6,4 | 2,5 | | |
| | 2000 | 6,6 | 6,6 | 6,6 | 727 | 28 | 40 | 8,3 | 8,4 | 3,4 | | |
| CHIP GAS | 2500 | 7,1 | 7,1 | 7,1 | 727 | 28 | 45 | 11,8 | 11,9 | 4,6 | | |
| GAS. COM | 3000 | 7,4 | 7,1 | 7,5 | 727 | 28 | 48 | 15,0 | 15,2 | 5,7 | | |
| 25% | 3500 | 7,3 | 7,5 | 7,5 | 727 | 28 | 49 | 17,9 | 18,1 | 7,3 | | |
| SEGUNDO | 4000 | 6,9 | 6,9 | 7,0 | 727 | 28 | 43 | 18,2 | 18,3 | 8,6 | | |
| CILINDRO | 4500 | 6,8 | 6,9 | 7,0 | 727 | 28 | 43 | 20,3 | 20,4 | 10,2 | | |
| | 5000 | 6,8 | 6,8 | 6,9 | 727 | 28 | 42 | 22,1 | 22,3 | 11,5 | | |
| | 5500 | 6,6 | 6,9 | 6,9 | 727 | 28 | 42 | 24,1 | 24,3 | 11,2 | | |
| | 6000 | 6,4 | 6,2 | 6,3 | 727 | 28 | 36 | 22,8 | 23,0 | 15,7 | | |
| | 1000 | 6,5 | 6,4 | 6,4 | 727 | 28 | 39 | 4,0 | 4,0 | 1,4 | | |
| | 1500 | 6,7 | 6,8 | 6,6 | 727 | 28 | 41 | 6,4 | 6,5 | 2,4 | | |
| | 2000 | 6,7 | 6,6 | 6,7 | 727 | 28 | 40 | 8,5 | 8,5 | 3,3 | | |
| CHIP GAS | 2500 | 7,2 | 7,2 | 7,2 | 727 | 28 | 46 | 12,1 | 12,2 | 4,3 | | |
| GAS. COM | 3000 | 7,4 | 7,5 | 7,3 | 727 | 28 | 49 | 15,3 | 15,4 | 5,5 | | |
| 25% | 3500 | 7,5 | 7,5 | 7,5 | 727 | 28 | 50 | 18,2 | 18,4 | 7,0 | | |
| TERCEIRO | 4000 | 6,9 | 7,0 | 7,1 | 727 | 28 | 44 | 18,5 | 18,6 | 8,3 | | |
| CILINDRO | 4500 | 6,9 | 6,9 | 7,0 | 727 | 28 | 43 | 20,4 | 20,6 | 10,0 | | |
| | 5000 | 7,0 | 6,8 | 6,9 | 727 | 28 | 43 | 22,5 | 22,7 | 11,1 | | |
| | 5500 | 6,8 | 6,9 | 6,7 | 727 | 28 | 42 | 24,1 | 24,3 | 11,2 | | |
| | 6000 | 6,3 | 6,2 | 6,2 | 727 | 28 | 36 | 22,4 | 22,6 | 16,2 | | |
| | 1000 | 6,2 | 6,3 | 6,2 | 727 | 29 | 36 | 3,7 | 3,8 | 1,6 | | |
| | 1500 | 6,7 | 6,7 | 6,7 | 727 | 29 | 41 | 6,4 | 6,5 | 2,4 | | |
| | 2000 | 6,6 | 6,6 | 6,7 | 727 | 29 | 40 | 8,4 | 8,5 | 3,3 | | |
| CHIP GAS | 2500 | 6,9 | 7,0 | 7,1 | 727 | 29 | 44 | 11,5 | 11,7 | 4,9 | | |
| GAS. COM | 3000 | 7,4 | 7,5 | 7,4 | 727 | 29 | 49 | 15,4 | 15,5 | 5,4 | | |
| 25% | 3500 | 7,4 | 7,4 | 7,4 | 727 | 29 | 49 | 17,8 | 18,0 | 7,4 | | |
| QUARTO | 4000 | 7,0 | 7,2 | 7,2 | 727 | 29 | 46 | 19,1 | 19,3 | 7,6 | | |
| CILINDRO | 4500 | 7,0 | 7,0 | 7,0 | 727 | 29 | 44 | 20,8 | 21,0 | 9,6 | | |
| | 5000 | 6,8 | 6,9 | 6,8 | 727 | 29 | 42 | 22,1 | 22,4 | 11,5 | | |
| | 5500 | 6,8 | 6,9 | 6,9 | 727 | 29 | 43 | 24,5 | 24,8 | 10,7 | | |
| | 6000 | 6,2 | 6,2 | 6,2 | 727 | 29 | 35 | 22,1 | 22,4 | 16,4 | | |

| MISTURA | RPM | TORQUE (mV) | | | P. ATM. | T.B.S. | TORQUE | POT.OBS. | POT. COR | POT.IND. | POT. IND. | REND. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | PRI | SEG | TER | (mmHg) | (C) | (N.m) | (kW) | (kW) | (kW) | TOTAL (kW) | MEC. |
| | 1000 | 6,2 | 6,3 | 6,3 | 730 | 21 | 36 | 3,8 | 3,7 | 1,4 | 5,5 | 0,93 |
| | 1500 | 6,8 | 6,8 | 6,8 | 730 | 21 | 42 | 6,6 | 6,5 | 2,3 | 9,5 | 0,93 |
| | 2000 | 6,9 | 6,9 | 6,8 | 730 | 21 | 43 | 8,9 | 8,9 | 3,3 | 14,0 | 0,87 |
| CHIP ÁLC | 2500 | 7,2 | 7,1 | 7,2 | 730 | 21 | 46 | 12,0 | 12,0 | 4,7 | 18,6 | 0,89 |
| ÁLCOOL | 3000 | 7,5 | 7,5 | 7,5 | 730 | 21 | 50 | 15,6 | 15,5 | 5,6 | 22,8 | 0,93 |
| PURO | 3500 | 7,5 | 7,5 | 7,5 | 730 | 21 | 50 | 18,2 | 18,1 | 7,4 | 29,3 | 0,87 |
| PRIMEIRO | 4000 | 7,2 | 7,2 | 7,2 | 730 | 21 | 46 | 19,4 | 19,3 | 8,1 | 33,1 | 0,83 |
| CILINDRO | 4500 | 7,0 | 7,0 | 7,0 | 730 | 21 | 44 | 20,8 | 20,6 | 9,8 | 38,3 | 0,80 |
| | 5000 | 6,8 | 6,8 | 6,8 | 730 | 21 | 42 | 21,9 | 21,8 | 11,7 | 44,6 | 0,75 |
| | 5500 | 7,0 | 7,0 | 7,0 | 730 | 21 | 44 | 25,4 | 25,2 | 10,0 | 41,5 | 0,85 |
| | 6000 | 6,8 | 6,4 | 6,4 | 730 | 21 | 39 | 24,4 | 24,3 | 10,4 | 45,9 | 0,76 |
| | 1000 | 6,3 | 6,4 | 6,3 | 730 | 21 | 37 | 3,8 | 3,8 | 1,3 | | |
| | 1500 | 6,7 | 6,8 | 6,7 | 730 | 21 | 41 | 6,5 | 6,4 | 2,4 | | |
| | 2000 | 6,8 | 6,8 | 6,8 | 730 | 21 | 42 | 8,8 | 8,7 | 3,5 | | |
| CHIP ÁLC | 2500 | 7,1 | 7,2 | 7,2 | 730 | 21 | 46 | 12,0 | 12,0 | 4,7 | | |
| ÁLCOOL | 3000 | 7,5 | 7,5 | 7,5 | 730 | 21 | 50 | 15,6 | 15,5 | 5,6 | | |
| PURO | 3500 | 7,5 | 7,5 | 7,5 | 730 | 21 | 50 | 18,2 | 18,1 | 7,4 | | |
| SEGUNDO | 4000 | 7,2 | 7,2 | 7,2 | 730 | 21 | 46 | 19,4 | 19,3 | 8,1 | | |
| CILINDRO | 4500 | 7,0 | 7,1 | 7,1 | 730 | 21 | 45 | 21,1 | 21,0 | 9,5 | | |
| | 5000 | 7,0 | 7,0 | 7,0 | 730 | 21 | 44 | 23,1 | 22,9 | 10,5 | | |
| | 5500 | 7,0 | 6,9 | 6,9 | 730 | 21 | 43 | 25,0 | 24,8 | 10,5 | | |
| | 6000 | 6,5 | 6,5 | 6,6 | 730 | 21 | 39 | 24,4 | 24,3 | 10,4 | | |
| | 1000 | 6,3 | 6,3 | 6,3 | 730 | 23 | 36 | 3,8 | 3,8 | 1,4 | | |
| | 1500 | 6,7 | 6,8 | 6,8 | 730 | 23 | 42 | 6,5 | 6,5 | 2,4 | | |
| | 2000 | 6,7 | 6,8 | 6,8 | 730 | 23 | 42 | 8,7 | 8,7 | 3,5 | | |
| CHIP ÁLC | 2500 | 7,3 | 7,2 | 7,2 | 730 | 23 | 47 | 12,2 | 12,2 | 4,5 | | |
| ÁLCOOL | 3000 | 7,5 | 7,5 | 7,5 | 730 | 23 | 50 | 15,6 | 15,5 | 5,6 | | |
| PURO | 3500 | 7,5 | 7,6 | 7,5 | 730 | 23 | 50 | 18,3 | 18,3 | 7,2 | | |
| TERCEIRO | 4000 | 7,1 | 7,1 | 7,2 | 730 | 23 | 46 | 19,1 | 19,0 | 8,4 | | |
| CILINDRO | 4500 | 7,0 | 6,9 | 7,1 | 730 | 23 | 44 | 20,8 | 20,7 | 9,8 | | |
| | 5000 | 6,9 | 6,9 | 6,9 | 730 | 23 | 43 | 22,5 | 22,4 | 11,0 | | |
| | 5500 | 7,1 | 7,0 | 7,1 | 730 | 23 | 45 | 25,8 | 25,7 | 9,6 | | |
| | 6000 | 6,2 | 6,3 | 6,4 | 730 | 23 | 36 | 22,8 | 22,7 | 12,0 | | |
| | 1000 | 6,3 | 6,3 | 6,2 | 730,0 | 24 | 36 | 3,8 | 3,8 | 1,4 | | |
| | 1500 | 6,7 | 6,7 | 6,8 | 730,0 | 24 | 41 | 6,5 | 6,4 | 2,4 | | |
| | 2000 | 6,7 | 6,7 | 6,8 | 730,0 | 24 | 41 | 8,6 | 8,6 | 3,6 | | |
| CHIP ÁLC | 2500 | 7,1 | 7,1 | 7,1 | 730,0 | 24 | 45 | 11,8 | 11,8 | 4,8 | | |
| ÁLCOOL | 3000 | 7,4 | 7,4 | 7,4 | 730,0 | 24 | 49 | 15,3 | 15,2 | 5,9 | | |
| PURO | 3500 | 7,5 | 7,5 | 7,5 | 730,0 | 24 | 50 | 18,2 | 18,2 | 7,3 | | |
| QUARTO | 4000 | 7,1 | 7,1 | 7,1 | 730,0 | 24 | 45 | 18,9 | 18,9 | 8,5 | | |
| CILINDRO | 4500 | 7,2 | 7,1 | 7,0 | 730,0 | 24 | 45 | 21,3 | 21,3 | 9,2 | | |
| | 5000 | 6,9 | 6,9 | 6,7 | 730,0 | 24 | 42 | 22,1 | 22,1 | 11,4 | | |
| | 5500 | 6,8 | 6,8 | 6,7 | 730,0 | 24 | 42 | 23,9 | 23,8 | 11,4 | | |
| | 6000 | 6,2 | 6,2 | 6,0 | 730,0 | 24 | 34 | 21,7 | 21,6 | 13,1 | | |

# ANEXO J – DADOS PARA DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO INDICADO

| MISTURA | RPM | POTÊNCIA CORRIGIDA ABNT (CV) | CONSUMO ESPECÍF. (g/CV.h) | RENDIM. INDICADO |
|---|---|---|---|---|
| CHIP GAS GAS. COM. 25% | 1000 | 7,3 | 328 | 0,40 |
| | 1500 | 12,0 | 286 | 0,46 |
| | 2000 | 16,1 | 307 | 0,45 |
| | 2500 | 22,5 | 271 | 0,50 |
| | 3000 | 28,4 | 266 | 0,49 |
| | 3500 | 34,4 | 261 | 0,53 |
| | 4000 | 36,6 | 268 | 0,55 |
| | 4500 | 41,6 | 267 | 0,58 |
| | 5000 | 46,0 | 286 | 0,57 |
| | 5500 | 48,3 | 304 | 0,48 |
| | 6000 | 52,7 | 296 | 0,61 |
| CHIP. ÁLC. ÁLCOOL PURO | 1000 | 7,0 | 522 | 0,42 |
| | 1500 | 12,0 | 487 | 0,44 |
| | 2000 | 16,6 | 456 | 0,50 |
| | 2500 | 22,6 | 451 | 0,49 |
| | 3000 | 28,7 | 472 | 0,45 |
| | 3500 | 34,6 | 444 | 0,52 |
| | 4000 | 37,2 | 454 | 0,54 |
| | 4500 | 41,4 | 473 | 0,54 |
| | 5000 | 45,4 | 507 | 0,53 |
| | 5500 | 47,9 | 536 | 0,45 |
| | 6000 | 47,2 | 528 | 0,56 |

# ANEXO K – PROCEDIMENTO PARA CONSTRUÇÃO DO GRÁFICO DA FIGURA 4.6

As porcentagens de AEHC somado ao gasohol são determinadas da seguinte maneira:

Seja a mistura genérica gasohol – AEHC abaixo:

$$(0{,}75 \cdot \text{gasolina} + 0{,}25 \cdot \text{AEAC}) \cdot f + (1 - f) \cdot \text{AEHC} \qquad \text{(AK.01)}$$

em que:

f = fração de gasohol na mistura

Como:

$$\text{AEHC} = 0{,}927 \cdot \text{AEAC} + 0{,}073 \cdot H_2O \qquad \text{(AK.02)}$$

Substituindo-se (AK.02) em (AK.01) e reagrupando-se os termos, têm-se:

$$f \cdot 0{,}75 \cdot \text{gasolina} + (0{,}927 - 0{,}677 \cdot f) \cdot \text{AEAC} + 0{,}073 \cdot H_2O \qquad \text{(AK.03)}$$

Para uma quantidade "x" qualquer de AEAC, tem-se:

$$(0{,}927 - 0{,}677 \cdot f) = x \qquad \text{(AK.03)}$$

Reagrupando os termos têm-se:

$$f = (0{,}927 - x) / 0{,}677 \qquad \text{(AK.04)}$$

Os valores de AEAC (valores de "x") adotados foram: 25%, 35%, 45%, 55%, 65% e 75%. Substituindo-se os valores de AEAC na equação (AK.04) calculam-se os valores do gasohol (f). Assim, o valor de AEHC é obtido por: (1 – f). Os valores de AEHC são mostrados na Tabela AK.01.

A curva da figura 4.6, construída com os triângulos com os vértices para baixo (triângulos em azul) representa misturas com massas de combustível aumentadas de maneira

a manter o mesmo poder calorífico do gasohol (25%). Essa curva foi construída conforme mostrado abaixo:

$$P_{cimistura} = f_{AEHC} \cdot P_{ciAEHC} + (1 - f_{AEHC})P_{cigh} \quad \text{(AK.04)}$$

em que:

$P_{cimistura}$ = poder calorífico da mistura (kcal/kg)

$f_{AEHC}$ = fração de AEHC na mistura

$P_{ciAEHC}$ = poder calorífico inferior do AEHC = 5952 kcal/kg (Tabela 2.6)

$P_{cigh}$ = poder calorífico do gasohol

Como:

$$P_{cigh} = 0{,}75 \cdot P_{cig} + 0{,}25 \cdot P_{ciAEAC} \quad \text{(AK.05)}$$

em que:

$P_{cig}$ = poder calorífico da gasolina = 10500 kcal/kg (Tabela 2.6)

$P_{ciAEAC}$ = poder calorífico do AEAC = 6400 kcal/kg (Tabela 2.6)

Substituindo-se o valor de $P_{cig}$ e $P_{ciAEAC}$ na equação (AK.05) têm-se:

$P_{cigh}$ = 9160 kcal/kg

Substituindo-se o valor acima e os demais valores de poder calorífico na equação (AK.04) e reagrupando-se os termos tem-se:

$$P_{cimistura} = 9160 - f_{AEHC} \cdot 3208 \quad \text{(AK.06)}$$

O valor de f é obtido da equação (AK.04). O valor de $P_{cimistura}$ é então determinado sendo, o aumento da massa da mistura necessária para manter o poder calorífico calculado, em porcentagem, pela divisão do poder calorífico do gasohol a 25% pelo poder calorífico da respectiva mistura. Note que o ponto de início da curva está sobre a ordenada com o valor de 100% que significa que a referência é realizada sobre a mistura de gasohol com 25%. O valor do poder calorífico e do aumento da massa em função da porcentagem de AEHC na mistura são mostrados na Tabela AK.01. Esses valores são utilizados para a construção da curva citada, através do MATLAB.

A curva da figura 4.6, construída com os triângulos com vértices para cima (triângulos em vermelho) representa misturas com massas aumentadas de modo a garantir a queima de todo o combustível através da mistura estequiométrica.

O cálculo da relação A/C para uma mistura genérica de gasohol – AEHC é realizado pela equação (2.25). A relação A/C para misturas de gasohol – AEHC em função da porcentagem de AEHC é mostrada pela Tabela AK.01.

Analogamente à curva anterior, o aumento da massa da mistura necessária para queimar todo o combustível é calculado, em porcentagem, dividindo-se a relação A/C do gasohol a 25% pela relação A/C da respectiva mistura. O valor da relação A/C e o aumento de massa em função da porcentagem de AEHC da mistura são mostrados na Tabela 4.3. Esses valores são utilizados para a construção da curva através do MATLAB.

A curva identificada pelos pontos " * " (pontos em cor verde) é construída a partir do valor do tempo de injeção medido no experimento. O aumento da massa, em porcentagem, é obtido em pela divisão do tempo injeção do gasohol a 25% em relação pelo tempo de injeção da respectiva mistura. Os valores são, também, mostrados na Tabela AK.01 e foram utilizados para a construção da curva através do MATLAB.

**TABELA AK.01 – Aumento de massa em função da porcentagem de álcool total na mistura**

| % ÁLCOOL AEAC | % AEHC | TEMPO INJEÇÃO | PODER CALORÍF. (kcal/kg) | RELAÇÃO A/C |
|---|---|---|---|---|
| 25% | 0% | 2513 (100%) | 9160 (100%) | 14,21 (100%) |
| 35% | 14,8% | 2491 (-0,88%) | 8839 (+7,54%) | 13,81 (+2,90%) |
| 45% | 29,5% | 2607 (+3,46%) | 8518 (+7,54%) | 13,33 (+6,60%) |
| 55% | 44,3% | 2627 (+4,53%) | 8037 (+13,97%) | 12,75 (+11,50%) |
| 65% | 59,1% | 2772 (+10,31%) | 7716 (+18,71%) | 12,02 (+18,21%) |
| 75% | 73,9% | 3052 (+21,45%) | 7396 (+23,85%) | 11,12 (+27,88%) |
| - | 100% | 4331 (+72,34%) | 5952 (+53,90%) | 8,71 (+63,12%) |

# BIBLIOGRAFIA REFERÊNCIADA

ANFAVEA – Associação dos Fabricantes de Veículos Automotores (2003). Anuário estatístico da industria automobilística brasileira. http://www.anfavea.com.br//anuário2003.

ANP – Agência Nacional do Petróleo (2002). Anuário Estatístico. http://www.anp.gov.br/doc/anuario_estatistico.

AMEY, R. G. (1995). Automotive Componente Innovation: Development and Diffusion of Engine Management Tecnologies. Technovation, V.15.

PASSARINI, L. C. (1997). Sistema de Controle. Apostila.

BOSCH (1998). Linha de Injeção e Ignição Eletrônica. São Paulo, ed. Divisão de Autopeças.

BOSCH (1996). Gerenciamento de Motor Motronic. Apostila Técnica.

CELERE, S. W. (1981). Desempenho de motor de ignição por centelha com álcool pré-evaporado. 152 p. Tese (doutorado) EESC, USP.

FERGUSON, C. R. (1986). Internal Combustion Engine: Applied Thermosciences. New York, John Wiley

FIAT AUTOMÓVEIS S.A. (1995). Diagnóstico do Sistema de Injeção/Ignição Eletrônica IWA G 7.11, ed. Assistência Técnica-Comportamento do Produto.

FIAT TECH (1996). Injeção e Ignição Eletrônica. São Paulo, ed. Hexa Comunicação Interativa e Informática Ltda.

FIAT AUTOMÓVEIS S.A. Injeção Eletrônica SPI, ed. Treinamento Assistencial.

FIAT (1985) – Manual de Reparação do Fiat 147. Betim.

FIPE – Fundação Instituto de Pesquisa Econômica/MB ASSOCIADOS (2001). Cenário para o Setor de Açúcar e Álcool. São Paulo.

GEPLACEA – Grupo de Países Latinoanericanos y Del Caribe Exportadores de Azúcar (1999). Projeto para Promoção do Álcool Carburante. São Paulo. Oesp.

HILDEBRAND JR, L. (1998). Análise do Desempenho de um motor do Ciclo Otto com Injeção Direta de Álcool Etílico Hidratado Pré-aquecido. São Carlos. 106p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

JÓVAJ, M. S. (1982). Motores de Automóvil. Moscou, Editorial Mir.

LEÃO, R. M. (2002). Álcool Energia Verde. São Paulo, ed. Iqual-Instituto de Qualificação Editora Ltda.

LEITE, R. C. C. (2002). Energia para o Brasil. Rio de Janeiro, ed. Expressão e Cultura.

MAGNETI MARELLI (1993). Apresentação do Sistema G 7, Assistência Técnica Magnéti Marelli – Weber.

MATHIAS, E.; SHOSHIMA, Y. (1993). Autoadaptatividade na Injeção Eletrônica Digital. SAE Technical Paper Series. /Apresentado ao II Congresso e Exposição Internacionais de Tecnologia da Mobilidade, São Paulo, 1993/

METAL LEVE (1985) – Manual Técnico. 5 ed. São Paulo.

PAGLIUSO, J. D. (1984). Combustíveis e Combustão. São Carlos, ed. Departamento de Engenharia Mecânica, EESC, USP.

PASSARINI, L. C. (1993). Projeto e Análise de Válvulas Eletromagnéticas Injetoras de Combustível: Uma Nova Proposta. São Carlos. XXXp. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

PENIDO FILHO, P. (1991). Os Motores a Combustão Interna. 2. ed. Belo Horizonte, Lemi S.A., v.1.

PENIDO FILHO, P. (1991). Os Motores a Combustão Interna. 2. ed. Belo Horizonte, Lemi S.A.,v.2.

OBERT, E. F. (1968). Internal Combustion Engines 3. ed. Pennsylvania, International Textbook Company.

PUGLIESE, M. (1976). Manual Completo do Automóvel. São Paulo, Livraria Editora Ltda.

RIBBENS, W. B. (1992). Understanding Automotive Electronics. 4. ed. Indiana, Sams.

SZWARC, A. Emissões de Veículos Automotores. Apresentado à Única – União da Agroindústria Canavieira. São Paulo, 1998.

KUHN, T. S. (1998). Estrutura das Revoluções Científicas. São Paulo. Perspectiva

# BIBLIOGRAFA CONSULTADA

DISTEFANO, J. J. et al. (1972). Sistemas de Retroação (realimentação) e Controle. São Paulo. Coleção Schaum. Mac Graw- Hill Ltda.

GARCIA, O. (1998). Motores de combustão interna. São Paulo, DER-SP.

HALLIDAY, D. et al. (1996). Fundamentos de Física. 4. ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. v.1.

OGATA, K. (1998). Engenharia de Controle Moderno. 3. ed. Rio de Janeiro, Prentice-Hall do Brasil Ltda.

VAN WYLEN G. J.; SONNTAG R. E. (1976). Fundamentos da Termodinâmica Clássica, São Paulo. 2. ed. Edgard Blücher Ltda.