

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DESEMPENHO DE MOTORES ALTERNATIVOS DE COMBUSTÃO INTERNA

- Utilização do Equipamento Piezoelétrico de Medidas Tipo PM-1 - Tópicos especiais sobre curvas de rendimento mecânico.

Tese submetida a Universidade Federal de Santa Catarina, para a obtenção do grau de Mestre em Ciências.

HONORATO ANTÔNIO TOMELIN

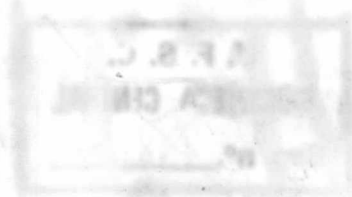


0.248.351-0

UFSC-BU



Setembro - 1970



DESEMPENHO DE MOTORES ALTERNATIVOS DE COMBUSTÃO INTERNA
- Utilização do Equipamento Piezoelétrico de Medidas Tipo PM-1 - Tópicos especiais sobre curvas de rendimento mecânico.

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM CIÊNCIAS

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA FORMA
FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO.

Carlos Alfredo Clezar, M.Sc.
Orientador

Getúlio Gões Ferreti, M. Sc.
Integrador do Curso de
Pós-Graduação

Apresentada perante a banca examinadora composta dos professores:

Carlos Alfredo Clezar, M.Sc.

Jaroslav Kozel, Ph.D.

Jukka Arturi Lehtinen, Ph.D.



À minha mãe

AGRADECIMENTOS

Ao Centro Tecnológico pela oportunidade de realizar este trabalho, os meus agradecimentos.

À STOLL MOTORES, Joinville, SC, pela doação do motor e peças suplementares.

À CAPES pela bolsa, que em muito auxiliou este trabalho.

À COPERTIDE, pelo apoio financeiro e incentivo ao regime de dedicação exclusiva.

Agradeço igualmente ao Professor Carlos Alfredo Clezar, M.Sc. pelo trabalho de orientação. A Jaroslav Kozel, D.Sc., pela colaboração emprestada e ao Professor Hamilton Savi pelo auxílio nas operações de montagem.

Ao Ditmar, pela dedicação na execução de acessórios e adaptações.

Aos alunos Sérgio, Orlando, Aldo e Raimundo, pelas suas colaborações na montagem, operação e instalação e execução de gráficos.

Ao Aurino e Nestor pelo trabalho de datilografia.

Enfim, aos Professores deste Centro, funcionários e todos aqueles que de uma ou de outra forma emprestaram sua colaboração, o meu muito obrigado.

ÍNDICE

INTRODUÇÃO	1
------------------	---

CAPÍTULO 1

EQUIPAMENTOS E ACESSÓRIOS	3
1.1 - O Equipamento Piezoelétrico de Medidas PM-1	3
1.2 - Eletrodinamômetro Anel e seus acessórios	3
1.2.1 - Características do Motor-Gerador Anel nº 10121	4
1.2.2 - Características do variador de tensão e resis- tências de dissipação de carga	5
1.3 - Quadro elétrico geral	5
1.4 - Equipamentos auxiliares	6
1.4.1 - Quadro de comando	6
1.4.2 - Medidores auxiliares	7
1.5 - Transdutores Piezoelétricos	8

CAPÍTULO 2

MONTAGEM E UTILIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO DE TESTE	13
2.1 - O motor em teste	13
2.2 - Instalação dos transdutores	13
2.3 - Instalação do Gerador de X	14
2.4 - Diagrama em bloco do PM-1	16
2.5 - Ligação motor-eletrodinamômetro	18
2.6 - Eletrodinamômetro e suas ligações	19
2.7 - Ligações hidráulicas	19
2.8 - Consumo de combustível	20
2.9 - Termômetro da temperatura de descarga	21
2.10 - Medidor de rotações	21
2.11 - Diagrama em bloco geral e circuito elétrico	25
2.12 - Utilização do equipamento	25
2.12.1 - Otimização do ponto de ignição	25
2.12.2 - Detonação e suas variáveis	27
2.12.3 - Balanço térmico	27
2.12.4 - Localização de anomalias no ciclo	27
2.12.5 - Refrigeração e suas variáveis	29

CAPÍTULO 3

RENDIMENTO MECÂNICO DE MOTORES A 2T	30
3.1 - Processos de cálculo de rendimento mecânico	30
3.2 - Cálculo do rendimento mecânico a partir da potência passiva	30
3.2.1 - Curva de potência passiva	30
3.2.2 - Medida de potência passiva	33
3.2.3 - Curva de rendimento mecânico	35
3.3 - Cálculo do rendimento mecânico a partir da potência indicada	36
3.3.1 - Processo de cálculo da potência indicada	36
3.3.2 - Cálculo da pressão média indicada	37
3.3.2.1 - Levantamento fotográfico	38
3.3.2.2 - Cálculo das áreas	44
3.4 - Rendimento mecânico - Apreciação de cálculo	45
3.5 - Resultados adicionais	45
3.5.1 - Curva de consumo específico	45
3.5.2 - Potência de partida	48
3.5.3 - Temperaturas de funcionamento	48
3.5.4 - Condições ambientes	48

CAPÍTULO 4

ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS	50
4.1 - Análise percentual da variação dos resultados	50
4.1.1 - Processo potência indicada	50
4.1.2 - Processo potência passiva	52
4.2 - Análise comparativa	53

APÊNDICE A-1

SISTEMAS DE AFERIÇÃO E CALIBRAÇÃO	54
A1.1 - Calibração de transdutores	54
A1.1.1 - Calibração do transdutor PD 100/14-1	54
A1.2 - Aferição do tacômetro	65
A1.3 - Aferição da balança de medição de torque	65
A1.4 - Distorção no acoplamento motor-gerador de X	66

APÊNDICE A-2

CÁLCULO DE ÁREAS DOS DIAGRAMAS INDICADOS	68
A2.1 - Área dos diagramas da câmara de combustão	68
BIBLIOGRAFIA	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Quadro comparativo dos diversos tipos de transdutores	10
Tabela 02 - Média dos valores medidos à curva de torque ...	31
Tabela 03 - Valores ajustados à curva de torque	31
Tabela 04 - Valores da potência efetiva	33
Tabela 05 - Valores medidos da potência efetiva	33
Tabela 06 - Valores medidos da potência passiva	34
Tabela 07 - Valores ajustados à curva de potência passiva .	34
Tabela 08 - Valores do rendimento mecânico através da potência passiva	36
Tabela 09 - Valores medidos do rendimento mecânico	36
Tabela 10 - Valores médios das áreas, relativos à câmara de combustão	44
Tabela 11 - Pressão média indicada, relativa à câmara de combustão	44
Tabela 12 - Valores do rendimento mecânico, considerando medições por dentro, no meio e por fora do ponto luminoso	45
Tabela 13 - Tempos de consumo	46
Tabela 14 - Valores do consumo específico, medidos	46
Tabela 15 - Valores do consumo específico, ajustados	47
Tabela 16 - Valores da tensão e corrente de partida	48
Tabela 17 - Temperaturas de funcionamento	49
Tabela 18 - Valores do fator de escala, através de medição estática (processo 1)	57
Tabela 19 - Valores do fator de escala, através de medição estática (processo 2)	61
Tabela 20 - Valores do fator de escala, através de medição dinâmica (processo 3), PD 100/14-1	65

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 - Vista geral do PM-1	4
Figura 02 - Quadro elétrico geral	6
Figura 03 - Quadro de comando	7
Figura 04 - Painel de medidores auxiliares	9
Figura 05 - Medidores de condição ambiente	9
Figura 06 - Sistemas de refrigeração	10
Figura 07 - Transdutores piezoelétricos	12
Figura 08 - Motor STOLL, 2T, 5,5 CV	13
Figura 09 - Instalação do PD 100/14-1	14
Figura 10 - Instalação do PDH 5/18-2	15
Figura 11 - Estágio eletrométrico	15
Figura 12 - Modulador	16
Figura 13 - Amplificador modulador	17
Figura 14 - Diagrama em bloco do PM-1	17
Figura 15 - Acoplamento motor-eletrodinamômetro	18
Figura 16 - Medidor de consumo de combustível	20
Figura 17 - Instalação do termômetro de temperatura de descarga	21
Figura 18 - Diagrama em bloco geral da instalação	22
Figura 19 - Sistema de alimentação de corrente contínua para o eletrodinamômetro	23
Figura 20 - Ligação motor de corrente contínua-gerador	24
Figura 21 - Lâmpadas indicadoras das posições das chaves ..	24
Figura 22 - Vista geral da instalação	25
Figura 23 - Diagrama aberto de pressão - faísca avançada ..	26
Figura 24 - Diagrama aberto de pressão - faísca atrasada ..	26
Figura 25 - Localização de provável defeito através do diagrama pV, da câmara de combustão	28
Figura 26 - Localização de provável defeito através do diagrama pV, do carter	28
Figura 27 - Curva de torque	32
Figura 28 - Curva de potência efetiva	32
Figura 29 - Curva de potência passiva	34
Figura 30 - Curva de rendimento mecânico através da potência passiva	35

Figura 31 - Diagramas indicados, a 1000 rpm	38
Figura 32 - Diagramas indicados, a 1200 rpm	39
Figura 33 - Diagramas indicados, a 1300 rpm	39
Figura 34 - Diagramas indicados, a 1400 rpm	40
Figura 35 - Diagramas indicados, a 1500 rpm	40
Figura 36 - Diagramas indicados, a 1600 rpm	41
Figura 37 - Diagramas indicados, a 1700 rpm	41
Figura 38 - Diagramas indicados, a 1800 rpm	42
Figura 39 - Diagramas indicados, a 1900 rpm	42
Figura 40 - Diagramas indicados, a 2000 rpm	43
Figura 41 - Diagramas indicados, a 2100 rpm	43
Figura 42 - Curva de consumo específico	47
Figura 43 - Instalação de calibração dos transdutores	55
Figura 44 - Calibração do PD 100/14-1 utilizando 10 atm ...	56
Figura 45 - Calibração do PD 100/14-1 utilizando 14 atm ...	56
Figura 46 - Calibração do PD 100/14-1 utilizando 20 atm ...	57
Figura 47 - Registrador indicador	58
Figura 48 - Calibração do PD 100/14-1 utilizando o registrador indicador, com 9,07 atm	59
Figura 49 - Calibração do PD 100/14-1 utilizando o registrador indicador, com 7,15 atm	59
Figura 50 - Calibração do PD 100/14-1 utilizando o registrador indicador, com 8,42 atm	60
Figura 51 - Calibração do PD 100/14-1 utilizando o registrador indicador, com 3,85 atm	60
Figura 52 - Valores registrados no indicador, processo 2, PD 100/14-1	61
Figura 53 - Adaptação do registrador indicador no motor ...	62
Figura 54 - Calibração do PD 100/14-1 utilizando o registrador indicador, dinamicamente, com 5,82 atm	62
Figura 55 - Calibração do PD 100/14-1 utilizando o registrador indicador, dinamicamente, com 5,87 atm	63
Figura 56 - Calibração do PD 100/14-1 utilizando o registrador indicador, dinamicamente, com 5,55 atm	63

Figura 57 - Calibração do PD 100/14-1 utilizando o registrador indicador, dinamicamente, com 5,92 atm	64
Figura 58 - Valores registrados no indicador, processo 3 ..	64
Figura 59 - Tacômetro eletromagnético	66
Figura 60 - Instalação de verificação de distorção no acoplamento motor-gerador de X	67

SIMBOLOGIA

A_p	área do pistão
A_v	área do diagrama da câmara de combustão
C_e	consumo específico
F_{ev}	fator de escala vertical - câmara de combustão
f	frequência
I	intensidade de corrente
KW	potência
L	comprimento
M_t	momento torçor
n	rotações por minuto
N_e	potência efetiva
N_i	potência indicada
N_p	potência passiva
P_{atm}	pressão atmosférica
P_{mi}	pressão média indicada
Q	vazão
t	temperatura
t_v	comprimento do diagrama obtido - câmara
V	tensão
η_m	rendimento mecânico

RESUMO

Os motores alternativos de pequeno porte, dispõem, no Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina, de instalação completa para testá-los, aperfeiçoá-los e compará-los, capaz de possibilitar o desenvolvimento de tecnologia adequada ao estado atual do parque industrial catarinense.

Utilizando um motor STOLL, produto da indústria de Santa Catarina, e através de modernos equipamentos eletrônicos, bem como uma gama variada de equipamentos auxiliares, tornou-se possível determinar todas as características do motor em teste. Não somente estes resultados puderam ser retirados, mas também dados informativos das condições de funcionamento do motor, otimização de regulagens e possibilidade de detecção de defeitos, com o motor em pleno funcionamento.

O aspecto científico deste trabalho prendeu-se à análise comparativa das formas de determinação da curva de rendimento mecânico do motor em apreço, apreciando-se os desvios prováveis do resultado final, a cada forma. Na primeira forma, obteve-se os resultados através da potência passiva, enquanto que na segunda forma, os resultados foram obtidos através dos diagramas indicados (pV) de funcionamento do motor. Instruções quanto a utilização de transdutores piezoelétricos são apresentadas, principalmente com relação a interpretação dos valores obtidos, que poderão ser empregados, preferencialmente, para obtenção de resultado qualitativo, uma vez que, na forma quantitativa poderá, em muitos casos, levar a conclusões errôneas e mesmo absurdas.

Processos e sistemas de aferição e calibração, utilizados no desenvolvimento do trabalho, completam esta colaboração ao estudo dos motores de combustão interna.

ABSTRACT

There is available at the Centro Tecnológico of UFSC a complete facility, including mechanical, electronic auxiliary devices, for testing, improving and study of internal combustion engines, which can be used for serve the industry in the area.

Using this equipment, a small engine, trade mark STOLL, fabricated at Joinville, Santa Catarina, was submitted to detailed testing.

Performance characteristic curves and other experimental data were measured for the purpose of tuning and trouble detecting. A comparative study of two mechanical efficiency curves, measured by two different methods, was undertaken. The first method used was the one based on passive input and the second method, using the PV-diagram recorded on the engine in run. Some practical observations on reasonable use of piezoelectric transducers and on evaluation of their puts are given. It is recommended that those data be used only for qualitative study because in some cases, the quantitative interpretation could lead to erroneous conclusions.

Notes on static calibration procedures used in this experimental work are included.

INTRODUÇÃO

O processo de desenvolvimento da tecnologia relacionada ao estudo de motores de combustão interna, carece de informações capazes de objetivar uma atualização das normas de execução, nos processos de fabricação e na otimização do desempenho destas máquinas alternativas.

O Estado de Santa Catarina conta em seu parque industrial de nada menos de cinco indústrias dedicadas à fabricação de motores de combustão interna, de pequeno porte, com potências numa faixa de 4 a 25 CV.

A atual situação das pesquisas neste setor tende a visualizar uma nova etapa na produção de motores. O sentido principal da idéia firmada em torno do entrosamento entre Indústria e Universidade tem agora seu objetivo firmado. As modernas instalações, capazes de verificar o desempenho, com possibilidade de comparar e, mais ainda, detetar defeitos e reformular projetos de motores de combustão interna, vão permitir a toda indústria catarinense de motores uma melhor conscientização desses problemas inerentes à técnica de sua execução.

A disponibilidade de pessoal especializado, por parte da Universidade, permitirá às indústrias de Santa Catarina um aproveitamento mais intensivo, as quais poderão dispor da orientação desses técnicos, a fim de poderem desenvolver, aproveitando as instalações do Centro Tecnológico, estudos determinados, com relação a algum problema específico em produtos de sua linha de fabricação.

Atestados de desempenho deverão acompanhar o produto final acabado, facilitando desta forma a seleção de um determinado motor à uma conveniente aplicação e conscientizando o mercado consumidor.

A movimentação de todo este conjunto em torno de uma mesma idéia, permitirá criar um órgão permanente de pesquisa sobre motores de combustão interna.

O trabalho de tese que ora se realiza, inicia uma nova fase nesta tecnologia. Pretende-se com ele, incentivar estu-

dos, encorajar pesquisas e lembrar que "mesmo quando não se alcance êxito, é nobre e glorioso haver tentado qualquer realização grande, nobre e bela".

A avaliação do comportamento de um motor de combustão interna se retrata através de suas curvas características. A este conjunto de informações, denominado desempenho de motores, permite-se analisar com detalhes a resposta a uma solicitação imposta à máquina.

Prende-se este trabalho à apresentação das curvas de potência efetiva, potência indicada, torque, consumo específico, rendimento mecânico, potência passiva, etc., a cujas considerações iniciais dispensam maiores comentários, assunto por demais explorado teoricamente em todas as bibliografias¹. Para tanto, a instalação montada permite obter os resultados que se propõe. À primeira vista, pode-se concluir, do diagrama em blocos da instalação (figura 18), da sua capacidade e versatilidade.

Ao introduzir-se a parte prática desta tese, convém ressaltar a inconveniência do detalhamento das características de todos os equipamentos, haja vista a disponibilidade de catálogos informativos sobre os mesmos, capazes de uma elucidação mais pormenorizada.

CAPÍTULO 1

EQUIPAMENTOS E ACESSÓRIOS

1.1 - O Equipamento Piezoelétrico de Medidas PM-1

Como um instrumento de alta qualidade, o Equipamento Piezoelétrico de Medidas tipo PM-1, é agora de grande valor para o engenheiro e o técnico, ao se tratar de medições de variação de pressão ou de vibração². O processo de medição utilizando este equipamento é baseado numa comparação indireta, fazendo uso de algumas formas de dispositivos transdutores, ligados ao aparelho central, cuja denominação total recebe o nome de sistema de medida. O sinal de entrada a ser medido é captado, convertido em impulso elétrico, amplificado e finalmente entregue a um osciloscópio na forma de um deslocamento, referido a uma determinada escala³. Torna-se claro a necessidade de referir este resultado a um sistema de comparação, capaz de avaliar a grandeza quantitativa da informação.

O Equipamento dispõe de dois canais (X_1Y_1 , X_2Y_2) capazes de entregar ao mesmo tempo, sinais de duas fontes, referidas a uma mesma variação.

O resultado pode ser fotografado e posteriormente analisado. A figura 1 ilustra uma vista geral do PM-1.

Além do quadro principal, o PM-1 dispõe de um gerador de sinal em X (proporcional ao curso do motor ou ao ângulo de giro da manivela), de amplificadores de saída e transdutores piezoelétricos.

1.2 - Eletrodinamômetro Anel e seus acessórios.

O eletrodinamômetro reúne, entre outras, a grande vantagem de poder trabalhar, não só como gerador, trabalhando como carga para o motor, mas também como motor elétrico, capaz de acionar o alternativo, facilitando mormente as condições de partida⁴. Esta vantagem se ressalta mais ainda, quando da necessi-

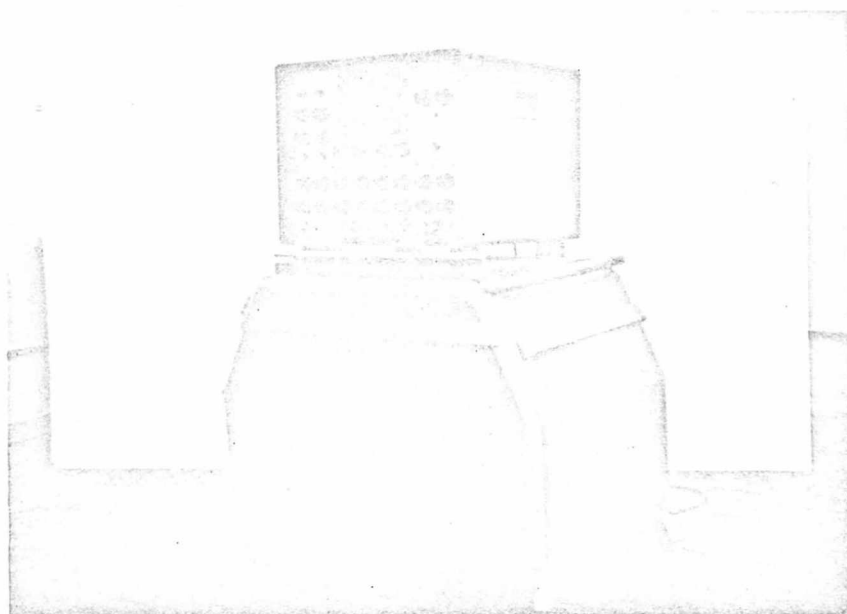


Figura 01 - Vista geral do PM-1

dade de sua utilização para colher dados, tendo em vista os valores necessários ao traçado da curva de potência passiva.

1.2.1 - Características do Motor-Gerador Anel nº 10121.

MOTOR: rpm - 1800
 tipo - MC-1-6/4
 Rend. - 0,83
 $\Delta t^{\circ}\text{C}$ - 50
 Campo - 340
 KW - 7,5
 V-LIG - 256 INDP

GERADOR: rpm - 1800 : 3600
 tipo - GC-1-6/4
 Rend. - 0,83
 $\Delta t^{\circ}\text{C}$ - 50
 Campo - 340
 KW - 7,5/15

Faz parte deste grupo, ainda, uma balança Filizola, capacidade de 20 kg que recebe a força proveniente do gerador, através de um braço de alavanca de 0,5 m. A aferição desta balança pode ser encontrada no Apêndice 1.

1.2.2 - Características do Variador de Tensão e Resistências de Dissipação de carga.

A variação de carga no motor em teste é controlada por um variador de tensão, que controla a energia exigida e a dissipa em forma de calor, em resistências elétricas.

Suas características são as seguintes:

Variador de Tensão:

marca	-	Anel
nº	-	28608
tipo	-	RT-2-5B
Regm.	-	Cont.

	Entrada	Saída
V.LIG	110 λ	0 : 190
KVA	10,5	9,5
A	55	29
Hz	60	60
Fases	3	3

Resistência elétrica:

marca	-	Anel
Resist.	-	3/6 Ω

1.3 - Quadro elétrico geral

O fornecimento de energia à instalação provém de duas redes, uma de 380 V trifásica, e outra de 220 V, monofásica. Esta alimentação é entregue a um quadro elétrico geral, de entrada, com os seguintes dispositivos:

- a) Retificador de corrente, marca Anel
- b) Chave contadora

- c) Chaves blindadas, marca Switchmaster, três polos, 30 A e 250 V.
- d) Transformador, marca Anel, tipo TR T 1-10, nº 1917
Regm. - Cont.

	Entrada	saída
V. LIG.	330 λ	110 λ
KVA	10	10
A	16	52,5
Hz	60	60
Fases	3	3

A figura 2 ilustra este quadro geral.

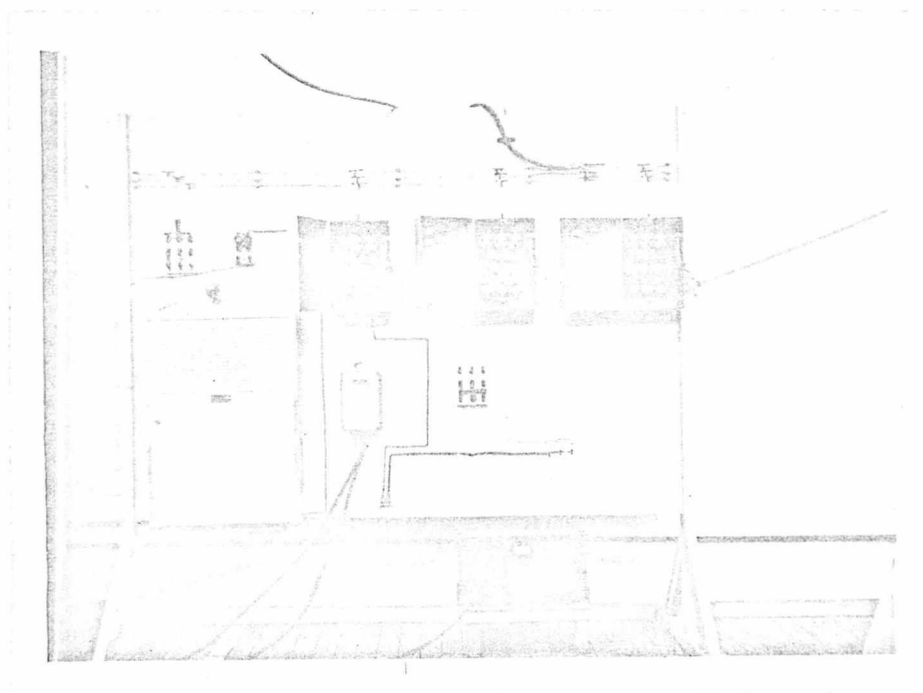


Figura 02 - Quadro elétrico geral.

1.4 - Equipamentos auxiliares.

1.4.1 - Quadro de comando.

As operações inerentes ao conjunto motor eletrodinamô

metro são comandadas através do quadro de comando, composto dos seguintes dispositivos:

- a) 8 lâmpadas, 40 W, 220 V (4 verdes e 4 vermelhas)
- b) 4 chaves-faca, 3 polos
- c) 2 voltímetros, marca HB, um para tensão de partida (0-400 V), e outro para tensão gerada (0-400 V)
- d) 1 amperímetro, marca HB, 0-60 A, para corrente gerada.
- e) 1 amperímetro, marca Engro, 0-100 A, para a corrente de partida.
- f) 4 contadores
- g) 1 chave disjuntora, com ligação ao quadro geral.

A figura 3 ilustra esta montagem.

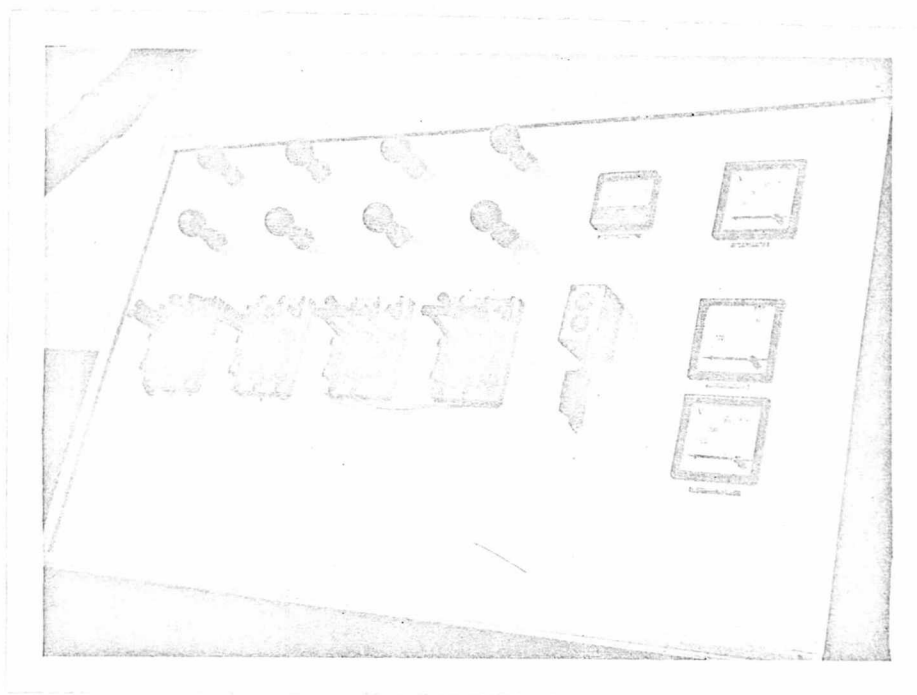


Figura 03 - Quadro de comando.

1.4.2 - Medidores auxiliares.

Uma série de medidores auxiliares se prestam a medida de grandezas igualmente necessárias à formulação dos testes, bem como ao controle de funcionamento do motor. Uma mesa auxiliar mantém instalados estes aparelhos, enumerados a seguir:

- a) Medidor de rotações, marca HB, 0-4000 rpm
- b) Termômetro para temperatura dos gases de descarga, marca HB, 20-800°C
- c) Termômetro para a temperatura de entrada da água de refrigeração, marca Motoco, 0-120°C
- d) Termômetro para a temperatura de saída da água de refrigeração, marca Motoco, 0-120°C

Para controlar as condições ambientes, dispõe-se dos seguintes aparelhos:

- a) Termômetro de temperatura ambiente, marca Wilh Lambrecht
- b) Barômetro, marca Fischer.
- c) Higrômetro, marca Fischer.

Além destes aparelhos, foram construídos sistemas de refrigeração para o motor, com possibilidade de medir-se a vazão de água de refrigeração, bem como uma instalação de refrigeração dos transdutores piezoelétricos, com vazão de 9 l/h, com água destilada.

Para medir-se o consumo de combustível, utilizou-se uma bureta, com capacidade de 200 ml, alimentando diretamente o motor e um cronômetro, para determinar-se o tempo de medição.

As figuras 4, 5 e 6 ilustram estes acessórios.

1.5 - Transdutores Piezoelétricos.

O transdutor piezoelétrico converte a quantidade mecânica numa quantidade elétrica. Esse consiste essencialmente de duas partes: uma parte mecânica, a qual liga ao objeto em teste, recolhe a quantidade mecânica e a transfere para outra parte do transdutor, o piezo-elemento⁵.

Alguns transdutores são designados como diretos ou tipo ativo. Esta categoria inclui os transdutores piezoelétricos, os transdutores dinâmicos, etc., que produzem uma voltagem, utilizando o princípio dínamo-elétrico. Em outros, a resistência, impedância ou capacitância são modificadas utilizando uma inter-relação física direta ou ação mecânica. Esta classe de transdutores é denominada indireta ou passiva. Fazem parte deste últi-

mo conjunto os extensômetros, os transdutores indutivos e os transdutores capacitivos.

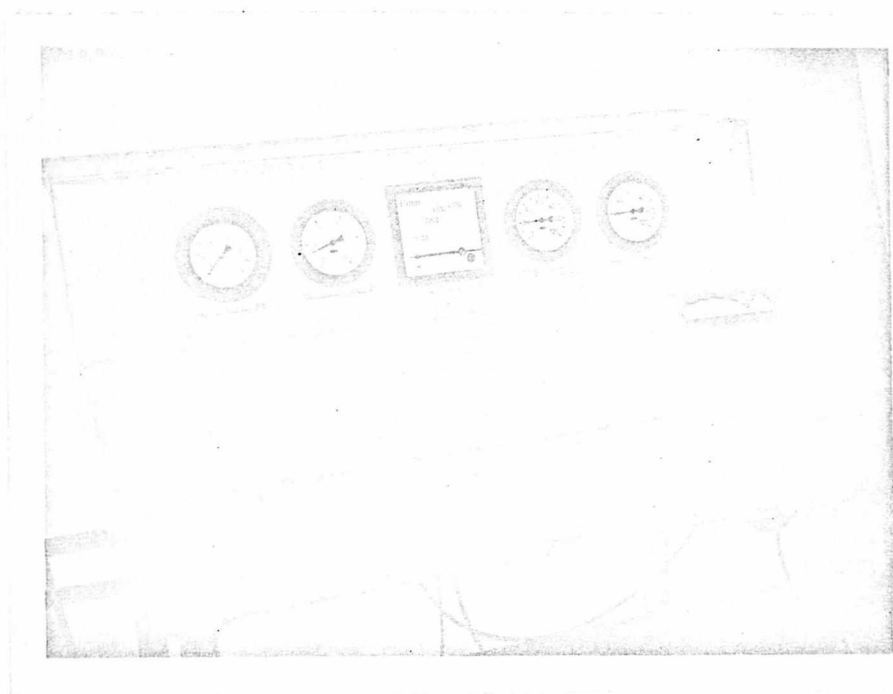


Figura 04 - Painel de medidores auxiliares.

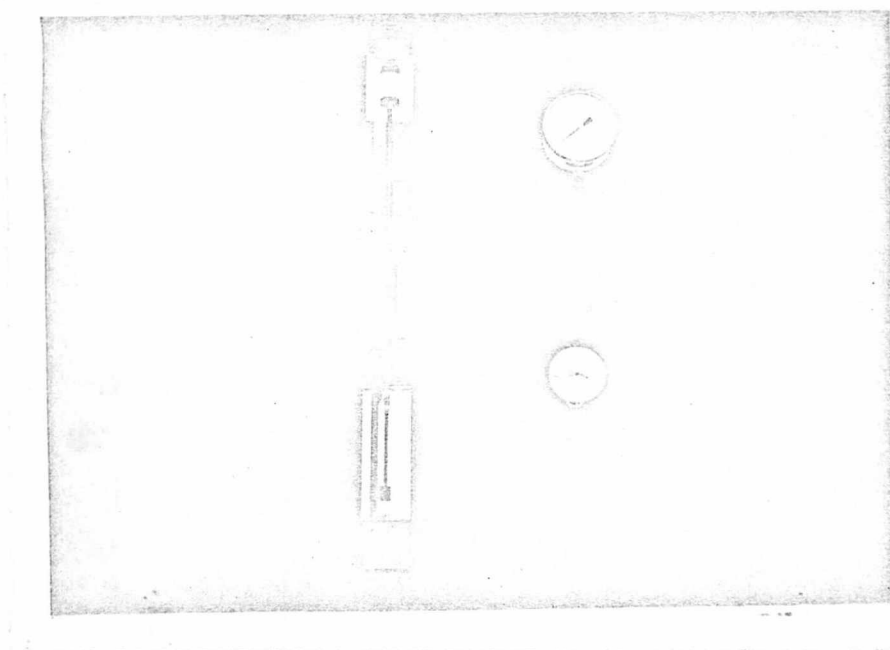


Figura 05 - Medidores de condição ambiente.

onde: ρ_e = Polarização elétrica (Efeito piezoelétrico).

L = Indutância ou variação da indutância

K = Fator de indutância

$d\phi/dt$ = variação do fluxo magnético

C = Capacitância ou variação da capacitância

dQ/dt = carga capacitiva ou descarga

ϕ_L = Fluxo luminoso

R = Resistência ou variação da resistência

E_{th} = Voltagem termo-elétrica.

A seleção do tipo de transdutor piezoelétrico, prendeu-se às suas características. Desta forma, selecionou-se os seguintes transdutores:

TIPO	PDH 5/18-2	PD 100/14-1
Grandeza de medição	pressão	pressão
Campo de variação	0 - 5 atm	0 - 100 atm
Sensibilidade	$\geq 2500 \cdot 10^{-12}$ As/atm	$\geq 13,5 \cdot 10^{-12}$ As/atm
Frequência	≥ 8 kcs	≥ 35 kcs
Faltas de linearidade	Utilizando 0 - 50% do campo de varia- ção	Utilizando 0 - 100% do campo de varia- ção
PD 100/14-1	$\geq 1,5\%$	$\geq 3\%$
PDH 5/18-2	$\geq 2,5\%$	$\geq 5\%$

A figura 7 ilustra estes dois tipos de transdutores piezoelétricos.

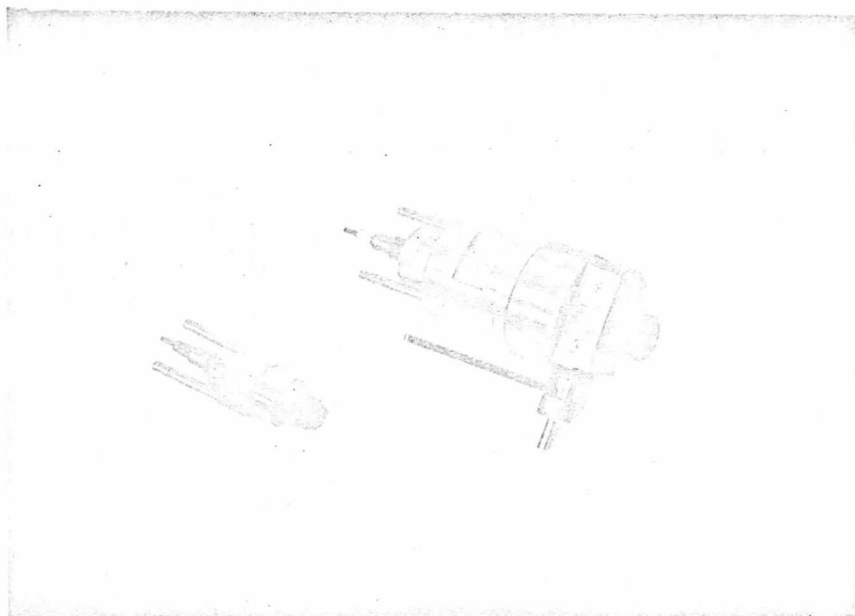


Figura 07 - Transdutores Piezoelétricos.

CAPÍTULO 2

MONTAGEM E UTILIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO DE TESTE

2.1 - O motor em teste.

A montagem de todos estes equipamentos tem seu objetivo testar motores de combustão interna, de pequeno porte. Utilizou-se para este trabalho um motor Stoll de 5,5 CV de potência de placa, a dois tempos, ignição por bateria, 79 mm de diâmetro e 76 mm de curso, fabricado por Stoll Irmãos, Fábrica de Motores, Joinville (SC). (Veja-se figura 8).

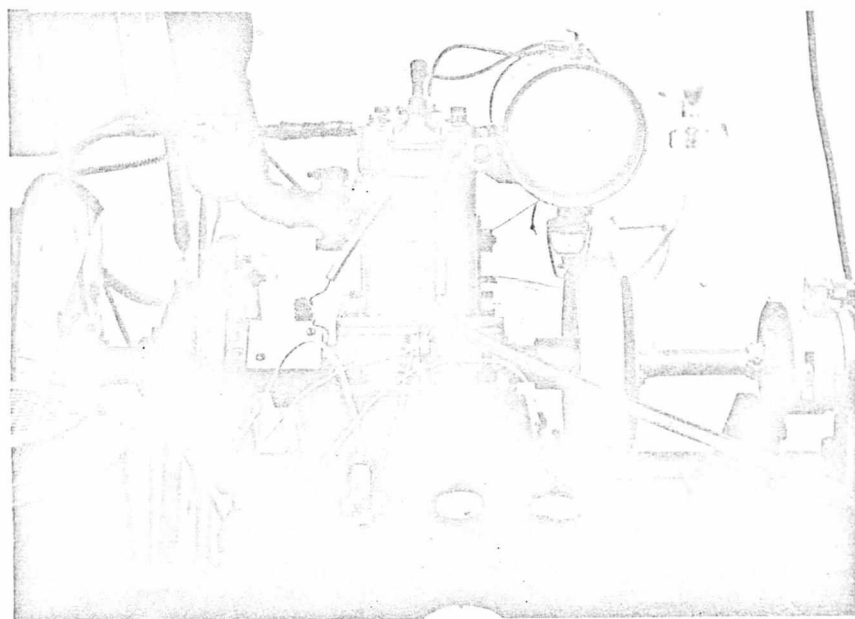


Figura 08 - Motor Stoll, 2 T, 5,5 CV

2.2 - Instalação dos transdutores.

Para medir a variação de pressão do interior da câmara de combustão, instalou-se no cabeçote do motor, o transdutor piezoelétrico PD 100/14-1. Esta montagem pode ser observada na figura 9.

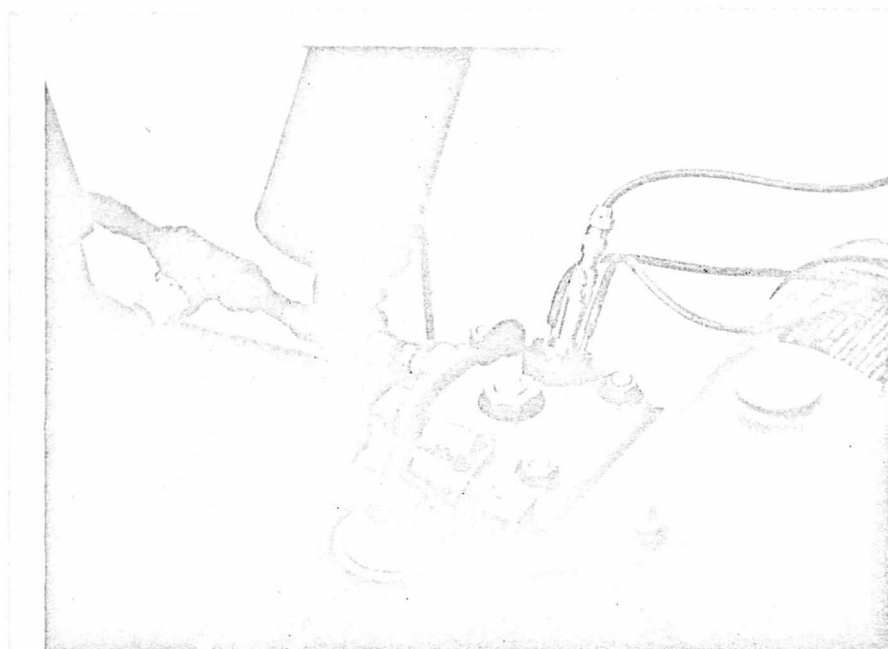


Figura 09 - Instalação do PD 100/14-1

Para medir a variação de pressão no carter, a título de ilustração, instalou-se nele o transdutor piezoelétrico PDH 5/18-2. Esta montagem pode ser observada na figura 10.

As quantidades mecânicas, transformadas em elétricas, produzidas, são levadas ao aparelho central através de ligações independentes, tomando-se o sinal do transdutor e ligando-o ao estágio eletrométrico (figura 11), por meio de um cabo blindado de 80 cm de comprimento. A saída deste amplificador está conectada ao aparelho central por intermédio de um cabo blindado de 15 m de comprimento.

2.3 - Instalação do Gerador de X.

O Gerador de X compõe-se de duas unidades principais, a saber: o modulador e o estágio eletrométrico.

A ligação do modulador se faz diretamente ao eixo do motor, através de um acoplamento elástico. Existe porém necessidade de rigidez nas conexões de um e outro lado para evitar



Figura 10 - Instalação do PDH 5/18-2.

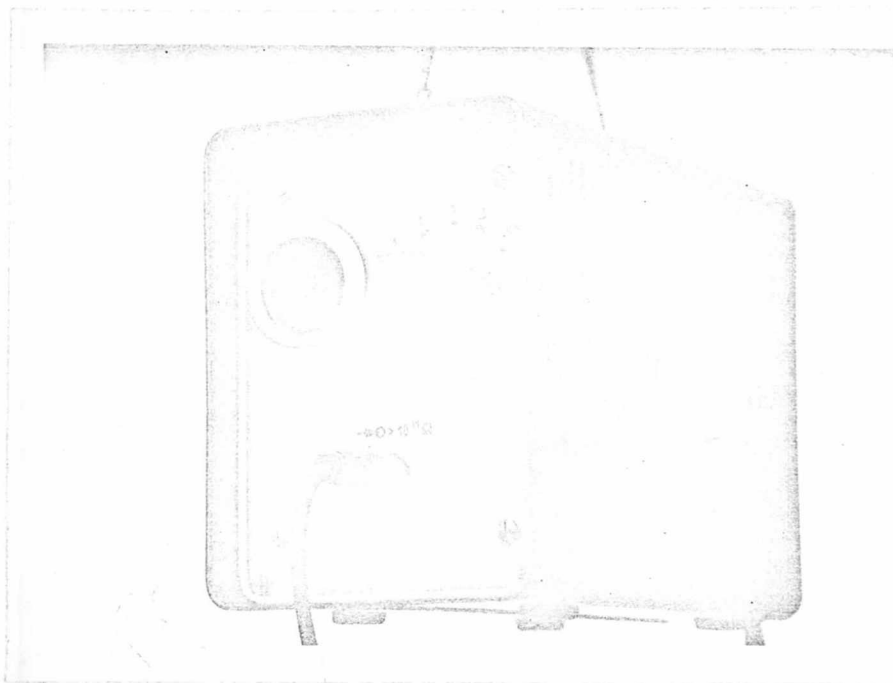


Figura 11 - Estágio eletrométrico

possíveis deslizamentos. (veja-se Apêndice 1). No modulador
transforma-se o movimento alternativo do motor num sinal elétri

co proporcional ao seu curso, ou ao ângulo de giro, também num sinal elétrico correspondente, e através de três cabos blindados de 0,80 m de comprimento, leva-se este sinal ao amplificador modulador cuja saída está conectada à unidade central, através de um cabo blindado de 15 m de comprimento. A ligação deste cabo à unidade central pode ser feita em qualquer uma das entradas X_1 ou X_2 , uma vez que esta unidade transfere a ambos os canais, o mesmo sinal de X , situação que não ocorre nas entradas de Y_1 ou Y_2 . O modulador pode ser apreciado na figura 12, enquanto que o amplificador modulador na figura 13.



Figura 12 - Modulador

2.4 - Diagrama em bloco do PM-1.

Após a montagem destes acessórios, o diagrama em bloco (figura 14) desta instalação permite visualizar o conjunto instalado, onde se encontra a unidade central de duplo feixe, os acessórios e o motor em estudo.

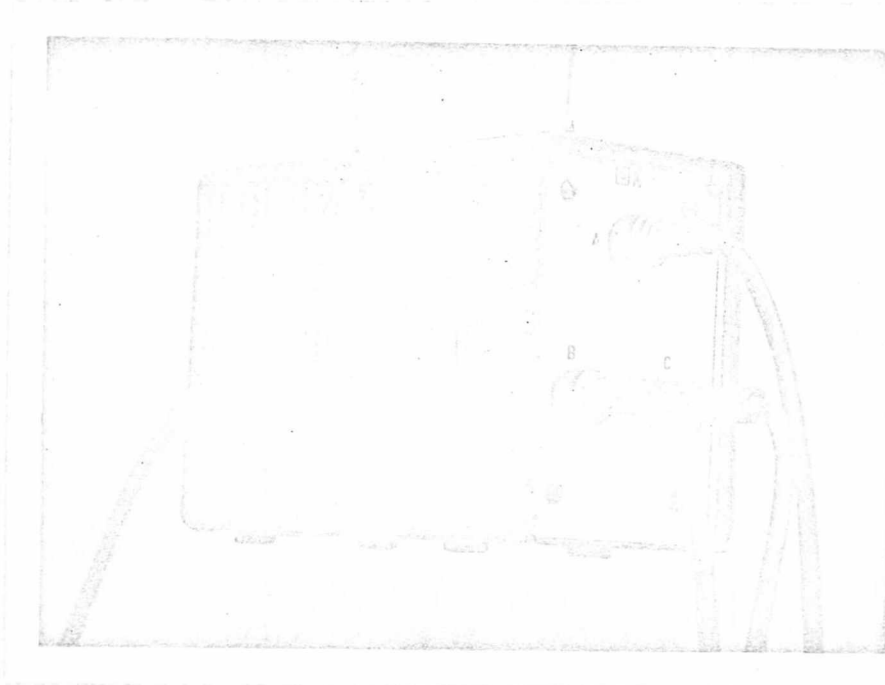


Figura 13 - Amplificador modulador.

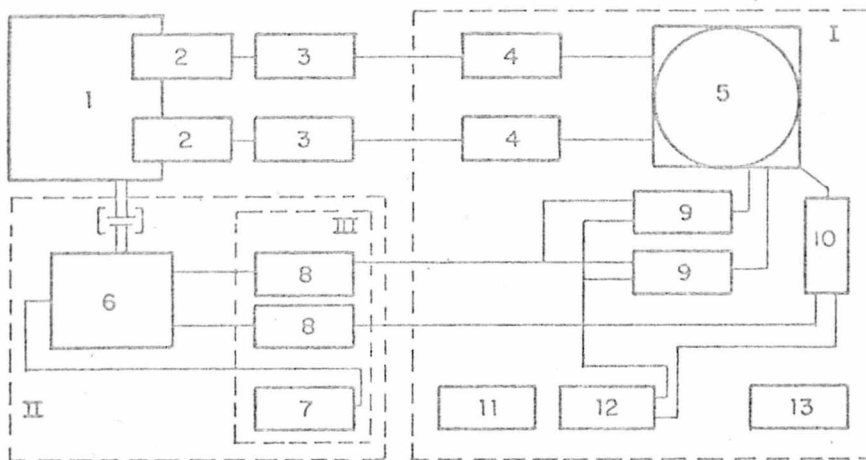


Figura 14 - Diagrama em bloco do PM-1

onde: I - Aparelho visual de dois canais

II - Gerador de X

III - Amplificador modulador

- 1 - Objeto a medir
- 2 - Transdutor piezoelétrico
- 3 - Estágio eletrométrico
- 4 - Amplificador Y
- 5 - Parte visual
- 6 - Modulador
- 7 - Oscilador
- 8 - Demodulador
- 9 - Amplificador X
- 10 - Amplificador Z
- 11 - Gerador de tensão de ensaio
- 12 - Tomada de energia.

2.5 - Ligação motor-eletrodinamômetro.

A fim de evitar prováveis desajustes entre a ligação do motor com o eletrodinamômetro, dado as vibrações excessivas a que este se submete, e para que a desnivelação não trouxesse maiores problemas, optou-se por um acoplamento bastante elástico. Este detalhe pode ser observado na figura 15.

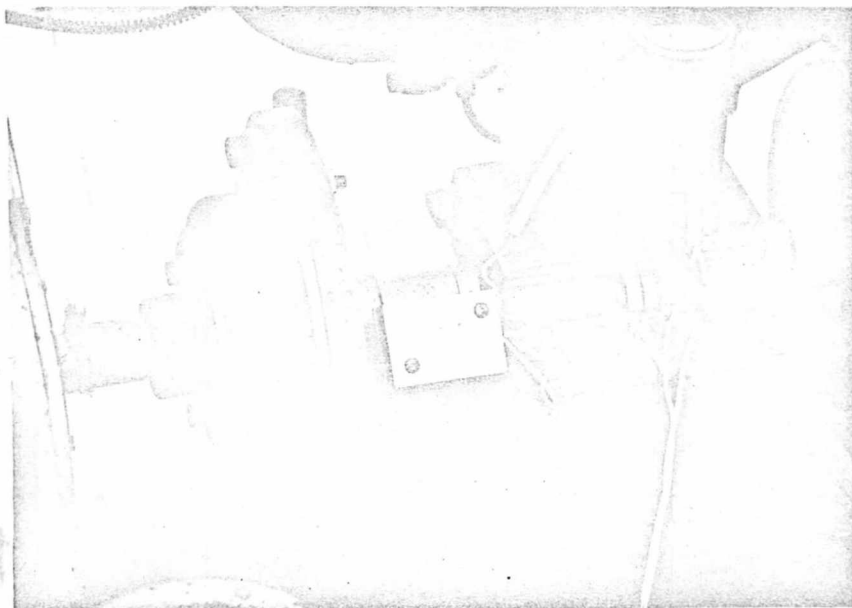


Figura 15 - Acoplamento motor-eletrodinamômetro.

2.6 - Eletrodinamômetro e suas ligações.

Como já se disse, o eletrodinamômetro pode funcionar como motor ou como gerador. No caso de funcionar como motor, recebe corrente contínua do quadro elétrico geral, fornecida a partir da rede externa através de uma bateria de retificadores. Através do variador de tensão, pode-se variar a energia fornecida ao motor para acionar o motor alternativo. Utilizando-se um amperímetro e um voltímetro, já cotados no capítulo anterior, pode-se medir tanto a corrente como a tensão de partida, haja vista estarem estes instrumentos em ligação com o em ora, motor elétrico.

Caço o eletrodinamômetro passe a funcionar como gerador, este passa a ceder energia à resistência elétrica de dissipação de carga. Liga-se a este conjunto, igualmente, um amperímetro e um voltímetro capazes de medir tanto a corrente como a tensão geradas.

2.7 - Ligações hidráulicas.

Para atender as condições de refrigeração do motor, instalou-se, a partir da rede de água interna do Centro Tecnológico uma ligação capaz de fornecer água, cuja vazão pode-se variar, variando-se a abertura do registro de interligação.

Estas junções foram realizadas, utilizando-se mangueiras plásticas de 1/2". Nas proximidades da entrada, e da saída destas ao motor, ligou-se os bulbos dos termômetros, necessários à medição das temperaturas de entrada e saída da água de refrigeração.

Após sair do motor, o fluido refrigerante é coletado numa caixa graduada, com capacidade para vinte litros, onde, com a ajuda de um cronômetro, pode-se avaliar a sua vazão. A descrição deste processo indica um sistema de refrigeração por consumo contínuo de água.

O sistema de refrigeração dos transdutores está constituído de dois tanques de plástico, com 5 litros de capacidade, colocados em desnível, desnível este capaz de provocar uma va-

ção horária de 9 litros. O tanque superior se liga aos transdutores por meio de mangueiras que conduzem água destilada, retornando, após passar por estes, ao tanque inferior.

2.8 - Consumo de combustível.

O medidor do consumo de combustível foi instalado entre o tanque de combustível e o carburador. No medidor, dispõe-se de uma válvula de três vias, capaz de permitir uma ligação direta do tanque com o carburador ou então, permitir alimentar o combustível ao motor através do depósito de 200 ml de que dispõe o medidor. Com a utilização de um cronômetro, torna-se fácil registrar o consumo específico do motor, verificado quando da liberação de uma determinada potência. A figura 16 ilustra esta montagem.

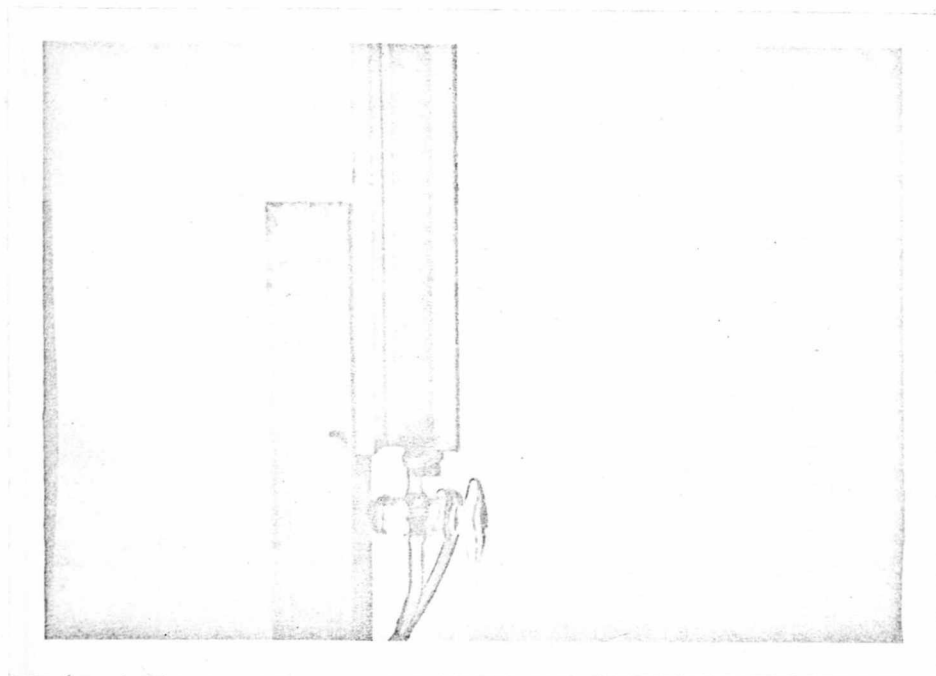


Figura 16 - Medidor de consumo de combustível.

2.9 - Termômetro da temperatura de descarga.

A fim de obter o valor da temperatura dos gases de descarga, instalou-se, junto ao coletor de descarga do motor e próximo à janela de descarga o bulbo captador do sinal correspondente à temperatura de descarga. Esta montagem pode ser observada na figura 17.

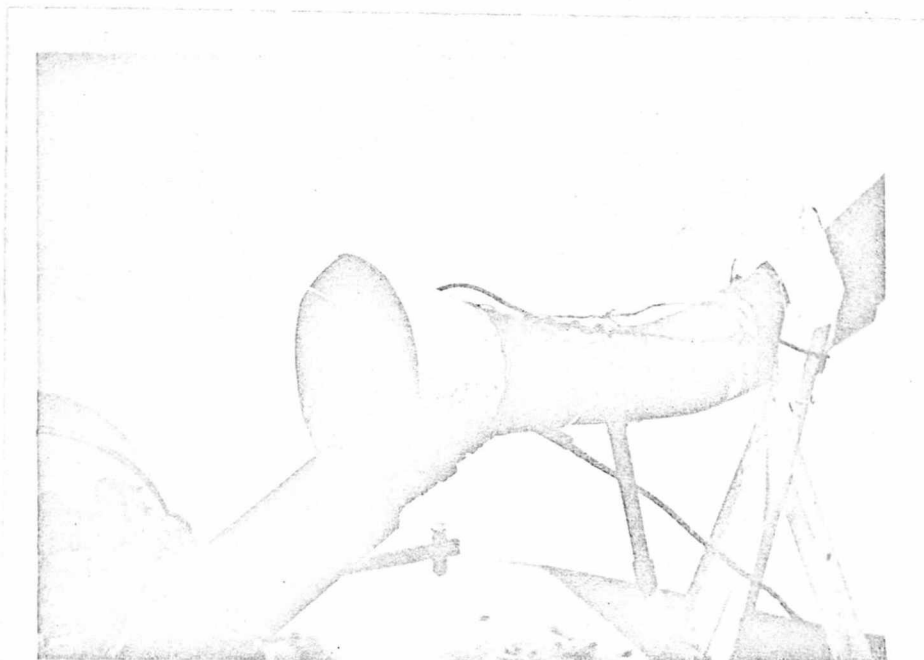


Figura 17 - Instalação do termômetro de temperatura de descarga.

2.10 - Medidor de rotações.

O eletrodinamômetro dispõe, acoplado a seu eixo, em ligação direta com o motor, de um gerador taquimétrico, capaz de retirar o sinal de rotações e levá-lo ao mostrador correspondente. O resultado a apreciar aparece em rotações por minuto. A aferição deste dispositivo encontra-se no Apêndice 1.

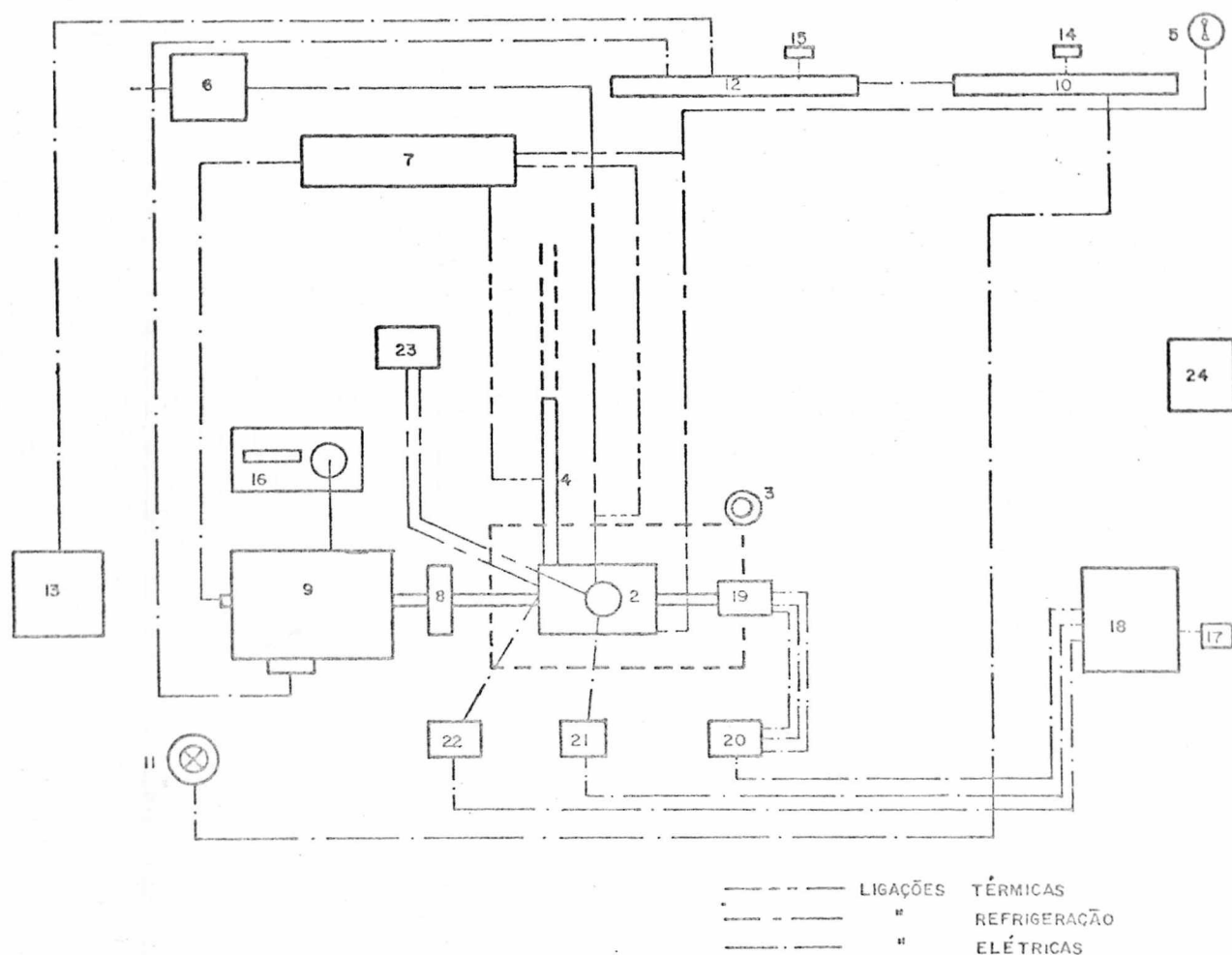


Figura 18 - Diagrama em bloco geral da instalação.

1 - base para o motor; 2 - Motor Stoll; 3 - Medidor de consumo de combustível; 4 - Conduto de saída dos gases; 5 - Tomada de água para refrigeração; 6 - Caixa medidora da vazão de água; 7 - Mesa de controle; 8 - Acoplamento; 9 - Eletrodinamômetro; 10 - Quadro elétrico; 11 - Variador de tensão; 12 - Quadro de comando; 13 - Resistência; 14 - Tomada de força (380 V); 15 - Tomada de força (220 V); 16 - Balança; 17 - Ligação PM-1; 18 - PM-1; 19 - Modulador; 20 - Amplificador modulador; 21 - Estágio eletrométrico; 22 - Estágio eletrométrico; 23 - Sistema de refrigeração dos transdutores; 24 - Controle das condições ambientes.

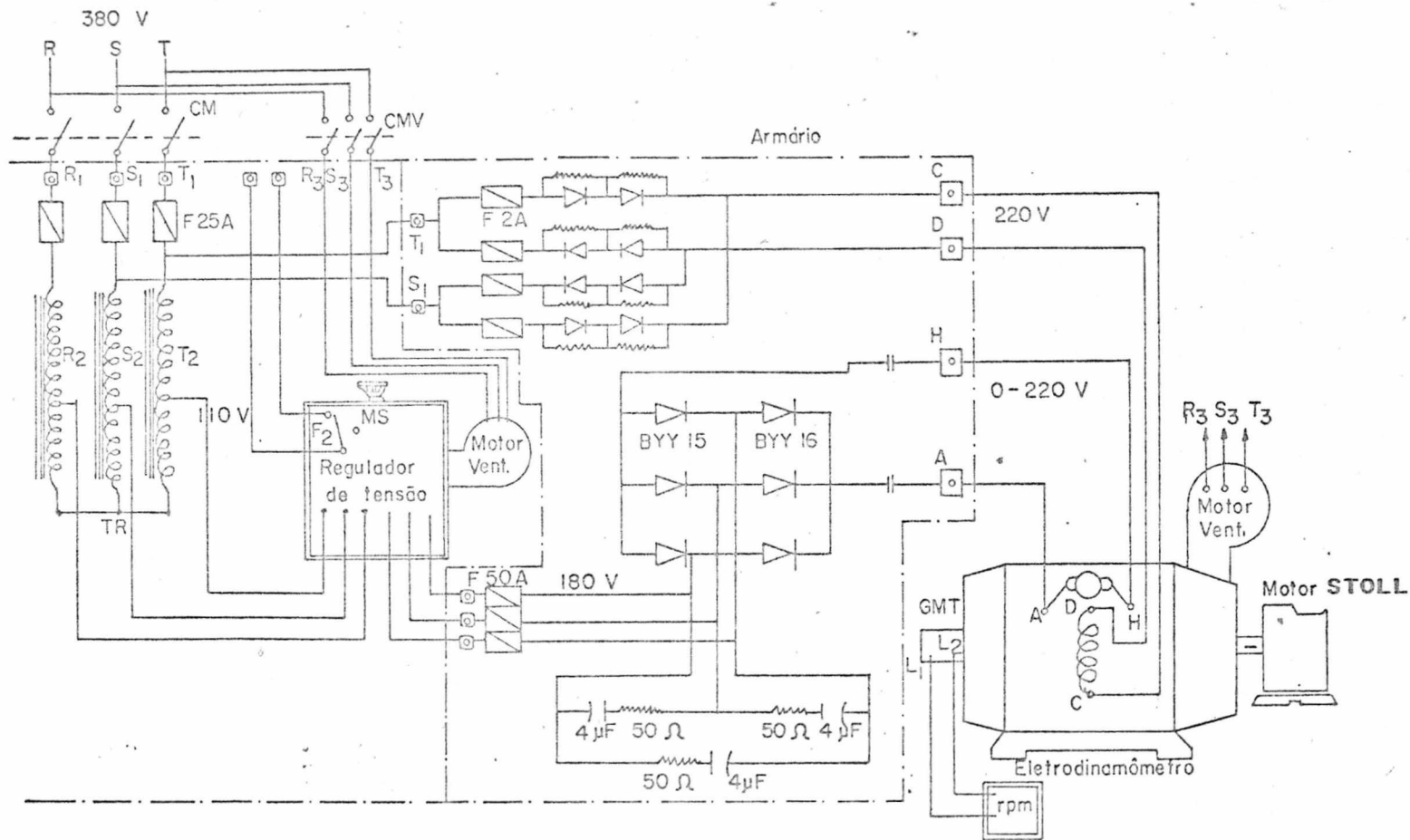
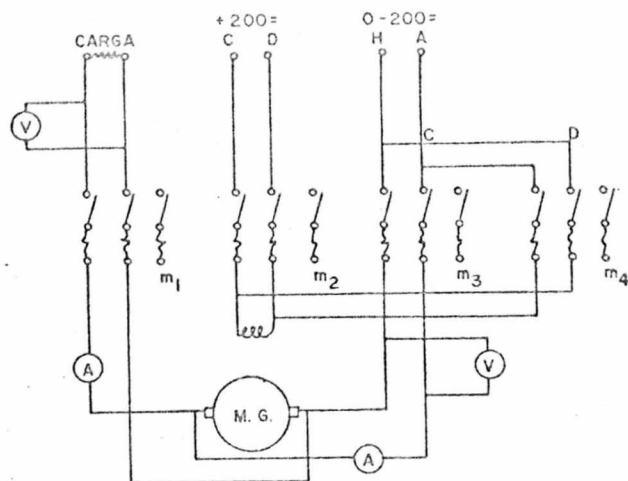


Figura 19 - Sistema de alimentação de C.C. para o eletrodinamômetro.



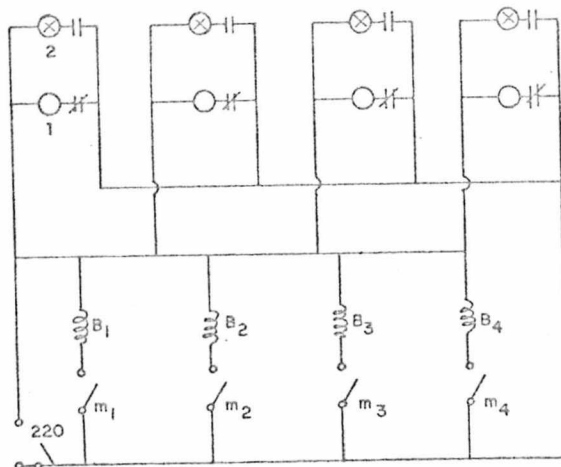
Partida como motor de corrente contínua

B - campo
C - armadura

Como gerador

A - chave de carga
B - alimentação do campo

Figura 20 - Ligação: motor de corrente contínua/gerador



Ligação 1, chave desligada (lâmpada vermelha)
Ligação 2, chave ligada (lâmpada verde)

Obs.: As bobinas B_1, B_2, B_3, B_4 correspondem as bobinas dos contactores manobrados pelo contactor m_1, m_2, m_3 e m_4 das chaves de comando A, B, C e D, cujos contatos acionados são:

Posição 1 - chave magnética desligada
Posição 2 - chave magnética ligada

Figura 21 - Lâmpadas indicadoras de posições das chaves

2.11 - Diagrama em bloco geral e circuito elétrico.

As figuras 18, 19, 20 e 21 ilustram o diagrama em bloco geral da instalação bem como os circuitos elétricos necessários ao funcionamento deste conjunto.

Uma vista geral da instalação pode ser vista na figura 22.

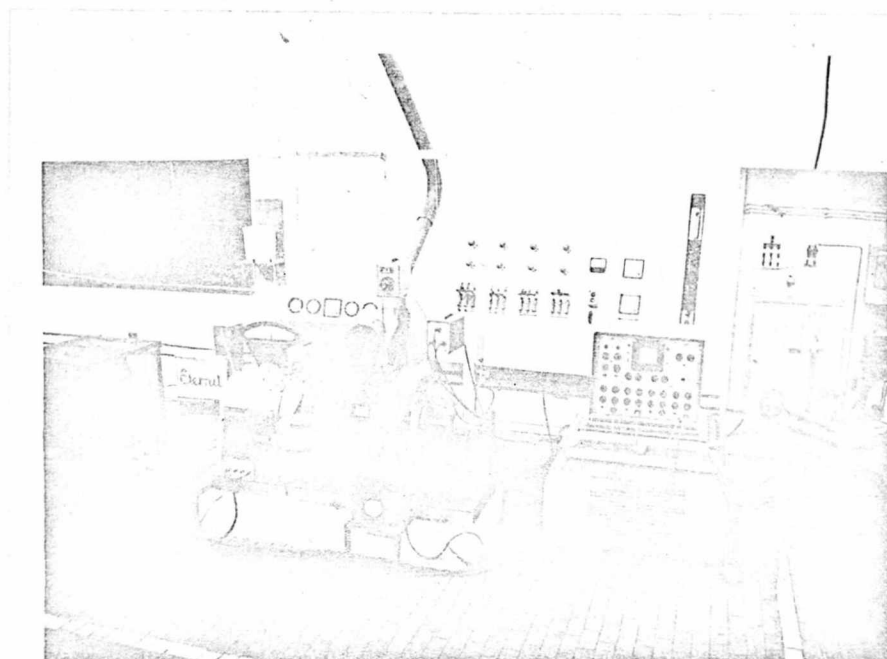


Figura 22 - Vista geral da instalação.

2.12 - Utilização do equipamento.

A montagem desta instalação permite uma série de experiências capazes de analisar uma gama variada de problemas inerentes ao motor. A título de ilustração sugere-se, para trabalhos futuros, as seguintes experiências.

2.12.1 - Otimização do ponto de ignição.

A cada rotação de funcionamento do motor, para obter-se um rendimento máximo do ciclo correspondente, torna-se neces

sário definir com exatidão o ponto ótimo de avanço da ignição.

Utilizando-se diagramas abertos de pressão, proporcionais ao ângulo de giro do virabrequim, pode-se determinar qual a melhor situação de funcionamento.

Este aspecto pode ser observado nas figuras 23 e 24.



Figura 23 - Diagrama aberto, de pressão - faísca avançada.



Figura 24 - Diagrama aberto, de pressão - faísca atrasada.

Em ambos os casos fixou-se a rotação do motor em 1700 rpm. Na primeira situação, observa-se que o ponto de ignição provocou o salto da faísca com excessivo avanço, enquanto que na segunda se faz com excessivo atraso. A variação das condições de pressão máxima, além das de maximização do diagrama pV, permite definir, a cada rotação de um ponto ótimo de funcionamento. A curva resultante desta experiência se prestaria como curva de resposta de um regulador que devesse atender às exigências deste motor.

2.12.2 - Detonação e suas variáveis.

Da mesma forma que a experiência anterior, poder-se-ia agora, estudar quais os fatores que influenciam no problema da detonação. Possível seria alterar as características do motor, combustível e alimentação, resultando assim num trabalho interessante deste tão discutido problema.

2.12.3 - Balanço térmico.

Sabendo-se o consumo de combustível, medindo-se a quantidade de ar admitido, conhecida a vazão de água de refrigeração e a correspondente diferença de temperatura entre a saída e a entrada, e ainda mais, conhecida a temperatura dos gases de escape e uma análise destes, torna-se também possível realizar um balanço térmico do motor em estudo, com possibilidade de definir as perdas mecânicas do motor.

2.12.4 - Localização de anomalias no ciclo.

A interpretação dos diagramas pV, tanto da câmara, como do carter, podem levar a conclusões quanto a existência de anomalias no interior da máquina. Existe, com a utilização do PM-1, a possibilidade de, uma vez interpretado o diagrama, localizar a posição em que se encontra a anomalia e verificar no projeto do motor em que situação ela se encontra. Isto é possível uma vez que pode-se interromper a curva no ponto onde está se

verificando o problema, e junto ao modulador do gerador de X, ler-se-á diretamente em graus, com relação a uma referência dada, a posição exata do provável defeito.

As figuras 25 e 26 ilustram tal situação.

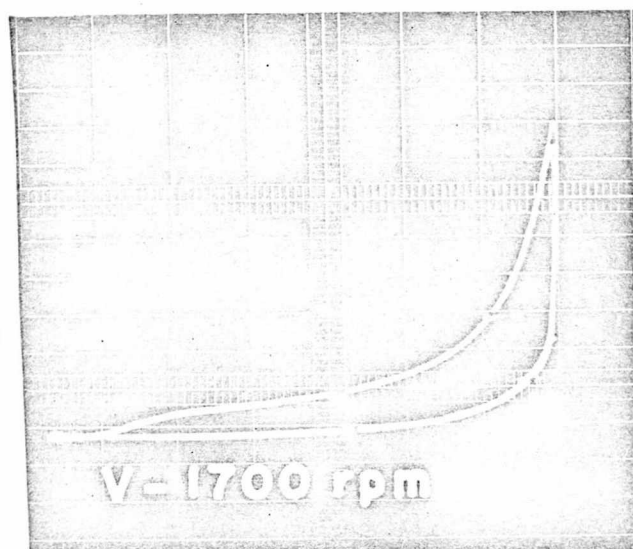


Figura 25 - Localização de provável defeito através do diagrama pV, da câmara de combustão.

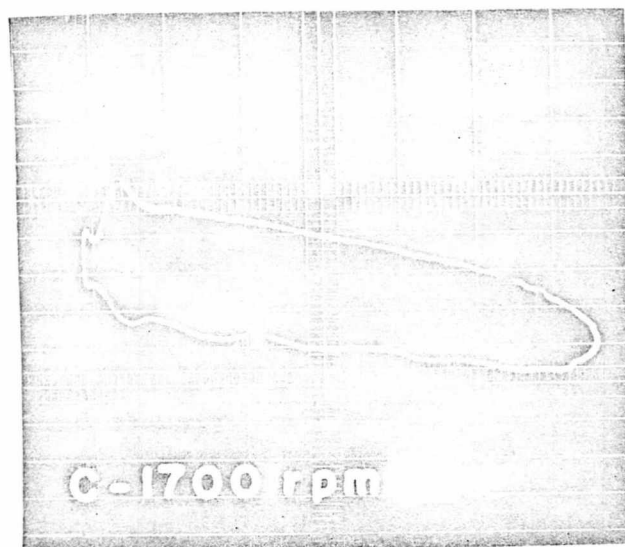


Figura 26 - Localização de provável defeito através do diagrama pV, do carter.

2.12.5 - Refrigeração e suas variáveis.

O processo de refrigeração exerce enorme influência sobre o funcionamento do motor. O estudo de suas variáveis e a variação das mesmas levará a conclusões sobre a forma de otimizar a refrigeração com relação ao melhor desempenho do motor. Isto torna-se possível, uma vez que, possibilitando-se a variação da vazão de água de refrigeração e conhecidos os materiais que trocam calor com o ambiente, será possível determinar, as condições ideais de funcionamento e otimizar o projeto deste sistema.

CAPÍTULO 3

RENDIMENTO MECÂNICO DE MOTORES A 2T

3.1 - Processos de cálculo de rendimento mecânico.

A fim de se obter a curva de rendimento mecânico, dois processos fundamentais podem ser utilizados. Existem obviamente algumas variações, porém basicamente são os seguintes: cálculo do rendimento mecânico a partir da potência passiva e cálculo do rendimento mecânico a partir da potência indicada.

3.2 - Cálculo do rendimento mecânico a partir da potência passiva.

A expressão genérica do rendimento mecânico a partir da potência passiva, é da forma

$$\eta_m = N_e / (N_e + N_p) \quad (1)$$

3.2.1 - Curva da potência efetiva.

A curva da potência efetiva foi obtida, a partir do eletrodinamômetro, obtendo-se, inicialmente a curva de torque. Para tanto o motor foi regulado para as melhores condições de funcionamento com relação a carburação e ignição, uma vez que neste motor estes dois sistemas são controlados manualmente. A fim de se obter um resultado estável dos valores, fez-se medições, a cada rotação em intervalos de tempo a 0, 1, 2, 4 3 8 minutos e o valor final correspondeu a média destes valores.

Com estes valores (tabela 2), medidos em intervalos de 100 rpm, a partir de 1000 até 2100 rpm, pode-se executar, com a utilização do computador IBM 1130, deste Centro, um programa de ajustamento de curvas, através do método dos mínimos quadrados⁶, com a finalidade de fornecer os coeficientes de uma equa-

ção de segundo grau, que satisfizesse as condições do problema físico. O resultado final desta operação foi o seguinte:

$$M_t = 0,05688 + 3,19574n - 1,10665n^2$$

onde $n = \text{rpm}/1000$.

n	Mt	n	Mt	n	Mt
1000	2,105	1400	2,386	1800	2,163
1100	-	1500	2,374	1900	2,118
1200	2,337	1600	2,351	2000	2,028
1300	2,335	1700	2,261	2100	1,925

TABELA 2 - Média dos valores medidos à curva de torque.

De posse deste resultado, obteve-se o valor máximo do torque, por maximização da função, que foi de 2,364 kgm a 1444 rpm.

Os valores ajustados aparecem na tabela 3, enquanto que a curva correspondente pode ser observada na figura 27.

n	Mt	n	Mt	n	Mt
1000	2,145	1400	2,361	1800	2,223
1100	2,233	1500	2,360	1900	2,133
1200	2,298	1600	2,337	2000	2,021
1300	2,341	1700	2,291	2100	1,887

TABELA 3 - Valores ajustados à curva de torque.

Conhecidos os valores do torque, obtêm-se a potência efetiva, através da relação⁷,

$$N_e = M_t n / 716,2 \quad (2)$$

O máximo da função verifica-se para $n = 1933$ rpm com $N_e = 5,666$ CV.

A tabela 4 apresenta os valores da potência efetiva, utilizados para o traçado da curva de potência efetiva, apresen

tada na figura 28.

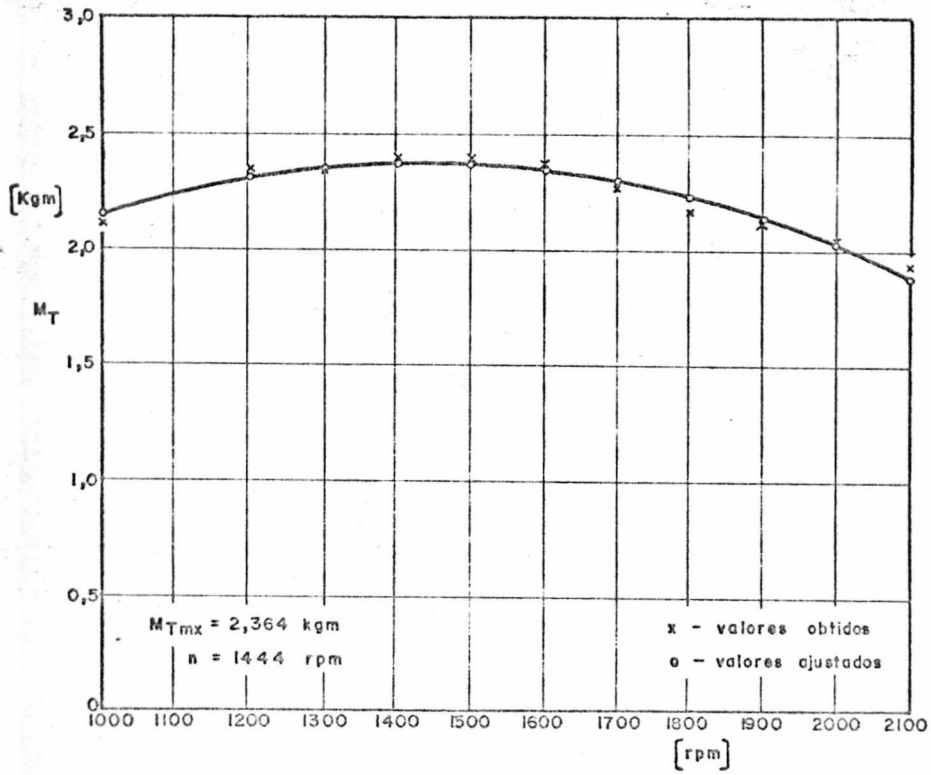


Figura 27 - Curva de torque

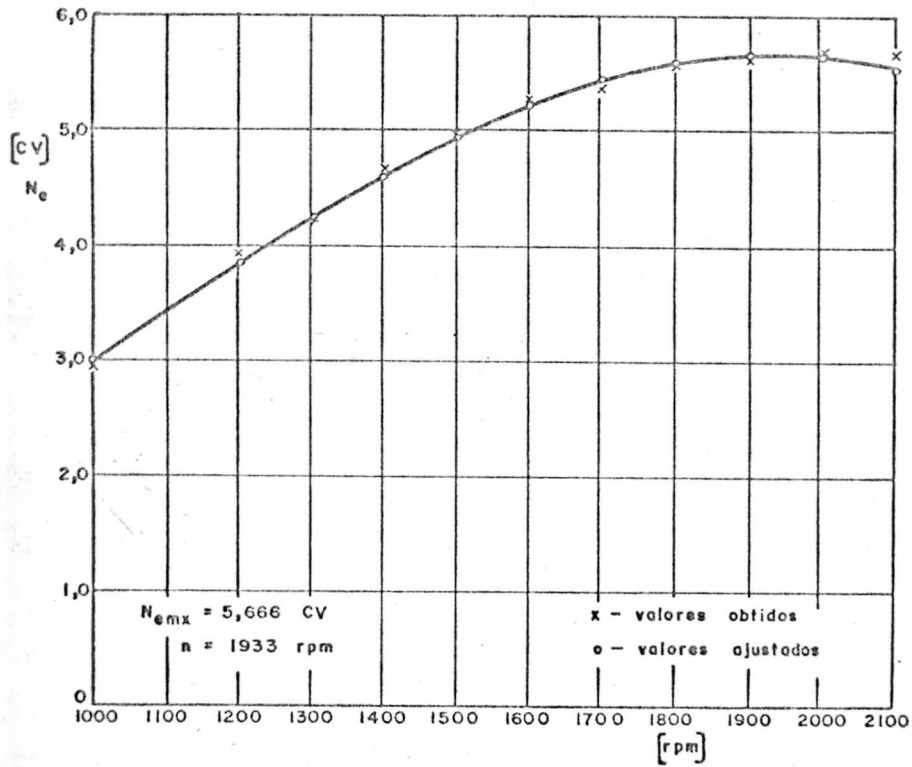


Figura 28 - Curva de potência efetiva

n	N _e	n	N _e	n	N _e
1000	2,994	1400	4,615	1800	5,587
1100	3,430	1500	4,942	1900	5,657
1200	3,850	1600	5,220	2000	5,644
1300	4,249	1700	5,438	2100	5,533

TABELA 4 - Valores da potência efetiva.

A tabela 5 fornece os valores da potência efetiva, calculados a partir da equação (2) onde os valores do torque são os medidos.

n	N _e	n	N _e
1000	2,9391	1600	5,2521
1100	-	1700	5,3667
1200	3,9156	1800	5,4361
1300	4,2383	1900	5,6188
1400	4,6640	2000	5,6632
1500	4,9720	2100	5,6443

TABELA 5 - Valores medidos da potência efetiva.

3.2.2 - Medida da potência passiva.

Utilizando o eletrodinamômetro como motor, pode-se acionar o motor de combustão a qualquer rotação, e medir, a cada rotação, os valores da tensão de alimentação e da corrente de acionamento. Conhecido o rendimento do motor (83%), pode-se calcular a potência passiva a cada rotação, pela expressão

$$N_p = 1,36 \cdot 0,83 V I / 1000 \quad (\text{CV}) \quad (3)$$

Estes valores, medidos a cada 100 rpm, a partir de 1000 até 2100 rpm, encontram-se na tabela 6. De posse destes resultados e utilizando o mesmo programa do processamento anterior, obteve-se a tabela de valores ajustados nº 7 e a correspondente curva que aparece na figura 29.

n	N_p	n	N_p	n	N_p
1000	0,438	1400	0,650	1800	0,978
1100	0,511	1500	0,685	1900	1,088
1200	0,585	1600	0,718	2000	1,109
1300	0,605	1700	0,853	2100	1,240

TABELA 6 - Valores medidos da potência passiva.

n	N_p	n	N_p	n	N_p
1000	0,467	1400	0,646	1800	0,944
1100	0,500	1500	0,709	1900	1,037
1200	0,541	1600	0,780	2000	1,137
1300	0,590	1700	0,858	2100	1,245

TABELA 7 - Valores ajustados à curva de potência passiva.

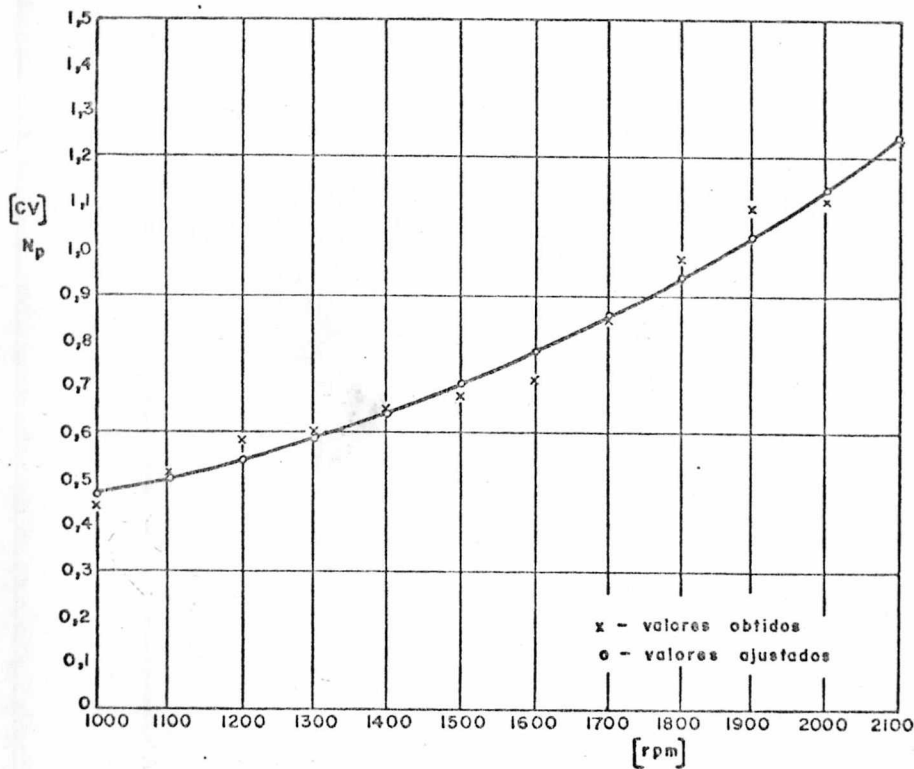


Figura 29 - Curva de potência passiva.

A expressão ajustada da potência passiva, através dos coeficientes fornecidos pelo computador foi a seguinte:

$$N_p = 0,53925 - 0,44308n + 0,37112n^2$$

onde $n = \text{rpm}/1000$

Teve-se o cuidado de a cada medição manter o motor em funcionamento, a fim de que se obtivesse condições de temperatura as mais próximas daquelas que se obteria com o motor sob carga.

3.2.3 - Curva de rendimento mecânico.

De posse dos valores de N_e e N_p , torna-se simples calcular os pontos que definem a curva de rendimento mecânico através da expressão (1). Os valores assim calculados encontram-se à tabela 8 e a curva correspondente, na figura 30.

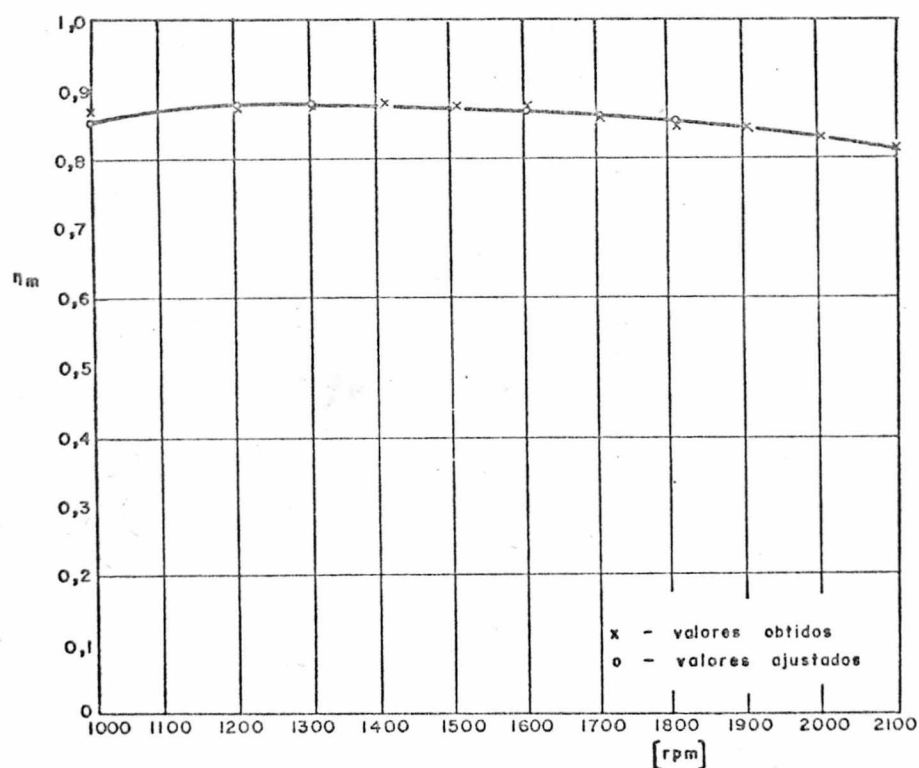


Figura 30 - Curva de rendimento mecânico, através da potência passiva

n	η_m	n	η_m	n	η_m
1000	0,8506	1400	0,8772	1800	0,8555
1100	0,8728	1500	0,8745	1900	0,8451
1200	0,8768	1600	0,8700	2000	0,8323
1300	0,8781	1700	0,8637	2100	0,8163

TABELA 8 - Valores do rendimento mecânico através da potência passiva.

Utilizando ainda a expressão (1) e nela substituindo N_e e N_p por seus valores medidos, obteve-se a tabela 9, dos valores medidos do rendimento mecânico.

n	η_m	n	η_m
1000	0,8629	1600	0,8797
1100	-	1700	0,8629
1200	0,8700	1800	0,8475
1300	0,8751	1900	0,8378
1400	0,8777	2000	0,8362
1500	0,8789	2100	0,8199

TABELA 9 - Valores medidos do rendimento mecânico.

3.3 - Cálculo do rendimento mecânico a partir da potência indicada.

A expressão genérica do rendimento mecânico a partir da potência indicada, é da forma⁸.

$$\eta_m = N_e / N_i \quad (4)$$

3.3.1 - Processo de cálculo da potência indicada.

A forma geral da potência indicada para motores a 2T, de simples efeito, monocilíndrico, é

$$N_i = P_{mi} A_p L n / 60 \cdot 75 \quad (5)$$

O diâmetro do pistão do motor é de 7,89 cm e o curso é de 0,0076 m. Desta forma $A_p = \pi(7,89)^2/4 = 48,89 \text{ cm}^2$.

Substituindo na expressão (4) os valores das expressões (2) e (5), obtêm-se

$$\eta_m = 1,6900 M_t / P_{mi}$$

Os valores de M_t já se encontram apresentados na tabela 3 e o valor 1,6900 é uma constante fixada a partir das características do motor. Desta forma, só nos resta o cálculo da pressão média indicada.

3.3.2 - Cálculo da pressão média indicada.

A pressão média indicada, relativo ao ciclo indicado do motor é definida como sendo aquela que atuaria uniformemente sobre a cabeça do pistão, durante todo o ciclo de trabalho⁹.

A expressão matemática que define a pressão média indicada é dada por

$$P_{mi} = \frac{A_d (F_{ev})}{t}$$

Para se conhecer este valor, três variáveis são necessárias, a saber:

- a) área do diagrama da câmara de combustão (A_d)
- b) fator de escala vertical, relativo ao transdutor piezoelétrico, instalado no cabeçote do motor (F_{ev})
- c) comprimento do diagrama obtido (t).

O fator de escala vertical foi fixado através de uma série de processos (Apêndice 1) e adotou-se o valor final de $5,365 \text{ kg/cm}^2/\text{cm}$.

O comprimento do diagrama médio, medido a partir das fotografias obtidas é de 68,8 mm.

3.3.2.1 - Levantamento fotográfico.

Para se conhecer os valores do comprimento do diagrama acima especificado e das áreas dos mesmos, tornou-se necessário um levantamento fotográfico. Para ilustração, apresentam-se também os diagramas do carter.

Para tanto utilizou-se uma máquina fotográfica capaz de registrar estes diagramas, marca Exacta, com abertura do diafragma 11. O tempo de exposição foi de 1/8 de segundo. Fixaram-se estes valores por tentativas, a fim de obter-se o melhor resultado. Foram batidas fotografias a cada medição de teste.

As figuras 31 a 41 apresentam estes resultados.

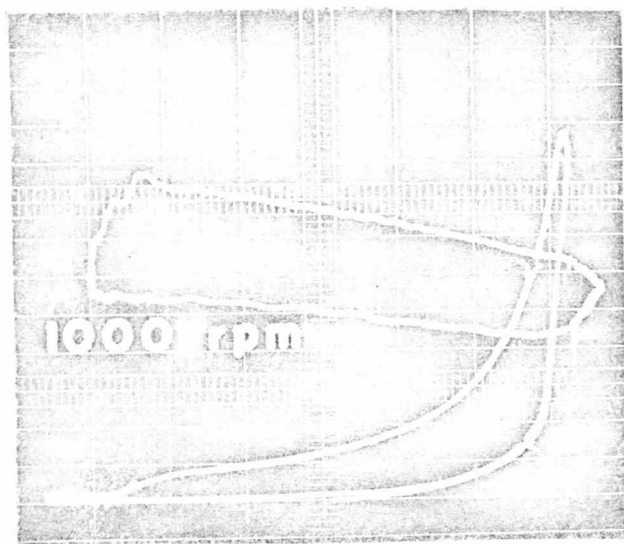


Figura 31 - Diagramas indicados, a 1000 rpm.

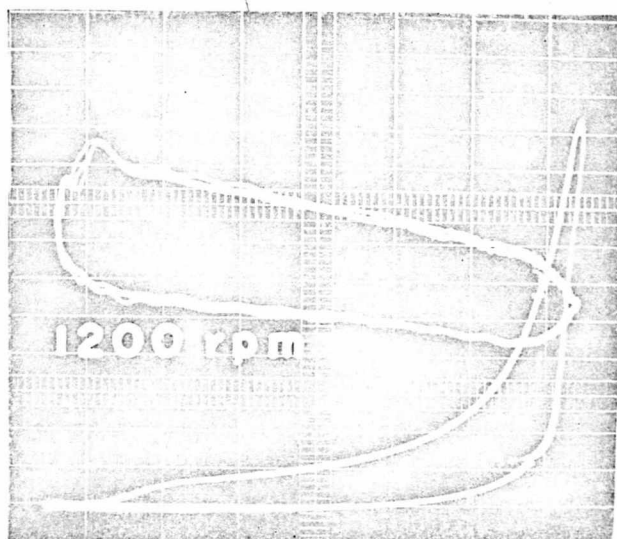


Figura 32 - Diagramas indicados, a 1200 rpm

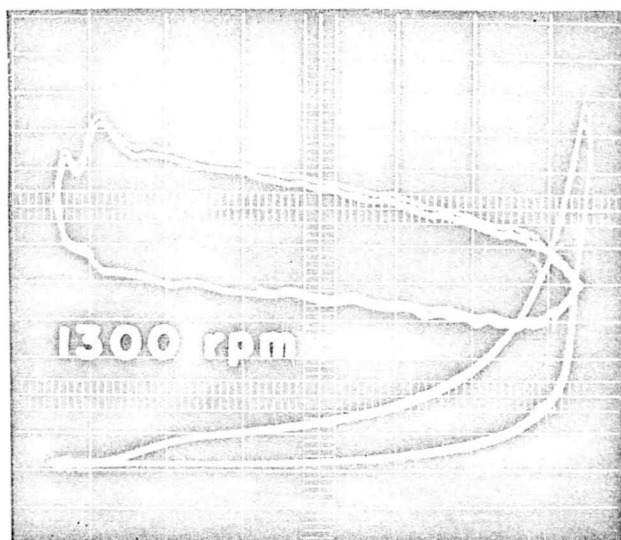


Figura 33 - Diagramas indicados, a 1300 rpm

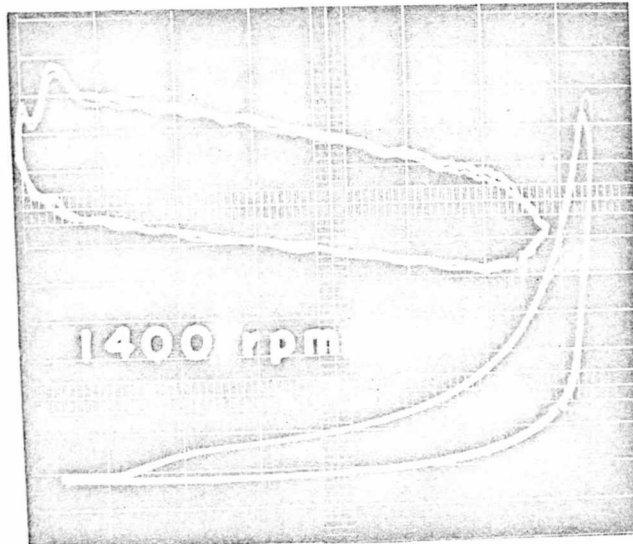


Figura 34 - Diagramas indicados, a 1400 rpm

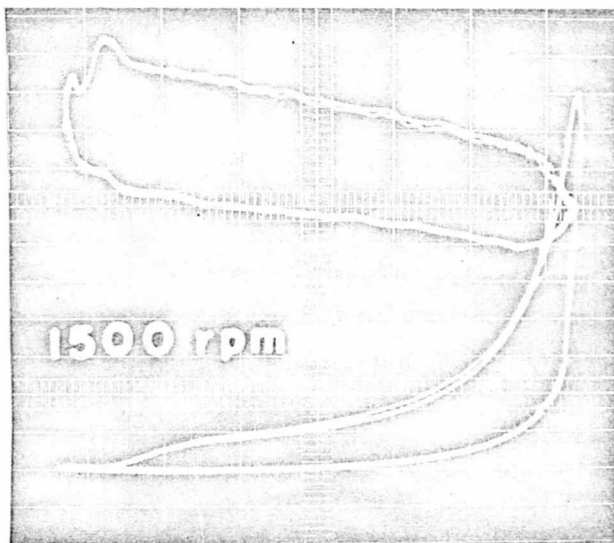


Figura 35 - Diagramas indicados, a 1500 rpm

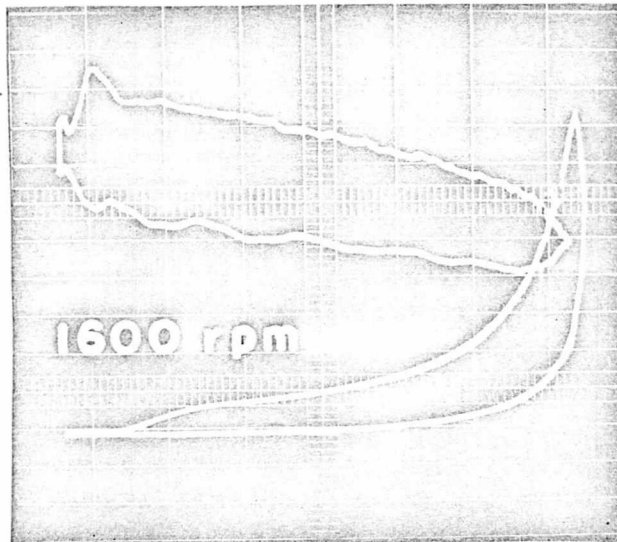


Figura 36 - Diagramas indicados, a 1600 rpm

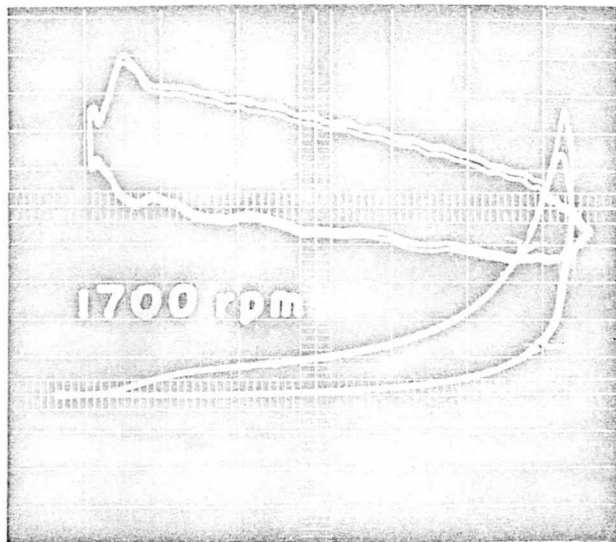


Figura 37 - Diagramas indicados, a 1700 rpm

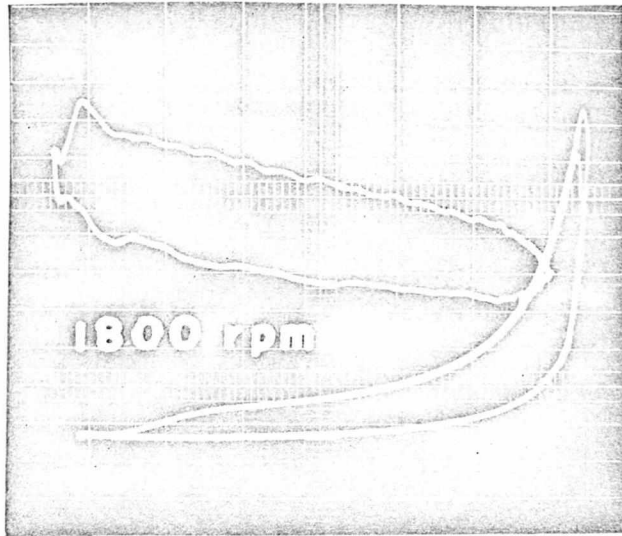


Figura 38 - Diagramas indicados, a 1800 rpm

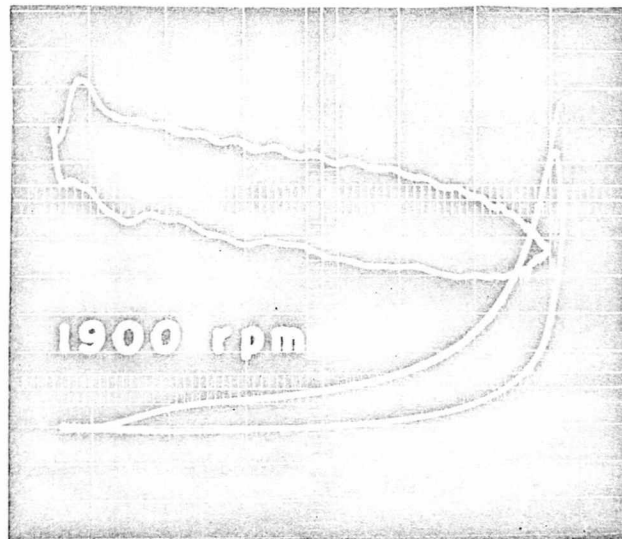


Figura 39 - Diagramas indicados, a 1900 rpm

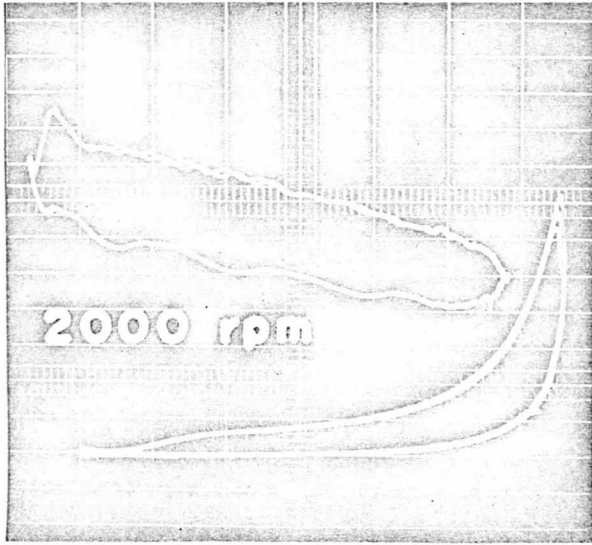


Figura 40 - Diagramas indicados, a 2000 rpm

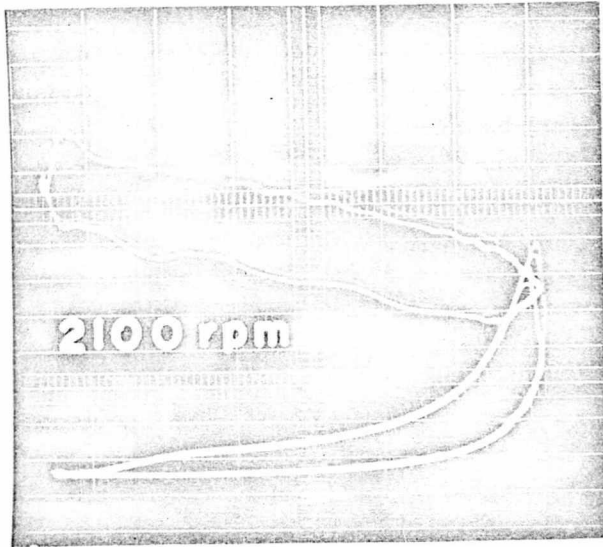


Figura 41 - Diagramas indicados, a 2100 rpm

3.3.2.2 - Cálculo das áreas.

n	Dentro	Meio	Fora	Média	
1000	4,02	4,98	6,04	5,010	
1200	4,06	5,00	6,20	5,087	
1300	3,94	4,90	6,00	4,947	
1400	4,10	5,00	6,00	5,033	
1500	4,12	4,88	6,28	4,760	
1600	4,02	4,70	5,92	4,880	
1700	3,34	4,10	5,34	4,260	
1800	3,30	4,20	5,40	4,300	
1900	3,16	4,12	5,12	4,133	
2000	2,62	3,48	4,38	3,493	
2100	2,60	3,10	4,28	3,327	
Compr. do diagr. (t)		6,82	6,87	6,95	6,88

TABELA 10 - Valores médios das áreas, relativos à câmara de combustão (cm^2)

n	Dentro	Meio	Fora	Média
1000	3,163	3,889	4,662	3,907
1200	3,194	3,905	4,786	3,967
1300	3,100	3,826	4,631	3,858
1400	3,226	3,905	4,631	3,925
1500	3,241	3,811	4,848	3,711
1600	3,163	3,670	4,570	3,805
1700	2,628	3,202	4,122	3,322
1800	2,596	3,280	4,168	3,353
1900	2,486	3,217	3,952	3,223
2000	2,061	2,718	3,381	2,724
2100	2,045	2,030	3,304	2,594

TABELA 11 - Pressão média indicada, relativa à câmara de combustão (Kg/cm^2)

O processo de medição das áreas dos doagramas, a cada rotação é descrito no Apêndice 2. Uma série de alternativas foi

idealizada e o resultado final adotado é apresentado na tabela 10. Estas áreas, transformadas na pressão média correspondente, aparecem na tabela 11.

3.4 - Rendimento mecânico - Apreciação de cálculo.

A variação dos valores correspondentes a pressão média indicada, como pode-se verificar no Apêndice 2, nos leva a curvas de rendimento mecânico, numa faixa variável entre o lógico e o absurdo. A tabela 12 permite verificar a variação destes resultados.

n	Por dentro	No meio	Por fora	Médio
1000	1,5673	0,9486	1,7754	0,9412
1100	-	-	-	-
1200	1,2088	0,9790	0,7888	0,9611
1300	1,2135	0,9781	0,8169	0,9760
1400	1,2250	0,9890	0,8283	0,9874
1500	1,2056	1,0280	0,7911	1,0458
1600	1,2070	1,0364	0,8279	0,9984
1700	1,4907	1,2095	0,9289	1,1639
1800	1,4386	1,1184	0,8706	1,0940
1900	1,4336	1,0883	0,8828	1,0896
2000	1,6148	1,2147	0,9654	1,2046
2100	1,5555	1,2925	0,9335	1,2037

TABELA 12 - Valores do rendimento mecânico considerando medições por dentro, no meio e por fora do ponto luminoso.

3.5 - Resultados adicionais.

3.5.1 - Curva de consumo específico.

Para a obtenção da curva de consumo específico fixou-se o volume a ser consumido pelo motor e registrou-se o tempo gasto para este consumo. O tempo foi medido para um consumo de

30 ml, a cada rotação, e registrado em horas.

Os valores obtidos aparecem na tabela 13. Sabendo-se que o peso específico da mistura combustível é de 780 g/l e conhecidos os valores de N_e , pode-se calcular o consumo específico pela relação

$$C_e = 0,78 \cdot 30/N_e \text{ h}$$

Os resultados correspondentes a estes valores estão na tabela 14.

n	t	n	t	n	t
1000	37,4	1400	25,9	1800	24,3
1100	-	1500	25,4	1900	24,4
1200	35,6	1600	24,5	2000	24,4
1300	25,8	1700	25,4	2100	24,2

TABELA 13 - Tempo de consumo para 30 ml.

n	C_e	n	C_e	n	C_e
1000	752,304	1400	704,766	1800	620,488
1100	-	1500	671,091	1900	610,298
1200	614,620	1600	658,691	2000	611,703
1300	768,445	1700	609,882	2100	629,131

TABELA 14 - Valores do consumo específico médios.

Da mesma forma anterior foram também estes valores ajustados. Além de se obter um resultado mais perto da realidade, foram subtraídas as informações relativas às rotações de 1000, 1200 e 1300 rpm por considerar-se uma probabilidade de erro nas medições. As constantes ajustadas fornecem a seguinte equação:

$$C_e = 2,10456 - 15,85367n + 41,99751n^2$$

onde $n = \text{rpm}/10000$

De posse desta equação, obteve-se a tabela 15 de valores ajustados do consumo específico e a correspondente curva

(figura 42).

O consumo mínimo verifica-se a 1888 rpm, para um valor de 608,42 g/CV_h.

n	C _e	n	C _e	n	C _e
1000	939	1400	708	1800	611
1100	868	1500	671	1900	608
1200	806	1600	643	2000	613
1300	753	1700	623	2100	627

TABELA 15 - Valores ajustados do consumo específico.

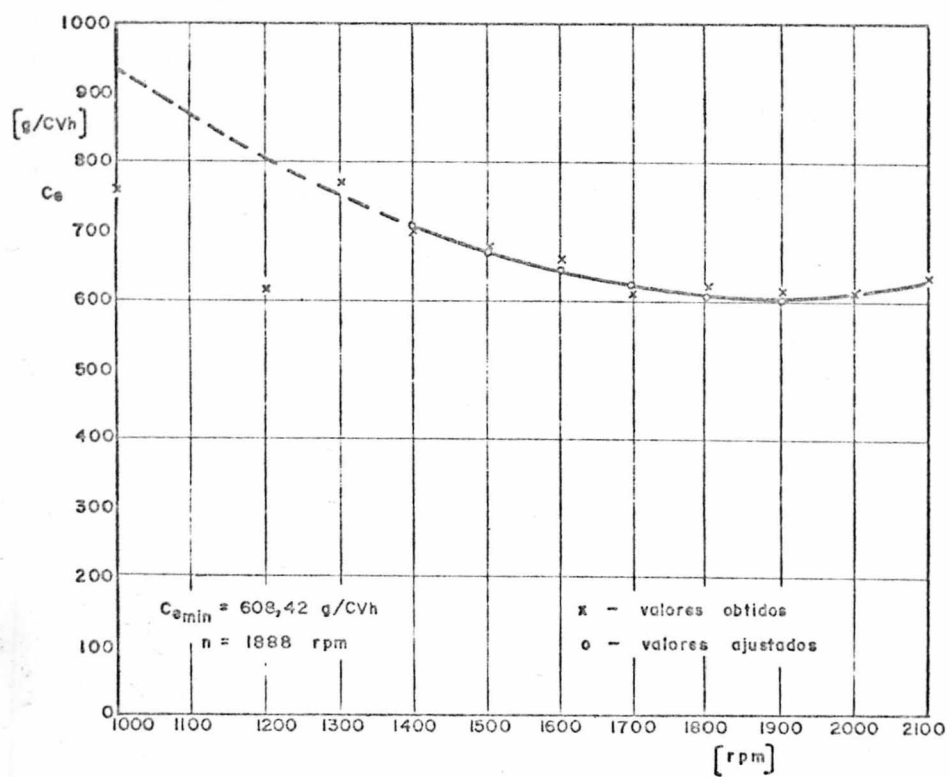


Figura 42 - Curva de consumo específico

3.5.2 - Potência de partida.

Utilizando-se o eletrodinamômetro como motor, pode-se medir a potência necessária para a partida do motor, capaz de colocá-lo em funcionamento. Isto é feito medindo-se os valores da tensão e corrente de partida, deduzindo-se dos valores obtidos a parcela correspondente a potência de partida do eletrodinamômetro. O processo foi realizado a duas condições do motor: a frio e a quente.

Pela expressão (3), obtêm-se para a partida a frio u ma potência de 0,54 CV enquanto que a quente atingiu 0,40 CV.

A tabela 16 indica os valores da tensão e correntes de partida.

Condição de partida			
	A frio	A quente	Do eletrodinamômetro
V	60	60	60
I	40	38	32

TABELA 16 - Valores da tensão e corrente de partida.

3.5.3 - Temperaturas de funcionamento.

A cada rotação de teste, controlou-se a temperatura dos gases de descarga ao mesmo tempo em que se media a variação de temperatura da água de refrigeração. Para esta última verificação, manteve-se estável a vazão da água de refrigeração em 240 l/h.

Estes resultados podem ser observados na tabela 17.

3.5.4 - Condições ambientes.

Durante os testes observou-se as seguintes condições ambientes médias:

Temperatura ambiente: 18°C

Pressão atmosférica ambiente: 765 mm de Hg

Umidade relativa do ar: 88%.

n	TG	TA	TS	n	TG	TA	TS
1000	378	17	30,0	1600	418	17	34,0
1100	-	-	-	1700	420	17	33,0
1200	398	17	28,0	1800	420	17	32,5
1300	398	17	28,0	1900	435	17	34,0
1400	400	17	31,0	2000	437	17	32,0
1500	400	17	30,0	2100	437	17	32,0

TABELA 17 - Temperaturas de funcionamento.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS

4.1 - Análise percentual da variação dos resultados.

4.1.1 - Processo Potência Indicada.

Como pode ser verificado no capítulo anterior, a variação dos resultados com relação ao rendimento mecânico, utilizando o processo de cálculo através da potência indicada deixa a desejar quanto a sua veracidade, sem considerar-se a possibilidade de obtenção de resultados absurdos.

A expressão do rendimento mecânico através deste processo, pode ser apresentada da seguinte forma:

$$\eta_m = 1,6900 P B / (A_d F_{ev} / t)$$

A constante 1,69 foi obtida tendo-se em vista as características do motor e os fatores de transformação de unidades.

O valor da força sobre a balança, em cada leitura, apresenta oscilações, de um máximo a um mínimo, de tal forma que tomou-se um valor médio, eliminando-se com isto a possibilidade de interpretações errôneas.

Por sua vez, o braço de alavanca B é calibrado no próprio eletrodinamômetro.

Como se observou até agora, os fatores citados não podem ser responsabilizados por um resultado absurdo.

O comprimento t apresenta sua leitura afetada da dimensão correspondente do ponto luminoso no osciloscópio, dependendo de considerar-se esta medida por fora do ponto, no centro ou internamente. Atendendo-se a estas considerações, obter-se-ia respectivamente, os seguintes valores para t: 69,5, 68,7 e 68,2.

Conforme pode ser visto no Apêndice 2, as medições feitas com relação ao fator de escala vertical do transdutor piezoelétrico instalado no cabeçote, apresentou um valor mínimo de

5,025 kg/cm²/cm a um valor máximo de 6,00 kg/cm²/cm, tendo em vista os três processos adotados.

Finalmente, as medições de áreas também envolvem sérios problemas. Considerando novamente a dimensão do ponto e a forma de acompanhar a curva ao planimetrá-la (Apêndice 2), verifica-se, para uma dada rotação, por exemplo, que esta variação pode, para 1500 rpm, apresentar uma variação de 4,12 até 6,28 cm² na área correspondente.

Observadas tais situações, passou-se a uma análise de erros, verificando-se a propagação dos mesmos no cálculo de função de funções. Com bibliografia adequada¹², passou-se a operar a expressão em análise, ou seja

$$\eta_{\text{m}} = 1,6900 P B / (A_{\text{d}} F_{\text{ev}} / t)$$

Assim, considerando a constante 1,6900, que analisada mostra que os determinados fatores que sobre ela influem (área do pistão e curso) estão acometidas de erros na faixa de centésimos de milímetro, inferiores a precisão desejada.

Tendo em vista a uniformidade dos resultados, escolheu-se para análise apenas uma rotação de regime, no caso 1700 rpm.

As variáveis, seus desvios e variações são dados abaixo:

Variável	Desvio (Δ)	Variação (%)
P = 4,58	+0,02	+0,44%
	-0,02	-0,44%
B = 0,50	+0,001	+0,20%
	-0,001	-0,20%
A _d = 4,26	+1,08	+25,35%
	-0,92	-21,60%
F _{ev} = 5,37	+0,64	+11,92%
	-0,34	-6,33%
t = 6,88	+0,07	+1,02%
	-0,06	-0,88%

Os desvios das variáveis foram obtidos a partir dos resultados e das medidas arredondadas para a precisão desejada.

A expressão do erro desenvolvida, aplicando-se o método da propagação do erro é:

$$\frac{\Delta \eta_m}{\eta_m} = \frac{\Delta P}{P} + \frac{\Delta B}{B} - \frac{F_{ev}}{t} \Delta A_d - [(A_d/t)/K] \Delta F_{ev} + [(A_d F_{ev}/t^2)K] \Delta t$$

onde $K = A_d F_{ev}/t$

Para as condições apresentadas, o valor do rendimento mecânico calculado pelo processo da pressão média indicada forneceu o valor de 1,163. Assim sendo e considerando a pressão acima, obtêm-se:

η_m	Desvio (Δ)	variação (%)
1,163	+0,31	26,65
	-0,43	36,97

Atendendo aos resultados acima verifica-se uma faixa de variação do rendimento mecânico de 73,30% até 147,30%. Enquanto o primeiro extremo é lógico, porém muito baixo, o outro é puramente absurdo. Observe-se ainda que o valor calculado pelo processo de potência passiva foi de 86,37%, lógico e razoável.

Conclui-se então que a qualidade do rendimento final é totalmente prejudicada pelas deformações até então citadas e inerentes ao próprio processo de medição.

4.1.2 - Processo potência passiva.

Por sua vez, o processo de cálculo de rendimento mecânico, através da potência passiva, também deixa muito a desejar, tendo em vista as condições em que é executado. O fato de desligar-se o sistema de ignição vai, evidentemente, afetar completamente os esforços sobre os mancais, e em consequência, as perdas mecânicas. Ainda mais, pelo fato de não existir combustão, o atrito entre pistão e cilindro é bastante diminuído, prin

principalmente se considerar-se os esforços sobre os anéis.

As temperaturas de funcionamento do motor neste processo, também não tem condições de serem observadas, dada a ausência de ignição. Logo, diferentes são as dissipações térmicas, e por conseguinte, diferentes serão os atritos da máquina.

4.2 - Análise comparativa.

É evidente que nenhum dos dois processos apresentados satisfaz as condições necessárias para se definir com precisão, a curva de rendimento mecânico de um motor.

Para situar-se entre um valor aproximado, o processo de medição utilizando a potência passiva fornece resultados aceitáveis.

Já no caso de se utilizar o processo que envolve o cálculo do rendimento mecânico através da potência indicada, nada de positivo poder-se-ia afirmar, donde se conclui a sua exclusão neste processamento.

Quer parecer, desta forma, que a utilização de transdutores piezoelétricos, em Equipamentos PM-1, deixa a desejar, quando se tiver por objeto a obtenção de um resultado quantitativo. Porém, como foi citado no capítulo 2, pode-se observar a sua grande utilização ao se tratar de análise qualitativa de fenômenos inerentes aos motores de combustão interna, como, otimização do ponto de ignição, detecção de defeitos ou comparação entre engenhos de mesmas características.

APÊNDICE A-1

SISTEMAS DE AFERIÇÃO E CALIBRAÇÃO

A1.1 - Calibração de transdutores.

O processo de calibração de transdutores é positivamente, um dos pontos discutidos nesta tese. A definição dos fatores de escala mereceu os maiores cuidados e uma definição dos métodos. Para que se pudesse concluir a respeito da veracidade dos resultados, três métodos foram empregados, que podem ser divididos em dois grupos: estáticos e dinâmicos, a saber:

Processo 1 - Aferição estática, utilizando manômetros de referência.

Processo 2 - Aferição estática, utilizando indicador de referência.

Processo 3 - Aferição dinâmica, utilizando indicador de referência.

A1.1.1 - Calibração do transdutor PD 100/14-1.

Utilizando o Processo 1 de aferição, processo este indicado pela própria firma fornecedora do Equipamento Piezoelétrico PM-1, cuja descrição se segue¹⁰, obteve-se resultados aproximados aos demais processos, o que se diz, que, dentro de uma determinada precisão, não são eles os responsáveis pelas conclusões imprecisas.

O processo utilizado para aferir os transdutores piezoelétricos uma instalação auxiliar (figura 43), identifica aquelas usadas para aferição de manômetros. A única diferença é que, neste caso, se adapta em um dos terminais do aparelho de referência, escala 0-100 at, precisão 1% e no outro, o transdutor piezoelétrico. Através de um circuito hidráulico comunica-se a ambos os dispositivos uma pressão conhecida. Isto é feito, com o auxílio de uma manivela, que caracteriza a estaticidade da aferição.

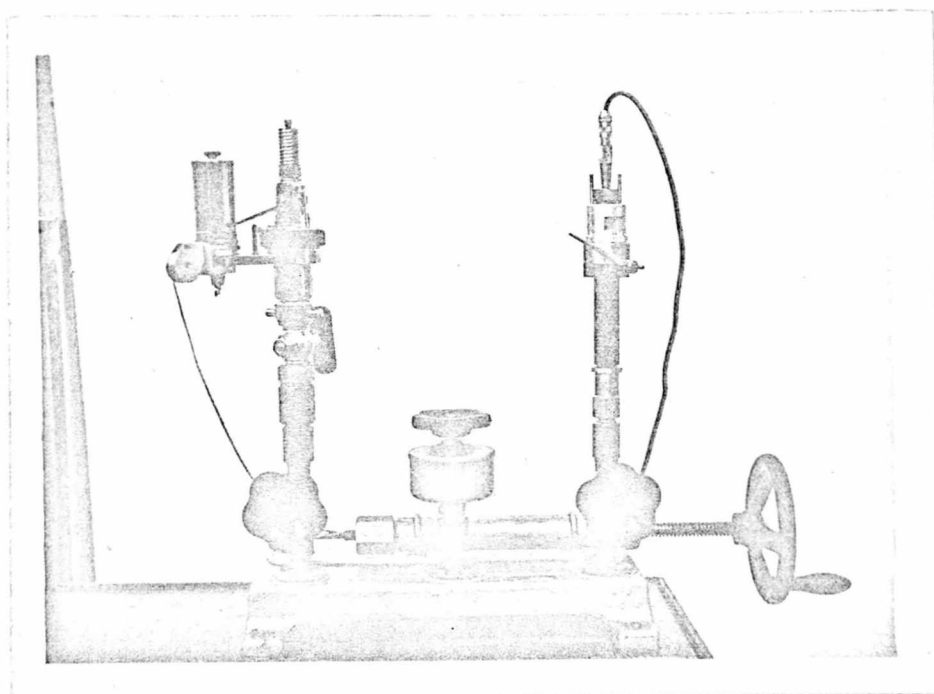


Figura 43 - Instalação de calibração de transdutores.

A instalação auxiliar utilizada possui as seguintes características:

VEB Messgerätewerk
 Nr. 817
 Abb. 3/PH1.

A cada carga de pressão comunicada ao transdutor corresponde, no painel do osciloscópio, um deslocamento vertical, capaz de ser registrado em fotografia.

Para este transdutor foram feitas medições utilizando-se pressões de 10, 14 e 20 atmosferas. Estes resultados aparecem registrados nas figuras 44, 45 e 46. Conhecido o deslocamento vertical, pode-se medi-lo, e então, através da pressão de carga, calcular o valor do fator de escala correspondente, dividindo-se a pressão pelo deslocamento. Os resultados deste processamento aparecem na tabela 18. Novamente aqui aparecem problemas quanto a consideração de se medir o deslocamento vertical tendo em vista as dimensões do ponto luminoso. A tabela 18 refere-se a medições utilizando-se como referência o meio do

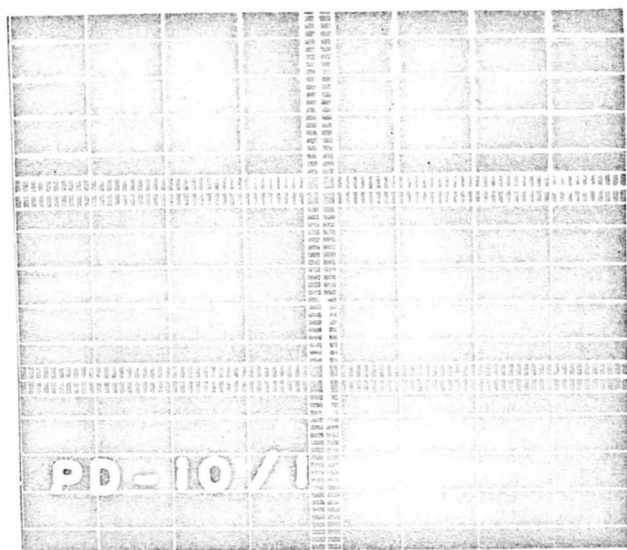


Figura 44 - Calibração do PD 100/14-1, utilizando 10 atm.

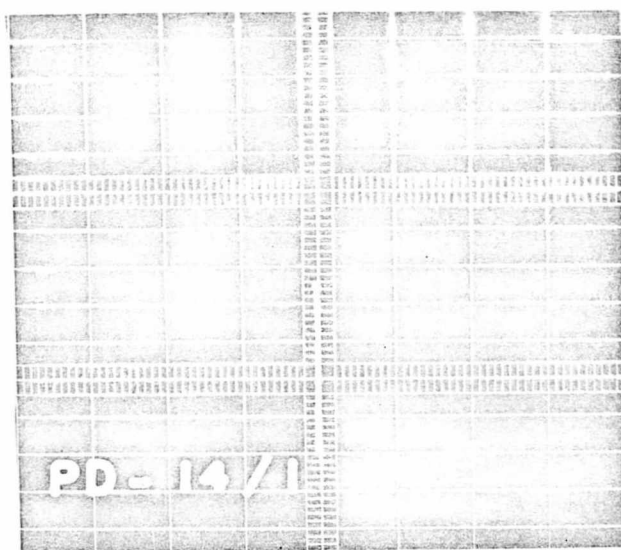


Figura 45 - Calibração do PD 100/14-1, utilizando 14 atm.

ponto luminoso. Uma média aritmética, entre os valores calculados, apresenta o resultado de $6,00 \text{ kg/cm}^2/\text{cm}$ para o fator de escala vertical, através deste processo.

A fim de evitar erros de leitura do valor da pressão no manômetro, alterou-se em parte o processo 1, substituindo o

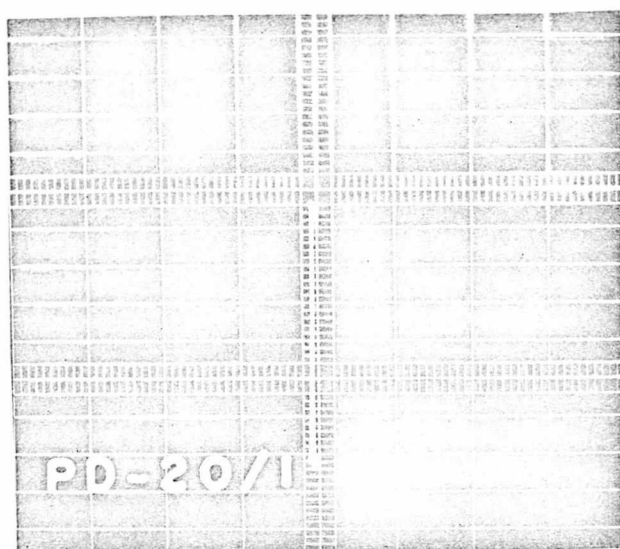


Figura 46 - Calibração do PD/14-1, utilizando 20 atm.

PROCESSO 1		PD 100/14-1	
Pressão kg/cm ²	Deslocamento mm	Fator-Escala kg/cm ² /cm	F. E. médio
10	16,0	6,25	6,00
14	23,3	6,01	
20	34,8	5,74	

TABELA 18 - Valores do fator de escala. através de medição estática (Processo 1).

manômetro de referência, por um dispositivo que caracteriza maior precisão a estes resultados. Trata-se de um indicador (figura 47), com as seguintes características:

Marca - Metallwerker Kg - Meerane (Sachsen)

Registrador Indicador Tipo 50

Rotação Máxima: 500 rpm

Altura máxima do diagrama: 50 mm.

Neste caso, a pressão de carga se comunica a um pistão do indicador, deste a uma mola de constante de deformação conhecida, e desta, a um estilete registrador, capaz de imprimir so-

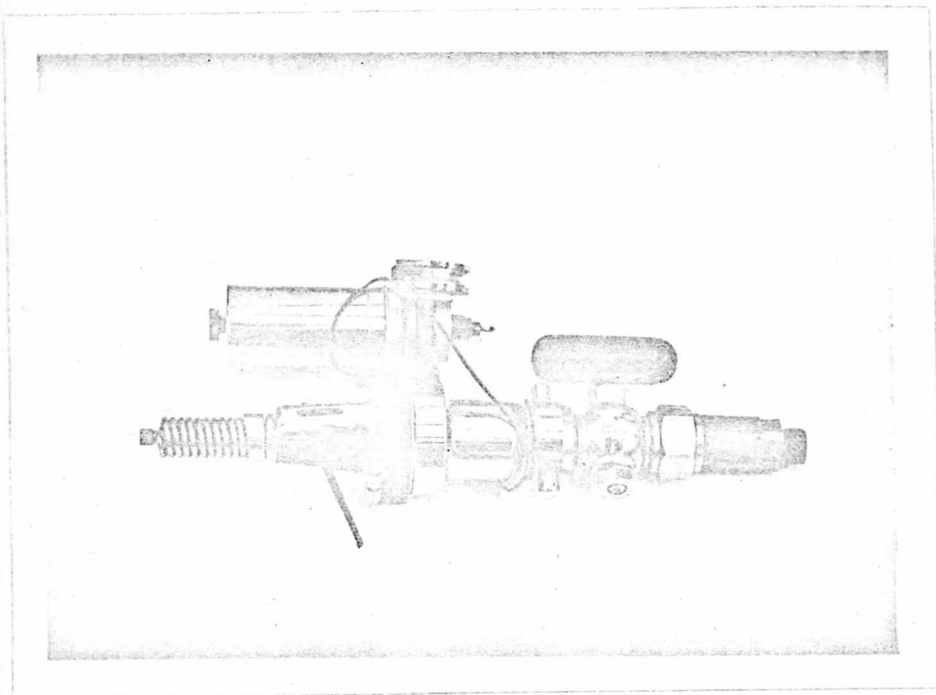


Figura 47 - Registrador Indicador.

bre um papel, colocado sobre o cilindro registrador, o comprimento proporcional a deformação. Conhecido o comprimento registrado e a constante de mola, pode-se determinar o valor da pressão aplicada. Da mesma forma que anteriormente, a pressão de carga sobre o indicador comunica-se igualmente ao transdutor piezoelétrico, cujo sinal de saída pode ser registrado fotograficamente, no painel do osciloscópio.

Utilizou-se, no indicador, um pistão 1/1 e uma mola de constante igual a 4 mm/atm, capaz de suportar uma pressão máxima de 12 atm¹¹.

Foram feitas quatro medições, ilustradas nas figuras 48 a 51. Os valores registrados no indicador aparecem na figura 52.

A tabela 19 ilustra os resultados desta operação. Uma média aritmética dos quatro valores obtidos leva ao resultado de 5,025 kg/cm²/cm para o fator de escala.

Finalmente, a utilização do processo 3, dinamicamente veio comprovar a validade dos anteriores.

Desta forma foi adaptado no lugar da vela de ignição

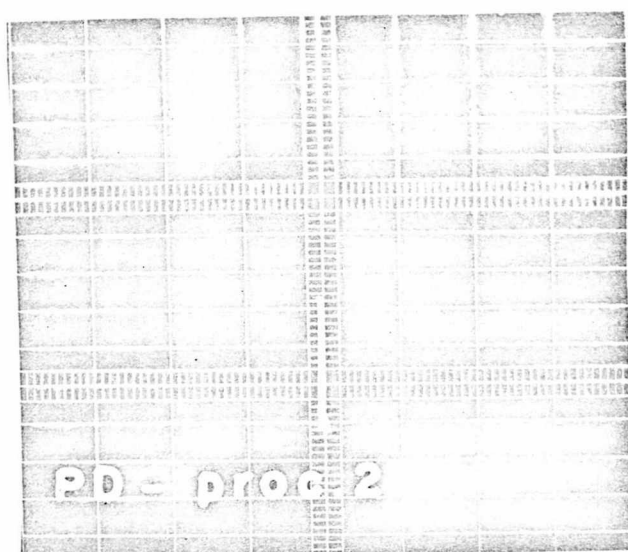


Figura 48 - Calibração do PD 100/14-1, utilizando o registro indicador, com 9,07 atm.

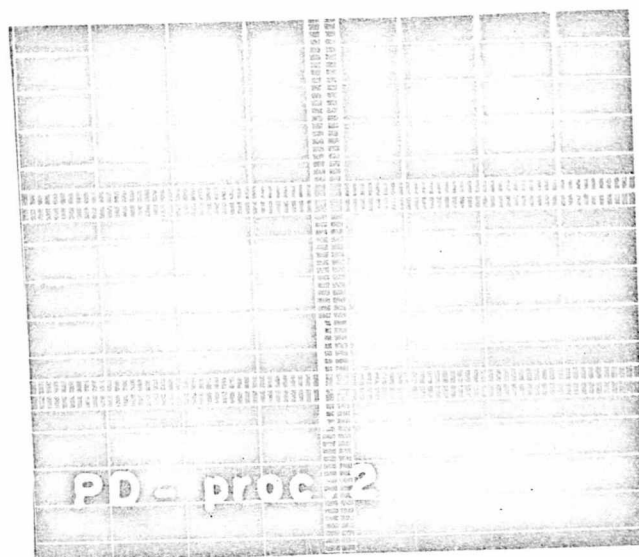


Figura 49 - Calibração do PD 100/14-1, utilizando o registrador indicador, com 7,15 atm.

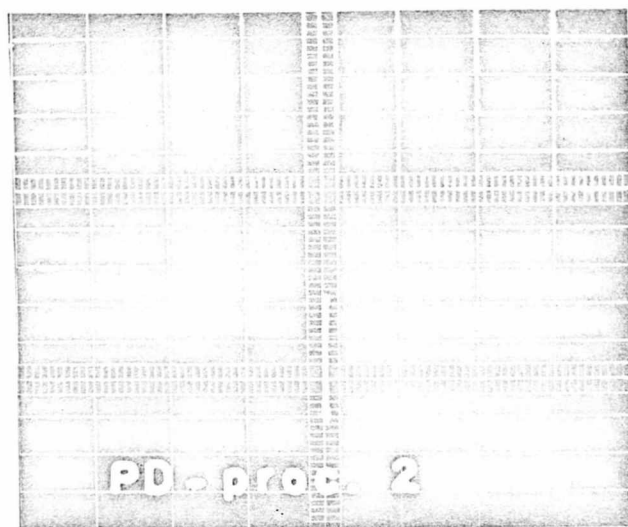


Figura 50 - Calibração do PD 100/14-1, utilizando o registrador indicador, com 8,42 atm.

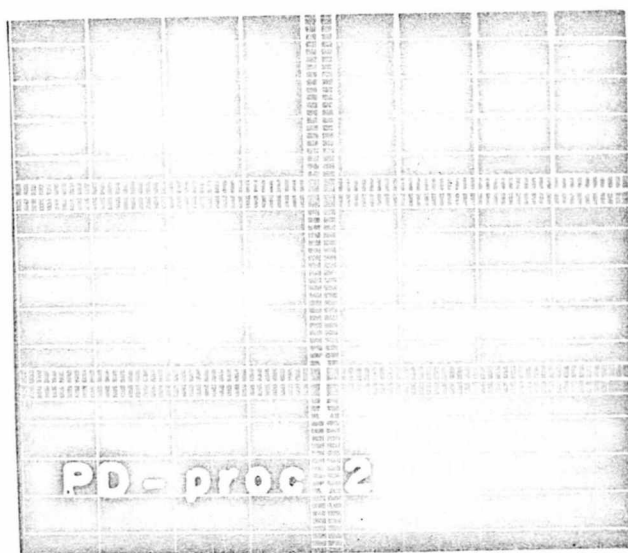


Figura 51 - Calibração do PD 100/14-1, utilizando o registrador indicador com 3,85 atm.

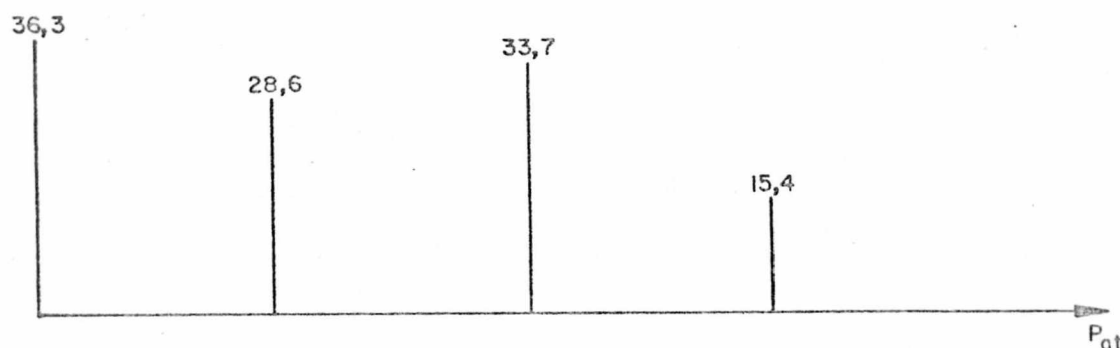


Figura 52 - Valores indicados no registrador, em mm, processo 2, PD 100/14-1.

Processo 2		PD 100/14-1		
DEF. IND. mm	PRES. CORRESP. kg/cm^2	DESLOC. mm	FATOR-ESC. $\text{Kg/cm}^2/\text{cm}$	F. E. médio
36,3	9,07	18,00	5,03	5,025
28,6	7,15	16,50	4,33	
33,7	8,42	14,20	5,93	
15,4	3,85	8,00	4,81	

TABELA 19 - Valores do fator de escala, através de medição estática (Processo 2).

do motor o Registrador Indicador (figura 53). A pressão de carga foi conseguida, fazendo-se acionar o motor em teste através do eletrodinamômetro. Para que a pressão de resistência fosse a atmosférica, comunicou-se o carter ao ambiente.

O teste foi executado da mesma forma que o Processo 2. A única diferença, neste caso, é que fez-se leituras a diversas rotações, conseguindo-se com isto diferentes pressões de carga. Tendo em vista a forma de se comunicar a pressão ao Indicador, e ao transdutor, fica então caracterizado este processo com o de uma aferição dinâmica.

As figuras 54 a 57 ilustram os resultados obtidos em quatro rotações diferentes, enquanto que a figura 58 apresenta os resultados registrados no indicador.

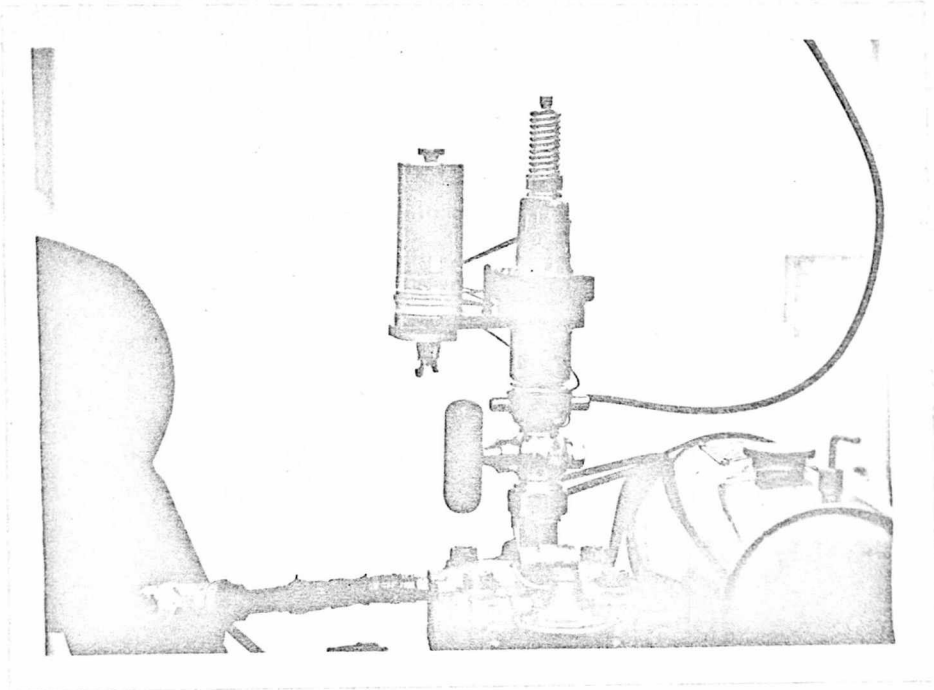


Figura 53 - Adaptação do registrador indicador no motor.

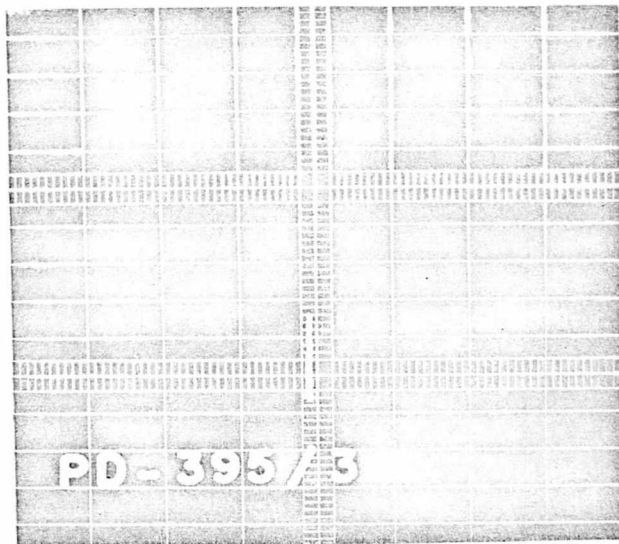


Figura 54 - Calibração do PD 100/14-1, utilizando o registrador indicador, dinamicamente, com 5,82 atm.

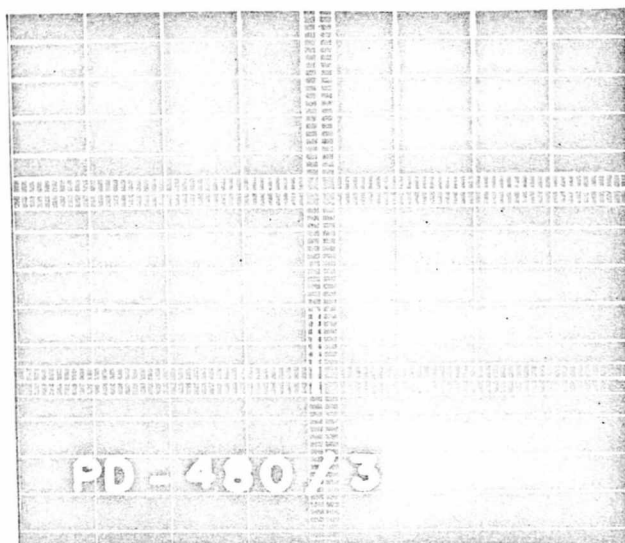


Figura 55 - Calibração do PD. 100/14-1, utilizando o registra-
dor indicador, dinamicamente, com 5,87 atm.

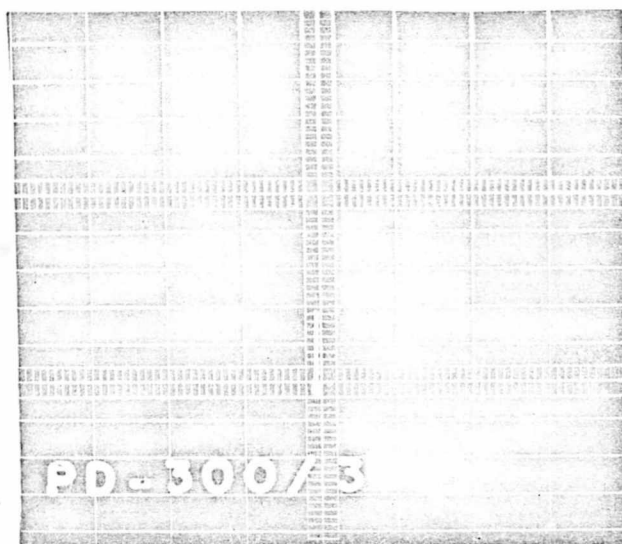


Figura 56 - Calibração do PD 100/14-1, utilizando o registra-
dor indicador, dinamicamente, com 5,55 atm.

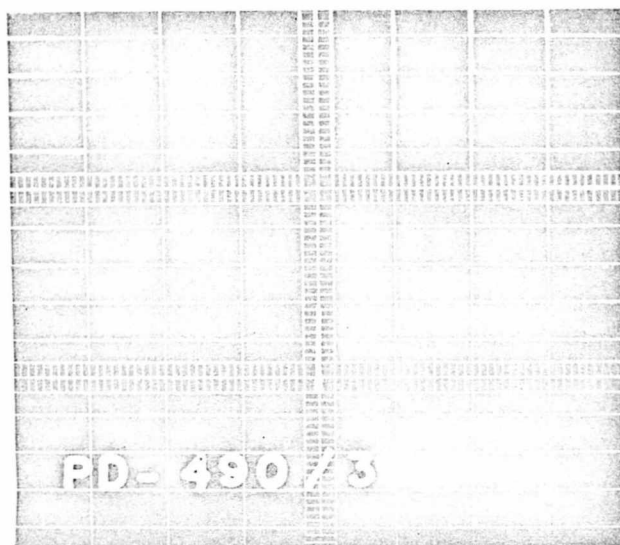


Figura 57 - Calibração do PD 100/14-1, utilizando o registrador indicador, dinamicamente, com 5,92 atm.

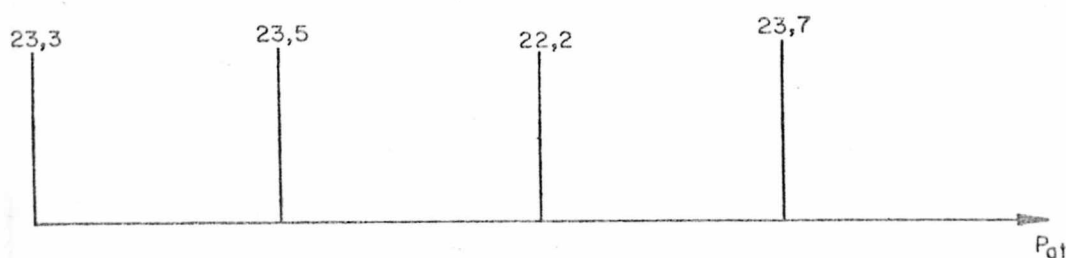


Figura 58 - Valores indicados no registrador, em mm, processo 3, PD 100/14-1.

A tabela 20 apresenta os resultados finais desta operação. Uma média aritmética entre os quatro valores obtidos, permite chegar ao valor de $5,07 \text{ kg/cm}^2/\text{cm}$ para o fator de escala, utilizando-se este processo.

Reunindo os valores dos Processos de aferição 1, 2, e 3, e tomando-se a sua média aritmética, chega-se ao valor de $5,365 \text{ kg/cm}^2/\text{cm}$ para o fator de escala vertical relativo ao

transdutor PD 100/14-1.

PROCESSO 3		PD 100/14-1		
Def. Ind. mm	Pres. corresp. Kg/cm ²	Desloc. mm	Fator-esc. Kg/cm ² /cm	F. E. médio
23,3	5,82	11,4	5,11	5,07
23,5	5,87	11,6	5,06	
22,2	5,55	11,0	5,05	
23,7	5,92	11,7	5,06	

TABELA 20 - Valores do fator de escala, através de medição dinâmica (Processo 3, PD 100/14-1).

A1.2 - Aferição do tacômetro.

Para a aferição do medidor de rotações, apresentado no item 2.10, utilizou-se outro tacômetro de precisão tipo eletromagnético, anteriormente aferido com uma fonte de frequência auxiliar de 50 Hz. As características deste tacômetro eletromagnético (figura 59), são as seguintes:

Marca - Philips
 Tipo - PR 9907
 NR LO 812

O processo de aferição utilizado foi o de comparação direta, corrigindo-se o valor da informação apresentada no tacômetro ligado ao gerador taquimétrico, instalado junto ao eixo do eletrodinamômetro.

A1.3 - Aferição da balança de medição do torque.

Este processo é bastante simples, constando apenas de uma verificação. Utilizou-se para tanto uma série de pesos fornecidos pelo Instituto Brasileiro de Medidas, e por comparação direta, liberou-se a utilização da balança em apreço, por não apresentar diferença entre o valor fornecido e o registrado.

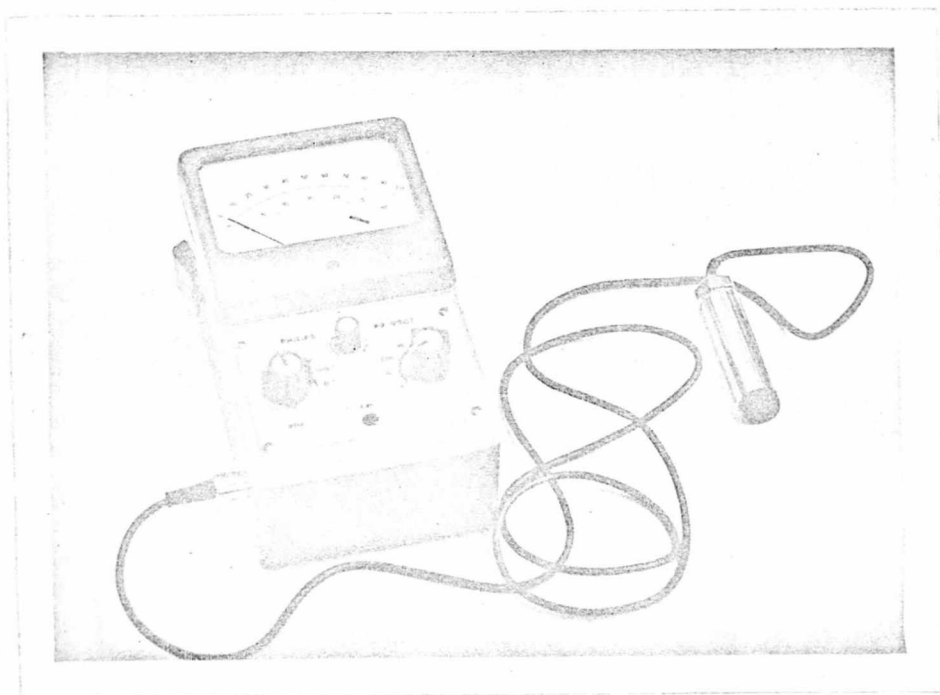


Figura 59 - Tacômetro eletromagnético.

A1.4 - Distorção no acoplamento motor-gerador de X.

Possíveis deslizamentos ou distorções da ligação entre o motor e o gerador de X, pode acarretar sérios problemas, passíveis de um erro de 5% no valor da área do diagrama¹², caso exista uma distorção de apenas 1°.

A fim de evitar este provável erro, idealizou-se uma pequena montagem, (figura 60), utilizando-se uma lâmpada estroboscópica, capaz de permitir, com o motor em funcionamento, a análise do problema. Registrou-se sobre o acoplamento uma linha horizontal de referência de comprimento razoável (10 cm), de tal forma que abrangesse posições sobre o eixo do motor e do gerador de X. Ligando-se o motor, verificou-se que a horizontal de referência permaneceu sem distorção.

Características do equipamento utilizado para este teste: Marca Photolastic Inc.; modelo - 134; série - 1916.

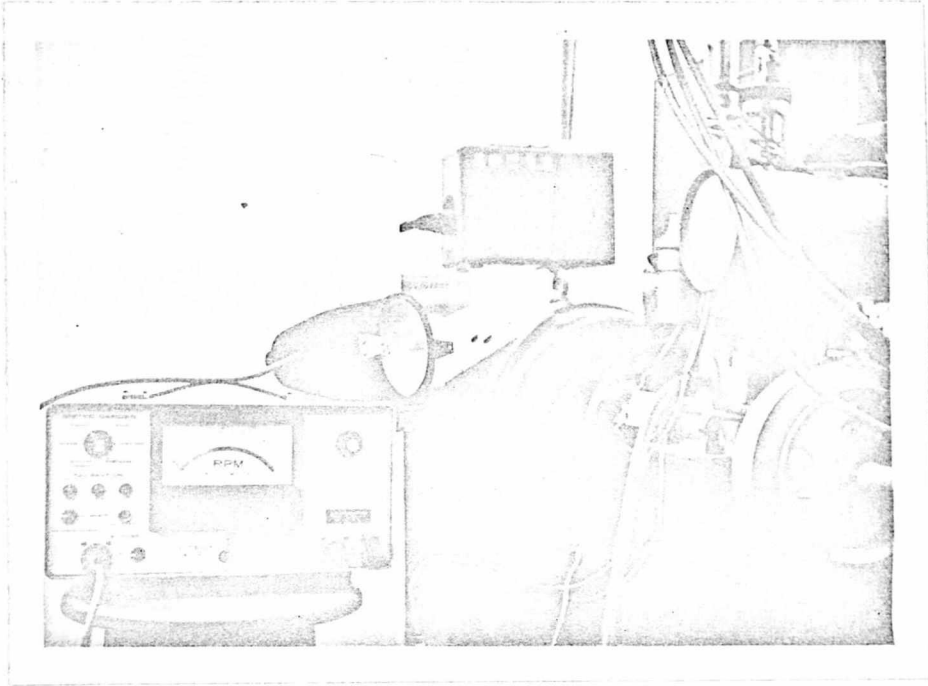


Figura 60 - Instalação de verificação de distorção no acoplamento motor-gerador de X.

APÊNDICE A-2

CÁLCULO DE ÁREAS DOS DIAGRAMAS INDICADOS

A2.1 - Área dos diagramas da câmara de combustão.

Para medir-se as áreas dos diagramas indicados utilizou-se um planímetro, marca Keuffel & Esser Co., nº 620005, série nº 50892.

Este processamento apresentou uma variação enorme nos resultados finais, tendo-se em vista a maneira de se percorrer a curva obtida, em se tratando de acompanhar a mesma por fora, no meio ou por dentro do ponto luminoso.

A ampliação fotográfica foi em escala natural (1:1) de tal forma que não houve necessidade de corrigir-se os valores das áreas, pois o planímetro já apresenta o resultado final em cm^2 .

A medição das áreas obedeceu então às três formas supra apresentadas, sendo feitas a cada rotação de teste.

Estes resultados assim obtidos acham-se apresentados na tabela 10 obtidos estes valores, tomou-se a média aritmética entre eles, como resultado final. A última coluna da tabela 10 ilustram os resultados assim fixados.

É interessante lembrar que para a obtenção da área de cada curva procedeu-se da seguinte forma: acompanhou-se, a partir de um ponto inicial pré-fixado, percorrendo-a por cinco voltas, anotando-se os resultados intermediários, e obtendo-se o valor da área, dividindo-se o valor registrado pelo número de voltas realizadas. Desta forma, obtém-se uma precisão de leitura na área do diagrama em apreço bastante mais apreciável.

BIBLIOGRAFIA

- 1 - Obert, Edward F., "Motores de Combustion Interna", p. 47, CECSA, México, 1966.
- 2 - Wegener, Klaus, "The Electrical Measurement of Dynamic Pressures and Forces by Use of the Piezoelectric Measuring Equipment PM-1", p. 6, Zwönitz - Catálogo do Equipamento PM-1.
- 3 - Beck with, T.G., Buck, N. Lewis, "Mechanical Measurements", p. 6, addison Wesley, London, 1965.
- 4 - Obert, Edward F., opus cit., p. 57.
- 5 - Wegener, Klaus, opus cit., p. 6.
- 6 - Pacitti, T., "Fortran Monitor", p. 244, Ao Livro Técnico SA Rio de Janeiro, 1968.
- 7 - Giacosa, D., "Motores Endotérmicos", p. 157, Hoepli, Barcelona, 1967.
- 8 - Obert, Edward F., opus cit., p. 66.
- 9 - Obert, Edward F., opus cit., p. 68.
- 10 - "Piezoelektrischer Druckgeber DD 100/14-1", Catálogo de instruções do transdutor PD 100/14-1.
- 11 - "Indicatoren", Catálogo de instruções do registrador, p. 7.
- 12 - Massarani, Giulio, "Introdução ao Cálculo Numérico, p. 125, Ao Livro Técnico S.A., Rio de Janeiro, 1967.