

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA  
INDICADA EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA**

Autor: Nerivaldo Rodrigues da Silva  
Orientador: Prof. Dr. Caio Glauco Sánchez

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA TÉRMICA E FLUIDOS**

# **METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA INDICADA EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA**

Autor: Nerivaldo Rodrigues da Silva  
Orientador: Prof. Dr. Caio Glauco Sánchez

Curso: Engenharia Mecânica  
Área de Concentração: Térmica e Fluidos

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2006  
S.P – Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA .ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

Si38m Silva, Nerivaldo Rodrigues da  
Metodologia para determinação da potência indicada  
em motores de combustão interna / Nerivaldo Rodrigues  
da Silva. --Campinas, SP: [s.n.], 2006.

Orientador: Caio Glauco Sánchez  
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Automóveis – Motores - Combustão. 2. Motores  
de combustão interna. 3. Combustão - Medição. 4.  
Motores – Combustão. I. Sánchez, Caio Glauco. II.  
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de  
Engenharia Mecânica. III. Título.

Titulo em Inglês: Method to determinate the indicated power in a internal combustion  
engine

Palavras-chave em Inglês: Indicated power, Combustion pressure, Internal combustion  
engine

Área de concentração: Térmica e Fluídos

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Antonio Moreira dos Santos e Jorge Isaias Llgostera Beltrán

Data da defesa: 06/07/2006

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA TÉRMICA E FLUIDOS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADEMICO**

**METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO  
DA POTÊNCIA INDICADA EM MOTORES  
DE COMBUSTÃO INTERNA**

**Autor: Nerivaldo Rodrigues da Silva  
Orientador: Prof. Dr. Caio Glauco Sánchez**



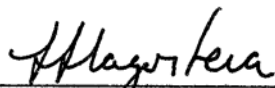
---

**Prof. Dr. Caio Glauco Sánchez, Presidente  
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP**



---

**Prof. Dr. Antônio Moreira dos Santos  
Universidade de São Paulo – EESC - São Carlos**



---

**Prof. Dr. Jorge Isaias Llagostera Beltrán  
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP**

Campinas, 06 de julho de 2006

## **Dedicatória:**

Dedico este trabalho à minha querida esposa, Alda, por ter suportado a minha ausência, me apoiado e incentivado meus estudos.

A minha querida mãe, Bernadete e ao meu pai Genesio “*in memória*” que sempre orientaram o meu caminho.

As minhas irmãs e irmãos, Neide, Nildete, Norma, Naraci, Nilson, Nelson e Nilton, que sempre me apoiaram em todos os momentos da minha vida.

Aos meus filhos, Juliana e Ricardo.

## **Agradecimentos**

Este trabalho não poderia ser terminado sem ajuda de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:

Ao meu orientador Prof<sup>o</sup>. Dr<sup>o</sup>. Caio Glauco Sánchez, pela confiança no meu trabalho.

A todos os professores e colegas do departamento, que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho.

Aos colegas e amigos que de alguma forma me incentivaram na realização deste trabalho.

Ao colega da empresa MAHLE, Sr. Clayton, do departamento de Pesquisa e Desenvolvimento pelos dados fornecidos e ao colega Sr. José Roberto, do Instituto Mauá de Tecnologia, por permitir minha participação nos ensaios de medição da pressão, que sem eles não seria possível dar continuidade ao meu trabalho.

Aos colegas e amigos que de alguma forma me incentivaram na realização deste trabalho.

A Deus, que em todos os momentos da minha vida, ajudou-me para que eu nunca perdesse a coragem na superação dos desafios.

*Aquele que persevera, dá o primeiro passo a caminho do sucesso.*

## Resumo

SILVA, Nerivaldo Rodrigues da, *Metodologia para determinação da Potência Indicada de Motores de Combustão Interna*, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2006, 176 p., Dissertação (Mestrado).

Neste trabalho buscou-se desenvolver um método para a determinação da potência indicada em motores de combustão interna e medição da pressão de combustão com um osciloscópio. Para isto é necessário conhecer a curva de pressão de combustão do cilindro em função da posição angular do virabrequim e os dados da geometria do mecanismo biela-manivela. Utilizou-se a pressão de combustão do cilindro para calcular o trabalho transferido pelo gás ao pistão do motor. A pressão de combustão foi medida com um transdutor de pressão piezoelétrico. O efeito piezoelétrico é devido ao fenômeno que ocorre com o cristal de quartzo que quando submetido a uma pressão gera uma carga elétrica. Essa carga é convertida em um sinal de tensão linear e proporcional. Este sinal pode ser analisado por um osciloscópio ou ser condicionado por um sistema de aquisição de dados. Obtidos os dados, estes foram analisados através dos diagramas Log P-Log v, para verificar sua qualidade e se representavam o fenômeno físico medido. A curva da pressão do cilindro versus volume calculado foram plotadas, gerando os diagramas P-v. A área do diagrama P-v durante o tempo de compressão e expansão, que corresponde ao trabalho indicado líquido, foi determinada por integração numérica. A pressão média indicada calculada foi comparada com o valor obtido com o indicador de pressão Indiset 620 da AVL e apresentou resultado satisfatório. Os demais resultados obtidos foram analisados e comparados com os dados da revisão da literatura e apresentaram uma boa concordância. As tecnologias disponíveis para medição da pressão de combustão e os métodos para avaliação da performance são de maior importância para o estudo do processo da combustão, visando o desenvolvimento de motores com



alta potência, baixo consumo de combustíveis e baixas emissões tóxicas dos gases de escapamento.

*Palavras Chave:* Potência Indicada, Pressão de combustão, Motor de combustão interna.

## Abstract

SILVA, Nerivaldo Rodrigues da, *Metodologia para determinação da Potência Indicada de Motores de Combustão Interna*, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2006, 115 p., Dissertação (Mestrado).

In this thesis, we were looking for a method to determinate the indicated power in a combustion engine and measurement of combustion pressure using an oscilloscope. To achieve that, it was necessary to know the curve of combustion pressure for each cylinder according to the crankshaft 's angular position and geometric data of connecting rod and crank shaft's mechanism. We used the cylinder's combustion pressure to calculate the work transferred by the gas to the engine's piston. The combustion pressure was measured by a piezoelectric pressure transducer. The piezoelectric effect occurs when a crystal of quartz, that under a certain pressure, generates an electrical signal. This signal is converted to a proportional and linear signal that can be analyzed by an oscilloscope or a data acquisition system. Once we obtained the data, we analyzed it thru a Log P-Log v diagram, verifying its quality and if it represents the measured physical effect. The curve of cylinder's pressure versus calculated area was plotted, generating the P-v diagrams. The diagram P-v area, during a certain time of compression and expansion, which correspond to the work indicated, was originated of a numerical integration. The indicated and calculated average pressure was compared to the value obtained from an AVL's Indiset 620 pressure indicator, showing satisfactory results. All the other results obtained were analyzed and compared to literature's revision data showing a good concordance. The available technologies to measure the combustion pressure and the methods to check performance, are very important to study the combustion process, aiming the development of higher power engines, lower consumption of fuel and lower toxic gas emission.

Key words:

Indicated power, Combustion pressure, Internal combustion engine

## Índice

Lista de Figuras	i
Lista de Tabelas	ii
Nomenclatura	iii
Capítulo 1 Introdução	1
Capítulo 2 Revisão da Literatura	8
Capítulo 3 Metodologia Experimental	92
Capítulo 4 Resultados e Discussões	103
Capítulo 5 Conclusões e Sugestões para próximos trabalhos Referências Bibliográficas	117
Referencias Bibliográficas	119
Anexo 1	122
Anexo 2	130
Apêndice A	138
Apêndice B	143

## Lista de Figuras

1.1	Variação da pressão em função do ângulo de ignição	04
1.2	Componentes básicos de um indicador eletrônico	05
2.1	Geometria do cilindro, pistão, biela e eixo de manivelas	10
2.2	Ciclo Otto e Diagrama indicador p-V	13
2.3	Exemplos de diagramas p-V	14
2.4	Princípio de funcionamento do dinamômetro	16
2.5	Enchimento de gás fresco em função da abertura da borboleta	21
2.6	Potencia, consumo de ar e emissões veiculares em função de $\lambda$	22
2.7	Curva de pressão de combustão com pontos de ignição e coeficiente $\lambda$	24
2.8	Sistema de injeção indireta e sistema de injeção direta	25
2.9	Diagrama de bloco do sistema de gerenciamento ME-Motronic da Bosch	27
2.10	Esquema de funcionamento da Regulagem Lambda	31
2.11	Aparelho indicador Maihak	33
2.12	Principais componentes do Encoder	36
2.13	Diagrama funcional do Encoder AVL 364	38
2.14	Certificado de calibração do sensor AVL GM11D	43
2.15	Seção transversal de sensor refrigerado	46
2.16	Sensor Piezoresistivo com Ponte de Wheatstone	46
2.17	Instalação do sensor miniatura tipo 6051 com luva adaptadora	47
2.18	Vela de ignição de medição tipo 6117 com conector isolado	48
2.19	Sensibilidade térmica do sensor não refrigerado do tipo 6125	48
2.20	Sensor com vedação frontal	49
2.21	Sensor com vedação intermediária	49

2.22	Gráfico definindo a sensibilidade e a linearidade.	52
2.23	Diagrama funcional do amplificador AVL	56
2.24	Diagrama elétrico do transdutor com o amplificador de pressão	57
2.25	Normalização da média de pressão versus o número de ciclos	63
2.26	Normalização da média da IMEP versus o número de ciclos	64
2.27	Pressão de compressão versus posição angular do virabrequim	65
2.28	Diagrama da pressão versus volume com motor acionado	66
2.29	Diagrama log p-log V corretamente faseado e referenciado	67
2.30	Diagrama obtido com os dados da figura 2.29 com 20 libras a menos	68
2.31	Mesmos dados da figura 2.30 com o volume reduzido em 14 %	69
2.32	Diagrama gerado com os dados da figura 2.30 com defasagem de 20 CA	70
2.33	Efeito da constante de tempo no diagrama log p-logV	71
2.34	Diagrama pressão-volume do motor com combustão	72
2.35	Diagrama log p-logV do motor com combustão	72
2.36	Dados de um mesmo cilindro usando diferentes tipos de sensores	73
2.37	Diferença no sinal do sensor devido ao “short term drift”	75
2.38	Erro do IMEP devido ao “short term drift”	75
2.39	Variação da IMEP próximo a região de detonação	76
2.40	Taxa de liberação de calor calculada com diferentes “short term drift”	77
2.41	Diagrama log p-logV de sensores com baixo e elevado “short term drift”	77
2.42	Mesma curva da pressão com filtro de 180 kHz e de 10 kHz	78
2.43	Curva da pressão com filtro de 180 kHz e 1 kHz, defasagem de 4,5 oCA	79
2.44	Erro no IMEP em função do erro na calibração	81
2.45	Curva de pressão com sensor com erro na calibração	82
2.46	Espectro das freqüências com diferentes constantes de tempo.	85
2.47	Erro do IMEP em função da resolução do ângulo do virabrequim	87
2.48	Erro do IMEP em função do erro do PMS	87
3.1	Vista traseira do motor instrumentado para os ensaios	93
3.2	Transdutor de pressão piezelétrico Kistler 6001 e torquímetro	94
3.3	Amplificador piezelétrico marca Kistler modelo 5011	95

3.4	Sincronismo entre o sinal do “trigger” e o sinal da posição angular	98
3.5	“Encoder” instalado no motor	98
3.6	Osciloscópio HP 54645D	99
3.7	Sistema de medição de pressão Indiset 620 da AVL	102
4.1	Exemplo do gráfico gerado pelo osciloscópio com a média de 32 ciclos	104
4.2	Curva do volume do cilindro em função da posição angular	108
4.3	Curva de pressão do cilindro 50 ciclos medidos	109
4.4	Diagramas log p-log V motor operando a 100% de carga	113
4.5	Diagramas p-V do motor funcionando a 5250, 5500, 5750 e 6000 RPM	115

## Lista de Tabelas

2.1	Resolução do Multiplicador de Pulso AVL 3064A2	35
2.2	Sistema da Constante de tempo do Amplificador Kistler modelo 504M 115	58
2.3	Influência do filtro no IMEP	79
2.4	Resolução digital	88
3.1	Especificações do motor 4.07 TCA	93
3.2	Especificações do transdutor de pressão Kistler 6001	95
3.3	Especificações técnicas do amplificador piezelétrico Kistler modelo 5011	96
3.4	Parâmetros de entrada do amplificador piezelétrico	96
3.5	Especificações do modo de aquisição do osciloscópio	99
3.6	Dados da geometria do motor	101
3.7	Especificações do transdutor de pressão Kistler modelo 6125 b	101
3.8	Especificações do Indiset 620 da AVL	102
4.1	Pressão de combustão medida no Laboratório de Pesquisa Mauá	105
4.2	Exemplo de dados de tensão medidos com Indiset	107
4.3	Exemplo de volumes calculados	108
4.4	Exemplo de dados de pressão medidos com Indiset	111
4.5	Resultado da análise estatística dos dados	112
4.6	Valores calculados do coeficiente politrópico	113
4.7	Resultado dos cálculos termodinâmicos	114

## Nomenclatura

### Letras Latinas

rc	Taxa de compressão	
V	Volume	cm <sup>3</sup>
Vd	Volume deslocado	cm <sup>3</sup>
Vc	Volume da câmara de combustão	cm <sup>3</sup>
PMS	Ponto morto superior	
PMI	Ponto morto inferior	
Rbs	Relação entre o diâmetro do cilindro e curso do pistão	
R	Relação entre o comprimento da biela e o raio do eixo de manivelas	
a	Raio do eixo de manivelas	mm
L	Curso do pistão	mm
B	Diâmetro do cilindro	mm
b	Comprimento do braço do freio	
s	Distância entre o centro do virabrequim e o pino do pistão	mm
a	Raio do virabrequim	mm
l	Comprimento da biela do centro do pino ao centro do mancal	mm
W	Trabalho	joule
P	Potência	W
T	Torque	Nm
p	Pressão	bar
$\eta$	Rendimento	%



N	Rotação do virabrequim	rev/seg
F	Força	N
$W_{c,in}$	Trabalho indicado bruto por ciclo	joule
$W_{c,ig}$	Trabalho indicado líquido por ciclo	joule
$n_R$	Numero de voltas do eixo de manivelas para um ciclo de trabalho	
m	Sensibilidade do sensor	pC/bar
a	Linearidade do sensor	%
Q	Carga elétrica	pC
K	Constante de conversão	pC/bar
VS	Tensão na saída do amplificador piezoelétrico	volt
CS	Capacitância do transdutor	pF
IMEP	Pressão média indicada	bar
MEP	Pressão média efetiva	bar
Sfc	Consumo específico	g/kwh
$\dot{m}_f$	Vazão em massa	

### Letras Gregas

$\varnothing, \alpha$	Ângulo do virabrequim
$\lambda$	Coefficiente de ar, relação Lambda.

### Subscritos

b	bombeamento,
f	atrito

### Abreviações

IVC	Abertura da válvula de admissão
IVO	Fechamento da válvula de admissão
EVO	Abertura da válvula de escape

EVC            Fechamento da válvula de escape

**Siglas**

DETF	Departamento de Engenharia Térmica e Fluidos
ASTM	Associação Americana de Teste de Materiais
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
SAE	Sociedade dos Engenheiros Automotivos
EGAS	Comando Eletrônico de Enchimento do Motor
AVL	AVL LIST GMBH
MAN & BW	MAN B&W Diesel A/S
ME – Motronic	Sistema de Gerenciamento Eletrônico do Motor
CDM	Trilha com 360 pulsos do encoder
ADC	Conversor Analógico Digital
FS	Fundo de escala

# Capítulo 1

## Introdução

O motor Otto é um motor a combustão interna com ignição por centelha, que transforma a energia contida no combustível em energia mecânica. Uma ignição externa com comando por tempo induz a combustão da mistura através da vela de ignição. O calor liberado pela combustão aumenta a pressão no cilindro. O pistão move-se para baixo transmitindo através da biela o trabalho mecânico para o virabrequim.

A potência indicada bruta, determinada teoricamente através do diagrama p-V, é resultante do trabalho transferido pelo gás ao pistão e corresponde à soma da potência efetiva, que é medida no flange do virabrequim, mais a potência de atrito e a potência de bombeamento dos gases no cilindro. O trabalho realizado pelo cilindro é numericamente igual ao valor da área do diagrama p-V.

Mudanças na ignição, tempo de injeção de combustível, falhas na pulverização do combustível, desgastes progressivos nos anéis de segmento e válvulas poderão ser diagnosticadas através dos diagramas.

## Justificativa

A combustão do motor tem sido objeto de muitos estudos há algum tempo e várias técnicas têm sido desenvolvidas para esse analisar o processo. A pressão do cilindro do motor é uma variável necessária para análise da combustão interna, sendo esta reconhecida e evidenciada pela literatura.

Para o desenvolvimento de motores com alta performance estudos do ciclo termodinâmico através da curva de pressão são de fundamental importância para a otimização do processo de combustão. Dentre esses estudos destacamos a taxa de liberação de energia, a velocidade da frente da chama, a fração de massa queimada e o cálculo da potência indicada.

O conhecimento detalhado da forma com que a energia devido à combustão é liberada permite conhecer parâmetros fundamentais para o desenvolvimento de motores com baixa emissão de poluentes. Os resultados desses estudos permitem verificar se a taxa de queima é adequada para um motor operando com determinado combustível, se a combustão se inicia e termina no instante desejado, se o ponto de ignição é o ideal e se a temperatura média dos gases de escapamento está dentro dos limites aceitáveis.

O ponto da ignição é um dos principais parâmetros que influenciam na pressão de combustão e depende principalmente de fatores como rotação e carga do motor. A dependência da rotação explica-se pelo fato de que quando o enchimento e a relação de ar-combustível são constantes o tempo de queima da mistura também é constante e, por isso, é necessário que a ignição ocorra cada vez mais adiantada, proporcionalmente ao aumento da rotação. A dependência a carga é influenciada pela diluição da carga, pelo teor de resíduo da combustão e pelo baixo preenchimento do cilindro. Esses efeitos provocam maior atraso da ignição e menor velocidade de queima da mistura, de modo que será necessário adiantar o ângulo de ignição (Bosch, 1999).

O ângulo de ignição  $P$  ou o ponto de ignição, respectivamente, exercem importante influência sobre os índices de emissões de poluentes do gás de escapamento, o torque e o consumo de combustível do motor Otto. Os componentes tóxicos mais importantes do gás de escape são os hidrocarbonetos não queimados (HC), o óxido de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ) e o monóxido de carbono (CO). A causa da emissão do ( $\text{NO}_x$ ) é a temperatura mais elevada na câmara de combustão devido à ignição adiantada. A emissão de CO é praticamente independente do ponto de ignição, sendo uma função exclusiva da relação ar-combustível (Bosch, 1999).

A influência do ponto de ignição sobre o consumo de combustível se opõe à influência sobre a emissão de poluentes. Com o aumento do coeficiente de ar é necessário compensar a velocidade cada vez menor da combustão com um adiantamento cada vez maior da ignição, para que o processo de combustão permaneça ótimo. Ponto de ignição adiantado significa menor consumo de combustível e maior torque, mas somente mediante respectiva alteração (correção) da mistura de ar-combustível (Bosch, 1999).

Existe uma outra relação importante entre o ponto de ignição e a tendência à detonação. Isso fica demonstrado no efeito de um ângulo de ignição muito adiantado ou muito atrasado (em comparação com o ângulo de ignição correto) sobre a pressão na câmara de combustão. Quando o ângulo de ignição está muito adiantado ocorre a formação de frentes de chama adicionais em diversos pontos da câmara de combustão provocando ondas de pressão da combustão. Em função disso a queima da mistura é irregular, provocando fortes oscilações de pressão com altos picos na pressão de combustão.

Esse efeito, chamado de detonação ou “batida de pinos”, pode ser ouvido nitidamente em baixa rotação. Em alta rotação o ruído é superado pelo barulho do motor. Mas é exatamente nessa condição que a detonação pode provocar danos, sendo necessário proceder a adequada otimização entre combustível e ponto de ignição (Bosch, 1999). A figura 1.2 apresenta a variação da pressão em função do ângulo de ignição, onde  $P_a$  é o ponto ideal,  $P_b$  o ponto adiantado e  $P_c$  o ponto atrasado.

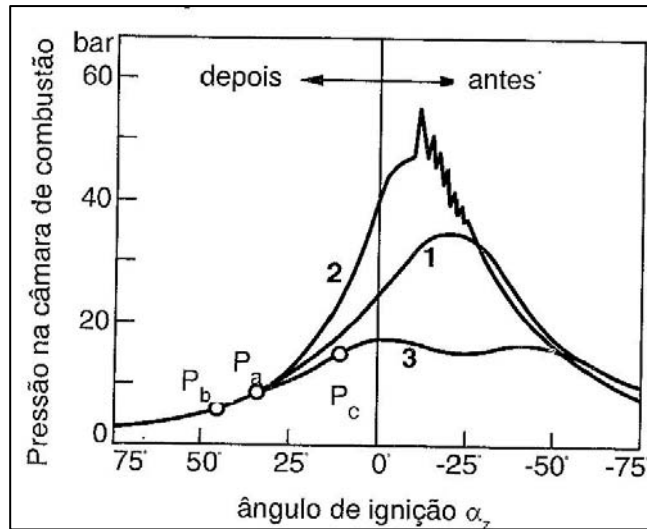


Figura 1.1 - Variação da pressão em função do ângulo de ignição

Em virtude dos argumentos apresentados, fica evidente a importância do levantamento da curva de pressão em função da posição angular do virabrequim e sua aplicação na avaliação de desempenho e no desenvolvimento de motores de combustão interna com alta performance, baixos níveis de consumo e emissões de poluentes.

Os métodos mais antigos para análise da combustão eram a observação do processo de propagação da chama usando-se uma máquina fotográfica de alta velocidade, através de um visor na câmara de combustão e o monitoramento da passagem da frente da chama com o uso de um detector de ionização. Após 1930, a ferramenta mais utilizada para o estudo da combustão foi um indicador de pressão de cilindro que utilizava um tubo de raios catódicos, o qual foi posteriormente substituído pelo indicador mecânico com mola. O indicador mecânico com mola e planímetro utilizado para medição da área do diagrama p-V podem ser vistos no Anexo 1. Desde que foi possível medir a pressão no interior dos cilindros de motores de combustão interna e levantar a curva de pressão em função de tempo ou posição angular do virabrequim através do indicador de pressão, tal curva passou a ser a principal ferramenta para análise do processo de combustão.

Atualmente existem equipamentos computadorizados específicos para análise da combustão. Esses equipamentos substituem o indicador mecânico, o planímetro e os cálculos

manuais para determinação da pressão média indicada e potência indicada. Os dados medidos são transferidos para um computador que avalia, executa os cálculos e gera os diagramas p-V e p- $\alpha$ . No apêndice A podem ser vistos 2 equipamentos computadorizados para análise da combustão: o “PMI SYSTEM Pressure Analyzer” da “MAN & BW” e o “INDISET” 6320 da “AVL”.

Outra opção mais econômica e de arquitetura aberta, utilizada pela maioria dos cientistas e engenheiros, é desenvolver o seu próprio indicador de pressão.

O indicador eletrônico descreve a variação da pressão no interior do cilindro em função do volume da câmara, com alta resolução e com capacidade de armazenar grande quantidade de dados com alta velocidade de aquisição. A figura 1.1 apresenta os componentes básicos de um indicador eletrônico de arquitetura aberta.

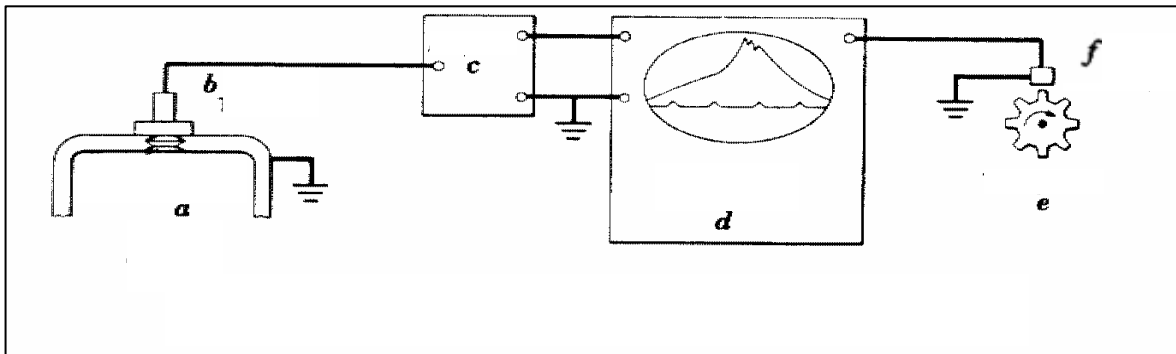


Figura 1.2 – Componentes básicos de um indicador eletrônico

- a) Cilindro
- b) Transdutor de pressão instalado na câmara de combustão.
- c) Unidade de aquisição para amplificar e integrar os sinais.
- d) Display (osciloscópio ou registrador gráfico).
- e) Engrenagem.
- f) Sensor magnético de pulso.

Um transdutor de pressão piezelétrico de cristal de quartzo é rosqueado na câmara de combustão do motor. Quando a pressão do cilindro é aumentada o cristal comprimido gera uma

diferença de potencial elétrico proporcional à pressão aplicada. Um sistema de aquisição de dados faz a aquisição simultânea dos sinais da pressão da câmara de combustão e do ângulo de posição do eixo de manivelas. Conhecendo-se a geometria do sistema biela-manivela calcula-se para cada posição angular do eixo de manivelas o volume do cilindro. O diagrama p-V será gerado com plotagem da curva de pressão e da curva de volume do cilindro.



## **Objetivo**

O objetivo deste trabalho é o estudo da metodologia para determinar a potência indicada nos motores de combustão interna e a análise do desempenho de motores de combustão interna através do diagrama indicado de pressão.

No capítulo 2 é apresentada a revisão da literatura abordando a geometria e as propriedades dos motores, o indicador eletrônico, o sistema de aquisição de dados, a metodologia para análise dos dados, a determinação da pressão média indicada, os parâmetros influentes gerados na indicação da pressão.

No capítulo 3 é apresentada a metodologia experimental utilizada para medição da pressão e geração dos diagramas e dos cálculos termodinâmicos.

No capítulo 4 são apresentados os resultados e sua análise.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões e recomendações para outros trabalhos.

## Capítulo 2

### Revisão da Literatura

Motores de combustão interna são desenvolvidos para diferentes aplicações, requerendo testes específicos para se determinar sua performance. Testes-padrão são normalizados por Associações de engenharia como a Society of Automotive Engineers (SAE), a American Societies of Mechanical Engineers (ASME), a American Society of Testing Materials (ASTM) e a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Os testes típicos contêm informações dos parâmetros de performance indicadas e ou efetivas, do consumo de combustível e de emissões dos gases de escapamento. Em função do tipo, do tamanho, da carga e da rotação do motor, além do combustível e da legislação ambiental os testes necessitam dados mais complexos e precisos. Programas de pesquisa e desenvolvimento de novos produtos envolvem medições de vários parâmetros como taxa ar / combustível, pressão do cilindro, potência, rotação e concentração das emissões do gás de escapamento.

Os dois principais alvos atuais no desenvolvimento de motores de combustão são a melhoria da economia de combustível e a redução de emissões, incluindo o CO<sub>2</sub>, que contribui com o chamado efeito estufa.

Para analisar as razões do bom ou do mau desempenho de um motor é necessário olhar para o cilindro do mesmo, pois é lá que originam a potência e as emissões. Para isso a medição da pressão na câmara durante a combustão e a troca do gás do cilindro é o meio mais adequado. Atualmente, mais de 1/3 de todas as medições do motor são executadas com o equipamento chamado de *indicador de pressão*, o qual é formado por um sensor de pressão instalado no

cilindro e por instrumentos para processamento dos dados. A principal aplicação do indicador de pressão é a análise do ciclo termodinâmico e o monitoramento visual da pressão do cilindro (Kuratle, 1995).

Análise do ciclo termodinâmico.

- Determinação da eficiência indicada e mecânica.
- Determinação do melhor ponto para ignição ou para injeção de combustível.
- Análise da troca dos gases, incluindo a medição da pressão do coletor de admissão e do escapamento.
- Análise da taxa de liberação do calor.
- Determinação da carga mecânica e térmica do motor.
- Ruído da combustão
- Flutuações cíclicas da combustão.
- Flutuações da pressão de combustão entre os cilindros.

Monitoramento puramente visual da pressão do cilindro.

- Efetuar o ajuste grosseiro do ponto inicial da ignição ou da injeção de combustível.
- Detecção de detonação.
- Verificação do pico de pressão e o do perfil aproximado da curva de pressão.
- Comparações entre os valores de pressão dos diferentes cilindros.

Os indicadores de pressão normalmente utilizados para análise de performance de motores geram diagramas P-V( pressão-volume) e P- $\alpha$  (pressão-ângulo do virabrequim). Motores com baixa rotação utilizam indicadores com mola e pistão, enquanto os transdutores de pressão são utilizados nos motores de alta rotação. O volume de ar consumido pode ser medido através de um reservatório com placa de orifício e a massa de combustível através de uma balança. A rotação é monitorada utilizando-se tacômetro e sensores magnéticos. A potência fornecida é absorvida por dinamômetros.

A configuração padrão para a medição da pressão do cilindro é constituída dos seguintes instrumentos:

- sensores de pressão piezelétricos para alta temperatura

- cabos com alta isolamento
- amplificadores da carga
- sensor de posição angular do virabrequim
- conversor analógico digital
- dispositivo com alta velocidade de processamento de dados para a análise e a exposição do sinal.

A exatidão dos resultados depende da precisão de cada componente e da análise correta do sinal gerado pelo sistema (Kuratle,1995).

## 2.1 Geometria e propriedades dos motores de combustão interna.

As propriedades dos motores de combustão são definidas através de parâmetros básicos e da geometria do motor. Os parâmetros básicos são definidos através da geometria do cilindro, pistão, biela e eixo de manivelas, conforme a figura 2.1 (Heywood, 1988).

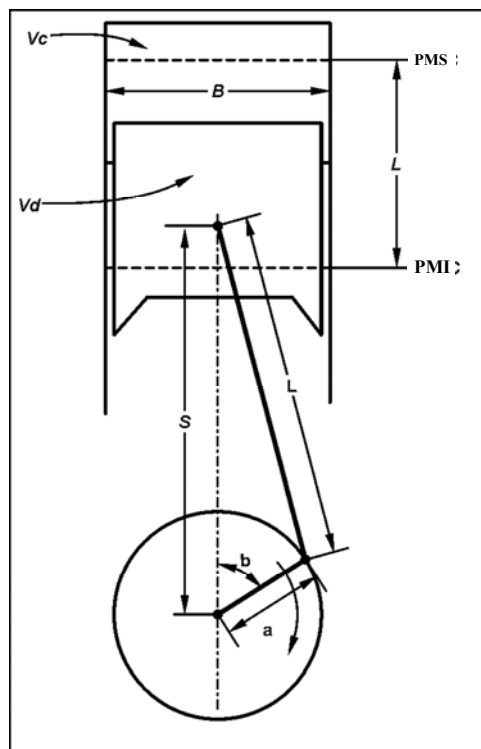


Figura 2.1 - Geometria do cilindro, pistão, biela e eixo de manivelas.

Taxa de Compressão:

$$r_c = \frac{\text{volume máximo do cilindro}}{\text{volume mínimo do cilindro}} = \frac{V_d + V_c}{V_c} \quad (2.1)$$

Onde  $V_d$  é o volume do ponto morto superior PMS até o ponto morto inferior PMI e  $V_c$  é o volume da câmara de combustão.

Relação entre o diâmetro do cilindro e o curso do pistão:

$$R_{bs} = \frac{B}{L} \quad (2.2)$$

Relação entre o comprimento da biela e o raio do eixo de manivelas.

$$R = \frac{l}{a} \quad (2.3)$$

Relação entre o curso do Pistão e o raio do eixo de manivelas

$$L = 2a \quad (2.4)$$

Volume do cilindro em qualquer posição angular ( $\theta$ ) do eixo de manivelas.

$$V = V_c + \frac{\pi B^2}{4} (l + a - s) \quad (2.5)$$

Onde a distância ( $s$ ) entre eixo de manivelas e o pino do pistão é determinada por:

$$s = a \cos \theta + (l^2 - a^2 \sin^2 \theta)^{\frac{1}{2}} \quad (2.6)$$

Substituindo ( $s$ ) na equação 2.5 e reorganizando os membros, obtemos o volume em qualquer posição ( $\theta$ ).

$$\frac{V}{V_c} = 1 + \frac{1}{2}(r_c - 1) \left[ R + 1 - \cos \theta - (R^2 - \sin^2 \theta)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (2.7)$$

## 2.2 Ciclo Otto e diagrama p-V (pressão-volume).

Os motores de combustão por faísca mais conhecidos são os de quatro tempos. Recebem esse nome porque seu ciclo pode ser dividido em quatro tempos:

1º tempo: admissão. O pistão desloca-se para baixo. Abrindo-se a válvula de admissão é aspirada uma mistura de ar mais combustível.

2º tempo: compressão. O pistão desloca-se para cima, comprimindo a mistura.

3º tempo: expansão. Entre os eletrodos de uma vela salta uma faísca que inicia a combustão, que se propaga com grande velocidade. A combustão transforma a energia química da mistura em calor sensível, aumentando a energia interna dos gases e elevando sua temperatura e pressão. A pressão exercida sobre o êmbolo o desloca para baixo, desenvolvendo trabalho, único tempo motor.

4º tempo: escapamento. O pistão se desloca para cima e abre-se a válvula de escapamento. Pelo fato dos gases estarem em pressão maior que a atmosfera e pelo movimento do pistão, os gases são expulsos do cilindro.

Este ciclo foi imaginado por Beau de Rochas em 1862 e posto em execução por Nikolaus Otto em 1876, recebendo seu nome. (Alfred e Francisco, 1960).

A análise termodinâmica do ciclo utiliza o diagrama p-V (pressão-volume) para visualizar a energia transferida pelo motor. Uma análise básica da energia, da pressão máxima de combustão, do trabalho realizado e da eficiência térmica pode ser obtida através do diagrama p-V. O diagrama indicador fig.2.2 para o ciclo Otto pode ser obtido experimentalmente através da medição direta da pressão e do volume do cilindro do motor com instrumento mecânico ou eletrônico (Keating, 1993).

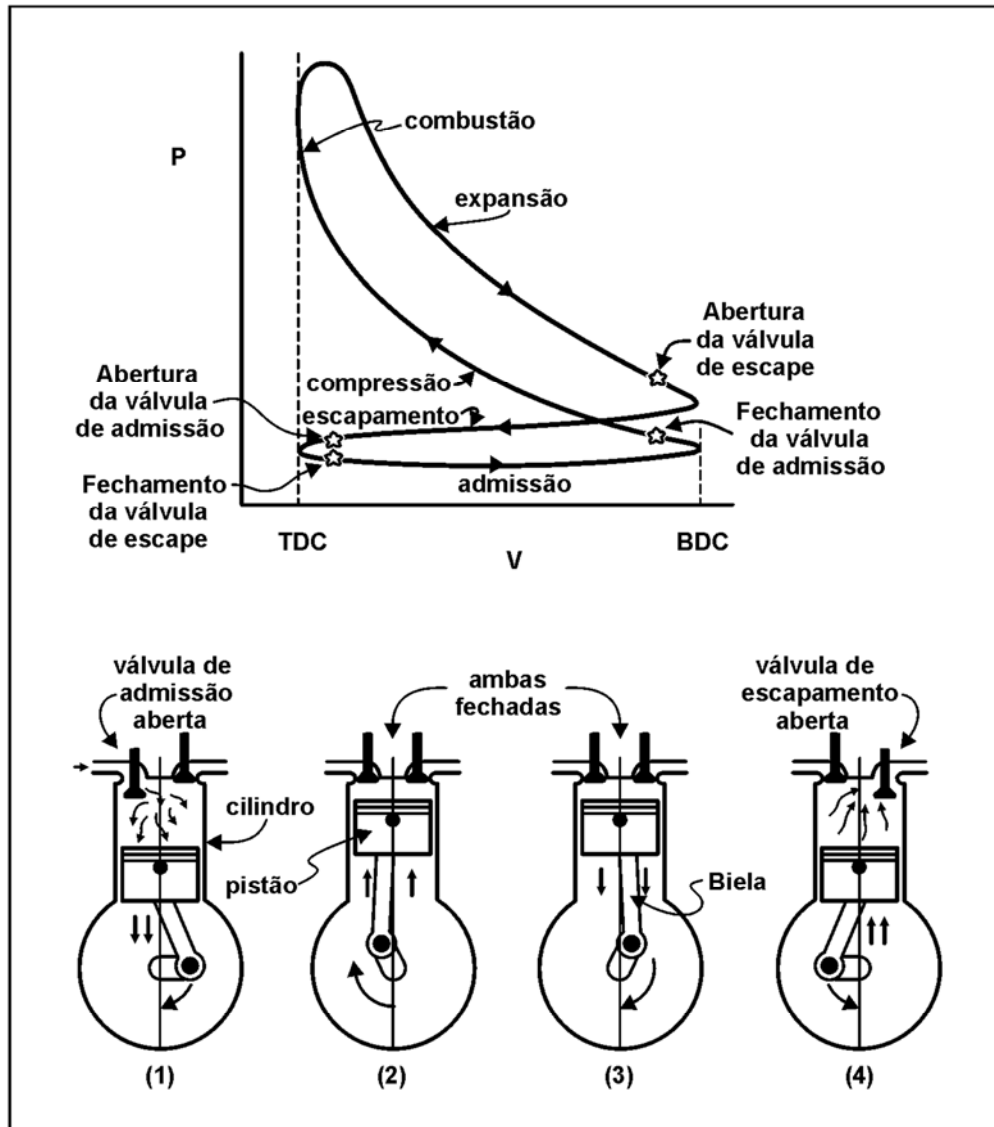


Figura 2.2 - Ciclo Otto e Diagrama indicador p-V

### 2.3 Potência indicada.

A pressão de combustão dentro do cilindro pode ser utilizada para calcular o trabalho transferido do gás para o pistão. A pressão do cilindro e seu respectivo volume são plotados gerando o diagrama p-V, fig. 2.3. O trabalho indicado por ciclo é numericamente igual à área obtida com a integração da curva do diagrama através da equação 2.8. O termo *indicado* é devido ao nome do instrumento utilizado para obter os diagramas: aparelho indicador.

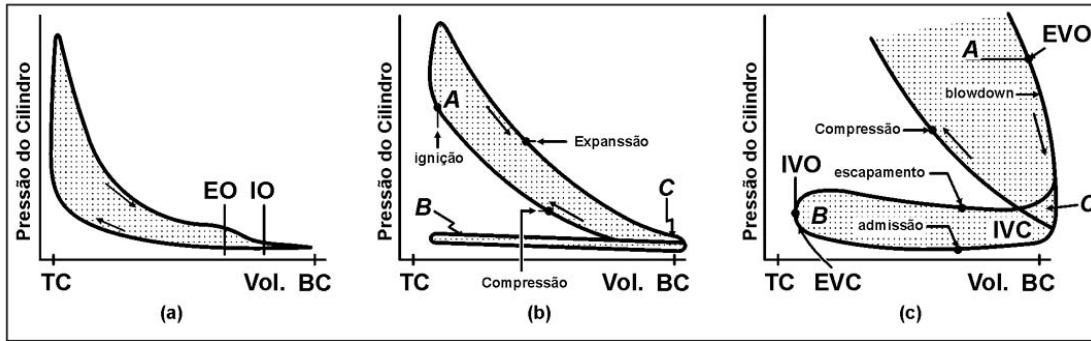


Figura 2.3 - Exemplos de diagramas p-V: (a) motor de 2 tempos; (b) motor de 4 tempos; (c) tempos de admissão e escapamento do motor de 4 tempos ciclo Otto.

$$W_{c,i} = \oint p dV \quad (2.8)$$

Para os motores de 2 tempos a utilização da Equação 2.8 é imediata. No motor de 4 tempos existem duas definições de Potência Indicada, devido à parte do trabalho gerado pela combustão ser utilizado no enchimento do cilindro com ar-combustível e na remoção do gás de escapamento.

Na figura 2.3c o trabalho indicado bruto por ciclo  $w_{c,ig}$  é o trabalho fornecido ao pistão unicamente nos tempos de compressão e expansão, correspondendo à área A + área C. O trabalho indicado líquido por ciclo  $w_{c,in}$  é o trabalho fornecido pelo pistão, correspondendo à área A - área B. O trabalho bruto menos o trabalho líquido, que corresponde à Área B + Área C, é o trabalho utilizado para o bombeamento do ar de admissão e do gás de escapamento.

A potência indicada é resultante do trabalho transferido pelo gás ao pistão. É diferente da potência efetiva disponível no flange de acoplamento do eixo do virabrequim pois inclui a potência de atrito dos componentes móveis e a de acionamento dos acessórios do motor. A potência indicada bruta corresponde à soma da potência efetiva mais a potência de atrito e a potência de bombeamento dos gases. “A potência indicada bruta é a melhor definição, pois é a soma da potência útil no eixo mais a potência perdida durante o funcionamento do motor” (Heywood, 1988).



A pressão média indicada (IMEP) é obtida com a divisão do trabalho líquido por ciclo pelo volume de deslocamento do cilindro, por integração numérica, através da equação 2.8 (Nagashima, 2002).

$$IMEP = \frac{1}{V_d} \sum_{j=0}^{n-1} \left( \frac{P_{j+1} + P_j}{2} \right) (V_{j+1} - V_j) \quad (2.9)$$

Onde:

$V_d$  = volume de deslocamento

$P_j$  = pressão de combustão medida

$V_j$  = volume do cilindro

$n$  = número de pressões medidas

A potência indicada por ciclo é calculada através da fórmula:

$$P_i = \frac{W_{c,in} N}{n_R} \quad (2.10)$$

Onde:  $n_R$  é o número de voltas do eixo de manivelas para um ciclo de trabalho de um cilindro,  $N$  é rotação do motor. Para o motor de quatro tempos,  $n_R=2$ ; para o motor de 2 tempos,  $n_R=1$ .

## 2.4 Potência efetiva e torque

Potência efetiva, diferentemente da indicada, não pode ser obtida teoricamente, necessita ser medida. O torque do motor é normalmente medido com um dinamômetro, podendo ser eletromagnético, hidráulico ou mecânico. O motor é fixado num banco de testes e seu eixo conectado ao rotor do dinamômetro. O estator é suportado por rolamentos para redução do atrito e tende a ser girado pelo rotor quando este gira. O torque exercido pelo rotor provoca um movimento no estator, o qual é medido através de uma alavanca de força de comprimento conhecido e um instrumento indicador (célula de carga).

Usando a notação da fig.2-4, o torque exercido pelo motor é determinado por:

$$T = Fb \quad (2.11)$$

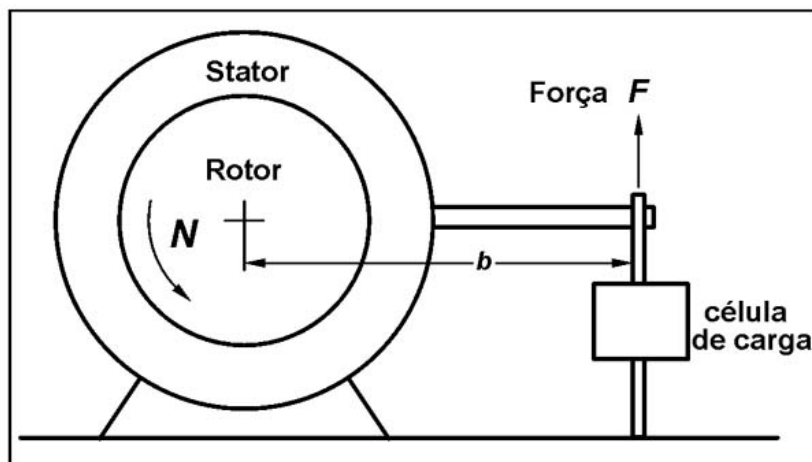


Figura 2.4 - Princípio de funcionamento do dinamômetro.

A potência  $P$  fornecida pelo motor e absorvida pelo dinamômetro é o produto do torque pela velocidade angular:

$$P = 2\pi NT \quad (2.12)$$

O valor da potência medido é a potência útil fornecida pelo motor e absorvida pela carga, neste caso o dinamômetro, chamada de  $P_b$  “*brake power*”. Devido às perdas de energia térmica e mecânica, a potência efetiva será menor que a potência indicada (Heywood, 1988).

## 2.5 Eficiência mecânica.

A potência indicada bruta ( $P_{ig}$ ) é a soma da potência de bombeamento ( $P_b$ ), usada para o bombeamento do ar de admissão e na expulsão do gás de escapamento, mais a potência de atrito ( $P_f$ ). A potência de atrito é utilizada para vencer o atrito resistente dos mancais, dos pistões, de outros componentes mecânicos do motor e acionar os acessórios.

$$P_{ig} = P_b + P_f \quad (2.13)$$

A potência de atrito é difícil de ser determinada com precisão. Um método comum utilizado para motores de alta rotação é o acionamento do motor sem ignição por um dinamômetro, que pode ser convertido para motor elétrico, onde a potência fornecida é medida pelo dinamômetro para vencer os atritos resistentes ao movimento. A rotação, a posição da borboleta de aceleração, a temperatura do óleo, a água de arrefecimento e as condições ambientais são as mesmas de quando o motor é testado com ignição. A maior causa da imprecisão deste método se deve ao fato das forças e temperaturas geradas durante o ensaio serem inferiores às da combustão (Heywood, 1988).

A razão entre a potência efetiva e a potência indicada é chamada de eficiência mecânica  $\eta_m$ :

$$\eta_m = \frac{P_b}{P_{ig}} = 1 - \frac{P_f}{P_{ig}} \quad (2.14)$$

## 2.6 Pressão média efetiva.

Um útil indicador de performance é obtido indiretamente dividindo-se o trabalho realizado no ciclo pelo volume de deslocamento do cilindro. Este indicador específico é chamado de pressão média efetiva MEP. (Heywood, 1988). O trabalho é obtido através da equação 2.15 e a MEP através da equação 2.16.

$$\text{Trabalho por ciclo} = \frac{P n_R}{N} \quad (2.15)$$

Onde  $n_R$  é o número de rotações do eixo de manivelas por ciclo de cada cilindro do motor, (2 para motores de 4 tempos e 1 para motores de 2 tempos), N é a rotação do motor e P a potência efetiva, então:

$$\text{MEP} = \frac{Pn_R \times 10^3}{V_d N} \quad (2.16)$$

## 2.7 Consumo específico de combustível e eficiência.

Nos testes de motor a taxa de consumo é medida pela vazão em massa dividida pelo tempo  $\dot{m}f$ . O parâmetro mais útil é o consumo específico (sfc), que é a vazão em massa dividida pela potência, indicando sua eficiência em converter a energia do combustível em trabalho.

$$sfc = \frac{\dot{m}f}{P} \quad (2.17)$$

## 2.8 Gerenciamento eletrônico ME-Motronic Bosch

A principal função do gerenciamento de motor é ajustar o torque do motor em função da necessidade do condutor, com o melhor consumo de combustível possível e com a mínima emissão de poluentes. O sistema de gerenciamento do motor ajusta o ar necessário para produção do torque, a respectiva massa de combustível e o ponto de ignição.

O sistema de formação da mistura do atual motor Otto é com injeção no coletor de admissão, a tendência futura é o emprego de sistemas com injeção de combustível diretamente na câmara de combustão (Bosch, 2001).

**Torque do motor Otto** - A potência fornecida pelo motor é determinada pelo torque disponível no volante e pela rotação do motor. O torque no volante resulta do trabalho produzido pelo processo de combustão, é reduzido pelo atrito dos componentes do motor, pela perda do bombeamento na mudança de carga e pelo torque gasto no acionamento dos acessórios. O torque da combustão é produzido no tempo de trabalho e é determinado pelos seguintes fatores:

- massa de ar disponível para a combustão após o fechamento da válvula de admissão
- massa de combustível disponível
- o instante em que a centelha de ignição induz a combustão da mistura ar combustível.

Os sistemas parciais de controle do enchimento do cilindro, da formação da mistura e do ponto de ignição controlam os fatores acima, ajustando o torque do motor às necessidades operacionais do veículo. Nos sistemas de injeção convencional o condutor controla a abertura da

borboleta de aceleração diretamente através do acionamento do pedal do acelerador. Nos sistemas com acelerador eletrônico, o enchimento necessário é calculado e a borboleta é aberta através de um motor de passo, no ângulo adequado para permitir o enchimento. No sistema parcial de formação da mistura é feito o cálculo da massa de combustível correspondente, determinando o tempo de injeção necessário e o ponto de injeção ideal. No sistema parcial que controla a ignição é determinado o ângulo do eixo de manivelas em que ocorrerá a centelha.

A mistura que se encontra no cilindro após o fechamento da válvula de admissão é o chamado enchimento do cilindro. Ela é formada pelo ar fresco admitido e pelo gás residual. O gás fresco alimentado através da borboleta de aceleração é o fator decisivo para o trabalho realizado pelo pistão durante a combustão e, portanto, para o torque liberado pelo motor. Medidas para o aumento do torque máximo e a potência máxima do motor quase sempre impõem o aumento do enchimento máximo possível. O enchimento máximo teórico é determinado pela cilindrada.

A parcela de gás residual do enchimento é formada pela massa de gás de escape que permanece no cilindro e pela massa de gás que retorna ao cilindro, para reduzir as emissões de óxido nitroso ( $\text{NO}_x$ ) e hidrocarbonetos (HC), não participa diretamente da combustão. O controle do torque do motor é feito através da borboleta de aceleração, que controla o fluxo de ar aspirado pelo motor. A troca do gás residual pelo gás fresco ocorre em função da abertura e fechamento adequado das válvulas de admissão e de descarga.

Os ressaltos do eixo de comando determinam os momentos de abertura e fechamento das válvulas, bem como o curso de levantamento da válvula. Isto influi no processo de mudança de carga e assim também no volume de gás fresco disponível na combustão. O cruzamento das válvulas, isto é, a sobreposição dos tempos de abertura das válvulas de admissão e descarga, influi incisivamente sobre a massa de gás residual no cilindro (Bosch, 2001). A figura 2.5 mostra a relação entre o enchimento de gás fresco e a rotação em função da abertura da borboleta de aceleração.

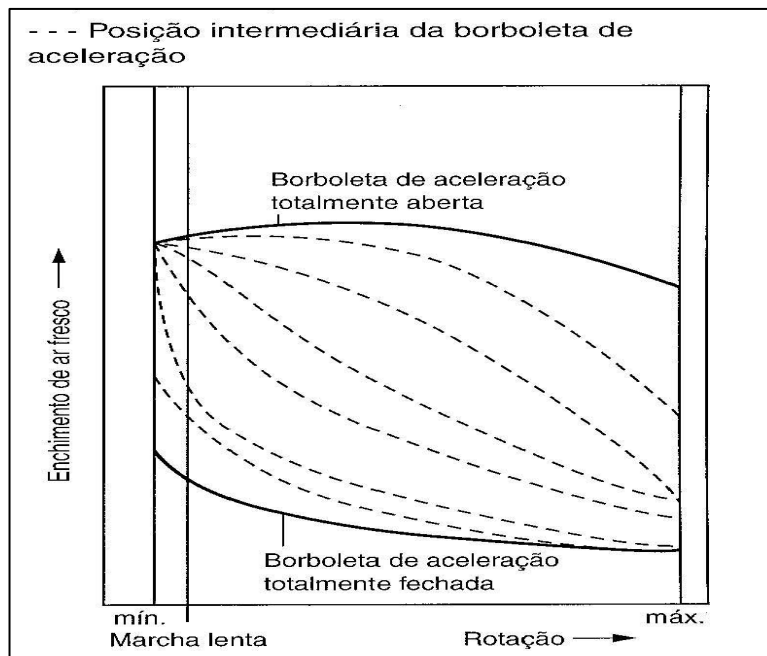


Figura 2.5 - Enchimento de gás fresco e a rotação/borboleta de aceleração.

**Formação da mistura ar-combustível** - A queima total, teoricamente ideal ocorre quando a mistura esta de acordo com a relação estequiométrica. A relação estequiométrica ar-combustível é a proporção de massa teoricamente necessária de 14,7kg de ar para 1kg de gasolina para a queima total da mistura. Motores atualmente no mercado são operados com mistura estequiométrica. O coeficiente de ar ou relação lambda indica quanto a mistura ar-combustível desvia da mistura teoricamente necessária.

$\lambda$  = a massa de ar admitida dividida pela massa de ar para a queima estequiométrica.

$\lambda = 1$ , a massa de ar admitida é igual a massa de ar teórica.

$\lambda < 1$ , falta de ar e, portanto mistura rica.

$\lambda > 1$ , excesso de ar, portanto mistura pobre.

O valor máximo de  $\lambda$ , chamado de limite de funcionamento pobre depende da construção do motor e do sistema de formação da mistura. No limite de funcionamento pobre a mistura não é mais facilmente inflamável e ocorrem falhas na combustão. Os motores com injeção de

combustível diretamente na câmara de combustão podem ser operados com coeficientes de ar-combustível consideravelmente maiores, até  $\lambda = 4$ .

Motores Otto com injeção de combustível no coletor de admissão atingem sua potência máxima com  $\lambda$  variando de 0,95 a 0,85, menor consumo de combustível com  $\lambda$  variando de 1,1 a 1,2 e para obter baixas emissões no escapamento é imprescindível manter  $\lambda=1$ . Pode-se deduzir que não existe uma relação de ar ideal que atenda todos as condições operacionais simultaneamente. Com a borboleta de aceleração totalmente aberta pode ser necessário enriquecer a mistura para obter-se o maior torque e a maior potência possível.

Nos motores com injeção no coletor de admissão, é necessária uma boa pulverização de combustível para evitar um grande depósito de gotas de combustível nas paredes da câmara de combustão, essas gotas podem não ser totalmente consumidas e provocarem o aumento na emissão de HC, hidrocarbonetos. A figura 2.6 mostra a dependência da potência, consumo específico de combustível e emissões veiculares em função de  $\lambda$  (Bosch, 2001).

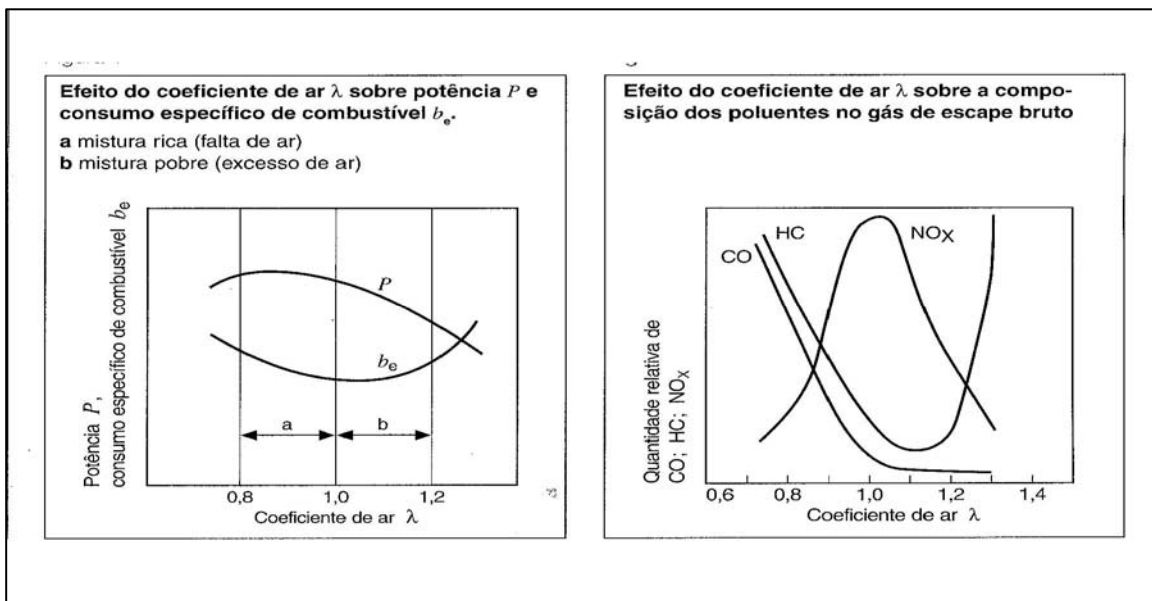


Figura 2.6 - Potência, consumo esp. de combustível e emissões veiculares em função de  $\lambda$

**Ponto de ignição e avanço** - Do momento da inflamação da mistura até a sua queima total transcorrem cerca de dois milissegundos. Quando há uma composição uniforme da mistura esse



tempo permanece constante. A faísca de ignição deve portanto saltar de modo a encontrar uma pressão ideal de combustão em qualquer regime de funcionamento do motor. O ponto de ignição deve ser escolhido de modo que os seguintes requisitos possam ser cumpridos:

- máxima potência do motor
- consumo econômico de combustível
- evitar detonação do motor
- emissões nocivas reduzidas

Essas exigências não podem ser satisfeitas simultaneamente; é necessário priorizar um requisito em detrimento de outro de acordo com a necessidade. Atualmente, para obter a máxima potência nos motores Otto, a mistura ar-combustível é altamente comprimida, com taxas da ordem de 12:1. Com isso o risco de detonação é maior em relação a condições de compressão anteriormente menores. A detonação no motor ocorre pela queima brusca de partes da mistura que ainda não foram atingidas pela frente da chama. O ponto de ignição neste caso está muito adiantado.

O funcionamento detonante leva ao aumento da temperatura na câmara de combustão, aumento intenso da pressão e produz oscilações de pressão, que se sobrepõe à curva normal de pressão. A tendência à detonação depende do tipo de construção da câmara, da preparação uniforme da mistura ar – combustível, do coletor de admissão e do combustível. A figura 2.7 mostra a curva de pressão de combustão com pontos de ignição diferentes e a influência do coeficiente  $\lambda$  e do ponto de ignição sobre o consumo de combustível. Na curva 1,  $Z_a$  é o ponto correto de ignição, na curva 2,  $Z_b$  está adiantado gerando pré-ignições e na curva 3,  $Z_c$  está atrasado gerando baixa pressão de combustão (Bosch, 2001).

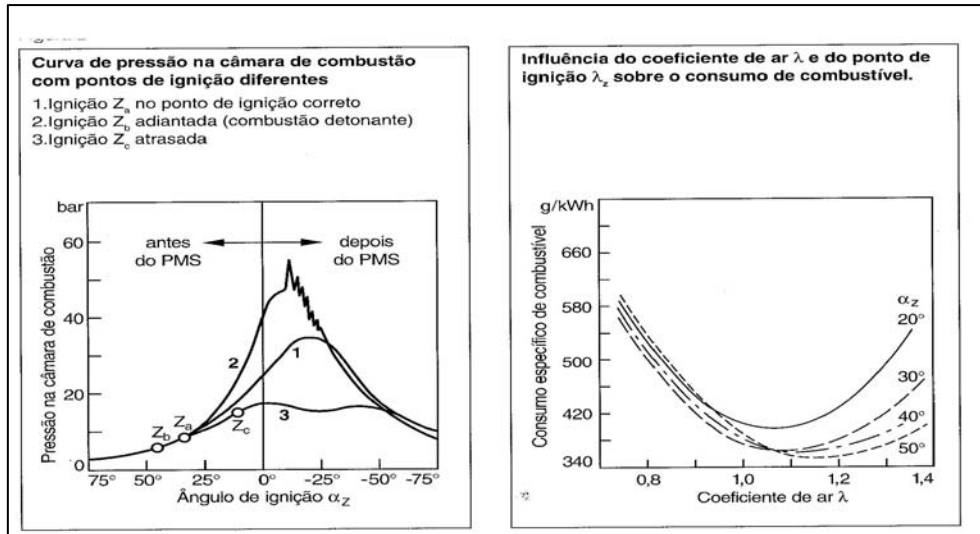


Figura 2.7 - a) curva de pressão de combustão com pontos de ignição diferentes;  
 c) influência do coeficiente  $\lambda$  e do ponto de ignição sobre o consumo específico de combustível.

**Sistema para formação interna da mistura** - Sistemas de injeção ou carburadores tem a função de fornecer uma mistura ar – combustível adaptada da melhor maneira possível a cada regime de funcionamento do motor. Sistemas de injeção com comando eletrônico injetam o combustível intermitentemente através de válvulas injetoras controladas eletronicamente.

A massa de combustível injetada é determinada pelo tempo de abertura da válvula injetora. Atualmente empregam-se quase exclusivamente sistemas em que a mistura é formada fora da câmara de combustão. Sistemas com formação interna da mistura, isto é, com injeção diretamente na câmara de combustão são excelentes para redução do consumo de combustível e emissões veiculares. No sistema de injeção direta o combustível é injetado diretamente na câmara de combustão pela ação de válvulas injetoras eletromagnéticas.

A mistura é formada dentro do cilindro através de uma fina pulverização do combustível. Em regime normal de funcionamento o motor com injeção direta, aspira apenas ar e não mais a mistura ar – combustível como nos sistemas convencionais, evitando desta forma a formação de película de combustível no coletor de admissão. Na formação externa, a mistura se apresenta homogênea e em proporção estequiométrica em toda a câmara de combustão. A formação da mistura internamente na câmara de combustão, ao contrário, permite dois modos de operação:

operação estratificada e operação homogênea. Na operação estratificada a mistura só é inflamada na área em torno da vela de ignição.

Na parte restante da câmara encontra-se somente o gás fresco e o gás residual, isto resulta em uma mistura geral muito pobre, ideal para o motor operar em marcha lenta e carga parcial com redução do consumo. Na operação homogênea, como na formação externa, todo ar fresco disponível na câmara de combustão participa do processo de combustão, operação ideal para regime de plena carga (Bosch, 2001). A figura 2.8 mostra o sistema de injeção direta de combustível na câmara de combustão e o sistema de injeção indireta, onde a injeção ocorre no coletor de admissão em frente à válvula de admissão.

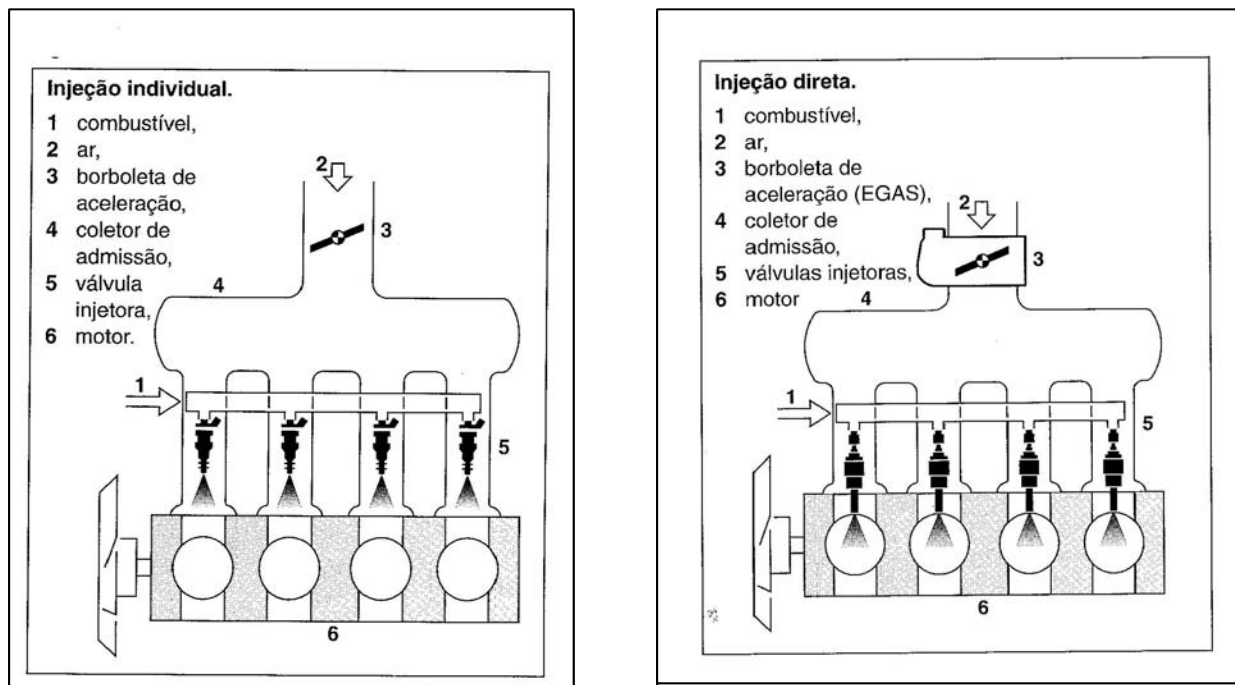


Figura 2.8 - Sistema de injeção indireta e sistema de injeção direta

**Sistema global MOTRONIC** - O sistema Motronic contém todos os atuadores necessários para executar todas as intervenções de ajuste pretendidas no motor Otto. Sensores registram os dados operacionais atuais de motor e veículo. O circuito de entrada de unidade de comando eletrônica central processa os sinais dos sensores e disponibiliza, por exemplo, as seguintes

informações para o microprocessador da unidade de comando, (A figura 2.9 mostra o diagrama de bloco do sistema de gerenciamento ME-Motronic da Bosch):

- Posição do pedal do acelerador,
- Rotação do motor,
- Enchimento do cilindro (massa de ar),
- Temperatura do motor e do ar admitido,
- Composição da mistura,
- Velocidade do veículo.

A partir dessas informações o microprocessador reconhece o regime de funcionamento desejado pelo condutor e calcula o torque necessário para poder oferecer o respectivo desempenho. A rotação do motor que, igualmente é um fator decisivo do desempenho, é determinada pela relação selecionada pelo condutor ou pelo comando de transmissão. Para ajustar o regime de operação, o microprocessador calcula os sinais de atuação necessários. Estágios de saída amplificam esses sinais e ativam elementos reguladores que controlam o motor. O enchimento necessário do cilindro com o respectivo volume de injeção, assim como a injeção no momento apropriada possibilita a formação ideal da mistura e da combustão.

A função básica do sistema Motronic é ajustar o regime de operação desejado pelo condutor. Para isso, no microprocessador a posição do pedal é convertida para um valor nominal de torque do motor. De acordo com os dados operacionais de entrada, o controlador das funções do ME-Motronic, efetua o processamento e atua nos sistemas e nos fatores determinantes para o torque do motor:

- O enchimento do motor
- A massa do combustível injetado
- O ângulo de ignição

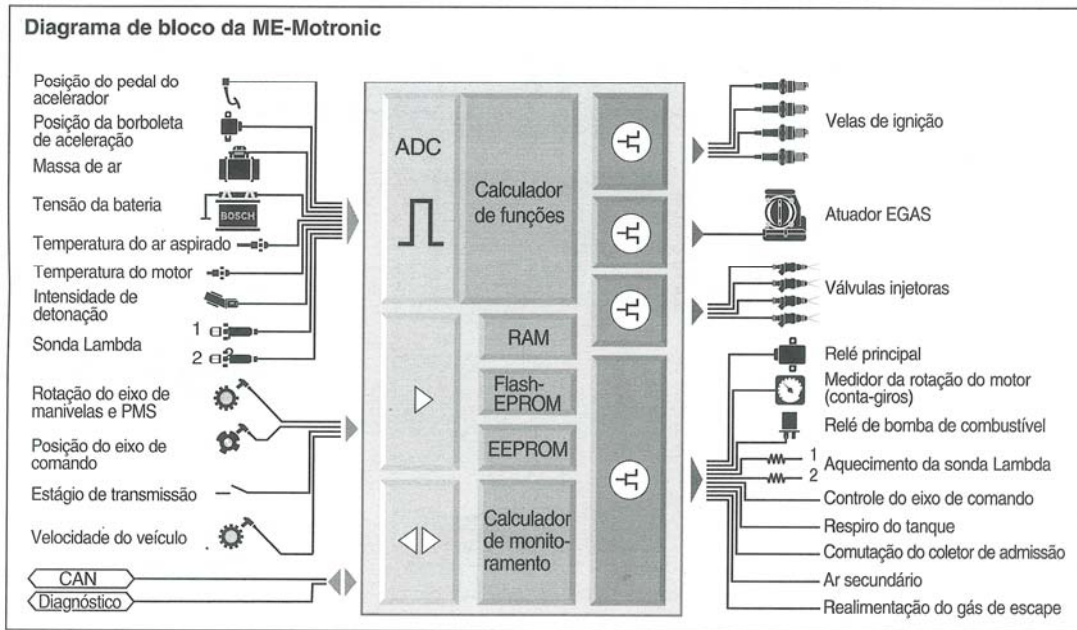


Figura 2.9 - Diagrama de bloco do sistema de gerenciamento ME-Motronic da Bosch.

**Sistema para controle do enchimento** - O controle da borboleta de aceleração no motor Otto com formação externa da mistura para o enchimento dos cilindros é o fator determinante para o torque liberado pelo motor e, portanto, para a potência. A borboleta de aceleração controla o fluxo de ar aspirado pelo motor e, conseqüentemente, o enchimento dos cilindros. Nos motores convencionais a borboleta de aceleração é movimentada mecanicamente. Um cabo tensor ou uma haste transmite o movimento do pedal do acelerador para a borboleta de aceleração. No sistema eletrônico de enchimento do motor EGAS, uma unidade de comando eletrônico efetua o acionamento da borboleta de aceleração. Em motores projetados com injeção no coletor de admissão existe uma relação linear entre o enchimento de ar e o torque produzido pela combustão. Por isso o enchimento do cilindro com ar é uma das principais grandezas para o cálculo do volume de injeção, do ângulo de ignição e do cálculo do torque que será liberado pelo motor (Bosch, 2001).

**Sistema de injeção de combustível** - Altos requisitos de performance e baixos níveis de emissões de poluentes pelo gás de escape requerem precisão do sistema de injeção em cada ciclo de trabalho. Além da dosagem precisa da massa de combustível injetada de acordo com o ar

aspirado pelo motor, a injeção no tempo exato torna-se cada vez mais importante, por isso é atribuída uma válvula injetora eletromagnética a cada cilindro do motor. Ela injeta o combustível, exatamente dosado de acordo com o torque calculado pela unidade de comando, diretamente na válvula de admissão do cilindro. A preparação do jato das válvulas injetoras, isto é, o formato do jato, o ângulo e o tamanho das gotículas influem sobre a formação da mistura ar-combustível. (Bosch, 2001).

**Processamento dos dados operacionais** - A função central do comando do motor é processar os sinais recebidos dos sensores e definir a melhor estratégia para disponibilizar a potência requerida do motor. O condutor precisa dessa potência do motor para transpor as resistências de condução do veículo. Para isso o sistema de comando calcula inicialmente a quantidade necessária de ar, o volume de injeção adequado e o ângulo de ignição ideal. Conhecidos esses fatores, os respectivos atuadores (unidade e comando da borboleta, válvula injetora, bobinas de ignição) são acionados. (Bosch, 2001).

**Calculo do torque teórico** - A grandeza básica para a estrutura do torque da ME-Motronic é o torque interno a partir da combustão. Como torque interno denominamos aquele torque resultante da pressão do gás no tempo de compressão e de expansão. Se deduzirmos o atrito, a dissipação pela troca de carga e o torque necessário para a acionamento dos conjuntos secundários (bomba d'água, alternador etc.) do torque interno, obteremos o torque efetivamente liberado pelo motor. A função da gestão do torque é ajustar o torque interno do motor através da opção correta das grandezas de atuação do motor de modo que a vontade do condutor seja obedecida e todas as perdas e exigências adicionais sejam cumpridas.

Como estão gravados na unidade de comando Motronic os valores ideais para cada um dos torques teóricos de enchimento, tempo de injeção e ângulo de ignição, ela pode garantir um ótimo desempenho do motor quanto a emissões de poluentes do gás de escape e consumo de combustível (Bosch, 2001).

**Ajuste do torque real** - Para o ajuste do torque interno o sistema gerenciador de torques da unidade Motronic possui duas estratégias de controle possíveis. Um caminho lento através da ativação da borboleta de aceleração e um caminho rápido por variação do ângulo de ignição e/ou

do corte da injeção de cilindros isolados. O caminho lento, também chamado de caminho de enchimento, é responsável pela operação estacionária. O enchimento de ar é ajustado através da borboleta de aceleração. Com o caminho rápido (caminho do ângulo de ignição) é possível reagir rapidamente à mudança dinâmica de torque (Bosch, 2001).

**Cálculo do enchimento dos cilindros** - A massa de ar que se encontra no cilindro após o fechamento da válvula de admissão é chamada de enchimento de ar. Uma grandeza independente da cilindrada do motor é o “enchimento relativo de ar”. Ela é definida como a relação entre o enchimento real e o enchimento nas condições normais de temperatura e pressão. O enchimento relativo precisa ser conhecido para que o volume de injeção possa ser calculado. No motor Otto atual ele é ainda o principal fator de influência no torque do motor. Como ele não é diretamente mensurável, ele é calculado através de um modelo do coletor de admissão e dos sinais medidos, disponíveis na entrada do módulo (Bosch, 2001).

**Cálculo do tempo de injeção** - A partir do enchimento de ar no cilindro é possível calcular a massa de combustível para uma reação estequiométrica de ar-combustível. Quando o tempo efetivo de injeção fica muito curto, as influências dos tempos de abertura e fechamentos da válvula ficam muito fortes. Para garantir a dosagem exata do combustível, o tempo de injeção é limitado a um valor mínimo. Este valor mínimo está abaixo do tempo de injeção, correspondente ao enchimento mínimo possível do cilindro. Para que a queima seja ideal, é necessário determinar, além da dosagem correta, também o ponto certo para injeção. Via de regra o combustível é injetado no coletor de admissão com as válvulas de admissão ainda fechadas e o fim da injeção é calculado em função do regime de operação do motor (Bosch, 2001).

**Cálculo do ângulo de ignição** - O ângulo básico de ignição é calculado a partir das atuais condições de operação do motor. É determinado em função do enchimento, rotação e composição da mistura (caracterizada pelo coeficiente de ar  $\lambda$ ). No sistema ME-Motronic esse ângulo básico de ignição representa, de maneira simplificada, o ângulo de ignição mais adiantado possível do respectivo ponto operacional. Em operação normal e motor aquecido, esse ângulo é definido como distância mínima para o limite de detonação. Este ângulo pode ser atrasado em caso de

detonação, pelas informações recebidas do sensor de detonação, instalado próximo ao cilindro no bloco do motor (Bosch, 2001).

**Regulagem Lambda** - Uma medida eficaz para a redução das emissões tóxicas é um pós-tratamento do gás de escape no catalisador. Ele tem a propriedade de reduzir monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC) e óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) em até mais de 98%, caso o motor opere em uma faixa muito justa em torno da relação estequiométrica de ar e combustível ( $\lambda=1$ ). Ele transforma esses três componentes em água (H<sub>2</sub>O), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e nitrogênio (N<sub>2</sub>). A sonda Lambda de dois pontos, que se encontra no circuito do gás de escape antes do catalisador, mede o teor de oxigênio do gás de escape. O tempo de injeção calculado depende desse sinal da sonda Lambda. Na regulagem Lambda, o sinal da sonda é transformado na unidade de comando para um sinal binário. O sinal transmitido ( $\lambda>1$ , mistura pobre ou  $\lambda<1$  mistura rica) solicita ao regulador modificar suas grandezas de ajuste. Ele gera um fator de regulagem pelo qual é multiplicado o tempo de injeção. O tempo de injeção é modificado até estabelecer-se uma oscilação permanente do fator de regulagem. A qualidade da regulagem será tanto melhor quanto mais rápido atuar contra um deslocamento do coeficiente de ar através do fator de regulagem. Como a combustão sempre é alimentada com combustível pré-depositado e como a sonda não está localizada na câmara de combustão e sim no escapamento resulta um retardamento para o circuito de regulagem. Esse tempo depende da carga do motor e da rotação. A reação de uma alteração de mistura só pode ser medida após o decurso desse tempo morto. Disso também resulta um período mínimo de duração para a variação cíclica do fator de regulagem. O retardamento aumenta ainda pelo tempo de cálculo da unidade de comando e o tempo de atraso da reação da sonda. A regulagem Lambda corrige a injeção subsequente em tempo, com base na medição anterior da sonda Lambda. Esse deslocamento de tempo é determinado pelo tempo de fluxo de gás e não pode ser evitado. Por isso, ao acessar um novo ponto operacional com pré-controle ajustado incorretamente ocorrem desvios de  $\lambda=1$ , até que eles sejam novamente compensados pela regulagem.

A sonda Lambda envia um sinal de tensão para a unidade de comando que, por sua vez, informa a um formador de mistura (sistema de injeção eletrônica ou carburador) dependendo da tensão, se a mistura deve ser enriquecida ou empobrecida. Na regulagem de dois pontos o sinal



da sonda é convertido em um sinal de dois pontos na unidade de comando. Cada salto de tensão da sonda Lambda causa um salto em sentido oposto da variável de regulagem Lambda, ou seja, quando a sonda indica mistura pobre, ocorre um enriquecimento da mistura e vice-versa. A amplitude do salto da variação de controle é de características 3%. Isso significa que o volume de combustível será multiplicado por um fator que:

- em caso normal é 1,00
- em caso de mistura muito pobre é 1,03
- em caso de mistura muito rica é 0,97.

Esse fator de regulagem é ajustado em forma de rampa em seguida ao salto da variável de regulagem, para ajustar novamente o valor médio e compensar interferências do pré-dimensionamento. A freqüência de regulagem é determinada principalmente pelo tempo transcorrido desde a formação da mistura fresca até a captação da nova mistura queimada pela sonda Lambda, tempo morto (Bosch, 2001). A figura 2.10 mostra o esquema de funcionamento da Regulagem Lambda.

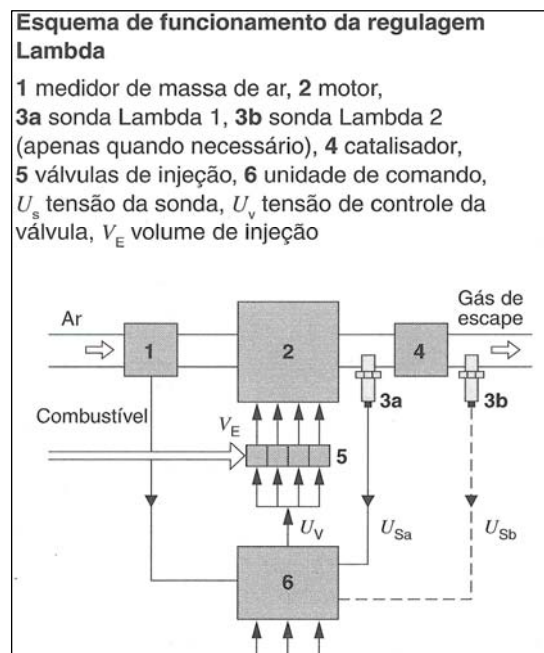


Figura 2.10 - Esquema de funcionamento da Regulagem Lambda

**Funções de proteção** - No sistema de gerenciamento da ME-Motronic existe a possibilidade de limitação da rotação, torque, potência e temperatura do motor, com o objetivo de não danificar componentes mecânicos do motor. A alta temperatura do gás de escapamento pode danificar os componentes dentro do circuito do gás de escape. Por isso a temperatura do gás de escape é reproduzida na unidade de comando com a ajuda de um modelo. Ultrapassada uma determinada margem, um enriquecimento da mistura pode produzir uma redução da temperatura, já que para evaporação do combustível o calor é extraído do gás de escape. Outras possibilidades consistem na limitação do enchimento ou do torque (Bosch, 2001).

## 2.9 Desempenho do motor através do diagrama p-V.

Para a determinação do desempenho geral do motor, parâmetros relativos às condições de combustão devem ser lidos freqüentemente. Além de servirem para determinação do desempenho, também auxiliarão no diagnóstico de distúrbios operacionais em estágio inicial (falhas no sistema de injeção, no mecanismo de acionamento de válvula, sopro nos anéis de pistão, etc.). Os principais parâmetros a serem medidos periodicamente para determinação da potência e previsão de possíveis desvios na performance são:

Rotação do motor

Pressão média indicada

Pressão de compressão.

Pressão máxima

Índice das bombas injetoras ou posição da borboleta de aceleração

Temperatura de gás de escapamento

Pressão de ar de alimentação

Temperatura de ar de alimentação

A leitura deve ser feita periodicamente e tem o propósito de assegurar o acompanhamento das alterações nas condições de combustão devido ao desgaste e deterioração da estanqueidade dos anéis de pistão, aumento de depósitos nas passagens de ar e gás.

### 2.9.1 Indicador mecânico

O indicador é empregado para obter os diagramas indicadores pressão *versus* volume enquanto o motor está funcionando. O diagrama indicador (diagrama p-V, diagrama de trabalho) descreve as variações da pressão no cilindro do motor. Sua área pode ser medida através de um planímetro para determinação potência indicada do motor. A figura 2.11 apresenta o aparelho indicador de pressão constituído de mola e pistão fabricado pela Maihak.

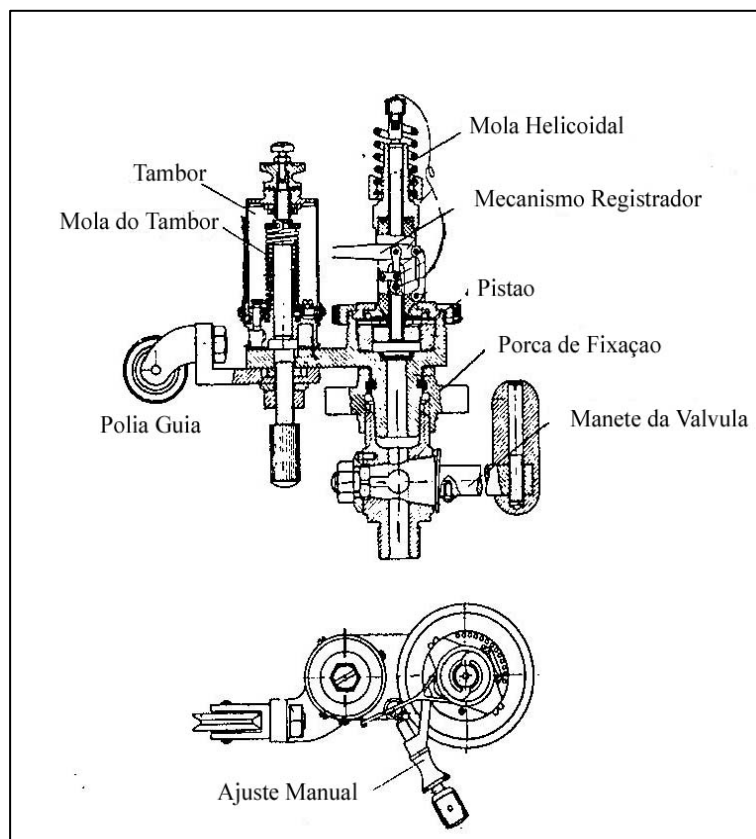


Figura 2.11 - Aparelho indicador Maihak.

A potência desenvolvida em cada cilindro pode ser encontrada multiplicando-se a pressão média indicada pela rotação do motor e pela constante do cilindro. A pressão de compressão e a pressão máxima de combustão podem ser medidas diretamente no diagrama aberto  $p\theta$  (pressão *versus* posição angular do virabrequim).

O atrito no movimento do pistão do indicador, assim como a folga no mecanismo registrador, distorcerá tanto o formato quanto a área no diagrama. Portanto, o indicador deve ser periodicamente inspecionado. A área do diagrama é numericamente igual ao trabalho desenvolvido pelo cilindro. Para sua medição utiliza-se um planímetro (Burmeister & Wain, 19XX). Maiores informações sobre operação, manutenção do aparelho indicado e medição da área do diagrama P-V com planímetro encontram-se no anexo 1.

## 2.10 Indicador Eletrônico.

Quando o objetivo da medição da pressão do cilindro é simplesmente obter a informação qualitativa da taxa da combustão, sua variação cíclica, ou verificar o pico de pressão, pouca preparação é requerida, bastando instalar um transdutor no motor e verificar o sinal resultante da pressão através de um osciloscópio. Entretanto, para a obtenção de grande quantidade de dados da pressão do cilindro e associação dessas pressões com seus respectivos volumes do cilindro o transdutor deve ser cuidadosamente selecionado. Sua preparação bem como a do motor, deve ser cuidadosa (Lancaster et al, 1975).

Em toda parte do mundo os seguintes tipos de instrumentos de medição transformaram-se no padrão estabelecido para a medição da pressão do cilindro:

- Sensores de pressão piezelétricos para alta temperatura
- Cabos com alta isolamento
- Amplificadores da carga
- Sensor de posição angular do virabrequim
- Conversor analógico digital
- Dispositivo com alta velocidade de processamento de dados para a análise e a exposição do sinal.

A exatidão dos resultados depende da precisão de cada componente e da análise correta do sinal gerado pelo sistema (Kuratle, 1992)

### 2.10.1 Sistema de medição da posição angular do virabrequim.

O “encoder” é um transdutor que converte um movimento angular ou linear em uma série de pulsos digitais elétricos. Esses pulsos gerados podem ser usados para determinar velocidade, distância, posição ou direção. Os “encoders” podem ser divididos em “encoders” incrementais ou absolutos.

O “encoder” incremental fornece normalmente dois pulsos quadrados defasados em 90°, que são chamados usualmente de canal A e canal B. A leitura de apenas um canal fornece a velocidade, enquanto a leitura dos dois canais fornece também o sentido do movimento. O sentido de giro é determinado pela fase dos canais: se o canal A estiver 90° avançado em relação ao canal B, o “encoder” estará girando no sentido horário, e se o canal A estiver atrasado 90° estará girando no sentido anti-horário. Um outro sinal, chamado de Z ou zero também está disponível e fornece a posição absoluta “zero” do “encoder”. Esse sinal é um pulso quadrado cuja fase e largura são as mesmas do canal A.

A resolução do “encoder” incremental é dada por pulsos / rotação (normalmente chamada de PPR), isto é, o “encoder” gera uma quantidade de pulsos elétricos por uma rotação. Para determiná-la basta dividir o número de pulsos por 360°. Por exemplo, um encoder que fornece 360 pulsos / rotação, geraria um pulso elétrico a cada 1° mecânico (Matias, 2002).

Quando uma resolução menor que um grau for necessário, utiliza-se um multiplicador de pulso em conjunto com o “encoder”. A tabela 2.1 apresenta a resolução obtida com o multiplicador de pulso AVL 3064A2, que opera em conjunto com o “encoder” AVL 364.

Tabela 2.1 – Resolução do Multiplicador de Pulso AVL 3064A2

0,05	0,0625	0,1	0,125	0,25	0,3	0,5	1	2	2,5	4	5	<sup>o</sup> ca
3600	2880	1800	1440	720	600	360	+180	90	72	45	36	Pulsos/rev

### 2.10.2 “Encoder” AVL 364 (específico para motores de combustão interna) .

O “Encoder” para medição da posição angular do virabrequim deve ser adequado para trabalhar em severas condições operacionais, como temperatura elevada e cargas vibracionais, apresentar resolução adequada e operar em alta velocidade. O “Encoder” AVL 364 é específico para essa aplicação. É constituído de: Braço de sustentação, grampo de fixação, mancal de rolamento, sensor ótico e disco graduado. A figura 2.12 apresenta a vista explodida do “Encoder” com seus principais componentes.

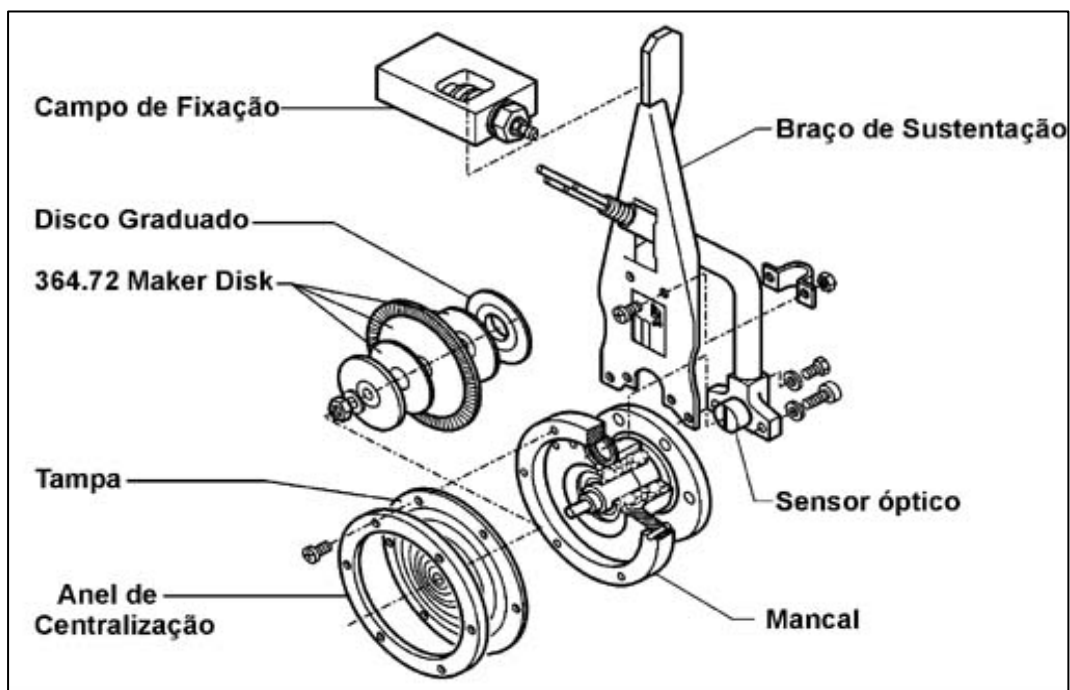


Figura 2.12 - Principais componentes do “Encoder”.

O braço de sustentação é projetado para absorver vibrações na direção axial dos mancais, garantindo que os esforços aplicados no ponto de fixação e na carcaça sejam minimizados. Essas forças são resultados da deflexão do virabrequim durante o funcionamento do motor.

A fixação do braço de sustentação é feita pelo grampo de fixação, que tem a função de compensar os movimentos radiais produzidos pelo sistema. Esse grampo é constituído por dois anéis planos revestidos com metal patente e tensão pré-estabelecida por molas.

O mancal de rolamento é composto de um eixo de titânio apoiado em dois rolamentos. Sua carcaça é de alumínio resistente a altas tensões e possui lubrificação permanente.

A interface entre os elementos mecânicos e o conversor de pulsos é feita pelo sensor ótico, através de cabos de fibra ótica que recebem e transmitem os pulsos gerados para o conversor de pulsos.

O disco graduado possui uma trilha com 720 traços para graduação dos ângulos do virabrequim e outra trilha com 01 traço para identificar o ponto morto superior do pistão (AVL, 1995).

### 2.10.3 Diagrama elétrico funcional do “Encoder”

O sistema de leitura é baseado em um disco rotativo graduado, iluminado perpendicularmente por uma fonte de luz infravermelha, que é absorvida ou refletida para o receptor. O receptor converte esses sinais luminosos em pulsos elétricos. Uma corrente constante alimenta, através de cabos de fibra ótica, dois diodos emissores de luz infravermelha, os quais irão iluminar as graduações dos 720 ângulos (CDM) e a marca do “*trigger*” (marca de referência do ponto morto superior do pistão).

A gravação dos traços dos ângulos é pintada com tinta preta e seus espaçamentos com tinta refletiva. Dessa maneira temos traços que absorvem a luz e espaços entre um traço e outro que são refletidos. A luz infravermelha será refletida ou não dependendo da posição em que se encontra o disco.

Os diodos receptores de luz infravermelha convertem os sinais luminosos em sinal elétrico analógico, sendo estes convertidos para sinais digitais no conversor analógico digital (AVL Hand Book, 1994). A figura 2.13 mostra o diagrama funcional do “Encoder” AVL 364.

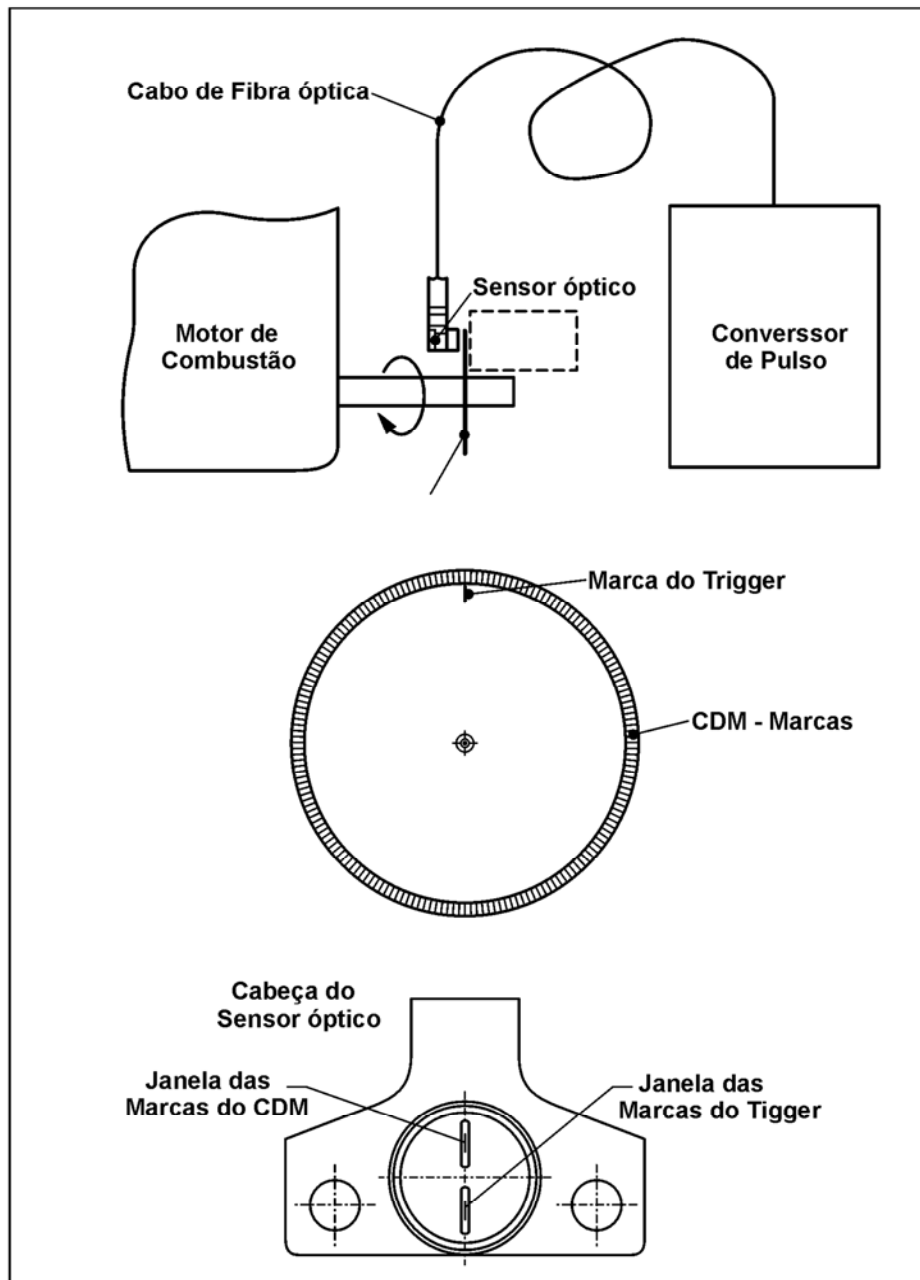


Figura 2.13 - Diagrama funcional do “Encoder” AVL 364



#### 2.10.4 Determinação do Ponto Morto Superior

O ponto de referência usado para determinar a posição angular do virabrequim é o ponto morto superior (PMS). Para determinar exatamente esse ponto utiliza-se um disco graduado e um relógio comparador.

Pode-se fazer uma estimativa inicial do PMS usando-se um relógio comparador para encontrar o ponto mais elevado do deslocamento do pistão e alinhar o ponteiro com a marca do PMS do disco graduado, quando o pistão estiver nessa posição. Esse ajuste inicial é somente aproximado, porque a posição do pistão muda muito lentamente com variação do ângulo do virabrequim perto do PMS, fazendo com que o ponto exato do PMS seja difícil de ser estabelecido.

Uma determinação exata do PMS pode ser feita utilizando-se uma região onde ocorre a mudança mais rápida da posição do pistão em relação à mudança do ângulo do virabrequim, fato que ocorre a 40 graus em ambos os lados do PMS.

Se o pino do pistão não for deslocado, o procedimento descrito a seguir é exato. Com o relógio comparador instalado no topo do pistão, gira-se o motor no sentido anti-horário até aproximadamente 60 graus antes do PMS. A seguir gira-se o mesmo no sentido horário em direção ao PMS, parando em 40 graus antes do PMS (indicado no disco graduado instalado no volante). Nessa posição registra-se a leitura do relógio comparador. Na sequência, gira-se o motor novamente 60 graus no sentido horário, até que a leitura do relógio comparador seja a mesma obtida anteriormente (40 graus após o PMS). Fazendo-se o registro de ambas as leituras com o pistão movido em direção ao PMS, os erros de posição devido às folgas mecânicas são minimizados. O PMS exato é o ponto médio, no disco graduado, entre as leituras iguais obtidas com o relógio comparador anteriormente (40° antes e 40° depois). O motor é girado até que esse ponto médio obtido fique alinhado com o ponteiro, que é a referência. Nessa posição o motor está posicionado no ponto morto superior exato, que será o volume mínimo do cilindro.

Se o pino do pistão for deslocado, como ocorre em muitos motores, o movimento do pistão não é simétrico, próximo ao PMS. Os cálculos feitos em um motor comum, entretanto, mostram que o erro na determinação do PMS quando não se considera o deslocamento do pino é menor que 0,06 graus.

A precisão na determinação do PMS depende da precisão das leituras do ângulo do virabrequim na graduação do volante. A graduação do volante traçada na fábrica teoricamente apresenta espaços iguais. Os erros nas leituras são, então, devidos à largura do ponteiro, à largura das marcas da graduação do volante e à paralaxe. A resolução das leituras da posição angular do virabrequim, de um motor CFR, foi estimada em 0,1° grau no estudo feito utilizando um ponteiro chanfrado para reduzir o erro de paralaxe e o procedimento acima para determinação do PMS (Lancaster et al., 1975).

#### **2.10.5 Determinação do Volume.**

A preparação e a calibração cuidadosa do transdutor de pressão é desperdiçada, a menos que cuidado similar seja tomado para se assegurar de que os volumes do cilindro sejam determinados com precisão. O volume do cilindro para cada posição angular do virabrequim é calculado através da equação 2.7, mais o volume da câmara de combustão. Desde que as dimensões físicas possam ser determinadas exatamente, a precisão do cálculo do volume é limitada pela exatidão da medida do volume da câmara de combustão e pela determinação do ângulo do virabrequim.

Lancaster utilizou um gerador de pulso fotoelétrico acionado pelo motor para sincronizar a aquisição do sinal de pressão com o ângulo do virabrequim. Um pulso de referência ( “trigger” ) em um canal do gerador de pulso foi usado para iniciar a aquisição. Um segundo canal forneceu 360 pulsos, cada um dos quais correspondendo a um grau de deslocamento do virabrequim. Cada posição angular do virabrequim é determinada a partir do pulso de referência conhecendo-se a resolução do “encoder”.

### **2.10.6 Determinação do Volume da Câmara de Combustão.**

Para determinar o volume da câmara de combustão não é necessária a computação da pressão média efetiva do motor. Entretanto, é necessário efetuar a medição exata do volume da câmara para se assegurar a qualidade dos dados da pressão obtidos no teste do motor. Para medir o volume da câmara o motor é desmontado e um líquido de volume conhecido é derramado nela até atingir a sua face. Para relações moderadas da compressão essa técnica é exata. Para relações elevadas, no entanto, pode ser inadequada devido às deformações mecânicas e térmicas que ocorrem durante a operação do motor (Lancaster et al.,1975).

### **2.11 Sistema de Medição da Pressão de Combustão**

Um sistema de medição da pressão de combustão consiste de um transdutor de pressão piezelétrico e de um amplificador de carga. O transdutor de pressão produz uma carga elétrica quando uma pressão é aplicada em seu diafragma. O amplificador gera uma tensão de saída proporcional a essa carga. A calibração é necessária para determinar o relacionamento da pressão aplicada com a tensão de saída do sistema. Segundo Brown (1967), que em seu trabalho analisou os métodos para avaliar os erros na medição de pressão, a função que relaciona a carga gerada pelo sensor e a tensão deve ser linear.

#### **2.11.1 Sensor de pressão de efeito piezelétrico**

O efeito piezelétrico é baseado no fenômeno que ocorre com o cristal de quartzo quando submetido a uma carga de pressão (pressão de compressão) gerando uma carga elétrica. Essa carga é convertida em um sinal de tensão linear e proporcional através de um amplificador. Dessa forma, esse sinal pode ser analisado diretamente por um osciloscópio ou ser condicionado por um sistema com alta frequência.

A pureza do cristal irá influenciar na precisão das medidas de pressão. Esse tipo de transdutor apresenta um efeito indesejado conhecido como “short term drift”, que é causado por tensões térmicas induzidas na face do diafragma. A figura 2.14 apresenta um certificado de

calibração na fábrica, de um sensor AVL GM11D, onde se observa o valor de sensibilidade em vários níveis de pressão e temperatura e a curva de linearidade do sensor.

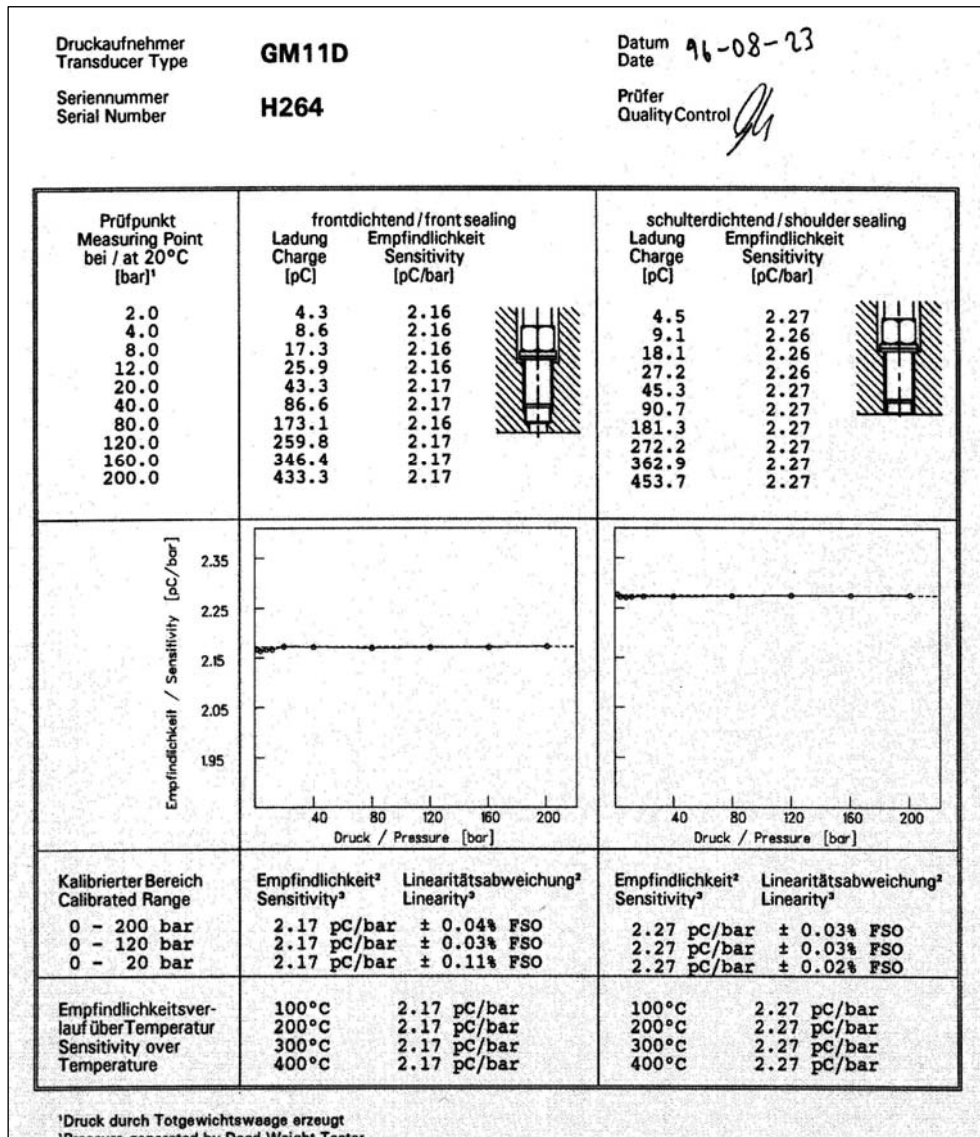


Figura 2.14 - Certificado de calibração do sensor AVL GM11D

### 2.11.2 Características do transdutor piezelétrico

O transdutor piezelétrico, para apresentar um bom desempenho, deve possuir as características físicas e dinâmicas apresentadas abaixo:

#### 1) Características Físicas:

- a) Extrema dureza e resistência mecânica, pequena deformação e alta frequência natural.
- b) Excelente linearidade, alta estabilidade e sensibilidade em várias faixas.

- c) Pequena variação da constante piezométrica com mudança da temperatura.
- d) Não possuir efeito termoelétrico.

## 2) Características Dinâmicas

- a) Sensibilidade à Aceleração.

O transdutor de pressão piezométrico pode ser comparado com um sistema composto por uma massa sustentada verticalmente por uma mola. O movimento acelerado do transdutor de pressão produz um sinal de saída devido à força de inércia gerada pela massa do elemento de quartzo, que é somada ao sinal medido. A sensibilidade à aceleração do sistema é medida através da oscilação vertical de uma massa de 1 grama submetida à aceleração da gravidade ( $g = 9,81\text{m/s}^2$ ). Com a instalação de um sistema de compensação da aceleração da massa no interior do amplificador de carga a sensibilidade à aceleração pode ser reduzida a valores mínimos, menores que  $10^{-3}$  pC/g.

- b) Características da frequência.

O sistema massa / mola possui uma faixa característica de frequência natural que influencia na medição. Os materiais com alto grau acústico e frequência natural, quando submetidos a processos adequados de fabricação, geram sensores com alta qualidade. Como regra geral um erro menor que 1% é obtido quando o sensor é utilizado acima de 10% da sua frequência natural.

- c) Características da temperatura de trabalho

Os transdutores de pressão piezométricos são submetidos a condições severas de operação nas câmaras de combustão, onde devem suportar extremas cargas, choques térmicos e longos tempos de exposição a altas temperaturas sem alterar sua linearidade (AVL Hand book 1994).

### 2.11.3 Seleção do transdutor

Diversos tipos e diferentes tamanhos de transdutores de pressão piezométricos estão disponíveis. Por causa da grande variedade, selecionar um transdutor pode ser uma tarefa

complexa, pois cada uso requer determinadas exigências de instalação. Além disso, o transdutor é um dispositivo imperfeito, que frequentemente introduz erro na medição da pressão. A falta de linearidade e sensibilidade devido às tensões térmicas, são geralmente, os problemas mais comuns, que podem ser minimizados selecionando-se transdutores refrigerados a água. Tem-se observado que tais transdutores é a melhor escolha; no entanto uma instalação mal feita pode comprometer o seu desempenho. Além disso, os erros podem aparecer se o transdutor não for preparado com cuidado.

Os principais tipos de sensor utilizados para a medição de pressão de combustão são os piezelétricos (refrigerados e não refrigerados) para pressões quase estáticas, piezoresistivos para a medição de baixa pressão estática, miniatura M5 sem refrigeração e velas de ignição com sensor interno.

A superfície oposta de um sensor de pressão do tipo piezelétrico fica carregada eletricamente quando o sensor é mecanicamente comprimido por uma força. Essa carga elétrica, medida em pC ( $1 \text{ pC} = 10^{-12} \text{ Coulomb}$ ), é exatamente proporcional à força que age no cristal de quartzo. Os sensores do tipo ativo não podem efetuar precisas medições estáticas, somente quase estáticas. Por outro lado, são excelentes para efetuar precisas medições em processos mais rápidos.

A Kistler e a AVL oferecem uma larga linha de sensores para as mais diversas aplicações. Os tipos refrigerados são mais utilizados quando se requer elevada precisão da indicação da pressão. São montados nos motores com bastante espaço disponível no cabeçote do cilindro. Essa utilização se constitui numa regra geral para os motores de 4 cilindros com uma capacidade maior que 2 litros, ou motores de 6 cilindros com capacidade maior que 3 litros. O tipo não refrigerado apresenta sempre uma precisão próxima dos sensores refrigerados a água. Pode ser usado em ambientes demasiadamente agressivos devido a sua isolação elétrica, à terra e a seu projeto robusto. Para espaços extremamente restritos nos motores pequenos, os sensores de pressão miniatura oferecem a melhor solução. Para sua instalação necessitam, mesmo nos motores refrigerados a água, somente um furo de acesso de 10 mm de diâmetro (Kuratle, 1995). A figura 2.15 mostra a secção transversal do sensor refrigerado e do sensor não refrigerado.

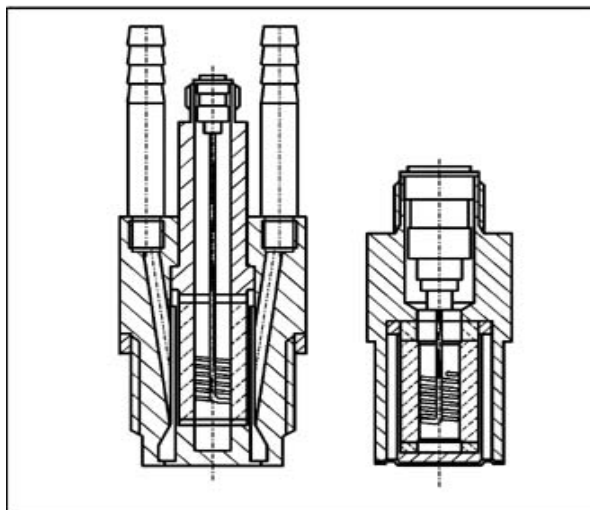


Figura 2.15 - Seção transversal de sensor refrigerado (à esquerda) e não refrigerado (à direita)

Os sensores piezoresistivos medem a pressão por meio de uma ponte de resistência revestida com silicone. Os sensores do tipo passivo (figura 2.16) são excitados por uma corrente constante. São utilizados idealmente para a medição de pressão estática. Os sensores piezoresistivos são usados para a medição de baixa pressão no coletor de admissão e de descarga.

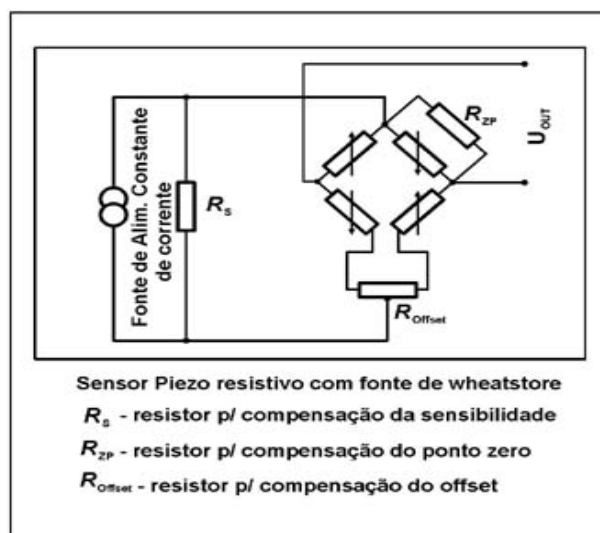


Figura 2.16 - Sensor Piezoresistivo com Ponte de Wheatstone.



Os sensores de pressão sem refrigeração do tipo miniaturas M5 são ideais para instalação nos motores com multiválvulas e câmaras de combustão pequenas. A melhor dissipação de calor é obtida com a instalação de uma luva de montagem tipo 6525 (figura 2.17), que faz a vedação na parte dianteira do sensor. O tipo 6051, da Kistler, é particularmente apropriado para os motores de alta velocidade porque é menos sensível à vibração. Por causa da sensibilidade relativamente baixa dos sensores miniatura o cabo entre o sensor e o amplificador da carga deve ser tão curto quanto possível. Kistler recomenda que o amplificador esteja montado o mais perto possível do motor (Kuratle, 1995).

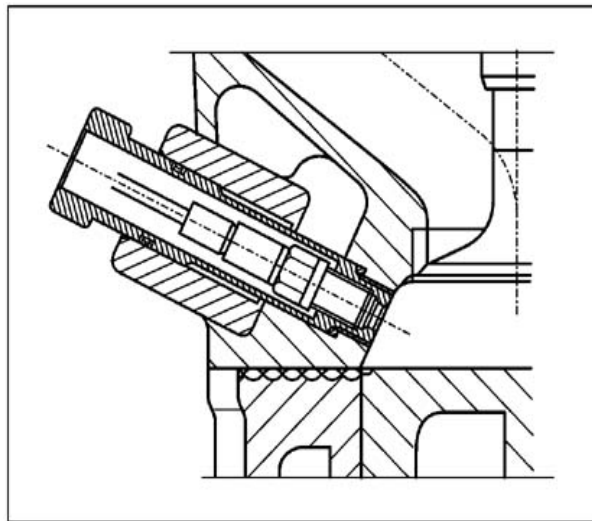


Figura 2.17 - Instalação do sensor miniatura tipo 6051 com luva adaptadora.

As velas de ignição de medição são usadas quando nenhuma modificação pode ser feita no motor. Sua maior aplicação é na calibração do módulo eletrônico de controle do motor. São ideais para aplicação em motores com velocidades acima de 4000 RPM desde que nenhuma ressonância na tubulação ocorra devido à mudança no projeto original. Estão disponíveis com diferentes graus térmicos, comprimentos de roscas e sedes de vedação (Kuratle, 1995). A figura 2.18 mostra a vela de ignição com sensor de medição tipo 6117 da Kistler.

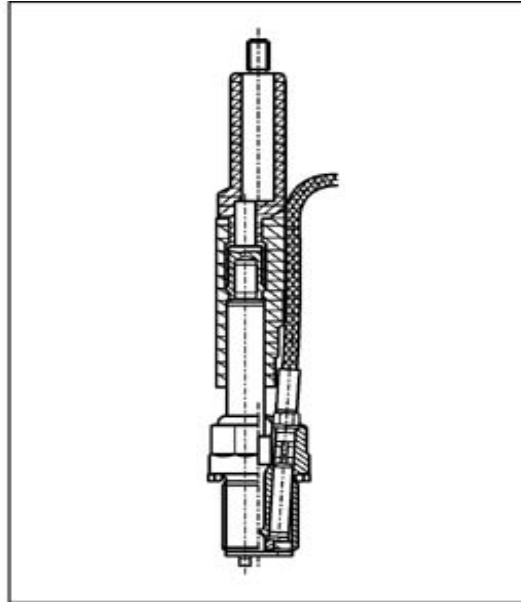


Figura 2.18 - Vela de ignição de medição tipo 6117 com conector isolado.

A figura 2.19 mostra o gráfico da sensibilidade térmica do sensor não refrigerado do tipo 6125 da Kistler, que é muito compacto, tem diafragma robusto e é apropriado para medições termodinâmicas e de pré-ignição no cilindro.

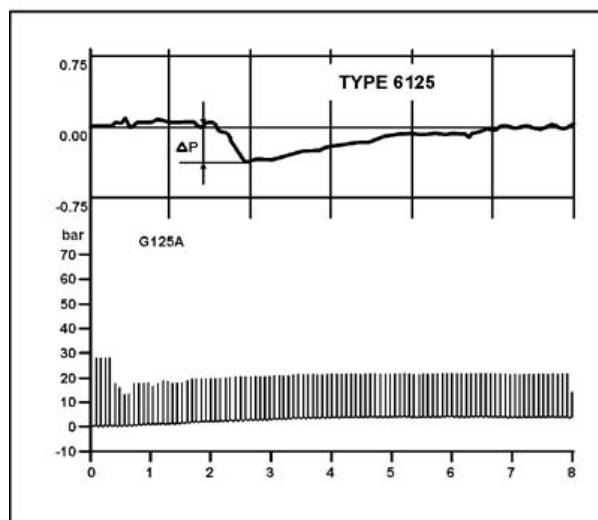


Figura 2.19 - Sensibilidade térmica do sensor não refrigerado do tipo 6125.

Alto: short term drift  $\Delta p < - 0,5$  bar

Abaixo: medium term drift  $< + 1,5$  bar

#### 2.11.4 Instalação do transdutor no motor

Os transdutores de pressão podem ser instalados diretamente no motor ou montados em um adaptador. O método de montagem direta necessita do mínimo espaço, exceto quando, para haver acesso à câmara de combustão, for necessário atravessar a cavidade de arrefecimento do cabeçote. Quando isso ocorre é necessário o uso de um adaptador. O transdutor de pressão pode ser instalado com sua vedação na parte frontal ou na parte intermediária. Dependendo do tipo de instalação, cargas térmicas irão produzir diferenças nos sinais medidos. O resultado na medição é mais preciso quando a instalação é feita com a vedação na parte frontal, devido à maior dissipação de calor na área de contato e à redução dos choques térmicos (AVLHandbook, 1994). A figura 2.20 mostra a montagem frontal e a figura 2.21 a montagem intermediária do transdutor M5 da AVL.

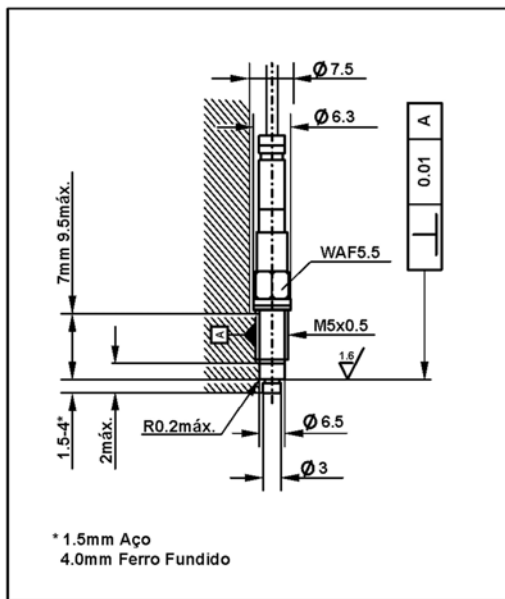


Fig.2.20 – Sensor com vedação frontal

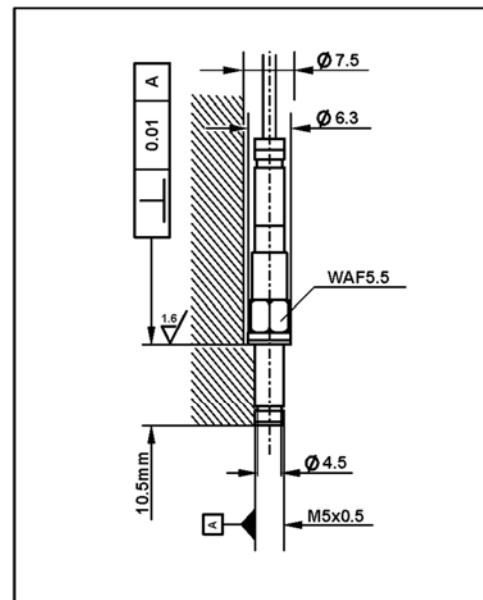


Fig.2.21 – Sensor com vedação intermediária

O transdutor deve ser instalado de acordo com as especificações do fabricante. A sensibilidade de saída de alguns transdutores é alterada quando os mesmos são fixados no motor e a eles é aplicado seu torque. Quando a montagem direta na câmara de combustão não é possível, a montagem com adaptador pode ser usada, mas esta é menos desejável.

Os sensores são instrumentos de precisão que requerem cuidadosa manutenção. O serviço de manutenção é essencial para a confiabilidade dos resultados da medição. Dependendo da aplicação e do tempo de operação, os sensores de pressão de quartzo devem ser limpos regularmente. Depósitos provenientes de resíduos da combustão, carbono e óleo lubrificante aderem ao diafragma e podem ser removidos com borracha de polimento ou com pasta de lapidação. Idealmente, a parte frontal do sensor deve ser submetida à limpeza final em um banho ultra-sônico. A isolação pode ser testada com o verificador de isolação da Kistler tipo 5493, ou equivalente. Os sensores piezoresistivos são sensores isolados com silicone. Nunca devem ser limpos mecanicamente ou em banho ultra-sônico.

#### **2.11.5 Calibração do transdutor**

A precisão com que a pressão do cilindro pode ser determinada não é maior do que a exatidão com que o sistema de medição foi calibrado. O termo sistema de medição é usado porque a calibração é feita com o transdutor e o amplificador de carga conectado. Preferencialmente, o uso de uma bomba de pressão de peso morto fornece as pressões para a calibração. Um voltímetro digital mede a tensão na saída do amplificador de carga.

O transdutor deve ser montado na bomba de pressão de acordo com as especificações do fabricante. É muito importante que todas as conexões entre o amplificador da carga e o transdutor estejam desengraxadas com o líquido de limpeza de contato. O amplificador de carga deve, então, ser conectado ao transdutor, aguardar seu aquecimento e estabilização por aproximadamente 1h antes da calibração. A calibração é feita com o amplificador de carga ajustado para a constante de tempo longa e na escala que será utilizado. Inicialmente, a sensibilidade do amplificador de carga é ajustada com o valor fornecido pelo fabricante do transdutor. O transdutor é carregado, então, pela bomba de peso morto até a pressão máxima a que será submetido durante a operação do motor.

Se o voltímetro digital mostrar um rápido “drift” na saída do amplificador nesse momento, as conexões dos cabos devem ser separadas e limpas novamente. Após a re conexão dos cabos, a espera de alguns minutos é outra vez requerida para que o sistema se estabilize. Se o “drift”

estiver ainda presente o transdutor deve ser removido, colocado numa estufa a vácuo e aquecido a uma temperatura de 370 a 395K por, aproximadamente, uma hora. O “drift” na saída do amplificador de carga é causado normalmente pela baixa resistência na isolação do transdutor ou nos cabos e suas conexões.

O processo de aquecimento em estufa freqüentemente aumenta a resistência da isolação do transdutor e elimina o “drift”. Se a resistência de isolação do transdutor estiver acima de  $10^{13} \Omega$  e o amplificador de carga ainda apresentar um “drift” demasiadamente rápido para uma calibração eficaz, o amplificador de carga e seus cabos devem ser verificados e limpos outra vez. Se o “drift” não puder ser controlado deve-se tentar a utilização de diferentes transdutores e/ou sensores até que o problema seja eliminado.

Uma vez que o “drift” da saída foi controlado, o transdutor deve ser carregado outra vez até a pressão máxima a que será submetido durante a operação do motor. A pressão aplicada ao transdutor pode ser rapidamente alterada (retirada, diminuída ou aumentada) com a remoção ou adição de pesos da bomba. A sensibilidade do amplificador de carga deve, então, ser ajustada para fornecer um valor uniforme na saída, como 100 kPa/V. O uso da sensibilidade padrão simplifica e reduz os dados.

Uma vez ajustada à sensibilidade, a linearidade do transdutor deve ser verificada observando-se a mudança na tensão gerada na saída, através do uso progressivo de pesos para o carregamento e descarregamento do transdutor, que deve apresentar valores lineares na faixa da calibração (Lancaster et al., 1975).

Todos os sensores de medição de pressão do cilindro são calibrados cuidadosamente antes de saírem da fábrica. Os sensores de pressão são calibrados em todo o range da escala de pressão e em várias temperaturas até 350°C. Esses valores são gravados na folha individual de calibração, que acompanha sempre o sensor.

Os fabricantes de sensores oferecem dois tipos de sistemas para a calibração do sensor: gerador de alta pressão hidráulica para a calibração quase estática e gerador de pulso de pressão para a calibração dinâmica, que é mais recomendada.

A calibração é feita por comparação do valor medido com o valor do sensor padrão. Após sua execução a sensibilidade e a linearidade do sensor devem ser determinadas e plotadas num gráfico. A sensibilidade é determinada através da equação 2.18 (Kuratle, 1995).

$$m = \frac{\sum Y[pC]}{\sum X[bar]} \quad (2.18)$$

A linearidade é determinada através da fórmula 2.19.

$$a[\%] = \pm \frac{(Y - m \cdot X)_{max}}{FS} \cdot 100 \quad (2.19)$$

A figura 2.22 apresenta um gráfico típico da linearidade e da sensibilidade do sensor.

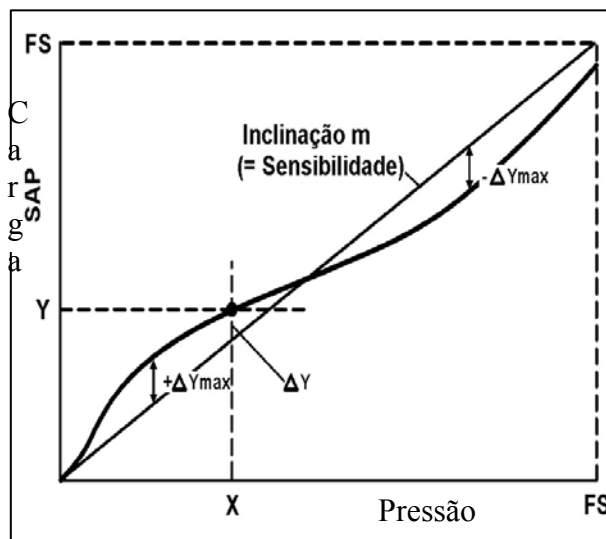


Figura 2.22 - Gráfico definindo a sensibilidade e a linearidade.

## 2.12 Amplificador de carga piezelétrica.

O amplificador de carga piezelétrica é utilizado para medição de cargas eletrostáticas geradas por transdutores de pressão, força e aceleração. Medições quase estáticas são possíveis devido à alta resistência na entrada do amplificador e medições dinâmicas devido a sua alta frequência de corte. Analogamente o amplificador de carga pode ser comparado a um capacitor de alta qualidade e isolamento que, ao armazenar essas cargas elétricas em suas armaduras, produz uma diferença de potencial, que poderá ser amplificada.

### 2.12.1 Princípio de funcionamento.

Para a conversão de carga elétrica em tensão o amplificador trabalha com o mesmo princípio de um amplificador operacional. O comprimento do cabo de conexão do transdutor (capacitância) não interfere no resultado da medição. A realimentação  $C_K$  é capacitiva e corresponde ao sinal medido. A carga de alimentação ( $I_n$ ) na entrada pode ser desviada apertando o botão de reset, que descarrega a carga  $C_K$  do capacitor. O canal de alimentação  $I_n$  é altamente isolado e contém um transistor MOSFET (metal óxido de silício de efeito de campo) associado a um amplificador operacional com ganho aberto, o qual se comporta como um amplificador ideal ( $I_1$ ). O transistor MOSFET é sensível a tensões estáticas  $> \pm 40$  V e protegido por um circuito na alimentação.

Segundo Thevenin (19XX), um transdutor de medição piezelétrico comporta-se como fonte de tensão quando conectado em série com uma resistência capacitiva. A tensão gerada  $V_s$  é proporcional ao valor da carga que está sendo medida, podendo ser obtida através da fórmula 2.21.

$$Q = Kp = V_s C_s \quad (2.20)$$

Onde:

Q = Carga em pC

K = Constante de conversão pC/bar

P = Pressão em bar

V<sub>S</sub> = Tensão em Volts

C<sub>S</sub> = Capacitância do transdutor em pF

Como o ganho do amplificador operacional é aberto, a função de transferência é mais ou menos independente da impedância de entrada e do valor da capacitância C<sub>S</sub>. O comprimento do cabo de conexão do transdutor não afeta o resultado da medição. A tensão de saída no amplificador pode ser determinada pela fórmula 2.22.

$$V_{saída} = \frac{Q}{C_K} A \quad (2.21)$$

Q = Carga em pC

C<sub>K</sub> = Sinal negativo da realimentação do amplificador

A = Fator de ganho

O sistema de compensação aplica na entrada do amplificador, uma corrente de compensação I<sub>INSUL</sub> equivalente à corrente perdida pela soma dos resistores de isolação. O circuito de controle fornece a tensão de controle V<sub>Control</sub>, que faz circular a corrente de compensação I<sub>Comp</sub> por um resistor com alta resistência ôhmica, fazendo com que a tensão de saída do conversor fique zero. Apesar de não existir sinal na entrada do amplificador o módulo S/H é acionado, fazendo com que o circuito de controle mantenha a saída do conversor em zero (compensação do “drift”).

Quando um sinal é aplicado na entrada o sinal do “trigger” é transmitido ao controlador para marcar o momento em que a saída deve ser zero. Esse sinal não é aplicado no módulo S/F enquanto o período de tempo do sinal for T < 1,2 s, que é equivalente a 100 RPM num motor de quatro tempos. Quando o sinal de entrada for transmitido a um intervalo de tempo T > 1,2 s, o modulo de controle fica permanentemente no modo de compensação de “drift”, mantendo a saída do amplificador em zero.



Essa ação do controlador evita o risco de instabilidade do sistema quando o tempo do pulso do “trigger” for muito longo. O intervalo de tempo do sinal do “trigger” é gerado internamente através de um comparador e de um contador de pulsos, pegando o período entre dois sinais de pressão e dividindo por dois (AVL,1993). A figura 2.23 mostra o diagrama funcional do amplificador de sinal AVL para sensor piezoelétrico.

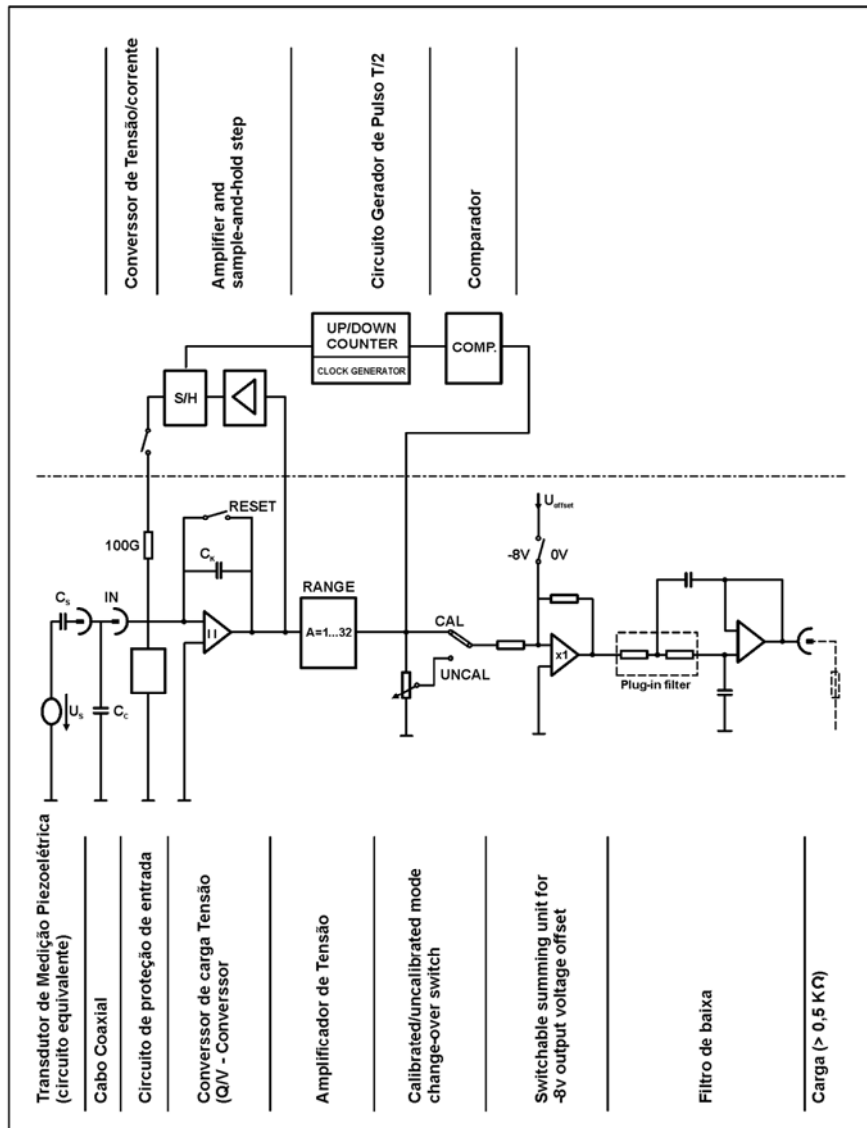


Figura 2.23 - Diagrama funcional do amplificador AVL

### 2.12.2 Efeito da Constante de tempo na Medição com Transdutor

O Processamento de cargas elétricas requer elevada resistência de isolamento do transdutor e de todas as conexões entre o transdutor e o amplificador de carga, porque sua resistência não é infinita e ocorre a fuga da carga. Assim, os dispositivos piezelétricos não podem ser usados para medição de pressão estática ou absoluta.

O amplificador de carga afeta também a taxa de circulação. Por isso, os seus ajustes podem influenciar a exatidão das pressões medidas. A figura 2.24 mostra a conexão do transdutor com o amplificador

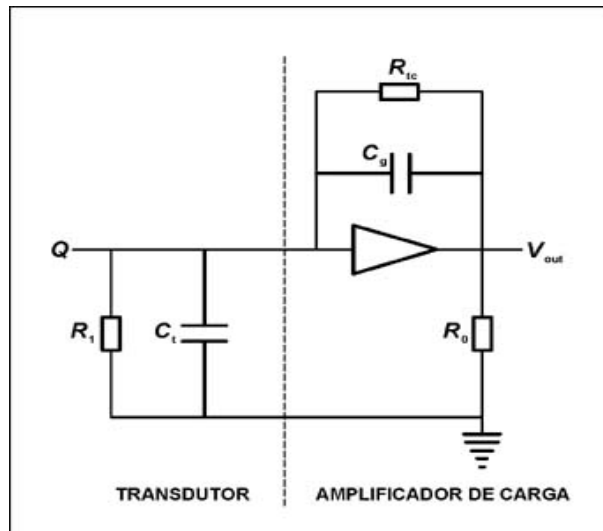


Figura 2.24 - Diagrama elétrico do transdutor com o amplificador de pressão.

Há dois caminhos paralelos para a circulação da carga do transdutor. A resistência de isolamento,  $R_1$ , do transdutor, fornece o primeiro. O segundo caminho é através da resistência da constante do tempo do amplificador,  $R_{tc}$ , que está em série com uma resistência muito menor,  $R_0$ , entre a saída do amplificador e o terra. A resistência do segundo caminho é efetivamente  $R_{tc}$ . As resistências deste caminho paralelo de circulação e o ganho da capacitância do amplificador,  $C_g$ , fornecem a constante de tempo do sistema  $\tau$  através da equação 2.22 (Kistler, 1972).

$$\tau = C_g \frac{R_{tc} R_1}{R_{tc} + R_1} \quad (2.22)$$

A constante do tempo não é o tempo de resposta do sistema para o processamento de um sinal de entrada. É a medida da taxa de circulação da carga. A constante do tempo do sistema é aumentada modificando a constante de tempo do amplificador ou o range de sua escala. Aumentar o range da escala do amplificador aumenta o ganho da capacitância,  $C_g$ , e diminui o ganho de amplificação.

A tabela 2.2 apresenta valores da constante de tempo do sistema para diferentes ajustes do amplificador da carga adotando para R1 os valores  $10^{10}\Omega$  e  $10^{14}\Omega$ . Para a medição precisa da pressão do motor a constante de tempo do sistema deve ser de 1 segundo. Dois problemas podem ser encontrados para ajustar a constante do tempo com esse valor: ruído e “drift” no sinal. Aumentando-se o range da escala do amplificador de carga diminui-se a relação entre o sinal e o ruído na saída. Aumentando-se a constante do tempo do amplificador de carga pode-se causar problemas de “drift” no sinal (Lancaster et al., 1975).

Tabela 2.2 - Sistema da Constante de tempo do Amplificador Kistler modelo 504M 115.

Range do Amplificador		Constante do Amplificador		Sistema da Constante do Tempo	
Ajuste	Cg ( pF)	Ajuste	Rtc ( $\Omega$ )	RI = $10^{10}$	RI = $10^{14}$
10	$10^2$	Curto	$10^9$	0.1	0.1
10	$10^2$	Médio	$10^{11}$	1.0	10.0
10	$10^2$	Longo	$10^{14}$	1.0	$10^4$
100	$10^3$	Curto	$10^9$	1.0	1.0
100	$10^3$	Médio	$10^{11}$	10.0	$10^2$
100	$10^3$	Longo	$10^{14}$	10.0	$10^5$

### 2.13 Aquisição dos dados

Antes da aquisição dos dados do sistema aplica-se uma tensão DC calibrada num canal de entrada disponível, digitalizando essa tensão pelo conversor AD da placa de aquisição. Esse sinal calibrado conhecido é utilizado para comparação com o sinal processado, determinando desta forma a precisão do sistema de digitalização.

Enquanto o motor funciona é feita a aquisição dos valores de pressão de combustão, da posição angular do virabrequim e do disparo da vela de ignição, que são sincronizados pelo sinal “trigger” do “encoder” por um período de tempo pré-determinado. A maioria da literatura citada neste trabalho informa que são digitalizados 300 ciclos para medição da pressão de combustão e 100 ciclos para medição da pressão de compressão. O número de ciclos que deve ser obtido depende das condições de operação do motor e do nível de ruído do sistema. Isso será discutido no item Análise dos resultados.

Enquanto os dados de pressão são adquiridos do motor, outros dados referentes a sua performance e emissões são medidos simultaneamente. Não se pode deixar de medir a pressão do coletor de admissão e a do coletor de escapamento. Como o sensor piezelétrico só mede pressão relativa para determinação da pressão absoluta no ciclo termodinâmico esses dois valores são necessários. A utilização da pressão de admissão e de escapamento será discutida posteriormente, no item Metodologia para Análise dos Resultados.

Vários dados do motor podem ser adquiridos conveniente e rapidamente, porém antes uma cuidadosa análise de uma quantidade mínima de dados deve ser efetuada e processada para se descobrirem dificuldades ou problemas no sistema de aquisição (Lancaster et al., 1975).

### 2.13.1 **Operação inicial**

Após a montagem do transdutor de pressão no motor e antes da aquisição dos dados várias verificações deverão ser efetuadas. Com o motor funcionando espera-se até o sistema aquecer e verifica-se o sinal gerado num osciloscópio. O range de tensão, a sensibilidade do sensor e a constante de tempo do amplificador de carga devem ser ajustadas. Ajusta-se a constante de tempo para “Long” ou até as correntes indesejáveis desaparecerem. A constante de tempo não mede o tempo de resposta de um sinal de entrada no sistema e sim o tempo necessário para que o sinal não se deteriore. Em medidas de pressão em motores a redução do sinal causa valores incorretos nas leituras de pressão do cilindro durante o processo de bombeamento, por isso é aconselhável minimizar essa deficiência aumentando-se a constante de tempo enquanto o sinal de corrente indesejável for encontrado.

Nos motores de ignição por velas um problema freqüentemente encontrado é um ruído acrescido ao sinal do transdutor. Esse ruído é um problema grave, pois não é aleatório e ocorre num ponto em que o volume do cilindro é pequeno e muda lentamente com a variação do ângulo do virabrequim. Ruídos de velas podem ser eliminados com sucesso instalando-se cabos supressivos e utilizando-se um transformador isolado com filtro de linha na alimentação do osciloscópio (Lancaster et al., 1975).

### 2.13.2 Procedimento para referenciar a pressão medida

Antes do cálculo da média, deve-se ter uma quantidade suficiente de dados escalados, isto é, deve-se atribuir um valor de pressão absoluta associado a um volume absoluto do cilindro. Já que a pressão foi digitalizada em sincronismo com a posição do virabrequim, o volume é facilmente determinado através da equação 2.7.

O procedimento de referenciar a pressão é um processo complexo. Os dados obtidos através do sistema digital de aquisição estão na forma de “integer” (número inteiro). Três passos devem ser efetuados para converter os dados de “integer” em pressão absoluta do cilindro:

1. Determina-se a média de dois sinais de tensão de calibração digitalizada. O valor médio digitalizado é associado a cada uma das duas tensões de calibração. Calcula-se a relação entre a tensão digitalizada e a tensão da célula de calibração. A inclinação da reta obtida através dos dados da calibração é o fator de ganho do sistema (Fisher e Macey, 1975).
2. O ganho do sistema e o fator de calibração do amplificador de carga com o transdutor de pressão são utilizados para converter o dado na forma de *integer* para a pressão relativa.
3. As pressões relativas são multiplicadas por um valor constante para serem convertidas em pressões absolutas do cilindro.

Há várias técnicas disponíveis para a determinação do valor da constante de conversão da pressão relativa em pressão absoluta. Todas envolvem a identificação de um ponto no ciclo, usualmente na região de gás de escape, onde a pressão do cilindro pode ser estimada com precisão. Então, todos os valores de pressão relativos podem ser referenciados a esse valor.

O procedimento utilizado por Lancaster para o passo 3, prevê que a pressão no cilindro, quando o pistão está no PMI após o tempo de admissão, é igual à pressão média do coletor de admissão obtida durante os testes. Isso se justifica por não haver condições de ocorrer fluxo de

fluido nesse instante do ciclo: o pistão parado, a válvula de escapamento fechada e a válvula de admissão parcialmente aberta permitem um pequeno fluxo provocando a queda de pressão no cilindro. Por essa razão a pressão média do coletor de escapamento é uma estimativa precisa da pressão do cilindro nesse instante. Em alguns casos esse procedimento não é confiável devido a efeitos cíclicos no coletor de admissão (Lancaster et al., 1995).

### 2.13.3 Procedimento para Sincronizar o Sistema de Aquisição de dados ao TDC.

O “encoder” (gerador de pulso) é acionado pelo eixo de manivela do motor. Para alinhá-lo gira-se o mesmo com a mão até que o traço de referência do “trigger” coincida com o TDC. Como o gerador de pulso é fotoelétrico, possui saída estática que permite ajustar o sincronismo inicial observando-se uma luz de indicação no “encoder”.

O pulso do “trigger”, correspondente ao ângulo zero do sistema de aquisição, deverá estar sincronizado com o TDC do pistão. Para a verificação conecta-se uma lâmpada estroboscópica na saída do canal do “trigger” e, com o motor funcionando verifica se a seta de indicação do TDC coincide com o pulso do “trigger”. Se este pulso não ocorrer no ângulo desejado, o “encoder” deve ser reajustado.

Como o gerador de pulso é acionado pelo eixo de manivela e foi sincronizado com o PMS, irá emitir um pulso de referência do PMS a cada volta do motor. A fim de se iniciar a aquisição do sinal do PMS somente no tempo de admissão, o sinal da pressão do coletor de admissão do motor pode ser usado como o sinal de entrada do “disparador Schmitt”. Esse “disparador” é ajustado de modo a não fazer a aquisição do pulso de referência do PMS quando a pressão estiver acima de um determinado nível, não adquirindo o pulso de referência do PMS no tempo de compressão.

O número de aquisições por volta é fixo e deve, conseqüentemente, ser decidido previamente, no momento da seleção da resolução do gerador de pulso. Os fatores que devem ser considerados incluem a taxa máxima esperada de amostragem da pressão do cilindro e a capacidade do sistema de aquisição. Para o motor de ignição por centelha a taxa de ascensão da

pressão é relativamente baixa. A aquisição de pressão a cada intervalo de 1° grau de deslocamento do virabrequim fornece resolução suficiente. Nos motores diesel, a taxa de ascensão da pressão é extremamente elevada, a aquisição a cada intervalo de 0,5° graus de deslocamento é necessária para definição precisa da curva de pressão.

O registro de grande densidade de dados com resolução angular adequada é o fator responsável pela especificação e limitação do sistema de aquisição. Um motor que opera com 2400 RPM requer uma taxa de aquisição de 14.400 amostras por segundo para fazer a aquisição de dados de um canal de pressão em intervalos de um grau de posição angular do virabrequim. Fazer a varredura de mais canais ou fazer a aquisição em intervalos menores aumenta proporcionalmente a necessidade de maior taxa de amostragem. A taxa de amostragem requerida deve ser mantida dentro das potencialidades do sistema. Caso contrário, gravam-se os dados em fita analógica e depois se processa os mesmos em velocidade mais baixa.

#### **2.14 Metodologia para análise dos dados medidos**

Uma pré-avaliação dos dados para verificar se estão suficientemente refinados e se a medição efetuada representa o fenômeno físico deve ser feita antes de qualquer consideração. Dois fortes argumentos justificam a obtenção da média da pressão de vários ciclos consecutivos de medição em vez de se considerar um único ciclo. O primeiro argumento é estatístico: para vários ângulos de posição do virabrequim a média de n medidas é mais precisa para obtenção da pressão média do que a utilização dos dados de um único ciclo. Isso porque a variância da média diminui com o número de ciclos utilizados. O segundo argumento é devido à responsabilidade de se comparar os dados obtidos com os valores medidos no dinamômetro.

O motor gera valores médios de pressão de combustão correspondentes à média de valores de vazão de ar e combustível, obtendo uma potência média indicada; por isso é apropriado o uso da média de vários ciclos quando se quer comparar a potência indicada calculada com a potência medida em banco de prova.



A questão é saber: quantos ciclos consecutivos são requeridos. A resposta não é simples, pois depende da variação entre os dados obtidos e a precisão da análise que se deseja obter. Em condições estáveis de operação a pressão de combustão se repete, sendo necessário um pequeno número de ciclos. Em condições instáveis onde os dados apresentam grande variação são necessários vários ciclos. A figura 2.25 mostra o resultado de um estudo realizado para verificar a quantidade de ciclos necessária. Os dados do gráfico superior são de um motor com grande instabilidade cíclica da pressão, o valor médio de 300 ciclos foi dividido pela média de 6 a 300 de ciclos medidos. Verifica-se que o resultado da divisão só se estabilizou com 300 ciclos e a confiabilidade foi de 99,9% e desvio de 3%. O gráfico inferior é o resultado de um ensaio de um motor com grande estabilidade cíclica da pressão, onde 40 ciclos foram suficientes para a mesma confiabilidade de 99,9% e desvio de 3% (Lancaster et al., 1975).

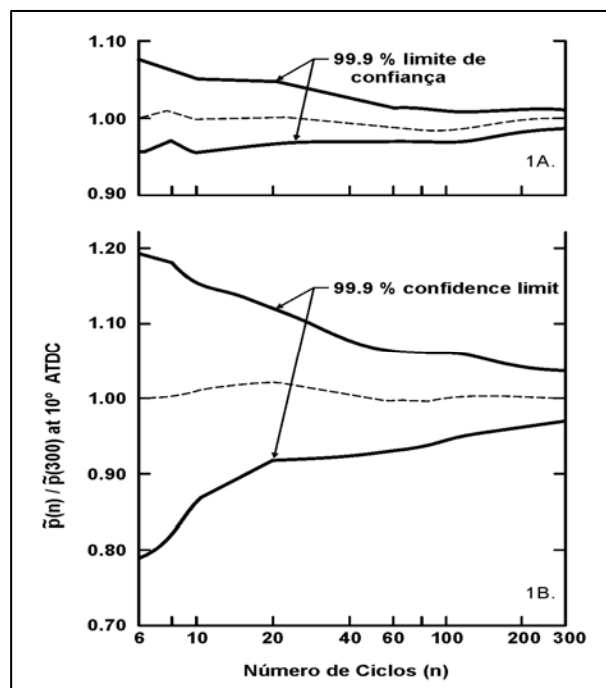


Figura 2.25 - Normalização da média de pressão versus o número de ciclos para uma condição estável e instável.

Além da variabilidade inerente aos dados, outro fator usado para determinar o número dos ciclos a serem gravados deve ser a exigência de precisão a que os dados estarão sujeitos tendo em

vista sua aplicação. Quando a variabilidade cíclica é elevada para a computação o IMEP ela pode requerer centenas de ciclos.

Em seus estudos da variação cíclica, Peters e Borman (1967) observaram que a variação do IMEP foi de 7%, mesmo que os picos de pressões variassem em torno de 65%. Já o estudo efetuado por Lancaster mostrou que para obter a confiabilidade de 99,99% e variação de 3% no IMEP são necessários 300 ciclos. A figura 2.26 mostra a normalização da média da IMEP versus o número de ciclos para uma condição instável (Lancaster et al., 1975).

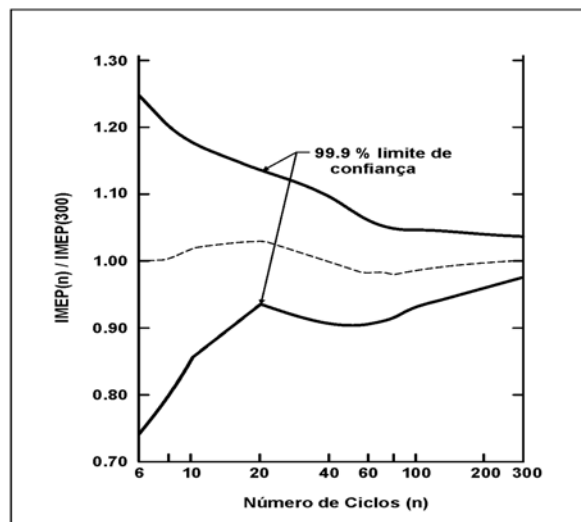


Figura 2.26 - Normalização da média da IMEP versus o número de ciclos para uma condição instável.

#### 2.14.1 Metodologia para análise dos dados do motor sem ignição

O analista, agora, possui suficiente informação para gerar o diagrama pressão-volume (p-V) e calcular significativas grandezas termodinâmicas. Ele deve ser cuidadoso de modo a resistir ao impulso de processar os dados gravados do teste com ignição antes de analisar cuidadosamente os resultados do teste sem ignição. A razão é simples: para o teste sem ignição complicações devido à não homogeneidade, alta taxa de transferência de calor e outras grandezas primárias da combustão estão ausentes. Os dados sem ignição apresentam pequena variação ciclo a ciclo e

podem produzir considerável informação sobre a exatidão e confiabilidade no procedimento dos parâmetros estabelecidos para o teste e para o registro dos dados.

A primeira avaliação a ser feita nos dados sem ignição é verificar o faseamento da pressão com seu respectivo volume através do exame da curva da média das pressões versus a posição angular do virabrequim, perto da região do pico de pressão.

A curva obtida deverá ser semelhante à curva da pressão de compressão em função da posição angular do virabrequim de um motor CFR (“cooperative fuel research engine”) operando em duas velocidades, conforme mostrado na figura 2.27 (Lancaster et al., 1975).

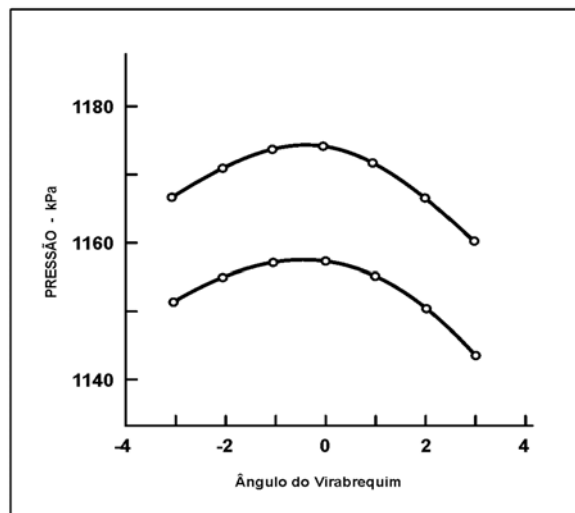


Figura 2.27 - Pressão de compressão versus posição angular do virabrequim.

O pico de pressão ocorre após o PMS devido à irreversibilidade causada principalmente pela transferência de calor. Se o pico de pressão ocorrer após ou no PMS, o dado de pressão está atrasado em relação ao seu respectivo volume. Por outro lado, se o pico de pressão ocorrer mais que dois graus antes do PMS, a pressão está, provavelmente, adiantada em relação ao seu respectivo volume. A figura 2.28 é um diagrama p-V dos dados de pressão de um motor CFR sem ignição (Lancaster et al., 1975).

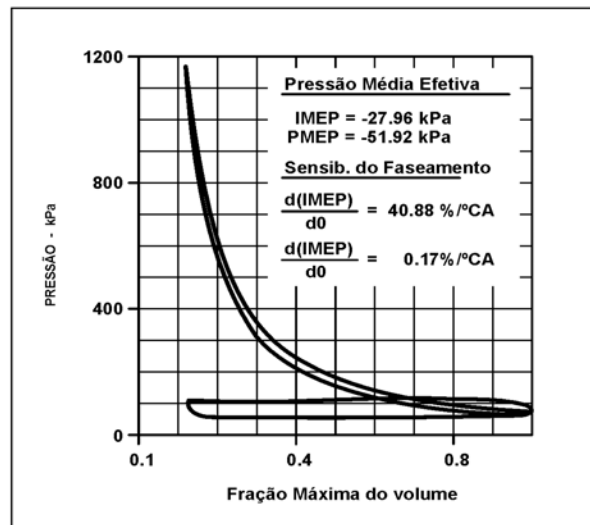


Figura 2.28 - Diagrama da pressão versus volume com motor acionado

Este diagrama é usado para verificar a qualidade da curva de pressão de bombeamento. Na maioria dos casos, o traço de linha de pressão de descarga, no diagrama, deve estar abaixo da pressão média do coletor de descarga no tempo de escapamento do motor. Similarmente, durante parte do curso de admissão no instante em que o fluxo de gás é alto a linha de pressão do cilindro deve cair abaixo da pressão média medida no coletor de admissão. Discrepâncias nesses pontos indicam erro no referenciamento da pressão medida no cilindro com a pressão de referência (média medida no coletor de descarga).

Também podem ser verificados, através do diagrama da figura 2.28, os valores computados da IMEP, da PMEP e suas sensibilidades em relação ao faseamento, à pressão e às variações do volume. A PMEP é relativamente insensível às mudanças devido ao faseamento. Entretanto, a

IMEP sem ignição muda aproximadamente 41% se a pressão for avançada ou retardada um grau do ângulo do virabrequim com relação ao seu volume. Quando a IMEP do motor com combustão for determinado indiretamente através da medição do torque em dinamômetro, a IMEP sem ignição computada é considerada zero. A IMEP de um motor com ignição, estimado através do torque medido no dinamômetro, apresenta erro devido ao fato que o IMEP do motor sem combustão não ser zero (Lancaster et al., 1975).

O diagrama logarítmico p-V, obtido com os mesmos dados da Figura 2.28, é mostrado na figura 2.29 (Lancaster et al., 1975). Através dele pode-se determinar a qualidade das informações com relação ao referenciamento, o faseamento e o desempenho do transdutor. A curva de compressão, no instante em que a válvula de admissão se fecha (ponto IVC da figura) até o pistão alcançar quase o TDC, pode ser modelada como um processo politrópico:  $PV^n = \text{constante}$ . Esta função traça uma linha reta no diagrama logarítmico, com uma inclinação igual a n e pode ser calculado através da equação 2.23.

$$n = \log \frac{(p1 / p2)}{(v2 / v1)} \quad (2.23)$$

O desvio de uma linha reta pode ser causado por diversos fatores, os quais serão discutidos na seqüência.

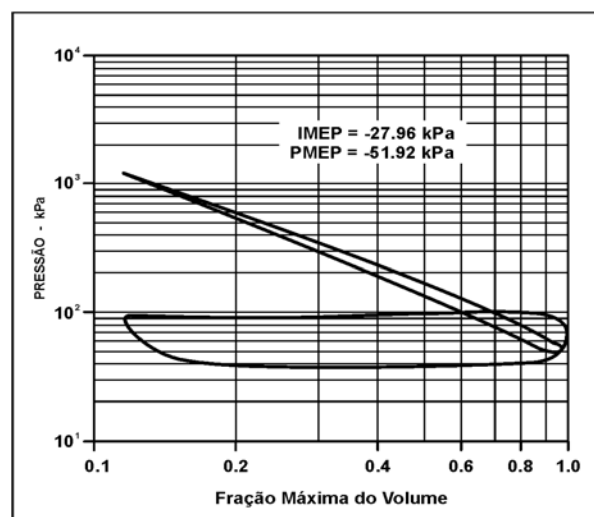


Figura 2.29 - Diagrama log p-log v corretamente faseado e referenciado com motor acionado

A figura 2.30 é uma duplicata da figura 2.29, com exceção da pressão de referência, que é 20kPa menor (Lancaster et al., 1975). Uma curvatura é introduzida na linha da compressão, que é visível somente durante a primeira parte do curso. Esse desvio é facilmente detectado e as correções podem ser feitas. Note que a região de alta pressão do diagrama não é afetada pela mudança e também os MEP computados não se alteram.

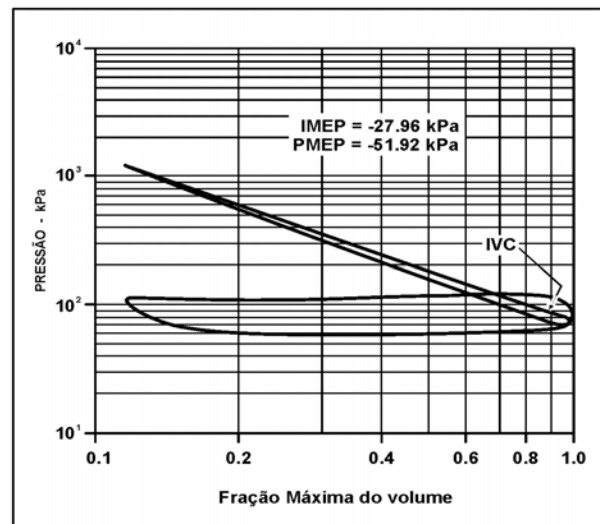


Figura 2.30 - Diagrama obtido com os dados da figura 2.29 com 20 libras a menos

Se a pressão de referência estiver correta mas o volume de deslocamento atribuído estiver errado, o efeito de distorção é similar, mas aparece agora na extremidade oposta ao curso da compressão, perto do PMS.

A figura 2.31 é um exemplo de caso em que o volume do cilindro é 14% menor do que o valor usado na figura 2.30 (Lancaster et al., 1975). Note outra vez que a extremidade da baixa pressão no curso de compressão praticamente não é afetada por essa mudança. Como antes, as MEP computadas ficaram inalteradas.

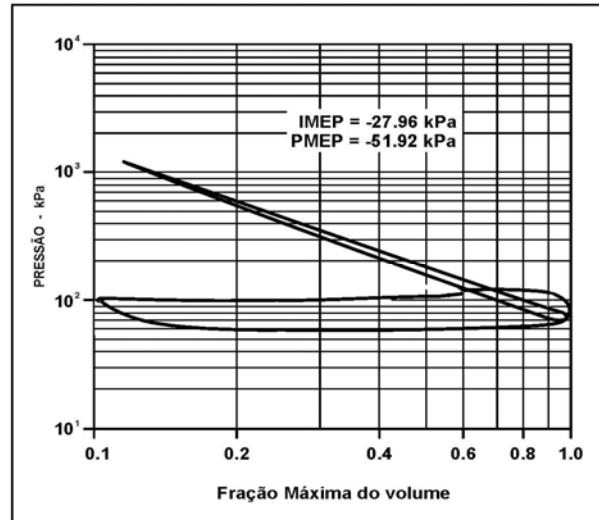


Figura 2.31- Mesmos dados da figura 2.30 com o volume reduzido em 14 %

Nas figuras 2.30 e 2.31, a parte central das linhas da compressão praticamente não é afetada pela atribuição errônea da pressão de referência ou do volume de deslocamento. Se os dados estiverem corretamente faseados e não houver a geração de uma reta é sinal de que a medição da pressão não foi correta.

O diagrama da figura 2.32 foi gerado com os dados do diagrama da figura 2.30, mas com o faseamento entre a pressão e a posição angular do virabrequim retardado dois graus (Lancaster et al., 1975). Note que a linha da expansão cruzou-se com a linha de compressão perto do PMS.

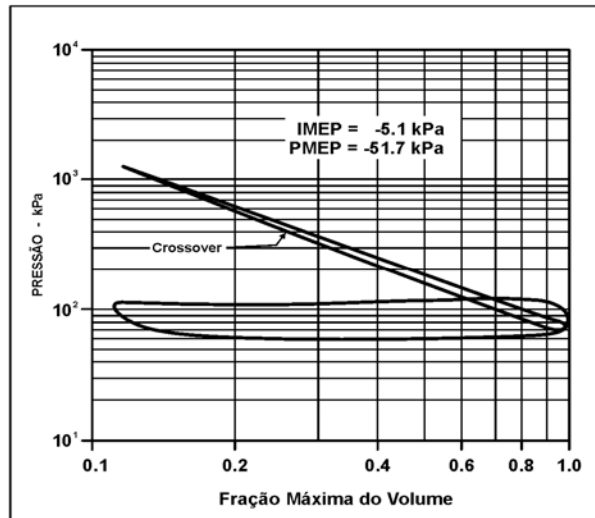


Figura 2.32 - Diagrama gerado com os dados da figura 2.30 com defasagem de 2° CA.

Um outro indicador da qualidade dos dados do motor sem ignição, que pode ser utilizado na avaliação dos dados é o expoente politrópico que corresponde à inclinação da linha de compressão. Dados obtidos em CFR, indicam que este expoente varia de 1,24 a 1,35, dependendo da velocidade do motor, da composição da mistura e do nível da turbulência.

Valores de inclinação fora desta faixa indicam erro no referenciamento da pressão de combustão com a pressão do coletor de admissão. Os dados que estão corretamente faseados e referenciados, mas com inclinação e/ou curvatura imprópria na linha da compressão ou da expansão indicam que a calibração do sistema ou o desempenho do transdutor é suspeito. A figura 2.33 mostra dois diagramas sobrepostos, obtidos com os dados de um motor CFR, sem ignição e na mesma condição de operação, exceto o ajuste da constante de tempo do amplificador (Lancaster et al., 1975). Note que a linha de compressão é completamente similar, mas os dados coletados com a constante do tempo ajustada para curta mostram uma perda do sinal, durante a expansão.



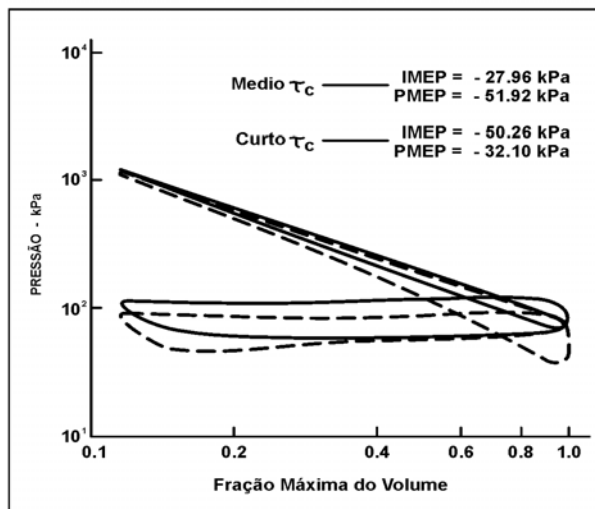


Figura 2.33 - Efeito da constante de tempo no diagrama log p-logV.

#### 2.14.2 Análise dos Dados do Motor com Ignição

Logicamente a análise dos dados da pressão do motor sem ignição é similar ao estudo das pressões do motor com ignição. O analista é advertido outra vez para seguir a seqüência das etapas apresentadas acima e resistir à tentação de olhar imediatamente os resultados dos dados do motor com ignição.

Com os dados do diagrama p-V do motor com ignição a IMEP pode ser calculada diretamente. Esse é o valor verdadeiro. Se calculada através das medidas do torque do dinamômetro tem-se uma estimativa do valor.

A fig 2.34 mostra o diagrama p-V gerado com os dados do motor com ignição, o IMEP e a PMEP computadas, além da sensibilidade destes parâmetros ao faseamento (Lancaster et al., 1975). Os motores com taxa de crescimento da pressão de combustão de baixa a moderada são mais tolerantes ao erro de faseamento. Segundo Brown (1967), os motores diesel apresentam taxas elevadas de ascensão da pressão. Uma resolução angular da ordem de 0,1° CA é requerida para manter o erro da IMEP menor que 1%. Essa resolução pode ser ampliada para 0,2° ou 0,3° CA para a maioria dos motores com ignição por vela.

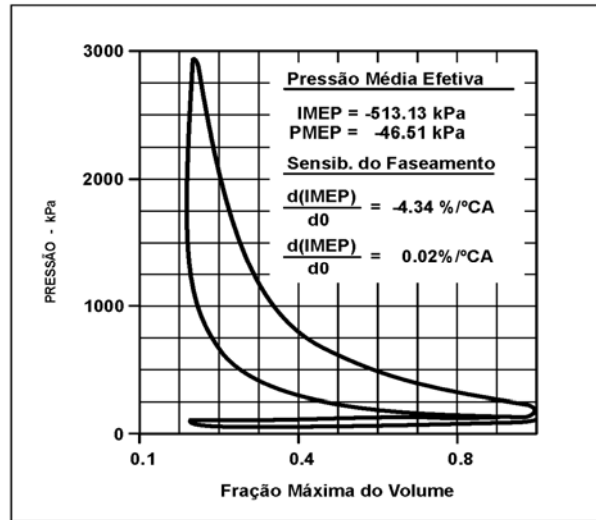


Figura 2.34 - Diagrama pressão-volume do motor com combustão.

O diagrama da figura 2.35 é o diagrama logarítmico gerado com os dados da figura 2.34 (Lancaster et al., 1975). A linha equivalente ao tempo de compressão é uma reta e tem uma inclinação razoável; as linhas equivalentes ao bombeamento, aparecem orientadas corretamente.

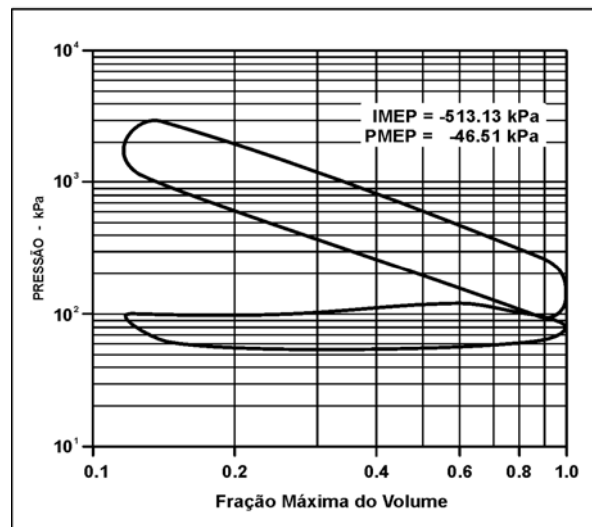


Figura 2.35 - Diagrama log p-logV do motor com combustão.

O diagrama da figura 2.36 foi obtido no mesmo cilindro, na mesma condição operacional só que com sensor diferente (Lancaster et al., 1975).

A linha da expansão curva-se drasticamente perto do PMI e cruza a linha do tempo de admissão, dando uma forma apelidada de “efeito do laço da gravata”. Este comportamento é freqüentemente devido a efeitos térmicos no transdutor, podendo deduzir-se que o resfriamento não foi efetuado adequadamente.

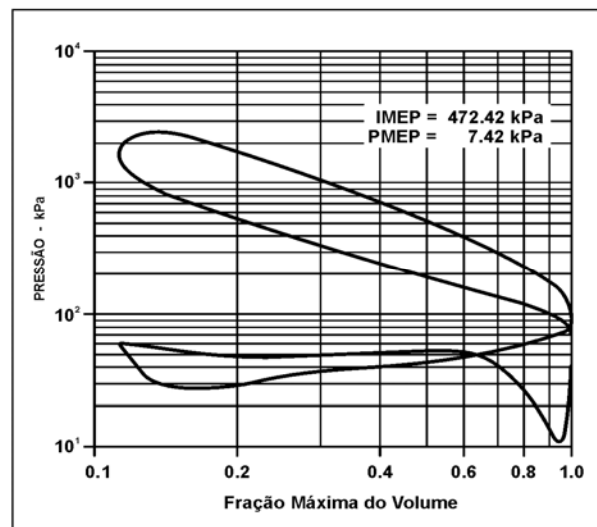


Figura 2.36 - Dados de um mesmo cilindro usando diferentes tipos de sensores.

### 2.15 Influentes Parâmetros e erros gerados durante a indicação da combustão nos motores com ciclo Otto.

Com menor potencial para a melhoria do motor de combustão interna, maior é a necessidade da indicação precisa da pressão do cilindro. Com a adequada seleção e manutenção dos instrumentos, os erros de medição podem ser mantidos em valores mínimos. Entretanto, o engenheiro deve estar habilitado para interpretar os resultados com precisão, apesar dos mesmos não poderem ser 100% corretos.

O objetivo deste item é interpretar corretamente os parâmetros significativos e as fontes de erro, bem como suas conseqüências individuais durante a indicação da combustão nos motores (Kuratle, 1992).

### 2.15.1 Sensor de Pressão Piezométrico.

**Montagem** - Os sensores de pressão devem ser montados próximos à câmara de combustão, no cabeçote do cilindro ou no bloco do motor. Com uma montagem afastada ocorrerá ressonância do gás na sua passagem, a qual pode falsificar a medição e também aumentar o volume da câmara de combustão.

A temperatura média medida na posição do transdutor está entre 150°C a 300°C. Ela pode ser reduzida usando-se um trocador de calor integrado ao sensor. Este conduz a resultados de medição mais estáveis. Por outro lado, o sensor refrigerado com água necessita de mais espaço para sua instalação do que o não refrigerado não podendo, conseqüentemente ser montado em pequenos motores que utilizam multiválvulas.

**Erros por tensões térmicas** – O diafragma do sensor é aquecido pelos gases intermitentes da combustão, que podem atingir 2000°C ou mais. Conseqüentemente, as partes expostas do transdutor podem alcançar mais de 300°C. Este curto período de aquecimento, da ordem de milésimos de segundo causa um erro na medição devido a tensões térmicas aplicadas ao sensor (“short term drift”). O “short term drift” pode gerar cargas positivas ou negativas, dependendo da construção do sensor. A amplitude de seu valor depende da condição de operação do motor. A duração do erro do sinal de medição é específica para cada tipo de sensor. Um sensor de alta precisão possui um erro por tensões térmicas, durante a combustão, menor que 1 bar . O “short term drift” afeta a precisão na determinação da pressão média efetiva indicada (IMEP), na taxa de liberação de calor e na região de baixa pressão do digrama. A figura 2.37 mostra a diferença de sinal entre o sensor padrão e o sensor testado devido ao “short term drift” (Kuratle, 1992).

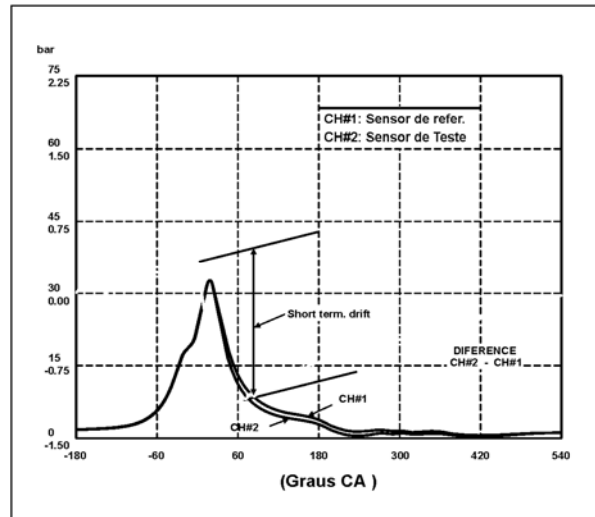


Figura 2.37 - Diferença no sinal do sensor devido ao “short term drift”.

A figura 2.38 mostra o erro no cálculo da IMEP devido ao “short term drift” sofrido pelo sensor (Kuratle, 1992).

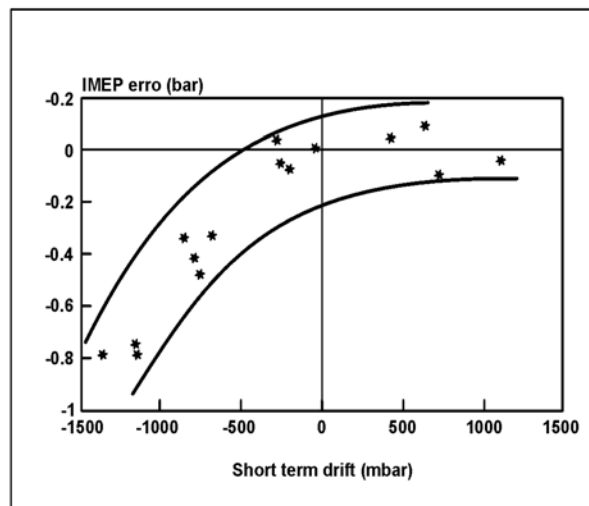


Figura 2.38 - Erro da IMEP devido ao erro por tensão térmica

Os valores absolutos dependem do tipo, da rotação e da carga do motor. O erro apresentado na medição da IMEP com tipos diferentes de sensor ficou entre -9% e +2%. As variações entre

diferentes sensores do mesmo tipo eram menores que 1%. O erro por tensão térmica aumenta com o uso de um sensor ruim quando o motor está detonando (Kuratle, 1992). Por isso a IMEP determinada com um sensor com alto erro por tensão térmica e com outro com baixo erro por tensão térmica não apresentam curvas paralelas próximo ao limite de detonação dos motores (figura 2.39).

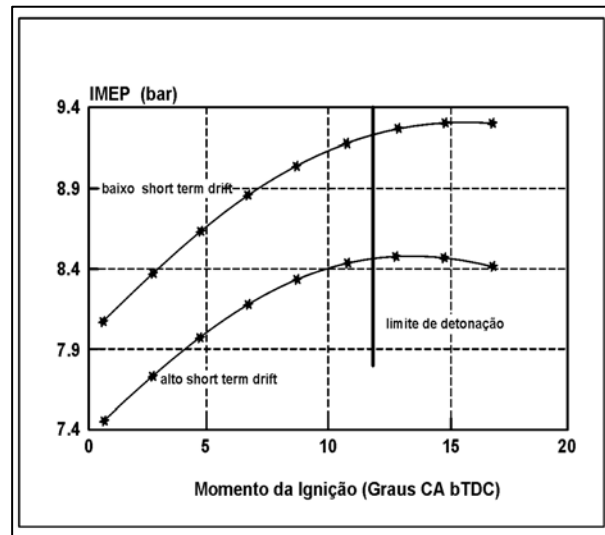


Figura 2.39 - Variação da IMEP próximo à região de detonação

O erro por tensão térmica pode ser positivo ou negativo e manifesta-se sozinho, através da dissipação de calor, após o fim da combustão. A figura 2.40 mostra que o erro por tensão térmica positivo simula um aumento da taxa de liberação do calor acumulado e que o erro por tensão térmica negativo simula uma queda na curva de pressão, após o término da combustão (Kuratle, 1992).

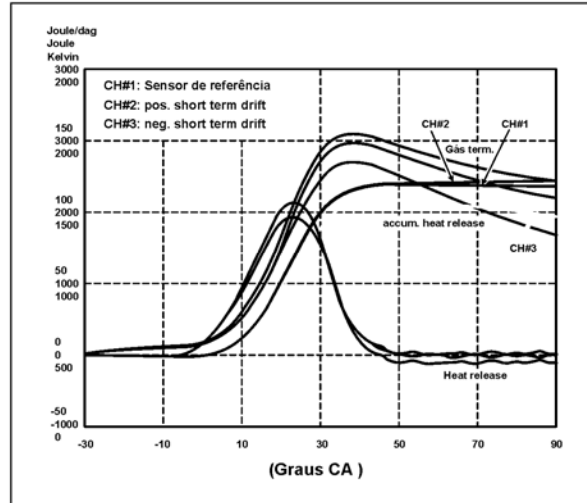


Figura 2.40 - Taxa de liberação de calor calculada com sensores com diferentes erros por tensões térmicas.

O efeito do erro por tensão térmica na região de baixa pressão é evidente quando o sensor não se recupera do choque térmico após o curso da expansão. Então, o sinal de baixa pressão pode ser consideravelmente errado e uma análise exata da troca de calor pode ser impossível através desse diagrama. A figura 2.41 mostra o diagrama log p-logV do registro de sensores que possuem baixo e elevado erro por tensão térmica, onde se verifica um “salto” no Canal 2, após o PMI, que é típico de um sensor com elevado erro por tensão térmica (Kuratle, 1992).

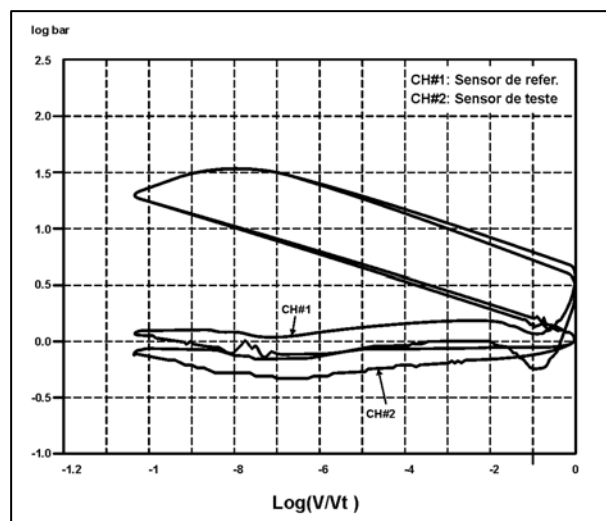


Figura 2.41 - Diagrama log p-logV do registro de sensores que possuem baixo e elevado erro por tensão térmica.

O erro por tensão térmica pode ser reduzido com o uso de um ou mais furos pequenos ou entalhes para passagem dos gases ou com o revestimento da parte dianteira do sensor com RTV (vedador de silicone). O último método é limitado a poucas horas de operação e, conseqüentemente, não muito prático.

Os projetistas de sensores minimizam o erro por tensão térmica através de projetos avançados utilizando trocador de calor integrado ao sensor, placas de proteção de calor ou selagem frontal na montagem do sensor. Todas essas medidas reduzem a dissipação de calor no diafragma de medição.

**Ruído acústico** - o ruído do fechamento das válvulas, principalmente nos motores com velocidades elevadas, como nos motores de competição, pode perturbar o sinal do sensor de pressão. A figura 2.42 apresenta a curva de pressão de um motor, em que as válvulas de admissão fecham a 120° após o PMS e obtida com dois tipos de filtros anti-ruídos (Kuratle, 1992).

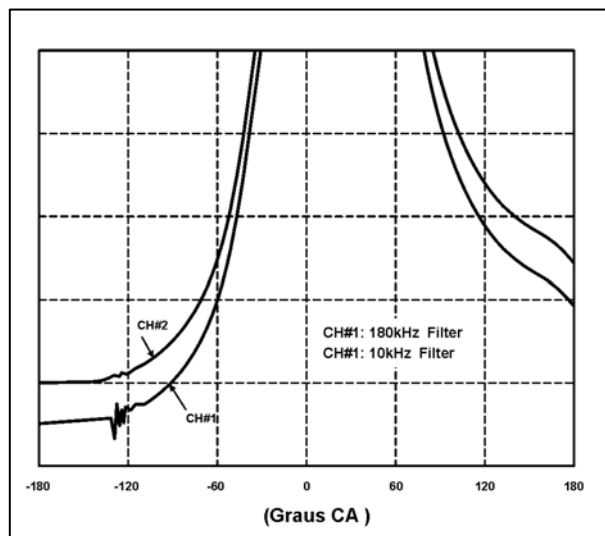


Figura 2.42 - Mesma curva da pressão com filtro de 180 kHz e de 10 kHz (o desvio foi feito somente para melhorar a exposição)

Um filtro de baixa passagem no amplificador pode reduzir esse ruído, mas naturalmente irá introduzir alguns efeitos negativos em outras partes da curva (deslocamento do faseamento), conforme mostra a figura 2.43. A frequência mínima permitida para o filtro de baixa é,



aproximadamente, de 10 kHz. Então, um erro no IMEP de aproximadamente +2% irá ocorrer (Kuratle, 1992).

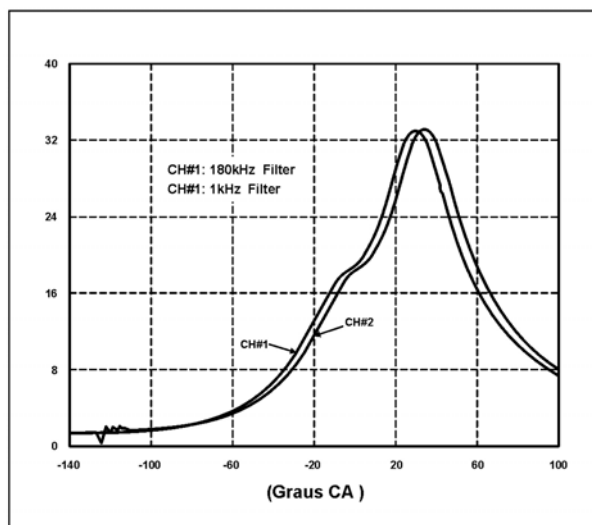


Figura 2.43 - A mesma curva da pressão com filtro de 180 kHz e 1 kHz (deslocamento de fase de aproximadamente 4,5 °CA)

A tabela 2.3 mostra que o erro de IMEP com um filtro 1 kHz é de, aproximadamente, +12 %. Nenhum filtro nem todas as funções analíticas são boas soluções para medições com precisão elevada (Kuratle, 1992).

Tabela 2.3 - Influência do filtro no IMEP

Filtro [kHz]	IMEP [bar]	$P_{\max}$ [bar]	$\alpha P_{\max}$ [°CA]	$dP_{\max}$ [bar/°]	$\alpha dP_{\max}$ [°CA]
180	9,0	32,4	32,4	0,72	19,5
30	9,0	33,8	32,5	0,75	19,4
10	9,2	33,8	32,4	0,75	20,0
1	10,1	32,2	37,1	0,68	23,8

**Linearidade** - a exatidão do sensor é determinada parte por seu short term drift e parte por sua linearidade, que é muito boa para todos os sensores de quartzo. Os erros das linearidades de 0,2 a 0,5 % de fundo de escala são padrões para sensores com fundo de escala de 200 bar. Isso conduz a um erro máximo de 1,4 a 2,0 bar durante a combustão. No pior caso se soma 1 bar

referente ao “short drift” mais o erro da linearidade. O erro mais provável (raiz quadrada dos quadrados dos erros) é, aproximadamente, de 1,1 a 1,4 % para um sensor de 100 bar.

### 2.15.2 Limpeza e Calibração do Sensor

**Limpeza** – uma boa manutenção dos sensores é fundamental para a obtenção de bons resultados na medição. Os transdutores devem ser limpos e calibrados regularmente. A limpeza do diafragma impede a mudança da sensibilidade. Se o diafragma estiver coberto por depósitos de fuligem (principalmente em motores diesel), deve ser limpo. Um suave abrasivo de limpeza, por exemplo, borracha para polimento é recomendado. O líquido de limpeza para forno também foi usado com sucesso.

Para a limpeza da pequena abertura do sensor e de sua chapa de proteção de calor uma lâmina de barbear ou um fio dental podem ser usados. A capa de proteção deve sempre ser montada para proteger a peça contra a sujeira. Limpezas mais apuradas podem ser feitas com um solvente como, por exemplo, acetona ou gasolina branca. Um banho em ultra-som pode ser útil, mas as instruções do fabricante do sensor devem ser seguidas. Após, a isolação pode ser melhorada secando o sensor por algumas horas em uma estufa, a uma temperatura de, aproximadamente, 100 °C (Kuratle, 1992).

**Refrigeração** – Para sensores com refrigeração deve-se utilizar somente água destilada, a fim de se evitar formação de depósitos. Estes podem impedir o fluxo apropriado do líquido refrigerante e mudar a sensibilidade do sensor. A vazão do líquido de refrigeração no circuito fechado deve ser ajustada para 0,5 litro por minuto. Sua temperatura não tem significativa influência no “short term drift”, mas na sensibilidade do sensor. Conseqüentemente, deve-se manter a temperatura da água de refrigeração em 20°C, valor em que a sensibilidade nominal exata do sensor é conhecida.

**Calibração** - a calibração inteira da cadeia de medição é melhor efetuada com a utilização de uma balança de pressão de peso morto e um sensor de referência. O alvo deve ser a determinação da sensibilidade da cadeia de medição dentro da escala de pressão de interesse.

Uma calibração errada tem o mesmo efeito negativo na medição que a utilização de um sensor ruim. Esse erro tem um efeito proporcional no IMEP. A figura 2.44 mostra o erro de calibração e sua influencia na IMEP (Kuratle, 1992).

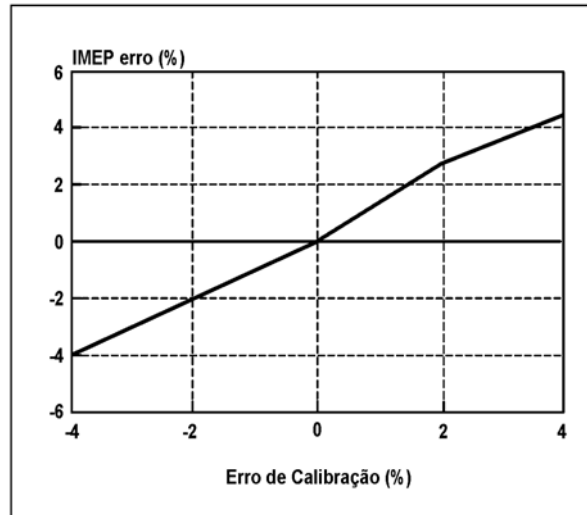


Figura 2.44 -Erro no IMEP em função do erro na calibração

O sinal de um sensor com erro de calibração é freqüentemente interpretado como sendo um fenômeno de “short term drift” porque apresenta uma curva de pressão geometricamente similar à curva de um sensor sensível a tensões térmicas. A figura 2.45 mostra alterações na curva de pressão devido a erros na calibração do sensor que é similar a erros por tensões térmicas apresentado na figura 2.40 (Kuratle, 1992).

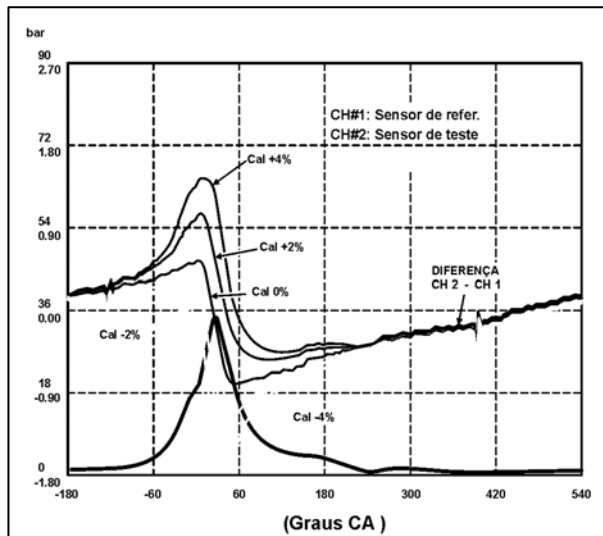


Figura 2.45 - Curva de pressão com sensor com erro na calibração

A sensibilidade do sensor muda ligeiramente com a temperatura. Conseqüentemente, durante a medição é importante saber a temperatura do local onde o sensor está instalado. A calibração pode ser feita em temperatura conhecida. Caso seja feita à temperatura ambiente, pode-se compensar a diferença de temperatura na calibração. Durante a medição com sensores refrigerados a uma vazão de 0,5 litro por o minuto, a temperatura do elemento do sensor permanece perto da temperatura do líquido refrigerante.

Uma calibração em alta temperatura é feita pelo fabricante em todos os sensores de alta temperatura não refrigerados. O desvio da sensibilidade versus a temperatura é registrado no certificado de calibração. Para obter-se uma medição com precisão, deve ser medida a temperatura na posição dos sensores. A sensibilidade pode, então, ser corrigida individualmente em cada sensor. Ignorar a mudança na sensibilidade devido à temperatura tem o mesmo efeito que uma calibração errada. Isso significa que se podem esperar erros menores que 3% na escala.

### 2.15.3 Influência dos cabos de conexão

**Isolação** - o princípio de medição piezelétrico requer uma isolação extremamente elevada ( $>10^{13} \Omega$ ) do sistema sensor - cabo - amplificador da carga. A resistência insuficiente da isolação produz “drift” no sinal de saída e pode levar o amplificador de carga à saturação.

A parte mais delicada em relação à isolação é o cabo de conexão do sensor com o amplificador. Conectores sujos e cabos com revestimento danificado reduzem a isolação. Os conectores devem ser limpos com solvente e caso haja problemas nos cabos, estes devem ser substituídos.

Pequenos erros podem ocorrer devido à movimentação do cabo durante a medição. Conseqüentemente, os mesmos devem ser tão curtos quanto possível e mantidos corretamente fixados. Quase sempre é vantajoso colocar o amplificador de carga dentro da sala de testes.

**Distúrbios** - os distúrbios elétricos do sinal de medição é um problema adicional. Podem se distinguir dois tipos de distúrbios:

- Interferência dos campos elétricos e magnéticos
- “Ground loops”

Campos elétricos e magnéticos - campos elétricos e magnéticos podem ocorrer em toda a sala do teste. Podem induzir uma corrente elétrica nos cabos de medição. O distúrbio mais comum é o aparecimento de alguns picos curtos no sinal da pressão devido à corrente que circula no sistema de ignição do motor. Isso pode ser evitado usando-se cabos com boa isolação. Se o distúrbio ainda ocorrer, uma proteção adicional de metal (gaiola de Faraday) pode ser montada sobre todo o cabo. Deve-se evitar instalar os cabos de medição paralelos aos cabos de alta corrente e de ignição.

“Ground loop” – Ocorrem se uma corrente circular do cabo terra para o cabo de medição devido à diferença de potencial elétrico em ambas as extremidades do cabo (por exemplo, se o aterramento do motor tiver um potencial diferente do que o da linha de alimentação). Nenhum

“ground loop” irá ocorrer no circuito do sensor-amplificador se o sensor utilizado for conectado ao cabo terra. O “*ground loop*” pode também ocorrer em outros circuitos como, por exemplo, no circuito do amplificador-osciloscópio.

Na maioria dos casos um “ground loop” resulta em uma ondulação na tensão do sinal medido. Sua frequência é geralmente igual à frequência principal ou a um múltiplo dela. Isso pode ser resolvido deixando ambas as extremidades do cabo com o mesmo potencial elétrico. Para isso conecta-se o cabo terra do motor ao cabo terra do amplificador através de um cabo com seção mínima de 16 mm<sup>2</sup>.

Se ainda assim o distúrbio não desaparecer completamente pode-se artificialmente isolar o sensor desconectando o cabo de aterramento o mais próximo possível do mesmo. Com a isolação artificial do sensor a conexão externa do cabo terra do motor ao amplificador de carga através do cabo comum é obrigatória.

#### 2.15.4 Amplificador de carga

**Isolação** - Os amplificadores de carga trabalham com uma isolação muita elevada na entrada. A isolação pode ir diminuindo se o MOSFET apresentar defeito ou se o amplificador reduzir a sua isolação devido à umidade elevada. Conseqüentemente, os amplificadores não devem ficar em lugar com concentração elevada de umidade ou de óleo. Às vezes é útil deixar o amplificador ligado permanentemente pois o calor produzido pode impedir que a umidade se condense dentro de sua carcaça. A perda da isolação manifesta-se sozinha através de um rápido sinal de “*drift*”, levando a saturação positiva ou negativa do amplificador.

**Constante de tempo** - Os amplificadores de carga oferecem diferentes constantes de tempo (curta, média, longa). Seu efeito no sinal de medição pode se manifestar no tempo ou na frequência do sistema. A constante de tempo “*longa*” é equivalente ao modo DC. As frequências muito baixas também são transmitidas. Não ocorre nenhuma distorção do sinal. Deve-se usar essa constante de tempo tanto para as medições quase estáticas como para as precisas medições

dinâmicas. As constantes de tempo "média" e "curta" são equivalentes ao modo A C. O sinal de medição gera sempre uma função exponencial em relação a zero, de acordo com constante de tempo. Por isso, as frequências baixas são cortadas. A figura 2.46 mostra a constante de tempo curta atuando como um filtro de alta (Kuratle, 1992).

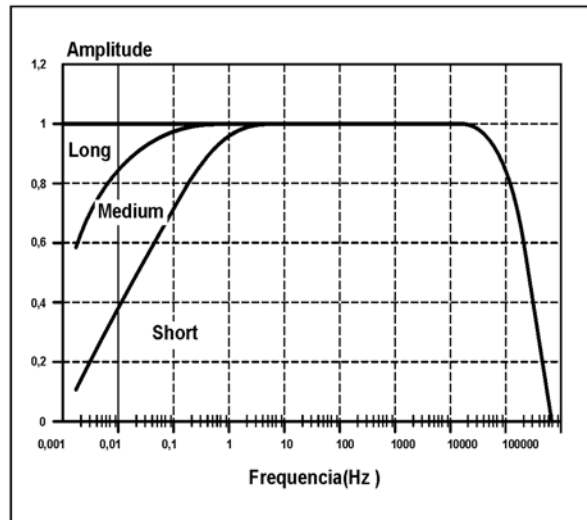


Figura 2.46 - Espectro das frequências com diferentes constantes de tempo.

Há somente uma vantagem na utilização da constante do tempo curta sobre a longa. Se o sistema de medição tiver significativo sinal de “*drift*” devido a problemas de isolamento ou tensões térmicas o uso da constante de tempo curta impede que o amplificador sature.

**Sensibilidade do sensor** – Tanto a influência da isolamento como da constante do tempo no sistema de medição dependem da quantidade de carga que está sendo medida e da sensibilidade do sensor. Um sensor com alta sensibilidade (pC/bar) é menos sensível à baixa isolamento. A constante do tempo torna-se mais longa (isto é, as frequências de corte são mais baixas) porque um maior capacitor pode ser usado no amplificador de carga.

**Exatidão** - A exatidão de um amplificador de carga que trabalha com a constante de tempo longa é determinada por sua linearidade e pela precisão da escala do capacitor. O erro de linearidade de um amplificador preciso, estar abaixo de 0.05%, o que é insignificante. As escalas dos capacitores têm uma tolerância de 1 % de sua capacidade. Para uma calibração regular do

amplificador sua exatidão pode ser mantida abaixo de 0,5 % do seu fundo de escala. Se a cadeia inteira do sistema de medição for calibrada, então a tolerância do capacitor não tem nenhum significado porque a sensibilidade total da cadeia foi determinada (Kuratle, 1992).

#### 2.15.5 Sensor de Posição Angular do Virabrequim.

O sensor de posição angular dá a base de tempo e dispara o sinal para o registro dos dados. Deve ser muito robusto e oferecer uma resolução suficiente para as avaliações termodinâmicas. Deve ser rigidamente montado no eixo de manivela a fim de evitar movimentos relativos.

Um cabo elétrico protegido com uma apropriada malha de aterramento conectando o “encoder” ao motor pode reduzir consideravelmente a sensibilidade a ruído elétrico.

**Resolução angular** - a vantagem de uma definição angular elevada é a possibilidade de indicar picos íngremes de pressão, por exemplo, na curva da taxa de liberação do calor de uma combustão nos motores diesel com injeção direta de combustível. A desvantagem de uma alta resolução é a demasiada sensibilidade a qualquer tipo de ruído.

O cálculo da IMEP (pressão média efetiva indicada) não é muito sensível à resolução angular. A figura 2.47 mostra o IMEP avaliado com 2 tipos de sensor em 4 resoluções angulares diferentes (3 medições para cada resolução). Uma resolução razoável do ângulo de posição do virabrequim para avaliações termodinâmicas está entre 0.5 a 1.0 °CA (ângulo do virabrequim). Uma resolução de 1°CA é suficiente para os motores sem gradientes elevados de pressão, por exemplo, motores de ignição por centelha (Kuratle, 1992).



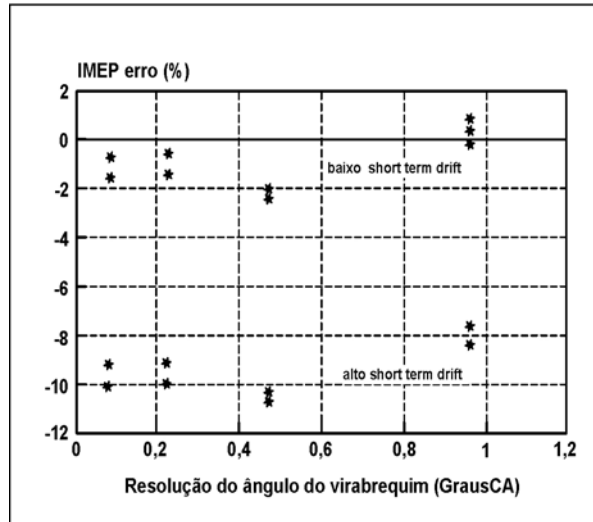


Figura 2.47 - Erro da IMEP em função da resolução do ângulo do virabrequim.

**Determinação do PMS (ponto morto superior)** - O cálculo da IMEP, extremamente sensível aos erros na determinação do PMS, deve ser determinado com precisão menor que 0,1 °CA. O método mais popular para a determinação do PMS (ângulo entre o PMS físico e o disparo do sensor de posição angular) é medir a posição do pico pressão com o motor acionado e então adicionar o ângulo equivalente à perda termodinâmica. A figura 2.49 mostra o erro do IMEP em função do erro do PMS (Kuratle, 1992).

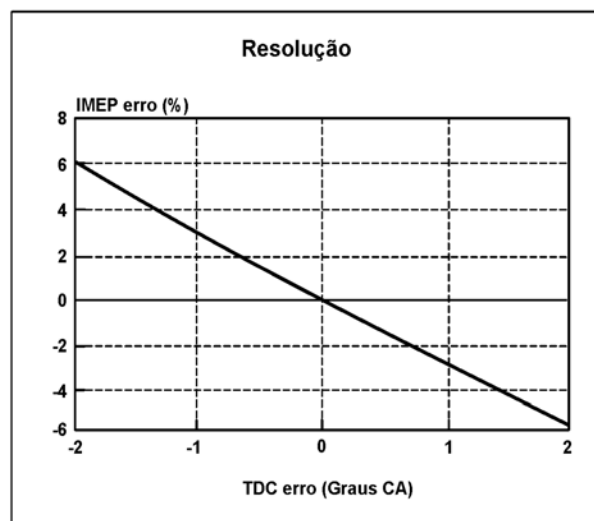


Figura 2.48 - Erro da IMEP em função do erro do PMS

### 2.15.6 ADC – Conversor Analógico Digital

Para a análise do sinal da pressão com um dispositivo de processamento de dados é necessário um ADC (conversor analógico digital), cuja exatidão é determinada através de sua linearidade, do erro devido à temperatura e da sua resolução digital. O erro da linearidade e da temperatura está entre 1 e 2 bits.

**Resolução Digital** - a resolução absoluta do sinal (em unidades mecânicas) depende da escala de medição. Deve-se sempre usar inteiramente a escala total de medição do ADC. A performance de um ADC com escala de 0 a 10V é mostrado na tabela 2.3 (Kuratle, 1992).

Tabela 2.4 - Resolução Digital

Resolução (Bit)	Resolução (mV)	Resolução (mbar) com 100 bar FS	Resolução (mbar) com 200 bar FS
8	39,0	391	781
10	9,8	98	195
12	2,4	24	49
14	0,6	6	12
16	0,2	2	3

Considerando os erros de todos os equipamentos restantes da cadeia de medição, uma resolução do ADC de 12 ou 14 bits é adequada. Se um conversor 12-bit for usado, ocorre um erro máximo de 48 mbar, que é aproximadamente 0,05 % de 100 bar (2 bit = 48 mbar de 100 bar de fundo de escala).

**Taxa de amostragem** - naturalmente a velocidade de conversão (taxa de amostragem) do ADC tem que atender as exigências da resolução angular do “encoder” na velocidade máxima do motor. A taxa de amostragem é obtida através da equação 2.24 (Kuratle, 1992).

$$SR = \frac{N \times 360}{RES} \quad (2.24)$$

Onde:

SR = Taxa de amostragem

RES = Resolução angular

N = rotação do motor

Exemplo: Se 1° CA de resolução é necessário para 6000 RPM, então a taxa de amostragem deve ser de 36 kHz por canal.

### 2.15.7 Processamento dos Dados

**Correção da pressão absoluta** – Para o processamento dos sinais da medição, o desconhecimento da pressão absoluta é um problema. Devido a grande diferença de temperatura entre o motor parado e em funcionamento e também devido a variação cíclica dessa temperatura quando o motor está em funcionamento todo o sensor apresenta erro no nível inicial do sinal. Conseqüentemente, o sinal tem que ser corrigido para o nível zero de pressão em qualquer avaliação termodinâmica. Um simples reset do amplificador de carga não é a solução porque o sinal é igualado a zero, independentemente do nível efetivo da pressão.

O correto nível da pressão efetiva do cilindro pode ser determinado de 3 maneiras:

1. Referência interna - no modo de referência interna define-se uma pressão estimada para uma determinada posição do ângulo do virabrequim, por exemplo, a pressão atmosférica no PMI.

2. Referência externa - no modo de referência externa a mesma pressão é gravada permanentemente através de um sensor de pressão absoluta, por exemplo, a pressão no coletor de admissão. É recomendado para este fim um sensor piezoresistivo com elevada exatidão, preferencialmente instalado em um adaptador refrigerado.

3. Referência termodinâmica – o modo de referência termodinâmica baseia-se na suposição do conhecimento da constante exponencial politrópica durante o curso de compressão. Pela experiência este expoente está aproximadamente entre 1,33 e 1,35 para os motores de ignição por

faísca e entre 1,36 e 1,38 para os motores diesel. Este último método é o mais apropriado porque nenhuma pressão de referência é necessária (Randolph, 1990). É necessário um bom sinal da pressão do cilindro livre de distúrbio. Nenhum sinal durante o curso da compressão provoca um nível errado da pressão.

**Cálculos** - os valores dependentes unicamente da pressão, como  $P_{\max}$  ou  $dp_{\max}$  têm a mesma exatidão que o sinal de pressão. Cálculos são mais complicados, como a liberação do calor ou a IMEP, não têm como base somente a pressão do cilindro mas também a curva do volume, que é determinada através do sensor de posição angular. A precisão da curva de pressão depende, principalmente, da exatidão dos dados da posição angular do virabrequim, do valor da taxa de compressão e da determinação correta do PMS.

O volume da câmara de combustão deve ser precisamente medido. Para realizar a medição enche-se a câmara com um fluido, medindo-se seu volume com uma proveta graduada em litros. A determinação da curva do volume nunca será determinada de forma absolutamente correta porque o pistão não se move exatamente como em seu curso teórico devido à sua massa, às forças exercidas pelo gás e às folgas nos mancais.

#### 2.15.8 Erro da cadeia de medição

Os erros individuais dos componentes de uma cadeia de indicação da medição foram expostos. A soma de todos os erros não é insignificante (min. 2%). Entretanto, com a calibração de toda a cadeia de medição, do sensor até a saída digital, o erro total está abaixo da soma dos erros individuais. O erro provável da cadeia de medição pode ser calculado através da equação 2.24 (Kuratle, 1992).

$$E_{Total} = \sqrt{\sum E^2} = \sqrt{E_{Sensor}^2 + E_{Amplificador}^2 + E_{ADC}^2} \quad (2.25)$$

Para o cálculo termodinâmico, a pressão absoluta e o PMS correto são os parâmetros que influenciam decisivamente a precisão, além da precisão da cadeia de medição. Como fontes de erros podemos citar também o uso de filtros, aproximações nos cálculos (incluindo o cálculo da

curva média da pressão), montagem do sensor afastado da câmara, sensores ou cabos sujos, desconhecimento da mudança da sensibilidade devido à alta temperatura, imprecisão nos dados da geometria do virabrequim (incluindo taxa de compressão) e ruídos acústicos e elétricos. Estes erros podem facilmente exceder o erro da cadeia de medição.

Como partes dos erros são absolutos, estes aumentam proporcionalmente os pequenos sinais da medição. Isso significa que o estudo da troca do gás no cilindro e a análise da fricção necessitam de sensores e instrumentos mais precisos para uma boa avaliação, e que somente medições relativas são possíveis (comparação entre diferentes versões do motor).

## **Capítulo 3**

### **Metodologia Experimental**

Os dados experimentais necessários ao desenvolvimento deste trabalho foram obtidos no laboratório de motores do Instituto de Pesquisa Mauá e no Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da MAHLE. No Instituto Mauá foi possível realizar a medição de pressão de combustão de um motor ciclo diesel, na MAHLE foi liberado e utilizado os dados medidos da pressão de um motor ciclo Otto.

O laboratório de motores do Instituto Mauá está equipado para realizar ensaio de medição da potência líquida efetiva de motores, segundo a norma NBR 1585, que objetiva a obtenção das curvas de potência de consumo específico de combustível a plena carga em função da rotação do motor.

O dinamômetro instalado na célula de teste é do tipo Foucault, fabricado pela Brown Boveri s/a, com capacidade de absorção de potencia de até 175 Cv, de medição de torque máximo de 77 kgm e operar na faixa de rotação de 1650 a 9000 RPM.

#### **3.1 Motor do ciclo Diesel (ICO)**

O motor utilizado no ensaio foi um motor de ignição por compressão usando como combustível o óleo diesel. A tabela 4.1 mostra as especificações do motor e a figura 3.1 mostra uma vista geral do motor após sua instrumentação.

Tabela 3.1 – Especificações do motor 4.07 TCA

Tipo de Construção	Diesel High Speed – 4 cilindros - 4 tempos – Injeção direta única
Aspiração	Fluxo cruzado com 2 dutos para admissão espiral e tangencial e turbo
Combustível	Diesel tipo B
Diâmetro dos cilindros	93,0 mm
Curso dos pistões	103,0 mm
Volume deslocado	700 cm <sup>3</sup> por cilindro
Taxa de compressão	17:1
Potência Máxima	97 kW @ 3600 RPM
Torque	333 Nm @ 1800 RPM

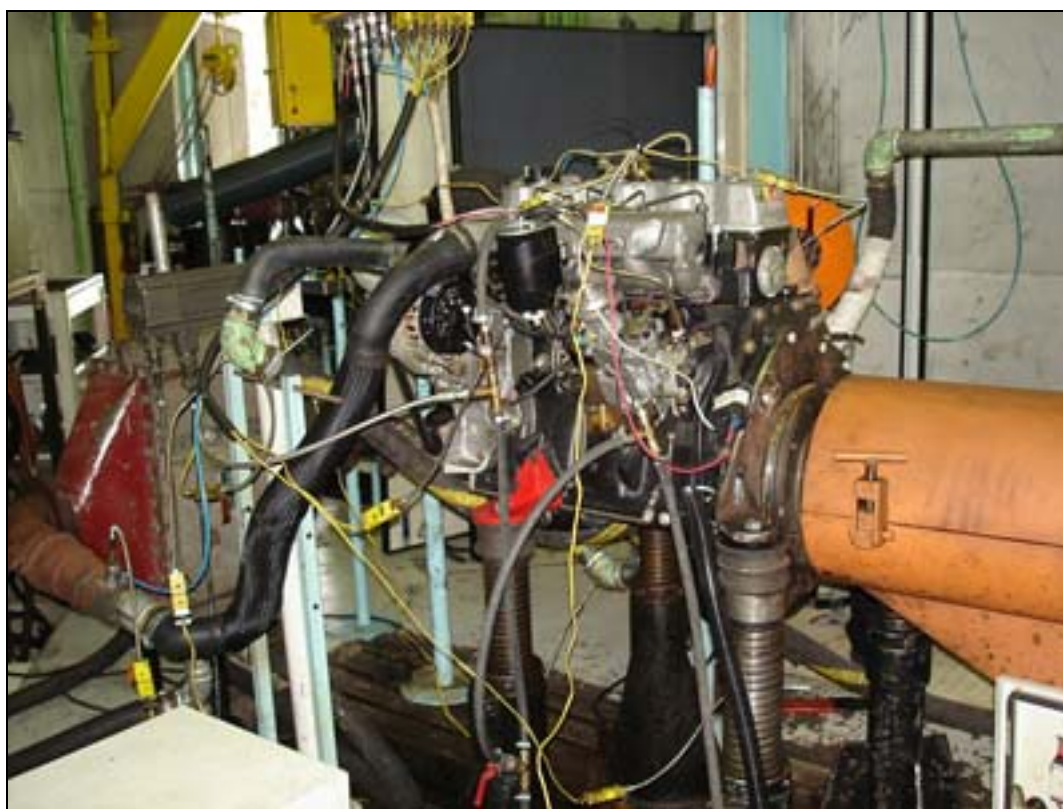


Figura 3.1 - Vista traseira do motor instrumentado para os ensaios

### 3.1.1 Sistema de medição de pressão no interior do cilindro

Para a medição da pressão no interior do cilindro foi utilizado um transdutor de pressão piezelétrico, um amplificador piezelétrico, um transdutor de posição angular e um osciloscópio digital.

**Transdutor** – Para a medição da pressão foi utilizado um transdutor de pressão piezelétrico marca Kistler, modelo 6001 e número de série SN 1079262. Foi instalado no cabeçote do cilindro número 1 do motor. Após um estudo do cabeçote, escolheu-se o local para a sua instalação de modo a não perfurar nenhuma câmara de água. Com uma broca especial fornecida pelo Kistler, efetuou-se o furo de acesso à câmara e a face de vedação do sensor no cabeçote. Após abertura da rosca M 5x 0,5 o sensor foi instalado com arruela de vedação e torque de 4,5 Nm. A figura 3.2 mostra o transdutor suas especificações são mostradas na tabela 3.2.



Figura 3.2 - Transdutor de pressão piezelétrico Kistler 6001 e torquímetro



Tabela 3.2 – Especificações do transdutor de pressão Kistler 6001

Faixa de operação	bar	0... 250
Sensibilidade	pC/bar	-15
Linearidade	%FSO	$\leq \pm 0,8$
Faixa de temperatura de operação.	°C	-196... 350
Sensibilidade à aceleração		
axial	bar / g	< 0,001
radial	bar / g	< 0,0001
Thermal sensibility shift		
200...300	%	$\pm 3$
Thermo shock 1500 rpm, 9 bar IMEP		
$\Delta p$	bar	< -2,6
$\Delta IMP$	%	< -15

**Amplificador** – A carga elétrica gerada pelo transdutor foi amplificada e convertida em tensão através de um amplificador piezelétrico marca Kistler modelo 5011. A figura 3.3 mostra o amplificador e a tabela 3.4 suas especificações técnicas.



**Figura 3.3** Amplificador piezelétrico marca Kistler modelo 5011

Tabela 3.3 - Especificações técnicas do amplificador piezométrico Kistler modelo 5011.

Faixa de medição para 10 V FS	pC	$\pm 10 \dots 99999$
Sensibilidade do sensor	PC/M. U	0,01... 9990
Escala (tensão de saída)	V	$\pm 10$
Frequência limite (- 3dB sem filtro)	kHz	0... 200
Filtro de Baixa	kHz	0,001... 30 ( $\pm 10$ )
Constante de tempo (filtro de alta)		
Longa	-	DC modo
Media	s	1... 10
Curta	s	0,01... 100
Erro $< \pm 100$ pC FS	%	$< \pm 3 / < \pm 2$
Erro $\geq \pm 100$ pC FS	%	$\leq \pm 1 / < \pm 0,5$
Linearidade	% FS	$\leq \pm 0,05$
Drift	pC/s	$\leq \pm 0,03$

O amplificador possui um software que efetua a conversão da carga de pC para tensão, bastando somente digitar os dados em sua tela de entrada. Os parâmetros de entrada digitados no amplificador estão mostrados na tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Parâmetros de entrada do amplificador piezométrico.

T	Sensibilidade do transdutor	-15 pc/bar
S	Escala	25 V
Lp	Frequência do filtro	0
Tc	Constante de tempo	Long

Com a fixação da escala em 25 volts e sendo o fundo de escala do transdutor igual a 250 bar o ganho total do conjunto composto pelo transdutor e pelo amplificador de carga foi de 25bar/V. Para verificar o efeito do erro por tensão térmica no transdutor a frequência do filtro foi fixada em zero.

**Transdutor de posição angular** - para medir a posição angular do virabrequim foi utilizado um transdutor de posição angular, “encoder”, fabricado pela Kistler modelo 2612c, número de série 634500. Esse “encoder” possui um disco com duas trilhas, uma gerando 360 pulsos por volta e outra um pulso por volta. O “encoder” foi instalado na polia do motor através de um flange adaptador, com ressalto para centralização na polia e rebaixo para montagem do “encoder”. Após a montagem, o alinhamento do flange foi controlado com relógio comparador, apresentando excentricidade de 0,05 mm e desvio no paralelismo de 0,01 mm. A figura 3.5 mostra o “encoder” instalado no motor. O condicionador de sinal instalado ao “encoder” defasa o sinal TTL para alterar a sua resolução angular. A resolução foi ajustada internamente no amplificador para 0,1 Ca, gerando 3600 pulsos por volta do virabrequim. Para sincronizar o pulso do “encoder” com o ponto morto superior do pistão do cilindro 1 efetuou-se o procedimento abaixo:

- Girou-se o volante do motor até a marca do PMS da polia coincidir com o ponteiro indicador fixo no motor.
- Para determinação exata do PMS movimentou-se lentamente o motor no sentido horário e anti-horário até a ferramenta MWM 9.407.0.690.029-4 ser introduzida em seu alojamento na carcaça e no volante do motor.
- Girou-se lentamente a carcaça do “encoder” e visualizou-se o sinal do “trigger” e da posição angular no osciloscópio. Quando o sinal do “trigger” ficou faseado com o sinal do ângulo do virabrequim com tensão igual a 0V, conforme mostrado na figura 3.4, fixou-se o braço do “encoder” ao seu suporte na base do dinamômetro.

Verifica-se, na figura 3.4 que, com a utilização do procedimento acima, o erro máximo no faseamento entre o sinal do “trigger” do “encoder” e o PMS do pistão é metade da resolução do “encoder”, ou seja, 0,05 ° CA.

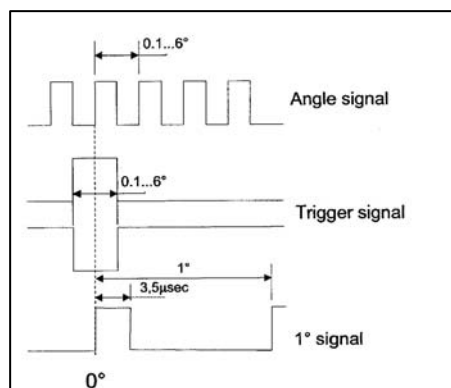


Figura 3.4 - Sincronismo entre o sinal do “trigger” e o sinal da posição angular.



Figura 3.5 – “Encoder” instalado no motor

**Sistema de aquisição de dados** – Para fazer a aquisição e a visualização do sinal do “trigger” do “encoder” e do sensor de pressão foi utilizado um osciloscópio digital da HP, modelo HP 54645D. Este osciloscópio permitiu a visualização, a gravação da curva de pressão obtida com a média de 32 aquisições e sua impressão. A tabela 3.5 resume as especificações técnicas do modo de aquisição do osciloscópio.

Tabela 3.5 - Especificações do modo de aquisição do osciloscópio

Canais analógicos	2
Canais digitais	8
Taxa de aquisição por canal	200 MSa/s
Memória <i>on-board</i>	1MB

A figura 3.6 mostra o osciloscópio com uma curva de pressão média salva em sua tela

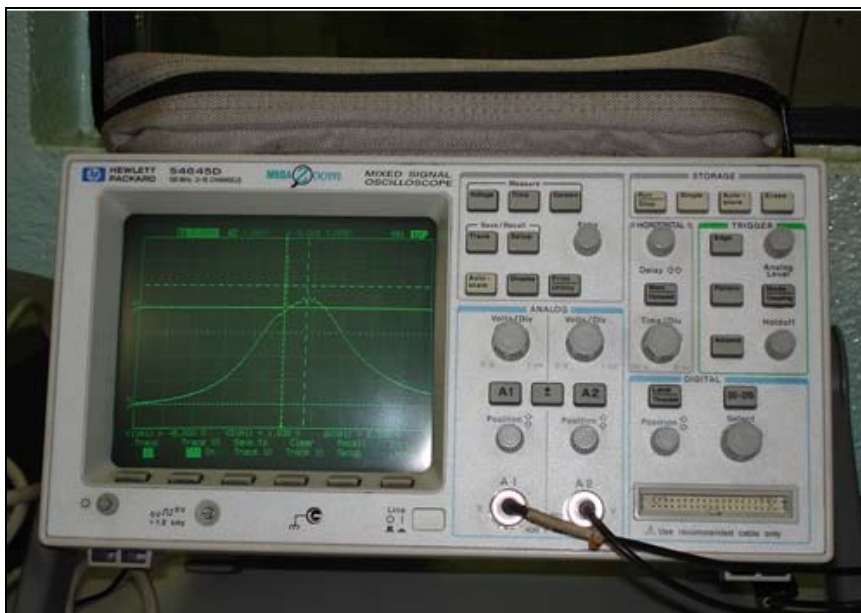


Figura 3.6 – Osciloscópio HP 54645D

Para minimizar a interferência de ruídos externos como “ground loop” e “drift”, todos os terminais de contato dos cabos de conexão foram limpos com um produto específico para limpeza de contato elétrico e conectados ao aterramento do banco de testes.

### 3.1.2 Sistema de medição do início da injeção de combustível

A medição do início de injeção de combustível serve para quantificar o tempo gasto desde a injeção até a combustão atingir a máxima pressão. Para a medição do início da injeção de combustível instalou-se um sensor de pressão do tipo piezoresistivo no tubo de alta pressão do injetor do cilindro nº 1. Neste sistema, a pressão de injeção, em torno de 250 bar, deforma o tubo do injetor, que comprime o sensor piezoresistivo. O sensor quando comprimido, gera um pulso elétrico que irá comandar uma lâmpada estroboscópica. A lâmpada possui um dispositivo de

ajuste para adiantar ou atrasar o disparo do lampejo e um visor que indica, em graus, a alteração angular efetuada. Com o motor funcionando com carga estável alterou-se o lampejo até que o indicador de referência da posição angular do virabrequim coincidissem com a gravação do PMS na polia do motor. O ângulo do início de injeção foi lido diretamente no visor da lâmpada para cada medição efetuada.

### **3.1.3 Operação inicial**

Após a instalação do sistema para medição da pressão de combustão, colocou-se o motor em funcionamento para observação, no osciloscópio, da curva de pressão e do sinal do ponto morto superior do pistão. Quando o motor atingiu as condições normais de operação iniciou-se o ensaio para medição simultânea da pressão de combustão, da potência e do torque do motor, conforme os procedimentos estabelecidos na norma ABNT-ISO 15085. Um resumo dos valores medidos é apresentado no capítulo 4 e todos os valores podem ser encontrados no apêndice.

## **3.2 Motor ciclo Otto (ICE)**

### **3.2.1 Motor utilizado.**

O motor utilizado no ensaio foi um motor de ignição por centelha ciclo Otto utilizando como combustível E22 (gasolina C com 22% de etanol anidro). Como o centro de pesquisa presta serviço para as montadoras, a especificação completa do motor utilizado não pode ser divulgada. Para que eu pudesse efetuar o cálculo da IMEP e da Potência indicada tive acesso aos dados da geometria do motor. A tabela 3.7 apresenta os dados da geometria do cilindro do motor utilizado.

Tabela 3.6 - Dados da geometria do cilindro.

Tipo de Construção	Ciclo Otto- 4 cil.- 4 tempos- Injeção Eletrônica
Diâmetro do cilindro	70,00 mm
Curso do pistão	64,50 mm
Comprimento da biela	111,95
Taxa de compressão	11,5: 1
Combustível	Gasolina E22
Volume de deslocamento	249 cm <sup>3</sup> por cilindro

### 3.2.2 Sistema de medição de pressão no interior do cilindro

Para a medição da pressão no interior do cilindro foi utilizado um transdutor de pressão piezelétrico, um transdutor de posição angular e o Indiset 620, fabricado pela empresa AVL.

Transdutor – Para a medição da pressão foi utilizado um transdutor de pressão piezelétrico marca Kistler, modelo 6125b. A tabela 3.8 apresenta suas especificações técnicas.

Tabela 3.7 - Especificações técnicas do transdutor de pressão Kistler modelo 6125b.

Faixa de operação	bar	0... 250
Sensibilidade	pC/bar	-16
Linearidade	%FSO	≤ ± 0,5
Sensibilidade à aceleração		
axial	bar / g	< 0,002
radial	bar / g	< 0,003
Thermal sensibility shift		
200...300	%	± 3
Thermo shock 1500 rpm, 9 bar IMEP		
Δp	bar	< -0,3
ΔIMEP	%	< -2
ΔPmax	%	< -1

Sistema de aquisição - O Indiset faz aquisição, armazenamento, visualização gráfica dos dados e calcula a IMEP em tempo real para até 1000 ciclos. O registro de grande densidade de

dados, com resolução angular do encoder para aquisições a cada intervalo de  $1^\circ$  é adequada para efetuar cálculos termodinâmicos e monitorar as flutuações da pressão de combustão entre os ciclos. A figura 3.7 mostra o sistema de medição de pressão com o Indiset 620 e a tabela 3.9 apresenta as especificações técnicas do sistema.

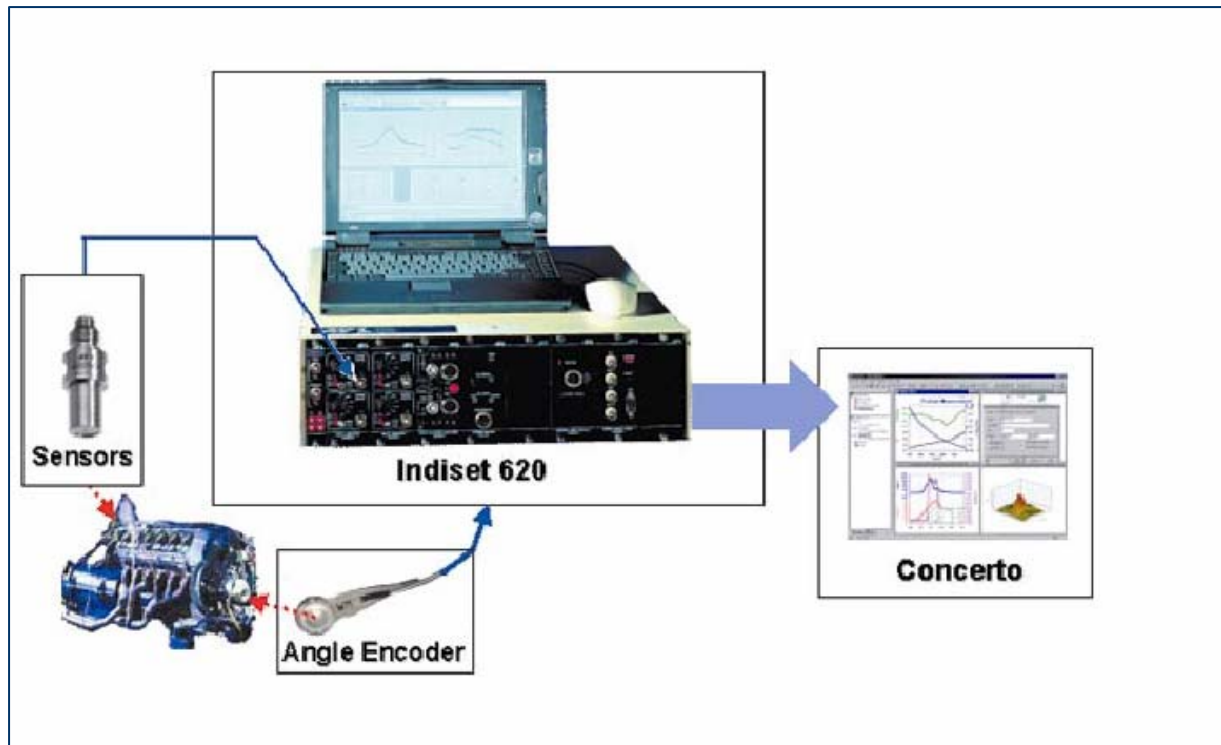


Figura 3.7 - Sistema de medição de pressão com o Indiset 620 da AVL

Tabela 3.8 - Especificações técnicas do Indiset 620 da AVL

Canais de entrada Sinais Analógico	4
Canal de entrada para “Encoder”	1
Memória interna	8 MB
Conversor ADC	12 Bit
Taxa de aquisição	1 MHz
Ângulo de resolução da medição	$0,1^\circ$ CA máximo



## Capítulo 4

### Resultados e Discussões

#### 4.1 Motor do ciclo Diesel (ICO)

Após a instalação do sistema para medição da pressão de combustão, colocou-se o motor em funcionamento para observação, no osciloscópio, da curva de pressão e do sinal do ponto morto superior do pistão. Quando o motor atingiu as temperaturas normais de operação, iniciou-se o ensaio para medição da pressão de combustão, da potência e do torque do motor, conforme os procedimentos estabelecidos na norma ABNT-ISO 15085. Um exemplo dos gráficos gerados, correspondente a média de 32 ciclos, pode ser visto através da Figura 3.5. O canal A1 mostra o sinal correspondente ao ponto morto superior do pistão e o canal A2 mostra o sinal do transdutor de pressão. A tensão medida no transdutor de pressão na saída do amplificador piezelétrico, neste exemplo, é de 5,125 V, correspondendo a uma pressão de combustão de 128,12 bar. A pressão máxima do ciclo médio do motor operando a 3400 RPM com 100% de carga ocorreu a  $0,530 \times 10^{-3}$  s após o PMS, correspondendo a uma posição angular de  $10^{\circ}81$ .

O osciloscópio utilizado para a aquisição dos sinais permitiu a visualização simultânea de 2 canais. Um canal foi utilizado para captura do sinal do "trigger" do "encoder" e outro para o sinal do sensor de pressão de combustão. Com estes dois parâmetros é possível avaliarmos o ponto em que ocorreu a pressão máxima de combustão. Como se monitorou o início da injeção de combustível através da lâmpada estroboscópica, foi possível quantificar a demora da pressão no cilindro para atingir seu valor máximo.

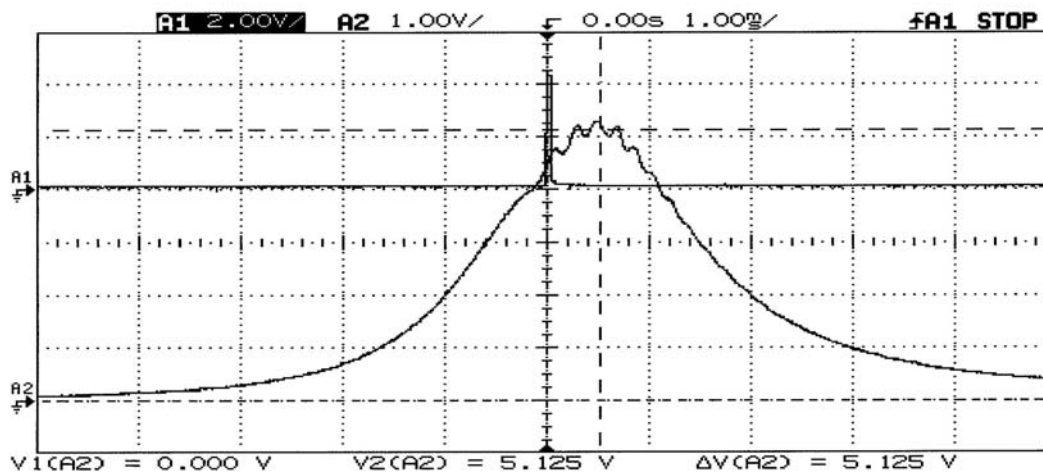


Figura 4.1 - Exemplo do gráfico gerado pelo osciloscópio média de 32 ciclos

#### 4.1.1 Motor de ignição por compressão (ICO)

Os resultados obtidos no ensaio do motor de ignição por compressão ICO, utilizando óleo diesel, encontram-se apresentados na tabela 4.1. O pico de pressão no cilindro nº 1 e a posição do pistão do motor ensaiado foram obtidos da curva média gerada por 32 ciclos amostrados pelo osciloscópio. Como os transdutores piezelétricos respondem a variações de pressão e não a pressões constantes a eles aplicadas é necessário, após a conversão de tensão em pressão, efetuar a correção de toda a curva. A correção da curva de pressão medida foi feita através de uma referência externa (pressão do coletor de admissão).

Durante o intervalo de 180° a 185° de deslocamento da árvore de manivelas a velocidade do pistão é quase nula e a pressão absoluta medida do cilindro é igual à pressão absoluta medida no coletor de admissão. A diferença entre a média das pressões nesse intervalo e o valor da pressão de admissão foi subtraída de todos os valores de pressão medidas. Com este procedimento, além da correção da curva reduz-se o efeito do “drift” no início do ciclo provocado pela variação brusca de temperatura no sensor no momento da passagem do tempo de combustão para o tempo de admissão.

Tabela 4.1 - Pressão de combustão motor ciclo Diesel (ICO)

Rotação do motor (RPM)	Tensão amplificador (volts)	Pressão máxima (bar)	Tempo em rel. ao PMS (mS)	Ângulo em rel. ao PMS (graus)
1400	3,781	94,525	1,400	11,76
1600	4,125	103,125	1,420	13,63
1800	4,594	114,850	1,420	15,34
2000	4,540	113,500	1,230	14,76
2200	4,720	118,000	1,230	16,24
2400	4,636	115,900	0,920	13,25
2600	4,680	117,000	0,760	11,86
2800	4,781	119,525	0,750	12,60
3000	4,969	124,225	0,750	13,50
3200	4,900	122,500	0,540	10,37
3400	5,125	128,125	0,530	10,81
3600	5,000	125,000	0,440	9,50
3800	5,281	132,025	0,420	9,58

Para obtenção da pressão máxima de combustão multiplicou-se a tensão de saída do amplificador pelo ganho total do sistema, que foi configurado no amplificador para 25bar/volt, conforme apresentado no capítulo 3, tabela 3.5 – parâmetros de entrada do amplificador. Os tempos medidos apresentados são os tempos gastos para a pressão atingir seu valor máximo em relação ao ponto morto superior do pistão e ao início de injeção de combustível no cilindro. Os ângulos medidos correspondem à posição angular que se encontrava o virabrequim em relação ao PMS e ao início da injeção.

#### 4.2 Motor de ignição por centelha (ICE)

A aquisição dos dados do motor ICE foi feita com o Indiset 620 da AVL, equipamento específico para medições em motores de combustão interna. A medição de pressão foi efetuada com resolução do “encoder” de 1 grau e gravação de 50 ciclos, gerando uma tabela com 36000 pontos. Para determinação da potência indicada foi necessário: determinar a curva de volume em função da posição angular do virabrequim, converter as tensões medidas em pressão absoluta, obter a curva média de pressão, plotar os diagramas p-V e p- $\alpha$ , efetuar a análise dos dados através do diagrama log p x logV e efetuar os cálculos termodinâmicos. Devido a grande quantidade de pontos medidos a tabela 4.2 mostra um exemplo de parte dos dados, equivalente à variação

angular de 10 graus do virabrequim em 50 ciclos de tensão medidos, na saída do amplificador piezométrico. No apêndice pode ser encontrado os 720 pontos medidos de 1 ciclo.

Tabela 4.2 - Exemplo de dados de tensão na saída do amplificador, variação angular de 10 graus do virabrequim em 50 ciclos.

Cycle	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	17,0	18,0	19,0	20,0	21,0	22,0	23,0	24,0	25,0		
Tensão na Saída do Amplificador																											
Posição Angular	X	-5	0,62	0,93	1,80	0,65	1,09	1,33	0,78	1,40	1,88	1,20	1,29	1,20	1,43	1,48	1,41	0,60	1,62	0,82	1,54	1,40	1,11	1,08	1,51	0,79	0,92
	-4	0,81	1,07	1,31	0,81	1,17	0,75	1,03	1,72	1,77	0,86	1,07	0,96	0,93	0,73	0,81	0,65	1,52	1,00	1,39	1,29	0,72	0,59	1,51	0,83	1,10	
	-3	1,16	1,44	0,70	1,22	1,48	0,69	1,36	1,81	1,51	0,72	1,15	0,60	0,69	0,62	0,68	0,84	1,40	0,64	0,79	0,71	0,76	0,67	1,64	1,18	1,40	
	-2	1,53	1,67	0,74	1,54	1,71	0,89	1,58	1,79	1,20	0,96	1,43	0,75	0,86	0,88	0,90	1,15	1,61	0,77	0,67	0,66	1,03	1,00	1,67	1,47	1,60	
	-1	1,85	1,71	1,02	1,64	1,76	1,16	1,67	1,74	0,63	1,21	1,65	1,04	1,14	1,21	1,20	1,63	0,83	1,08	0,91	0,93	1,30	1,43	1,44	1,58	1,63	
	0	1,89	1,70	1,56	1,70	1,76	1,51	1,68	1,68	0,72	1,40	1,72	1,51	1,33	1,57	1,55	1,90	0,60	1,37	1,20	1,27	1,43	1,66	1,23	1,60	1,63	
	1	1,88	1,67	1,89	1,72	1,73	1,70	1,65	1,64	0,97	1,43	1,68	1,81	1,61	1,79	1,74	1,93	0,76	1,46	1,40	1,47	1,44	1,73	0,71	1,57	1,60	
	2	1,82	1,65	1,92	1,72	1,72	1,74	1,59	1,60	1,52	1,43	1,63	1,85	1,68	1,82	1,78	1,91	1,29	1,49	1,46	1,50	1,43	1,75	0,70	1,56	1,56	
	3	1,76	1,65	1,93	1,70	1,72	1,70	1,55	1,57	1,80	1,41	1,57	1,86	1,65	1,79	1,74	1,85	1,93	1,48	1,46	1,51	1,40	1,72	0,89	1,56	1,55	
	4	1,72	1,63	1,87	1,69	1,70	1,65	1,51	1,54	1,83	1,38	1,56	1,81	1,59	1,73	1,68	1,78	2,19	1,45	1,43	1,48	1,37	1,68	1,26	1,57	1,54	
5	1,69	1,60	1,78	1,67	1,68	1,61	1,48	1,51	1,84	1,37	1,54	1,73	1,55	1,68	1,64	1,72	2,24	1,43	1,41	1,46	1,37	1,65	1,56	1,55	1,53		
Cycle	26,0	27,0	28,0	29,0	30,0	31,0	32,0	33,0	34,0	35,0	36,0	37,0	38,0	39,0	40,0	41,0	42,0	43,0	44,0	45,0	46,0	47,0	48,0	49,0	50,0		
Tensão na Saída do Amplificador																											
Posição Angular	X	-5	0,79	1,50	0,88	1,03	1,48	1,32	0,79	1,56	0,77	1,65	0,77	1,26	1,16	1,83	0,70	1,39	1,75	0,61	0,61	1,71	0,77	1,50	1,65	1,25	0,73
	-4	1,14	1,48	1,06	1,48	1,07	1,16	0,89	0,69	0,75	1,06	1,14	0,81	1,48	1,21	0,85	0,94	1,07	0,78	0,84	1,49	1,08	1,00	1,63	1,45	1,27	
	-3	1,48	1,46	1,45	1,68	1,13	1,02	1,24	0,64	1,09	1,01	1,51	0,71	1,61	0,89	1,21	0,85	0,71	1,15	1,25	0,76	1,44	0,88	1,37	1,65	0,69	
	-2	1,66	1,52	1,71	1,77	1,11	1,16	1,52	1,01	1,47	1,28	1,66	0,90	1,62	1,01	1,52	1,09	0,89	1,48	1,70	0,63	1,66	1,17	0,93	1,73	0,67	
	-1	1,69	1,56	1,76	1,80	1,04	1,35	1,62	1,50	1,63	1,56	1,74	1,16	1,62	1,25	1,61	1,33	1,19	1,62	1,97	0,84	1,70	1,43	0,75	1,73	0,89	
	0	1,66	1,18	1,76	1,79	1,19	1,45	1,62	1,75	1,67	1,70	1,77	1,61	1,63	1,61	1,67	1,46	1,43	1,64	2,00	1,25	1,68	1,58	0,87	1,67	1,16	
	1	1,60	1,07	1,72	1,76	1,39	1,45	1,59	1,80	1,66	1,71	1,76	1,78	1,65	1,78	1,68	1,46	1,50	1,62	1,99	1,76	1,63	1,67	1,08	1,61	1,61	
	2	1,57	1,19	1,69	1,73	1,51	1,43	1,55	1,78	1,64	1,69	1,74	1,78	1,65	1,80	1,68	1,46	1,51	1,60	1,93	2,05	1,59	1,67	1,44	1,57	1,77	
	3	1,57	1,51	1,67	1,71	1,52	1,40	1,52	1,75	1,62	1,66	1,73	1,75	1,63	1,76	1,67	1,44	1,50	1,58	1,87	2,09	1,56	1,62	1,58	1,55	1,77	
	4	1,56	1,62	1,65	1,69	1,50	1,39	1,51	1,70	1,61	1,65	1,71	1,69	1,60	1,70	1,66	1,42	1,46	1,57	1,82	2,07	1,55	1,56	1,61	1,53	1,75	
5	1,55	1,63	1,63	1,66	1,48	1,39	1,50	1,68	1,59	1,64	1,68	1,63	1,55	1,65	1,64	1,41	1,44	1,56	1,79	1,99	1,54	1,53	1,58	1,50	1,68		

**Curva do Volume do Cilindro** - A curva de volume foi determinada através da equação 2.7 para cada posição angular do virabrequim em função da geometria do cilindro do motor. Para verificação da precisão dos cálculos do volume do cilindro partiu-se da premissa de que o volume do cilindro, quando o pistão está no PMS, é igual ao volume da câmara de combustão e quando está no PMI é igual ao volume de deslocamento do pistão mais o volume da câmara. Calculou-se o volume na posição zero grau do virabrequim e na posição 180 graus pela equação 2.7 e comparou-se com o volume da câmara calculado através da equação 2.1 e com o volume de deslocamento acrescido do volume da câmara. O resultado dos volumes obtido foram os mesmos para os cálculos efetuados com os dados da geometria do cilindro do motor. A tabela 4.3 apresenta os principais valores da curva de volume e sua respectiva posição angular, e a figura 4.2 apresenta a curva do volume do cilindro em função da posição angular do virabrequim.

Tabela 4.3 - Exemplo de volumes calculados

Posição angular (graus)	Volume (Cm <sup>3</sup> )
-180	273,54
-90	166,74
0	23,78
90	166,74
180	273,54
360	23,78

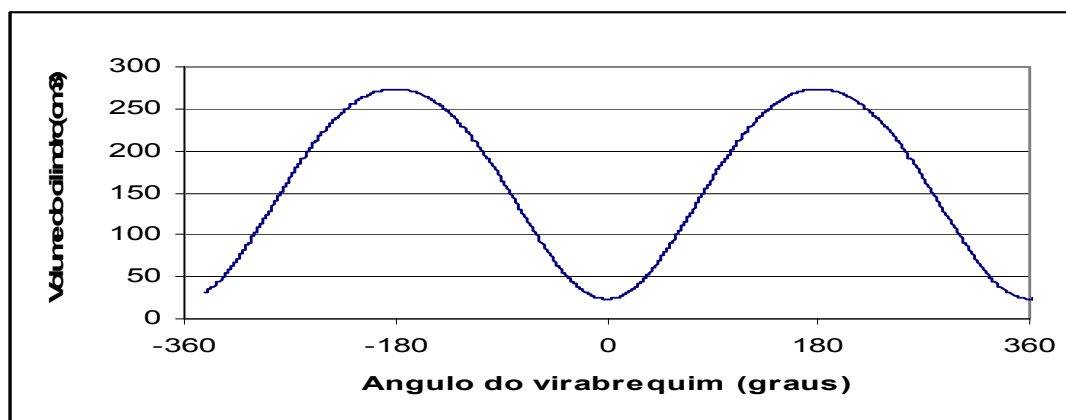


Figura 4.2 - Curva do volume do cilindro em função da posição angular do virabrequim.

**Curva de Pressão** - A conversão dos valores de tensão em pressão absoluta foi feita diretamente pelo Indiset 620 em função da sensibilidade do sensor e da pressão de referência configurado pelo operador do equipamento. O PMS do pistão corresponde à posição angular zero, valores negativos, o pistão está posicionado antes do PMS e valores positivos após PMS. A figura 4.3 apresenta 50 curvas sobrepostas da pressão que foram obtidas através da aquisição contínua de 50 ciclos completos do motor, operando a 6000 RPM e 100% de carga e a cada variação de 1° do virabrequim. Verifica-se a grande variação da pressão de combustão de um ciclo a outro, sem alteração das condições de operação do motor (abertura da borboleta de aceleração, carga e rotação). Segundo Peters e Borman (1970) esta variação é maior em motores com ignição por centelha do que em motores com ignição por compressão. Em seu trabalho um motor com ignição por centelha apresentou variação de até 65% na pressão de combustão.

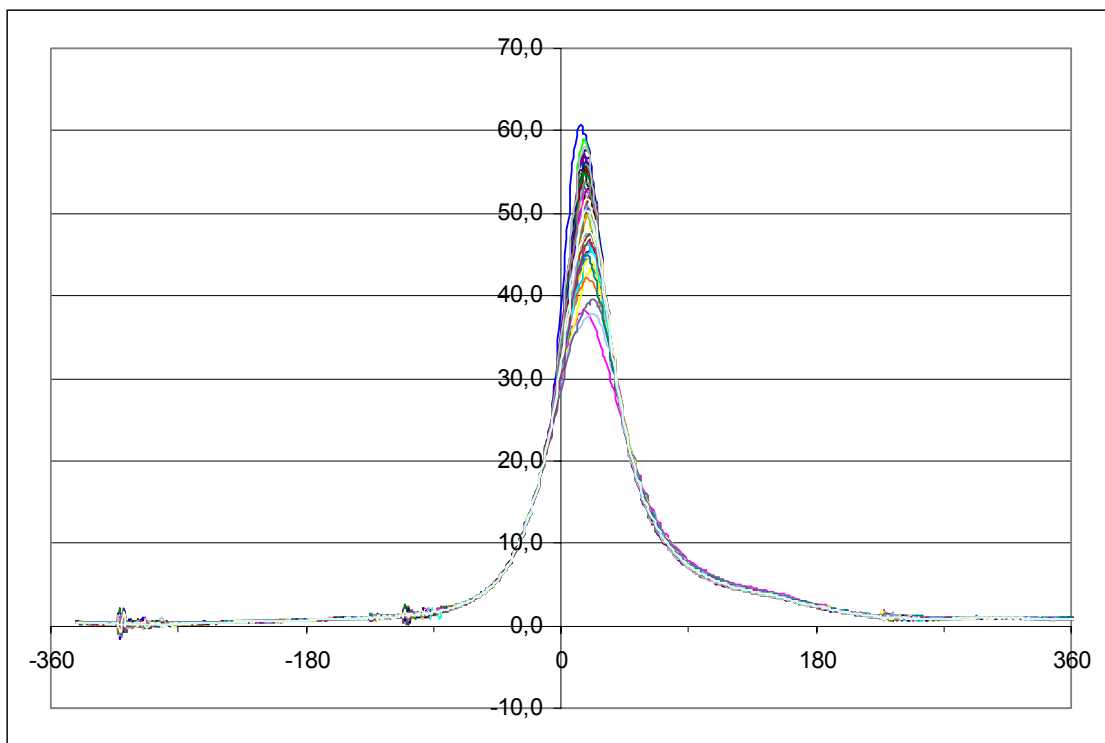


Figura 4.3 Curvas de pressão do cilindro nº 1 em função da posição angular do virabrequim 50 ciclos medidos motor a 6000 RPM a 100% de carga.

Segundo Taylor (1968), na prática, uma das características proeminentes do processo de combustão de ignição por centelha é a grande variação, de ciclo para ciclo, do diagrama de pressão-ângulo de manivela. Pesquisa nesse campo indica que “a maioria dos sistemas comerciais de ignição por centelha mostra alguma variação no ângulo de manivela em que ocorre a centelha. Uma causa óbvia pode ser deficiência na formação da mistura ar-combustível, grande quantidade de gás residual no cilindro e a variação do ponto de ignição”.

A tabela 4.4 mostra os dados da tabela 4.2 convertidos em pressão já referenciada a pressão do coletor de admissão.



Tabela 4.4 - Exemplo de dados pressão medidos com Indiset 620, variação angular de 10 graus do virabrequim em 50 ciclos

		6000@wot_E22																									
Cycle		1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	17,0	18,0	19,0	20,0	21,0	22,0	23,0	24,0	25,0	
		Pressão da Combustão																									
X	Posição Angular	-5	26,4	24,9	25,3	26,1	26,2	26,8	26,5	28,1	25,0	27,0	25,7	26,0	25,2	25,7	27,1	26,3	26,0	25,9	26,2	25,6	25,3	25,5	24,6	26,3	26,7
		-4	27,6	26,0	26,5	27,2	27,2	28,0	27,6	29,8	25,9	28,5	26,7	27,0	26,0	26,8	28,6	27,5	27,0	27,0	27,4	26,6	26,5	26,4	25,4	27,5	27,7
		-3	28,9	26,9	27,2	28,5	27,9	29,2	28,8	31,6	27,0	29,9	27,8	28,0	27,1	28,0	29,9	29,0	28,1	27,8	28,4	27,5	27,4	27,2	26,5	28,8	29,0
		-2	29,9	27,7	27,7	29,8	29,0	30,7	30,2	33,7	27,7	31,3	29,0	29,1	28,1	29,4	31,3	30,5	29,2	28,9	29,6	28,5	28,3	28,3	27,2	30,0	30,4
		-1	31,0	28,6	28,9	31,4	30,2	32,2	31,6	36,0	28,7	33,3	30,0	30,4	29,0	30,9	32,6	31,8	30,3	29,9	30,5	29,6	29,4	29,4	27,6	30,9	31,8
		0	32,3	29,3	30,1	32,7	31,2	33,9	33,2	38,4	29,5	34,8	30,9	31,7	29,7	32,1	34,0	33,1	31,4	31,2	31,7	30,9	30,7	30,5	28,4	32,1	33,1
		1	33,7	30,4	30,9	34,2	32,3	35,4	34,6	40,7	30,6	36,4	32,0	33,0	30,5	33,2	35,3	34,3	32,5	32,4	32,9	32,1	31,9	31,4	29,2	33,6	34,7
		2	35,0	31,5	31,7	35,6	33,0	36,7	36,1	42,8	31,8	37,9	33,2	34,4	31,2	34,3	36,6	35,9	33,6	33,6	34,0	33,3	33,0	32,3	30,1	35,1	36,0
		3	35,9	32,5	32,4	37,2	34,1	38,0	37,6	45,0	32,9	39,5	34,4	35,8	32,1	35,7	37,8	37,4	34,4	35,1	35,1	34,5	34,2	33,3	31,0	36,3	37,7
		4	36,6	33,5	33,1	38,6	35,2	39,6	39,1	46,9	34,0	41,3	35,3	37,2	32,7	37,0	39,0	39,0	35,2	36,3	36,3	35,7	35,2	34,4	31,9	37,4	39,5
		5	37,6	34,2	33,7	39,9	36,2	40,9	40,4	49,0	34,8	42,8	36,2	38,4	33,3	38,3	40,3	40,6	36,1	37,9	37,4	37,1	36,1	35,4	32,8	38,8	41,1
		6000@wot_E22																									
Cycle		26,0	27,0	28,0	29,0	30,0	31,0	32,0	33,0	34,0	35,0	36,0	37,0	38,0	39,0	40,0	41,0	42,0	43,0	44,0	45,0	46,0	47,0	48,0	49,0	50,0	
		Pressão da Combustão																									
X	Posição Angular	-5	26,3	27,6	27,2	25,3	25,7	25,5	26,6	26,0	26,2	26,6	26,2	26,1	26,0	25,7	25,8	27,1	27,1	25,5	27,7	25,8	27,3	26,9	25,4	25,2	25,9
		-4	27,8	28,9	28,5	26,1	26,4	26,6	27,8	27,1	27,0	27,8	27,3	27,0	27,0	26,5	26,9	28,3	28,3	26,5	29,2	26,7	28,6	28,1	26,1	25,9	26,8
		-3	29,1	30,1	30,1	26,9	27,3	27,9	29,0	28,3	28,0	29,2	28,4	27,9	28,2	27,6	27,9	29,5	29,9	27,7	30,6	27,7	30,3	29,5	27,2	26,9	27,9
		-2	30,5	31,5	31,7	27,9	28,2	29,1	30,3	29,3	29,1	30,4	29,6	28,9	29,1	28,9	29,2	31,4	31,5	28,7	32,3	29,0	31,9	30,8	28,3	28,0	29,0
		-1	31,8	32,9	33,4	28,9	29,3	30,2	31,6	30,5	30,3	32,0	31,0	30,0	30,3	29,9	30,6	33,1	33,1	29,8	33,9	30,1	33,4	32,0	29,3	28,9	30,3
		0	33,5	34,6	34,9	30,1	30,2	31,3	32,9	31,6	31,4	33,8	32,5	31,3	31,5	30,7	32,1	34,7	34,7	31,1	35,5	31,3	34,9	33,3	30,2	30,0	31,4
		1	35,6	36,6	36,5	31,0	31,0	32,5	34,4	32,7	32,4	35,4	34,0	32,4	32,9	31,5	33,8	36,3	36,5	32,4	37,3	32,5	36,5	34,6	31,1	30,9	32,7
		2	37,2	38,3	37,9	32,1	32,1	33,8	35,7	33,8	33,3	37,0	35,7	33,4	34,2	32,5	35,0	37,9	38,4	33,6	38,9	33,8	38,1	36,0	32,3	32,0	33,8
		3	38,9	39,9	39,7	33,0	33,0	35,3	36,7	34,8	34,6	38,5	37,4	34,4	35,6	33,4	36,5	39,4	40,2	34,7	40,3	34,8	39,9	37,3	33,6	33,2	34,7
		4	40,7	41,7	41,3	34,3	34,0	36,5	38,0	35,9	35,7	40,3	39,2	35,6	37,0	34,4	38,0	40,9	41,6	35,6	41,9	35,8	41,7	38,7	34,8	34,4	36,0
		5	42,4	43,3	42,8	35,6	35,0	37,7	39,3	37,0	36,9	42,1	41,0	36,8	38,3	35,2	39,7	42,4	43,1	36,4	43,6	36,8	43,3	39,8	36,1	35,5	37,4

**Estatística dos Dados Medidos** - Como visto na revisão da literatura no item 2.3 o motor de combustão interna gera valores médios de pressão de combustão, correspondendo a média de valores de vazão de ar e combustível. O estudo estatístico dos dados confirma a grande variação cíclica do motor Otto nas mesmas condições de operação e a necessidade do uso do ciclo médio quando se quer comparar a potência indicada a potência medida do motor. Os resultados apresentados foram efetuados com uma população amostral de 50 ciclos medidos, com resolução do “encoder” de 1 grau, totalizando 36000 pontos. Na tabela 4.5 apresenta os seguintes resultados: o valor máximo, mínimo e médio, suas respectivas posições angulares e o desvio padrão da pressão de combustão.

Tabela 4.5 - Resultado da análise estatística dos dados

Rotação RPM	Pressão medida					Desvio padrão (bar)
	Máxima (bar)	Posição angular (graus)	Mínima (bar)	Posição angular (graus)	Média (bar)	
6000	60,64	14	37,87	22	50,70	5,37
5750	64,02	14	36,50	21	52,61	6,70
5500	58,67	18	33,05	12	48,48	5,83
5250	64,87	19	38,21	17	50,08	5,73

**Avaliação dos Dados Medidos** - Uma pré-avaliação dos dados para verificar se estão suficientemente refinados e se a medição efetuada representa o fenômeno físico deve ser feita antes de qualquer consideração, conforme item 2.4 da revisão bibliográfica. A qualidade dos dados foi verificada através da análise da linha de compressão do diagrama logarítmico da pressão e do volume e do cálculo da constante politrópico.

A curva de compressão, do momento em que a válvula de admissão está fechada até o pistão alcançar quase o PMS pode ser modelado como um processo politrópico,  $PV^n = \text{constante}$ , onde  $n$  é a inclinação da linha de compressão e varia de 1,33 a 1,35 para motores ciclo Otto. Os valores de  $k$  foram calculados através da equação 2.23 para os ciclos medidos. Encontram-se dentro da faixa prevista na literatura e estão apresentados na tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Valores calculados do coeficiente politrópico k no tempo de admissão

Rotação	n
6000	1,3503
5750	1,3498
5500	1,3499
5250	1,3498

Através da análise da linha de compressão do diagrama log p-logV é possível avaliar a qualidade dos dados medidos e verificar se houve erros no referenciamento ou no faseamento entre a curva de pressão e a curva do volume. A linha de compressão deve se aproximar de uma reta. A curvatura da linha no início do curso indica erro no referenciamento e no faseamento da pressão de combustão medida. Por outro lado, se a curvatura da linha de compressão ocorrer no fim do curso indica erro na determinação do volume da câmara de combustão. A figura 4.4 apresenta o diagrama log p-logV traçado com os dados médios de 50 ciclos do motor operando com 100% de carga nas rotações de 5250 , 5500,5750 e 6000 RPM.

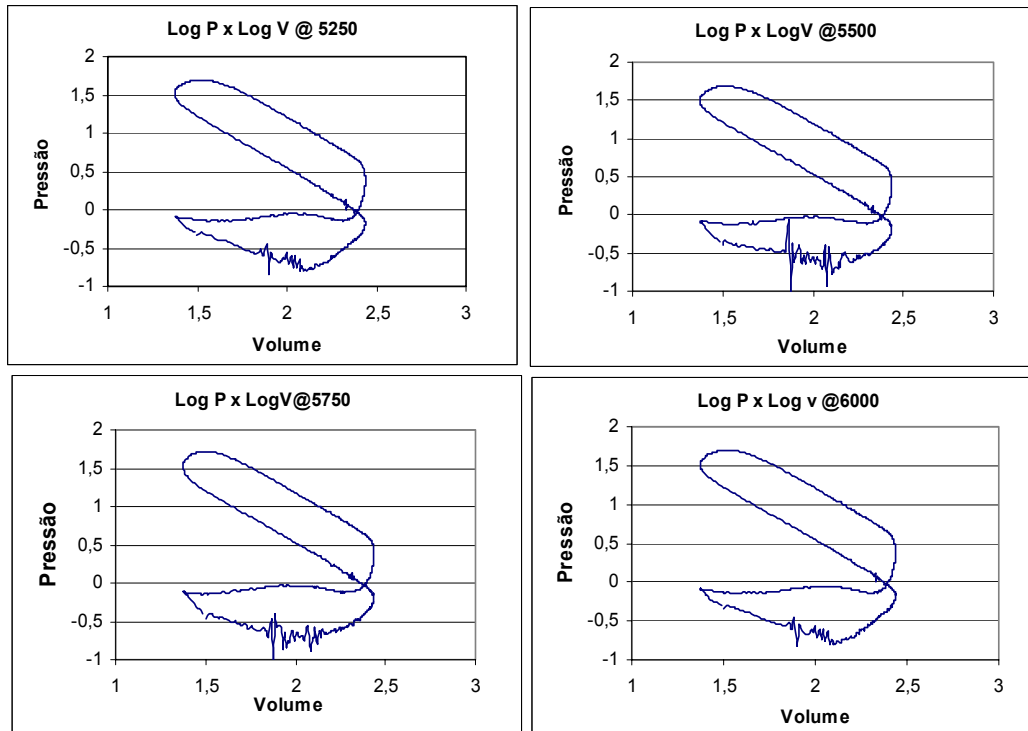


Figura 4.4 - Diagrama log p-logV do motor operando a 100% de carga.

Pode-se perceber na figura 4.4 o efeito indesejado conhecido como “short term drift”, causado por tensões térmicas induzidas na face do transdutor, é considerado um fato normal pois o transdutor não possui refrigeração. A linha de pressão no tempo de compressão não apresenta curvatura nas suas extremidades, caracterizando que o referenciamento, o faseamento e o volume da câmara estão corretos.

**Cálculos Termodinâmicos** - Como visto no item 2.14 o motor gera valores médios de pressão de combustão, correspondendo à média de valores de vazão de ar e combustível, obtendo desta forma uma potência média indicada. O uso da média de vários ciclos, quando se quer comparar a potência indicada calculada com a potência medida no banco de provas é apropriado. Segundo Lancaster et al., 1975, a quantidade de ciclos necessária para o limite de confiabilidade de 99,9 % e um desvio padrão de 3% da curva de pressão é de 40 ciclos.

Como a curva média de pressão deste estudo foi gerada com os dados de 50 ciclos medidos e resolução de 1° é adequada para calcular a pressão média indicada, o trabalho realizado pelo cilindro e a potência bruta indicada do motor operando a 100% de carga em 4 regimes de rotações. A potência indicada que é resultante do trabalho transferido pelo gás ao pistão do motor e foi calculada através da equação 2.10. O cálculo do trabalho bruto indicado por ciclo ( $w$ ) que é numericamente igual à área do diagrama p-V foi obtido com a integração numérica do diagrama p-V através da equação 2.8. A pressão média indicada IMEP foi calculada através da equação 2.9 e comparada com a IMEP do Indiset 620. A tabela 4.7 apresenta os resultados dos cálculos efetuados, a potência medida no banco de teste ( $P_e$ ), o IMEP fornecido pelo Indiset 620, o trabalho fornecido pelo gás ( $w$ ), a potência indicada calculada (IMEP) e o rendimento mecânico ( $\eta_m$ ) para quatro diferentes rotações do motor operando a 100% de carga.

Tabela 4.7 - Resultado dos cálculos efetuados motor (ICE)

Rotação (Rpm)	Imep ( Indiset) (bar)	Imep (calculada) (Bar)	W (joule)	Pi (kW)	Pe (kW)	$\eta_m$ (%)
6002	9,7227	9,8830	247,4864	49,3557	40,2809	81,61
5750	10,1203	10,2873	257,5636	51,3748	40,4942	78,82
5501	10,2597	10,4157	260,8393	52,0159	40,4280	77,72
5251	10,5633	10,7215	268,5691	53,5431	39,3028	73,40

Observa-se na tabela 4.7 que o valor do IMEP calculado e valor do IMEP fornecido pelo Indiset 620 estão próximos, validando desta forma as equações utilizadas para os cálculos. Os resultados ainda indicam que o motor operando a 5251 RPM apresentou rendimento de 73,40%, menor rendimento mecânico, apesar do IMEP de 10,72 bar ser o valor máximo.

Segundo Heywood (1988), a eficiência mecânica depende da posição de abertura da borboleta de aceleração. Os valores típicos para os motores modernos com a borboleta de aceleração 100% aberta é de 90% para a faixa de rotação de 1800 a 2400 RPM e cai para 75% na rotação máxima. A figura 4.5 apresenta os diagramas p-V do motor funcionando a 5250, 5500, 5750 e 6000 RPM, com o motor a 100% de carga e gerados com os valores médios de pressão dos 50 ciclos medidos com 720 pontos por ciclo.

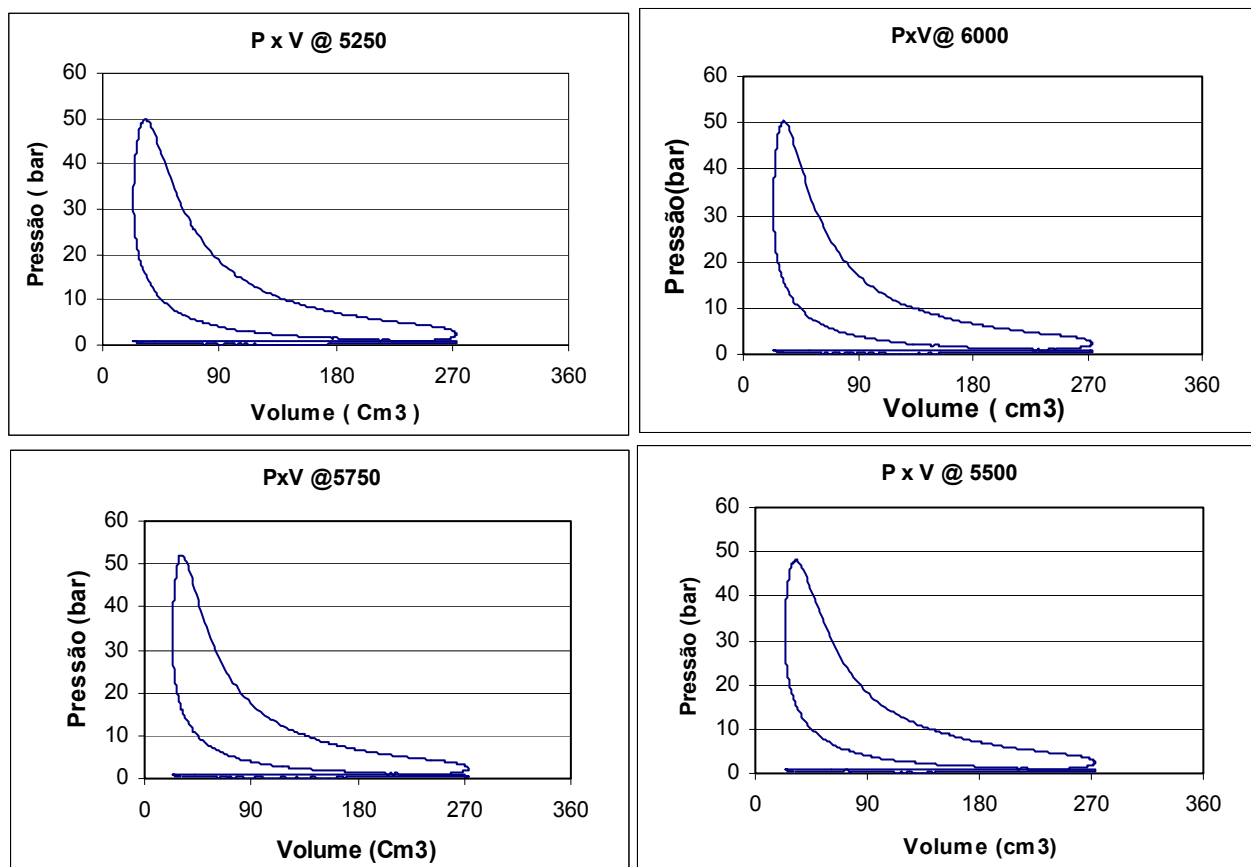


Figura 4.5 - Diagramas p-V do motor funcionando a 5250, 5500, 5750 e 6000 RPM

Os principais parâmetros que alteram a forma do diagrama p-V são: a quantidade de combustível injetada e a pressão de combustão. O sistema de gerenciamento eletrônico de injeção de combustível e ignição monitora em tempo real a quantidade de combustível injetada e o tempo da ignição. Os diagramas p-V da figura 4.5 apresentam pouca variação em suas formas devido à precisão do sistema de gerenciamento eletrônico. A pressão máxima de combustão é limitada pelo avanço da ignição e pelo sensor de detonação que atrasa a ignição em caso de pré-combustão, para não provocar danos nos componentes mecânicos do motor. A sonda lambda instalada no coletor de escapamento controla e corrige a quantidade de combustível injetada no coletor de admissão, mantendo a relação estequiométrica ideal entre o ar admitido e a massa de combustível injetada. A variação do trabalho ( $w$ ) realizado pelo cilindro, para se adequar as necessidades, pode ser observado na tabela 4.7.

## Capítulo 5

### Conclusões e Sugestões para Próximos Trabalhos

#### 5.1 Conclusões

Os ensaios realizados comprovam que:

- O rendimento mecânico obtido pelo quociente entre a potência efetiva e a potência indicada é o parâmetro mais eficiente para verificar a performance do motor pois indica diretamente quanto de energia química do combustível se transformou em energia mecânica.

- O diagrama  $P \times \alpha$  é uma ferramenta fundamental para otimização da combustão pois permite ajustar o ponto de ignição de acordo com a velocidade de queima dos combustíveis, obtendo a pressão de combustão adequada, para propiciar o máximo torque, menor emissão de gases tóxicos e verificar a existência de pré-ignição no cilindro.

- O gerenciamento eletrônico da injeção de combustível, com a sonda lambda de dois pontos, é insuficiente para evitar a grande variação cíclica na pressão de combustão no motor ciclo Otto.

- Houve variação de 57% na pressão de combustão em 50 ciclos medidos, com o motor operando em regime constante, com rotação de 5750 RPM, 100% de carga e a borboleta de aceleração totalmente aberta. A pressão máxima obtida foi de 64 bar e a pressão mínima foi de 36,5 bar.

- A 6000 RPM o motor obteve o seu maior rendimento mecânico, de 81%, e o seu menor rendimento de 73% ocorreu a 5250 RPM. Como esperado o inverso aconteceu com o trabalho indicado, maior trabalho de 258,5 joule a 5250 RPM e menor trabalho de 247 Joule a 6000 RPM.

Esta inversão ocorreu devido a interferência do sistema de gerenciamento eletrônico, aumentando a injeção de combustível para manter o torque solicitado.

- O método aplicado funciona e pode ser utilizado para cálculo da potência indicada e do rendimento mecânico de motores de combustão interna.

## **5.2 Recomendações para futuros trabalhos**

- Pesquisar processos de sobre alimentação dinâmica para aumentar o enchimento do gás dos cilindros, através do desenvolvimento de coletor de admissão: com tubo oscilador, reservatório de ressonância e com geometria variável.

- Modelagem matemática de coletor de admissão e válvula injetora de combustível.

- Desenvolvimento de uma unidade de comando didática para estudo de estratégias de gerenciamento eletrônico de motores para testar os modelos matemáticos desenvolvidos.

- Desenvolvimento de uma bancada didática para teste de motores com potência até 10 cv, com freio de Foucault e sistema de aquisição de dados para estudo da combustão.



## Referências Bibliográficas

ABD ALLA, G. H. “Computer simulation of a four stroke spark ignition engine”, Energy Conversion and Management, Paper 431043-1061, 2002.

ABNT, Rio de Janeiro, NBR ISO 1585, Veículos Rodoviários - Código de ensaio de motores - Potência líquida efetiva, 1996.

AVL 3066A01. “Piezo Amplifier, Operating Manual”, 1993.

AVL Handbook. “Engine Indicating With Piezoelectric Transducers”, AVL, 1993.

AVL Handbook for Quartz Pressure, AVL, 1994.

Application Note 007, National Instruments, 1996.

BEAK, E.; HAHN, K.; MILLER, M. “A Real-Time Combustion Analysis Instrument”, SAE paper #880689, 1988.

BROWN, W.L. Methods for Evaluating, “Requirements and Error in Cylinder Pressure Measurement”. SAE Transactions, Vol. 76 (1967), Paper 670008.

BROWN, W.L. The Caterpillar Imep Meter and Engine Friction, SAE Paper 730150.

B&W Engineering, Instruction book.operation, K/L – GFCA, 18ed, page 701.02-18, 19xx.

CARTWRIGHT, A.; FLECK, ROBERT. “Cylinder Pressure Analysis in High Performance Two-Stroke Engines”, SAE paper #962535, 1996.

CYPRA, A., et al., “Manual de la técnica del Automovil”, BOSCH, Editorial Reverte, 2000.

FERGUSON, C. R. “Internal Combustion Engines”. Editor John Wiley & Sons, 1973.

FISHER, R.V., Macey J. P. Digital Data Acquisition with Emphasis on Measuring. Pressure Synchronously with Crank Angle”, SAE Paper Being Prepared for Presentation at 1975, SAE Congress, 750028.

HAYES, T. K. and Savage, L. D. “Cylinder Pressure Data Acquisition and Heat Release Analysis on Personal Computer”, SAE paper # 860029, 1986.

HEYWOOD, J.B. Internal Combustion Engine. McGraw-Hill, 1988.

KEATING, E. L. Applied Combustion. Ed. USA: Marcel Dekker, 1993.

KURATLE, R.H; Marki, B. “Influencing Parameters and Error During Indication on Internal Combustion Engines”, SAE Paper 920233, 1992

KURTLER, R. “The State of The Art of Combustion Engine Pressure Instrumentation”, Kistler Instrumente AG, Switzerland, 1995.

LANCASTER, D.R; et al. “Measurement and Analysis of Engine Pressure Data” SAE paper # 750026, 1975.

MORISHITA, M.; KUSHIYAMA, T. “An Improved Method for Determining the TDC Position in a PV-Diagram (First Report). SAE paper #970062, 1992.

NAGASHIMA, K. and Tsuchiya, K. “New Indicated Mean Effective Pressure Measuring Method and Its Applications”. SAE paper # 2002321834, 2002..

NATIONAL INSTRUMENTS, "Data Acquisition (DAQ) Fundamentals". Application Note 007,1999.

OBERT,E.F. Internal Combustion Engines Vol.1. International Textbook Company. Pennsylvania, 1968.

PETERS, B.D.Borman, G. L. Cyclic. "Variation an Average Burning Rate in a Spark Ignition Engine". Paper 700064. Presented at SAE Anual Congress, Detroit, January, 1970.

RANDOLPH, A. L., "Cylinder Pressure Transducer Mounting Techniques to Maximize Data Accuracy". SAE paper # 900171.

RASSWEILER, M.; WITHROW, L. "Motion Pictures of Engine Flames Correlated with Pressure Cards", SAE Journal Transations, Vol.42, N° 5.

ROTH, K. J.; SOBIESSIAK, A.; ROBERTSON, L.; YATES, S. "In-Cylinder Pressure Measurements with Optical Fiber and Piezoelectric Pressure Transducers", SAE paper #2002-01-0745, 2002.

SAITZKOFF, A.; REINMANN, R.;MAUSS, F. "In-Cylinder Pressure Measurements Using the Spark Plug as an Ionization Sensor", SAE paper #970857, 1997.

TAYLOR, F.T. Analise dos Motores de Combustão Interna vol 1. Editora Edgard Blücher.1968

WALTER, T. "Pressure Indicating with Measuring Spark Plugs on a DI-Gasoline Engine-State of Technology". Kistler Instrumente AG, Switzerland,2004.

## Anexo 1

### Aparelho Indicador MAIHAK

O aparelho indicador é empregado para obter os diagramas indicadores pressão versus volume enquanto o motor está funcionando. A figura 1.1 apresenta o aparelho indicador de pressão constituído de mola e pistão fabricado pela Maihak

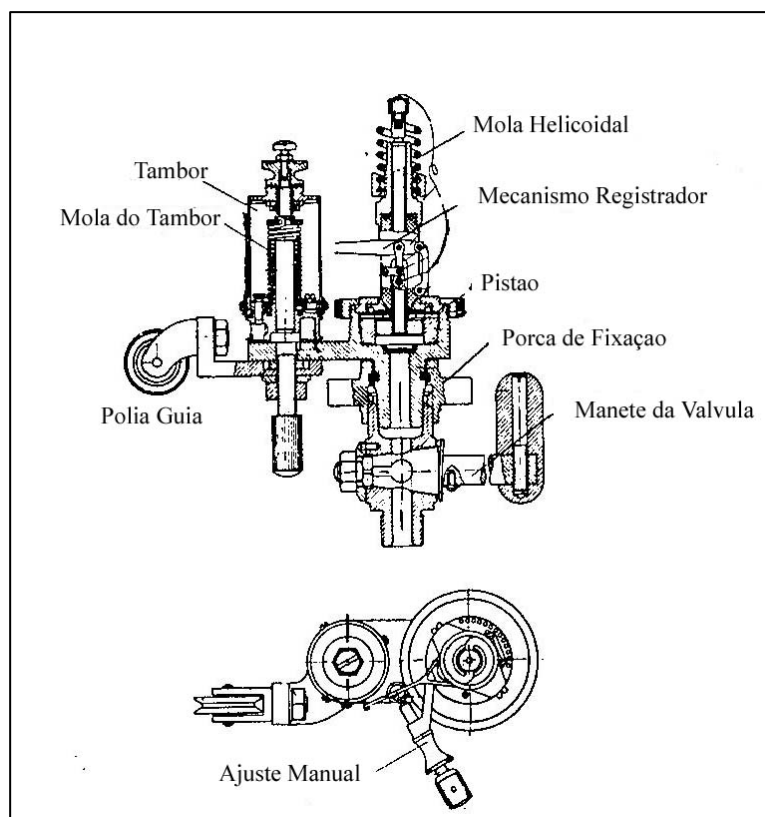


Figura 1.1 Aparelho indicador Maihak..

O diagrama indicador (diagrama  $p \times V$ , diagrama de trabalho) descreve as variações da pressão no cilindro do motor. Sua área pode ser medida através de um planímetro para determinação da pressão média indicada. A figura 1.2 apresenta o diagrama do indicador fechado e aberto.

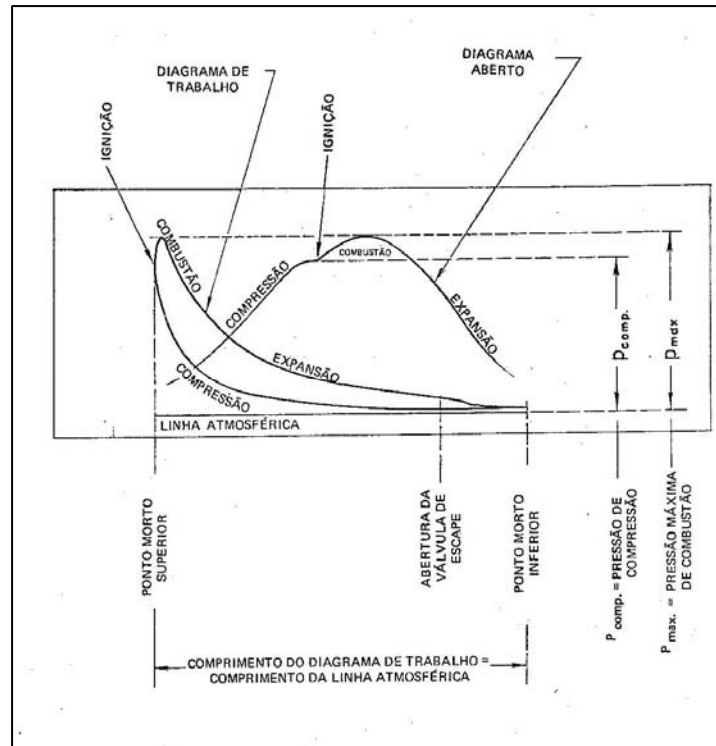


Figura 1.2 Diagrama indicador.

### 1.1 Operação do aparelho Indicador

O indicador deve ser na torneira do cabeçote do motor numa posição tal que o cordão do indicador fique paralelo com o movimento do mecanismo do indicador ao qual o gancho o cordão é preso. Se o cordão for passado sobre uma roldana ele deve tangenciar a roldana. Se isso não for observado, de maneira que o cordão fique desalinhado, o movimento do tambor será curto, inferior ao curso do embolo do motor. O comprimento do cordão deve ser ajustado de maneira tal

que o diagrama seja traçado no centro do papel, o cordão fique esticado em todas as posições e o movimento do tambor correspondendo ao curso do embolo do motor.

Operação: quando em uso, o indicador deve estar ligeiramente aquecido. Coloque-o sobre o cabeçote do motor, 5 minutos antes de utilizá-lo.

(1). Com a torneira para indicador fechada, trace a linha atmosférica pressionando o estilete contra o papel, enquanto o tambor gira 2 ou 3 vezes.

(2). Abra a torneira do indicador. Pressione o estilete contra o papel enquanto o tambor gira 2 ou 3 vezes. Dessa maneira o diagrama indicador é traçado. Feche a torneira do indicador.

(3). Solte o cordão do mecanismo do indicador. Abra a torneira do indicador. Observe o movimento do estilete e pressione-o contra o papel quando ele se mover para cima. Ao mesmo tempo, puxe o cordão do indicador tão depressa que o estilete trace a seqüência de compressão e de ignição na forma assim chamada diagrama aberto. Esta operação requer certa prática, para garantir que a compressão e a pressão máxima possam ser medidas, as pressões máximas e de compressão são medidas com uma régua graduada que corresponde a constante da mola usada no indicador.

O atrito no movimento do pistão do indicador, assim como a folga no mecanismo registrador, distorcerá tanto o formato quanto a área no diagrama. Portanto, o indicador deve ser periodicamente inspecionado.

## 1.2 Ajuste do came de acionamento do aparelho indicador

O mecanismo do indicador mostrado na figura 2c, que através do barbante, move o tambor do papel, representa o curso do pistão no cilindro. O mecanismo é geralmente acionado por came, montado sobre o eixo de comando, na direção do cilindro correspondente. Para garantir que esse came possa produzir uma representação simultânea do curso do pistão correspondente, ele deve mover o tambor com o papel de maneira tal que as posições extremas sejam alcançadas no momento em que o pistão estiver em sua posição superior e inferior. Isto é verificado através do

diagrama do tempo de compressão, isto é, um diagrama de trabalho, após a bomba injetora em questão ter sido colocada fora de operação, puxando-se a cremalheira para o índice zero, no caso de motores diesel ou desconectando-se o cabo da vela de ignição para motores ciclo Otto. A curva de compressão, que é traçada enquanto o pistão sobe, deve agora coincidir com a curva de expansão traçada enquanto o pistão desce. Se o came do indicador estiver colocado errado, essas duas linhas não coincidirão e sim, circunscreverão uma área, fig 1.2 b. Esse erro é corrigido girando-se o came do indicador até que novos diagramas de compressão indiquem que as curvas de compressão e expansão coincidam exatamente, fig. 2.c. Só nesse caso, a área de um diagrama de trabalho representará a potência desenvolvida no cilindro.

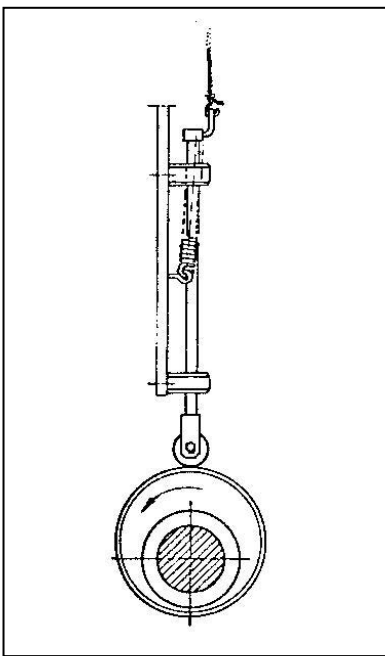


Figura 1.3a- Mecanismo do indicador, girando o came no eixo de comando.

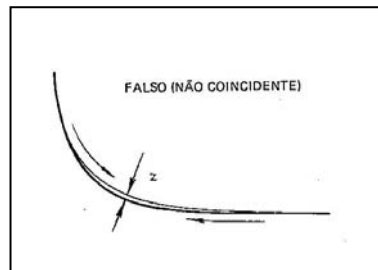


Figura 1. 3 b- Diagrama de compressão, indicador desajustado, discrepante Z.

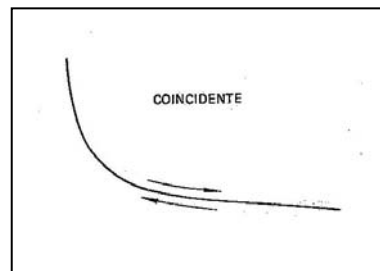


Figura 1. 3c- Diagrama de compressão, indicador corretamente ajustado.

### 1.3 Desempenho do motor

Para a determinação do desempenho geral do motor, parâmetros relativos às condições de combustão devem ser lidos freqüentemente. Além de servirem para determinação do desempenho, medidos periodicamente também auxiliarão no diagnóstico de distúrbios

operacionais em estágio inicial (falhas no sistema de injeção, no mecanismo de válvulas e sopro nos anéis de pistão, etc.). Os principais parâmetros a serem medidos periodicamente para determinação da potência e previsão de possíveis desvios na performance são:

Rotação do motor

Pressão média indicada

Pressão de compressão.

Pressão máxima

Índice das bombas injetoras ou posição da borboleta de aceleração

Temperatura de gás de escapamento

Pressão de ar de alimentação

Temperatura de ar de alimentação

A leitura deve ser feita diariamente e tem o propósito de assegurar o acompanhamento das alterações nas condições de combustão devido ao desgaste e deterioração da vedação dos anéis de pistão, aumento de depósitos nas passagens de ar e gás.

Os instrumentos mecânicos de medição utilizados para controle do desempenho do motor são: termômetros, manômetros, tacômetros e o indicador para levantamento do diagrama  $p \times V$  e  $p \times \alpha$ .

### 1.3.1 Determinação da Pressão média indicada

A pressão média indicada ( $p_i$ ) do motor é calculada através da fórmula abaixo.

$$p_i = \frac{a}{L * c_s} \quad 1.1$$

Onde:

$a$  = área do diagrama de trabalho.

$L$  = comprimento do diagrama de trabalho ou da linha atmosférica



$C_s$  = constante da mola (movimento vertical do estilete do indicador, para uma elevação de pressão de 1 atmosfera no cilindro do indicador).

A área do diagrama é numericamente igual ao trabalho desenvolvido pelo cilindro. Para sua medição utiliza-se um planímetro, que deve ser colocado sobre um pedaço de papelão plano, não muito liso, em relação ao diagrama, conforme mostrado na figura 1.13. Quando posicionado como mostrado na figura, fazer com a ponta um pequeno furo no meio da curva de expansão para localizar a posição de partida e conclusão da circunscrição do diagrama. Empregar boa iluminação e lente de aumento para leitura exata do nônio antes e depois da circunscrição, que deve ser feita com velocidade constante, não muito devagar e pelo menos duas vezes, com uma diferença entre as leituras menor que 1, para que o resultado seja considerado satisfatório.

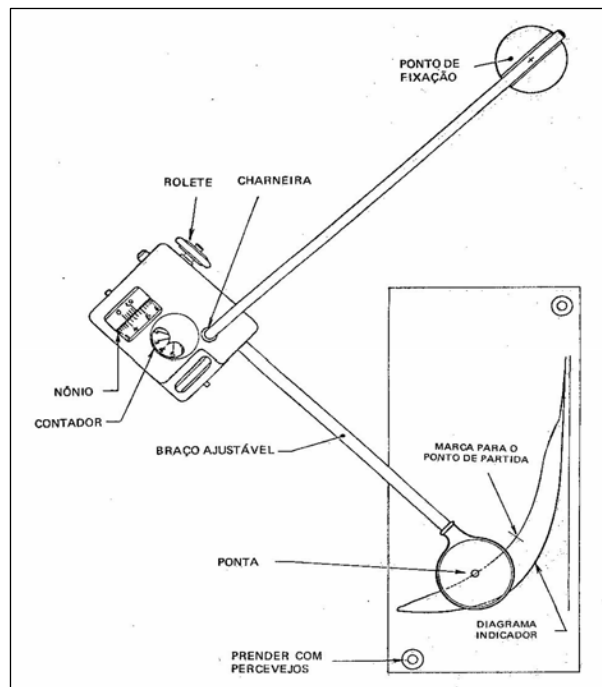


Figura 1.4 Posição do planímetro em relação ao diagrama no início da medição

### 1.3.2 Determinação da Potência Indicada

A potência desenvolvida em cada cilindro pode ser encontrada multiplicando-se a pressão média indicada pela rotação do motor e pela constante do cilindro.

Conhecendo-se a pressão média indicada calcula-se a potência indicada do motor.

$$P_i = K_1 * n * p_i \quad 1.2$$

onde:

$K_1$  = constante do motor

$n$  = rotação do motor.

$p_i$  = pressão média indicada

#### 1.4 Análise de falhas através dos diagramas

Falhas no motor podem ser diagnosticadas através do diagrama indicador. As figuras abaixo mostram alguns exemplos típicos de desajustes ou falhas no motor e suas causas. A figura 1.5 apresenta pressão máxima muito baixa, mas pressão de compressão correta. Para localizar a causa, verifique o funcionamento do injetor e direção do jato. Se estiver em ordem, o óleo combustível está sendo injetado muito tarde, o avanço da bomba injetora deve ser aumentado.

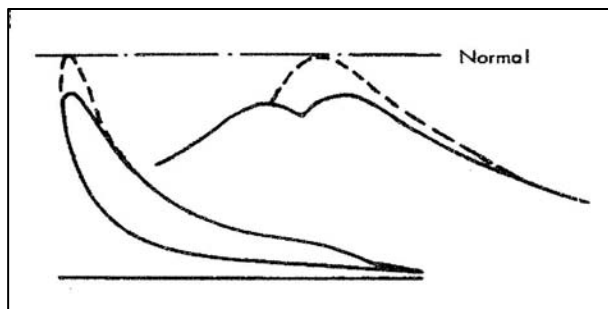


Figura 1.5 Pressão máxima baixa e pressão de compressão normal

O diagrama da figura 1.6 apresenta a pressão máxima muito elevada, porém à pressão de compressão normal, indica injeção muito adiantada. O avanço da bomba injetora deve ser reduzido.

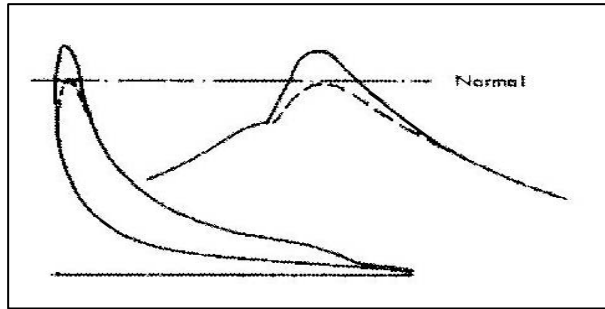


Figura 1.6 Pressão máxima elevada e pressão de compressão normal

O diagrama da figura 1.7 apresenta pressão máxima e de compressão muito baixas, possíveis causas: anéis de pistão com vazamento, válvula de escape com vazamento, aumento de volume, alimentação insuficiente de ar de alimentação devido a depósitos de carvão no sistema de admissão de ar.

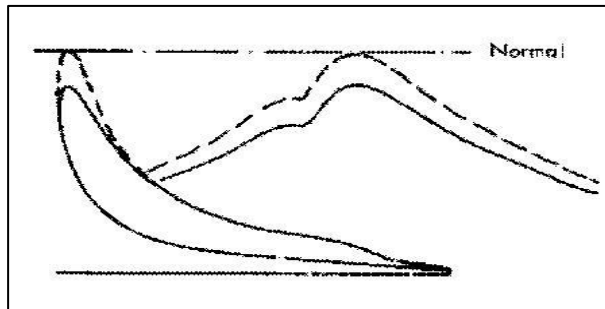


Figura 1.7 Pressão máxima e de compressão muito baixa.

## **Anexo 2**

### **Fundamentos para aquisição digital de dados**

Atualmente, a maioria dos cientistas e engenheiros utiliza PC (computador pessoal) para aquisição de dados em laboratórios de pesquisa, medições, testes de equipamentos e automação de processos industriais. Placas desenvolvidas especificamente para esse fim são instaladas nos slots PCI, PCMCIA e ISA. Para uma maior velocidade do sistema os dados são recebidos através da porta serial e transferidos diretamente para a memória do computador (DMA modo). Para se obter resultado apropriado, a aquisição e processamento dos dados dependem da performance dos seguintes componentes:

- Computador.
- Transdutores
- Condicionador de sinal
- Placa`DAQ`
- Programa

A figura 2.6 mostra um diagrama típico e a interligação dos componentes de um sistema de aquisição de dados via PC.

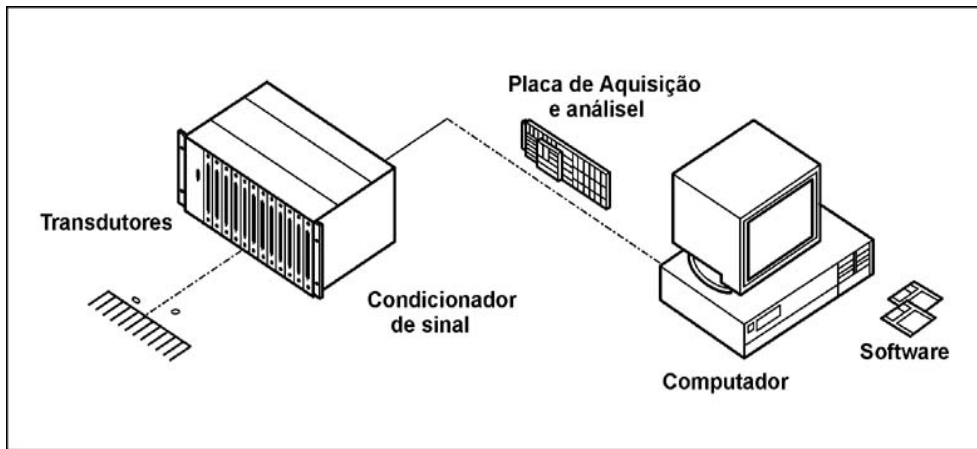


Figura 2.6 Diagrama típico de um sistema para aquisição de dados via PC.

Computador – A evolução tecnológica dos processadores, acoplados a barramentos de alta performance, como o PCI, tornou os sistemas de aquisição de dados com a utilização de PC mais flexível e rápida. O PC (computador pessoal), utilizado na aquisição contínua de dados, afeta diretamente a velocidade do sistema de aquisição. Para a transmissão de dados a distância o setor de comunicação industrial conta, atualmente, com uma grande quantidade de produtos e protocolos de comunicação entre o computador e os dispositivos usados nas aplicações de automação. Muitos destes dispositivos utilizam os padrões EIA, RS 232, RS 422 e RS 485. O padrão RS 232 é uma conexão serial encontrada em PC é utilizada para diversos propósitos, como a conexão para o mouse, impressora e modem, além de porta de comunicação, monitoramento e controle de processos. Porém é um padrão limitado a uma conexão ponto a ponto e a uma distância máxima de 15 metros, entre a porta serial do PC e o dispositivo. A transmissão serial é o processo pelo qual bit a bit é transmitido de forma seqüencial por uma linha física. Sistemas de comunicação de dados digitais estão baseados no envio de informações (letras, números, ou sinais especiais) de um ponto a outro através da utilização de código binário. Para possibilitar a correta comunicação entre o equipamento emissor e o receptor utiliza-se um protocolo, conjunto de normas e especificações que determinam as características do sinal.

A capacidade de transferência de dados do computador afeta a performance do sistema de aquisição. A transferência através de DMA (direct memore access) não é disponível em alguns computadores. A utilização de hardwares que possuam esse mecanismo aumenta a eficiência do

sistema, pois o processador é liberado para executar outras tarefas enquanto os dados são transferidos.

Transdutores – Os transdutores monitoram fenômenos físicos e os convertem em sinais elétricos podendo, dessa forma, ser medidos pelo sistema de aquisição. O sinal elétrico gerado é proporcional ao parâmetro físico medido. Como exemplo de transdutor temos o sensor tipo termopar, que converte temperatura em um sinal analógico, tornando possível sua leitura através de um ADC (conversor analógico digital). Chamamos de sinal elétrico toda diferença de potencial que se manifesta num circuito. Se esse potencial permanecer constante no tempo é chamado de sinal contínuo, caso contrário é chamado de variável. Um sinal elétrico variável pode ser classificado quanto ao modo de sua variação no tempo em sinal analógico e sinal digital. Sinais analógicos são aqueles para os quais a variação de tensão pode assumir quaisquer valores de tensão entre um instante e outro, por exemplo, um sinal elétrico enviado a um alto falante por um amplificador de áudio. Sinais digitais são aqueles para os quais a variação de tensão é permitida dentro de certos valores discretos, ou seja, uma quantidade finita de valores entre dois instantes. Os sinais digitais podem ser binários, caso os valores discretos de tensão possíveis de serem assumidos sejam apenas dois, como o sinal elétrico utilizado em lógica digital TTL, que admite apenas dois níveis de tensão, 0v e 5v. A figura 2.7 apresenta os sinais analógico e digital variando com o tempo.

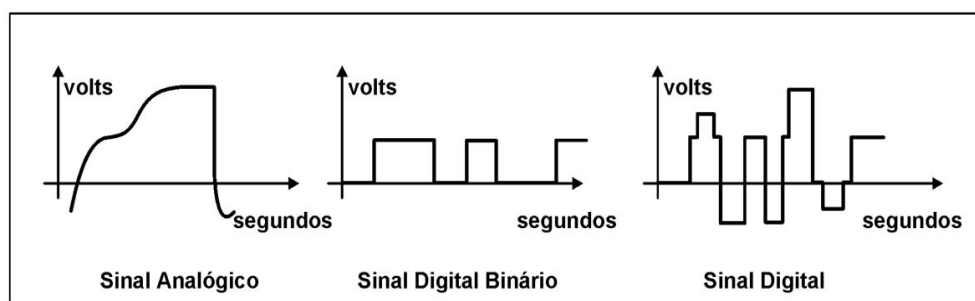


Figura 2.7 Sinais analógico e digital

Condicionador de sinal - O condicionamento do sinal consiste na amplificação do sinal de baixo nível, no isolamento de ruídos indesejáveis e na filtragem. O sinal elétrico gerado pelo

transdutor deve ser tratado de modo que fique compatível com o range de entrada do canal da placa de aquisição. Para aumentar a resolução da medição, o ganho do condicionador deve amplificar o sinal de baixo nível sem ultrapassar o range de entrada da placa de aquisição. Uma importante função do condicionador é proteger o computador de altas tensões transientes, que podem ser captadas pelos transdutores de sinais e danificá-lo. A isolação do sinal a ser medido é de fundamental importância para precisão das medições efetuadas pela placa de aquisição. Quando os canais de entrada da placa e o sinal a ser medido estão referenciados a diferente aterramento, não deve existir diferença de potencial entre os aterramentos. Essa diferença gera uma corrente, chamada de “*ground loop*”, que pode causar erro na medição e danificar a placa de aquisição. O propósito do filtro é remover ruídos indesejáveis do sinal que está se tentando medir. Para a medição de um sinal DC de baixa frequência, como temperatura, um “*lowpass*” filtro é usado para eliminar sinais de alta frequência antes da digitalização do mesmo aumentando, dessa forma, a precisão da medição. Já para a medição de sinal AC como, por exemplo, a vibração, é necessário um filtro diferente para evitar *aliasing*. Como o filtro de ruídos, o filtro “*antialiasing*” é um filtro de baixa frequência. Apesar de possuir várias faixas de corte, remove todos os sinais de frequência diferentes do sinal de entrada da placa. Uma outra função do condicionador é fornecer um sinal de tensão ou corrente para excitação de alguns sensores como strain gauges, termistores e RTD.

É importante entender a natureza do sinal que será medido, a configuração do sistema e fatores ambientais que possam intervir no mesmo. Baseado nestes fatores pode-se determinar qual o tipo de condicionador necessário.

Sinal analógico – A especificação do canal de entrada para sinal analógico, na especificação técnica da placa, fornece informações sobre a capacidade e precisão da placa de aquisição. Especificações básicas da placa indicam o número de canais, taxa de aquisição, resolução, range da tensão de entrada e corrente máxima suportada. Existem dois tipos de canal de entrada: “*single ended*” e diferencial. A Entrada “*single ended*” é conectada a um terra de referência comum a todos os canais e é tipicamente utilizada para sinal de alta tensão (maior que 1 volt). A distância de referência entre o sensor e o condicionador deve ser menor que 4,5m. O canal diferencial de entrada possui o seu próprio terra de referência. A ligação do sensor nesse canal favorece a

redução de ruídos. A taxa de aquisição (“*sample rate*”) é o número de amostras que a placa pode adquirir no tempo de um segundo. Quanto maior a taxa de aquisição maior será a quantidade de amostra e melhor será a representação do sinal, posteriormente. Como exemplo temos os sinais de áudio, que são convertidos em sinais elétricos por um microfone com frequência maior que 20 khz. Para uma boa digitalização e análise desse sinal o teorema de Nyquist determina que a taxa de aquisição da placa seja duas vezes a frequência máxima do sinal que se deseja detectar. No exemplo acima se necessita de uma placa com taxa de aquisição maior que 40 ks/s, quarenta mil amostras por segundo, (National Instruments, 1999).

A multiplexagem é uma técnica comum utilizada para aquisição de vários sinais com um único conversor ADC. O multiplexador conecta um canal de cada vez ao conversor AD. Devido à placa de aquisição possuir um único conversor para vários canais, a taxa efetiva de aquisição é inversamente proporcional ao número de canais. Uma placa com capacidade de amostragem de 1MS/s com 10 canais, por exemplo, irá efetivamente amostrar por canal, sua capacidade dividida pelo número de canais, ou seja, 100 KS/s por canal.

O número de bits que o conversor ADC utiliza para a conversão do sinal analógico em digital determina a resolução da placa. Quanto maior a resolução, maior será o número de divisões do range, que determina qual a menor mudança de tensão que a placa pode detectar. A figura 2.8 mostra um sinal senoidal e sua correspondente imagem digital, obtida com um conversor ADC ideal de 3 bits que, atualmente não é utilizado. O range do sinal analógico foi dividido em 8 partes, ou  $2^3$ , e cada divisão é representada por um código binário que varia de 000 a 111.



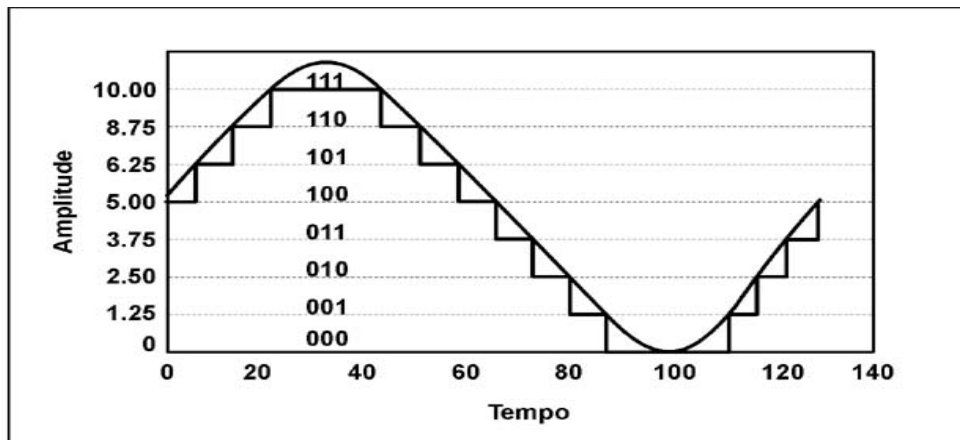


Figura 2.8 Digitalização de uma curva senoidal com resolução de 3 bits

Obviamente essa não é uma boa representação do sinal analógico original porque informações foram perdidas na conversão. A utilização de uma placa com resolução de 16 bits aumentaria a precisão na representação digital do sinal original, pois o número de códigos binários para representá-lo passaria de 8 para 65.536, o equivalente a  $2^{16}$ . O range da placa é o intervalo compreendido entre o menor e o maior valor de tensão que o conversor pode quantificar. As placas multifuncionais oferecem a possibilidade de seleção de vários ranges, configurados manualmente através de conectores, para diferentes níveis de tensão. Com essa flexibilidade é possível selecionar o melhor range disponível para se obter a melhor resolução e a precisão requerida na digitalização do sinal. O range, a resolução e o ganho do amplificador determinam a menor mudança de tensão que a placa pode detectar. Esse menor valor de mudança de tensão representa 1 LSB (bit menos significativo), que é obtido com a divisão do range da placa pelo ganho multiplicado por 2 elevado à resolução da placa. Por exemplo para uma placa com resolução de 16 bits com range selecionado de 0 a 10 volts e ganho do amplificador de 100, a resolução teórica de um bit digitalizado será  $10 / 100 \times 2^{16} = 1,5 \mu\text{V}$ .

Embora a especificação básica, previamente descrita, mostre que a placa de aquisição possui 16 bits de resolução e 100kS/s de taxa de amostragem, isso não significa que se possa fazer aquisição nessa taxa em todos os canais e conseguir 16 bits de resolução. Para se saber se placa escolhida dará a resolução esperada é importante fazer um exame minucioso da especificação para se avaliar a não linearidade do conversor (DNL), a precisão relativa, o tempo

de resposta do amplificador e os ruídos. Idealmente, a tensão aplicada na placa e sua conversão para os códigos binários devem manter a mesma linearidade. Plotando-se o gráfico das tensões aplicadas versus os valores digitalizados pelo conversor ADC o resultado deverá ser uma reta. Os pontos dessa reta ideal com maiores desvios indicarão a não linearidade da conversão (DNL) e serão expressos em LSB. Uma boa placa de aquisição possui seu DNL na ordem de  $\pm 0,5$  LSB. No exemplo anterior, a placa possui uma resolução de  $1,5 \mu\text{V}$  equivalente a um DNL de  $0,75 \mu\text{V}$ . Isso significa que se a placa recebesse um sinal de  $500 \mu\text{V}$  e houvesse um acréscimo de tensão para  $502 \mu\text{V}$  nenhuma mudança seria detectada pelo conversor, a não ser que se aumentasse um LSB. Nesse exemplo, a mudança de tensão seria detectada quando atingi-se o valor de  $503 \mu\text{V}$ . Como se pode observar, o valor do DNL influencia na resolução da placa.

A precisão relativa do maior desvio da reta ideal obtida através da função ideal de conversão da placa é medida em LSB e determinado, experimentalmente, alimentando a placa com tensões negativas e positivas em todo o seu range e digitalizando esses valores. A subtração dos valores reais digitalizados pela placa dos valores calculados através da função ideal de conversão, conforme mostra a fig. 2.9, determinará a precisão relativa do conversor ADC. O desvio máximo obtido em relação à reta ideal será a precisão relativa da placa.

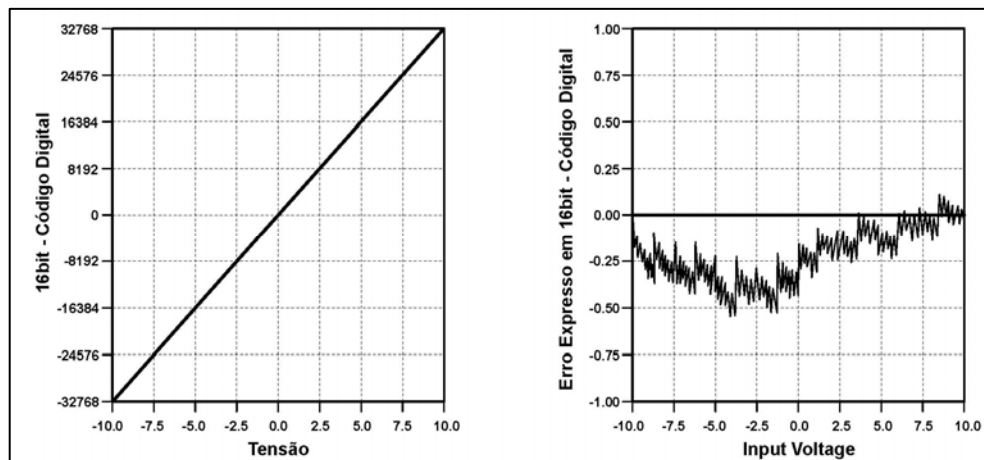


Figura 2.9 Determinação da precisão relativa do Sistema de Aquisição

Programa: O programa conhecido como software transforma o PC e a placa de aquisição de sinal em um completo sistema de aquisição. Também analisa e mostra os dados na tela do computador. A maioria das placas utiliza programas específicos, chamados de driver, que têm a função de programar os registradores, gerenciar suas operações e integrá-los com os demais componentes internos do computador. As principais funções desenvolvidas pelo Software são:

- Aquisição de dados de acordo com a taxa de amostragem necessária.
- Programação de entradas e saídas digitais I/O, interrupções e modo DMA para transferência de dados.
- Transferência de dados entre os discos do computador.
- Criação, de uma interface homem-máquina.

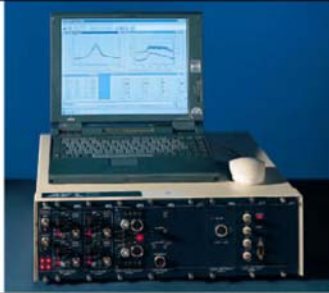
Para o desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados de alta qualidade deve-se conhecer cada componente utilizado. De todos os componentes envolvidos, o software é o elemento que deve ser examinado com maior atenção. Devido às placas não possuírem display, é a única interface que se tem com o sistema. É o componente que controla, retransmite e analisa todas as funções do sistema de aquisição, além de integrar os transdutores, o condicionador de sinal e a placa de aquisição (National Instruments, 1999).

## **Apêndice A**

### **Aparelhos Indicadores**

Neste apêndice encontram-se as especificações técnicas de dois equipamentos para medição da pressão de combustão, o Indiset 620, fabricado pela AVL e o PMI System da MAN&BW.

## Indicating Systems



### Indiset 620

The 620 Indiset is a flexible and powerful measurement system for IC engine testing. With its compact design, the modular hardware and software and with , functionality-enhanced **IndiCom** control and display software, the 620 Indiset is a versatile, high-speed data acquisition system suitable for everyday use, as well as an in-depth analysis tool on test beds and in vehicles.

The 620 Indiset's modular amplifier plug-in system and the user-friendly graphics interface allow quick installation in any application. The way data is collected, calculated in real-time and displayed on screen can be determined intuitively with no restriction on the range. All data can be stored at a click of the mouse.

Plug-in amplifier modules for the Indiset 620 are available for voltages, for 4 - 20mA current loop and for piezoelectric, piezo-resistive, inductive (Hall, Wolff , etc.), capacitive or strain gauge sensors. Special modules are also available for ignition timing, crank angle conversion from toothed wheel / disk or for rotational analysis.

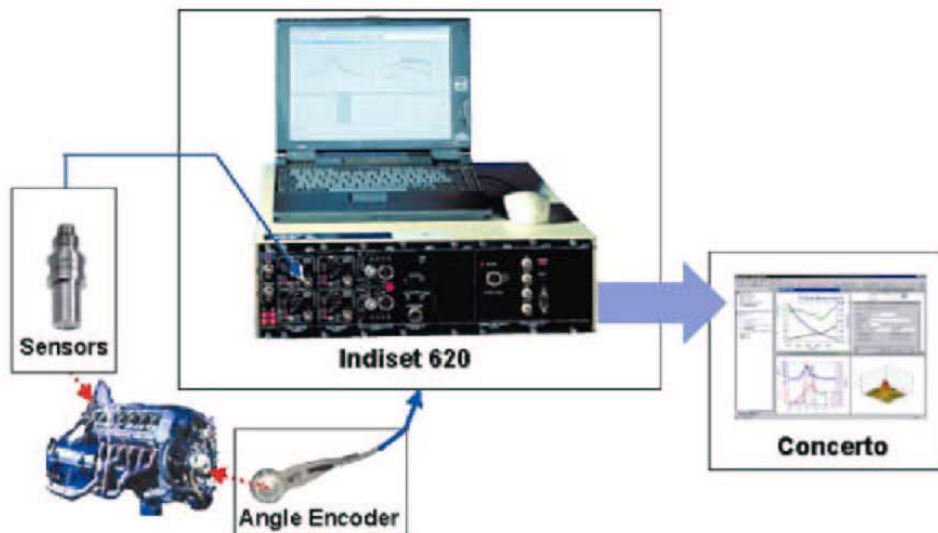
#### Areas of Usage

- Research and development of combustion engines
- Component testing (ignition or injection systems, shaft oscillation, valve timing, etc.)
- Engine monitoring (display/measurement of irregular combustion)
- Real-time knock detection and analysis
- Knock alarm for automated testbed operation
- Transient measurement of dynamic signals
- Multiple injection analysis (common rail)
- Recording of time-based signals

## Indiset 620

**Your Benefits at a Glance**

- **IndiCom** – the powerful software for data acquisition, calculation and presentation
- Modular hardware and software for easy installation
- 8 free slots for amplifier integration
- Various possibilities for data storage (I-File, ASCII, raw data, real-time data, etc.)
- Synchronous operation of knock detection and real-time calculation of IMEP, peak pressure, etc.
- IMEP or peak pressure monitoring
- Crank angle or time-based data acquisition
- Remote control from test bed via serial interface
- Designed for both SI and diesel engines



## Indiset 620

### Technical Features

- Can be operated as data acquisition system, oscilloscope or multi-channel digital voltmeter
- Multiple windows for graphical, numerical or statistical display of measured and calculated data
- Real-time calculation and on-line tabular display of various results per engine cycle
- Cycle by cycle selection or zoom-in of several cycles
- Collection of result values for several 1000 cycles
- Event monitoring and single event measurement
- Measurement table technique (variable resolution)
- Graphical programming of on-line calculations with *CalcGraf* (optional)
- Knock analysis (optional)
- FFT – Fast Fourier Transformation (optional)
- Rotational and torsional analysis (optional)

### Technical Data

Bench top / rack mount cabinet	3 HU / 19"
Indicating input channels	4 extendable to 8 (12 or 16)*
On-board data memory	8 (16)* MB
Channel resolution	12 Bit
Throughput rate	1 (2)* MHz
Angle and measurement resolution	0.1 °CA max.
(...) * values for extension with a second data acquisition card	

## Indiset 620

**Options****Basic Configuration**

- Basic Equipment Indiset 620 (4 channels, 8MB, *IndiCom* 620)

**Options**

- Extension by 4 measurement channels
- Power Package 620: additional data acquisition card
- Graphical formula editor *CalcGraf* – Basic Functions, FFT, Rotational Analysis, Digital Filter Software package
- Flow Graf
- Real-Time Knock Monitoring
- Recorder Function
- Software for testbed connection
- *IndiCom* – Offline Administrator
- *IndiCom* – Driver SW for NI PC-Cards
- *IndiCom* – Driver for CAN Bus PC-Cards

**Accessories**

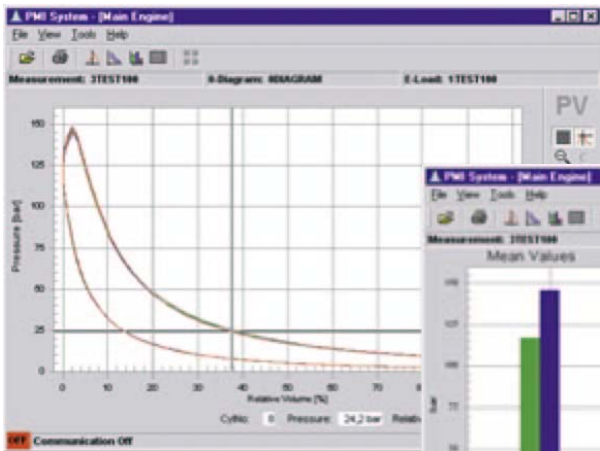
- Cooled and uncooled pressure transducers for numerous applications: from combustion pressure monitoring to detailed thermodynamic analysis, from small to heavy-duty engines, for spark plug and glow plug solutions
- Large range of amplifiers with signal conditioning rack or single amplifier bench top cabinets, for all indicating requirements: piezoelectric amplifiers, multi-purpose amplifiers, carrier frequency amplifiers, voltage amplifiers, ignition timing module (3000 amplifier family or IFEM amplifiers)
- *AVL Concerto* – the popular tool for postprocessing combustion data

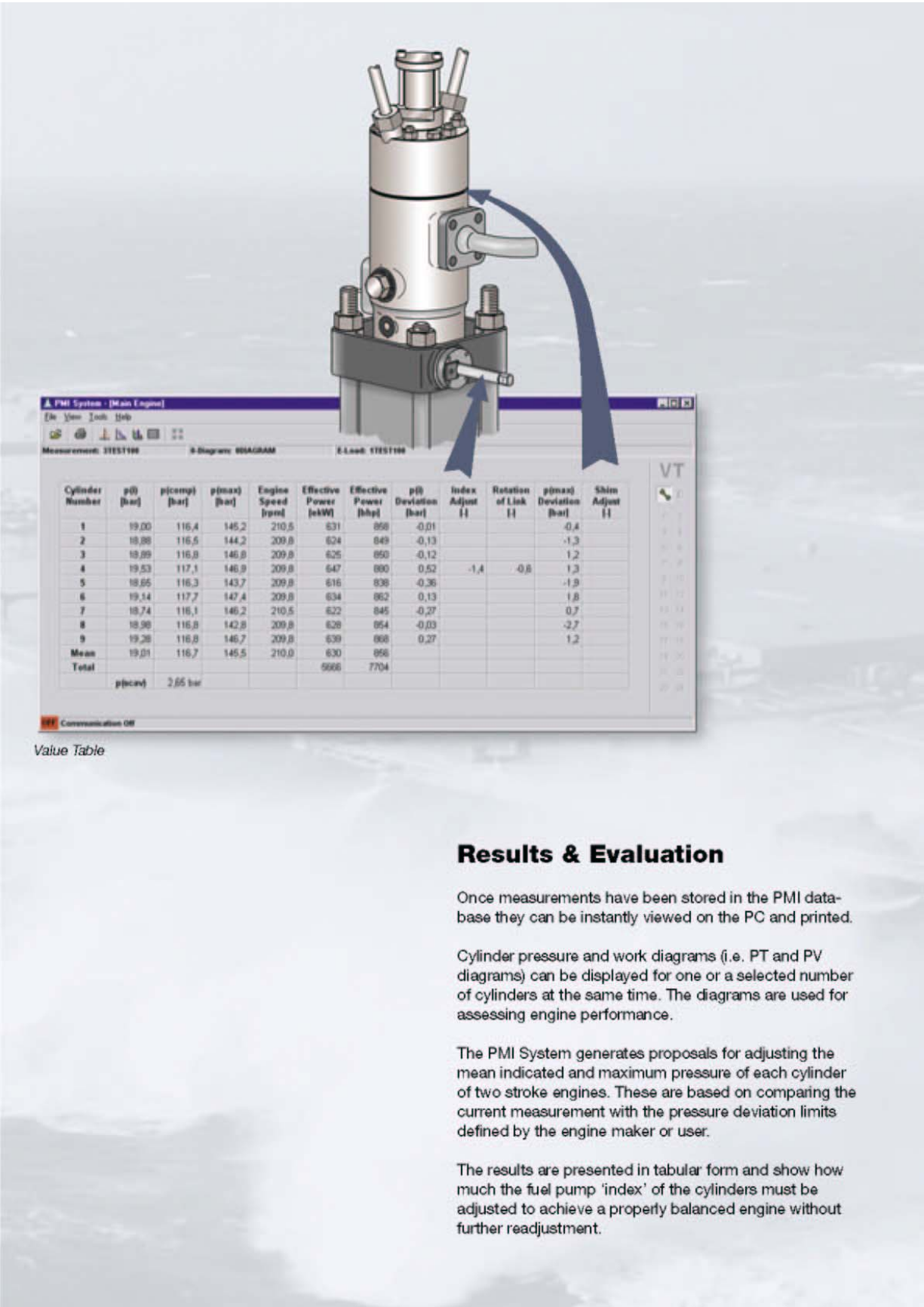


## **Apêndice B**

### **Dados de Pressão**

Neste apêndice encontram-se os dados de pressão do ciclo médio do motor de combustão por centelha (ICE), obtido da média de 50 ciclos medidos e as curvas de pressão do motor de combustão por compressão (ICO).





Value Table

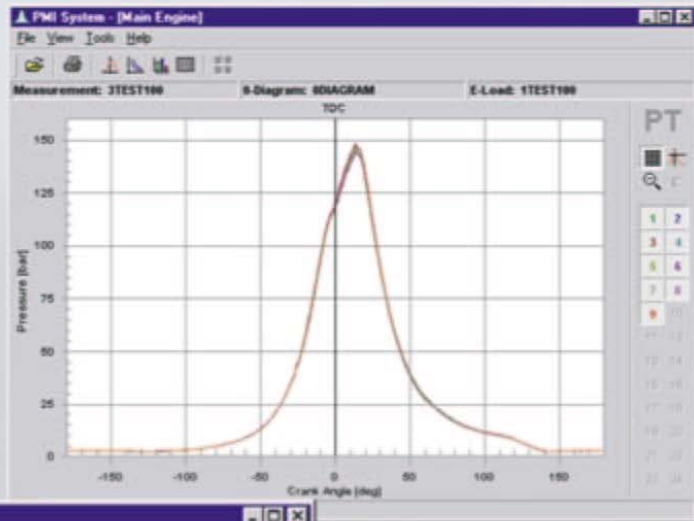
### Results & Evaluation

Once measurements have been stored in the PMI database they can be instantly viewed on the PC and printed.

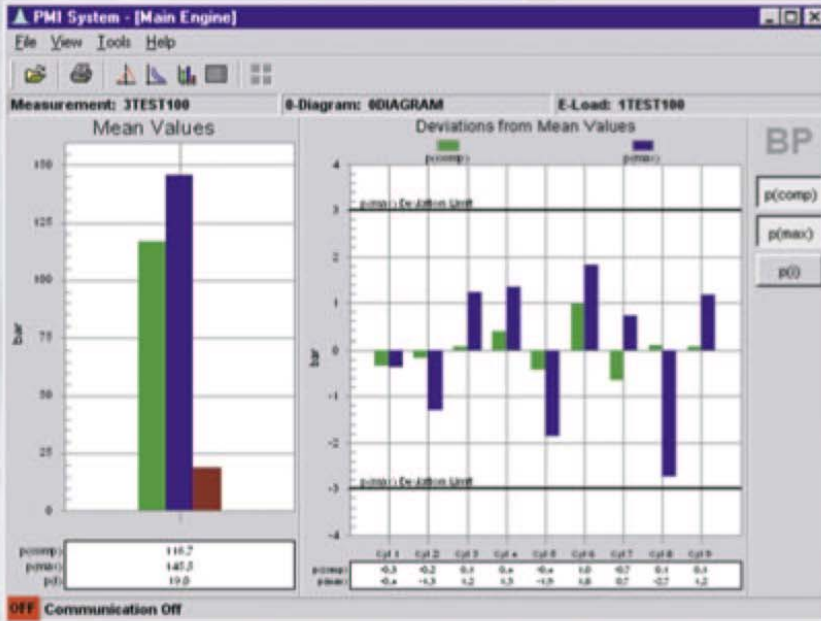
Cylinder pressure and work diagrams (i.e. PT and PV diagrams) can be displayed for one or a selected number of cylinders at the same time. The diagrams are used for assessing engine performance.

The PMI System generates proposals for adjusting the mean indicated and maximum pressure of each cylinder of two stroke engines. These are based on comparing the current measurement with the pressure deviation limits defined by the engine maker or user.

The results are presented in tabular form and show how much the fuel pump 'index' of the cylinders must be adjusted to achieve a properly balanced engine without further readjustment.



Cylinder Pressure Diagram



Balance Plot

In addition, values are given for the compression pressure, maximum pressure, mean indicated pressure and scavenge air pressure, as well as the engine speed and engine output for each cylinder and the engine as a whole.

The PMI System can directly export measurement data to the CoCoS-EDS Engine Diagnostics System which is also available from MAN B&W Diesel, and thus expands the engine measurement, analysis and diagnostic capabilities of CoCoS-EDS.

## Scope of Supply

The PMI System comprises the following:

Carrying Case containing:

- 1 x Pressure Transducer with integral coupling for cylinder cock and output connector for PMI Controller
- 1 x PMI Controller with shoulder strap and cable for Junction Box
- Installation and User Guides (English language)
- Data CD containing PMI software

Other items included:

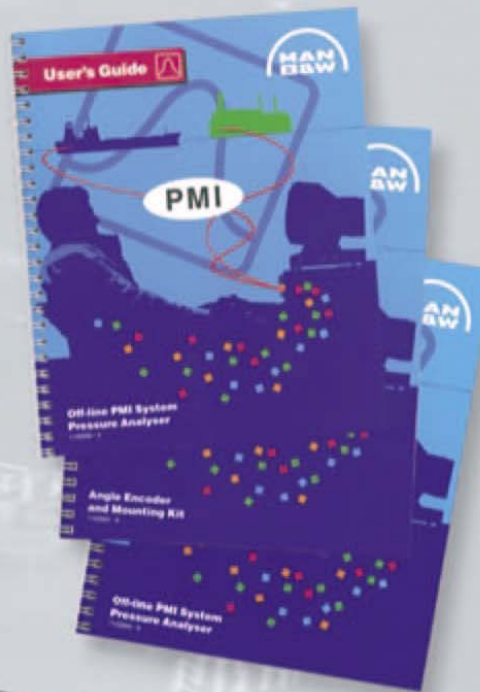
- 1 x Crankshaft Pickup, plus Mounting Kit, per engine
- 1 x Junction Box per engine
- 1 x Intermediate Box per engine
- 1 x Converter Box (RS422 - RS232) for coupling PMI System to free communication port of PC

## Computer Requirements

- Pentium II Processor, or later
- 32 MB RAM or more
- Hard disk with 500 MB free space, or more
- SVGA video adaptor with 640 x 480 resolution or better
- CD-ROM drive
- Mouse
- Free Communication Port

## Operating System

Microsoft® Windows NT (v. 3.5.1 or later),  
Windows 95™ or later



Cycle		Pressão de Combustão média, 5250@wot E22,					
-342	0,5	-291 0,15	-240 0,36	-189 0,61	-138 0,9	-87 1,79	-36 8,04
-341	0,5	-290 0,19	-239 0,36	-188 0,6	-137 0,91	-86 1,84	-35 8,33
-340	0,5	-289 0,16	-238 0,38	-187 0,62	-136 0,95	-85 1,86	-34 8,69
-339	0,5	-288 0,17	-237 0,38	-186 0,63	-135 0,93	-84 1,92	-33 9,07
-338	0,5	-287 0,16	-236 0,38	-185 0,63	-134 0,95	-83 1,96	-32 9,42
-337	0,5	-286 0,17	-235 0,4	-184 0,64	-133 0,96	-82 2,01	-31 9,82
-336	0,5	-285 0,17	-234 0,39	-183 0,65	-132 0,98	-81 2,05	-30 10,2
-335	0,4	-284 0,16	-233 0,39	-182 0,64	-131 0,98	-80 2,09	-29 10,6
-334	0,4	-283 0,17	-232 0,4	-181 0,65	-130 0,99	-79 2,14	-28 11,1
-333	0,4	-282 0,17	-231 0,4	-180 0,66	-129 1	-78 2,2	-27 11,6
-332	0,4	-281 0,19	-230 0,41	-179 0,68	-128 1,02	-77 2,25	-26 12,1
-331	0,4	-280 0,18	-229 0,41	-178 0,67	-127 1,03	-76 2,31	-25 12,6
-330	0,4	-279 0,19	-228 0,4	-177 0,67	-126 1,02	-75 2,35	-24 13,1
-329	0,4	-278 0,19	-227 0,42	-176 0,68	-125 1,03	-74 2,43	-23 13,7
-328	0,4	-277 0,18	-226 0,42	-175 0,7	-124 1,04	-73 2,47	-22 14,2
-327	0,4	-276 0,19	-225 0,43	-174 0,69	-123 1,06	-72 2,54	-21 14,8
-326	0,3	-275 0,2	-224 0,43	-173 0,71	-122 1,08	-71 2,6	-20 15,5
-325	0,3	-274 0,2	-223 0,44	-172 0,71	-121 1,07	-70 2,68	-19 16,1
-324	0,3	-273 0,2	-222 0,44	-171 0,73	-120 1,1	-69 2,75	-18 16,7
-323	0,3	-272 0,2	-221 0,45	-170 0,72	-119 1,09	-68 2,81	-17 17,4
-322	0,3	-271 0,21	-220 0,43	-169 0,72	-118 1,12	-67 2,9	-16 18
-321	0,3	-270 0,21	-219 0,45	-168 0,73	-117 1,13	-66 2,99	-15 18,7
-320	0,3	-269 0,21	-218 0,46	-167 0,75	-116 1,14	-65 3,05	-14 19,4
-319	0,3	-268 0,22	-217 0,46	-166 0,75	-115 1,19	-64 3,15	-13 20,1
-318	0,3	-267 0,21	-216 0,46	-165 0,75	-114 1	-63 3,22	-12 20,9
-317	0,3	-266 0,25	-215 0,46	-164 0,75	-113 1,33	-62 3,31	-11 21,6
-316	0,3	-265 0,23	-214 0,45	-163 0,75	-112 1,17	-61 3,4	-10 22,4
-315	0,3	-264 0,24	-213 0,47	-162 0,77	-111 1,22	-60 3,51	-9 23,2
-314	0,3	-263 0,25	-212 0,48	-161 0,77	-110 1,23	-59 3,6	-8 24
-313	0,3	-262 0,24	-211 0,49	-160 0,78	-109 1,28	-58 3,73	-7 24,9
-312	0,2	-261 0,25	-210 0,48	-159 0,78	-108 1,29	-57 3,84	-6 25,8
-311	0,4	-260 0,25	-209 0,49	-158 0,79	-107 1,29	-56 3,96	-5 26,8
-310	0,1	-259 0,26	-208 0,5	-157 0,79	-106 1,35	-55 4,1	-4 27,7
-309	0,3	-258 0,27	-207 0,51	-156 0,8	-105 1,34	-54 4,23	-3 28,8
-308	0,3	-257 0,28	-206 0,51	-155 0,81	-104 1,39	-53 4,37	-2 29,9
-307	0,2	-256 0,27	-205 0,53	-154 0,82	-103 1,38	-52 4,51	-1 31
-306	0,2	-255 0,28	-204 0,52	-153 0,83	-102 1,39	-51 4,69	0 32,2
-305	0,2	-254 0,29	-203 0,53	-152 0,83	-101 1,42	-50 4,84	1 33,4
-304	0,2	-253 0,31	-202 0,52	-151 0,83	-100 1,43	-49 4,99	2 34,6
-303	0,2	-252 0,29	-201 0,53	-150 0,83	-99 1,45	-48 5,15	3 35,8
-302	0,2	-251 0,3	-200 0,54	-149 0,85	-98 1,47	-47 5,32	4 36,9
-301	0,2	-250 0,31	-199 0,55	-148 0,85	-97 1,5	-46 5,53	5 38,1
-300	0,3	-249 0,3	-198 0,55	-147 0,85	-96 1,55	-45 5,73	6 39,3
-299	0,2	-248 0,33	-197 0,56	-146 0,86	-95 1,54	-44 5,94	7 40,4
-298	0,2	-247 0,32	-196 0,56	-145 0,86	-94 1,57	-43 6,16	8 41,5
-297	0,3	-246 0,33	-195 0,57	-144 0,87	-93 1,59	-42 6,41	9 42,6
-296	0,2	-245 0,33	-194 0,58	-143 0,88	-92 1,64	-41 6,62	10 43,6
-295	0,2	-244 0,34	-193 0,58	-142 0,89	-91 1,65	-40 6,87	11 44,7
-294	0,2	-243 0,35	-192 0,59	-141 0,89	-90 1,69	-39 7,14	12 45,6
-293	0,2	-242 0,36	-191 0,6	-140 0,91	-89 1,71	-38 7,42	13 46,5
-292	0,2	-241 0,36	-190 0,6	-139 0,9	-88 1,77	-37 7,72	14 47,3

15	48,1	66	13,6	117	5,38	168	3,01	219	1,02	270	0,78	321	0,75
16	48,6	67	13,3	118	5,3	169	2,95	220	1,01	271	0,78	322	0,74
17	49,1	68	12,9	119	5,26	170	2,89	221	0,99	272	0,79	323	0,74
18	49,5	69	12,6	120	5,19	171	2,84	222	0,97	273	0,8	324	0,73
19	49,7	70	12,3	121	5,13	172	2,79	223	0,95	274	0,81	325	0,73
20	49,7	71	12	122	5,09	173	2,73	224	0,93	275	0,81	326	0,73
21	49,5	72	11,7	123	5,04	174	2,69	225	0,92	276	0,82	327	0,74
22	49,2	73	11,4	124	4,99	175	2,62	226	0,91	277	0,82	328	0,7
23	48,7	74	11,1	125	4,93	176	2,57	227	0,89	278	0,83	329	0,74
24	48,2	75	10,9	126	4,89	177	2,52	228	0,88	279	0,84	330	0,71
25	47,6	76	10,6	127	4,85	178	2,47	229	0,85	280	0,84	331	0,74
26	46,7	77	10,4	128	4,8	179	2,41	230	0,85	281	0,85	332	0,71
27	45,9	78	10,2	129	4,77	180	2,36	231	0,83	282	0,85	333	0,74
28	44,9	79	9,9	130	4,71	181	2,3	232	0,83	283	0,86	334	0,72
29	43,9	80	9,71	131	4,66	182	2,27	233	0,82	284	0,86	335	0,72
30	42,8	81	9,52	132	4,62	183	2,23	234	0,81	285	0,85	336	0,73
31	41,6	82	9,3	133	4,58	184	2,17	235	0,81	286	0,87	337	0,71
32	40,5	83	9,11	134	4,54	185	2,13	236	0,78	287	0,87	338	0,72
33	39,3	84	8,92	135	4,49	186	2,08	237	0,78	288	0,88	339	0,73
34	38,1	85	8,74	136	4,45	187	2,02	238	0,78	289	0,87	340	0,74
35	36,9	86	8,59	137	4,42	188	2	239	0,76	290	0,88		
36	35,7	87	8,4	138	4,38	189	1,93	240	0,77	291	0,88		
37	34,5	88	8,26	139	4,34	190	1,9	241	0,74	292	0,87		
38	33,4	89	8,11	140	4,31	191	1,84	242	0,75	293	0,88		
39	32,3	90	7,97	141	4,25	192	1,81	243	0,76	294	0,88		
40	31,2	91	7,83	142	4,23	193	1,76	244	0,72	295	0,89		
41	30,1	92	7,68	143	4,17	194	1,74	245	0,74	296	0,89		
42	29,1	93	7,54	144	4,15	195	1,69	246	0,74	297	0,89		
43	28,1	94	7,42	145	4,1	196	1,66	247	0,74	298	0,89		
44	27,2	95	7,3	146	4,07	197	1,61	248	0,73	299	0,88		
45	26,2	96	7,19	147	4,03	198	1,58	249	0,73	300	0,88		
46	25,4	97	7,05	148	3,97	199	1,55	250	0,73	301	0,88		
47	24,5	98	6,95	149	3,94	200	1,53	251	0,72	302	0,87		
48	23,7	99	6,83	150	3,9	201	1,51	252	0,73	303	0,87		
49	22,9	100	6,74	151	3,86	202	1,47	253	0,73	304	0,85		
50	22,1	101	6,65	152	3,8	203	1,45	254	0,73	305	0,86		
51	21,4	102	6,57	153	3,76	204	1,42	255	0,72	306	0,84		
52	20,8	103	6,46	154	3,72	205	1,37	256	0,72	307	0,84		
53	20	104	6,37	155	3,65	206	1,36	257	0,73	308	0,84		
54	19,5	105	6,28	156	3,61	207	1,33	258	0,73	309	0,83		
55	18,8	106	6,18	157	3,57	208	1,29	259	0,74	310	0,82		
56	18,3	107	6,1	158	3,52	209	1,27	260	0,74	311	0,81		
57	17,7	108	6,03	159	3,46	210	1,24	261	0,74	312	0,81		
58	17,2	109	5,93	160	3,41	211	1,21	262	0,75	313	0,8		
59	16,7	110	5,87	161	3,35	212	1,19	263	0,76	314	0,79		
60	16,1	111	5,79	162	3,32	213	1,16	264	0,75	315	0,79		
61	15,7	112	5,72	163	3,27	214	1,13	265	0,76	316	0,78		
62	15,2	113	5,65	164	3,22	215	1,11	266	0,76	317	0,79		
63	14,9	114	5,57	165	3,17	216	1,09	267	0,76	318	0,76		
64	14,4	115	5,51	166	3,12	217	1,06	268	0,77	319	0,75		
65	14	116	5,44	167	3,07	218	1,05	269	0,77	320	0,77		

Cycle	Pressão de Combustão média, 5500@wot E22.						
-342	0,41	-291 0,11	-240 0,34	-189 0,59	-138 0,91	-87 1,8	-36 7,89
-341	0,47	-290 0,36	-239 0,35	-188 0,61	-137 0,91	-86 1,83	-35 8,2
-340	0,44	-289 0,26	-238 0,35	-187 0,61	-136 0,93	-85 1,88	-34 8,53
-339	0,43	-288 0,17	-237 0,35	-186 0,61	-135 0,92	-84 1,91	-33 8,9
-338	0,43	-287 0,18	-236 0,36	-185 0,62	-134 0,94	-83 1,95	-32 9,27
-337	0,4	-286 0,18	-235 0,37	-184 0,62	-133 0,94	-82 1,99	-31 9,62
-336	0,43	-285 0,2	-234 0,38	-183 0,62	-132 0,94	-81 2,03	-30 10,1
-335	0,39	-284 0,21	-233 0,38	-182 0,63	-131 0,96	-80 2,05	-29 10,4
-334	0,4	-283 0,19	-232 0,38	-181 0,63	-130 0,95	-79 2,1	-28 10,9
-333	0,41	-282 0,24	-231 0,39	-180 0,63	-129 0,98	-78 2,15	-27 11,3
-332	0,37	-281 0,21	-230 0,4	-179 0,65	-128 1,01	-77 2,2	-26 11,8
-331	0,39	-280 0,31	-229 0,4	-178 0,66	-127 0,99	-76 2,25	-25 12,3
-330	0,39	-279 0,29	-228 0,4	-177 0,67	-126 0,99	-75 2,32	-24 12,8
-329	0,38	-278 0,29	-227 0,41	-176 0,66	-125 1,01	-74 2,38	-23 13,4
-328	0,37	-277 0,33	-226 0,41	-175 0,68	-124 1	-73 2,42	-22 13,9
-327	0,35	-276 0,28	-225 0,42	-174 0,68	-123 1,02	-72 2,5	-21 14,3
-326	0,36	-275 0,26	-224 0,41	-173 0,69	-122 1,05	-71 2,55	-20 15,1
-325	0,35	-274 0,26	-223 0,42	-172 0,69	-121 1,05	-70 2,63	-19 15,7
-324	0,36	-273 0,24	-222 0,43	-171 0,69	-120 1,08	-69 2,69	-18 16,3
-323	0,34	-272 0,24	-221 0,44	-170 0,71	-119 1,07	-68 2,78	-17 16,9
-322	0,34	-271 0,24	-220 0,44	-169 0,72	-118 1,09	-67 2,85	-16 17,6
-321	0,36	-270 0,24	-219 0,45	-168 0,73	-117 1,11	-66 2,93	-15 18,3
-320	0,33	-269 0,27	-218 0,45	-167 0,73	-116 1,09	-65 3,01	-14 19
-319	0,33	-268 0,25	-217 0,46	-166 0,73	-115 1,15	-64 3,11	-13 19,7
-318	0,32	-267 0,27	-216 0,47	-165 0,74	-114 1,29	-63 3,17	-12 20,4
-317	0,32	-266 0,29	-215 0,47	-164 0,75	-113 1,09	-62 3,29	-11 21,1
-316	0,34	-265 0,27	-214 0,48	-163 0,74	-112 1,23	-61 3,37	-10 21,9
-315	0,34	-264 0,29	-213 0,48	-162 0,76	-111 1,2	-60 3,47	-9 22,7
-314	0,33	-263 0,29	-212 0,49	-161 0,76	-110 1,22	-59 3,59	-8 23,5
-313	0,81	-262 0,27	-211 0,49	-160 0,77	-109 1,21	-58 3,65	-7 24,3
-312	0,07	-261 0,29	-210 0,49	-159 0,79	-108 1,26	-57 3,76	-6 25,2
-311	0,39	-260 0,28	-209 0,49	-158 0,76	-107 1,29	-56 3,88	-5 26,1
-310	0,24	-259 0,29	-208 0,49	-157 0,79	-106 1,31	-55 4,02	-4 27,1
-309	0,28	-258 0,31	-207 0,5	-156 0,8	-105 1,38	-54 4,14	-3 28,1
-308	0,39	-257 0,3	-206 0,5	-155 0,8	-104 1,3	-53 4,29	-2 29,2
-307	0,27	-256 0,3	-205 0,51	-154 0,8	-103 1,44	-52 4,44	-1 30,3
-306	0,23	-255 0,3	-204 0,51	-153 0,81	-102 1,4	-51 4,59	0 31,4
-305	0,29	-254 0,31	-203 0,52	-152 0,81	-101 1,39	-50 4,74	1 32,6
-304	0,23	-253 0,31	-202 0,53	-151 0,82	-100 1,43	-49 4,91	2 33,8
-303	0,33	-252 0,3	-201 0,53	-150 0,82	-99 1,47	-48 5,09	3 35
-302	0,3	-251 0,3	-200 0,55	-149 0,82	-98 1,44	-47 5,24	4 36,1
-301	0,24	-250 0,32	-199 0,55	-148 0,83	-97 1,53	-46 5,42	5 37,3
-300	0,28	-249 0,32	-198 0,54	-147 0,83	-96 1,5	-45 5,62	6 38,4
-299	0,28	-248 0,32	-197 0,56	-146 0,85	-95 1,56	-44 5,83	7 39,6
-298	0,23	-247 0,32	-196 0,56	-145 0,86	-94 1,59	-43 6,07	8 40,7
-297	0,28	-246 0,32	-195 0,57	-144 0,86	-93 1,62	-42 6,28	9 41,7
-296	0,26	-245 0,33	-194 0,57	-143 0,86	-92 1,62	-41 6,53	10 42,7
-295	0,25	-244 0,34	-193 0,57	-142 0,88	-91 1,66	-40 6,79	11 43,7
-294	0,2	-243 0,34	-192 0,58	-141 0,87	-90 1,7	-39 7,01	12 44,6
-293	0,22	-242 0,34	-191 0,59	-140 0,88	-89 1,73	-38 7,29	13 45,5
-292	0,4	-241 0,34	-190 0,61	-139 0,89	-88 1,76	-37 7,58	14 46,3



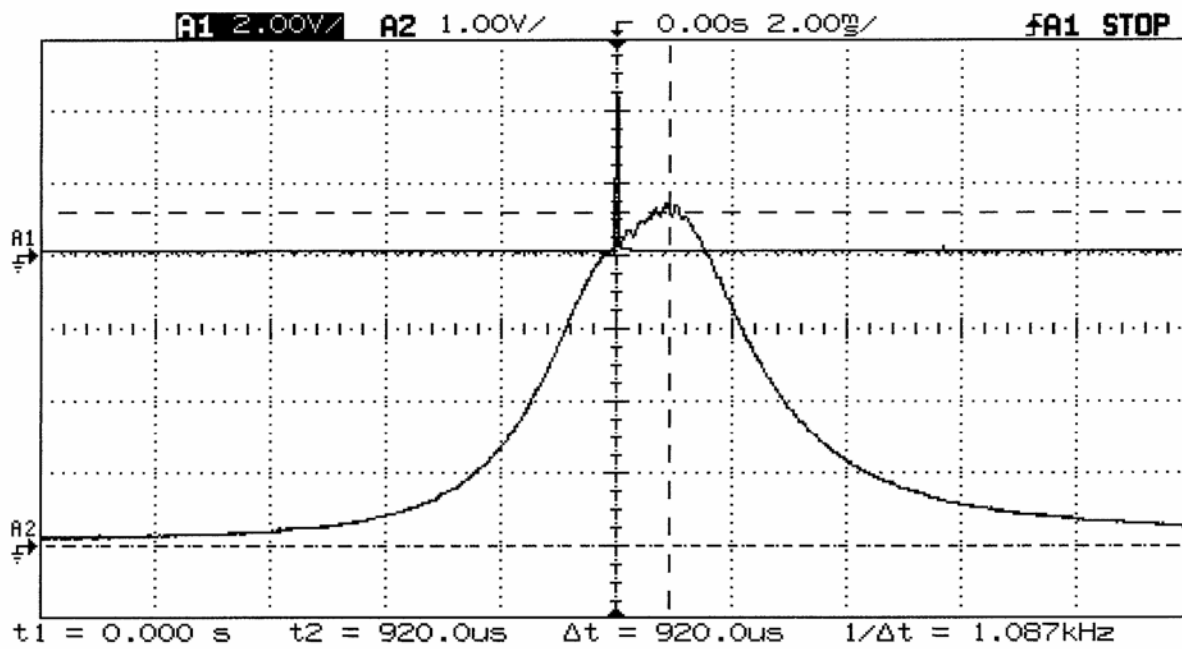
15	46,9	66	13,4	117	5,3	168	3,03	219	1,12	270	0,81	321	0,84
16	47,4	67	13	118	5,24	169	2,97	220	1,1	271	0,81	322	0,84
17	47,8	68	12,7	119	5,19	170	2,92	221	1,07	272	0,82	323	0,82
18	48	69	12,4	120	5,12	171	2,87	222	1,06	273	0,83	324	0,82
19	48,1	70	12	121	5,07	172	2,82	223	1,05	274	0,83	325	0,81
20	48,1	71	11,8	122	5,02	173	2,76	224	1,04	275	0,84	326	0,81
21	47,9	72	11,5	123	4,96	174	2,71	225	1,01	276	0,83	327	0,8
22	47,6	73	11,2	124	4,9	175	2,66	226	1	277	0,84	328	0,75
23	47,1	74	11	125	4,86	176	2,6	227	0,98	278	0,84	329	0,83
24	46,6	75	10,7	126	4,81	177	2,56	228	0,97	279	0,86	330	0,74
25	45,9	76	10,4	127	4,76	178	2,49	229	0,96	280	0,86	331	0,8
26	45,1	77	10,2	128	4,73	179	2,45	230	0,88	281	0,87	332	0,78
27	44,3	78	9,98	129	4,67	180	2,4	231	0,92	282	0,88	333	0,77
28	43,3	79	9,78	130	4,63	181	2,35	232	0,89	283	0,87	334	0,78
29	42,3	80	9,57	131	4,59	182	2,31	233	0,87	284	0,89	335	0,76
30	41,2	81	9,38	132	4,54	183	2,27	234	0,86	285	0,89	336	0,76
31	40,2	82	9,17	133	4,51	184	2,23	235	0,85	286	0,9	337	0,75
32	39,1	83	8,97	134	4,46	185	2,18	236	0,85	287	0,9	338	0,75
33	38	84	8,8	135	4,43	186	2,14	237	0,85	288	0,91	339	0,76
34	36,9	85	8,6	136	4,38	187	2,11	238	0,83	289	0,91	340	0,75
35	35,8	86	8,47	137	4,36	188	2,06	239	0,83	290	0,91	341	0,76
36	34,6	87	8,3	138	4,32	189	2,03	240	0,82	291	0,91		
37	33,5	88	8,13	139	4,27	190	1,99	241	0,82	292	0,92		
38	32,5	89	7,97	140	4,27	191	1,96	242	0,81	293	0,91		
39	31,4	90	7,86	141	4,22	192	1,93	243	0,81	294	0,93		
40	30,4	91	7,68	142	4,17	193	1,89	244	0,81	295	0,93		
41	29,4	92	7,57	143	4,14	194	1,84	245	0,8	296	0,93		
42	28,4	93	7,42	144	4,09	195	1,81	246	0,79	297	0,94		
43	27,5	94	7,28	145	4,06	196	1,77	247	0,8	298	0,95		
44	26,5	95	7,17	146	4,02	197	1,74	248	0,79	299	0,94		
45	25,7	96	7,06	147	3,99	198	1,69	249	0,78	300	0,94		
46	24,8	97	6,95	148	3,95	199	1,67	250	0,79	301	0,94		
47	24	98	6,84	149	3,9	200	1,61	251	0,77	302	0,94		
48	23,2	99	6,75	150	3,85	201	1,59	252	0,78	303	0,94		
49	22,5	100	6,64	151	3,82	202	1,57	253	0,78	304	0,95		
50	21,7	101	6,55	152	3,79	203	1,53	254	0,76	305	0,93		
51	21	102	6,42	153	3,75	204	1,5	255	0,79	306	0,92		
52	20,4	103	6,35	154	3,71	205	1,48	256	0,77	307	0,93		
53	19,6	104	6,25	155	3,67	206	1,43	257	0,77	308	0,92		
54	19,1	105	6,18	156	3,62	207	1,4	258	0,77	309	0,92		
55	18,5	106	6,06	157	3,57	208	1,38	259	0,79	310	0,92		
56	18	107	6	158	3,53	209	1,35	260	0,77	311	0,92		
57	17,4	108	5,91	159	3,49	210	1,32	261	0,79	312	0,92		
58	16,8	109	5,83	160	3,45	211	1,3	262	0,78	313	0,9		
59	16,4	110	5,76	161	3,39	212	1,27	263	0,79	314	0,9		
60	15,9	111	5,68	162	3,34	213	1,25	264	0,79	315	0,89		
61	15,4	112	5,61	163	3,28	214	1,23	265	0,8	316	0,88		
62	15	113	5,54	164	3,24	215	1,21	266	0,8	317	0,86		
63	14,6	114	5,47	165	3,18	216	1,18	267	0,8	318	0,86		
64	14,1	115	5,4	166	3,14	217	1,16	268	0,81	319	0,85		
65	13,8	116	5,34	167	3,09	218	1,14	269	0,81	320	0,84		

Cycle		Pressão de Combustão média, 5750@wot E22											
-339	0,35	-288	0,18	-237	0,32	-186	0,61	-135	0,84	-84	1,71	-33	7,73
-338	0,39	-287	0,13	-236	0,33	-185	0,6	-134	0,92	-83	1,76	-32	8,07
-337	0,4	-286	0,19	-235	0,32	-184	0,61	-133	0,89	-82	1,79	-31	8,35
-336	0,4	-285	0,2	-234	0,34	-183	0,61	-132	0,98	-81	1,87	-30	8,77
-335	0,36	-284	0,26	-233	0,35	-182	0,62	-131	0,9	-80	1,91	-29	9,08
-334	0,36	-283	0,2	-232	0,36	-181	0,63	-130	0,94	-79	1,96	-28	9,43
-333	0,35	-282	0,16	-231	0,36	-180	0,62	-129	0,93	-78	1,98	-27	9,81
-332	0,35	-281	0,24	-230	0,36	-179	0,63	-128	0,95	-77	2,03	-26	10,2
-331	0,34	-280	0,19	-229	0,38	-178	0,63	-127	0,91	-76	2,07	-25	10,7
-330	0,33	-279	0,22	-228	0,38	-177	0,64	-126	0,95	-75	2,13	-24	11,1
-329	0,32	-278	0,25	-227	0,39	-176	0,63	-125	0,93	-74	2,18	-23	11,6
-328	0,31	-277	0,22	-226	0,39	-175	0,65	-124	0,96	-73	2,22	-22	12,1
-327	0,3	-276	0,22	-225	0,4	-174	0,65	-123	0,96	-72	2,27	-21	12,6
-326	0,32	-275	0,23	-224	0,4	-173	0,65	-122	0,98	-71	2,34	-20	13,1
-325	0,29	-274	0,22	-223	0,4	-172	0,65	-121	0,99	-70	2,37	-19	13,6
-324	0,29	-273	0,22	-222	0,42	-171	0,67	-120	1,02	-69	2,44	-18	14,2
-323	0,28	-272	0,23	-221	0,42	-170	0,66	-119	1	-68	2,48	-17	14,8
-322	0,29	-271	0,23	-220	0,41	-169	0,66	-118	1,01	-67	2,57	-16	15,4
-321	0,26	-270	0,23	-219	0,41	-168	0,68	-117	1,04	-66	2,62	-15	16
-320	0,25	-269	0,23	-218	0,42	-167	0,68	-116	1,04	-65	2,71	-14	16,7
-319	0,28	-268	0,24	-217	0,43	-166	0,69	-115	1,06	-64	2,77	-13	17,3
-318	0,25	-267	0,25	-216	0,43	-165	0,69	-114	1,09	-63	2,87	-12	18
-317	0,24	-266	0,22	-215	0,44	-164	0,7	-113	1,11	-62	2,92	-11	18,7
-316	0,24	-265	0,24	-214	0,45	-163	0,7	-112	1,09	-61	3,02	-10	19,4
-315	0,24	-264	0,25	-213	0,46	-162	0,7	-111	1,11	-60	3,11	-9	20,2
-314	0,26	-263	0,26	-212	0,46	-161	0,71	-110	1,22	-59	3,2	-8	21
-313	0,24	-262	0,26	-211	0,46	-160	0,73	-109	1,14	-58	3,29	-7	21,8
-312	0,24	-261	0,24	-210	0,47	-159	0,71	-108	1,08	-57	3,4	-6	22,7
-311	0,2	-260	0,26	-209	0,48	-158	0,72	-107	1,33	-56	3,48	-5	23,6
-310	0,33	-259	0,25	-208	0,47	-157	0,73	-106	1,08	-55	3,62	-4	24,6
-309	0,07	-258	0,25	-207	0,49	-156	0,74	-105	1,29	-54	3,7	-3	25,6
-308	0,38	-257	0,26	-206	0,48	-155	0,74	-104	1,19	-53	3,85	-2	26,7
-307	0,26	-256	0,26	-205	0,47	-154	0,75	-103	1,23	-52	3,94	-1	27,8
-306	0,29	-255	0,28	-204	0,5	-153	0,74	-102	1,27	-51	4,04	0	29,1
-305	0,27	-254	0,27	-203	0,49	-152	0,76	-101	1,29	-50	4,18	1	30,4
-304	0,14	-253	0,26	-202	0,51	-151	0,77	-100	1,37	-49	4,34	2	31,7
-303	0,23	-252	0,27	-201	0,52	-150	0,77	-99	1,33	-48	4,47	3	33,1
-302	0,14	-251	0,29	-200	0,53	-149	0,77	-98	1,34	-47	4,62	4	34,5
-301	0,17	-250	0,29	-199	0,53	-148	0,78	-97	1,34	-46	4,79	5	35,8
-300	0,17	-249	0,3	-198	0,53	-147	0,79	-96	1,39	-45	4,97	6	37,2
-299	0,24	-248	0,3	-197	0,53	-146	0,81	-95	1,36	-44	5,15	7	38,6
-298	0,24	-247	0,3	-196	0,53	-145	0,79	-94	1,45	-43	5,33	8	40
-297	0,18	-246	0,28	-195	0,54	-144	0,8	-93	1,49	-42	5,51	9	41,4
-296	0,22	-245	0,29	-194	0,55	-143	0,81	-92	1,53	-41	5,71	10	42,8
-295	0,22	-244	0,31	-193	0,55	-142	0,83	-91	1,5	-40	5,91	11	44,2
-294	0,19	-243	0,32	-192	0,57	-141	0,82	-90	1,56	-39	6,15	12	45,5
-293	0,2	-242	0,34	-191	0,58	-140	0,83	-89	1,56	-38	6,39	13	46,7
-292	0,2	-241	0,32	-190	0,58	-139	0,84	-88	1,63	-37	6,64	14	47,9
-291	0,17	-240	0,32	-189	0,6	-138	0,84	-87	1,66	-36	6,9	15	49,1
-290	0,22	-239	0,34	-188	0,59	-137	0,84	-86	1,67	-35	7,18	16	50
-289	0,27	-238	0,33	-187	0,6	-136	0,85	-85	1,73	-34	7,43	17	50,7

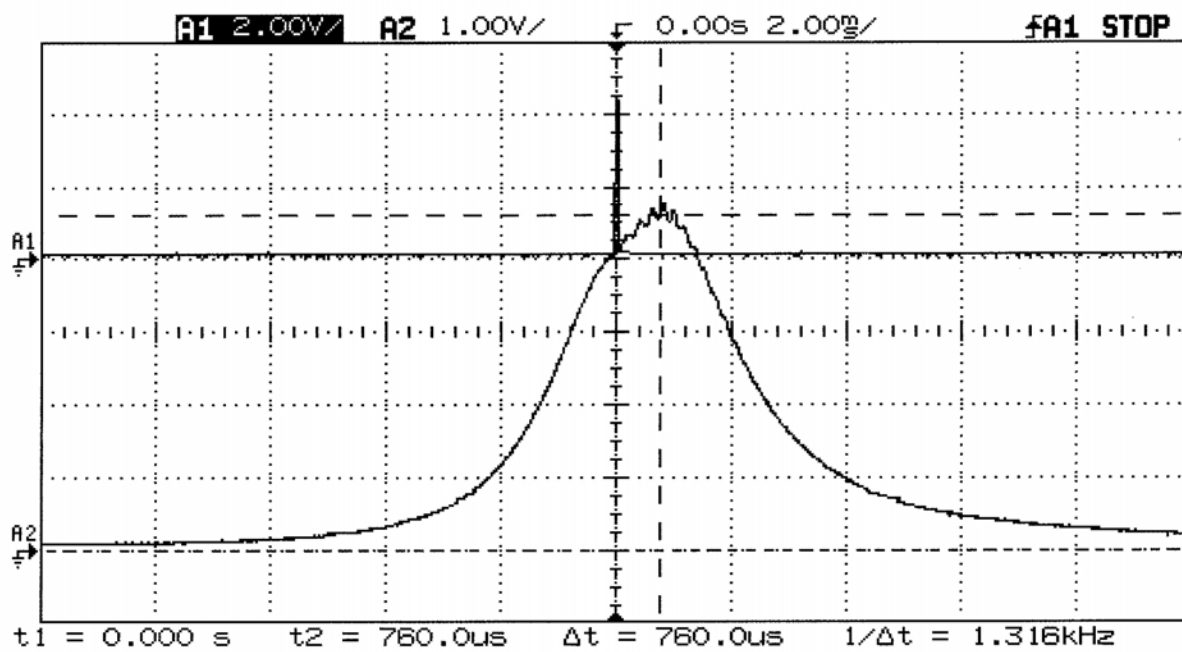
18	51,3	69	12,7	120	5,04	171	2,89	222	1,09	273	0,79	324	0,83
19	51,8	70	12,4	121	4,98	172	2,84	223	1,07	274	0,79	325	0,84
20	52	71	12,1	122	4,92	173	2,79	224	1,05	275	0,79	326	0,82
21	52	72	11,8	123	4,88	174	2,75	225	1,03	276	0,8	327	0,82
22	52	73	11,5	124	4,82	175	2,69	226	1,02	277	0,83	328	0,8
23	51,6	74	11,2	125	4,76	176	2,66	227	1	278	0,82	329	0,81
24	51,1	75	11	126	4,72	177	2,59	228	0,99	279	0,83	330	0,79
25	50,4	76	10,7	127	4,66	178	2,55	229	0,98	280	0,82	331	0,77
26	49,7	77	10,4	128	4,61	179	2,5	230	0,94	281	0,82	332	0,82
27	48,7	78	10,2	129	4,56	180	2,45	231	0,94	282	0,83	333	0,8
28	47,6	79	9,96	130	4,52	181	2,42	232	0,9	283	0,84	334	0,77
29	46,6	80	9,71	131	4,49	182	2,38	233	0,9	284	0,84	335	0,75
30	45,3	81	9,51	132	4,45	183	2,33	234	0,91	285	0,86	336	0,73
31	44,1	82	9,31	133	4,39	184	2,3	235	0,9	286	0,84	337	0,77
32	42,9	83	9,1	134	4,36	185	2,26	236	0,85	287	0,86	338	0,75
33	41,6	84	8,9	135	4,31	186	2,21	237	0,88	288	0,88	339	0,74
34	40,4	85	8,72	136	4,27	187	2,19	238	0,87	289	0,85	340	0,72
35	39	86	8,57	137	4,24	188	2,14	239	0,85	290	0,89		
36	37,7	87	8,39	138	4,2	189	2,11	240	0,84	291	0,88		
37	36,5	88	8,23	139	4,15	190	2,06	241	0,83	292	0,9		
38	35,3	89	8,04	140	4,12	191	2,03	242	0,83	293	0,91		
39	34	90	7,91	141	4,09	192	1,97	243	0,81	294	0,89		
40	32,8	91	7,75	142	4,06	193	1,94	244	0,82	295	0,9		
41	31,7	92	7,6	143	4,05	194	1,91	245	0,82	296	0,9		
42	30,6	93	7,48	144	4	195	1,85	246	0,82	297	0,9		
43	29,5	94	7,33	145	3,98	196	1,82	247	0,8	298	0,92		
44	28,5	95	7,21	146	3,94	197	1,78	248	0,81	299	0,91		
45	27,5	96	7,1	147	3,9	198	1,74	249	0,79	300	0,91		
46	26,5	97	6,98	148	3,86	199	1,72	250	0,79	301	0,92		
47	25,6	98	6,85	149	3,84	200	1,68	251	0,79	302	0,91		
48	24,7	99	6,74	150	3,8	201	1,64	252	0,77	303	0,91		
49	23,9	100	6,63	151	3,78	202	1,61	253	0,79	304	0,91		
50	23,1	101	6,52	152	3,73	203	1,58	254	0,77	305	0,92		
51	22,3	102	6,42	153	3,68	204	1,54	255	0,77	306	0,91		
52	21,5	103	6,33	154	3,66	205	1,51	256	0,77	307	0,93		
53	20,8	104	6,21	155	3,6	206	1,48	257	0,76	308	0,91		
54	20,1	105	6,13	156	3,56	207	1,44	258	0,77	309	0,9		
55	19,4	106	6,03	157	3,52	208	1,43	259	0,76	310	0,91		
56	18,8	107	5,95	158	3,48	209	1,4	260	0,77	311	0,93		
57	18,3	108	5,88	159	3,45	210	1,37	261	0,76	312	0,92		
58	17,7	109	5,78	160	3,39	211	1,35	262	0,77	313	0,91		
59	17,1	110	5,71	161	3,37	212	1,32	263	0,75	314	0,9		
60	16,6	111	5,64	162	3,31	213	1,28	264	0,77	315	0,9		
61	16	112	5,56	163	3,27	214	1,25	265	0,75	316	0,9		
62	15,6	113	5,5	164	3,22	215	1,23	266	0,77	317	0,9		
63	15,1	114	5,42	165	3,17	216	1,2	267	0,75	318	0,88		
64	14,7	115	5,36	166	3,12	217	1,17	268	0,77	319	0,87		
65	14,3	116	5,28	167	3,07	218	1,15	269	0,77	320	0,88		
66	13,9	117	5,22	168	3,03	219	1,15	270	0,77	321	0,87		
67	13,5	118	5,16	169	2,99	220	1,13	271	0,78	322	0,86		
68	13,1	119	5,1	170	2,94	221	1,1	272	0,79	323	0,86		

Cycle		Pressão de Combustão média, 6000@wot E22,											
-340	0,4	-286	0,2	-232	0,4	-178	0,68	-124	1	-70	2,44	-16	15,8
-339	0,4	-285	0,19	-231	0,39	-177	0,66	-123	1,01	-69	2,5	-15	16,5
-338	0,4	-284	0,19	-230	0,4	-176	0,69	-122	1,1	-68	2,56	-14	17,1
-337	0,4	-283	0,2	-229	0,41	-175	0,71	-121	1,04	-67	2,61	-13	17,8
-336	0,4	-282	0,16	-228	0,42	-174	0,7	-120	1,07	-66	2,69	-12	18,5
-335	0,4	-281	0,24	-227	0,42	-173	0,7	-119	1,07	-65	2,75	-11	19,2
-334	0,3	-280	0,21	-226	0,43	-172	0,7	-118	1,11	-64	2,82	-10	19,9
-333	0,3	-279	0,2	-225	0,43	-171	0,73	-117	1,09	-63	2,9	-9	20,7
-332	0,3	-278	0,19	-224	0,45	-170	0,74	-116	1,1	-62	2,99	-8	21,5
-331	0,3	-277	0,22	-223	0,45	-169	0,74	-115	1,13	-61	3,09	-7	22,4
-330	0,3	-276	0,19	-222	0,45	-168	0,73	-114	1,13	-60	3,17	-6	23,2
-329	0,3	-275	0,21	-221	0,46	-167	0,73	-113	1,14	-59	3,26	-5	24,1
-328	0,3	-274	0,19	-220	0,46	-166	0,77	-112	1,19	-58	3,38	-4	25,1
-327	0,3	-273	0,22	-219	0,47	-165	0,76	-111	1,15	-57	3,48	-3	26,1
-326	0,3	-272	0,23	-218	0,47	-164	0,77	-110	1,18	-56	3,57	-2	27,2
-325	0,3	-271	0,23	-217	0,48	-163	0,76	-109	1,17	-55	3,69	-1	28,4
-324	0,3	-270	0,23	-216	0,47	-162	0,78	-108	1,26	-54	3,81	0	29,6
-323	0,3	-269	0,24	-215	0,48	-161	0,8	-107	1,22	-53	3,93	1	30,8
-322	0,3	-268	0,26	-214	0,49	-160	0,8	-106	1,27	-52	4,06	2	32,1
-321	0,3	-267	0,23	-213	0,5	-159	0,79	-105	1,32	-51	4,19	3	33,4
-320	0,3	-266	0,25	-212	0,51	-158	0,8	-104	1,27	-50	4,32	4	34,7
-319	0,3	-265	0,26	-211	0,5	-157	0,82	-103	1,33	-49	4,43	5	36
-318	0,3	-264	0,27	-210	0,51	-156	0,83	-102	1,3	-48	4,61	6	37,3
-317	0,2	-263	0,28	-209	0,51	-155	0,83	-101	1,32	-47	4,76	7	38,5
-316	0,2	-262	0,27	-208	0,53	-154	0,82	-100	1,36	-46	4,94	8	39,8
-315	0,3	-261	0,28	-207	0,53	-153	0,84	-99	1,38	-45	5,11	9	41
-314	0,2	-260	0,28	-206	0,54	-152	0,85	-98	1,35	-44	5,3	10	42,2
-313	0,2	-259	0,28	-205	0,54	-151	0,86	-97	1,4	-43	5,51	11	43,4
-312	0,3	-258	0,3	-204	0,54	-150	0,87	-96	1,44	-42	5,69	12	44,6
-311	0,3	-257	0,27	-203	0,54	-149	0,86	-95	1,44	-41	5,9	13	45,7
-310	0,2	-256	0,29	-202	0,53	-148	0,87	-94	1,49	-40	6,11	14	46,8
-309	0,1	-255	0,32	-201	0,55	-147	0,89	-93	1,47	-39	6,34	15	47,8
-308	0,2	-254	0,3	-200	0,57	-146	0,89	-92	1,59	-38	6,59	16	48,6
-307	0,2	-253	0,31	-199	0,55	-145	0,88	-91	1,62	-37	6,87	17	49,3
-306	0,1	-252	0,32	-198	0,56	-144	0,88	-90	1,52	-36	7,12	18	49,8
-305	0,3	-251	0,31	-197	0,58	-143	0,89	-89	1,6	-35	7,39	19	50,1
-304	0,2	-250	0,34	-196	0,56	-142	0,9	-88	1,66	-34	7,67	20	50,3
-303	0,2	-249	0,35	-195	0,58	-141	0,91	-87	1,68	-33	7,97	21	50,2
-302	0,2	-248	0,34	-194	0,59	-140	0,93	-86	1,7	-32	8,36	22	50,1
-301	0,2	-247	0,33	-193	0,58	-139	0,91	-85	1,74	-31	8,64	23	49,7
-300	0,1	-246	0,35	-192	0,59	-138	0,93	-84	1,76	-30	9,09	24	49,1
-299	0,2	-245	0,35	-191	0,6	-137	0,92	-83	1,82	-29	9,35	25	48,3
-298	0,3	-244	0,35	-190	0,62	-136	0,95	-82	1,87	-28	9,76	26	47,5
-297	0,2	-243	0,35	-189	0,61	-135	0,91	-81	1,95	-27	10,2	27	46,5
-296	0,2	-242	0,36	-188	0,61	-134	0,95	-80	1,94	-26	10,6	28	45,5
-295	0,2	-241	0,37	-187	0,63	-133	0,94	-79	1,95	-25	11	29	44,3
-294	0,2	-240	0,36	-186	0,62	-132	0,98	-78	2,01	-24	11,5	30	43,2
-293	0,2	-239	0,38	-185	0,63	-131	0,83	-77	2,07	-23	12	31	42
-292	0,2	-238	0,38	-184	0,65	-130	1,04	-76	2,11	-22	12,5	32	40,7
-291	0,2	-237	0,37	-183	0,63	-129	1,02	-75	2,16	-21	13	33	39,5
-290	0,1	-236	0,4	-182	0,65	-128	1	-74	2,22	-20	13,6	34	38,2
-289	0,2	-235	0,37	-181	0,65	-127	0,99	-73	2,26	-19	14,1	35	37
-288	0,1	-234	0,39	-180	0,67	-126	1,05	-72	2,31	-18	14,6	36	35,7
-287	0,2	-233	0,38	-179	0,67	-125	0,99	-71	2,37	-17	15,3	37	34,5

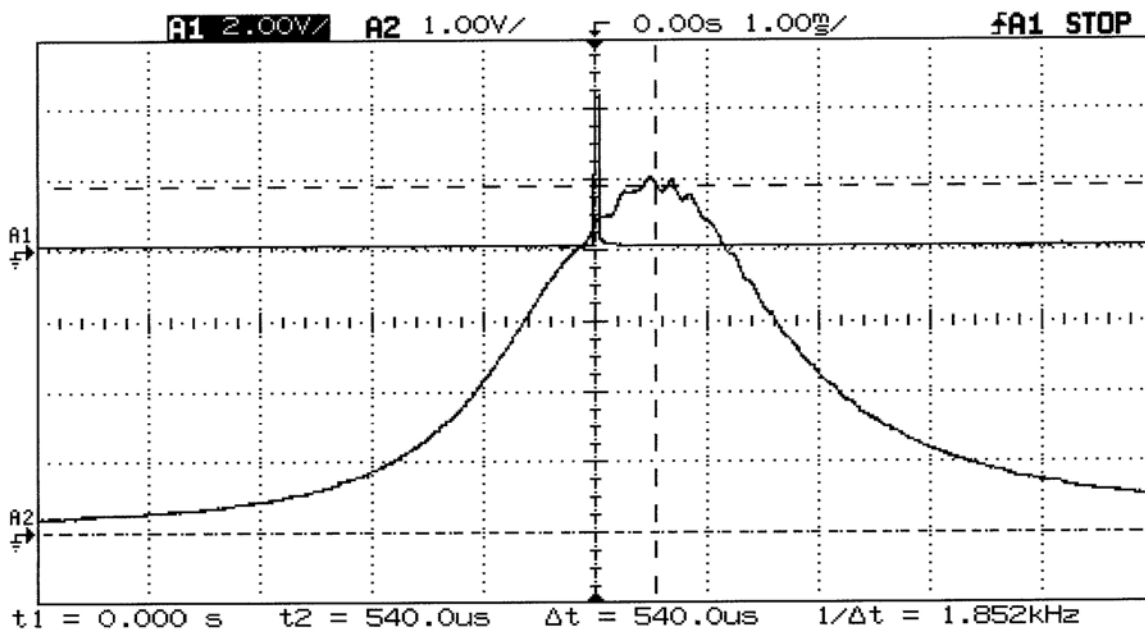
38	33,3	92	7,34	146	3,86	200	1,72	254	0,86	308	0,99	362	0,84
39	32,2	93	7,23	147	3,82	201	1,69	255	0,92	309	0,99	363	0,81
40	31	94	7,08	148	3,79	202	1,68	256	0,87	310	1	364	0,8
41	29,9	95	7	149	3,76	203	1,64	257	0,88	311	1,01	365	0,86
42	28,9	96	6,84	150	3,74	204	1,61	258	0,86	312	0,99	366	0,77
43	27,9	97	6,74	151	3,7	205	1,58	259	0,88	313	1	367	0,79
44	26,9	98	6,64	152	3,67	206	1,56	260	0,87	314	1	368	0,74
45	26	99	6,52	153	3,62	207	1,53	261	0,87	315	0,99	369	0,74
46	25,1	100	6,42	154	3,57	208	1,49	262	0,87	316	0,99	370	0,7
47	24,2	101	6,32	155	3,56	209	1,47	263	0,86	317	0,98	371	0,68
48	23,3	102	6,22	156	3,51	210	1,44	264	0,85	318	0,98	372	0,58
49	22,5	103	6,15	157	3,45	211	1,43	265	0,84	319	0,99	373	0,58
50	21,8	104	6,05	158	3,43	212	1,42	266	0,85	320	0,97	374	0,56
51	21,1	105	5,96	159	3,39	213	1,4	267	0,86	321	0,97	375	0,53
52	20,4	106	5,87	160	3,34	214	1,36	268	0,85	322	0,96	376	0,49
53	19,7	107	5,8	161	3,29	215	1,34	269	0,85	323	0,96	377	0,47
54	19	108	5,72	162	3,25	216	1,34	270	0,86	324	0,95		
55	18,4	109	5,65	163	3,2	217	1,28	271	0,87	325	0,96		
56	17,9	110	5,56	164	3,17	218	1,26	272	0,85	326	0,95		
57	17,3	111	5,51	165	3,11	219	1,25	273	0,87	327	0,93		
58	16,8	112	5,41	166	3,06	220	1,23	274	0,86	328	0,95		
59	16,3	113	5,38	167	3,01	221	1,19	275	0,87	329	0,92		
60	15,7	114	5,3	168	2,98	222	1,19	276	0,89	330	0,88		
61	15,2	115	5,22	169	2,92	223	1,16	277	0,9	331	0,92		
62	14,8	116	5,18	170	2,87	224	1,15	278	0,89	332	0,91		
63	14,5	117	5,09	171	2,83	225	1,13	279	0,91	333	0,87		
64	13,9	118	5,04	172	2,79	226	1,1	280	0,92	334	0,9		
65	13,5	119	4,97	173	2,74	227	1,12	281	0,9	335	0,89		
66	13,2	120	4,92	174	2,7	228	1,08	282	0,92	336	0,85		
67	12,9	121	4,84	175	2,67	229	1,1	283	0,91	337	0,87		
68	12,6	122	4,79	176	2,62	230	1,09	284	0,92	338	0,87		
69	12,3	123	4,75	177	2,58	231	1,09	285	0,93	339	0,84		
70	11,8	124	4,7	178	2,55	232	1,01	286	0,93	340	0,83		
71	11,5	125	4,64	179	2,5	233	1,06	287	0,95	341	0,85		
72	11,3	126	4,59	180	2,46	234	1,02	288	0,96	342	0,84		
73	11	127	4,54	181	2,41	235	1,01	289	0,95	343	0,82		
74	10,8	128	4,51	182	2,39	236	1	290	0,97	344	0,83		
75	10,5	129	4,47	183	2,34	237	0,98	291	0,95	345	0,81		
76	10,3	130	4,44	184	2,3	238	0,97	292	0,98	346	0,8		
77	9,97	131	4,38	185	2,26	239	0,96	293	0,98	347	0,81		
78	9,8	132	4,36	186	2,22	240	0,96	294	0,97	348	0,83		
79	9,52	133	4,32	187	2,18	241	0,95	295	0,99	349	0,79		
80	9,31	134	4,29	188	2,16	242	0,94	296	0,99	350	0,81		
81	9,14	135	4,25	189	2,14	243	0,94	297	0,98	351	0,82		
82	8,96	136	4,2	190	2,1	244	0,95	298	1	352	0,81		
83	8,75	137	4,17	191	2,05	245	0,9	299	1	353	0,82		
84	8,57	138	4,11	192	1,99	246	0,92	300	1	354	0,83		
85	8,45	139	4,12	193	1,98	247	0,91	301	1,01	355	0,81		
86	8,22	140	4,07	194	1,93	248	0,93	302	1	356	0,82		
87	8,08	141	4,02	195	1,91	249	0,91	303	0,99	357	0,83		
88	7,93	142	4,03	196	1,88	250	0,89	304	1	358	0,82		
89	7,74	143	3,97	197	1,82	251	0,89	305	0,99	359	0,83		
90	7,62	144	3,93	198	1,79	252	0,91	306	0,99	360	0,83		
91	7,51	145	3,92	199	1,78	253	0,88	307	0,99	361	0,83		



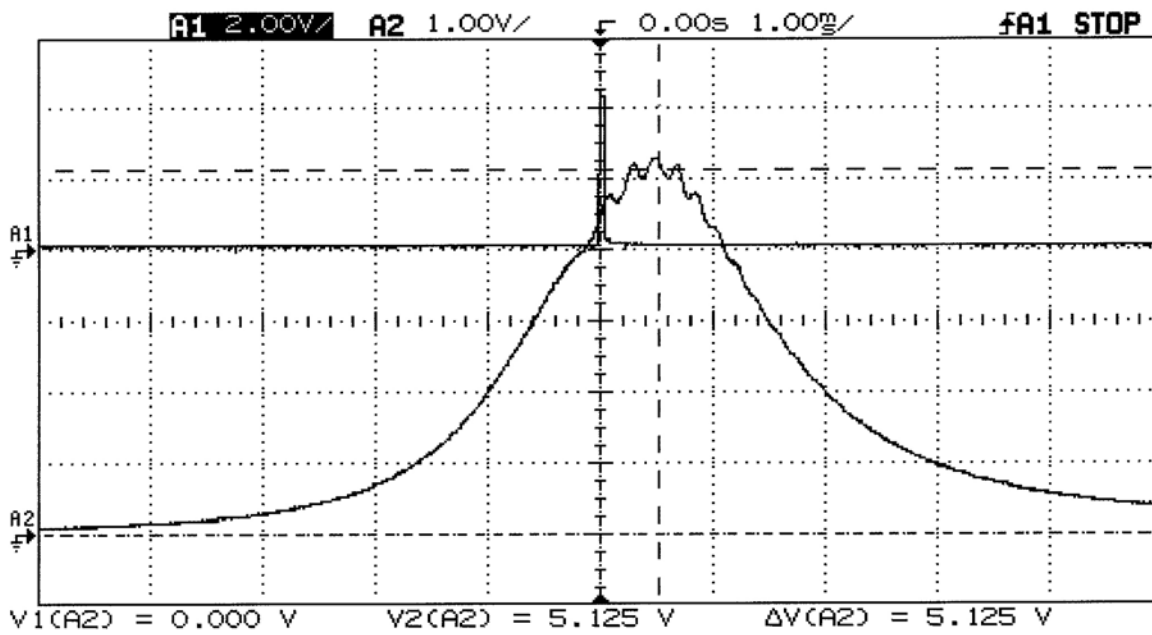
Motor ICO 2400 RPM



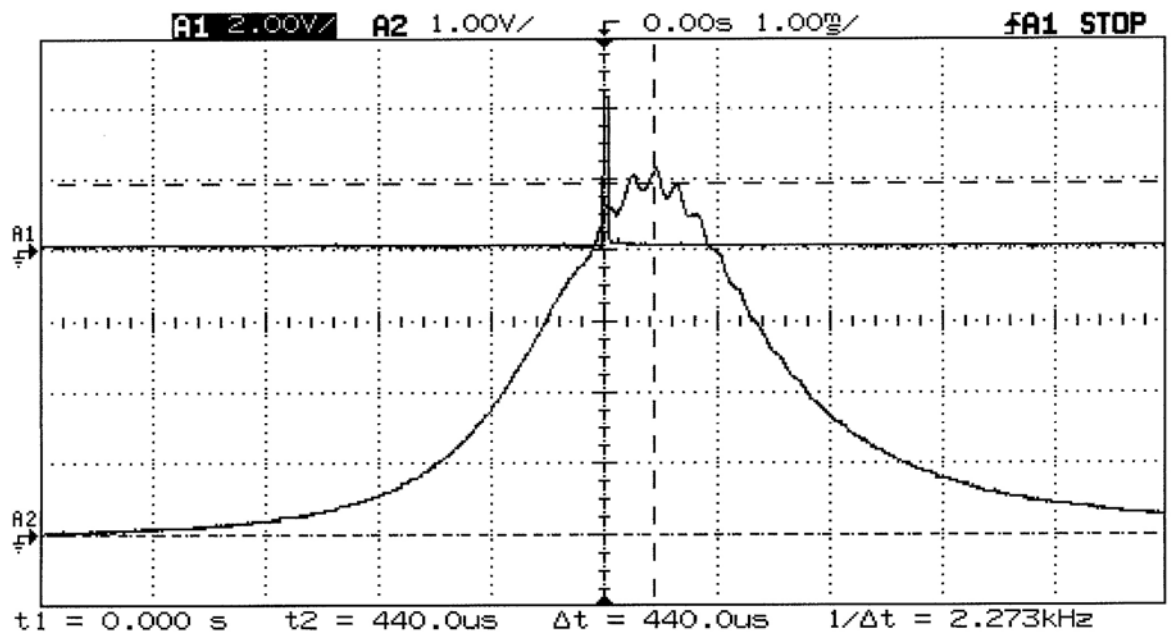
Motor ICO 2600 RPM



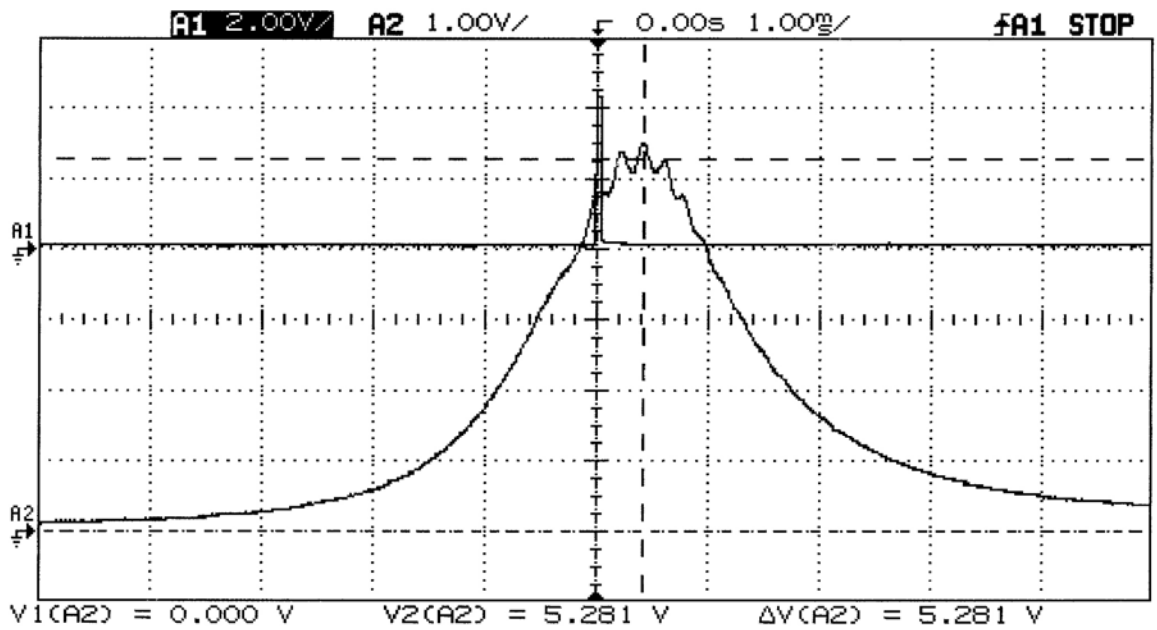
Motor ICO 3400 RPM



Motor ICO 3400 RPM



Motor ICO 3600 RPM



Motor ICO 3800 RPM