

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ASPECTOS BÁSICOS NA IMPLEMENTAÇÃO DE
SISTEMAS DE ENSAIO DE MOTORES A COMBUSTÃO INTERNA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA
CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA

LUÍS EDUARDO LAFFITTE RONCONI

FLORIANÓPOLIS, JULHO DE 1986.

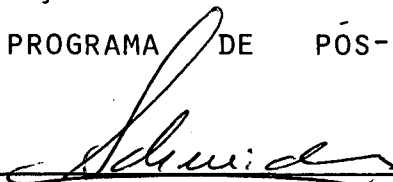
ASPECTOS BÁSICOS NA
IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMAS DE ENSAIO
DE MOTORES A COMBUSTÃO INTERNA

LUÍS EDUARDO LAFFITTE RONCONI

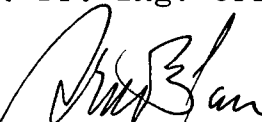
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA
DE CONCENTRAÇÃO FABRICAÇÃO, E APROVADA EM
SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

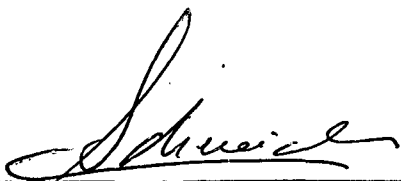


CARLOS ALBERTO SCHNEIDER
Prof. Dr.-Ing. Orientador



ARNO BLASS
Prof. Ph.D. Coordenador do Curso

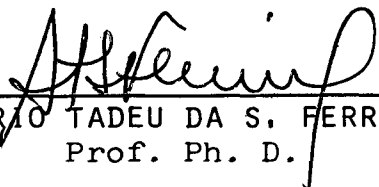
BANCA EXAMINADORA



CARLOS ALBERTO SCHNEIDER
Prof. Dr.-Ing. Presidente



CARLOS ALBERTO FLESCHE
Prof. MSc.



ROGERIO TADEU DA S. FERREIRA
Prof. Ph. D.



CARLOS INACIO ZANCHIN
Prof. MSc.

A MINHA MÃE, COMO
HOMENAGEM PÓSTUMA
A SUA VIDA E LUTA
EXEMPLARES.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Carlos Alberto Schneider, pela orientação deste trabalho.

Ao engenheiro Antônio Fernando de Moura Santos e aos acadêmicos Júlio Cesar D. Luca, Werner Kraus Júnior, e Antônio Severiano pela sua imprescindível ajuda na parte experimental.

À Janete Fernandes pela datilografia, com o valioso auxílio de Maria Marli Berns e Maria Alice Martins.

À equipe do LABMETRO que marcou sua participação neste trabalho, direta ou indiretamente.

Ao Laboratório de Motores do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC, em especial aos professores Carmelo M. F. Faraco Jr. e Sérgio Seugling, pela cessão de equipamentos para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos pós-graduandos que passaram pelo LABMETRO no mesmo período em que este trabalho foi desenvolvido, pelo coleguismo.

À Comissão Nacional de Energia Nuclear CNEN, pela concessão da bolsa.

S U M Á R I O

RESUMO.....	i
ABSTRACT.....	ii
GLOSSÁRIO.....	iii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 MOTORES A COMBUSTÃO INTERNA - CONTEXTO ATUAL.....	2
1.1.1 Princípios Operativos dos Motores a Combustão Interna.....	3
1.1.2 Tendências no Desenvolvimento dos MCI.....	6
1.1.3 Tendências no Desenvolvimento de Motores para Veículos Rodoviários.....	8
1.2 EQUIPAMENTOS E TÉCNICAS PARA ENSAIOS DE MOTORES...	9
1.3 PROPOSTA DE TRABALHO.....	11
2. ENSAIOS DE MOTORES A COMBUSTÃO INTERNA.....	12
2.1 ASPECTOS GERAIS.....	12
2.1.1 Classificação de Ensaios.....	12
2.1.2 Operações de Controle e Medição.....	14
2.1.3 Apresentação dos Resultados de Ensaio.....	17
2.2 ANÁLISE DE MÉTODOS DE ENSAIO.....	20
2.2.1 Especificações Gerais.....	21
2.2.2 Especificações para Medição e Controle.....	22
2.2.3 Ajuste às Condições de Referência.....	23
2.3 PROCEDIMENTO DE ESTABELECIMENTO DE RESULTADOS DE ENSAIO.....	28
2.3.1 Procedimento Geral.....	28
2.3.2 Análise dos Resultados de Ensaios de MCI....	31
2.3.3 Resultado da Medição da Potência Efetiva....	40

2.3.4	Resultado da Medição do Consumo Específico de Combustível.....	46
2.3.5	Resultado da Medição da pmi.....	48
2.4	SISTEMAS DE ENSAIO PARA MOTORES VEICULARES.....	49
2.4.1	Aplicações dos SEMCI.....	49
2.4.2	Classificação e Características Específicas.	51
3.	INSTRUMENTAÇÃO DOS SISTEMAS DE ENSAIO.....	54
3.1	MÓDULOS DE UM SISTEMA DE ENSAIO.....	54
3.2	INSTRUMENTAÇÃO DE MEDIÇÃO.....	64
3.2.1	Torque.....	65
3.2.2	Rotação.....	67
3.2.3	Consumo de Combustível.....	68
3.2.4	Pressões.....	72
3.2.5	Temperaturas.....	74
3.2.6	Posição Angular do Virabrequim e Grandezas Derivadas.....	75
3.2.7	Outras Grandezas.....	78
3.3	INSTRUMENTAÇÃO DE CONTROLE.....	80
3.3.1	Controle Operacional Básico do Motor.....	81
3.3.2	Otimização do Controle Operacional.....	83
3.4	QUALIFICAÇÃO DE INSTRUMENTOS.....	84
3.4.1	Critérios Gerais para sua Seleção.....	84
3.4.2	Operações de Qualificação de Instrumentos...	86
4.	AUTOMAÇÃO DE SISTEMA DE ENSAIO.....	90
4.1	OBJETIVOS GERAIS.....	90
4.2	AUTOMAÇÃO DE BANCOS DE ENSAIO.....	92
4.2.1	Funções do Controlador do Banco de Ensaio...	92
4.2.2	Sequenciamento de Operações Durante um Ensaio.....	93
4.3	INTERFACES DE AQUISIÇÃO E CONTROLE.....	96
4.3.1	Funções da Interfaces.....	96
4.3.2	Requisitos das Interfaces de Aquisição e Controle.....	97

4.3.3 Interfaces Modulares de Aquisição e Controle.....	97
4.4 OTIMIZAÇÃO DE RESULTADOS DE ENSAIO.....	99
4.4.1 Finalidades do Acompanhamento da Operação do Motor.....	100
4.4.2 Aplicações na Supervisão de Instrumentos....	100
4.4.3 Técnicas para Otimização.....	101
5. IMPLEMENTAÇÃO E TESTE DE UM SISTEMA DE ENSAIO.....	102
5.1 CARACTERÍSTICAS DO BANCO DE ENSAIO E SEUS INSTRUMENTOS.....	102
5.2 PREPARAÇÃO DO SISTEMA DE ENSAIO.....	107
5.2.1 Automação da Aquisição de Sinais.....	108
5.2.2 Automação de Controle de Rotação e Torque...	111
5.2.3 Sistema de Medição de Combustível.....	115
5.3 ANÁLISE DOS ASPECTOS METROLÓGICOS DO SEMCI.....	117
5.3.1 Calibração de Sistemas de Medição.....	117
5.3.2 Análise das Variações Inerentes do Motor....	118
5.3.3 Estimativa de Incertezas de Resultados em Ensaio de Desempenho.....	121
5.4 PLANOS E PROGRAMAS DE ENSAIOS.....	122
5.4.1 Planos para Ensaio Específicos.....	122
5.4.2 Programas para o Microcomputador.....	125
5.5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	126
5.5.1 Controle de Rotação.....	126
5.5.2 Controle de Torque e Rotação.....	128
5.5.3 Ensaio de Estabilização de Temperaturas....	130
5.5.4 Ensaio de Desempenho.....	132
5.5.5 Comentários sobre a Especificidade dos Resultados Obtidos.....	135
6. CONCLUSÕES.....	136
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	140

R E S U M O

Em função da necessidade da realização de ensaios de desempenho, cada vez mais rigorosos e completos de Motores de Combustão Interna, em especial os de aplicação veicular, uma revisão sistemática dos procedimentos e da instrumentação aplicável para bancos de ensaios destes motores foi realizada. No decorrer deste trabalho, aspectos relativos a rapidez e a confiabilidade na obtenção de resultados de desempenho foram enfatizados, destacando-se o estabelecimento de fundamentos teóricos e métodos experimentais para avaliação da influência de: erros de medição, no controle e das variações inerentes das grandezas associados à operação do motor, sobre os resultados de desempenho e rendimento. Particularidades de modernos analisadores, sistemas de medição e controladores para bancos de ensaio de MCI foram também apreciadas, bem como alternativas para automação de bancos de ensaio necessária para a constituição de Sistemas de Ensaio com aquisição de dados e controle automáticos, cujos aspectos básicos são analisados de forma geral, ao longo dos capítulos 2, 3 e 4.

Como prática experimental (capítulo 5), instrumentos de medição e controle, um sistema de aquisição de sinais, um microcomputador e alguns programas aplicativos foram criteriosamente implementados num banco de ensaios, e o conjunto resultante de informações obtidas de uma série de experimentos realizados num motor veicular, permitiu evidenciar inúmeros aspectos relevantes a serem considerados na implementação de Sistemas de Ensaios de Motores a Combustão Interna.

A B S T R A C T

As the requirements for Internal Combustion Engines-ICE and their testing need to be constantly improved, a systematic revision of up-to-date instrumentation and test procedures was carried out. Questions related to quickness and reliability on the measurement of performance parameters were brought out, and theoretical and experimental procedures for error analysis and evaluation of inherent variations on ICE operation, respectively, have been proposed. Particularities of modern analyzers, measurement and control systems used on ICE testing, were also object of appreciation. Some alternatives for automatic data acquisition and engine operation control, necessary for the development of Computer Aided Systems for Engine Testing, are analyzed throughout chapters 2, 3 and 4.

As an experimental task (chapter 5), a microcomputer and a Data Acquisition System were carefully implemented on a modern engine test bench, and with the set of resultant information obtained from tests with a vehicular Otto-ICE, it was possible to establish some important requirements for Computer Aided Test Systems used on Engine Performance Evaluation.

G L O S S Á R I O

- AM Ângulo da Manivela (do cilindro n ...): ângulo formado entre a linha de deslocamento do pistão no cilindro de referência e a manivela do eixo do virabrequim ao qual está interligado.
- BE Banco de Ensaio: conjunto de dispositivos físicos e instrumentos utilizados para realizar operações de medição, controle ou para verificação funcional de um produto/processo.
- BEMCI Banco de Ensaio de Motores a Combustão Interna: conjunto de dispositivos físicos (bancada de fixação do motor, freio, acionador, atuadores e transdutores) utilizados na submissão do motor a determinados regimes de operação.
- BEV Banco de Ensaio de Veículos: conjunto de dispositivos físicos utilizados para submeter um veículo a condições de operação que se verificam na prática, em trajetos urbanos e/ou rodoviários.
- CO Monóxido de carbono: gás tóxico emitido pelo MCI.
- Desempenho (de um MCI): capacidade do MCI para fornecer potência (torque), economizar combustível, ou ambos, na sua operação sob condições normais.
- Durabilidade: atributo associado à maximização do período de operação praticável entre reparos e/ou substituição de peças de um produto.

- Dmp Dispersão das medidas: caracteriza a faixa de variação das medidas efetuadas, relativa ao valor médio obtido, onde com uma probabilidade P se situa o valor de uma medida qualquer (neste trabalho, utiliza-se $P = 95\%$).
- Ensaio: conjunto de operações de medição, controle e/ou de verificações funcionais realizadas segundo um determinado plano.
- Ensaio de MCI: conjunto de regimes de operação a que o MCI é submetido, e das verificações funcionais e medições que são realizadas. Tipos:
- de aprovação (aprovar = julgar bom): caracterizam o desempenho básico de um MCI produzido em série para verificar se as obrigações contratuais foram cumpridas.
 - de homologação (homologar = certificar-se de): verificam-se o desempenho de um MCI representativo atende os requisitos da legislação, órgãos fiscalizadores e associações de fabricantes ou usuários.
 - de apreciação técnico-científica (do desempenho, da durabilidade, de emissões, etc): visam a obtenção de informações detalhadas e relevantes acerca do desempenho, durabilidade, e características poluentes de um MCI.
- HC Hidrocarbonetos: presentes na forma de gases emitidos pelos MCI.
- Im Incerteza de medição: corresponde ao erro máximo provável que um módulo ou sistema de medição pode impor ao valor da grandeza a medir.

- Ir Incerteza do resultado (da medição): erro máximo provável que o conjunto de instrumentos e técnicas de medição podem impor ao valor de uma grandeza ou parâmetro determinado experimentalmente, através da medição e controle de outras k grandezas.
- IR Indeterminação do resultado da medição: especifica a faixa relativa à média das medidas (corrigida, se for o caso), dentro da qual se localiza ou varia o valor verdadeiro da grandeza medida.
- MCI Motor a combustão interna: motor térmico cuja combustão se processa no próprio fluido operante.
- Motor Subentende-se no âmbito deste trabalho: motor (de êmbolo) alternativo ou rotativo a combustão interna. Em outros casos especifica-se: motor hidráulico, motor elétrico, motor a vapor, etc...
- NOx Óxidos de nitrogênio, produtos da combustão emitidos pela tubulação de descarga dos MCI.
- pmi Pressão média na câmara de combustão: relativa a um dos cilindros de um MCI.
- Pat Potência de atrito: energia por tempo dispendida para acionar o motor (com o centelhamento/injeção inoperante), numa determinada rotação.
- Pe Potência efetiva: trabalho mecânico por unidade de tempo que o motor é capaz de fornecer, sob determinadas condições de operação (rotação, taxa de alimentação, etc.).

- Pi Potência interna do MCI: potência nas câmaras de combustão, avaliada correntemente através da soma das potências efetiva e de atrito a uma dada rotação.
- Regime Regime de operação de um MCI: conjunto de condições de operação a que um motor é submetido, em especial, sua rotação e torques de operação. Pode ser: fixo, quando controlado de modo a permitir a estabilização térmica do motor, ou variável, quando imposto sem que haja preocupação relativa quanto à estabilização do desempenho ou temperaturas do motor. Também diferencia-se em:
- regime de plena alimentação ("carga"): operação do motor com a máxima taxa de alimentação de combustível que admite.
 - regime parcial de alimentação: operação com regulagem/estrangulamento da capacidade do sistema de alimentação de combustível do motor.
- re Rendimento térmico efetivo: razão entre a potência efetiva fornecida pelo motor e a equivalente potência calorífica associada à vazão mássica do(s) combustível(eis) consumido(s).
- ri Rendimento indicado: razão entre a potência interna do motor e a potência calorífica inerente à massa de combustível consumida por unidade de tempo.
- rm Rendimento mecânico: razão entre a potência efetiva e a potência interna do motor.
- RB Resultado base: número que melhor expressa o valor de uma grandeza física medida. Em geral é a média das medidas adicionada ou multiplicada por fatores de

correção de erros ou de compensação de alterações nas condições de medição.

RM Resultado de medição: na sua forma mais completa é composto por um resultado ou valor básico e pela especificação da faixa onde possa se localizar ou variar o valor verdadeiro da grandeza medida.

SE Sistema de ensaio: conjunto de dispositivos físicos e lógicos utilizados especificamente no ensaio de um produto.

SEMCI Sistema de Ensaio de Motores a Combustão Interna: conjunto de equipamentos, transdutores, atuadores, interfaces, computadores, programas e arquivos de dados, utilizados em ensaios de Motores a Combustão Interna, que propiciem rapidez no acesso a informações tecnológicas e no processamento e análise dos resultados de ensaios.

SEV Sistema de ensaio para veículos: sistema de ensaio constituído a partir de um banco de ensaio de veículos, que utiliza freios de rolos para avaliar o desempenho em conjunto de motores e veículos.

SM Sistema de medição: conjunto de módulos, em geral, um transdutor, uma unidade de tratamento de sinal e um indicador, capaz de converter a ação de uma grandeza física num valor passível de anotação (leitura) ou de registro.

Vazão de gases do cárter: fluxo de gases que passam pela vedação dos anéis ou guias de válvulas e escapam pelo respiro do tanque de óleo (cárter) do motor

(procura-se evitar o uso do termo estrangeiro "blow-by").

- VE Valor efetivo: valor verdadeiro de uma grandeza durante uma operação de medição e/ou controle.
- VFE Valor final de escala: limite superior da faixa de operação de um instrumento.
- VGp Faixa de variação de uma grandeza física. No âmbito deste trabalho, refere-se geralmente à flutuação temporal das grandezas medidas/calculadas em ensaios de desempenho de motores, avaliada a partir do desvio padrão típico do valor da grandeza, em geral para uma faixa de enquadramento de $P = 95\%$ de seus valores efetivos.

1. INTRODUÇÃO

O Motor a Combustão Interna (MCI), que tem assumido um papel fundamental no aperfeiçoamento da qualidade de vida na sociedade contemporânea, teve seu desenvolvimento iniciado com a invenção dos motores Otto (1876) e Diesel (1892) /1/, e efetivado em seguida, de forma quase que inteiramente empírica, de acordo com modismos comerciais do início deste século. Posteriormente, fundamentos científicos estabelecidos em institutos de Pesquisa, em parte fruto do trabalho de acadêmicos /2/, contribuíram para aprimorar o conhecimento acerca do comportamento dos MCI. Paralelamente, em consequência dos trabalhos experimentais realizados, inúmeros procedimentos de ensaios para avaliação de seu desempenho e durabilidade foram estabelecidos. Com a evolução da metodologia de pesquisa, tanto nos meios acadêmicos como nas grandes empresas, o conjunto de procedimentos de ensaio e informações tecnológicas acerca dos MCI, sofreu um processo de

sistematização e passou a constituir, juntamente com os dispositivos físicos dos bancos de ensaio, parte integrante de Sistemas de Ensaio de Motores a Combustão Interna (SEMCI). Estes devem fornecer, basicamente, informações confiáveis acerca do efeito das modificações tecnológicas introduzidas no MCI sobre seu desempenho e durabilidade, visando a otimização do produto. Por outro lado, no âmbito da organização fabril, cabe aos SEMCI desempenhar a tarefa do controle de qualidade dos MCI produzidos em série, os quais devem atender a requisitos mínimos de desempenho, confiabilidade, durabilidade, baixos níveis de ruído e poluição ambiental, etc.

1.1 MOTORES A COMBUSTÃO INTERNA - CONTEXTO ATUAL

No início deste século¹ era bastante equilibrada a disputa entre os motores elétricos, a vapor e do ciclo Otto. Após o motor Otto alternativo já ter-se consolidado como opção preferencial na indústria automobilística e os motores Diesel superarem os concorrentes em inúmeras outras aplicações, foram concebidos uma série de outros MCI baseados nos mais diversos princípios operativos, ainda utilizando gasolina ou óleo diesel como combustível principal. A crise do petróleo reverteu esta situação. Pode-se afirmar que hoje é proposta uma série de combustíveis alternativos, mas dispõe-se de poucos MCI capazes de utilizá-los com eficiência. Não se pode supor que exista, no momento, uma opção tecnológica ótima, por um tipo de motor e um combustível específico. Governos, empresas e sociedade devem estabelecer, em conjunto, métodos e diretrizes para o desenvolvimento das opções mais viáveis.

Para embasar a meta deste trabalho em prestar uma contribuição ao assunto SEMCI faz-se, a seguir, uma breve análise dos princípios de operação e das tendências atuais no desenvolvimento dos MCI mais importantes.

1.1.1 Princípios Operativos dos Motores a Combustão Interna

Não existe um critério universal para classificação ou caracterização dos motores térmicos a combustão devido à multiplicidade de seus princípios de funcionamento e possíveis aplicações. No caso de motores convencionais, não há motivo para se falar, por exemplo, em "motor alternativo de combustão interna de ignição por centelha a álcool", ao invés de, simplesmente motor a álcool. Entretanto, com o objetivo de permitir a distinção entre grupos de motores, uma classificação segundo os princípios operativos mais relevantes e o uso de uma nomenclatura própria é recomendado. Propõe-se a apresentada na figura 1.1.

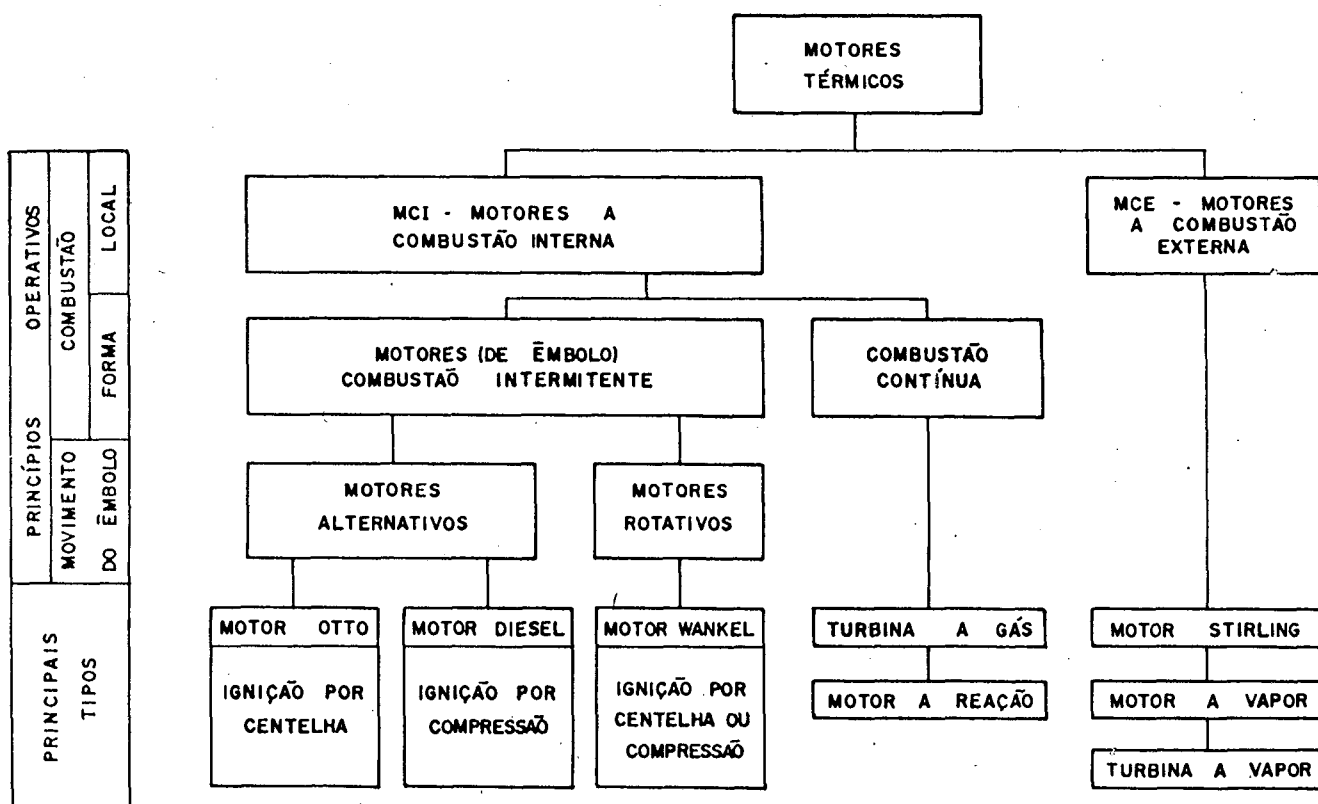


FIG. 1.1 - Princípios operativos e nomenclatura dos Motores a Combustão Interna.

Define-se formalmente que um motor é a combustão interna quando esta se processa no próprio fluido operante /3/. Estes dividem-se em motores a combustão intermitente, nos quais a combustão tem efeito em uma das fases operativas (tempos) do processo de geração de trabalho, e motores a combustão contínua, por exemplo: turbinas a gás e motores a reação. Dentre as turbinas a gás cujo princípio operativo, tipos e aplicações descritos com detalhes em /1/ e /4/, destacam-se as do tipo regenerativo que promovem o aquecimento do ar de admissão através da troca térmica com os gases de descarga, reduzindo a quantidade de calor que deve ser fornecida pela queima de combustível, com o conseqüente aumento de seu rendimento térmico. Já os motores a reação (para propulsão a jato) constituem um grupo muito particular dos MCI, cujo estudo e aplicação interessa em especial ao setor aeroespacial. Os motores a combustão intermitente tem, por sua vez, a combustão provocada por uma faísca ou centelhamento ou pela compressão do fluido operante na câmara de combustão, distinguindo-se assim os motores que operam segundo o ciclo Otto e Diesel, respectivamente. Os citados MCI se dividem ainda em motores alternativos e rotativos de acordo com o movimento do êmbolo no cilindro.

Os motores alternativos destacam-se dentre os demais contribuindo com pelo menos 90% da potência instalada global dos MCI /2/, sendo suas versões mais importantes apresentadas na figura 1.2. Os motores Otto convencionais operam com uma mistura homogênea de ar/combustível no ciclo de admissão. No motor de mistura estratificada parte da câmara de combustão recebe uma mistura ar/combustível mais rica em combustível e o restante da câmara é preenchido pelo ar de admissão ou por uma mistura mais pobre, podendo receber válvulas adicionais para admissão da

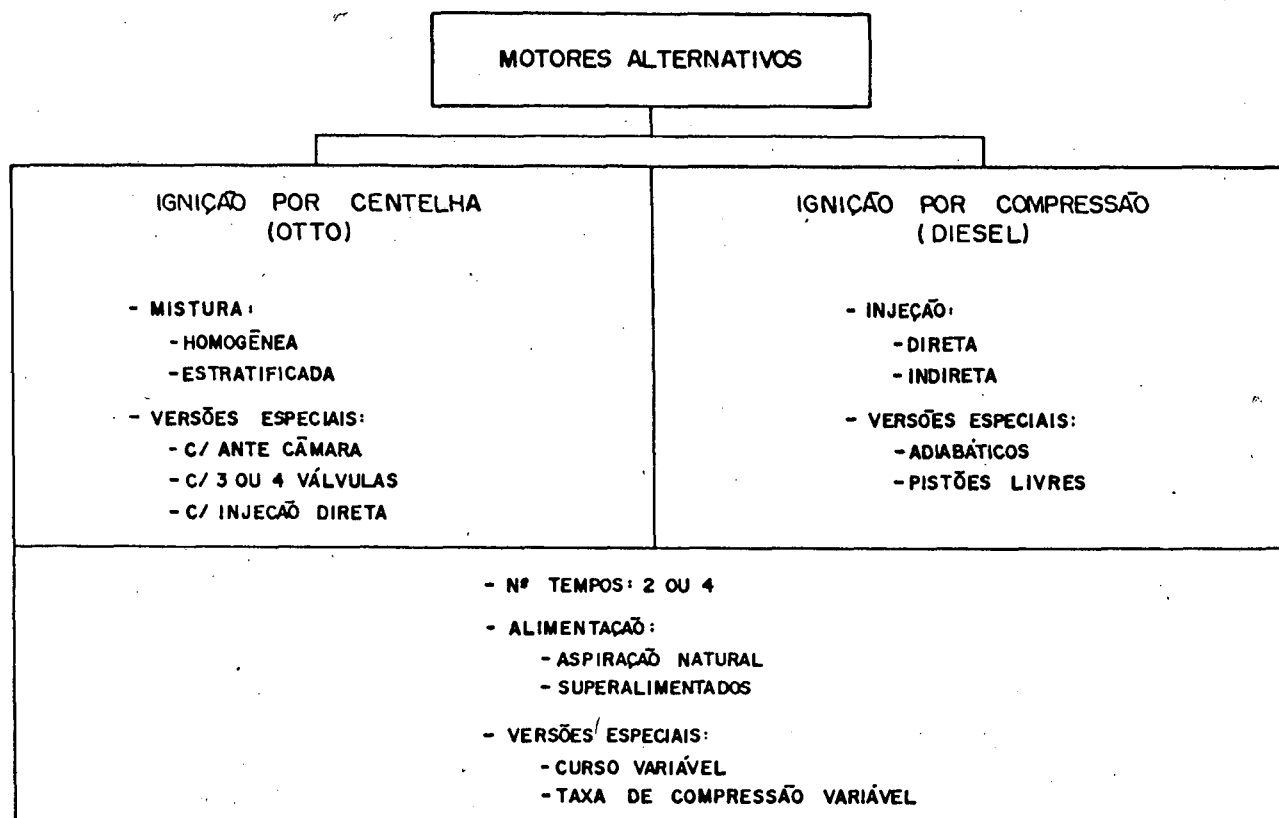


FIG. 1.2 - Principais versões e características dos Motores Alternativos a Combustão Interna.

mistura mais rica e/ou ser dotado de um sistema de injeção direta de combustível em substituição ao carburador. Já nos motores Diesel, sistemas de injeção direta (câmara aberta) ou indireta (com ante-câmara) são sempre utilizados; enquanto a injeção direta oferece maior economia de combustível, a indireta oferece melhores condições de combustão, em uma faixa mais ampla de velocidades angulares /5/. Os motores Otto e Diesel alternativos, além da opção por uma operação com 2 ou 4 tempos, podem ser superalimentados, isto é, receber durante a fase de admissão uma quantidade de ar superior a que receberia normalmente. A turboalimentação, isto é, a alimentação forçada de ar às câmaras de combustão promovida por um compressor acionado por uma turbina movida pelos gases de descarga, pode viabilizar uma apreciável redução do tamanho e peso nos motores convencionais, em especial

no motor Diesel. Conseqüentemente, seu uso neste motor está se tornando praticamente obrigatório /3/.

Dentre as versões especiais de motores alternativos merecem ser citados os motores Diesel adiabáticos que recebem um revestimento cerâmico em suas válvulas, na cabeça dos pistões e no seu coletor dos gases de descarga. Já a instalação de pistão livre pode ser considerada um motor Diesel cujo sistema de biela foi substituído por um sistema de transmissão de gases quentes que movimentam uma turbina a gás acoplada ao eixo principal. Enquanto ambos destinam-se a aplicações comerciais, motores monocilíndricos que possibilitam a variação da taxa de compressão ou o curso do pistão são utilizados normalmente na pesquisa da combustão.

1.1.2 - Tendências no Desenvolvimento dos MCI

A análise das tendências no desenvolvimento dos Motores a Combustão Interna envolve necessariamente as seguintes questões /6/:

- existem sérios competidores que tendem a substituir os motores alternativos a pistão?
- que modificações técnicas devem sofrer estes motores nos próximos 20 anos em função dos combustíveis que estes terão que suportar?

As previsões realizadas por Taylor em 1967 /2/, relativamente ao futuro dos motores alternativos tendem a se confirmar, apesar da crise do petróleo de 1973. Entre eles, citam-se:

- nenhuma mudança radical na forma atual dos motores alternativos parece razoável;
- a turbina a gás é a única séria competidora do motor alternativo;
- as turbinas a gás podem substituir os motores alternativos

de maneira limitada em locomotivas, caminhões pesados e veículos não-rodoviários;

- ainda é duvidoso se a turbina a gás substituirá os motores alternativos utilizados em automóveis, navios convencionais, lanchas e pequenas instalações de baixo custo.

Efetivamente, mesmo considerando a utilização crescente de novos combustíveis, é muito improvável que os motores alternativos venham a sofrer alterações radicais no seu projeto ou que tenham sua liderança hegemônica no emprego em transporte e equipamentos industriais e agrícolas ameaçada até o final deste século. As turbinas a gás serão, por sua vez, mais utilizadas em instalações industriais e marítimas de grande porte (500 kW ou maior), sendo possível que venham equipar veículos pesados (caminhões, bondes) ou de luxo (ônibus de turismo, etc.) /6/.

Entre as opções alternativas de motores que chegaram a despertar certas expectativas quanto ao emprego em veículos rodoviários, destacam-se os motores Wankel e Stirling (combustão externa). Com efeito, no ramo automobilístico as perspectivas dos motores rotativos Wankel pareciam promissoras no início da década passada (1971). Entretanto, como este motor não demonstrou um bom potencial para apresentação de baixo consumo de combustível e nível de emissão de gases, as empresas do setor automobilístico desistiram de fabricá-lo, com exceção de uma empresa japonesa de médio porte /5/. Da mesma forma, as perspectivas do motor Stirling (a combustão externa) neste setor parecem estar restritas a aplicações em ônibus urbanos, em função de seu baixo nível de emissão sonora e capacidade multicomcombustível.

Concluindo, pode-se afirmar que no campo de aplicação veicular, existem expectativas promissoras apenas quanto à utilização de turbinas a gás regenerativas. Estas tem apresentado um rendimento efetivo comparável ao dos motores Diesel requerendo menores despesas em manutenção e lubrificação, sendo provável que, com o aprimoramento da tecnologia de materiais cerâmicos,

venham a apresentar desempenho e economia ainda superior. Porém os mais elevados custos de fabricação das turbinas a gás, devem limitar sua aplicação a veículos pesados, que deverão estar disponíveis no mercado internacional a partir de 1990 /6/.

1.1.3 Tendências no Desenvolvimento de Motores para Veículos Rodoviários

No setor automobilístico, inúmeras modificações estão previstas para os motores convencionais. As principais diretrizes /6, 7/ para o desenvolvimento dos motores Otto preveem o uso de:

- maiores taxas de compressão;
- mistura empobrecida com detecção eletrônica da detonação;
- mistura estratificada com injeção direta de combustível;
- controle eletrônico.

Já para os motores Diesel, em especial os de aplicação em caminhões pesados é prevista /5, 6, 8/ uma crescente implementação de:

- turboalimentação;
- injeção eletrônica;
- isolamento térmico (Diesel adiabático);
- materiais e revestimentos especiais - válvulas e pistões.

Tais desenvolvimentos e implementações requerem a realização de intensivos ensaios experimentais para elaboração de mapas de consumo específico de combustível que possa traduzir o impacto das modificações realizadas, assim como novos ensaios de durabilidade. Paralelamente, nos países em que se pretenda utilizar novos combustíveis, e persistir no estudo e aprimoramento dos motores convencionais, faz-se necessário o estabelecimento de metas prioritárias, devido ao enorme esforço tecnológico requerido e a necessidade da utilização sensata da maioria das novas tecnologias ainda não existentes no auge do desenvolvimento dos motores a gasolina e a óleo diesel, entre os

↑
quais: tecnologia de materiais anticorrosivos, plásticos, cerâmicos, sistemas de injeção de combustível eletrônicos, e sistemas computacionais aplicados à pesquisa experimental (ensaios), projeto e desenvolvimento de motores.

No contexto nacional as diretrizes para pesquisa e desenvolvimento de motores automotivos estabelecidos em /9/ permitem prever uma intensificação nos ensaios de:

a) Motores Otto

- emissões veiculares: com a necessidade de métodos simplificados de medida e de controle de emissões veiculares;
- desenvolvimento de motores e componentes: em especial com análise da combustão e detonação e mapeamento completo do desempenho do motor;
- combustível e lubrificantes: seqüências de ensaios em MCI para teste de óleos lubrificantes, álcoois com diferentes graus de hidratação, gás pobre, metano artificial (biogás) e gás natural.

b) Motores Diesel

- combustíveis convencionais: óleo Diesel de composição variada;
- combustíveis alternativos: englobando dupla injeção álcool/Diesel, injeção de combustível com aspiração simultânea de gás pobre, misturas binárias e ternárias, óleos vegetais e ésteres, uso de álcoois aditivos, etc.
- emissões e aspectos toxicológicos.

1.2 EQUIPAMENTOS E TÉCNICAS PARA ENSAIOS DE MOTORES

O desenvolvimento dos equipamentos e técnicas para ensaios de motores foi inicialmente efetivado pelos próprios fabricantes e institutos de pesquisa. Freio-acionadores elétricos, balanças hidráulicas para medição da força (torque no freio) e rotâmetros

para medição da vazão de combustível eram frequentemente utilizados em laboratórios de motores /2/. Após a 2a. guerra mundial, devido à grande e rápida diversificação das atividades relativas a pesquisa, projeto e desenvolvimento técnico dos MCI os equipamentos para medição e ensaio também tiveram de sofrer melhoramentos. Para isto muitos instrumentos de medição especiais tiveram que ser desenvolvidos dando lugar inclusive a empresas especializadas que ainda hoje tem disponíveis os mais variados instrumentos de medição e análise de MCI /10/.

Em 1965 a SAE publica o primeiro artigo que descreve um sistema de automação computadorizado para bancos de ensaio de motores. Destaca-se neste a iniciativa de um fabricante de motores pelo desenvolvimento, na própria empresa, dos dispositivos de adaptação, interfaces e programas (hardware e software) necessários ao sistema de automação /11/.

A disponibilidade e uso generalizado de microcomputadores, sistemas de aquisição de sinais e instrumentos digitais veio contribuir significativamente para a garantia da qualidade dos resultados de ensaios e, conseqüentemente, dos próprios motores. Constata-se, no entanto, que apesar de toda propaganda existente acerca de instrumentos digitais com mostradores coloridos, múltiplas funções e de "fácil operação", existe ainda muita falta de informações úteis, como por exemplo: descrições detalhadas dos princípios operativos e especificações técnicas claras e coerentes. Na problemática específica da pesquisa experimental de MCI, necessitam-se de técnicas eficientes e de instrumentos de confiabilidade comprovada, para possibilitar o aprimoramento dos SEMCI visando a obtenção de resultados capazes de espelhar mais perfeitamente as alterações de desempenho, obtidas em consequência de uma mudança das condições de regulação do motor e/ou da implementação de uma modificação técnica.

1.3 PROPOSTA DE TRABALHO

A análise das diretrizes da pesquisa de motores, componentes e combustíveis revela a necessidade crescente da realização de ensaios cada vez mais amplos e rigorosos. Por outro lado, na atividade de qualificação de MCI produzidos em série, onde também há necessidade da realização de amplos e rigorosos ensaios de controle de qualidade, destaca-se ainda o fator tempo, que deve ser minimizado.

Com a intensificação das atividades experimentais está sendo requerida uma revisão sistemática da instrumentação, disponível para ensaios e o estudo dos aspectos básicos relativos à automação em SEMCI, pois quando a realização e interpretação da medição, durante um ensaio, deixam de ser efetuadas com a intervenção humana e passam a obedecer critérios lógicos previamente estabelecidos, torna-se imprescindível uma definição clara e objetiva dos métodos de medição, controle e processamento das informações.

Sendo a problemática tecnológica muito abrangente, propôs-se abordar, no âmbito deste trabalho, os seguintes aspectos:

- caracterização de ensaios: métodos, grandezas a medir, condições a controlar, sistemática na utilização de bancos de ensaio e equipamentos auxiliares;
- avaliação dos erros nos sistemas de medição e controle e suas consequências sobre os resultados de desempenho do motor;
- análise dos princípios operacionais e demais características dos instrumentos utilizados para pesquisa e desenvolvimento de MCI;
- realização de ensaios experimentais para qualificação de um Sistema de Ensaio de Motores à Combustão Interna.

Foi necessário, também, dar atenção especial à terminologia utilizada, com dispêndio de considerável esforço para torná-la objetiva, coerente e de aceitação generalizada, visto que no contexto nacional, em que pesem os esforços da normalização vigente, é freqüente a utilização de termos e expressões de interpretação ambígua ou tecnicamente incoerente.

2. ENSAIOS DE MOTORES À COMBUSTÃO INTERNA

Dentre os aspectos mais relevantes a considerar no planejamento de ensaios de MCI, destacam-se:

- o tempo necessário para a obtenção do conjunto de resultados desejados;
- a confiabilidade de resultados de ensaios (validade dos resultados da medição ao longo do tempo).

Com efeito, é sempre desejável minimizar o tempo compreendido entre a preparação dos ensaios e a obtenção dos resultados finais e garantir sua confiabilidade através do estabelecimento de especificações minuciosas. No desenvolvimento de SEMCI, estes dois aspectos - tempo e confiabilidade - devem ser priorizados de acordo com as finalidades dos ensaios a serem realizados. Neste capítulo tratar-se-ão dos assuntos: classificação de ensaios, operações usuais de medição e controle, apresentação dos resultados, análise de métodos de ensaio e da validade dos resultados. Complementarmente, as finalidades e principais requisitos de Sistema de Ensaio de motores para veículos rodoviários serão apresentados.

2.1 ASPECTOS GERAIS

2.1.1 Classificação de Ensaio

Os ensaios de MCI compreendem atividades específicas de qualificação dos motores ensaiados, quanto a suas características de desempenho e confiabilidade/durabilidade. O conceito de desempenho dos MCI, tende cada vez mais a englobar simultaneamente aspectos de sua capacidade em torque, potência, economia de combustível e de controle de emissões de produtos poluentes. No controle de qualidade para detecção de defeitos de

fabricação ou para prevenção do excessivo desgaste de componentes, também é necessária a avaliação de dados de desempenho tão completa quanto requerer o tipo de atividade. Em ambos os casos, é preciso que se considere a finalidade básica do ensaio e das operações de qualificação, utilizada como critério para uma classificação dos ensaios em de:

- a) aprovação: quando referentes a uma revisão geral da qualidade de fabricação para verificar se as obrigações contratuais foram preenchidas. Englobam usualmente a medição de potência efetiva e de consumo de combustível em determinados pontos de operação e verificações funcionais de termostatos, pressostatos, sistema de partida, dispositivos de proteção, alarmes (ex. baixa pressão do óleo lubrificante), etc.
- b) homologação: se dizem respeito ao atendimento a requisitos da legislação, órgãos fiscalizadores e associações de fabricantes e usuários. Exigem normalmente a determinação das curvas de torque, potência efetiva, e do consumo específico de combustível em todo o campo operacional, com controle do índice de fumaça (motores Diesel), e de emissões de gases poluentes (conforme a legislação).
- c) apreciação técnico-científica: quando visam a determinação metódica de grandezas de desempenho, rendimentos do MCI, características poluentes ou a obtenção de informações relevantes acerca de sua durabilidade. Devem ser consideradas alternativas quanto ao uso de diferentes condições de regulagem, relações de compressão, tipos de câmara de combustão, sistema de alimentação de combustível, etc.

Propõe-se e procura-se especificar a finalidade associada ao ensaio, neste trabalho, pois desta forma ensaios de aprovação, ensaios de homologação ou ensaios para apreciação do desempenho ou da durabilidade, bem como sistemas que operacionalizem a realização destes ensaios, podem ser textualmente diferenciados.

2.1.2 Operações de Controle e Medição.

Durante um ensaio propriamente dito são obedecidas sequências programadas de operações de controle e medição de grandezas físicas. As operações de controle visam o estabelecimento das condições de operação do motor, na qual é realizada a medição das grandezas de interesse. Tais condições são estabelecidas através do controle das seguintes grandezas:

- velocidade angular do motor: especificada em rad/s. A mesma grandeza também é denominada rotação, quando expressa o número de revoluções por unidade de tempo. Pode-se utilizar alternativamente a velocidade média do pistão (m/s), especialmente, como base de comparação entre motores de diferentes tipos.
- torque de operação: parâmetro imposto ao motor em regimes parciais de alimentação. Deriva-se do torque a pressão média efetiva (pressão média na câmara de combustão vezes o rendimento mecânico) grandeza independente do deslocamento volumétrico do motor (1,4 l; 1,8 l; etc).
- pressão no coletor de admissão: nos motores a carburação, esta grandeza é proporcional a vazão de combustível consumido, logo pode ser utilizada para controle do regime de alimentação do motor.
- taxa de injeção de combustível, visto que a quantidade de combustível enviada por bombas injetoras, por ciclo operativo (2 ou 4 tempos), às câmaras de combustão (mg/ciclo) é um parâmetro possível de ser controlado.
- pressão dos gases de descarga, visando permitir a simulação dos dispositivos que causam queda de pressão na tubulação de descarga.
- temperaturas do óleo lubrificante e do fluido de arrefecimento, pois representam condições térmicas de operação do motor.
- índice de fumaça (Diesel), que não deve ultrapassar o valor

estabelecido pelo fabricante ou pelos métodos de ensaio.

- densidade do ar de admissão (condições do ar): pressão, temperatura e umidade do ar admitido pelo motor.

Dentre as grandezas associadas especificamente às condições da combustão destacam-se:

- as temperaturas na câmara de combustão, por exemplo, a temperatura da vela de ignição (Otto) e a temperatura dos gases formados na combustão.
- a pressão na câmara de combustão, utilizada para avaliação de rendimentos internos do MCI ou de solicitações mecânicas a ele impostas.

Nos ensaios sob regime fixos de operação, a medição do consumo de combustível e do torque, permite obter os seguintes parâmetros de desempenho associados às grandezas cujas designações e aspectos relevantes são apresentados abaixo :

- Potência efetiva: é o valor proporcional ao produto do valor médio do torque pelo valor médio da velocidade angular do eixo de transmissão do torque, segundo definição da ISO-3046/I. O torque efetivo associado a esta potência a plena alimentação especifica sua capacidade de suportar solicitações de carga.
- Consumo de combustível: equivalente à massa de combustível consumida pelo motor por unidade de tempo nas condições de operação do motor declaradas.
- Consumo específico de combustível: é a razão entre o consumo de combustível e a potência efetiva acima definidos, e por conseguinte, é o principal parâmetro para apreciação comparativa do rendimento térmico de MCI.

Por sua vez, destaca-se a medição de grandezas associadas à verificação de defeitos ou desgastes em peças fundamentais dos motores alternativos:

- consumo de óleo lubrificante: a quantidade de óleo que escapa à vedação dos anéis do pistão, sendo queimado e eliminado pelos gases de descarga é uma medida representativa na avaliação da confiabilidade e durabilidade destes componentes do motor.

- compressão no cilindro: a medição da máxima pressão num cilindro durante uma interrupção momentânea da injeção de combustível/centelhamento permite verificar o estado operacional dos anéis do pistão e válvulas na câmara de combustão.
- vazão de gases do cárter: a mistura de gases da combustão que passam pelos anéis de vedação ou guias de válvulas e vapores de óleo formados no cárter contém uma alta porcentagem de hidrocarbonetos, e por isto são usualmente aspirados por um tubo ligado ao carburador/ou coletor de admissão e posteriormente queimados na câmara de combustão. Este processo também recebe o nome de "Blow-by", e a medição da vazão dos gases que se acumulam no cárter é importante na verificação de defeitos e desgaste de peças fundamentais do MCI (anéis, pistões e suas guias, etc).

Por outro lado, as características poluentes de motores veiculares necessitam ser determinadas através de ensaios que reproduzam suas condições efetivas de operação. Para tanto, devem ser reproduzidos em bancos de ensaio, ciclos de tráfego urbano ou rodoviário que permitam, em especial, uma avaliação realista das emissões de:

- Monóxido de carbono (CO) - gás tóxico devido a sua alta afinidade com a hemoglobina do sangue. A formação de CO se deve a falta de oxigênio para combustão, na operação do motor com misturas ricas em combustível/ar (caso dos motores Otto e dos motores Diesel com excesso de fumaça).
- Óxido de Nitrogênio (NOx) - os óxidos de nitrogênio (NOx) não são diretamente tóxicos, mas reagem com os raios ultravioletas do sol formam o ácido nítrico que produz irritações nos olhos fazendo-os lacrimejar.
- Hidrocarbonetos (HC) - não são gases tóxicos, porém, quando sua porcentagem na atmosfera é muito alta eles dão origem a uma reação química que além de ter odor desagradável, também provoca irritação nos olhos.

- Acetaldeídos: compostos emitidos por motores a álcool, com estudos acerca de seus efeitos toxicológicos recentemente intensificados /9/.

No Brasil, já foram propostos alguns métodos para avaliação de emissões de motores a álcool /12/ e para a minimização de emissões de motores em geral, a partir de sua regulagem ótima /13/, sendo sugerida a implementação de instrumentos de baixo custo para o controle e fiscalização de emissões. Consequentemente, medidas mais rigorosas para o controle de emissões veiculares, pelo menos em centros urbanos, já deveriam estar sendo gradativamente implementadas.

2.1.3 Apresentação dos Resultados.

Para apreciação dos resultados de desempenho de MCI utilizam-se gráficos bidimensionais ou diagramas especiais representando suas curvas características de desempenho. A apresentação de grandezas como a pressão média efetiva, o consumo específico de combustível no eixo das ordenadas e da velocidade do êmbolo, rotação ou potência relativa (% do valor máximo) no eixo das abcissas é altamente recomendada por serem estas razoavelmente independentes do tamanho do(s) cilindro(s) do motor /2/ e portanto, permitirem a comparação direta entre motores diferentes.

A figura 2.1 reproduz o modelo de diagramas utilizados para apresentar resultados de desempenho: potência efetiva (líquida ou bruta) e consumo de combustível (família de curvas com rotação constante). Estes diagramas, que normalmente apresentam grandezas reduzidas às condições atmosféricas de referência, fazem parte da documentação técnica exigida pela legislação internacional. Para apreciação mais detalhada do desempenho podem ser utilizados diagramas de planos cotados, como o reproduzido na figura 2.2, contendo curvas do consumo específico de combustível e do índice de fumaça de um motor Diesel. Útil para análise comparativa de

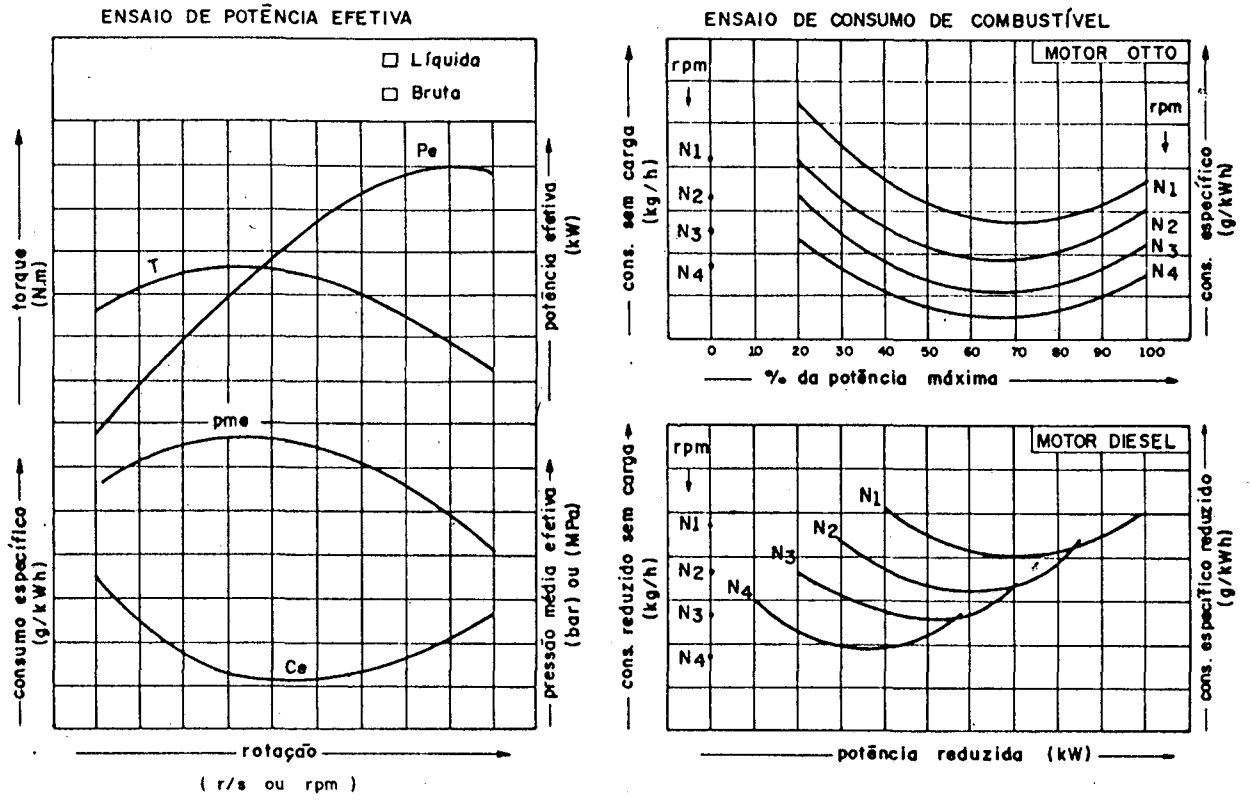


FIG 2.1 - Gráficos utilizados na apresentação de grandezas de desempenho dos MCI.

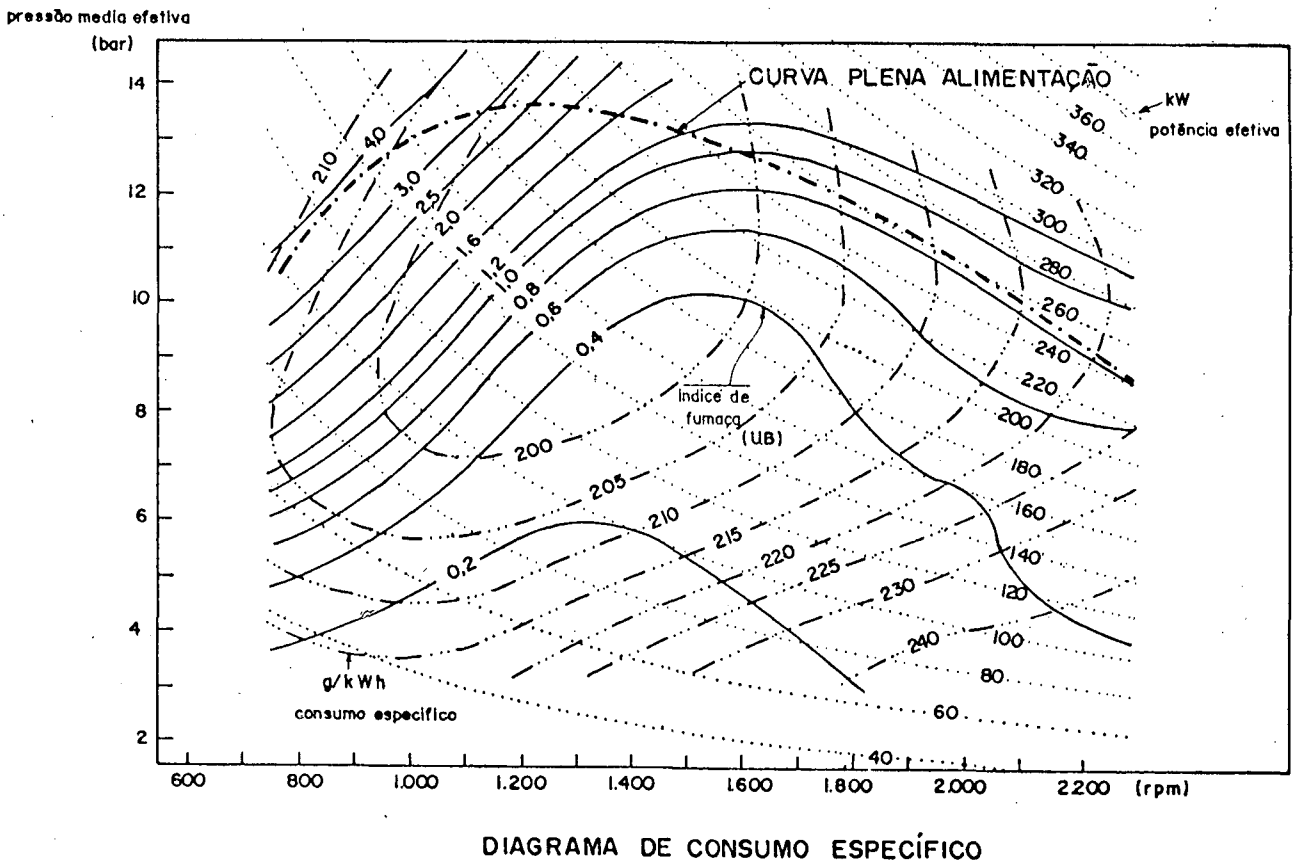


FIG. 2.2 - Diagrama de consumo específico de combustível e índice de fumaça de um motor Diesel.

seu desempenho, através dele é possível, por exemplo, verificar se a região de operação com mínimo consumo específico é extensa (no exemplo 200 g/kWh ou 43% de rendimento efetivo), sem que os índices de fumaça sejam elevados. Destacam-se por fim, os diagramas indicados para análise do processo de combustão em MCI.

A obtenção destes baseia-se na medição da pressão numa câmara de combustão, associada ao ângulo de manivela do seu respectivo pistão. A avaliação da evolução desta pressão fundamenta a análise termodinâmica do processo de combustão, através da qual calculam-se, entre outras grandezas, a taxa de liberação de calor e a quantidade de calor liberado no interior das câmaras de combustão do motor (fig. 2.3).

EVOLUÇÃO DO CALOR LIBERADO PELA COMBUSTÃO

EVOLUÇÃO DA PRESSÃO NA COMBUSTÃO

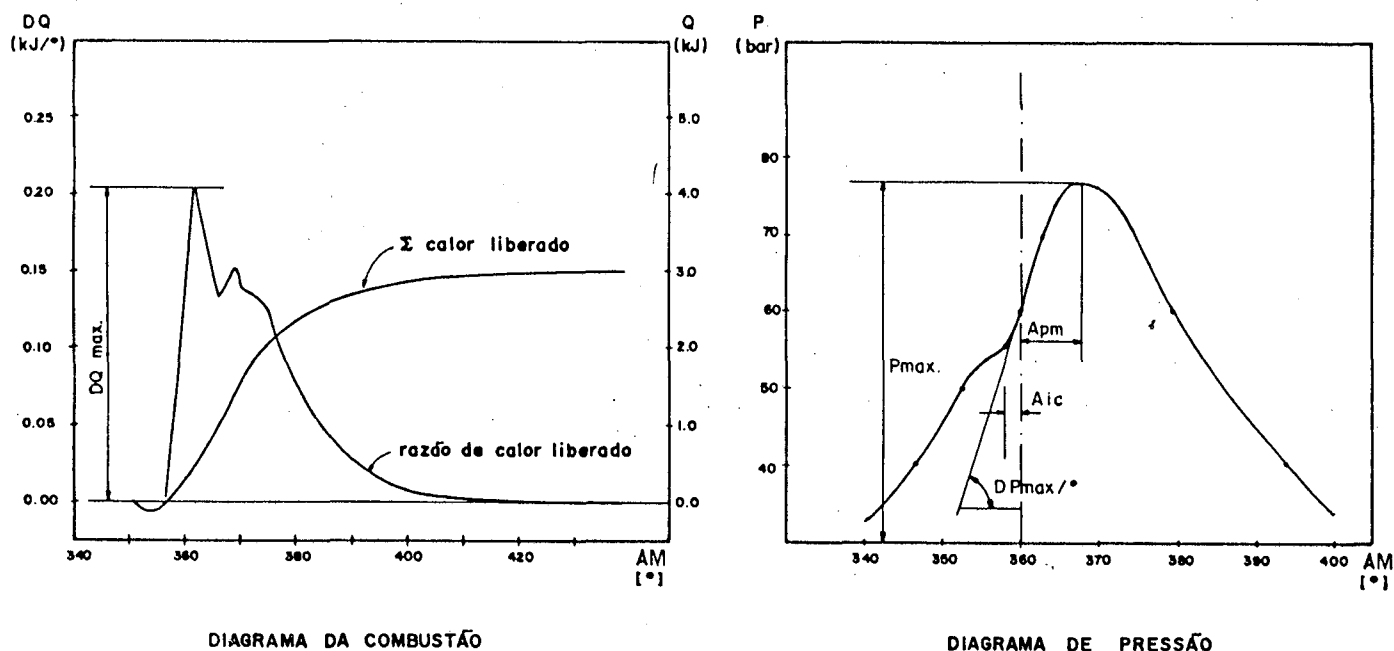


FIG. 2.3 - Diagramas para análise dos processos de combustão de MCI.

Na comparação da evolução do processo de combustão de uma série de combustíveis ou motores distintos as seguintes grandezas são correntemente apreciadas:

- Pmax .. pressão máxima na câmara de combustão
- Apm ... ângulo da manivela associado à Pmax

- Aic ... ângulo de início da combustão
- DPmax.. máxima taxa de elevação da pressão
- DQmax.. máxima taxa de liberação de calor
- Q(x)... calor liberado até x graus de ângulo da manivela.

2.2 ANÁLISE DE MÉTODOS DE ENSAIOS

O padronização dos procedimentos na preparação, e execução de ensaios propicia economia de tempo e garantias quanto à qualidade dos resultados. Em ensaios para aprovação e homologação de MCI, em especial, utilizam-se especificações de métodos de ensaio estabelecidos pela normalização técnica, destacando-se entre eles os métodos da norma ISO e os métodos da tradicional SAE para motores veiculares (fig. 2.4). Juntamente com os demais métodos de ensaio de interesse no âmbito deste trabalho, quais sejam DIN-70020 e NBR-5484, tem suas especificações analisadas a seguir.

TIPO DE MCI	APLICAÇÃO	NORMAS	ENSAIOS: ESPECIFICAÇÕES
ALTERNATIVOS DE USO GERAL	INDUSTRIAL	ISO-3046 / I	CONDIÇÕES DE REFERÊNCIA APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS
	MARÍTIMA	ISO-3046 / II	MÉTODOS DE ENSAIO
	FERROVIÁRIA	ISO-3046 / III	TÉCNICAS DE MEDIÇÃO
	FLUVIAL	ISO-3046 / IV	REGULAÇÃO DE VELOCIDADE
	OUTRAS	ISO-3046 / V	VIBRAÇÕES TORSIONAIS
		ISO-3046 / VI	LIMITAÇÃO DE VELOCIDADE
VEICULARES	AUTOMÓVEIS UTILITÁRIOS CAMINHÕES	ISO-1585	POTÊNCIA LÍQUIDA
		ISO-2534	POTÊNCIA BRUTA
		SAE - J1349	POTÊNCIA(S) EFETIVA (S)
		SAE - J1312	CONSUMO DE COMBUSTÍVEL
	MOTOCICLETAS E MOTONETAS	ISO-4106	DESEMPENHO EM PLENA ALIMENTAÇÃO
	TRATORES AGRÍCOLAS	ISO-2288	

FIG. 2.4 - Principais normas internacionais relativas a ensaios de Motores a Combustão Interna.

2.2.1 Especificações Gerais

Os métodos de ensaio para motores de veículos rodoviários (ISO-1585, ISO-2534, DIN-70020, SAE-J1349, SAE-J1312, ABNT-NBR-5484), contém relevantes informações acerca de ensaios que visem a determinação das curvas de desempenho de motores Otto ou Diesel, bem como orientam a elaboração da documentação técnica e protocolar do ensaio, necessária à homologação ou apreciação técnico-científica dos motores veiculares.

De modo geral, os mencionados métodos delegam ao fabricante do motor a ensaiar a competência quanto ao estabelecimento de especificações relativas à regulação do motor, características do combustível e do lubrificante a utilizar, bem como dos limites de temperaturas de operação do motor (água, óleo, etc.).

Por outro lado, os métodos propriamente ditos devem conter descrições claras e coerentes quanto a:

- acessórios do motor a ensaiar: essenciais a sua operação assistida, no caso do motor básico (ensaio de potência bruta), e necessários ao seu funcionamento autônomo no veículo, quando do motor completamente equipado (ensaios de potência líquida).
- operações de medição e controle: grandezas a medir e controlar, erros admissíveis na sua medição e procedimentos básicos de medição e controle.
- ajuste de resultados às condições atmosféricas de referência, com definição dos métodos e algoritmos a utilizar.
- documentação técnica e formas de apresentação dos resultados do ensaio: relatórios e gráficos.

As novas versões de métodos de ensaio já apresentam mínimas diferenças, quanto à especificação dos acessórios do motor a ensaiar, no entanto algumas diferenças tradicionais permanecem, como por exemplo a apresentação da potência líquida (DIN) e da potência bruta (SAE) conforme o método de ensaio, nas especificações técnicas do motor. As principais diferenças efetivas entre os mencionados métodos são encontradas nas

especificações metrológicas e métodos de ajuste de resultados que devem ser adequadamente compatibilizadas com o intuito de se chegar, futuramente, a um consenso comum.

2.2.2 Especificações para a Medição e Controle

Como orientação básica para a seleção de sistemas de medição e para calibração e ajustagem de seus módulos principais deveriam ser estabelecidas especificações quanto à indeterminação do resultado, admissíveis na medição e no controle de grandezas do ensaio. No entanto, as especificações normalizadas referem-se mais freqüentemente à incerteza de medição admissível para as grandezas do ensaio (através do termo "precisão dos instrumentos"), apresentadas na figura 2.5.

GRANDEZAS A MEDIR		INCERTEZA DE MEDIÇÃO ADMISSÍVEL				
		ISO - 1585	ISO - 2534	SAE - J1349	SAE - J 1312	ABNT - NBR - 5484
TORQUE *** [1]		±1%	±0,5%	±0,5%	±0,5%	±0,25%
ROTAÇÃO EFETIVA		±0,5%	±0,5%	±0,5%	±0,25%	±0,25%
CONS. COMBUSTÍVEL		±1%	±1%	±1%	±1%	±1%
PRESSÕES	BAROMÉTRICA	±100 Pa	±70 Pa	±100 Pa	±70 Pa	±70 Pa
	VAPOR D'ÁGUA	±100 Pa [2]	-	±100 Pa [2]	-	-
	AR ADMISSÃO	±50 Pa	-	-	±25 Pa	±20 Pa [3]
	GASES DESCARGA	±200 Pa	±25 Pa	-	±340 Pa	±270 Pa
TEMPERATURAS	AR ADMISSÃO	±2 K	±1 K	±1 K	±1 K	±1 K
	BULBO SECO	-	-	-	±0,3 K	±0,5K
	BULBO ÚMIDO	-	-	-	±0,3 K	±0,5K
	NÃO CITADAS	-	-	±1 K	< 204°C ± 1°C > 204°C ± 5°C	< 200°C ± 1°C > 200°C ± 1%

[1] REFERÊNCIAS: SAE = % TORQUE MÁXIMO DO MOTOR; ISO-2534 E NBR 5484 = VFE DO SISTEMA DE MEDIÇÃO;
ISO-1585 = TORQUE EFETIVO

[2] ESPECIFICAÇÃO IMPLÍCITA À DEFINIÇÃO DA PRESSÃO BAROMÉTRICA DO AR SECO.

[3] PRESSÃO NO FILTRO DE AR E TUBULAÇÕES. NO COLETOR DE ADMISSÃO ADMITE-SE ±270 Pa (2,0 mm Hg).

FIG. 2.5 - Incertezas admissíveis para Sistemas de Medição especificadas por métodos de ensaio de motores veiculares.

Evidencia-se a falta de uma referência comum na especificação das incertezas de medição do medidor de torque, fundamental para o estabelecimento de requisitos para seleção ou calibração de seu sistema de medição - SM, bem como para garantia dos resultados de potência efetiva e consumo específico de combustível. Recomenda-se que os erros máximos admissíveis neste caso específico, sejam referidos ao valor do torque máximo do motor de menor porte a ser ensaiado, tendo em vista a importância da especificação técnica deste valor. Quando aos demais valores especificados para os SM de rotação, consumo, pressão e temperaturas, há uma relativa concordância, exceção feita aos $\pm 2K$ ao invés de $\pm 1K$ para a temperatura do ar de admissão, no método ISO-1585.

Por outro lado, para o controle das condições de operação foram estabelecidas especificações quanto às máximas variações admissíveis nos valores observados de torque, rotação, consumo de combustível e temperaturas e de limites para o controle da temperatura do combustível, óleo e fluido de arrefecimento, como ilustra a figura 2.6.

As especificações da SAE são as mais completas e rigorosas, portanto recomendáveis quando a preocupação com a confiabilidade dos resultados é relevante. Embora os métodos em geral, estabeleçam no mínimo duas leituras de valores instantâneos para cada grandeza, na prática é recomendável a realização de várias medidas das grandezas de interesse, com intervalos de poucos segundos, durante um significativo período de operação estabilizada, para que se obtenham valores significativos a serem utilizados no cálculo da potência efetiva e demais grandezas.

2.2.3 Ajuste às Condições de Referência

Uma vez que o desempenho dos motores Diesel e Otto é afetado pela pressão barométrica, temperatura e umidade do ar de admissão, são estabelecidas condições de referência padronizadas

REF	GRANDEZAS	ESPECIFICAÇÕES DOS MÉTODOS				
		ISO-1585	ISO-2534	SAE-J1349	SAE-J1312	NBR-5484
VARIÁVEIS ADMISSÍVEIS [1]	TORQUE	±2%	±2%	±1%	±1%	±1%
	ROTAÇÃO	±1%	±1%	±1%	±1%	±1%
	CONSUMO DE COMBUSTÍVEL	±2%	±2%	-	±1%	±1%
	TEMPERATURAS	-	-	±2°C	±1%	-
	TEMPO ESPECIFICADO (min) [1]	1	1	2	2	1
CONTROLE DE TEMPERATURAS [2]	t. ÓLEO LUBRIFICANTE	[3]	[3]	-	-	-
	t. COMBUSTÍVEL	[3]	[3]	40 ± 3°C	38 ± 5°C	-
	t. ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO	80 ± 5°C	80 ± 5°C	F ± 3°C	88 ± 5°C	80 ± 5°C
	t. AR DE REFRIGERAÇÃO	F ⁰ ₋₂₀ °C	F ⁰ ₋₂₀ °C	-	-	-
	t. ÁGUA E ÓLEO NO MOTOR ACIONADO [4]	-	-	M ± 3°C	M ± 3°C	-

[1] - MÁXIMA VARIAÇÃO DO VALOR EFETIVO DESTAS GRANDEZAS NO TEMPO ESPECIFICADO.

[2] - VALOR NOMINAL ESTABELECIDO PELO FABRICANTE - F.

[3] - LIMITES ESTABELECIDOS PELO FABRICANTE.

[4] - VALORES MEDIDOS NO ENSAIO COM MÁXIMO TORQUE - M.

FIG. 2.6 -- Condições especificadas por métodos de ensaio de motores veiculares.

que representam uma base comum para comparação de desempenho dos motores ensaiados.

Após as últimas revisões realizadas, a maioria dos métodos passou a adotar condições idênticas ou aproximadamente iguais às apresentadas na ISO-1585/1982, abaixo especificadas:

- temperatura do ar de admissão..... 25 ° C
 - Pressão barométrica do ar seco..... 101,325 kPa
 - Pressão do vapor d água (umidade absoluta)..... 1 kPa
 - Densidade do ar seco..... 1.1572 kg/m³
- (referência SAE-J1349).

As normas DIN-70020 e ISO-2534 adotam como pressão barométrica de referência - 100 kPa, desprezando a influência da umidade no desempenho de motores Otto ou Diesel, para temperaturas do ar entre 15 e 35 ° C. No entanto para países de

clima tropical e úmido como o Brasil, é mais recomendável seguir as citadas especificações da ISO-1585, como propõe o projeto de método de ensaio 5.02.03-001 da Comissão de Estudo de Motores de Combustão Interna da ABNT.

Para compensar a alteração do desempenho do motor quando as condições no ensaio diferem das de referência, é necessário transformar os valores observados da Potência Efetiva e Consumo de Combustível, em valores correspondentes às condições atmosféricas de referência, ou seja reduzi-los a tais condições. Os métodos de redução consideram que o valor de uma das seguintes grandezas permaneça constante, apesar das variações das condições do ar de admissão:

- razão ar/combustível, ou
- vazão de combustível (ou taxa de injeção de combustível).

Admite-se que quando a razão ar/combustível permanece constante o rendimento indicado não se altera. Conseqüentemente, a potência interna desenvolvida pelo motor é proporcional somente à densidade do ar admitido e à eficiência volumétrica do motor, em condições de operação estabilizada. Desta forma a variação da potência efetiva do motor devido a sua operação com o ar fora das condições de referência pode ser compensada através de fatores que ponderam os efeitos da variação relativa da pressão do ar seco e sua temperatura na admissão, e que seguem a expressão geral:

$$f_{a,r} = \left(\frac{pbr}{pbt - k.pva} \right)^m \cdot \left(\frac{tad + 273}{tr + 273} \right)^n \quad (2.1)$$

onde

- f_a = fator atmosférico
- f_r = fator de redução
- pbr = pressão barométrica de referência
- pbt = pressão barométrica total
- pva = pressão parcial de vapor d'água
- tad = temperatura do ar de admissão - °C
- tr = temperatura de referência - °C

k = define a consideração ou não da umidade do ar
(\emptyset ou 1)

m, n = expoentes especificados pela normalização (fig. 2.7).

Parâmetros		Método de Ensaio			
		ISO - 1585	SAE	DIN 70020 ^[1]	NBR-5484
R E F.	pbr	99 K Pa	99 K Pa	100 K Pa	736 mmHg
	tr	25 °C	25 °C	25 °C	30 °C
E X P O N E N T E S	OTTO	m	1,2	1	1
		n	0,6	0,5	0,5
	Diesel ^[2]	m	1	1,1	0,65
		n	0,7	1,2	0,5
	Diesel- -TURBO	m	0,7	0,6	0
		n	1,5	0,6	0
Efeito Umidade		k	1	1	0

[1] Equivalente a ISO-2534

[2] De aspiração natural ou sobrealimentação mecânica

[3] Valores ISO-1585 equivalem ao projeto PB-5.03-001 da ABNT

FIG. 2.7 - Parâmetros para cálculo de fatores para ajuste do desempenho de MCI às condições de referência

Para se calcular a potência efetiva reduzida às condições atmosféricas de referência, segundo o método da razão ar-combustível constante é considerada sua relação com a potência interna do motor através das fórmulas:

$$P_i = P_e + P_{at}$$

$$P_e = P_i \cdot f_a - P_{at}$$

$$P_{er} = P_e \cdot (f_a/r_m + (1 - 1/r_m)) \quad (2.2)$$

onde

P_e potência efetiva observada

Per... potência efetiva reduzida
 Pi... potência interna
 Pat... potência de atrito
 rm... rendimento mecânico

Ou diretamente através do fator de redução - fr:

$$Per = Pe \cdot fr \quad (2.3)$$

onde fr é calculado através da fórmula 2.1, com expoentes tais que $fr \sim fa/rm + (1 - 1/rm)$.

Nos motores Diesel, que por sua vez, usualmente operam com taxa de injeção de combustível constante (limitações fixas da bomba injetora) a razão ar/combustível não permanece constante. Neste caso, para se reduzir sua potência às condições de referência é preciso avaliar experimentalmente os efeitos da variação da razão ar/combustível para cada ponto de operação (curvas de potência x densidade do ar) /14/. Os métodos ISO e SAE propõem alternativamente que os efeitos da variação das condições ambientais, expressos por fa, sobre a potência do motor (operando com taxa de injeção constante), sejam ponderados em função da influência da razão ar/combustível, através do parâmetro fator do motor-fm, segundo a fórmula:

$$fr = (fa)^{f_m} \quad (2.4)$$

onde fm, é dado por:

$$\begin{aligned} f_m &= 0,036 \cdot qc - 1,14, \text{ se } 40 < qc < 65 \text{ mg/(l.ciclo)} \\ f_m &= 1.2 \text{ se } qc > 65 \text{ mg/(l.ciclo)} \\ f_m &= 0.3 \text{ se } qc < 40 \text{ mg/(l.ciclo)} \end{aligned}$$

sendo

qc a taxa específica de injeção em
 (mg combustível)/(l de ar.ciclo operativo).

2.3 PROCEDIMENTO DE ESTABELECIMENTO DOS RESULTADOS DE ENSAIO

No contexto atual já é importante poder distinguir, com segurança, alterações inferiores a 1% no desempenho de MCI. Para tanto faz-se necessário que se tomem providências que assegurem a validade dos resultados de ensaios, o que é diretamente dependente do:

- uso de métodos de ensaio adequados,
- otimização no controle das condições de operação do motor,
- minimização dos erros na medição de grandezas básicas, como torque e consumo de combustível.

Paralelamente, há necessidade de um melhor aproveitamento dos dados experimentais, tanto para análise e diagnóstico do motor, como para elaboração de modelos do comportamento do MCI sob operação estabilizada e/ou sob operação transiente /15/.

Dentre os muitos aspectos a serem analisados, focaliza-se na sequência, métodos e considerações que facilitam a avaliação da influência de erros de medição e de controle sobre os resultados de ensaios de MCI sob regime de operação estabilizada.

2.3.1 Procedimento Geral.

O resultado de medição de uma grandeza física é dado, genericamente, por /16/:

$$RM = RB + IR \cdot |U_{GF}| \quad (2.5)$$

onde

- RM - resultado da medição de uma grandeza física-GF
- RB - resultado base, número que melhor expressa o valor da grandeza física medida (média das medidas corrida).

IR - indeterminação do resultado da medição - faixa relativa a RB dentro da qual se localiza ou varia o valor verdadeiro da grandeza medida.

U_{GF} - unidade da grandeza física.

A IR, especialmente nas grandezas de desempenho de um MCI, tem como componentes a:

- Incerteza de medição- I_m , referente ao erro do(s) sistema(s) de medição, caracterizando o erro máximo provável que pode ocorrer na medição.
- a não constância da grandeza a medir, referente a variações admitidas pelo(s) sistema(s) de controle(s) ou variações provocadas por fatores diversos, e que podem ser caracterizadas, respectivamente, pela incerteza no controle- I_c das grandezas consideradas, ou através da observação da flutuação temporal da grandeza- V_G .

Uma vez definidas suas componentes, pode-se estabelecer a seguinte expressão para a indeterminação de resultados da medição:

$$IR = I_m + I_c \text{ ou } V_G$$

Ao se medir uma grandeza física, em geral pode-se apenas avaliar o valor total da interminação do resultado da medição uma vez que a variação do valor das medidas pode ser provocada tanto por erros aleatórios do sistema de medição, como pela constância da grandeza medida. Neste caso:

$$IR = \bar{r} (I_m + \Delta M_{\text{máx}})$$

onde

ΔM_{max} - Máximo desvio típico observado em relação ao valor das medidas.

Im - Incerteza de Medição, adicionada por se supor desconhecida a parcela de erros sistemáticos do SM /16/.

ou

$IR = \mp \Delta M_{\text{máx}}$, quando erros sistemáticos do SM forem conhecidos e eliminados.

Se também for conhecido o desvio padrão dos valores medidos (S), pode-se, no tempo de observação considerado, calcular a indeterminação como:

$$IR_p = \mp (2.S) \text{ (com 95\% de probabilidade)} \quad (2.6)$$

onde IR_p - indeterminação provável do resultado.

S - desvio padrão de várias medidas (> 30).

Por exemplo, o resultado da medição torque-T, uma vez avaliada a média e o desvio padrão das medidas do torquímetro, poderia ser apresentado mais formalmente, por:

$$RM(T) = MM(T) \mp (2.S(T) + Im \text{ (do torquímetro)})$$

onde: RM(T) - resultado da medição do torque,

MM(T) - média das medidas do torque,

S(T) - desvio padrão das medidas do torque, observado durante 1 minuto, por exemplo.

O esforço no desenvolvimento tecnológico dos instrumentos de medição e controle deve ser empenhado na minimização das parcelas de incerteza que compõem a indeterminação do resultado de medição.

Por sua vez, uma grandeza física ou um parâmetro-P pode ser calculada a partir de k grandezas físicas-G_i determinadas

experimentalmente através da medição, caso das grandezas de desempenho de MCI. Retomando o conceito de resultado de medição, deve-se considerar que desta feita, tem-se:

$$R_{Mc} = R_{Bc} \mp IR_p$$

onde R_{Mc} - resultado da medição para a grandeza calculada.

R_{Bc} - resultado base calculado a partir dos R_{Bi} das grandezas medidas.

IR_p - indeterminação ou variação máxima provável relativa à grandeza, calculada pela teoria de combinação de erros, respeitando-se as dependências dos resultados das grandezas medidas, ou avaliada experimentalmente.

Em função da generalização envolver um grande número de fatores e ser complexa, em especial quando duas ou mais grandezas são fisicamente dependentes foram reunidos procedimentos de análise e combinação de erros, específicos para aplicação na análise da validade e de variações dos resultados de ensaios de motores a combustão interna.

2.3.2 Análise dos Resultados de Ensaios de MCI

Em função de sua utilidade para apreciação do desempenho de um MCI, o estudo restringe-se às seguintes grandezas físicas:

- Potência efetiva - P_e
- Consumo de combustível - C_b
- Consumo específico de combustível - C_e
- Pressão média na câmara de combustão - p_{mi} .

É necessário esclarecer que as grandezas de desempenho de um motor a combustão interna, devem ser referidas às condições do ar admitido pelo motor durante o ensaio. Comparações sem restrições dos valores das grandezas especificadas somente podem ser feitas

se estes forem referidos às mesmas condições do ar de admissão /14/.

Como passo inicial desta análise, foram especificadas as grandezas independentes que contribuem para o cálculo e/ou afetam de alguma forma as grandezas de desempenho já citadas, bem como assinaladas as prováveis parcelas significativas da indeterminação de cada grandeza específica, conforme ilustra o quadro da figura 2.8.

Para fins da estimativa e combinação de erros, não se costuma considerar erros grosseiros, ou decorrentes da falta de atenção no estabelecimento e monitoração das condições do ensaio. No entanto, para se estabelecerem as condições de operação do MCI, é sempre necessário se utilizar de instrumentos cujo

Grandezas determinadas		Grandezas medidas		Fontes / componentes da IR		
Referidas	Observadas	Símbolo	Denominação	Incerteza		Variações inerentes
				medição	controle	
Pe(r) Potência Efetiva (referida)	Pe Potência Efetiva	T	Torque	X		X
		R	Rotação	O	X	X
	Cb Consumo de combustível	Vc	Vazão mássica de combustível	X		X
		T,R	Regime de operação		X	O
	fr Fator de redução (ds condições de referência)	tad	temp. do ar admissão	O	X	O
		pbr	Pressão barométrica	O	X	
		pva	Pressão vapor de água	O	X	
		tbs	temp. de bulbo seco	O	X	
		tbu	temp. de bulbo úmido	O	X	
		fm	fator do motor (Diesel)	O		
Ce(r) Consumo Específico (referido)	pmi	AM	Ângulo de manivela	X		
		pc	Pressão na câmara de combustão	X		X

[1] Normalmente significativa - X; eventualmente significativa - O

FIG. 2.8 - Fontes de indeterminação dos resultados de desempenho.

desempenho é afetado por incertezas de seus módulos de medição, e de controle, se for o caso. Para uma boa caracterização da incerteza de medição, erro máximo provável que um SM pode impor ao valor da grandeza medida, ela deve ser associada a:

- um valor fixo na faixa de operação do sistema de medição, correntemente o valor final de escala-VFE. Por exemplo se um tacômetro para até 10.000 rpm apresenta um erro máximo de ± 10 rpm, $I_m = \pm 0,1\% \text{ VFE}$ (10.000 rpm).
- valores efetivos das medidas. Por exemplo, uma balança com uma incerteza de medição de $\pm 0,5$ g para um valor efetivo - VE de 100 g ($\pm 0,5\% \text{ VE}$).
- valores com erros sistemáticos corrigidos. Quando for disponível a curva ou tabela de erros do sistema de medição, os erros sistemáticos podem ser corrigidos. Neste caso a incerteza de medição pode se limitar a uma faixa de dispersão das medidas do SM, também associada ao termo repetibilidade.

Para grandezas tipicamente controladas, nos ensaios sob operação estabilizada, a incerteza no controle deve expressar o maior erro que o controlador admite após ter-se atingido a estabilização do valor médio da grandeza controlada, avaliável através da diferença entre o valor medido e o valor desejável a ser imposto a grandeza controlada.

Por sua vez, instabilidades na operação do motor podem ser associados a flutuação temporal de grandezas específicas (potência efetiva, torque, consumo de combustível, etc). Sendo possível a medição num tempo suficientemente curto para que as condições do ensaio não variem significativamente, pode-se avaliar variações inerentes à cada grandeza independente através da expressão:

$$VG_{95} = \mp (2.Sg) \quad (2.7)$$

onde VG_{95} - faixa de variação associada a uma probabilidade de enquadramento de 95% dos valores efetivos da grandeza G.

S_g - desvio padrão de uma amostra com várias medidas da grandeza G efetuados com um sistema de medição sem erros aleatórios significativos em relação a V_G , no tempo de observação considerado.

A avaliação da flutuação temporal de uma grandeza medida/calculada (torque, pmi, potência efetiva, etc.) é importante para verificar se o estabelecimento do valor médio das medidas (MM) não é afetado por um número insuficiente ou pela má distribuição no tempo das medidas realizadas. No caso de medidas uniformemente distribuídas no tempo de observação, tem-se:

$$EA_{95}(MM) = VG_{95} \times n^{0.5} \quad (2.8)$$

onde $EA_{95}(MM)$ - é o erro aleatório máximo provável (95%) do valor médio das medidas.

VG_{95} - é a variação inerente da grandeza medida ou calculada avaliada conforme a expressão 2.7.

n - é o número de medidas efetuadas, que deve ser suficientemente grande para tornar $EA_{95}(MM)$ desprezível.

A seguir, apresenta-se um procedimento para estimativa e combinação das parcelas de incerteza de medição e controle de instrumentos, e para avaliações experimentais da dispersão de resultados de medição no próprio banco de ensaio, através dos quais as estimativas estabelecidas podem ter sua validade verificada, até que se estabeleçam os efetivos níveis de confiabilidade dos resultados do ensaio. Os passos e considerações básicos deste procedimento são apresentados nos seguintes itens:

a) Estimativa das incertezas dos instrumentos de medição e controle.

As citadas estimativas, podem se basear, inicialmente, nas incertezas de medição admitidas pelo método de ensaio

utilizado, ou preferencialmente nas especificações do fabricante dos instrumentos. Caso seja provável que estes, devido ao seu estado ou modo de operação apresentem alterações nas suas características metrológicas, calibrações que permitam estabelecer os erros sistemáticos e aleatórios em toda a faixa de operação devem ser efetuadas /17/.

b) Cálculo da incerteza do resultado de grandezas de desempenho.

Para uma grandeza ou parâmetro-P a partir de outras k grandezas G_i determinadas experimentalmente, e portanto sujeitas a parcelas de incerteza de medição e/ou controle de cada instrumento utilizado tem-se:

$$P = f (G_1, G_2, \dots, G_k)$$

onde $G_i = V_{Bi} + I_{Gi}$

sendo V_{Bi} - o valor efetivamente utilizado no cálculo de P (média das medidas corrigida ou valor desejado da grandeza).

I_{Gi} - parcela de incerteza de medição e/ou controle relativa a grandeza G_i .

A incerteza do resultado calculado para P devido a cada parcela de I_{Gi} é dada em valor absoluta como sendo:

$$I_r(P)_{G_i} = F_s (G_i) \cdot I_{Gi}$$

onde $I_r(G_i)$ - é a parcela de incerteza do resultado obtido para a grandeza ou parâmetro-P relativa aos instrumento(s) utilizado(s) na medição ou controle de G_i .

$F_s(G_i)$ - é o fator de sensibilidade de P em relação a grandeza G_i .

sendo $F_s(G_i) = \frac{dP}{dG_i}$, a derivada de P em relação a G_i .

A incerteza relativa pode ser dada por:

$$\frac{Ir(P)G_i}{P} = fs(G_i) \cdot \frac{IG_i}{VB_i}$$

onde $fs(G_i)$ - é o fator de sensibilidade adimensional para a grandeza G_i dado por:

$$fs(G_i) = \frac{dP}{dG_i} \cdot \frac{VB_i}{P} \quad (2.9)$$

A soma algébrica de todas as parcelas $Ir(P)G_i$ forneceria a incerteza do resultado máxima que poderia ocorrer, sendo esta, no entanto, uma situação muito improvável considerando as G_i são medidas e/ou controladas por instrumentos diferentes. Neste caso, a provável incerteza do resultado - $Ir(P)$ é dada por:

$$\frac{Ir(P)}{P} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{Ir(P)G_i}{P} \right)^{0.5} \quad (2.10)$$

Utilizando as fórmulas 2.9 e 2.10 considerando as parcelas de incerteza expressas em termos de percentagem dos valores efetivos da grandeza/(% VE) a seguinte fórmula pode ser estabelecida para a estimativa da incerteza do resultado da Potência efetiva - $Ir(Pe)$:

$$Ir(Pe) = \left((fs(T) \times IT)^2 + (fs(R) \times IR)^2 + Ir(Pe)_{ar}^2 \right)^{1/2}$$

onde $Ir(Pe)_{ar}$ expressa sinteticamente a parcela de incerteza do resultado (de potência efetiva, devido aos erros no referenciamento desta às condições do ar de admissão (medidas de temperaturas ou pressão do ar afetadas por erros de seus sistemas de medição).

Analogamente, para o consumo de combustível, pode-se estabelecer:

$$Ir(Cb) = ((fs(T) \times IT)^2 + (fs(R) \times IR)^2 + (ICb)^2 + Ir(Cb)_{ar}^2)^{1/2}$$

onde $Ir(Cb)_{ar}$ é a incerteza do resultado de Cb , devido aos erros no seu referenciamento às condições do ar de admissão.

Da mesma forma, para o consumo específico de combustível, estabelecer-se-ia:

$$Ir(Ce) = ((fs(T) \times IT)^2 + (fs(R) \times IR)^2 + (ICb)^2 + Ir(Ce)_{ar}^2)^{1/2}$$

E para p_{mi} :

$$Ir(p_{mi}) = ((fs(AM) \times IAM)^2 + (fs(p_c) \times I_{p_c})^2)^{1/2}$$

c) Flutuação temporal das grandezas de desempenho

Os motores alternativos, em especial, desenvolvem uma potência que é afetada por perceptíveis variações ao longo do tempo, em qualquer intervalo ou faixa de frequências considerada. Além das vibrações torsionais inerentes ao motor alternativo, utilizados na análise e estudo do seu balanceamento dinâmico, a potência desenvolvida pelo motor está sujeita à inconstância ou flutuação temporal da massa de combustível admitida/injetada em cada câmara de combustão. Esta flutuação é atribuída ao fato de sistemas de alimentação do motor, basicamente constituídos pelo carburador ou por uma bomba injetora e seus acessórios, não poderem manter, além de determinado nível, constante a quantidade de combustível enviada a cada cilindro nos ciclos operativos do motor. Conseqüentemente, a variação da potência interna, fornecida pelo motor alternativo é, em geral, significativa, como pode-se deduzir a partir da análise da dispersão das medidas da pressão na câmara de combustão, para motores Otto ou Diesel, como ilustram os diagramas da figura 2.9. A falta de constância ou flutuação da alimentação de combustível, em última análise, da vazão de combustível admitido/injetado, propaga-se tanto à potência interna (ou relativamente, à pmi) como a potência efetiva do motor caracterizando uma relação de dependência entre estas grandezas. Torna-se difícil, portanto, avaliar variações momentâneas no rendimento térmico efetivo do motor sem efetuar medidas da massa de combustível admitida/injetada e da potência gerada a cada ciclo operativo do motor.

d) Avaliação da indeterminação dos resultados:

Com a estimativa e combinação de parcelas de incertezas de medição e/ou controle, pode-se obter a incerteza provável do resultado relativa aos instrumentos e suas condições de operação. A indeterminação dos resultados, por sua vez,

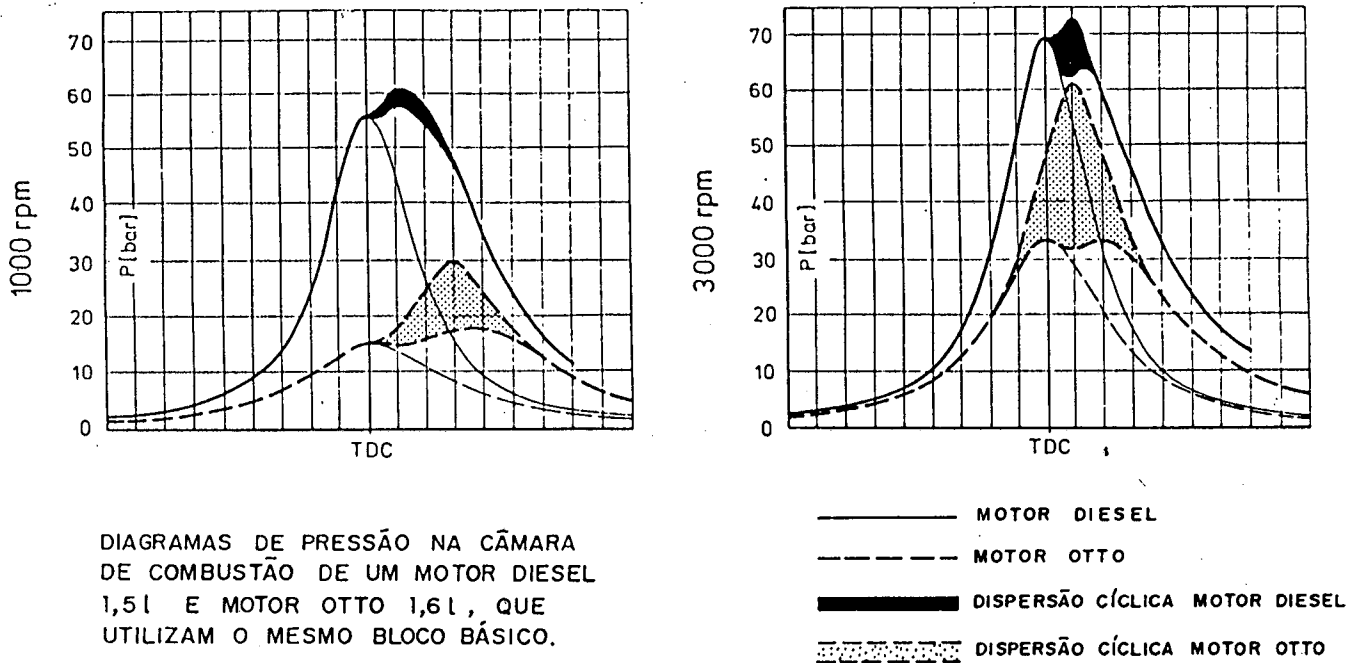


FIG. 2.9 -- Variações da pressão na câmara de combustão em diversos ciclos operativos de MCI.

considera adicionalmente a dispersão das medidas da grandeza medida/calculada, da qual o esforço tecnológico deve extrair a faixa de variações inerentes (inevitáveis) das grandezas medidas ou calculadas. Os procedimentos para avaliação de variações inerentes, no caso de grandezas como a potência efetiva, requerem a análise da dispersão de medidas calculadas, ou resultados-base.

A indeterminação do resultado pode ter sua componente aleatória avaliada experimentalmente através da avaliação da dispersão das medidas para uma probabilidade de enquadramento de 95% - DM_{95} , dada por:

$$DM_{95} = \pm 2 \cdot DP \quad (2.11)$$

onde: DP é o desvio padrão típico dos valores da grandeza resultante.

Sendo a incerteza do resultado composta basicamente por parcelas de erros sistemáticos, ou desconhecendo-se a proporção destes erros, pode-se considerar:

$$IRp = +/- (Ir + DM_{95}) \quad (2.12)$$

Se a proporção de erros sistemáticos for pequena, em relação à de erros aleatórios, ou for minimizada através da correção dos valores medidos, a indeterminação do resultado, sendo composta apenas de componentes de ordem aleatória, deve espelhar os erros aleatórios dos SM bem como as variações da grandeza resultante, ou seja, a dispersão das medidas, logo:

$$IRp \approx DM_{95} \quad (2.13)$$

Por sua vez comprovadamente, $Ir < 0,2 DM_{95}$, pode-se estabelecer:

$$IRp \approx VG_{95} \quad (2.14)$$

significando que a mínima indeterminação provável do resultado, da medição que se pode alcançar, corresponde à real faixa de variação da grandeza considerada.

2.3.3 Resultados da medição da potência efetiva

Supondo que num determinado sistema de ensaio, o conhecimento acerca dos instrumentos nele utilizados permita apenas afirmar que suas incertezas de medição/controlado estejam conforme as especificações da norma ISO-1585 (fig 2.5), são identificadas as fontes prováveis de IR da potência efetiva (fig 2.8), ter-se-ia:

$$Im(T) = +/- 1\% \text{ do valor efetivo}$$

$$Im(R) = +/- 0,5\% \text{ do valor efetivo}$$

$$Im(pbt) = +/- 100 \text{ Pa}$$

$$Im(pva) = +/- 100 \text{ Pa}$$

$$Im(tad) = +/- 2 \text{ K}$$

Considerando um meticuloso controle dos regimes de operação dos motores ensaiados, pode-se admitir que tais incertezas sejam as parcelas básicas que devem ser consideradas na expressão 2.7. Há necessidade ainda do cálculo de fatores de sensibilidade $f_s(G)$ para cada grandeza de interesse. O cálculo destes fatores envolve algumas considerações específicas, apresentadas para cada grandeza ou condição nos itens seguintes:

a) torque:

Sendo a relação entre torque e potência efetiva direta e proporcional - $Pe = T.R$, deduz-se facilmente que o fator de sensibilidade adimensional - $f_s(T)$ com auxílio da expressão 2.9:

$$f_s(T) = \frac{1}{R} \cdot \frac{dPe}{dT} = \frac{1}{R} \cdot \frac{d(T.R)}{dT}$$

logo

$$f_s(T) = 1$$

significando que a incerteza na medição do torque se propaga na mesma proporção relativa a resultados da potência efetiva do motor. Por exemplo, $Im(T) = + 1\%$, tem-se consequentemente $Ir(Pe)_T = 1\%$.

b) Rotação

Na figura 2.10 apresentam-se os efeitos do erro na medição e/ou controle de rotação- $E(R)$. O motor ao invés de operar na rotação desejada- R_d opera em outra rotação- R_v , com a diferença ou erro $E(R) = R_v - R_d$ provocando uma ligeira variação no torque a medir- V_T . Por seguinte a potência medida apresentaria um erro- V_{Pe} como expressa:

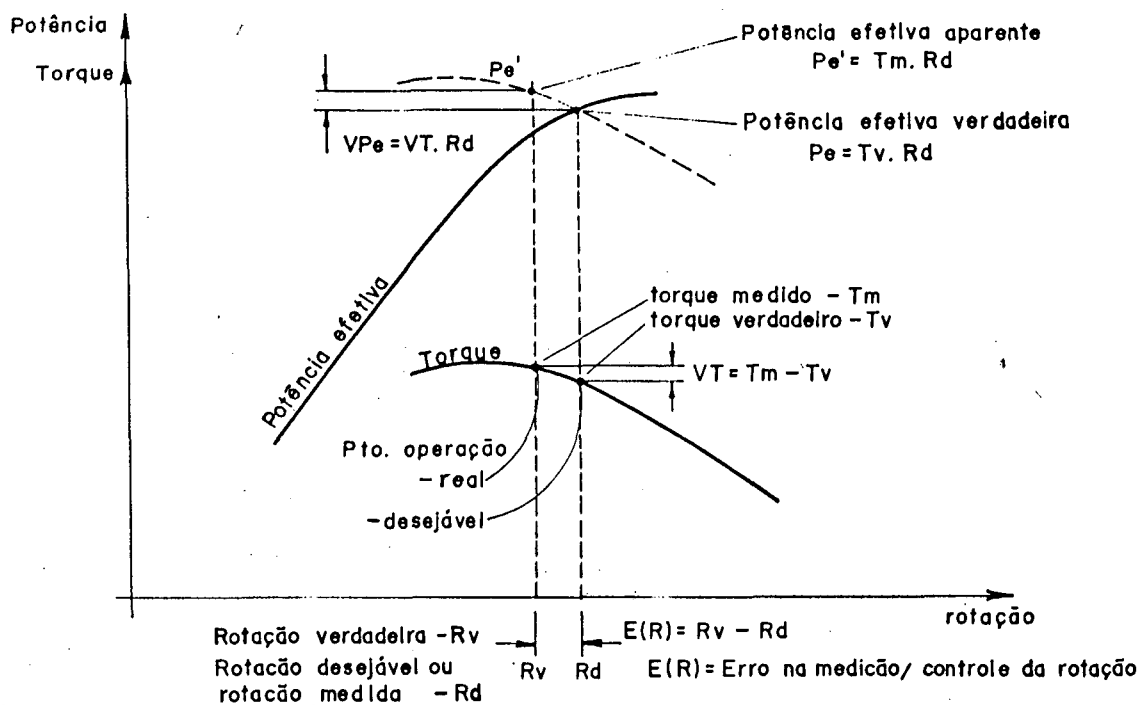


FIG. 2.10 - Influência do erro na medição/controlado de rotação sobre a medida da potência efetiva.

$$V_{Pe} = V_T \cdot R_d$$

Isto significa que na medição da potência efetiva o valor do fator de sensibilidade da rotação deve ser calculado por:

$$f_s(R) = \frac{1}{T} \cdot \frac{dPe}{dR} = \frac{1}{T} \cdot \frac{dPe}{dT} \cdot \frac{dT}{dR}$$

logo,

$$f_s(R) = \frac{R}{T} \cdot \frac{dT}{dR}$$

Com base na análise de curvas de torque e rotação de MCI em geral constata-se que o valor absoluto de $f_s(R)$ pode variar de zero, na região de máximo torque, até aproximadamente 1 na região de potência efetiva máxima do motor.

Consequentemente, pode-se adotar por segurança $f_s(R) = 1$, logo $Ir(Pe)_R = \pm 0,5\%VE$, ou calcular $f_s(R)$ numericamente, para cada motor e regime de operação específicos, como ilustra a figura 2.11, para verificar mais exatamente como se propagam os erros na medição de controle de rotação ao resultado da potência efetiva.

c) Condições do ar de admissão

A incerteza combinada das parcelas de incerteza de medição da pressão, temperatura e umidade do ar, será apresentada por $Ir(Pe)_{ar}$. Para avaliá-la, extraíram-se dos métodos e fórmulas

MOTOR	G	Rotação R	Torque T	Consumo Cb	Potência Pe	Avaliação de dT/dR		$f_s(R)$
						Fórmula	Resultado	
	U _g	rpm	N.m	kg/h	kW	Aplicada ao regime da potência máxima	Na região da Pe máxima	Valor absoluto
OTTO (1)	1	3600	235.4	30.0	88.7	$\left(\frac{dT}{dR}\right)_{3600} = \frac{T_3 - T_1}{R_3 - R_1}$	-0.056 Nm/rpm	0.95
	2	3800	225.6	31.2	89.7			
	3	4000	212.9	33.4	89.2			
DIESEL (2)	1	2500	292.4	19.6	76.5	$\left(\frac{dT}{dR}\right)_{2850} = \frac{T_2 - T_1}{R_2 - R_1}$	-0.035 Nm/rpm	0.40
	2	2850	278.6	22.4	83.2			

(1) Dados de ensaios extraídos do exemplo da norma NBR-5484, motor Otto básico

(2) Idem ao motor Otto

FIG. 2.11 - Fator de sensibilidade da potência efetiva em relação à rotação.

de redução do método de ensaio em questão (ISO-1585), os fatores de sensibilidade da potência efetiva com relação às citadas grandezas, para cada tipo de motor: Otto, Diesel ou Diesel-turboalimentado. Para tornar mais simples a avaliação das parcelas de $Ir(Pe)_G$, a tabela da figura 2.12, que admite a entrada do valor do erro, incerteza ou indeterminação da medição diretamente na unidade da grandeza física, pode ser utilizada. No exemplo em questão, ter-se-ia para o motor Otto:

$$Im(pbt) = \mp 100 \text{ Pa} \therefore Ir(Pe)pbt = \mp 0,12\% \text{ VE}$$

$$Im(pva) = \mp 100 \text{ Pa} \therefore Ir(Pe)pva = \mp 0,12\% \text{ VE}$$

$$Im(tad) = \mp 2 \text{ K} \therefore Ir(Pe)tad = \mp 0,40\% \text{ VE}$$

GRANDEZA DE REFERÊNCIA	SÍMBOLO ADOTADO	INDETERMINAÇÃO NA MEDIÇÃO	$\pm Ir$ (Pe) RESULTANTE (%)		
			OTTO	DIESEL [1]	DIESEL [2]
PRESSÃO BAROMÉTRICA	pbt	$\pm 100 \text{ Pa}$	0,12	0,10 fm	0,07 fm
PRESSÃO VAPOR D'ÁGUA	pva	$\pm 100 \text{ Pa}$	0,12	0,10 fm	0,07 fm
TEMP. AR ADMISSÃO	tad	$\pm 1 \text{ K}$	0,20	0,24 fm	0,50 fm
TEMP. BULBO ÚMIDO	tbu	$\pm 1 \text{ K}$	0,25	0,25 fm	0,18 fm
TEMP. BULBO SECO	tbs	$\pm 1 \text{ K}$	0,07	0,07 fm	0,05 fm

[1] - MOTOR COM ASPIRAÇÃO NATURAL OU COM SOBREALIMENTAÇÃO MECÂNICA.

[2] - MOTOR DIESEL : NESTE CASO A INDETERMINAÇÃO DEPENDE DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS ASSOCIADAS AO FATOR DO MOTOR - fm.

[3] - QUANDO $tad = tbs$, OS EFEITOS DA INDETERMINAÇÃO DE tbs SÃO DESPREZÍVEIS.

FIG. 2.12 - Influência de pequenas variações nas condições do ar sobre a potência efetiva.

A incerteza $Ir(Pe)_{ar}$, soma quadrática das parcelas $Ir(Pe)_{pbt}$, $Ir(Pe)_{pva}$ e $Ir(Pe)_{tad}$, no ensaio de um motor Otto, valeria neste exemplo:

$$Ir(Pe)_{ar} = \mp 0,44\% \text{ VE}$$

Nos motores Diesel, o fator do motor (item 2.2.3) pondera a influência das condições do ar sobre Pe . Adotando $f_m = 1.2$ (máximo possível), ter-se-ia com as mesmas incertezas estabelecidas:

$$Ir(Pe)_{ar} = \mp 0,77\% \text{ VE no motor Diesel,}$$

$$Ir(Pe)_{ar} = \mp 1,26\% \text{ VE no motor Diesel turboalimentado.}$$

Tais valores permitem comprovar, entre outras, a afirmação de que a especificação da norma ISO-1585, de $Im(tad) = \pm 2K$ é excessivamente "generosa". Visando a compatibilidade com outras especificações, seria mais adequado estabelecer $Im(tad) = \pm 0,5 K$.

Tendo em vista o exposto, pode-se estabelecer a seguinte fórmula para o cálculo da provável incerteza do resultado de potência efetiva:

$$Ir(Pe) = (Im(T)^2 + Im(R)^2 + Ir(Pe)_{ar}^2)^{0.5}$$

Nas condições de observação, isto é com $Ir(Pe)_{ar} \approx 0$, ter-se-ia, $Ir(Pe) = 1,1\% \text{ VE}$.

No caso geral, a combinação das parcelas anteriormente avaliadas forneceria:

$$Ir(Pe) = \pm 1.2\% \text{ VE para motor Otto}$$

$$Ir(Pe) = \pm 1.4\% \text{ VE para motores Diesel, (} f_m = 1.2 \text{)}$$

$$Ir(Pe) = \pm 1.7\% \text{ VE para motores Diesel-turboalimentado}$$

Por fim, na apresentação de resultados da medição, poder-se-ia declarar a faixa de variação da potência efetiva. Supondo que uma amostra com um número significativo de medidas de P_e , apresentasse um desvio padrão $DP = 0,4\%$, ter-se-ia $VG_{95} = 0,8\%$. Com isto para o motor Otto do quadro da figura 2.8, por exemplo, a apresentação de resultados relativos a sua potência máxima poderia se efetuar da seguinte forma:

- Potência efetiva máxima (a 3800 rpm)... 89,7 kW (ABNT)
 - Incerteza do resultado $\pm 1,0$ kW
 - Faixa de variação de $P_e(95\%)$ $\pm 0,6$ kW
 - Indeterminação do resultado..... $\pm 1,6$ kW
- (avaliada segundo 2.12, uma vez que não é conhecida a parcela de erros sistemáticos de I_r).

2.3.4 Resultado de Medição do Consumo Específico de Combustível.

Sendo o consumo específico de combustível de MCI, definido como a razão entre o consumo de combustível e a potência efetiva, estabelece-se a seguinte expressão para a avaliação da incerteza do resultado da medição de $C_e - I_r(C_e)$:

$$I_r(C_e)^r = (I_m(T)^2 + I_m(R)^2 + I_m(C_b)^2 + I_r(C_e)_{ar}^2)^{0.5}$$

Analogamente, ao caso da potência efetiva, admite-se a probabilidade da influência das condições do ar de admissão sobre a medição de C_e , em função do tipo de motores ensaiados:

- Motores Otto: teoricamente a razão ar/combustível permanece constante num regime de operação independente das condições do ar. Neste caso $I_r(C_e)_{ar}$ torna-se desprezível relativamente a outras parcelas, pois para pequenas variações do ar (por exemplo, da ordem das I_m admissíveis), o consumo específico de combustível não se altera.
- Motores Diesel: na sua operação com taxa de injeção de

combustível constante, o consumo de combustível- C_b , permanece constante, e neste caso como $C_e = C_b/P_e$, pode-se considerar $(I_r(C_e)/C_e) \approx (I_r(P_e)/P_e)$ sendo a sua avaliação possível a partir da própria tabela da figura 2.12.

Desta forma, admitindo-se um valor de incerteza de medição do consumo de combustível - $I_m(C_b) = \pm 1\% VE$, também conforme a especificação da ISO-1585, e as demais parcelas de incerteza iguais às do item 2.3.3, ter-se-ia para os casos em consideração:

$I_r(C_e) = \pm 1,5\% VE$... para um motor Otto

$I_r(C_e) = \pm 1,7\% VE$... para um motor Diesel,

$I_r(C_e) = \pm 2,0\% VE$... para um motor Diesel turboalimentado.

Uma diferenciação importante se faz necessária em relação ao caso do item anterior. A medida do consumo de combustível é condicionada a um tempo mínimo admitido pelo seu medidor, geralmente suficiente para que a rotação e torque do motor sofram variações significativas. No caso da rotação, pode-se utilizar o número de revoluções do motor, no tempo de medição do consumo de combustível, para medida da rotação média no período considerado. O torque, por sua vez deve ter sua flutuação temporal acompanhada, de modo que o resultado baseado em várias medidas esteja sujeito a um erro aleatório provável-EA pouco significativo. Quando este não puder ser suficientemente minimizado, deve se considerar a parcela $EA(T)$ na avaliação da incerteza do resultado- $I_r(C_e)$.

Para se avaliar a dispersão típica das medidas do consumo específico, deve-se realizar ensaios com várias medidas de C_e em cada regime de operação do motor e/ou com medidas de C_e num regime nominal repetido múltiplas vezes.

Na apresentação de resultados de C_e (valores médios, faixa de dispersão das medidas, ou de indeterminação) é importante que parâmetros como o tempo de medição do consumo, o número de medidas efetuadas e de vezes que um regime foi reajustado/repetido e outros relativos à condições de operação do motor, sejam adequadamente explicitados.

2.3.5 Resultado da Medição de p_{mi}

A determinação da p_{mi} num cilindro é afetada por variações e erros na medição da pressão na câmara de combustão- p_c , erros na medição do ângulo de manivela- AM e do volume da câmara de combustão- V_c , grandezas utilizadas na sua avaliação através da fórmula:

$$p_{mi} = \frac{1}{V_c} \int_{AM=-360^\circ}^{AM=+360^\circ} p_c \cdot dAM \cdot \frac{dV_c}{dAM} \quad (2.15)$$

Analisando-se, inicialmente o efeito de erros invariantes, conclui-se que sendo o volume da câmara de combustão uma função ímpar do ângulo da manivela, erros sistemáticos constantes das medidas da pressão- p_c se anulam na avaliação da integral da expressão 2.15.

Por outro lado, a dificuldade quanto à avaliação da influência do erro sistemático da medição do ângulo da manivela (usualmente invariável) na obtenção de p_{mi} , deve-se à impossibilidade de calcular analiticamente um fator de sensibilidade, tal que:

$$Ir(p_{mi}) = Fs(AM) \cdot Im(AM)$$

onde $Ir(p_{mi})$ - incerteza relativa do valor de p_{mi} (%)

$Fs(AM)$ - fator de sensibilidade em % VE/°

$Im(AM)$ - incerteza de medição de AM em graus (parcela sistemática).

Os resultados de um recente trabalho experimental /19/ permitiram avaliar $F_s(AM)$ sob diversas condições de operação do motor constatando que ele cresce com o aumento da relação de compressão do MCI. Foram obtidos valores entre 2,5%/° e 5,0%/° (% do valor efetivo de p_{mi} /erro na medição de AM em graus) para um motor ASTM = CFR48 com relação de compressão 1:8, e 5,0%/° a 7,5%/° para um motor veicular com relação de compressão de 1:12,5 (semelhante a dos motores a álcool). Percebe-se, portanto é necessário reduzir a incerteza de medição do ângulo de manivela a valores iguais ou inferiores a 0,1°, para garantir $I_r(p_{mi}) < 1\%$ e consequentemente garantir menores erros na avaliação do rendimento indicado e mecânico do motor.

As variações inerentes à pressão média na câmara de combustão, atribuídas à falta de repetibilidade da massa do combustível admitido/injetado e a singularidades da combustão, por sua vez, só podem bem caracterizadas com auxílio de modernos sistemas de medição utilizados para análise da combustão dos MCI, com os dados de pelo menos 16 ciclos operativos do motor.

2.4 SISTEMAS DE ENSAIO DE MOTORES

Com a utilização de sistemas computacionais para facilitar o desenvolvimento e qualificação de produtos, surge o conceito de Sistema de Ensaio - SE, conjunto de dispositivos físicos-"hardware" e lógicos-"software" que supervisionam operações de controle e medição de grandezas físicas em ensaios de produtos específicos. Particularmente os SE aplicados a motores a combustão interna (SEMCI) diferenciam-se de acordo com suas aplicações usuais, e portanto estas devem ser melhor caracterizadas.

2.4.1 Aplicações dos SEMCI

Para caracterizar as aplicações e a abrangência de um

sistema de ensaio, é preciso que tenha uma visão global do seu enquadramento e função na qualificação ou desenvolvimento do produto final de uma empresa ou instituição de pesquisa. No setor automobilístico, as funções e programas dos SEMCI integram-se e se sobrepõem às dos sistemas de ensaio de veículos - SEV e outros, portanto, faz-se necessário caracterizar o sistema físico básico, suas funções principais e os programas de ensaio usuais destes SE, como apresentado na figura 2.13.

Os sistemas físicos utilizados podem ser bancos de ensaio com freios para absorção de potência, ou unidades embarcadas em veículos com os instrumentos necessários à verificação do nível sonoro, emissão de fases, consumo de combustível e demais características do veículo.

Os dados obtidos através de ensaios de campo podem ser aproveitados para o desenvolvimento de programas simuladores para SEV ou SEMCI e utilizados para avaliação do desempenho e

SISTEMAS DE ENSAIO - SE.			
SISTEMA FÍSICO	BEMCI - BANCO DE ENSAIO DE MCI	BEV - BANCO DE ENSAIO DE VEÍCULOS	UE - UNIDADE EMBARCADA
UTILIZADOS PARA DETERMINAR	- DESEMPENHO - DURABILIDADE - CARACTERÍSTICAS POLUENTES DO MOTOR	- CONSUMO DE COMBUSTÍVEL - EMISSÃO DE GASES POR QUILOMETRO RODADO	- NÍVEL SONORO - EMISSÃO DE GASES - CONSUMO COMBUSTÍVEL - CARACTERÍSTICAS CINE-MÁTICAS DO VEÍCULO
PROGRAMAS DE ENSAIO	- SEQUÊNCIA DE REGIMES ESTABILIZADOS - REGIME VARIÁVEL	- SIMULADORES: CICLOS URBANOS, DE ESTRADA, ETC...	- CICLOS URBANOS E DE ESTRADA (ENSAIOS DE CAMPO)
DENOMINAÇÃO DO SE	SEMCI SE DE MOTORES A COMBUSTÃO INTERNA	SEV SE DE VEÍCULOS	SEE SE EMBARCADO

FIG. 2.13 - Sistemas de Ensaio para Motores e Veículos.

características poluentes dos motores veiculares, porém considera-se que a simulação em BEV é tecnologicamente mais adequada para a qualificação dos módulos complementares do veículo: transmissão, diferencial, suspensão, etc.

Particularmente, a determinação das características poluentes dos MCI segundo métodos estabelecidos pela legislação de alguns países, através da utilização de BEV ou BEMCI, requer um considerável dispêndio de equipamento e de tempo para o desenvolvimento e execução dos programas simuladores. Por este motivo as prioridades no contexto nacional voltam-se para o estabelecimento de métodos simplificados de medição e controle da emissão de gases em motores veiculares /Ø9/ e considera-se que o desenvolvimento de sistemas a partir de BEMCI é também recomendável para a devida medição e controle da emissão de gases em motores nacionais.

2.4.2 Classificação e Características Específicas

Com base na análise das tendências para especialização das funções dos BEMCI destacam-se três grupos característicos de bancos de ensaios, a partir dos quais podem ser desenvolvidos SEMCI específicos:

a) Funcionais:

Utilizados na avaliação de grandezas de desempenho, potência efetiva bruta ou líquida, consumo de combustível, emissão de gases na operação contínua, e regulagem de carburadores, bancos de injeção e desenvolvimento de sistemas de refrigeração, lubrificação, turbocompressores, ignição e injeção eletrônica. Normalmente requerem operadores qualificados e elevado grau de flexibilidade, na instrumentação, devido ao grande número de operações de medição e controle envolvidas. Para facilitar a obtenção de resultados de ensaios no mínimo tempo e com a mínima indeterminação possíveis, é preciso que os sistemas e bancos de ensaio funcionais apresentem as seguintes características:

- controle das condições do ar de admissão;
- separação física das salas de ensaio e de operação;
- facilidades para utilização de equipamentos específicos para: medição de índice de fumaça, medição do ângulo de injeção/análise da combustão;
- possibilidade do acionamento dos motores no próprio banco de ensaio;
- rapidez na instalação e troca de motores ou componentes.

b) de durabilidade:

Destina-se a reprodução de solicitações de carga em condições de operação que contribuam para:

- desgaste do motor e/ou componentes;
- fadiga de materiais;
- deterioração de lubrificantes.

Os ensaios de durabilidade são normalmente prolongados, sendo interessante, neste caso, a economia do tempo de mão-de-obra e a disponibilidade de recursos no SE que permitam a:

- aquisição sistemática das grandezas do ensaio;
- operação ininterrupta (24h);
- medição contínua do consumo de óleo lubrificante e da vazão de gases do cárter;
- registro automático de certas grandezas para verificação de falhas.

Na programação dos ensaios de durabilidade deve-se procurar a minimização do tempo, de ocorrência de falhas ou desgaste do motor, aumentando-se a severidade de condições e omitindo-se regimes de operação não significativas /11/.

c) Simuladores:

Utilizados para otimização do consumo de combustível e da emissão de gases de um motor operado segundo regimes representativos de suas reais condições de operação. Estas, por sua vez, são obtidas através de ensaios de veículos em BEV e dos ensaios de campo.

Os sistemas de ensaio com recursos de simulação permitem a influência de características veiculares como por exemplo, seu peso, relação de transmissão, coeficientes aerodinâmicos, e outros, sobre o consumo de combustível e emissão de gases do motor, no próprio BEMCI /20/.

Para tanto, estes sistemas requerem a utilização de:

- freio-acionadores com potência controlável e baixos tempos de resposta ($< \emptyset,1$ s) /21/;
- controladores que permitam a regulação simultânea e razoavelmente independente do torque e da rotação;
- controladores digitais para supervisão e controle do ensaio.

Ao contrário dos ensaios convencionais com regimes de operação estabilizada, a simulação da operação em condições reais é caracterizada por rápidas variações da rotação e torque impostos ao motor ensaiado. Os modernos SE simuladores adotam a opção pelo controle ótimo da rotação /21,22/, e procuram aumentar a repetibilidade na reprodução dos perfis de torque, tendo se conseguido valores de dispersão inferiores a 2% /22/, ou até mesmo menor que 1% em sistemas mais sofisticados /21/.

3. INSTRUMENTAÇÃO DOS SISTEMAS DE ENSAIO

Um das maiores preocupações na composição de Sistemas de Ensaio para MCI está relacionada à adequabilidade dos instrumentos de medição e controle. Ambos freqüentemente necessitam ser aprimorados ou substituídos por outros mais modernos, em função da necessidade de sua integração ao SEMCI, ou seja, sua capacidade de receber instruções, executar operações específicas e enviar informações ou dados de medição. Simultaneamente, devem atender requisitos metrológicos e operacionais cada vez mais rigorosos. A análise da instrumentação, termo que designa determinado conjunto de técnicas e instrumentos usados na observação, medição, registro, controle e atuação em fenômenos físicos, requer a apreciação dos módulos usuais de SEMCI, apresentados em seguida.

3.1 MÓDULOS DE UM SISTEMA DE ENSAIO

Para sistematizar a identificação e análise da instrumentação, os módulos interligados ao banco de ensaio de um MCI foram caracterizados através da figura 3.1. Suas funções básicas, características gerais e potencialidades são discutidas a seguir:

a) Banco de ensaio do MCI (BEMCI)

O BEMCI é o núcleo básico do sistema global, composto usualmente pela bancada de fixação do motor, pelo freio/acionador e pelos dispositivos de controle e instrumentos de medição, passando estes últimos a se restringirem a atuadores e transdutores na medida que a automação se desenvolve. O freio do banco de ensaio é utilizado para absorção da energia mecânica do motor,

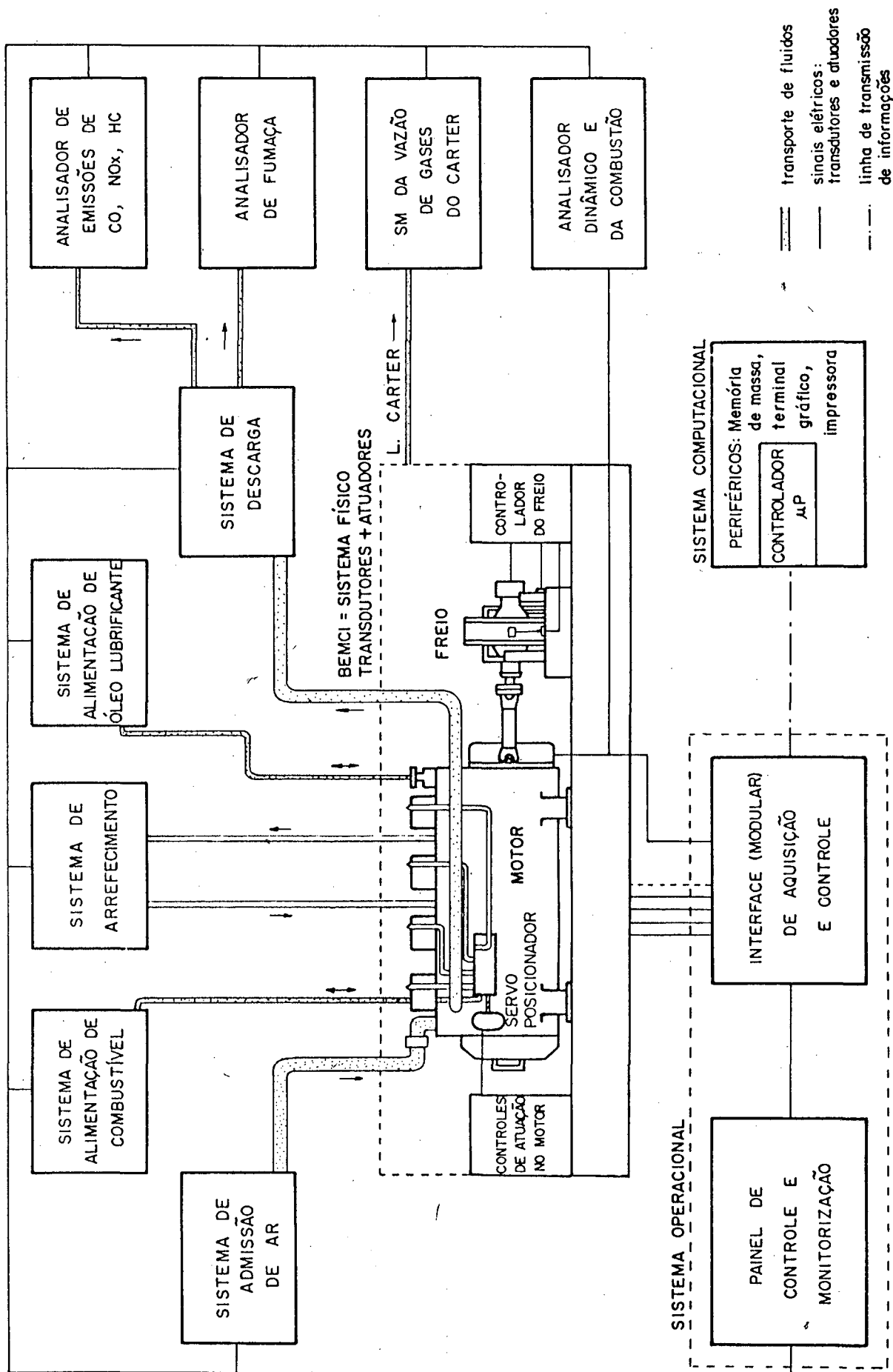


FIG. 3.1 - Módulos de um Sistema de Ensaio de Motores a Combustão Interna.

controlando desta forma sua rotação ou torque de operação. Nas figuras 3.2 e 3.3 são apresentados exemplos típicos de freios eletromagnéticos e hidráulicos, respectivamente. Os geradores elétricos, podem ser utilizados como freio/acionadores do motor, pois além de freiá-lo podem acioná-lo, possibilitando a medição de sua potência de atrito ou a simulação de condições efetivas de operação. Sem capacidade para o acionamento, mas com maior capacidade de absorção de potência e menor custo inicial, os freios a correntes de Foucault exibem características dinâmicas bastante adequadas ao controle automático por computador /23/. Os freios hidráulicos (fig. 3.3), por sua vez, possuem menor custo operacional e maior confiabilidade, mas necessitam de servo-válvulas para o controle remoto e automático de sua capacidade de frenagem.

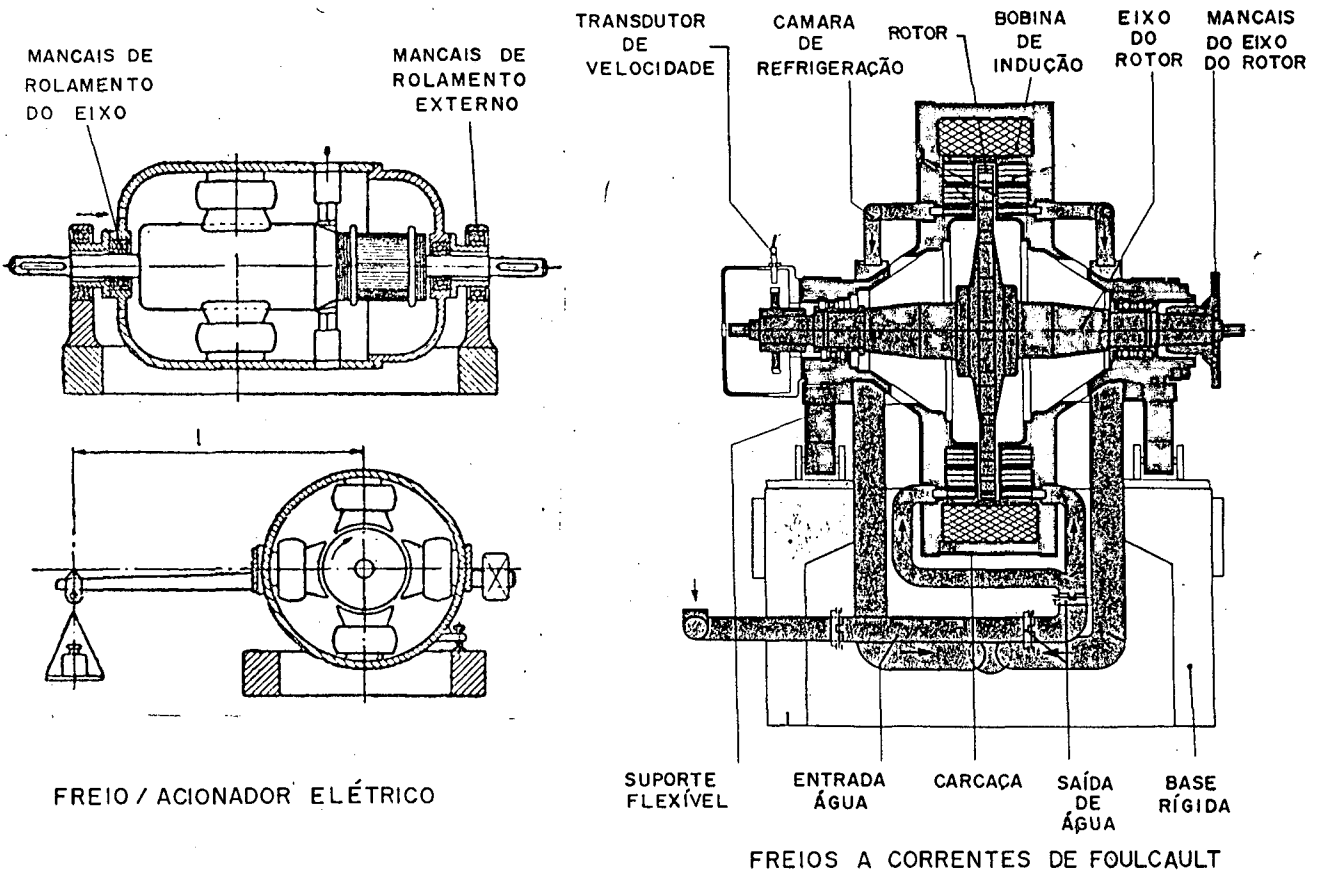
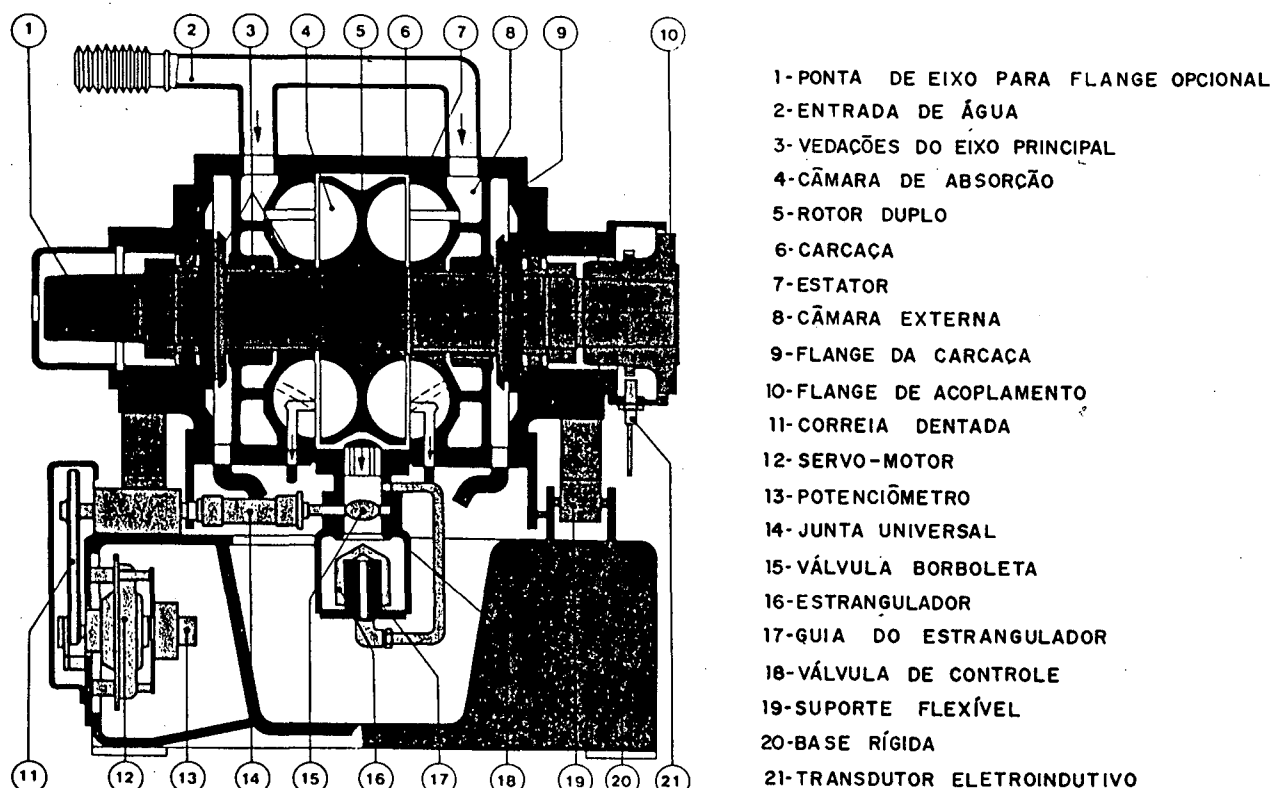


FIG. 3.2 - Freios eletromagnéticos para bancos de ensaio.

b) Sistema de admissão de ar

Uma vez que a temperatura e a umidade do ar afetam significativamente o desempenho do motor, a tomada do ar de admissão deve localizar-se de preferência fora da sala do banco de ensaio, numa região isenta da influência térmica do MCI ou outras fontes térmicas. O ideal é que o ar seja proveniente de uma sala climatizada ou central de condicionamento de ar capaz de manter a sua temperatura em $25 \pm 1^\circ \text{C}$ e a umidade absoluta em $0,005 \pm 0,0001$ (kg de vapor)/(kg de ar seco) segundo especificações da norma ISO-1585. Para se facilitar a medida da vazão de ar, e proteger o motor da influência de ondas de pressão na tubulação de admissão é necessário instalar grandes tanques de equilíbrio próximos ao motor, com volume superior a cinquenta vezes o volume de cada cilindro do motor /2/.



OBS.- 11, 12, 13, 14 e 15 COMPONENTES DA SERVOVÁLVULA DE FREIO.

FIG. 3.3 - Freio hidráulico para banco de ensaio.

c) Sistema de alimentação de combustível

Em muitos casos, o processo de medição de consumo de combustível exige a interação entre os sistemas operacional e de alimentação de combustível, para preparação da medição e preenchimento do reservatório do SM de combustível. Na figura 3.4 é apresentado um sistema de alimentação de combustível com todos os elementos necessários a sua operação sem intervenção humana. É necessário utilizar, no mínimo, uma válvula de três vias, para permitir a passagem de combustível do reservatório principal, quando a medição não estiver sendo realizada. Tais sistemas devem se adequar também a motores com linha de retorno de combustível, da bomba de combustível ou carburador.

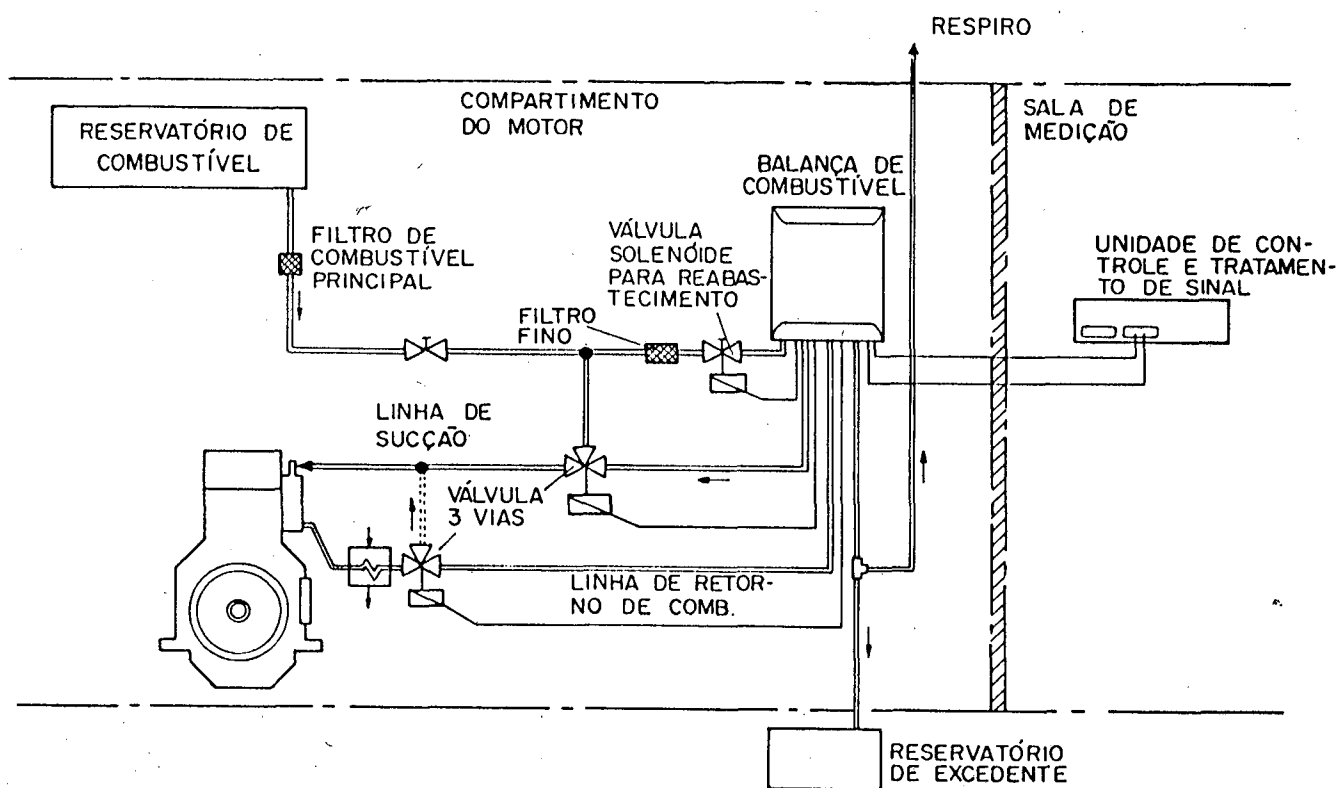


FIG. 3.4 - Alimentação de combustível para bancos de ensaio de MCI.

d) Sistema de arrefecimento

Em motores arrefecidos a líquido, é recomendável efetivar o controle da temperatura do líquido de arrefecimento na saída do motor, de forma a facilitar o processo de ensaio, e em especial, o aquecimento do motor. Para tanto, sistemas como o ilustrado na figura 3.5 podem ser utilizados.

Observe-se que no sistema apresentado é possível aquecer ou refrigerar rapidamente o conteúdo do reservatório B, regulando a temperatura na entrada e conseqüentemente na saída do líquido de arrefecimento.

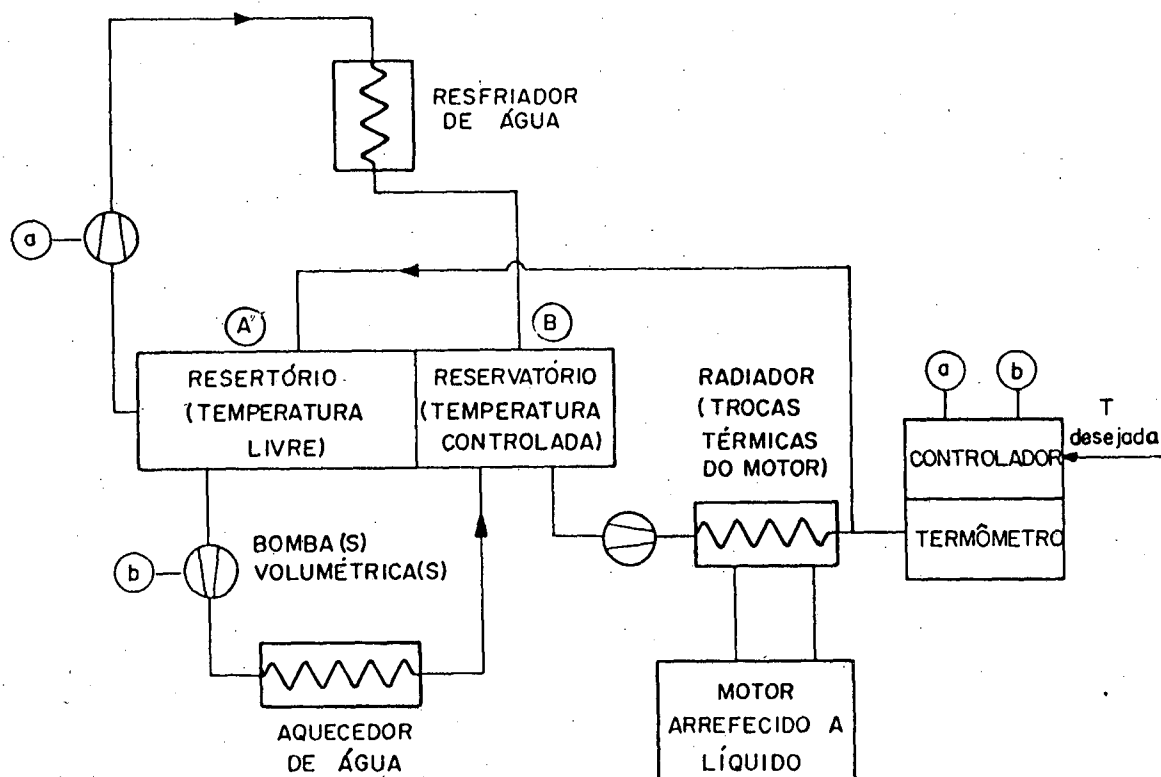


FIG. 3.5 - Arrefecimento de um motor a combustão interna no seu banco de ensaio.

e) Sistema de óleo lubrificante

Circuitos como o apresentado na figura 3.6 ou similares propiciam a alimentação de óleo lubrificante ao motor e simultaneamente mantêm sua temperatura abaixo de limite desejado. O óleo circula continuamente pela servo-válvula de 3 vias que controla a quantidade de óleo que é arrefecida, em função da diferença entre a temperatura desejada e a medida pelo transdutor na saída do reservatório. Por sua vez, o consumo de óleo é medido através de um medidor de vazão de lóbulos rotativos instalado na linha de alimentação de um reservatório auxiliar de óleo que abastece o tanque de óleo do motor (cárter).

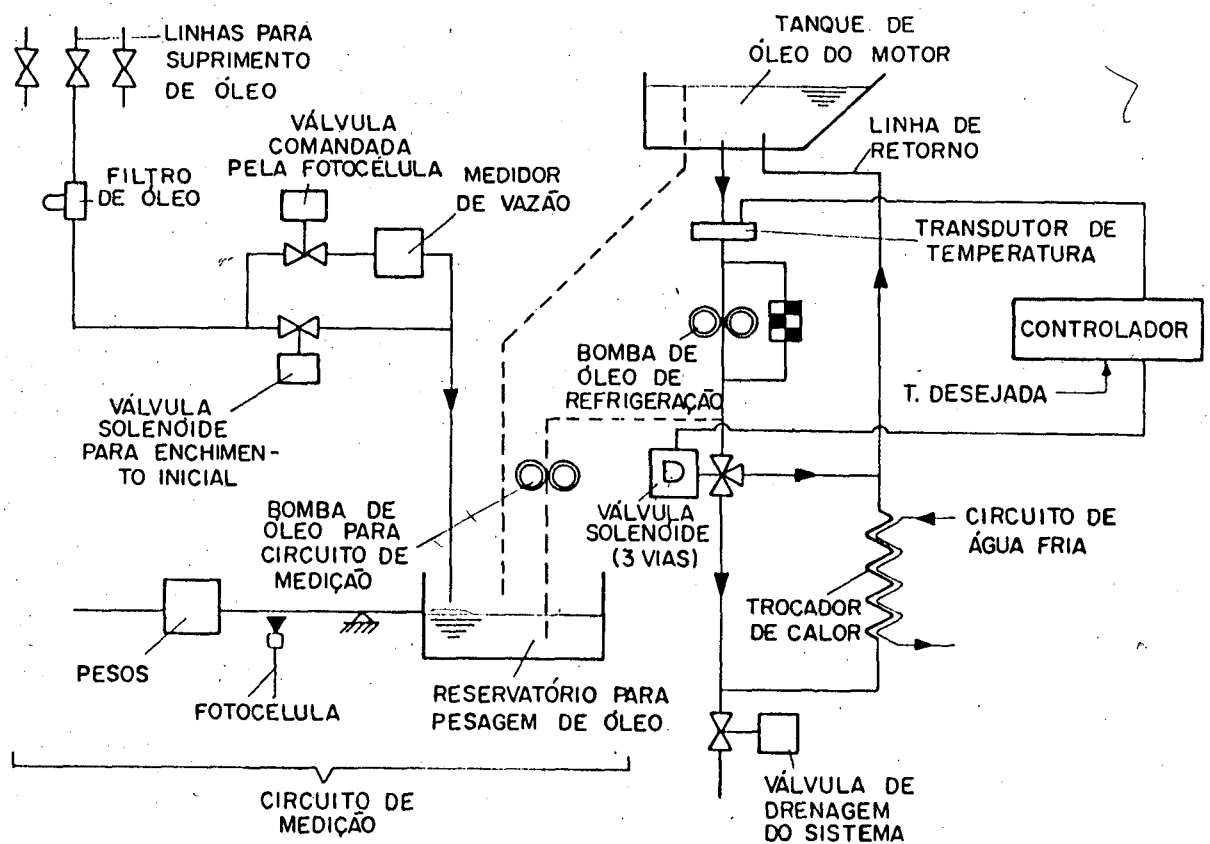


FIG. 3.6 - Circuito de óleo lubrificante para bancos de ensaio de MCI/11/.

f) Sistema de descarga

Os gases de descarga devem, preferencialmente, ser transportados por tubulações protegidas com isolamento térmico, e que disponham de tanques de equilíbrio se forem excessivamente longas. Usualmente, atuadores ou válvulas manuais são utilizados para controle da pressão efetiva dos gases, e eventualmente o sistema de descarga pode incluir tubulações auxiliares para diluição dos gases, bem como coletores para amostragem contínua e amostradores de volume constante (CVS-constant volume samplers). As amostras dos gases de descarga são levadas a analisadores de compostos poluentes, dentre os quais destacam-se os:

- analisadores de fumaça (Motores Diesel exclusivamente)
- analisadores de emissões de CO, NOx, HC.

Os analisadores de fumaça medem a quantidade de carbono (C) ou fuligem expelida por um motor Diesel, que é em geral inversamente proporcional à reflexão da luz num filtro de papel branco submetido a uma amostra de gases de volume conhecido. Os mais modernos realizam automaticamente as operações de ajuste do zero, amostragem, exposição do filtro de papel a amostra coletada e medição do índice de enegrecimento do papel com foto-detetores elétricos /24/. O índice de fumaça, enegrecimento do papel, é expresso em unidades BOSCH, por singularmente não possuir unidades similares no Sistema Internacional ou outros sistemas de medida.

Na análise de emissões de CO, NOx e HC, um considerável volume de dados foi obtido utilizando técnicas de análise química de Orsat, eficientes e bem conhecidas, mas limitadas em função do tempo dispendido para coleta de amostras e sua análise. Com o desenvolvimento de analisadores NDIR (Non-dispersive Infrared), baseados na absorção do infravermelho pelos gases analisados /25/, tornou-se possível

a amostragem contínua sem sacrifício da eficiência dá análise. Alguns destes analisadores admitem medidas dinâmicas em regimes variáveis, registro e monitoração da vazão de gases poluentes, bem como a operação remota e automática /10/. Também se utilizam analisadores FID (Flame ionization Detectors), para medição mais simples e eficiente de emissões de hidrocarbonetos, com base na medição da ionização resultante da queima dos HC. Não obstante, com o desenvolvimento de motores a álcool, novas técnicas serão necessárias para análise de compostos orgânicos, visto que a combustão do etanol gera produtos qualitativamente diferentes dos conhecidos para gasolina, tais como os acetaldeídos e os ácidos carboxílicos deles derivados. Dentre os métodos mais promissores para análise de acetaldeídos, destacam-se os que utilizam reagentes orgânicos MBTH com espectrofotometria a luz visível e reagentes orgânicos DNPH com cromatografia gasosa ou líquida de alta pressão /12/.

g) Sistema de medição da vazão de gases do cárter.

A medição da vazão de gases do cárter (item 2.1) pode ser realizada com fluxímetros de gás, sendo os mais simples semelhantes aos contadores de gás para consumo doméstico. Fluxímetros com área variável, dotados de transdutores indutivos de deslocamento também podem ser utilizados, com a vantagem da disponibilidade de sinal elétrico. Entretanto, a incerteza de medição nestes SM é da ordem de $\pm 5\%$ VFE, o que os torna mais apropriados para o registro de acréscimos súbitos na grandeza medida, que podem ser decorrentes da aceleração do processo de desgaste de anéis, válvulas ou camisas dos cilindros do MCI, e para verificação de defeitos nestes componentes /26/.

h) Módulos de análise dinâmica e da combustão

Os analisadores dinâmicos e da combustão dispõem de sistemas de medição com microprocessadores para aquisição de sinais, inclusive nas elevadas freqüências de amostragem necessárias

para o registro de fenômenos dinâmicos. Permitem a aquisição de dados com processamento a tempo real em vários ciclos operativos do motor, apresentando-os posteriormente por meio de:

- diagramas de pressão x volume,
- diagramas da velocidade e aceleração angular,
- relatórios com dados da pressão na câmara, valores de pmi, picos de pressão, máxima razão de elevação da pressão e medidas angulares associadas.

Na figura 3.7 é apresentada a configuração lógica de um moderno analisador da combustão com as citadas características /27/. O analisador necessita ser interfaceado a um sistema

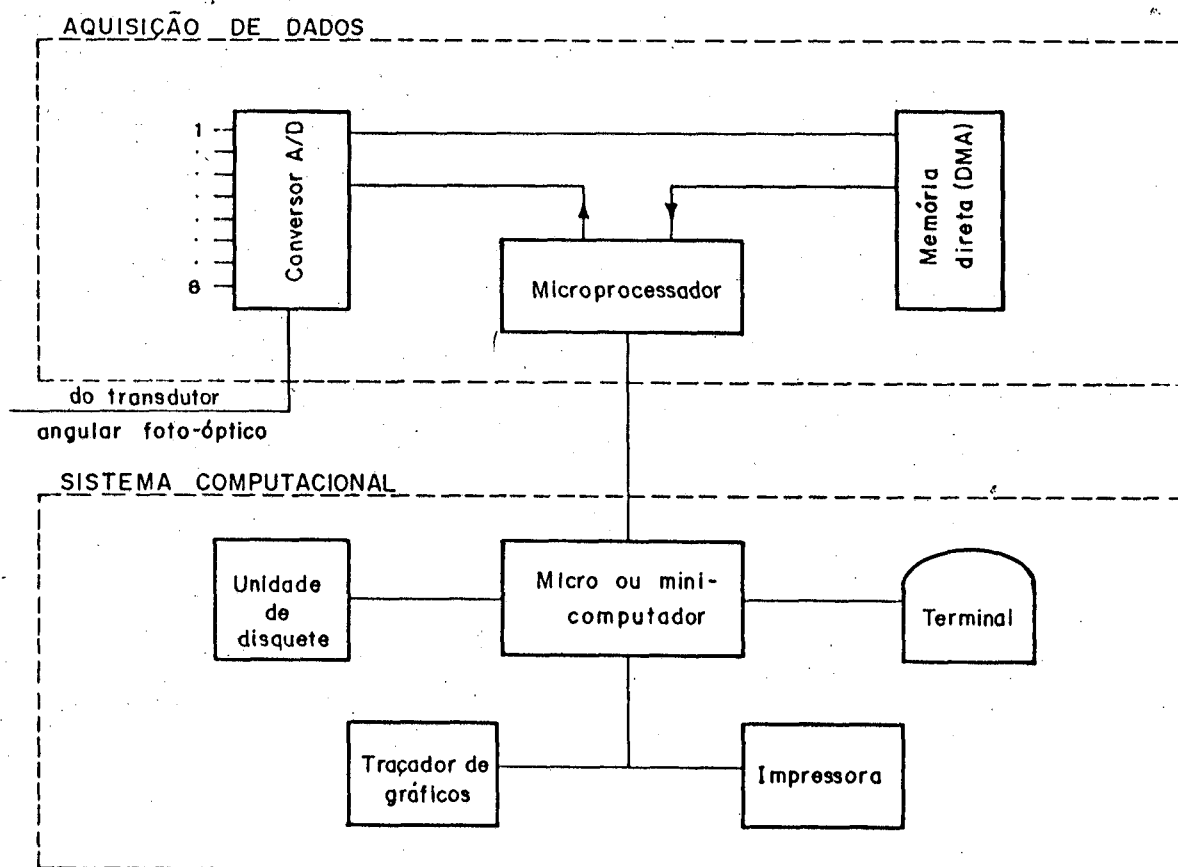


FIG. 3.7 - Analisador dinâmico e da combustão para MCI /27/.

computacional para permitir o processamento de dados necessário para elaboração dos mencionados diagramas e relatórios.

i) Sistema Operacional

O sistema operacional do banco de ensaio executa as funções do controle da aquisição de dados e da operação do motor, com base nas instruções do sistema computacional ou do operador do banco de ensaio, habilitando o controle automático ou manual do ensaio, respectivamente. Conforme caracterizado, engloba o painel de controle da sala de operação do banco de ensaio, com todas as suas unidades de tratamento de sinal ou de controle (atuação), que tendem a ser substituídos por módulos da interface de aquisição e controle, a qual viabiliza a conversão de sinais analógicos em informações digitais ou vice-versa e a comunicação com o sistema computacional.

j) Sistema Computacional

O sistema computacional completa o SEMCI propriamente dito, assumindo a automação e o controle da comunicação entre seus diversos módulos. Nele as informações sobre o MCI são processadas e armazenadas para posterior análise pelo pessoal técnico ou de engenharia, através da documentação mais conveniente (gráficos, diagramas 3D, relatórios, etc).

3.2 INSTRUMENTAÇÃO DE MEDIÇÃO

Dentre os inúmeros aspectos a enfatizar relativamente à adequabilidade dos instrumentos de medição para modernos SEMCI consideramos como os mais relevantes:

- níveis de erros de medição,
- disponibilidade de sinais para automação,
- confiabilidade (qualidade ao longo do tempo).

X

A tais requisitos deve-se adicionar ainda o baixo custo. Todavia, dependendo da grandeza considerada, esta não é uma característica que possa ser assegurada, especialmente para instrumentos que utilizem a tecnologia de micromecânica.

Os transdutores mais utilizados em BEMCI são construídos a partir de extensômetros de resistência, sensores fotoelétricos ou eletro magnéticos, termoelementos e cristais piezoelétricos. Acrescentando-se a estes uma unidade de tratamento de sinal e um indicador adequados obtém-se um sistema de medição básico. Ao SM podem se integrar filtros, registradores e circuitos para controle de circulação de fluidos, conforme o caso.

Para viabilizar a análise dos Sistemas de Medição de cada grandeza física, os seguintes tópicos serão abordados nos próximos itens:

- particularidades da medição de cada grandeza física,
- comentários sobre SM convencionais,
- adequabilidade dos SM à automação,
- modernas soluções para medição automatizada.

3.2.1 Torque

Usualmente, mede-se o torque efetivamente imposto ao motor pelo freio do banco de ensaio, através da medição de seu momento de reação. Este torque, a rigor, é igual à soma dos momentos de frenagem eletromagnético ou hidrodinâmico e do momento devido ao atrito dinâmico nos mancais do eixo do rotor do freio. Portanto, o processo de medição desta grandeza requer a suspensão da carcaça do freio, através de pares de mancais independentes dos mancais do eixo do rotor (fig. 3.2) ou de suportes flexíveis (fig. 3.3) e da utilização de um braço radial ligado a um dinamômetro que constituem o torquímetro de reação do freio apresentado na figura 3.8.

Basicamente, a incerteza de medição do torquímetro de

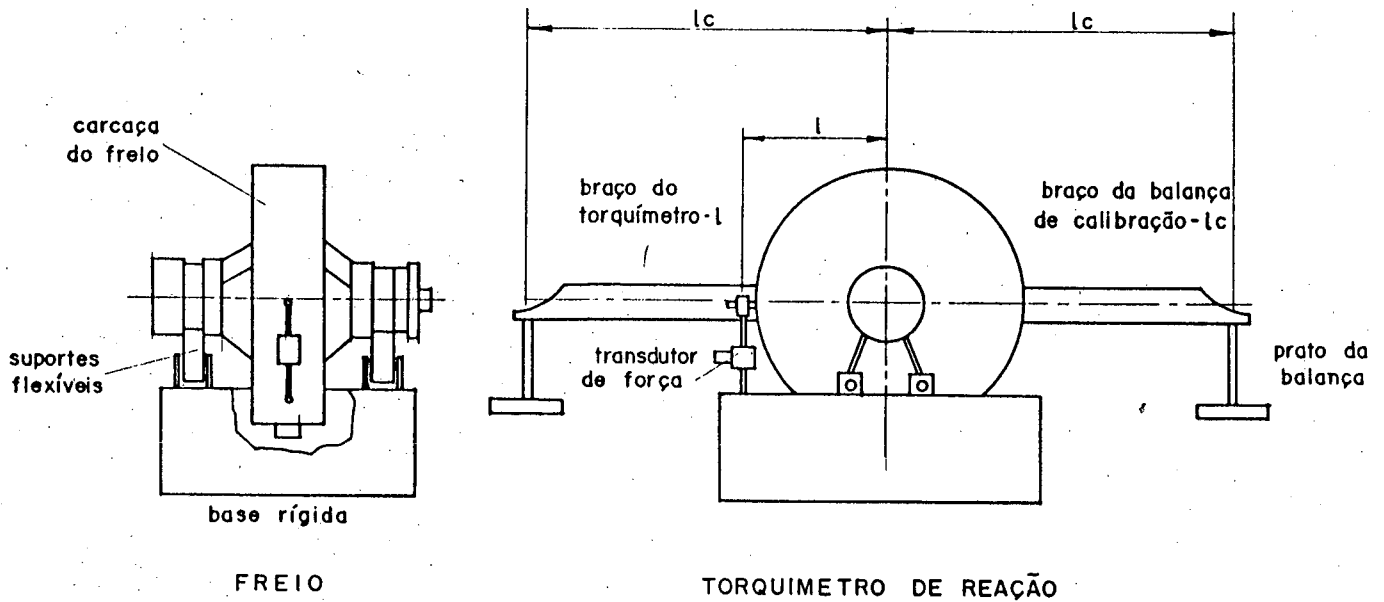


FIG. 3.8 - Freio com suportes flexíveis e seu torquímetro de reação.

reação é afetada pelos seguintes fatores, não compensáveis através da ajustagem do SM:

- atrito estático nos mancais ou suportes da carcaça,
- efeitos de histerese no transdutor de força,
- variação da temperatura ambiente,
- vibrações induzidas pelo motor ou outras fontes.

Sob o ponto de vista dinâmico, a inércia da carcaça e o amortecimento nos seus mancais ou suportes flexíveis de sustentação formam um filtro passa-baixa, o que significa que o torquímetro de reação elimina as frequências mais elevadas do torque a medir. Este fato, no entanto, não restringe a utilização do torquímetro de reação, nem mesmo em trabalhos científicos /20, 28/, pelo contrário dele se pode tirar proveito para reduzir efeitos perturbadores das vibrações induzidas pelo motor ou outras máquinas sobre a medição do seu torque médio.

Um módulo importante do torquímetro de reação é o dinamômetro (balança ou medidor de força). Sua faixa operacional normalmente situa-se entre ∓ 2000 N até ∓ 20000 N, considerando-se motores com torque máximo entre 100 Nm (veículos leves) e 1.500 N.m (caminhões pesados), visto que o braço do torquímetro tem usualmente $0,5$ a 1 m de comprimento. Verifica-se que transdutores de força, disponíveis no mercado nacional /29, 30, 31/, possuem qualidade suficiente para os propósitos de utilização em BEMCI, a melhor delas apresentando uma incerteza de medição de $\mp 0,1\%$ VFE. Sua repetibilidade é de $0,01\%$ VFE/K. Estes valores, no entanto, baseiam-se em especificações do fabricante não incluindo erros no tratamento de sinal ou devidos a procedimentos de medição inadequados.

3.2.2 Rotação (Velocidade angular)

Para medição da rotação de MCI, podem ser utilizados sistemas de medição analógicos, como os tacômetros mecânicos ou elétricos. Não obstante suas excelentes características operacionais e dinâmicas, os tacômetros elétricos apresentam desvantagens que podem comprometer sua utilização em BEMCI:

- significativo coeficiente de temperatura ($0,03\%/K$) /32/
- sua calibração no próprio banco de ensaio não é recomendável devido às variações inerentes da rotação do MCI.

Desta forma, SM digitais com sensores eletroindutivos ou fotoelétricos (fig. 3.9) passaram a ser preferidos para este propósito, por não apresentarem as desvantagens acima assinaladas e reunirem excelentes potenciais quanto à resolução e baixas Im. Com uso de um frequencímetro pode-se obter facilmente o valor da rotação média ou número de revoluções do motor num dado período. Por conveniência tem-se utilizado engrenagens com 60 dentes, ou discos codificados com 60 marcas e 1 s para tempo de contagem, de modo que a leitura do frequencímetro corresponda diretamente à

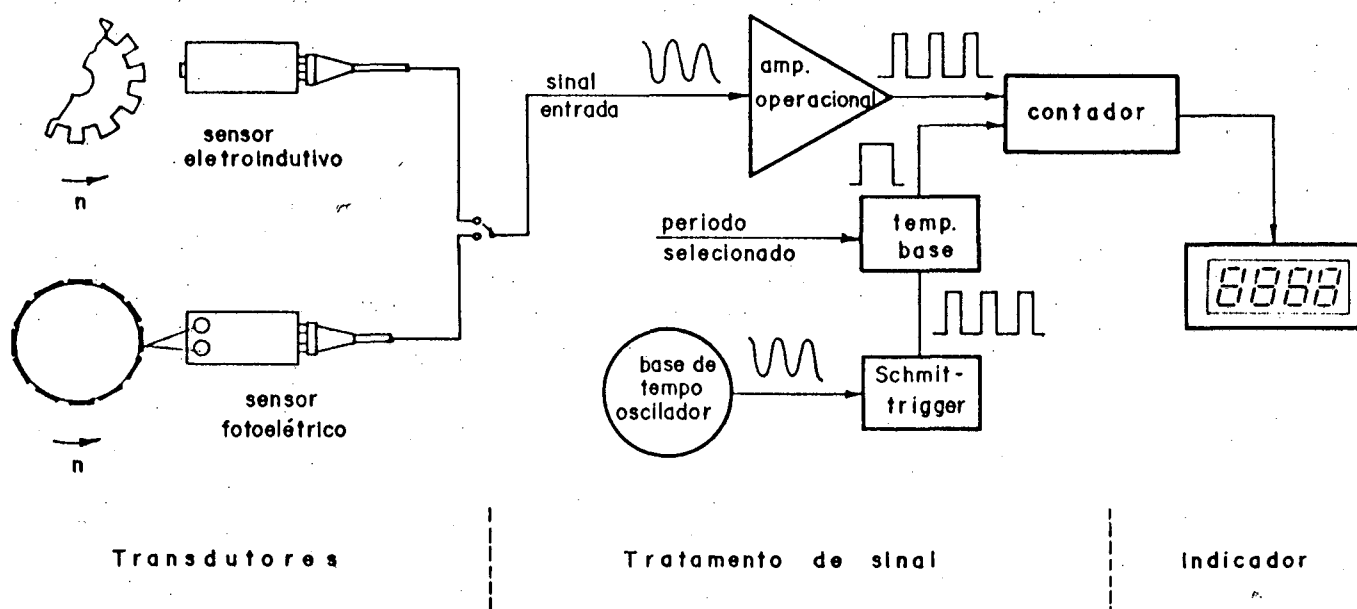


FIG. 3.9 - Sistemas de medição digitais de rotação.

rpm. Conseqüentemente, incertezas de medição inferiores a $\pm 0,1\%VE$ são obteníveis para rotações mais elevadas que 1.000 rpm. No entanto, como o controle da rotação requer tempos de amostragem menores que 1 s é necessário:

- aumentar o número de marcas ou dentes.
- medir alternativamente o período de um número fixo de pulsos de entrada.
- utilizar um conversor frequência/tensão para obter um sinal analógico correspondente ao valor da rotação.

A última alternativa tem sido preferida pelos fabricantes de freios com controladores analógicos de rotação /23/.

3.2.3 Consumo de Combustível

O consumo de combustível deve expressar efetivamente a massa de combustível gasta pelo motor na operação sob regime

estabilizado, no entanto, a medição da vazão volumétrica de combustível é admitida quando a determinação do peso específico de combustível é simples e eficiente.

Ao se medir a vazão instantaneamente deve-se, no entanto, levar em consideração que o fluxo de combustível na linha de alimentação é afetado por:

- flutuações da pressão na alimentação do combustível, logo da sua vazão instantânea.
- presença de bolhas de vapor, formadas a partir da vaporização de hidrocarbonetos leves, devida aos efeitos combinados do calor do motor e de baixas pressões na linha de alimentação de combustível.
- presença de linhas de retorno de combustível em muitos sistemas de carburação e injeção.

De fato, verifica-se que nos motores Otto a carburação a vazão de combustível após sua bomba principal pode inclusive assumir momentaneamente um valor negativo, ou seja, podem ocorrer inversões temporárias no sentido do fluxo de combustível /33/.

Logo a medição de valores instantâneos da vazão de combustível não pode ser considerada representativa do consumo efetivo de combustível. Porém, sob o ponto de vista operacional, é importante diferenciar os processos de medição contínua e intermitente do consumo de combustível, pois a primeira propicia maior simplicidade operacional, enquanto a outra exige interrupções periódicas para o reabastecimento de buretas cu reservatório de balanças do SM (fig. 3.10).

Na figura 3.10 são analisados os medidores mais utilizados para medição do consumo de combustível e suas principais características. Os rotômetros, não obstante sua facilidade de manuseio, tem incertezas de medição relativamente altas. Medidores de deslocamento positivo, que operam através do contínuo aprisionamento e liberação de volumes fixos do fluido, são próprios para medição ininterrupta do consumo em regimes

PROCESSO DE MEDIÇÃO	DESIGNAÇÃO DO MEDIDOR	PRINCÍPIO OPERATIVO	DISPOSITIVOS PARA AUTOMAÇÃO	MEDIÇÃO INSTANTÂNEA
contínuo	rotâmetro	área variável	transdutores de deslocamento	somente em regimes estabilizados
	lobulos rotativos	deslocamento de volume fluido (positivo)	contatos eletro-mecânicos	
	turbina	velocidade do fluido	sensores eletro-magnéticos	sim
intermitente	buretas	nível do líquido	sensores fotoelétricas	não
	balança de compensação	equilíbrio de massas na balança	sensores eletro-mecânicos ou foto elétricos	não
	balanças eletromecânicas	variação do peso do reservatório de fluido	transdutores indutivos/capacitivos de deslocamento	sim

FIG. 3.10 - Principais medidores de consumo de combustível.

estabilizados, cujo valor é proporcional à rotação média deste medidor. Já os medidores do tipo turbinas requerem criteriosas calibrações para cada tipo de combustível visando a determinação da relação entre a vazão de combustível e a rotação da turbina, a qual deixa de ser linear em faixas de operação pequenas, entre 1 a 100 l/h. No entanto, algumas versões de transdutores a turbina mostram-se bastantes adequadas para medição da vazão instantânea de combustível e utilização em sistemas de controle eletrônico de MCI /33, 34, 35/.

Por outro lado, os SM com operação intermitente são usualmente designados de medidores volumétricos ou gravimétricos, correspondentes a buretas e balanças para medição de consumo de combustível, respectivamente, cuja utilização é analisada a seguir:

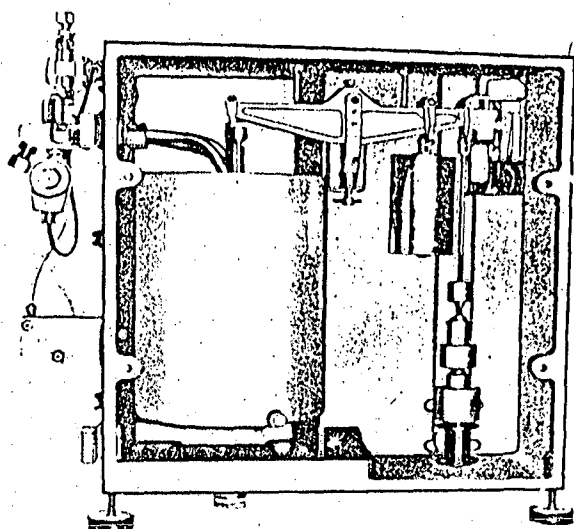
a) Buretas para medição do consumo de combustível.

A utilização de buretas com células fotosensíveis constitui a opção mais visível quando se requer operação automática, baixo custo e incerteza na medição do consumo de combustível. O volume de combustível a ser consumido é selecionável em sistemas mais modernos, adequando-se, portanto, a requisitos de minimização do tempo ou incerteza de medição /36/. A correta ajustagem da posição das fotocélulas permite diminuir a I_m até um valor aproximadamente proporcional à área da seção transversal da bureta na região da fotocélula-S vezes o diâmetro do orifício de entrada do fotodetector-d. Por exemplo, admitindo-se $S = 100 \text{ mm}^2$ e $d = 1 \text{ mm}$ respectivamente, ter-se-ia uma $I_m = \pm 100 \text{ mm}^3$, ou $\pm 0,2\%$ em 50 ml , menor volume usualmente selecionável.

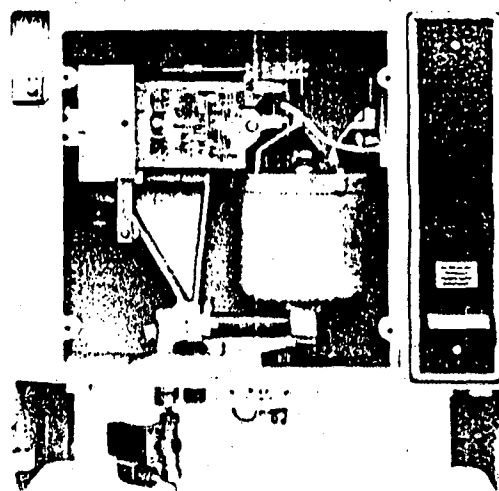
b) Balanças para medição do consumo de combustível.

Na figura 3.11 são apresentadas versões de balanças especialmente projetadas para medição de consumo de combustível. As balanças de compensação permitem a medição indireta do consumo de combustível por meio do tempo necessário para que a massa consumida de combustível equilibre os pesos do outro lado da balança, suas incertezas de medição são uma função da inexatidão dos pesos e da resolução da balança e nos melhores casos são de ordem de $0,5 \text{ g}$ até 100 g e de $\pm 2 \text{ g}$ em 1 kg . /10, 37/.

As balanças eletromecânicas permitem, por sua vez, medir diretamente a variação efetiva da massa de combustível remanescente no reservatório do SM. Com o tratamento de sinal adequado é possível obter sinais analógicos proporcionais ao consumo mássico instantâneo e a massa de combustível já consumida. Os mais modernos SM utilizam balanças com sensores capacitivos para medir a deflexão de uma mola de formato laminar, que sustenta o reservatório de combustível (fig. 3.11). Apresentam incertezas de $\pm 0,05 \text{ g}$ em 600 g , $\pm 0,05 \text{ kg/h}$



BALANÇA DE COMPENSAÇÃO



BALANÇA ELETROMECCÂNICA

FIG. 3.11 - Medidores de consumo de combustível gravimétricos.

em 100 kg/h, ou menores que $\pm 0,15\%$ do valor efetivo do consumo na faixa de 3 a 100 kg/h, desde que o SM não seja submetido a elevados gradientes de temperatura, uma vez que a flutuação da sensibilidade dos mesmos atinge $0,01\% \text{ VE/ } ^\circ\text{C} / 38/$.

No contexto nacional, a omissão de informações e especificações técnicas acerca de balanças eletromecânicas aqui produzidas /39/, tem inviabilizado a avaliação de seu potencial e desempenho com vistas à aplicação em SM de consumo de combustível.

3.2.4 Pressões

Para a medição de pressões efetivas ou diferenciais em BEMCI é necessário considerar as condições de variação, da temperatura

na tomada de pressão e outros aspectos relevantes, como apresentadas na figura 3.12. Destacam-se as pressões diferenciais, baixas e médias, das pressões efetivas, barométrica ou na câmara combustão.

As colunas de líquidos dispostas em tubos em U, ainda são muito utilizadas para medição de baixas pressões por seu baixo custo e incerteza de medição incomparavelmente pequena, até mesmo inferior a $\pm 0,1\%$ VFE. Com o uso de SM de pressão elétricos, o deslocamento ou a deformação de elementos mecânicos provocado pela pressão a medir, pode ser transformado em sinal de tensão elétrica por meio de transdutores indutivos ou extensométricos, com incertezas de medição de até $\pm 0,5\%$ em transdutores

PRESSÕES			T max ^[1]	CARACTERÍSTICAS
TIPO	REFERÊNCIA	bar	(°C)	DESEJÁVEIS
D I F E R E N C I A S	Na tubulação de admissão	até 0,1	50	- baixa Im p/cálculo de consumo de ar
	Coletor de Admissão	0,01/ a 0,2	100	- baixa Im p/controle da pressão no coletor
	Gases de descarga	0,01 a 0,2	800	- fluido de transmissão intermediária
	Combustível	até 2	50	- Segurança, sem maiores requisitos quanto a Im
	Óleo Lubrificante	2 a 10	120	
	Ar na saída do compressor	0,1 a 2	200	- baixa Im para cálculo de rendimento de turbo-compressores
	Gases na ent. da turbina	0,05 a 1	800	
E F E T I V A S	Câmara de Combustão	0,5 a 100	350 média 2500 ins- tan- tâ- nea	- baixa Im em toda faixa de variação - espaço reduzido para transdutor de pressão - resist.a impactos, vibrações mecânicas e choques térmicos
	Barométrica	0,8 a 1,1	50	- Im bastante reduzida 0,1% - compensação para temperatura

[1] Tmax - Temperatura máxima na tomada de pressão.

FIG. 3.12 - Principais pressões medidas em ensaios de MCI e suas características.

comerciais, para pressões diferenciais inferiores a 2 bar /40, 41, 42, 43/. Quanto aos SM da pressão barométrica pode-se afirmar que os transdutores de pressão existentes no mercado dificilmente permitem garantir incertezas de medição inferiores a ± 1 mbar ($\emptyset, 1\%$ VFE). Portanto, o uso de barômetros de mercúrio ou mecânicos continua sendo recomendável, devido à falta de transdutores de pressão de melhor qualidade.

Na medição da pressão na câmara de combustão de MCI, SM com dispositivos eletromecânicos foram considerados por Taylor /1/ e Obert /2/, mais adequados para obtenção de resultados quantitativos do que os próprios SM que utilizam transdutores elétricos, amplificadores e osciloscópios. No entanto, graças ao desenvolvimento de Sistemas de Aquisição de Sinais com elevadas frequências de amostragem, paralelamente ao de transdutores piezoelétricos resistentes ao calor, a altas temperaturas, impactos e vibrações na câmara de combustão, conta-se hoje com melhores instrumentos para medição e análise da pressão na câmara de combustão e parâmetros derivados. Ainda assim, os transdutores piezoelétricos necessitam ser rigorosamente calibrados, para se minimizar sua incerteza de medição, atualmente já inferior a $\pm 1,0\%$ VFE /44/.

3.2.5 Temperaturas

A medição de temperaturas associadas às condições térmicas de operação de MCI requer em certos casos o uso de técnicas especiais, especialmente na medição de fluidos gasosos.

Para se minimizar, por exemplo, a incerteza na medição de temperaturas elevadas, como a dos gases formados na combustão deve-se evitar a transmissão de calor por condução ou radiação, das superfícies vizinhas ao sensor, para que sua temperatura corresponda à temperatura real dos gases. Recomenda-se a utilização de múltiplas telas de proteção contra a radiação (2 a

4), termopares com comprimento de inserção pelo menos 1ϕ vezes maiores que seu diâmetro nominal /45/ e também o uso de isolamento térmico na tubulação de descarga. Por sua vez, para medição de temperaturas na câmara de combustão ou em pistões utilizam-se técnicas "off-line", como a análise de materiais ou tintas térmicas e técnicas a tempo real com transmissão de sinal de termopares ou termistores: contínua, intermitente ou telemétrica. A transmissão intermitente através do fechamento momentâneo de contatos elétricos, tem fornecido bons resultados, embora limitados a regime de operação estabilizada /46/.

Os SM de temperaturas que utilizam termopares, juntas de compensação e chaves seletoras devem ser preferencialmente reservados para medição de temperaturas onde incertezas de medição iguais ou maiores que $\pm 1^\circ\text{C}$ sejam admissíveis, por exemplo, temperaturas do óleo, do fluido de arrefecimento e do combustível. Quando for desejável a garantia de incertezas de medição ainda maiores (na medição de tad e tbu, por exemplo) é recomendável a utilização de termoresistores, preferencialmente do tipo Pt100. Tal opção justifica-se não apenas pela qualidade superior dos termoresistores, mas também porque admitem um tratamento de sinal bem menos sensível à tensões termoelétricas e variações na resistência de contatos elétricos do que os termopares /47/.

3.2.6 Posição Angular do Virabrequim e Grandezas Derivadas

Para determinar o momento exato em que um dos pistões do MCI passa pelo Ponto Morto Superior - PMS, ou seja, do evento ângulo de manivela = 0° PMS, diversas técnicas podem ser utilizadas. A mais elementar consiste na observação visual da coincidência entre uma ranhura na polia ou volante do virabrequim e saliências de partes fixas do motor, com auxílio de luz estroboscópica.

Para automatizar a medida do evento - 0° PMS, sensores eletroindutivos e foto-ópticos podem ser utilizados para a

geração de um sinal sempre que detectam a passagem de uma marca de referência no volante do MCI. Conjuntos de sensores e adaptadores utilizados em SM de posição angular, de eventos garantem incertezas inferiores a $\pm 0,5^\circ$ AM (graus do ângulo de manivela) /48/.

Para se obter incertezas na medição ainda menores, da ordem de $\pm 0,1^\circ$ AM é recomendável a utilização de transdutores angulares foto-ópticos ajustáveis como o apresentado na figura 3.13. Nestes um disco com n linhas escuras radiais gira conjuntamente com o eixo do motor, fazendo com que o sensor fotoelétrico a ele acoplado gere pulsos a cada passagem pelas linhas, logo a cada intervalo de $(360^\circ/n)$. Possui uma marca de referência interna para assinalar a passagem por 0° PMS, cuja ajustagem é viabilizada através de um braço do suporte do sensor

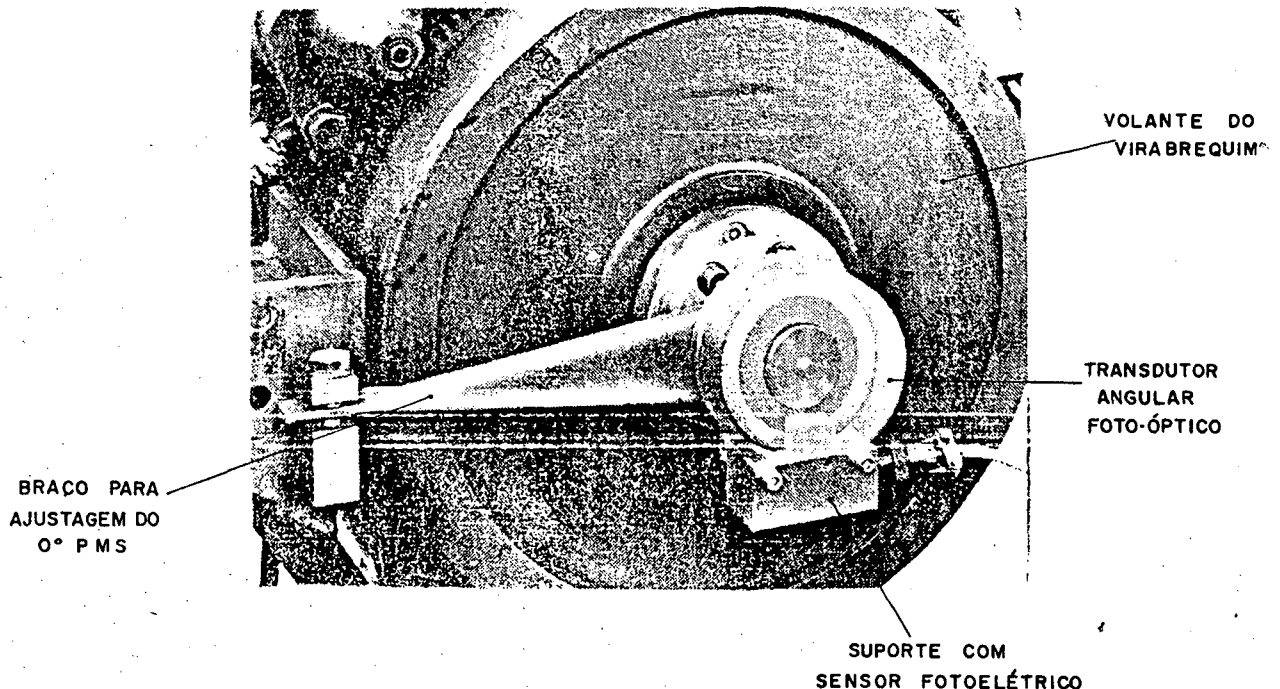


FIG. 3.13 - Transdutor angular foto-óptico para referenciamento ao PMS /10/.

fotoelétrico que pode girar ligeiramente para ajustes finos da sua posição de referência.

Sendo disponível um sinal de referência ou pulsos associados ao evento - \emptyset° PMS, a posição angular de outros eventos pode ser facilmente medida desde que sejam disponíveis os seguintes sensores:

- ângulo de injeção efetivo: sensores indutivos de deslocamento que geram estímulos elétricos quando o deslocamento da agulha do bico injetor ultrapassa um valor correspondente ao início efetivo da injeção (aprox. $4\emptyset \mu\text{m}$).
- ângulo de início da injeção: transdutores extensométricos instalados na tubulação de injeção dotados de um circuito que gere um estímulo cada vez que a pressão ultrapassa determinado valor (aprox. $3\emptyset \text{bar}$).
- ângulo de ignição (Otto): um sensor capacitivo ligado ao terra da bobina de ignição, que no momento em que se fecha o contato para o centelhamento na vela de ignição, envie um sinal que permita determinar o ângulo do fechamento do contato, com um SM adequado.

Na figura 3.14 é apresentado o diagrama de blocos de um moderno SM da posição angular de eventos para MCI. A versão apresentada é constituída de um módulo eletrônico de tratamento de sinais, um sensor eletroindutivo para o evento \emptyset° PMS, e transdutores indutivos de deslocamento e extensométricos. Os sinais de eventos, após um tratamento adequado devidamente condicionados, servem de entrada para um circuito eletrônico que avalia o ângulo de injeção através dos intervalos de tempo entre os sinais recebidos. Um processador lógico calcula o ângulo a apresentar a partir da média de leituras em n ciclos operativos. O uso de uma segunda marca de referenciamento, a aproximadamente 25° antes do PMS, permite, segundo o fabricante, minimizar os efeitos da variação de velocidade durante um ciclo operativo do MCI /49/.

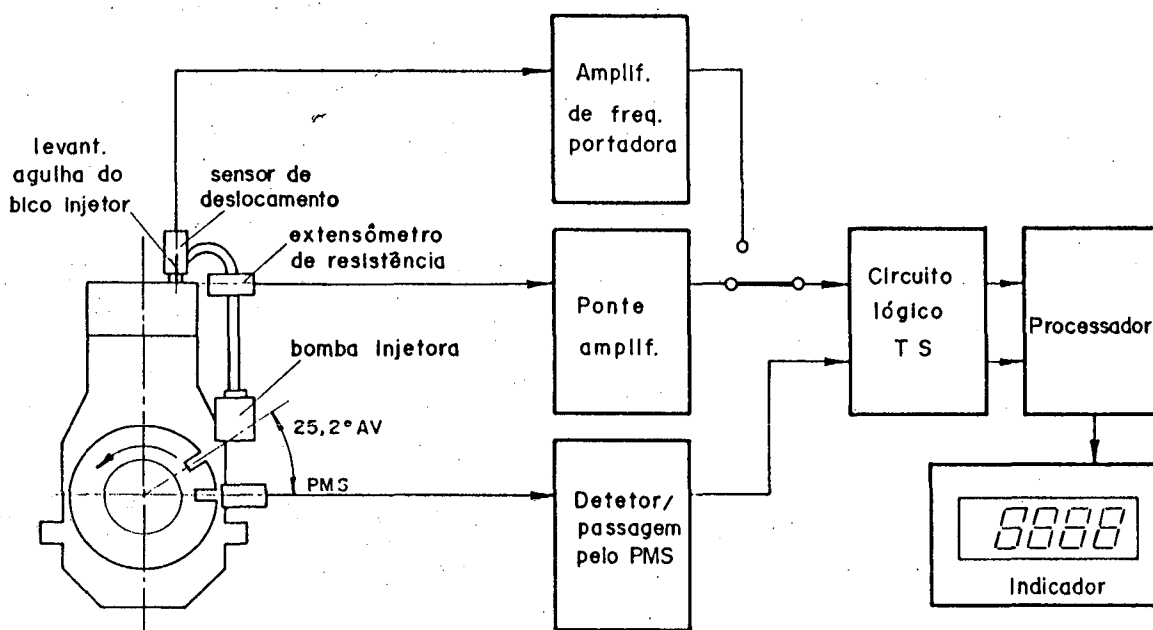


FIG. 3.14 - Diagrama de blocos de um SM de ângulos operacionais de um MCI/49/.

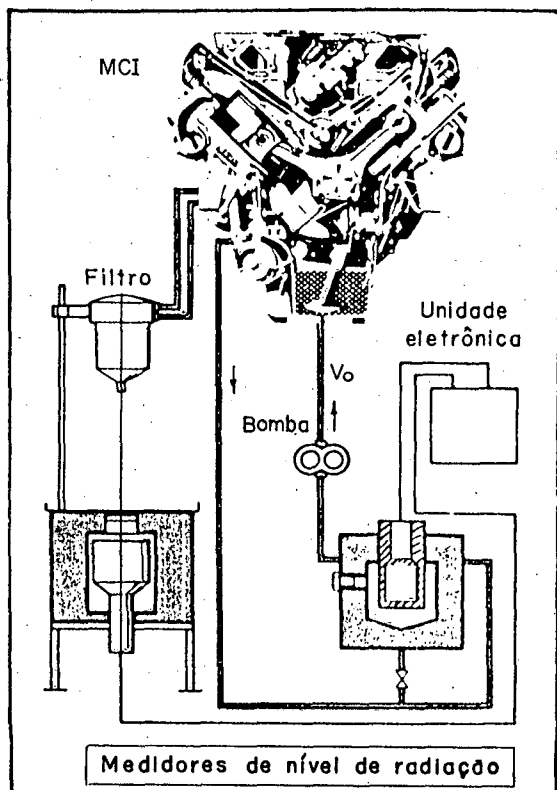
3.2.7 Outras Grandezas

Tem sido necessário desenvolver novos métodos e instrumentos para medição de grandezas de especial interesse, não só associados ao desempenho energético do MCI, mas também para avaliação do desgaste de componentes ou para controle e otimização da combustão em MCI.

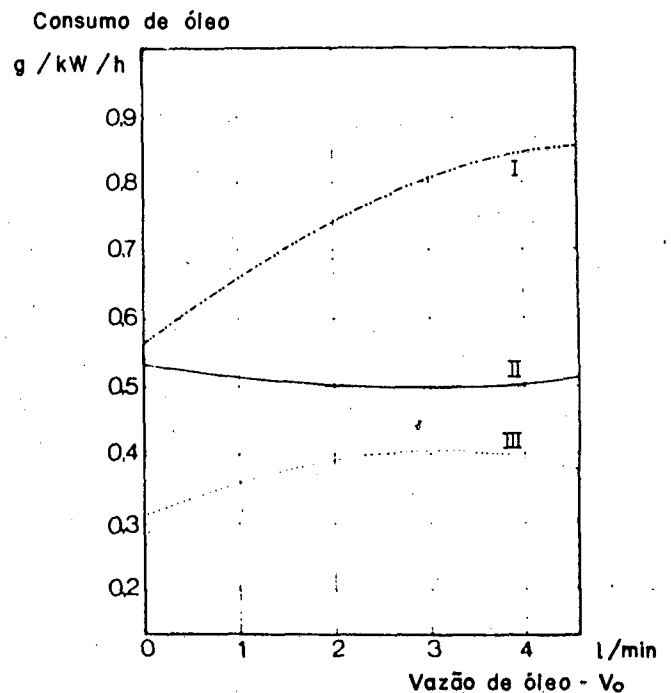
A medição do consumo de óleo lubrificante a tempo real, por exemplo, pode ser viabilizada através da adição de uma quantidade conhecida de uma substância radioativa como o trítio, no próprio óleo lubrificante. Uma vez que o óleo que passa para a câmara de combustão é queimado, a medição do fluxo de radiação nos gases de descarga permite determinar o consumo de óleo de forma quase instantânea. Utilizando-se adicionalmente uma circulação forçada

de óleo (vazão - V_o), tal método permite qualificar diferentes conjuntos de anéis/pistão após poucas horas de ensaio (fig. 3.15). Pelos métodos usuais (fig. 3.5) tais resultados poderiam ser obtidos somente após muitos ensaios de longa duração (50, 100 h) /6/.

Por outro lado, na avaliação e controle das condições da combustão, torna-se importante a medição do consumo de ar e da Razão Ar/Combustível - A/C. Nos BEMCI em geral a medição da vazão de ar na tubulação de admissão tem sido efetivada com auxílio de elementos deprimogênicos (orifícios, bocais ou venturi) e transdutores de pressão de diafragma ou medidores de vazão tipo



Sistema de Medição do consumo de óleo



Medidas de consumo de óleo para diferentes conjuntos de anéis de vedação (I, II e III)

FIG. 3.15 - Medição do consumo de óleo para qualificação de anéis e pistões de MCI/6/.

turbina de fluxo total, para os quais fabricantes garantem uma incerteza de medição de até $\pm 1\%$ VFE, nas condições reais de operação /50/. No entanto, as tendências quanto a medição de vazão de ar ou da razão A/C nos próprios MCI, tem requerido o uso de transdutores mais simples e de baixo custo, com vistas a sua utilização em sistemas de injeção eletrônica e de controle da emissão de gases. Alguns protótipos destes transdutores são apresentados e descritos detalhadamente nas referências /51, 52/.

3.3 INSTRUMENTAÇÃO DE CONTROLE

A modernização de técnicas e instrumentos de controle em SEMCI, atende basicamente a dois objetivos:

- automação do ensaio propriamente dita, visando a redução de custos operacionais, maior rapidez e obtenção de maior volume de informações;
- aumento da reprodutibilidade das condições operacionais impostas ao motor tanto em regime estabilizado como variável, com a finalidade de garantir maior confiabilidade aos resultados (redução da indeterminação).

Para estabelecer os requisitos a serem satisfeitos pela instrumentação necessária ao SEMCI devem ser consideradas a modalidade das operações e técnicas de controle disponíveis e/ou desejáveis. Estas operações englobam a climatização do ar, controle das temperaturas do óleo e fluido de arrefecimento e controle operacional do motor, basicamente torque e rotação, e adicionalmente parâmetros como o ângulo de injeção/ignição e razão ar/combustível. Para a automação destas operações são utilizados atuadores eletrodinâmicos, dentre os quais destacam-se:

- reguladores de corrente para freios eletromagnéticos e geradores elétricos;
- servo-válvulas para freios, motores ou circuitos hidráulicos;

- servo-posicionadores para regulagem da abertura de válvulas borboletas, bombas injetoras ou equivalentes, freqüentemente com transdutores potenciométricos para realimentação de posição;
- servo-reguladores do sistema de avanço, com medição do ângulo de ignição/injeção com transdutores angulares foto-ópticos;
- reguladores de pressão na alimentação de combustível para modificar a razão A/C (motores Otto).

Os atuadores utilizados para controle operacional do motor (servo-posicionadores, servo-reguladores) requerem o uso de tecnologias de micromecânica e eletrônica, desenvolvidas para o adequado controle do processo específico. Um considerável esforço deve ser dispendido no desenvolvimento da instrumentação de controle para BEMCI, se o domínio destas tecnologias por parte do usuário for requerido. Mais freqüentemente, no entanto, os usuários necessitam conhecer as limitações e potencialidades do controle do motor no BEMCI, apresentadas a seguir.

3.3.1 Controle Operacional Básico do Motor

Na automação para o controle básico do motor, o sistema deve oferecer condições para regulagem da rotação, torque, pressão no coletor de admissão (motores Otto) e abertura do carburador/bomba injetora. Na figura 3.16, é apresentado o diagrama de blocos de um BEMCI com um controlador analógico multi-modal, que permite variar a estratégia de controle do motor de acordo com a programação do ensaio. Admite entradas dos valores desejados de rotação-Rd, torque-Td, ou daqueles associados à taxa de alimentação, quer sejam, posição angular para servo-atuador-Ad ou pressão na admissão-Pd, com seu modo de operação sendo selecionado pelas chaves seletoras A e B. A configuração apresentada é a mais usual, qual seja, o controle da rotação através do freio e de torque por meio do "acelerador" do carburador/bomba injetora.

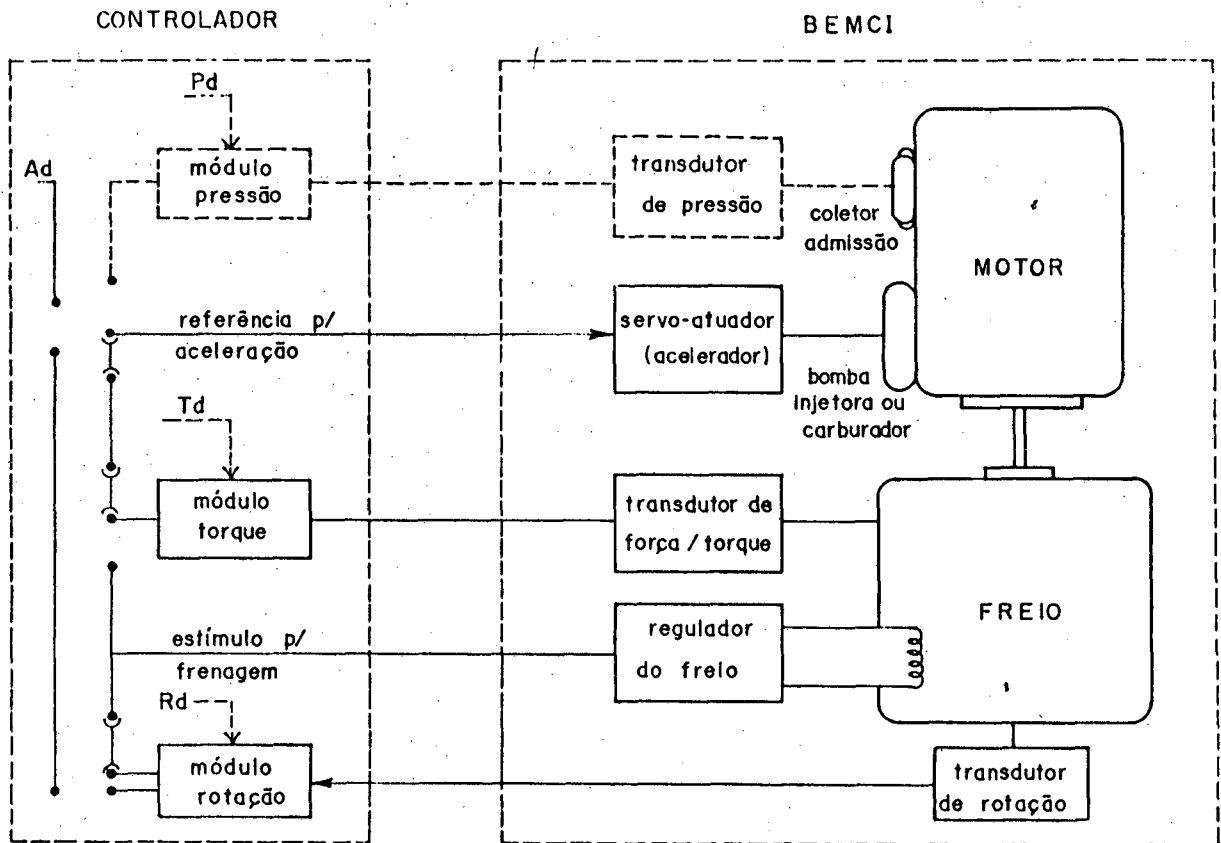


FIG. 3.16 - Diagrama de blocos de um controlador analógico para BEMCI.

Os módulos de controle do torque, rotação ou pressão são usualmente circuitos eletrônicos analógicos com ganhos Proporcional, Integral e Diferencial - PID ajustáveis, porém não adaptativos. No contexto atual é comum a substituição parcial ou integral dos citados módulos por algoritmos de controle PID implementados em microprocessadores. As potencialidades do uso de controle digital em BEMCI são apontados por seus usuários /20, 53/ como sendo:

- condições para alteração do modo de controle sem parar o motor. Ex: do controle de rotação e torque para o controle da rotação e da taxa de alimentação de combustível.
- minimização do tempo de resposta na variação do regime de

operação.

- capacidade de memorização das características operacionais do motor e freio, necessária à otimização do controle em toda a faixa operacional, utilizada na reprodução de perfis de torque e rotação em condições reais de operação.

3.3.2 Otimização do Controle Operacional

Sendo desejável uma mudança contínua e rápida do regime de operação do motor, deve-se evitar a oscilação transitória do torque ou rotação, sem contudo dispender excessivo tempo na regulagem do novo regime. Para tanto a avaliação do comportamento da rotação do motor a súbitas alterações da sua taxa de alimentação ou equivalente é recomendável. Na figura 3.17 são apresentados os resultados da otimização do controlador de um freio a correntes de Foucault, visando minimizar o tempo de estabilização da rotação após a alteração da abertura da válvula borboleta de um motor Otto de 1,3 l. A ajustagem ótima é realizada com o controle de rotação relativamente baixas (2000 rpm, no citado caso), tendo sido verificado que o ganho e constante de tempo do termo derivativo do PID são os fatores críticos a serem considerados na minimização das oscilações resultantes na rotação /28/.

Nos ensaios em regimes estabilizados, admitem-se controladores de torque com tempos de regulagem maiores que o da rotação e com pequena sensibilidade a perturbações (uso de filtros, valores médios, etc.). Nestes ensaios, o baixo erro no controle após a estabilização da rotação (fig. 3.17) é uma característica fundamental para ambos os tipos de controladores: de rotação ou de torque.

Por outro lado, nos ensaios com regime variável utilizados na reprodução de perfis de torque e velocidade a que o motor é submetido na operação em veículos, é imprescindível a adequada utilização de sistemas com controle digital /20, 22/.

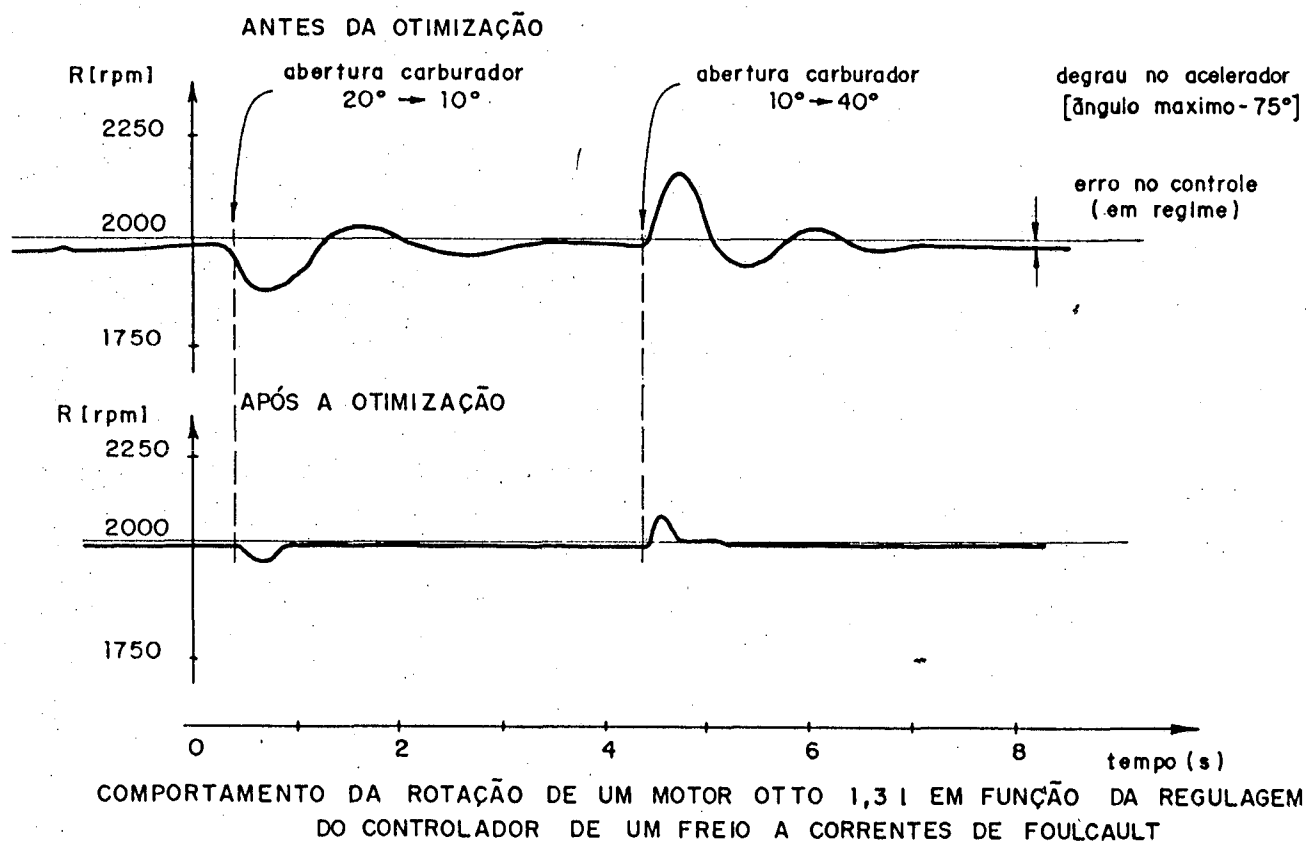


FIG. 3.17 - Otimização do controlador de um freio a correntes de Foulcault.

3.4 - QUALIFICAÇÃO DE INSTRUMENTOS

3.4.1 - Critérios Gerais para sua Seleção

Os usuários de SEMCI tem especial interesse que o sistema esteja a maior parte do tempo disponível para realização de ensaios propriamente ditos. Pode-se avaliar o aproveitamento do SEMCI neste sentido através da expressão:

$$A = \frac{TE}{TE+TP}$$

onde A = fator de utilização do SEMCI

TE = tempo de utilização em ensaios (h)

TP = tempo gasto em reparos e manutenção (verificação de defeitos, reparos, ajustagem, recalibração de instrumentos).

Recentes estudos realizados por Berg /54/ permitiram avaliar o fator de utilização de um conjunto de 5 bancos de ensaio funcionais e outro de 10 bancos de ensaio de durabilidade e otimizá-lo ao longo do tempo (atingiu-se $A = 0,95$), tendo-se concluído que os seguintes fatores contribuíram significativamente para a otimização em questão:

- padronização da instrumentação, com uso de instrumentos passíveis de serem temporariamente compartilhados com os de outros bancos de ensaio (ociosos ou utilizados por ensaios mais simples).
- eficiência na assistência técnica por parte de fornecedores de equipamentos.
- disponibilidade de pessoal com conhecimento detalhado dos módulos e instrumentos do sistema de ensaio.

No que concerne aos instrumentos do SEMCI, estes devem apresentar características que poupem o dispêndio de tempo em reparos e manutenção, entre os quais:

- facilidades para substituição de seus módulos no local de utilização,
- adequada confiabilidade e resistência as condições de operação no SEMCI (temperatura e vibração em especial).

Por outro lado, a preocupação com o estado operacional e a confiabilidade dos instrumentos é também fundamental para segurança operacional na execução de ensaios e a minimização da indeterminação dos resultados desejados. No entanto, a realização de verificações funcionais e de ajustagem para compensação de erros dos sistemas de medição e controle, embora fundamentais, não devem prejudicar a utilização do SEMCI na sua finalidade

precípua. Por este motivo, requer-se adicionalmente dos SM, uma ótima estabilidade de sua função transferência-FT, e/ou recursos para dinamizar a realização de testes e calibração, mesmo sob reais condições de operação.

Alguns sistemas de medição equipados com microprocessadores podem executar operações de autoverificação e autocalibração, fato bastante interessante pela economia de tempo de preparação e confiabilidade que propiciam. Certos analisadores de fumaça, por exemplo, realizam automaticamente a ajustagem do zero ao medirem o índice de reflexão da luz incidente sobre um filtro de papel antes que este seja exposto aos gases de descarga /10/. Outros SM dispõem de recursos para auto calibração como é o caso de alguns SM digitais de consumo de combustível /33/ e SM de pressões efetivas, estes últimos a tempo real, por submeterem seu transdutor de pressão sucessivamente à pressão atmosférica, à pressão de final de escala e a pressão a medir, com auxílio de válvulas de 3 vias /55/.

Embora tecnologicamente disponíveis, os instrumentos com auto calibração são ainda pouco usados em SEMCI, logo por enquanto também devem ser priorizados métodos eficientes para qualificação de instrumentos quanto a sua confiabilidade e paralelamente para uma padronização que possibilite sua fácil substituição ou uso eventual em ensaios onde sejam requisitados.

3.4.2 - Operações de Qualificação de Instrumentos

A calibração de sistemas de medição visa o levantamento de dados para operações de ajustagem ou aferição /16/, devendo ser realizada com um número de ciclos e pontos de leitura suficientes para caracterizar os erros aleatórios e sistemáticos de modo geral e os efeitos de histerese presentes em alguns tipos de transdutores (força, pressão, etc. É necessário ressaltar que além dos módulos usuais de SM (transdutor, unidade de tratamento de sinal e indicador), podem ser integrados na cadeia de medição

as chaves seletoras e conversores A/D das interfaces utilizadas. Em laboratório, é possível qualificar alguns módulos individuais, inclusive caracterizando seu comportamento na variação de temperaturas, porém nem sempre é possível calibrar o SM completo, com todos os seus módulos e linhas de transmissão. Neste caso é interessante avaliar a incerteza de medição do SM, considerando a propagação de erros na cadeia de medição, quais sejam, parcelas não compensadas de erros sistemáticos e aleatórios do transdutor, tratamento do sinal e demais módulos significativos do SM /16, 17/. Por outro lado é recomendável que também se disponha no BEMCI de recursos para calibração e ajustagem de sistemas de medição. Na figura 3.18 são apresentadas orientações mais específicas para qualificação para os SM das principais grandezas do ensaio. No que tange as operações realizáveis no próprio banco

GRANDEZA A MEDIR	INCERTEZAS DE MEDIÇÃO (SM)		OPERAÇÕES DE QUALIFICAÇÃO A EXECUTAR	
	USUAIS	ESPECIAIS	NO BEMCI	EM LABORATÓRIO
Torque	$\pm 0,5\%$	$\pm 0,2\%$	-calibração do SM -ajustagem do SM	-calibração do transdutor de força, verificando a influência da temperatura
Velocidade angular	$\pm 0,5\%$	$\pm 0,2\%$	-calibração do SM	-ajustagem de ganho e zero do conversor frequência/tensão
Consumo de combustível	$\pm 0,5\%$	$\pm 0,2\%$	-verificação da ocorrência de bolhas de ar ou vapor	- aferição de medidores volumétricos ou balanças
Vazão	$\pm 1\%$	$\pm 0,5\%$	-verificação da presença de fluxo descontínuo ou oscilatório	-calibração com o próprio fluido
Pressão	$\pm 1\%$	$\pm 0,5\%$	-calibração do SM -ajustagem do SM	-calibração do transdutor verificando sua estabilidade com a temperatura
Temperatura	<200°C	$\pm 1^\circ\text{C}$	calibração no local utilizando termômetros padrões (Pt100, etc...)	-calibração em banhos líquidos e fornos especiais
	>200°C	$\pm 1\%$		

FIG 3.18 - Operações de qualificação de sistemas de medição.

de ensaios, são úteis as seguintes recomendações para qualificação dos instrumentos disponíveis:

a) torquímetros

O processo de calibração de torquímetros de reação, quando são disponíveis braços calibradores (fig. 3.8), é bastante facilitado, no entanto é sempre preciso evitar erros:

- devido ao desalinhamento dos braços calibradores;
- devido ao posicionamento incorreto do transdutor de força;
- na ajustagem do comprimento dos braços: l, lc.

Usualmente a calibração inclui vários ciclos de carregamento e descarregamento e se estende por toda faixa de operação do SM. Pode-se no entanto realizar calibração especificamente na faixa de variação do torque a plena alimentação do MCI (70% a 100% torque máximo do motor) e ajustar a melhor reta para a FT do torquímetro nesta faixa, procedimento que permite uma compensação mais objetiva de seus erros de linearidade.

b) freqüencímetros

A utilização de um gerador de pulsos para simular o sinal do transdutor a uma freqüência conhecida é recomendada. O método indireto de calibração, utilizando o motor em funcionamento para comparação das leituras de um SM padrão e a calibrar, é menos recomendável, porque as variações inerentes à rotação do motor elevam a indeterminação dos resultados do próprio padrão.

c) SM de consumo de combustível

Cada SM exige procedimentos específicos para sua calibração. Aqueles utilizados para medição intermitente apresentam maiores facilidades para calibração uma vez que operam com amostras de combustível, cujo peso ou volume é facilmente determinável. Já na calibração de medidores de vazão tipo turbina, ou de deslocamento positivo, devem-se utilizar bancos de ensaio específicos. Estes podem ser dotados de buretas com

células fotosensíveis, uma vez que estas são facilmente incorporáveis a sistemas de alimentação de combustível em BEMCI /33/.

d) SM de pressão.

É interessante realizar a calibração indireta de transdutores elétricos de pressão no próprio BEMCI, com auxílio de SM de pressão padrão, por exemplo, colunas de líquido, especialmente quando os transdutores forem sensíveis à temperatura de operação ou quando o nível dos medidores for diferente do nível na conexão com as linhas de transmissão de pressão.

e) SM de temperaturas.

Os transdutores devem ser calibrados pelos fabricantes ou em laboratório na sua devida faixa de operação. A disponibilidade no BEMCI de pelo menos um termômetro padrão (p. ex. um Pt100) é bastante interessante pois permite verificar as leituras de outros transdutores, em especial os utilizados na medição de temperaturas do ar e gases, nos sistemas de admissão e descarga, respectivamente.

4. AUTOMAÇÃO EM SISTEMAS DE ENSAIO

Na constituição de um SEMCI são requeridas facilidades para automação a um nível básico. Faz-se necessário, em primeiro lugar, a centralização do comando das operações de controle e medição das principais grandezas do ensaio, de forma a facilitar a operação manual e automática do BEMCI. Simultaneamente, é usual a constituição de um sistema computacional que proporcione uma distribuição racional de unidades de processamento e periféricas de entrada/saída (terminais, impressoras, unidades de disco).

O baixo custo dos microcomputadores tem justificado sua utilização para supervisionar cada banco de ensaio /56/, incentivando a descentralização de funções e operação autônoma dos módulos de ensaio. Não obstante, tarefas de programação, análise e documentação de ensaios podem ser compartilhadas com outros computadores interligados aos microcomputadores dos bancos de ensaio.

A configuração de um moderno sistema de computadores para ensaios de desempenho de MCI apresentada na figura 4.1, ilustra estas tendências. No decorrer deste capítulo, será efetivada a análise dos aspectos de automação dos módulos de SEMCI, em especial, utilizando-se a configuração apresentada como base para análise mais objetiva caso necessário.

4.1 OBJETIVOS GERAIS

De um modo geral, o sistema computacional de suporte deve dinamizar a troca de informações necessárias à programação, execução e análise comparativa de resultados de ensaios. Prioritariamente, deseja-se que estes possibilitem:

- reduzir o tempo entre a preparação do ensaio e obtenção dos resultados desejados.

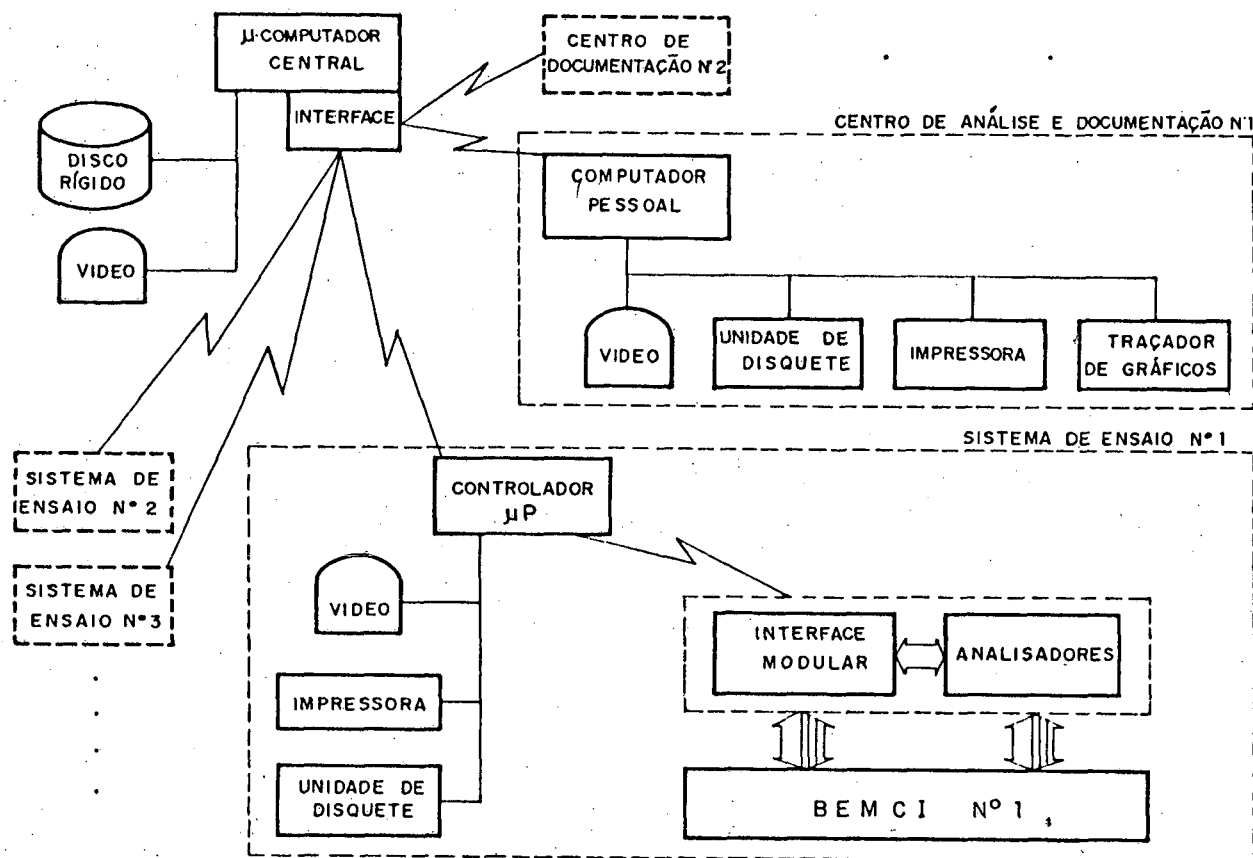


FIG. 4.1 - Configuração de um sistema computacional para ensaios de MCI ("hardware") /56/.

- facilitar o armazenamento e recuperação de dados, assim como a geração de gráficos e relatórios, para comprovação de resultados.

Por outro lado, deseja-se que a automação propicie condições em cada sistema de ensaio particular para:

- obtenção de resultados imediatos e tomada de decisões nestes baseada.
- execução autônoma de ensaios, permitindo a economia de mão-de-obra, com o controlador assumindo a supervisão do ensaio sem intervenção do operador.
- maximização da quantidade e qualidade de dados obtidos em ensaios.
- aprimoramento da segurança operacional através da contínua monitoração das grandezas do ensaio.

4.2 AUTOMAÇÃO DE BANCOS DE ENSAIO.

A partir de cada banco de ensaio pode-se constituir um SEMCI particular, capaz de atender a pelo menos uma das seguintes funções /57/:

- aquisição e processamento de dados a tempo real,
- controle automático do ensaio e das condições de operação do motor,
- aquisição rápida de dados e processamento dos parâmetros cíclicos do motor (pressão na câmara de combustão e grandezas derivadas).

Para execução ou supervisão das funções relativas à aquisição de dados e controle automático, um microcomputador que possa ser interfaceado com transdutores, atuadores ou analisadores do BEMCI (controlador) pode ser utilizado. Neste caso suas funções devem ser detalhadamente estabelecidas.

4.2.1 Funções do Controlador do Banco de Ensaio.

A seqüência de operações executadas pelo controlador durante um ensaio, deve permitir o atendimento das seguintes funções:

- seqüenciamento da aquisição de dados, incluindo leituras de instrumentos que exijam inicialização de procedimentos e determinado tempo para completar a operação de medição (buretas, balanças, analisadores).
- processamento de dados em tempo real, em especial, a conversão para unidades de engenharia e cálculo de grandezas derivadas, visando a apresentação de parâmetros em terminal de vídeo.
- monitoração do estado operacional do MCI, com apresentação de parâmetros no vídeo e verificação de limites admissíveis.
- acionamento de alarmes com parada emergencial do motor, caso necessário.

- gravação de valores de grandezas físicas, instantâneos, médios e/ou de desvio padrão.
- supervisão do ajuste manual ou automático dos valores desejados de rotação, torque ou abertura do carburador/bomba injetora.

O desempenho do controlador está relacionado não somente a sua capacidade de atender isoladamente as mencionadas funções, mas também em executar operações simultâneas ou numa seqüência adequada. Também a versatilidade para atender a interrupções ou executar operações de emergência é um requisito fundamental para o controlador e seus programas de execução de ensaios. Um controlador ideal deveria ser capaz de exercer todas as funções mencionadas, simultaneamente: controle, aquisição de dados, cálculos, monitoração, gravação, segurança e ainda atender a solicitações do operador do BEMCI.

O controlador pode assumir outras funções como a emissão de relatórios de dados brutos ou processados e gerenciamento de dados e programas de ensaios, sendo interessante neste caso a integração ao sistema de pelo menos uma impressora e unidade de disquete. Tais funções, no entanto, usualmente não geram requisitos adicionais para controladores constituídos com base em microcomputadores pessoais.

4.2.2 Seqüenciamento de Operações Durante um Ensaio.

A sucessão de operações de controle, medição e outros de que é composto um ensaio de MCI, é idêntica a cada regime de operação do motor. Por sua vez, a execução de operações num regime obedece a uma seqüência lógica, pré-estabelecida caracterizada pelo fato do controlador do ensaio dar atendimento a uma ou várias das funções já mencionadas. O conjunto de operações exercidas prioritariamente pelo controlador durante a execução do ensaio caracteriza o estado funcional do sistema. Na figura 4.2 é apresentado o diagrama de operações e estados funcionais do

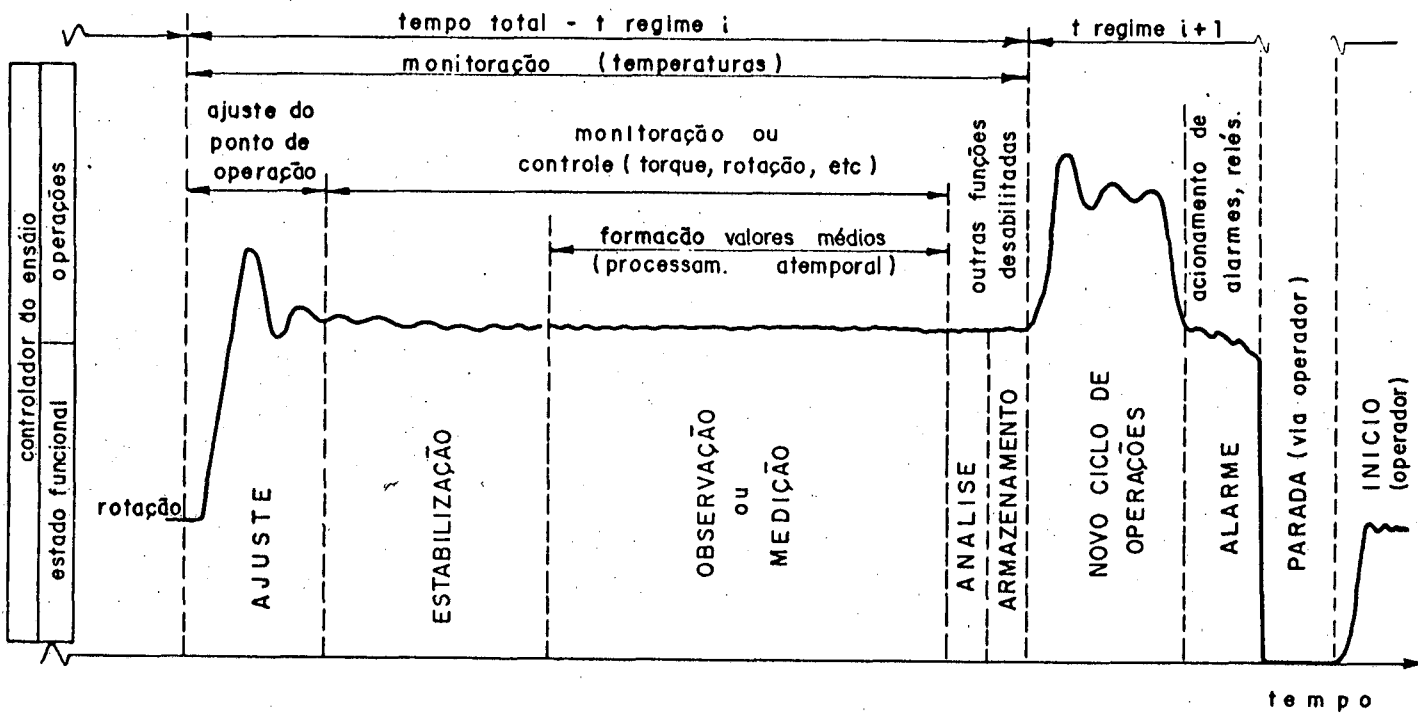


FIG. 4.2 - Funções e estados operacionais de um controlador de ensaios.

controlador de um módulo de ensaio.

O seqüenciamento de operações com a passagem de um estado funcional para outro e da mudança de regime pode ser efetivado ao final de um tempo pre-estabelecido ou através de:

- um pedido do operador do sistema.
- rotinas identificadoras de condições operacionais do motor.

Usualmente a passagem dos estados de controle para estabilização, regime e gravação se dá sempre que ultrapassado um limite de tempo. Pode-se permitir que o operador acelere o processo ou solicite análise (cálculos), gravações ou paradas do motor intermediários caso ache conveniente. Também é possível utilizar rotinas identificadoras para determinar a estabilização das condições de operação, efetivando desta forma a mudança ao próximo estado funcional do controlador. No entanto, a utilização mais usual das rotinas identificadoras é na verificação de limites quanto a grandezas do ensaio, determinando a passagem

para estados de ALARME e eventual PARADA (do motor). O fluxograma da figura 4.3 destaca o papel das rotinas identificadoras num programa de medição para controladores de ensaios /57/. Tanto os valores médios como os desvios padrões das grandezas medidas são avaliadas e comparados com limites pre-estabelecidos para alertar o operador ou o controlador do ensaio para a execução das medidas necessárias. Também ilustra a estrutura básica de uma rotina elementar de aquisição de dados para ensaios de MCI.

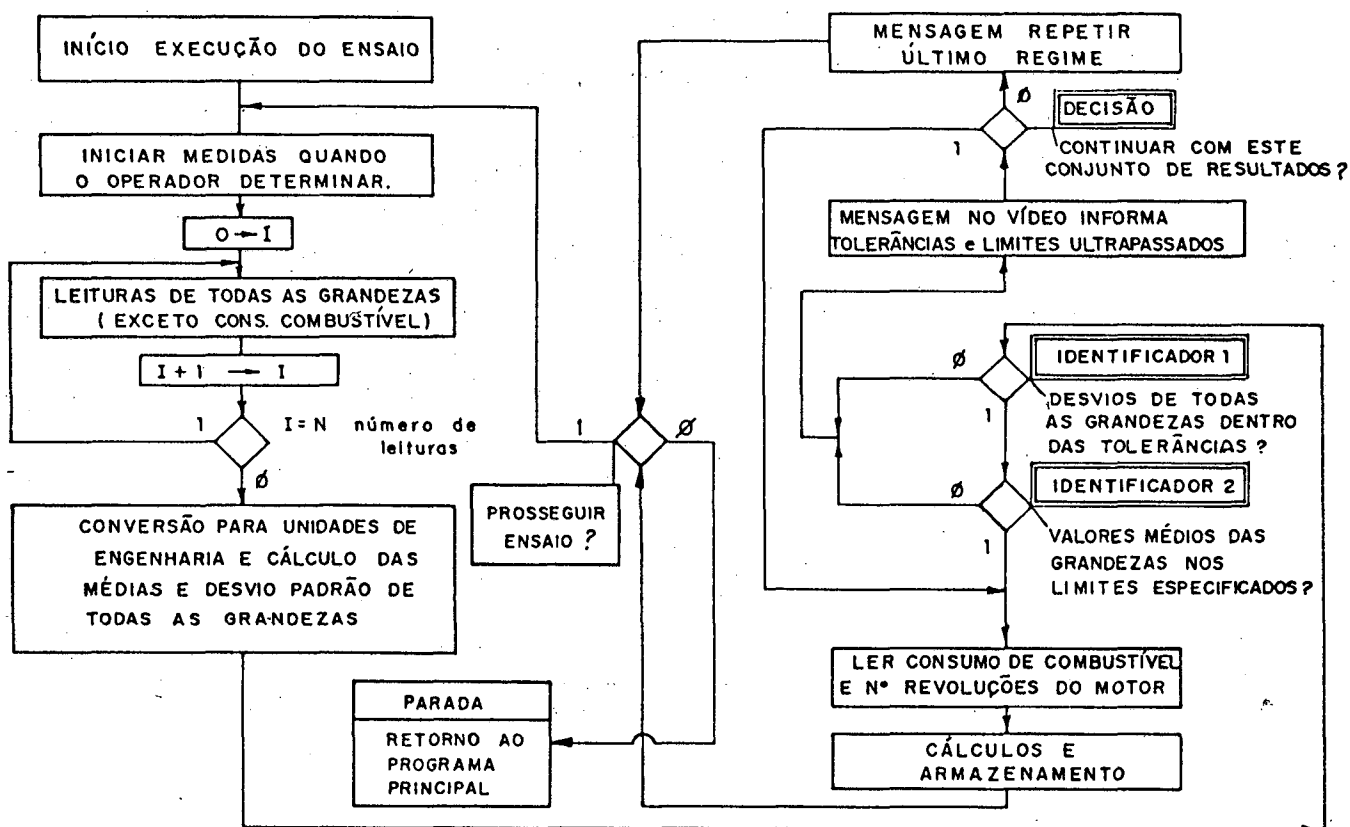


FIG. 4.3 - Rotina de medição para controladores de ensaios (MCI).

A análise efetuada evidencia a importância do desenvolvimento de programas bem elaborados para controladores de ensaio, dos quais dependem a versatilidade e facilidade de operação do sistema. Fornecedores de sistemas de ensaios tem tendência a oferecer configurações, interfaces e pacotes de programação padronizados. A versatilidade destes sistemas, nestes

casos, é discutível e sua operacionalidade deve ser avaliada tanto do ponto de vista produtivo como do relativo à comodidade proporcionada a operadores e engenheiros de ensaio. O desenvolvimento de programas voltados para os requisitos específicos do SEMCI e dos ensaios a realizar é freqüentemente uma opção mais inteligente.

4.3 INTERFACES DE AQUISIÇÃO E CONTROLE

A comunicação entre os instrumentos do banco de ensaio e o sistema computacional requer o uso de um conjunto de circuitos lógicos, em especial, chaves seletoras e conversores A/D e D/A, que compõem a interface de aquisição e controle de um BEMCI. Suas funções, requisitos e características principais são discutidos a seguir.

4.3.1 Funções das Interfaces

As interfaces de aquisição e controle permitem, basicamente a aquisição de sinais e o acionamento de relés ou atuadores mas também podem gerenciar a comunicação entre controlador/instrumentos priorizando operações relacionadas a segurança do sistema. Para evitar que o controlador se ocupe de tarefas repetitivas, um microprocessador interno a interface pode realizar, independentemente, tarefas como a leitura de transdutores, ativação de atuadores ou armazenamento temporário de dados. Adicionalmente, podem acomodar um relógio a tempo real, módulo fundamental para o controle de tempo do ensaio pelo controlador ou para medição do intervalo entre eventos.

4.3.2 Requisitos das Interfaces de Aquisição e Controle.

Para sua utilização em SEMCI é desejável que estas interfaces apresentem características operacionais e metrológicas adequadas dentre os quais cumpre destacar:

- flexibilidade configuracional: deve ser configurada de modo a atender necessidades específicas de cada banco de ensaio, mediante a incorporação de módulos de "hardware" necessários e suficientes, mas com possibilidades para eventual expansão.
- universalidade: capacidade de interligação com microcomputadores ou computadores de médio ou grande porte.
- rapidez de processamento: para execução de tarefas a tempo real.
- hierarquização de funções: capacidade de interromper a execução de uma tarefa para atender a outra mais prioritária.
- qualidade das chaves seletoras: devem ser projetadas de forma a minimizar efeitos perturbadores como a variação da resistência de contato e aparecimento de tensões termoelétricas /47/.
- adequação dos conversores A/D e D/A: quanto a faixa operacional (sensibilidade), resolução e velocidade de conversão. Conversores de pelo menos 12 bit (resolução $\emptyset, \emptyset 5\%$ VFE), com erro de linearidade admissível de ± 1 LSB são desejáveis. Os sinais de entrada devem variar segundo a faixa operacional do conversor (\emptyset a 1 V, \emptyset a 5 V, etc), para minimizar erros relativos.
- facilidade de manutenção: uma característica usual das interfaces modulares.

4.3.3 Interfaces Modulares de Aquisição e Controle

Na figura 4.4 é apresentada uma interface de concepção modular para aquisição e controle (IMAC). As IMACs utilizadas em BEMCI são formadas usualmente, pelos seguintes módulos de "hardware", os quais podem ser agrupados de acordo com as necessidades de cada aplicação /58/:

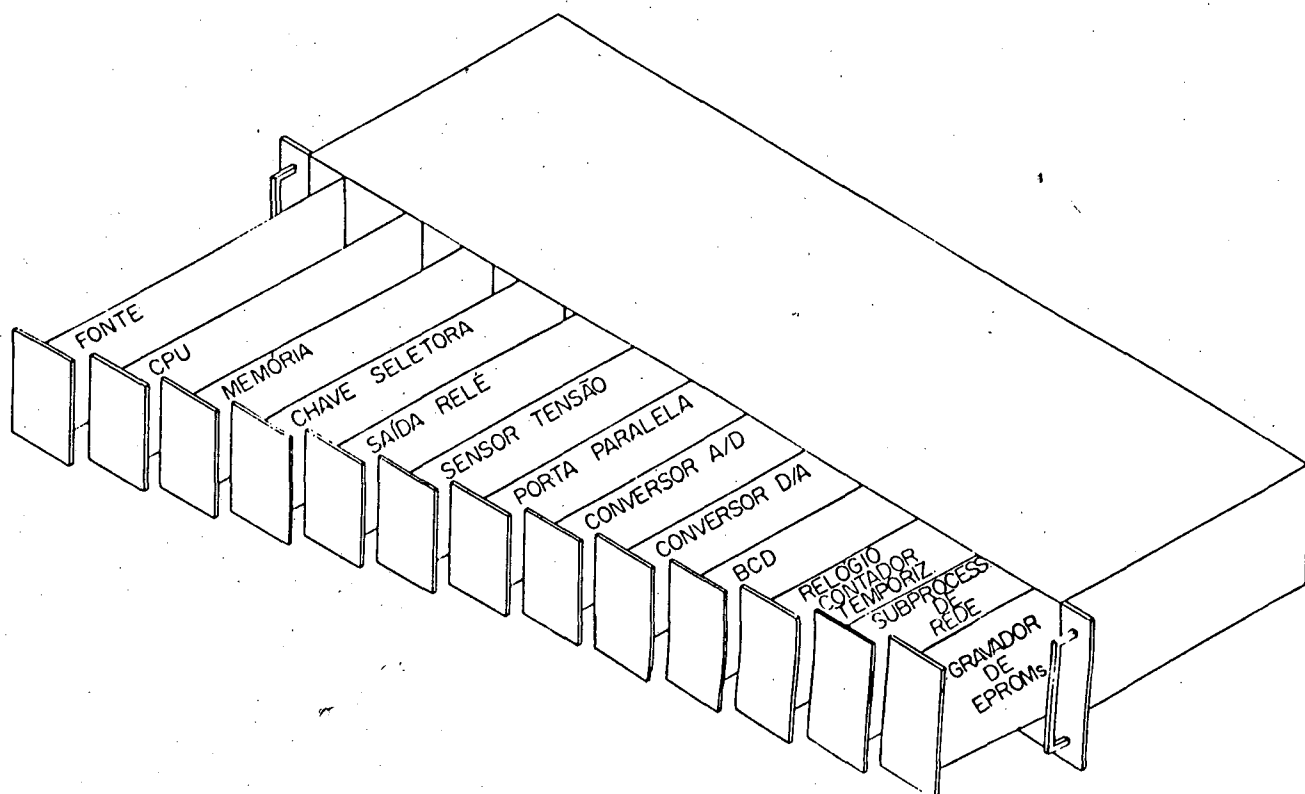


FIG. 4.4 - Módulos de uma interface modular de aquisição e controle /58/.

- fonte de alimentação: com diferentes tensões de saída para módulos digitais e analógicos.
- CPU ou microprocessador: memória RAM e EPROM.
- chave seletora: constituída por vários relés (4 ou 8, em geral) com 3 ou 6 contatos para entrada de sinais. Devem ser utilizados relés especiais para termopares.
- saída relé: conjunto de relés para tensões elevadas (até 250V, por exemplo) utilizados para acionamento de alarmes e dispositivos de segurança.
- conversor Analógico/Digital: de 12 bits ou mais, usualmente. Opções para sua autocalibração, auto-zeragem e ajuste da faixa de tensão são desejáveis.
- conversor Digital/Analógico: com faixa de tensão de saída regulável, de preferência.
- relógio/contador/temporizado: relógio a tempo real

programável, entradas para contadores de pulsos e saídas.

Outros módulos podem ser utilizados, para comunicação digital com outros instrumentos (entrada BCD) ou para integrar a IMAC à redes de comunicação de sistemas de processamento (subprocessador de rede), como ilustra a figura 4.5.

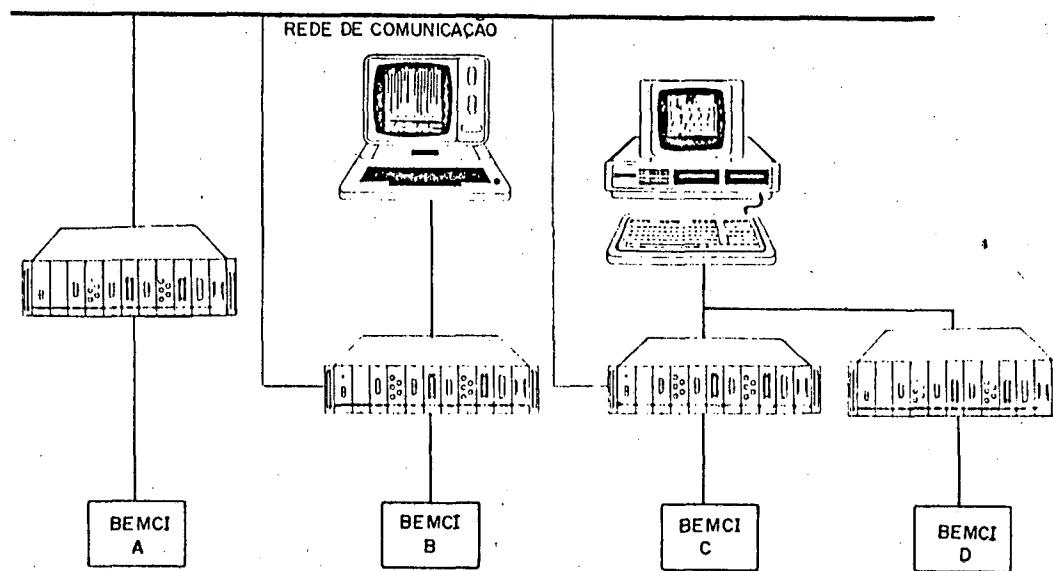


FIG. 4.5 - Versatilidade quanto a integração de IMAC à redes de comunicação de computadores.

4.4 OTIMIZAÇÃO DE RESULTADOS DE ENSAIO

Os recursos para aquisição de dados e controle do ensaio, proporcionados pelas interfaces de aquisição e controle e demais módulos de automação, propiciam oportunidades para o registro contínuo das condições de operação e desempenho do motor e viabilizam a supervisão de operações dos instrumentos de medição e controle, contribuindo para melhor qualidade nos resultados obtidos.

4.4.1 Finalidades do Acompanhamento Contínuo da Operação do Motor

A aquisição e registro contínuo das grandezas de ensaio, além de atender a finalidades de monitoração e segurança operacional, permite:

- obter médias representativas das grandezas medidas, bem como sua variância no período de medição.
- avaliar a flutuação temporal das grandezas medidas e/ou sua evolução ao longo do tempo.
- perceber rapidamente o desempenho irregular do motor (mal regulado ou defeituoso) ou quando opera fora das condições pré-estabelecidas, para evitar erros grosseiros.

4.4.2 Aplicações da Supervisão de Instrumentos

A supervisão de instrumentos permite minimizar, em certos casos, suas incertezas de medição e garantir a confiabilidade das operações da medição e controle por meio da:

- aplicação de funções transferência não lineares mais próximas das efetivas, reduzindo-se desta forma erros sistemáticos.
- medição de consumo de combustível pelo processo indireto (buretas e balanças para combustível, em especial), através da determinação mais exata do tempo de consumo de combustível.
- autozeragem ou autocalibração de SM durante a execução de ensaios, com ajustagem de suas funções transferência se necessário.
- supervisão de controladores da operação do motor, torque e rotação em especial, efetuando as devidas correções caso necessário. Por exemplo, supondo que a rotação seja 1990 rpm ao invés de 2000 rpm como desejável, o microcomputador pode executar uma rotina de correção da referência para frenagem do motor, aliviando a carga até a rotação atingir 2000 rpm, efetivamente.

Outras aplicações da supervisão podem ser necessárias em casos mais específicos, no entanto, os acima mencionados são os mais usuais. Estas aplicações devem ser previstas e consideradas na elaboração dos programas de medição do SEMCI.

4.4.3 Técnicas para Otimização

São consideradas a seguir, algumas técnicas que podem ser utilizadas para assegurar maiores garantias e confiabilidade quanto aos resultados do ensaio:

- iniciar as leituras de um sinal algum tempo depois do fechamento do relé da chave seletora (ms), para minimizar efeitos da variação da resistência de contato.
- seqüenciar as leituras dos transdutores adequadamente formando um ciclo e repetí-las várias vezes para que a amostragem dos sinais das grandezas do ensaio seja representativa.
- verificar a repetibilidade dos valores ajustados de rotação ou torque quando se utilizam de controladores automáticos. Utilizar a supervisão do microcomputador para corrigir erros sistemáticos.
- atualizar as médias das grandezas medidas em tempo real, isto é, após cada medida. Um procedimento análogo é recomendável para cálculo de desvios padrões.
- comparar desvios padrões das grandezas medidas a limites pré-estabelecidos e alertar o operador em caso de sua ultrapassagem.

A avaliação da otimização de resultados de ensaios, no entanto, requer estudos experimentais com instrumentos e métodos apropriados. A automação de cada SEMCI particular, pode apresentar muitos requisitos específicos. Optou-se pela análise prática destas questões através da implementação de um sistema de ensaio para motores veiculares, apresentado no próximo capítulo.

5. IMPLEMENTAÇÃO E TESTE DE UM SISTEMA DE ENSAIO

Foi implementado um conjunto de equipamentos e módulos para automação em um banco de ensaio disponível no Laboratório de Motores do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC. O sistema de ensaio foi configurado de forma a viabilizar a análise do comportamento de um motor veicular e suas implicações sobre a operação de instrumentos, otimização da aquisição de dados e do controle do ensaio.

5.1 CARACTERÍSTICAS DO BANCO DE ENSAIO E SEUS INSTRUMENTOS

O banco de ensaio que adequou-se aos propósitos deste trabalho é correntemente utilizado para ensaios de homologação de motores veiculares convertidos de gasolina para álcool, como atribuição do Centro de Apoio Tecnológico (CAT) da UFSC, já tendo sido utilizado em outros trabalhos de pesquisa aplicada /59/.

O equipamento básico deste BEMCI é um freio a correntes de Foulcault com capacidade de absorção de potência até 70 kW, cujo torquímetro possui um braço de 0,45 m, em cuja extremidade localiza-se um transdutor de força do tipo universal (fig. 5.1).

Por outro lado, para o arrefecimento do motor é disponível um reservatório de água, sem controle automático de temperatura, mas com um circuito de alimentação de água fria que permite limitar o aumento excessivo da temperatura da água de arrefecimento (fig. 5.2). A sala do BEMCI possui um ventilador de médio porte e um exaustor utilizados para promover a circulação de ar e impedir a super elevação da temperatura do ar de admissão do motor, uma vez que não se dispõe de tubulações para coleta de ar em outros ambientes. Por sua vez, a sala de operação é climatizada e nela se localizam o painel de comando, o controlador do freio e as unidades tratamento de sinal dos medidores de torque e temperatura (fig. 5.3).

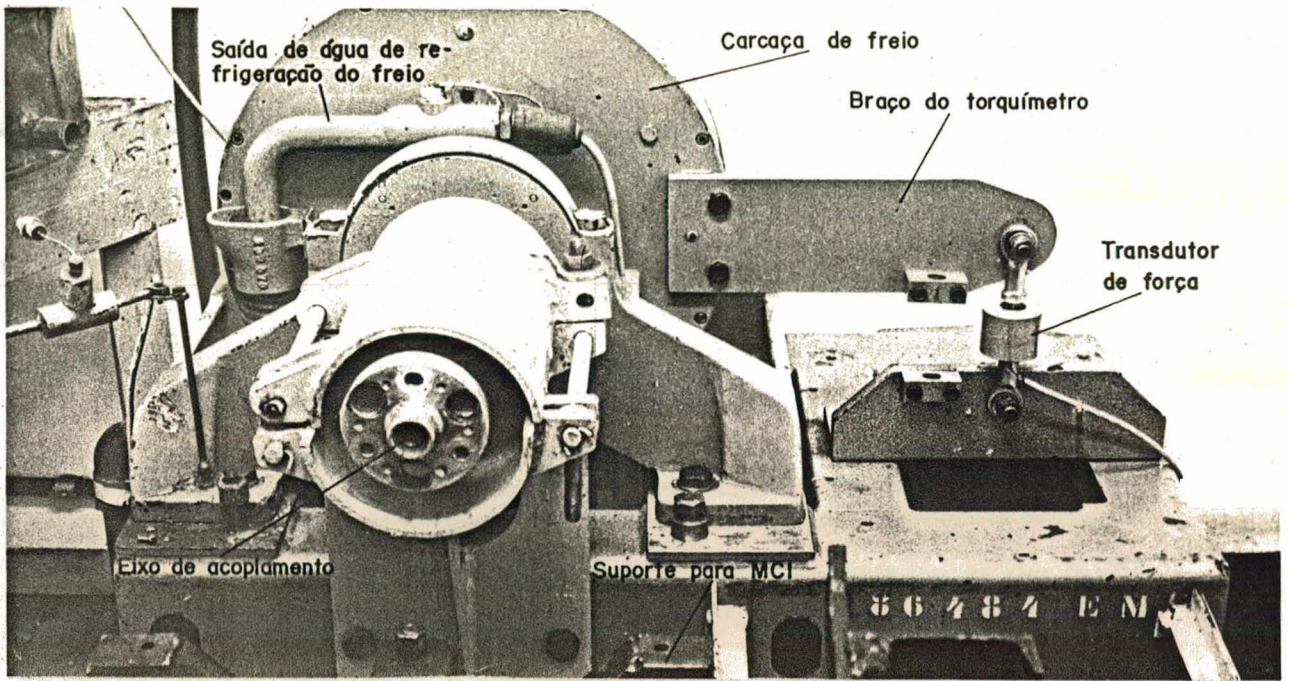


FIG. 5.1 - Freio eletromagnético e seu torquímetro.

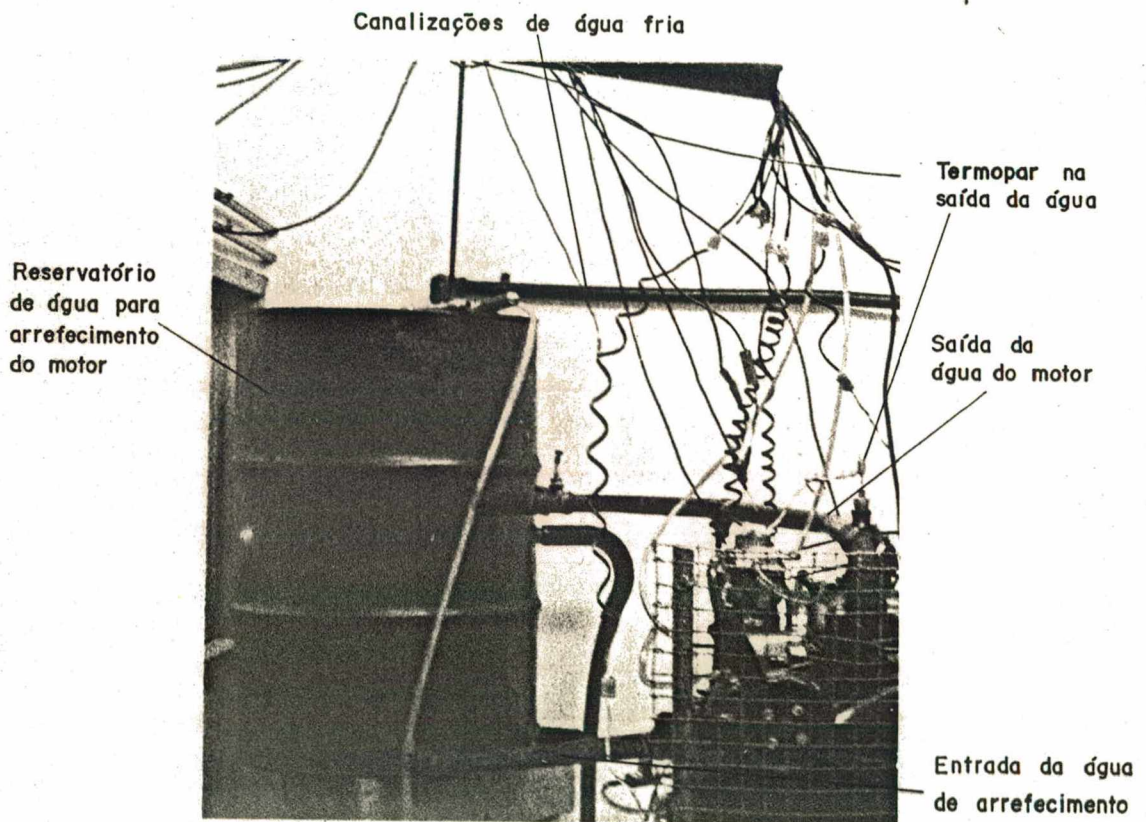


FIG. 5.2 - Arrefecimento do motor no banco de ensaio.

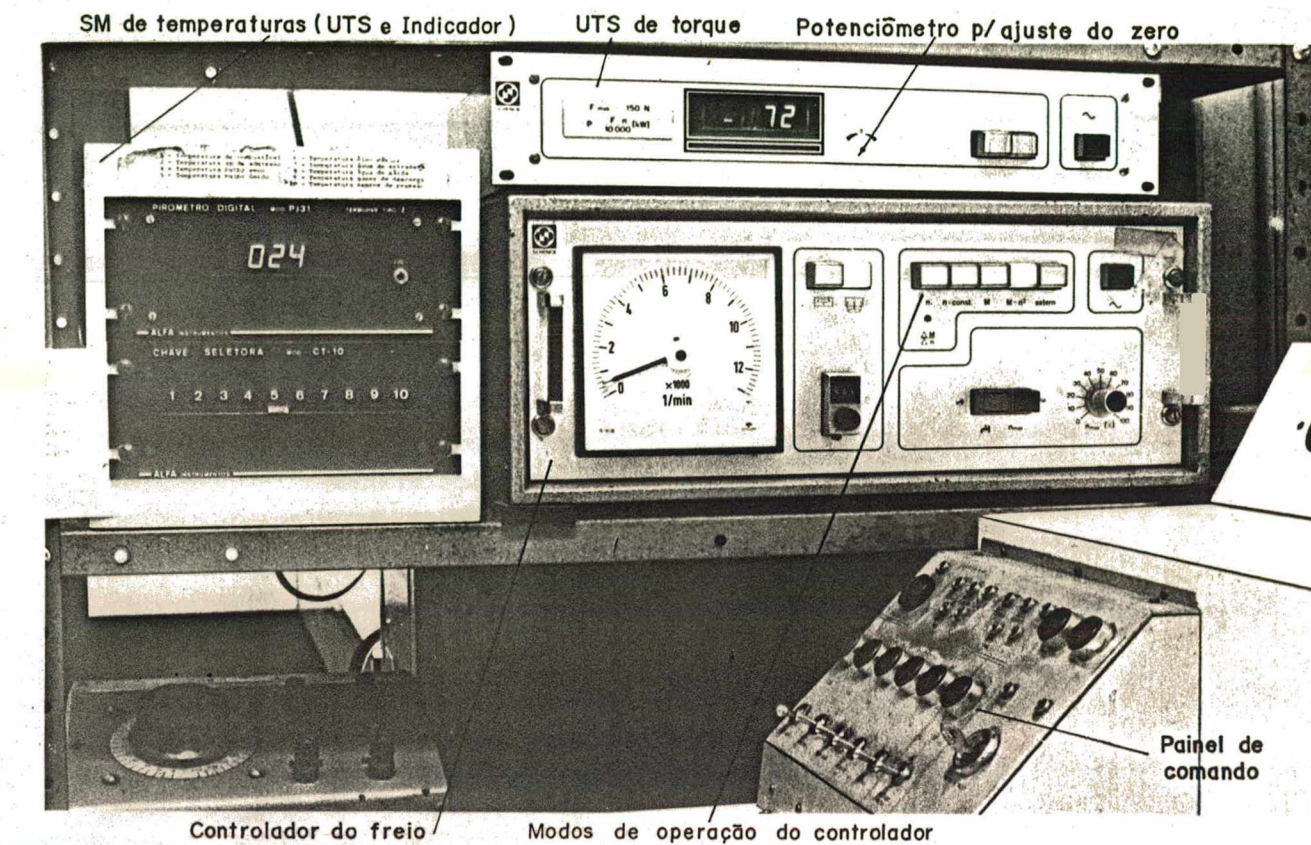


FIG. 5.3 -- Instrumentos da sala de operação do banco de ensaio.

Algumas informações relevantes a respeito dos sistemas de medição e controle utilizados na operação de ensaios são apresentadas a seguir:

a) Controlador do freio

A função básica do controlador do freio eletromagnético é o fornecimento da corrente de alimentação às bobinas de seu estator. A intensidade de corrente fornecida (logo o torque de frenagem) é relativamente independentemente da rotação do motor e proporcional a uma tensão de $\emptyset - 1\emptyset V$, regulado pelo potenciômetro de ajuste do controlador ou externamente, nos modos de operação "M" e "extern", respectivamente (fig. 5.3). No entanto, são disponíveis modos que utilizam a realimentação

com o sinal analógico proporcional à velocidade angular, os quais possibilitam: a geração de curvas quadráticas de torque x rotação (" $M \sim n^2$ "), a variação da sensibilidade do freio e suas curvas operacionais (" n ") ou o controle em malha fechada da velocidade angular do freio e motor a ensaiar (" $n = \text{const}$ "). Para fins de segurança operacional, o controlador possui um relé normalmente fechado por onde passa a corrente da bobina de ignição do motor ou equivalente, que é aberto se a refrigeração do freio estiver inoperante, e nos casos de falta de energia elétrica ou ultrapassagem da máxima rotação admissível no freio. Enquanto o motor estiver em funcionamento, o controlador desabilita a mudança ou troca do seu modo corrente de operação (" n ", " $M \sim n^2$ ", etc), admitindo, no entanto, a mudança da entrada interna (manual) ou externa do sinal de referência para o controle /60/. Este fato exemplifica uma das desvantagens dos controladores analógicos, previamente citadas no item 3.3.1.

b) Unidade de tratamento de sinal do torque

A unidade de tratamento de sinal (UTS) do torque é constituída, basicamente, de um módulo de amplificação para pontes extensométricas, modelo HBM GA Ø3, de um filtro ativo passa-baixa ($\approx 1,2$ Hz) e por um indicador, um voltímetro digital de 3 1/2 dígitos. A ajustagem do zero, ou compensação eletrônica, uma vez que o peso do braço do torquímetro não é contrabalanceado, é realizada através de um potenciômetro de fácil acesso da própria UTS (fig. 5.3).

c) Sistema de medição de temperaturas

É constituído basicamente por uma chave seletora manual, com 10 canais; que seleciona sinais de termopares tipo J para tratamento e indicação num módulo posterior (fig. 5.3). O tratamento do sinal realizado, engloba a compensação de junta fria e linearização por segmentos, e não introduz erros maiores que $\pm 1^\circ\text{C}$ nas medidas de temperatura, de acordo com o fabricante /61/.

d) Sistemas de medição de combustível

Era disponível para medição do consumo de combustível, um tubo de vidro interligado a um reservatório auxiliar, que possui uma escala para assinalar o volume correspondente a 250 ml entre duas linhas horizontais consecutivas. O tempo para consumo de um volume determinado (250, 500 ml, etc) era cronometrado manualmente com auxílio desta escala. Previam-se que este processo de medição necessitaria ser automatizado ou substituído por outro mais confiável. Com este intuito foi aproveitada uma balança mecânica com resolução de 0,1 g, modelo Mettler P11, disponível na UFSC, para constituir um SM de combustível alternativo (fig. 5.4).

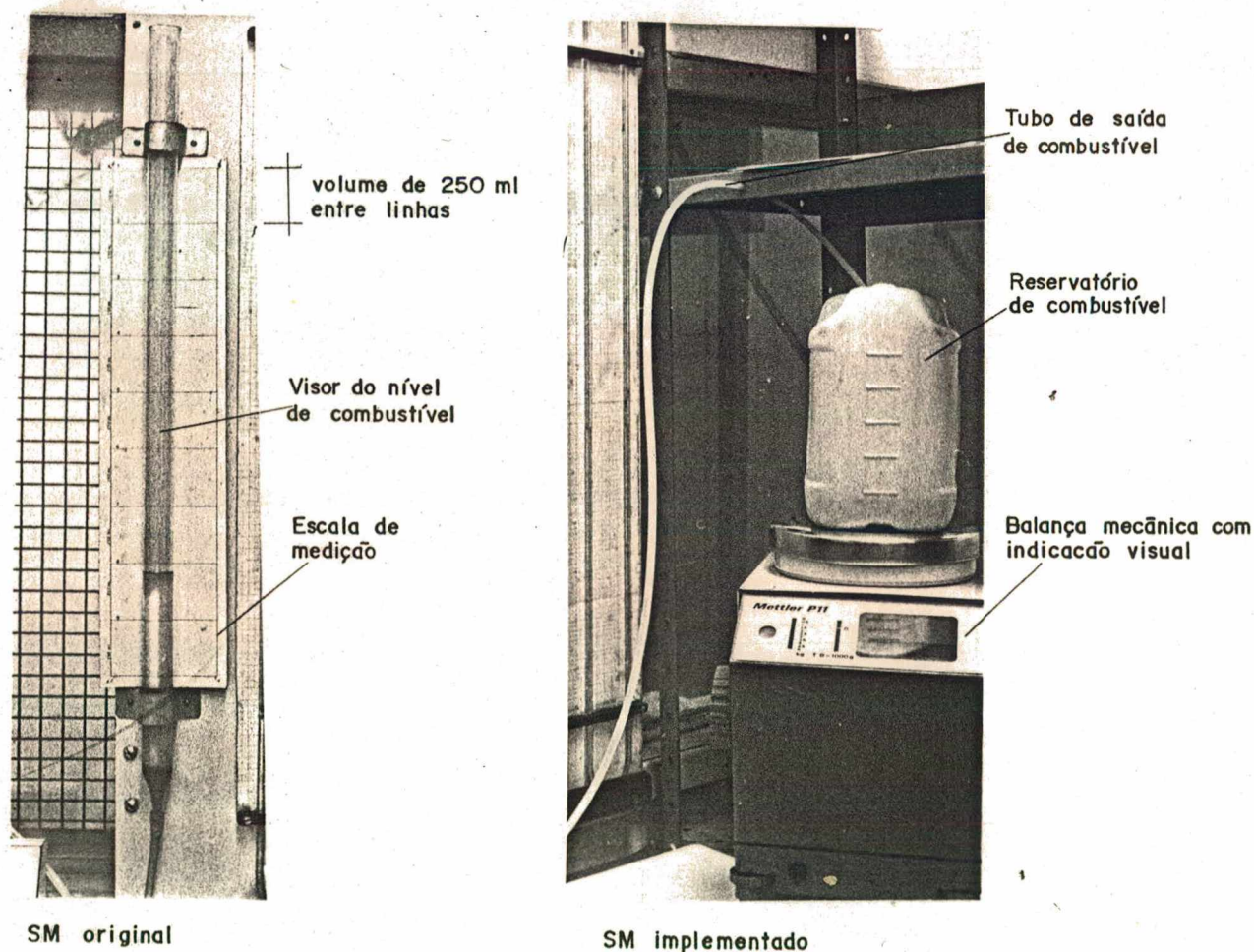


FIG. 5.4 - Medidores do consumo de combustível.

5.2 PREPARAÇÃO DO SISTEMA DE ENSAIO

Os instrumentos apresentados vinham sendo utilizados na operação manual do banco de ensaio, alguns deles com disponibilidade de entrada e saídas para a automatização da medição e controle, mas que ainda não havia sido implementada anteriormente. Para a concretização da parte experimental deste trabalho, foi preparado e instalado no banco de ensaio, um motor veicular FORD-CORCEL-1400, a etanol hidratado, com carburador de corpo simples (marca Weber) e coletor de admissão com recirculação de água quente (fig. 5.5). Sua regulação foi efetivada visando sua operação sob condições estáveis de rotação, com ângulo de ignição de 10° APMS, a 700 rpm. Não houve, no

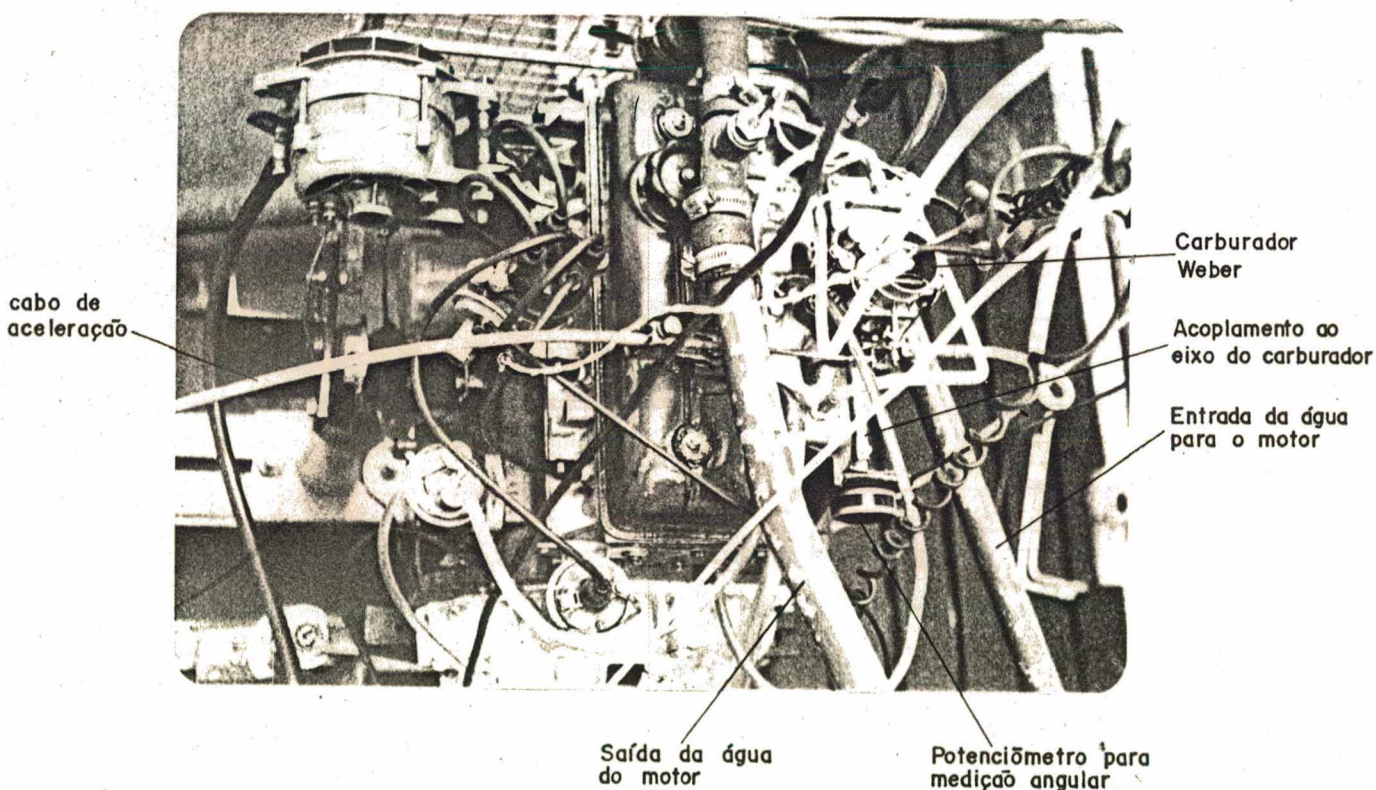


FIG. 5.5 - Motor FORD CORCEL-1.400 instalado no banco de ensaio.

entanto, preocupação quanto ao enquadramento de seu desempenho nos padrões da STI/MIC /62/. A aquisição de dados e do controle automático, efetivada com o uso de um microcomputador modelo HP 9825, uma interface modular HP 6940 (fig. 5.6) e um Sistema de Aquisição de Sinais (SAS) modelo HP 3947A (fig. 5.7), bem como o aprimoramento do processo de medição de combustível, foram os demais passos básicos na preparação do SEMCI utilizado neste trabalho conforme apresentado a seguir.

5.2.1 Automação da Aquisição de Sinais

Após a verificação do estado operacional dos módulos dos instrumentos disponíveis, decidiu-se manter os transdutores já instalados no banco de ensaio, e suas unidades de tratamento de

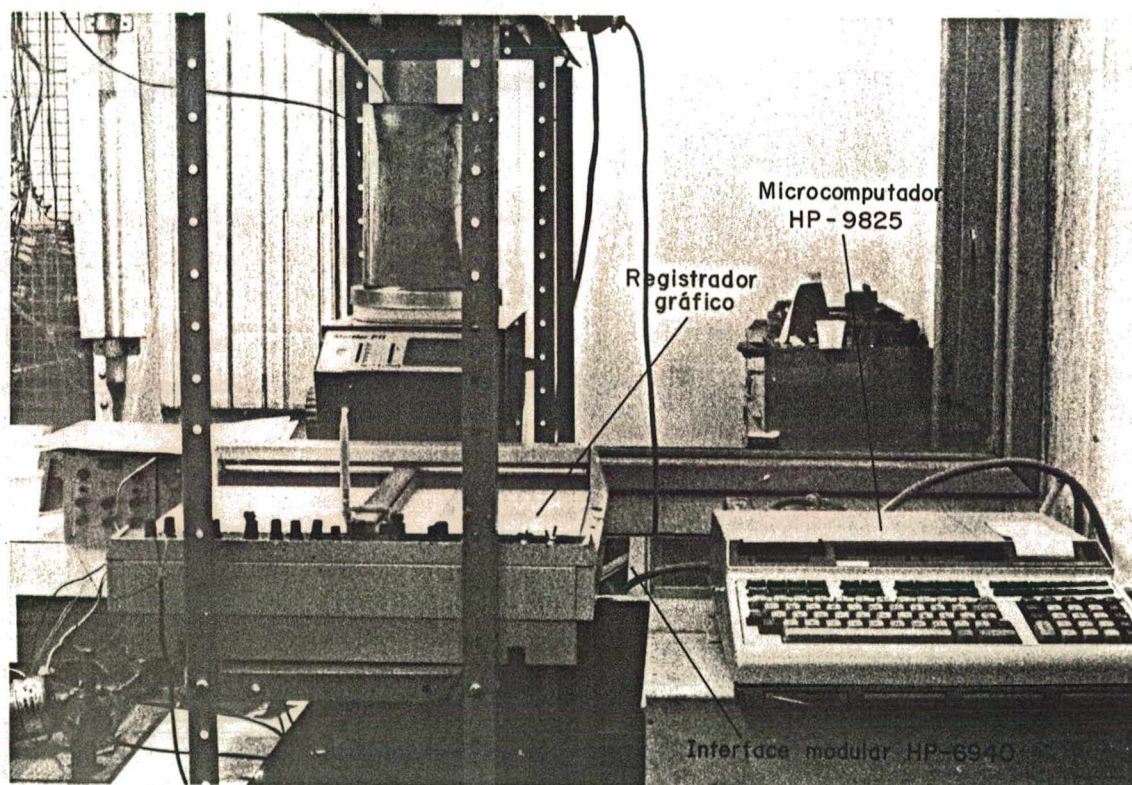


FIG. 5.6 - Controlador do ensaio e instrumentos auxiliares.

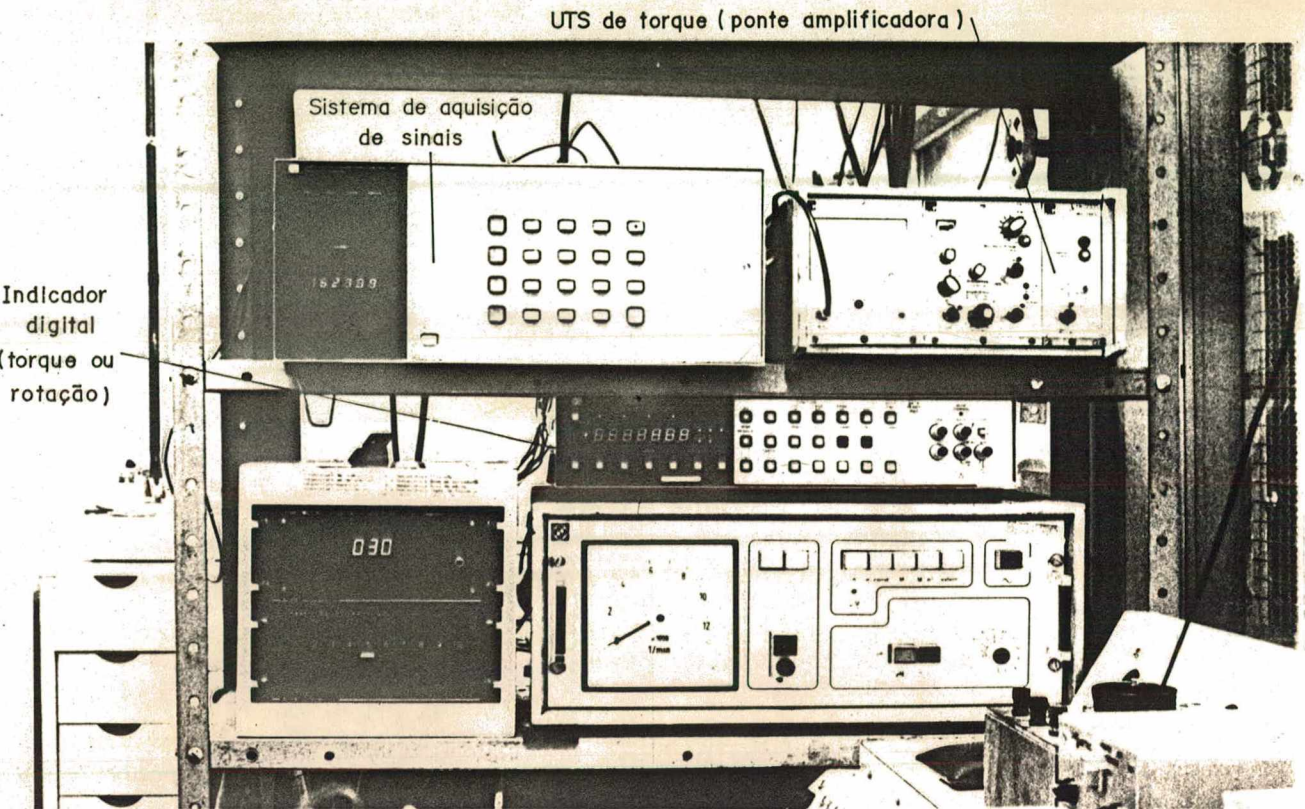


FIG. 5.7 - Configuração de instrumentos após a implementação da aquisição de dados.

sinal (UTS), com exceção da UTS de torque, que por impossibilitar a fácil ajustagem de zero e ganho, foi substituída por outra mais versátil, modelo HBM KWS /63/. Os transdutores que já tinham, disponibilidade de sinais elétricos proporcionais são abaixo relacionados:

- transdutor de torque: tensão da saída da ponte amplificadora (fig. 5.7).
- transdutor de rotação: tensão na saída analógica do controlador do freio, ou sinal disponível na forma de onda quadrada em outra saída do controlador.
- termopares: tensões termoelétricas dos termopares disponíveis para medição das temperaturas de bulbo seco, bulbo úmido, ar de admissão, combustível, água na saída do motor, óleo no cárter e gases de descarga.

Adicionalmente foram instalados outros transdutores permitindo também a medição automatizada das seguintes grandezas:

- temperaturas do ar de admissão: termoresistores do tipo Pt100, dispostos em 3 pontos, a 50, 100 e 150 mm acima do carburador e nos bulbos seco e úmido do psicômetro. Ligação a 4 fios, sendo dois para alimentação e dois para medição independente.
- ângulo de abertura da borboleta: transdutor angular tipo potenciométrico de 1 volta - 360°, interligado ao eixo do carburador, e alimentado por uma fonte de corrente contínua (fig. 5.8).

O sistema de aquisição de sinais (fig. 5.7) foi constituído basicamente pelos seguintes módulos básicos, de modo a viabilizar uma aquisição de dados confiável e relativamente rápida:

- chave seletora para sinais analógicos (20 canais de entrada),

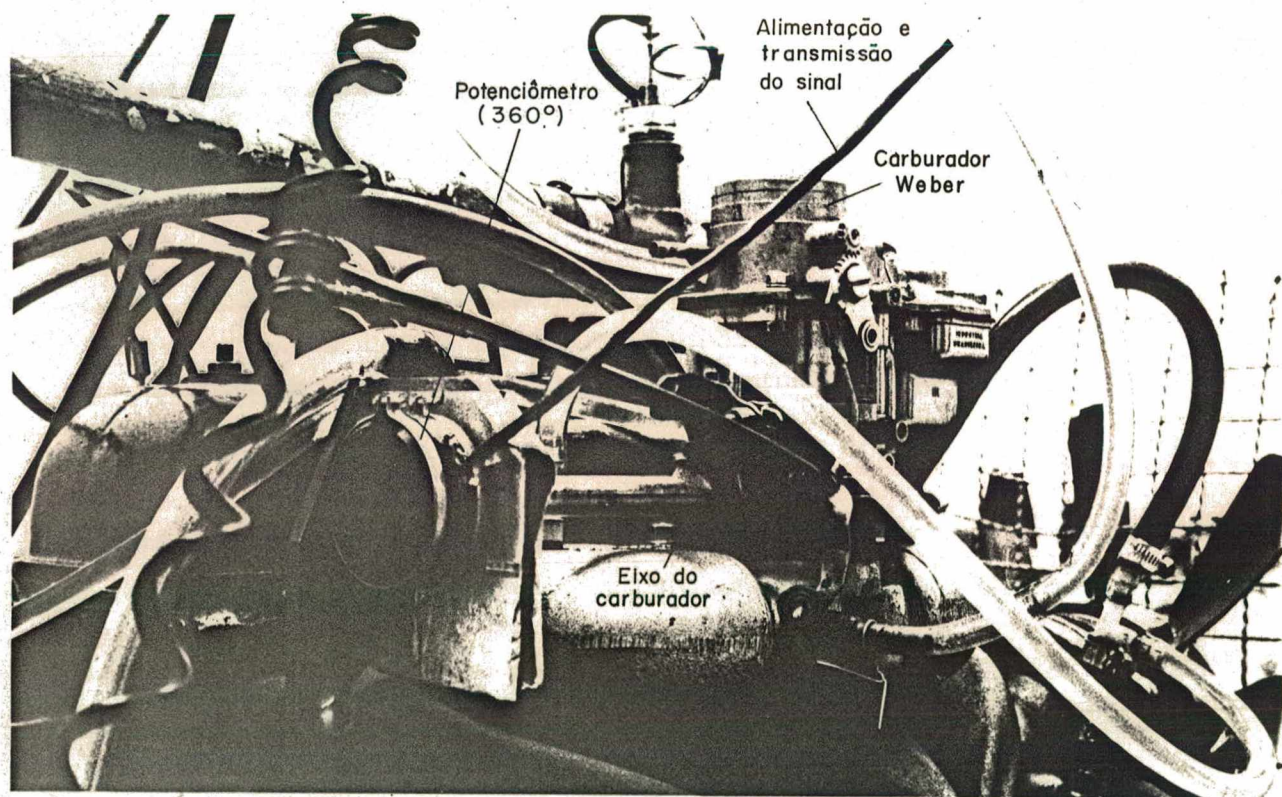


FIG. 5.8 - Medição do ângulo de abertura da válvula borboleta do carburador.

- chave seletora para termopares do tipo J, com compensação eletrônica (2 \emptyset canais de entrada),
- voltímetro de 5 1/2 dígitos do SAS.

Foram utilizados 2 canais para aquisição do sinal de torque (com e sem filtro) e outros 2 canais para os sinais de rotação (analógico) e do ângulo da borboleta, não tendo se verificado quaisquer problemas para ligação dos sinais com indicação em paralelo: torque e rotação. No caso dos sinais de termopares optou-se por sua ligação em paralelo a uma chave seletora especial do SAS com compensação eletrônica de junta fria dos termopares do tipo J, mantendo-se a operação independente da chave seletora manual e SM disponíveis, para possibilitar a supervisão em paralelo, pelo operador, das temperaturas fundamentais para segurança do ensaio. Os termoresistores instalados, por sua vez, foram alimentados por uma fonte de corrente do próprio SAS (1mA) e seus sinais em tensão resultantes coletados pela mesma chave seletora dos sinais de torque e rotação.

5.2.2 Automação do Controle de Rotação e Torque

A utilização do microcomputador no banco de ensaio para supervisão e controle do processo foi prevista e implementada. Para viabilizá-la foi utilizada uma interface modular de 16 bits, modelo HP 694 \emptyset , com dois conversores D/A de 12 bits. Inicialmente, dispunha-se apenas do freio e seu controlador como atuadores do BEMCI, os quais permitiram efetivar o controle de rotação via freio. Após o desenvolvimento de um atuador para válvula borboleta do carburador, alternativas para o controle de torque e rotação simultâneos foram também analisadas.

Os passos básicos na implementação do controle são apresentados a seguir:

- a) O controlador do freio possui uma entrada de tensão externa, de \emptyset a 1 \emptyset V, que pode ser utilizada como referência para sua

operação. Constatou-se, no entanto, que era suficiente uma tensão de referência entre \emptyset a 4 V, para o controle do motor FORD-CORCEL, sendo necessária a utilização de um divisor de tensão na saída do conversor D/A para compatibilizar faixas e aprimorar a resolução da regulagem do freio.

Foram testados inicialmente as seguintes alternativas de controle e formas de utilização do controlador do freio:

- controle analógico, com o controlador do freio exercendo o controle efetivo da rotação através da sua operação no modo "n=const", e o microcomputador fornecendo a tensão correspondente à tensão de referência correspondente à rotação desejável.
- controle digital: com o controlador do freio operando no modo usual " $M \sim n^2$ " e o microcomputador efetivando o controle em malha fechada da rotação.

O controlador respondeu satisfatoriamente, aos estímulos enviados pelo conversor D/A da interface modular, permitindo que posteriormente a rotação fosse controlada pelo microcomputador nos ensaios de desempenho do MCI.

b) Acionamento da válvula borboleta do carburador.

A posição do carburador do motor FORD-CORCEL 1.6 (fig. 5.8) exigia o uso de um eixo intermediário ou cabo flexível para o acoplamento de um servo-posicionador ao eixo de sua válvula borboleta.

Para viabilizar tal acionamento, também foi necessário considerar:

- a resistência da mola interna do carburador, requerendo um torque de acionamento no eixo de até 35 N.cm.
- a resistência adicional (atrito) no encaixe da válvula borboleta na posição de marcha-lenta.
- a presença de vibrações não amortecidas no eixo do carburador.

Optou-se pelo desenvolvimento em laboratório de um servo-posicionador a partir de um motor de corrente contínua

utilizado em limpadores de parabrisa de veículos automotores. Foram desenvolvidos um circuito de controle, um regulador da corrente e uma fonte de alimentação para o motor elétrico. O conjunto foi utilizado no acionamento do parafuso de regulagem de um cabo de aceleração flexível ligado a um braço do eixo da válvula borboleta (fig. 5.9). Com o uso do potenciômetro acoplado diretamente ao eixo do carburador, foi viabilizada a regulagem da posição da válvula borboleta.

Com a análise da relação entre (torque do motor)/(abertura da borboleta), na operação do motor sob rotação constante (fig. 5.10) constatou-se que a sensibilidade do motor a incrementos iguais na abertura da borboleta é variável, tendo-se

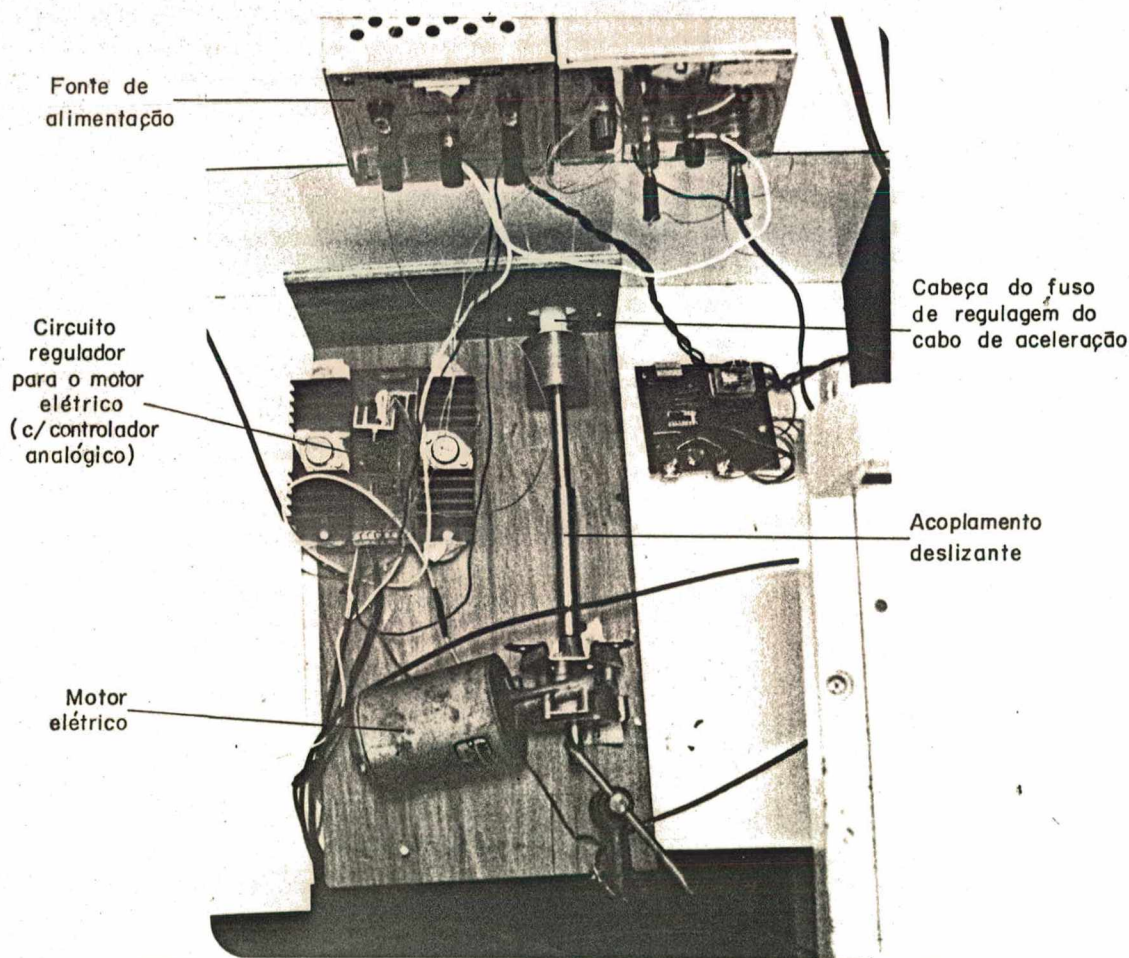


FIG. 5.9 - Regulador da posição da válvula borboleta.

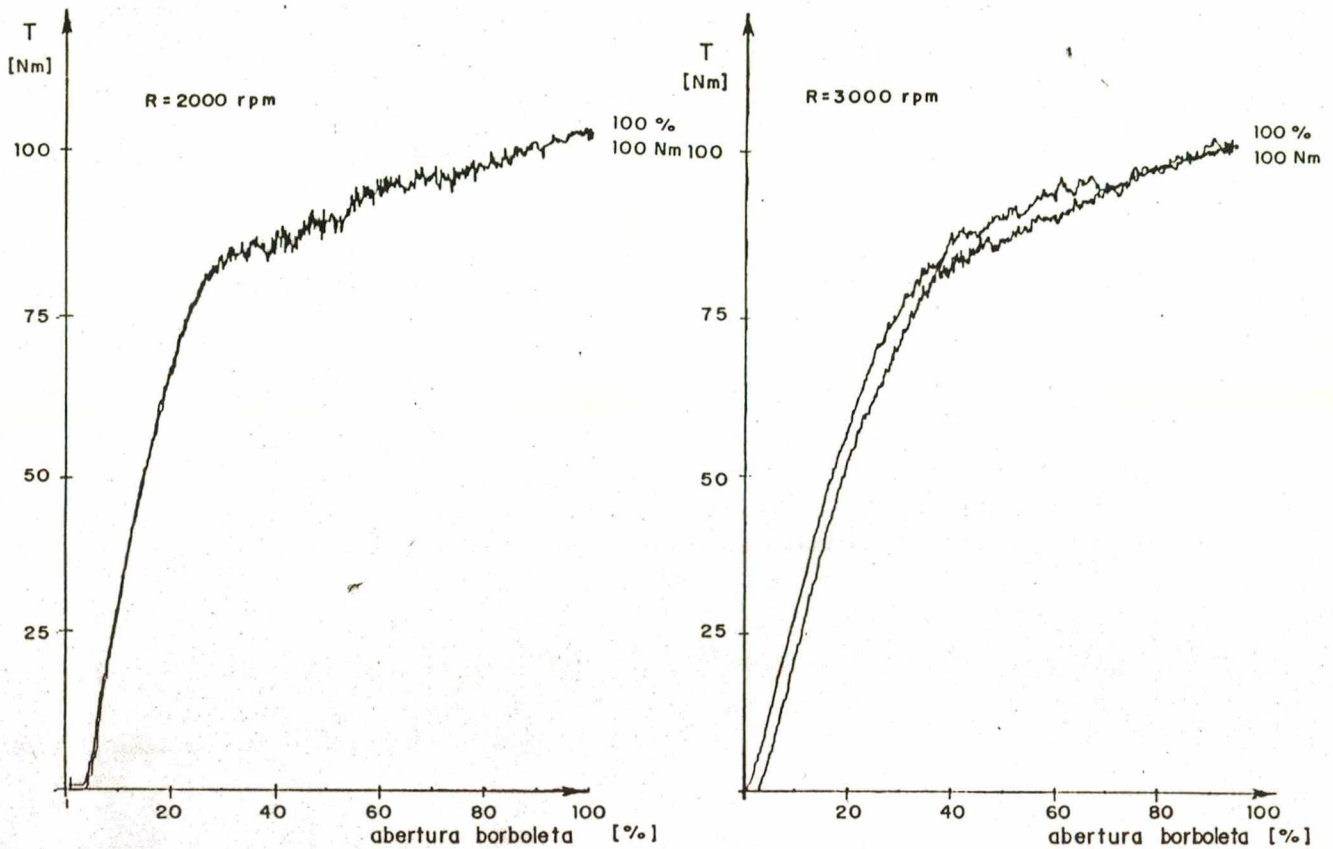


FIG. 5.10 - Curvas do torque x abertura da borboleta do carburador (R = "cte").

obtido os seguintes valores típicos:

- a 2000 rpm: 5 Nm/1% para aberturas até 20% (trecho A) , atingindo 0,5 Nm/1% para aberturas maiores que 30%.
- a 3000 rpm: 3,6 Nm/1% para aberturas até 25% e no mínimo 0,5 Nm/1% para aberturas superiores.

No carburador do motor ensaiado, a válvula borboleta perfazia um deslocamento angular de 75°, da posição de marcha lenta até a correspondente à abertura plena. Conseqüentemente, para assegurar uma incerteza no controle menor que 1% VE, num ponto de operação desfavorável, por exemplo 2000 rpm e 50 Nm, era necessária uma resolução de 0,1% ou 0,08° (6') no posicionamento da borboleta.

A alternativa quanto ao acoplamento do sistema de posicionamento da figura 5.9 diretamente ao eixo do carburador foi considerada, mas alguns testes iniciais revelaram-no

inadequado para tal aplicação, por este ter apresentado:

- assimetria no comportamento operacional dependente do sentido de rotação (horário, antihorário).
- incerteza elevada no posicionamento ($\sim \emptyset, 3^\circ$ em ensaios sem carga em laboratório), atribuída a presença de considerável zona morta do motor elétrico. Acoplado ao eixo do carburador, não foi possível assegurar resoluções sequer próximas a $\emptyset, 1^\circ$, como desejável.

Manteve-se o acionamento da borboleta do carburador por via indireta, pois com o uso do cabo e fuso existentes, embora fossem necessárias 10 voltas e o dispêndio de aproximadamente 10 segundos para a abertura/fechamento completo da borboleta, a minimização da incerteza no posicionamento desta era favorecida.

Tal implementação permitiu a realização de algumas experiências relativas ao controle simultâneo de torque e rotação.

5.2.3 Sistema de Medição de Combustível

Verificou-se que a cronometragem manual do tempo de consumo de combustível, era afetada por erros dependentes da acuidade visual e motriz do cronometrista. Foram realizadas algumas medidas com cronometragem manual de combustível constante e igual a 6,5 l/h e obteve-se como resultado do tempo de consumo para 250 ml, uma média de 138 s e um desvio padrão de 1 s ($\emptyset, 8\%$) em quatro leituras, confirmando a necessidade do aprimoramento do processo de medição.

Tendo em vista a dificuldade em se obter ou adquirir SM nacionais a um custo razoável, optou-se pelo desenvolvimento de um sistema constituído por uma válvula solenóide de 3 vias, um circuito de temporização da abertura de sua via normalmente fechada (NF) e pela balança mecânica Mettler (fig. 5.11). Com o disparo do temporizador, a via NF da válvula era aberta, e

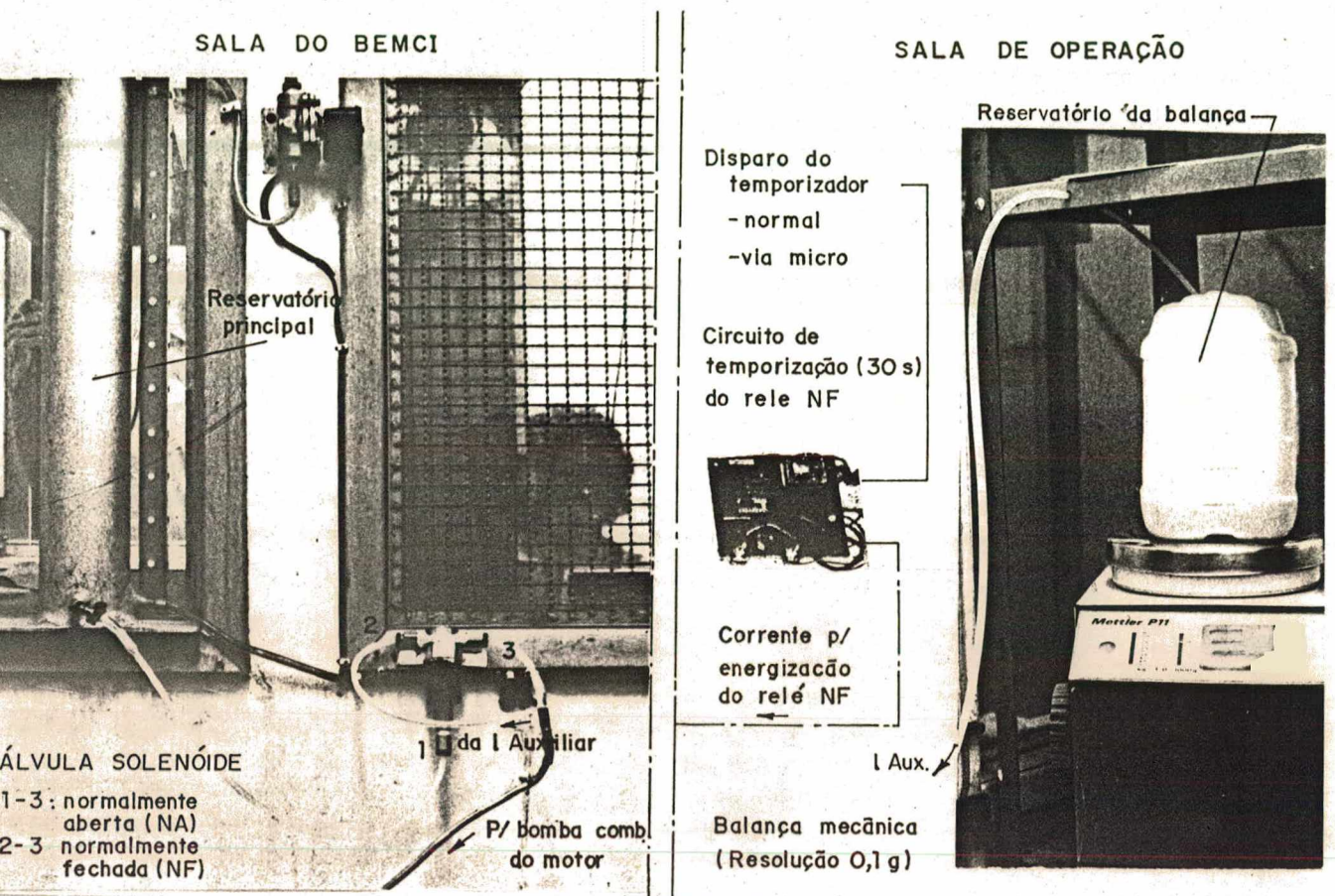


FIG. 5.11 - Sistema de medição do consumo de combustível gravimétrico.

durante 30 s, o combustível passava a ser consumido, de um reservatório colocado sobre a balança mecânica (fig. 5.11). Após este tempo e enquanto não houvesse necessidade de nova medição o combustível provinha do reservatório principal, como usual.

De imediato, este sistema possibilitou a medição do consumo de combustível em tempos menores que os mínimos necessários para o consumo de 250 ml, mantendo a possibilidade de medições sucessivas com pequenas amostras (50 g, 100 g) de combustível até completar 1 kg, correspondente à faixa operacional útil da balança.

5.3 ANÁLISE DOS ASPECTOS METROLÓGICOS DO SEMCI

Na preparação do sistema de ensaio foram efetivadas operações de calibração e ajustagem dos instrumentos principais, e adicionalmente obtidas algumas amostras de sinais analógicos para verificação da presença de ruídos e das variações inerentes das grandezas medidas.

5.3.1 Calibração de Sistemas de Medição

Os sistemas de medição de torque, rotação e consumo de combustível foram calibrados com o objetivo de:

- determinar suas funções de transferência efetivas (leitura/valor da grandeza medida).
- avaliar suas incertezas de medição, em especial, parcelas de erros aleatórios que poderiam contribuir para aumentar a faixa de dispersão das medidas.

Foram realizadas calibrações no próprio BEMCI, de dois transdutores de força/torque disponíveis, entre os quais um de capacidade de 50 kgf, modelo U2 da HBM /64/ mas que apresentou erros sistemáticos e que ultrapassaram em muito os limites especificados pelo fabricante. Manteve-se, portanto, o transdutor nacional em uso e após conectado com a outra ponte amplificadora (fig. 5.7) realizou-se a avaliação de erros do SM resultante, na faixa de operação de interesse, de 50 a 100 Nm para os ensaios de desempenho à plena alimentação. A submissão do transdutor a cinco ciclos completos de carregamento e descarregamento permitiu a obtenção dos seguintes valores típicos

- linearidade: +/- 0,3% VFE
- histerese : +/- 0,2% VFE
- não repetibilidade: ... +/- 0,1% VFE (Dispersão de 95% das medidas).

No caso do SM de rotação a calibração foi bem mais simples, exigindo apenas o uso de um gerador de onda, tendo este SM

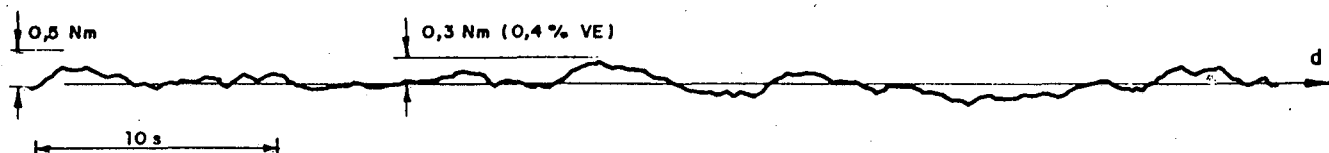
apresentando uma linearidade excelente, que combinada com pequenos erros aleatórios, compõe uma incerteza de medição que não ultrapassa a faixa de ± 2 rpm. No entanto, verificou-se que, com a utilização do sinal de rotação para realimentação do controlador (modo "n=const"), a tensão na saída analógica do SM sofria uma pequena alteração provocando um erro sistemático da ordem de ± 3 rpm que, se não compensado, aumenta significativamente a incerteza de medição - Im (até ± 5 rpm). Já as medidas realizadas pelo SM de combustível gravimétrico (da fig. 5.11) apresentaram um desvio padrão típico de $0,1\%$ VFE, conseqüentemente uma dispersão de 95% das medidas - $DM_{95} = \pm 0,2\%$ VFE, obtida em ensaios onde se manteve constante a vazão de combustível. Tal valor é de fundamental importância pois pode ser associado a uma determinada capacidade de resolução do SEMCI, quer seja, a possibilidade de distinguir com segurança alterações da ordem de até $0,2\%$ nos valores do consumo de combustível e consumo específico, neste último com adequada e eficiente medição da potência efetiva.

5.3.2 Análise das Variações Inerentes do Motor

Foi utilizado, inicialmente, um registrador gráfico tipo X-Y-t (fig. 5.6) para a obtenção de registros significativos dos sinais de rotação e torque. Selecionou-se um registro do sinal de torque do motor, enquanto este operava sob um determinado regime estabilizado, para caracterizar as variações do sinal, que foram associadas a suas causas prováveis, conforme ilustra a figura 5.12. A análise deste sinal revela que o torque do motor desviou-se de até $0,4\%$ do valor médio, sendo suas variações, até mesmo em intervalos de poucos segundos, bastante significativas.

Após a implementação do SAS, foi possível realizar diversas medidas do torque e rotação em intervalos definidos, bem como multiplicá-las para obter, a tempo real, a medida da potência do Motor, como necessário para a análise de suas variações. Os

REGISTRO DO SINAL DE TORQUE (2000 rpm, torque médio = 76 Nm)



ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL

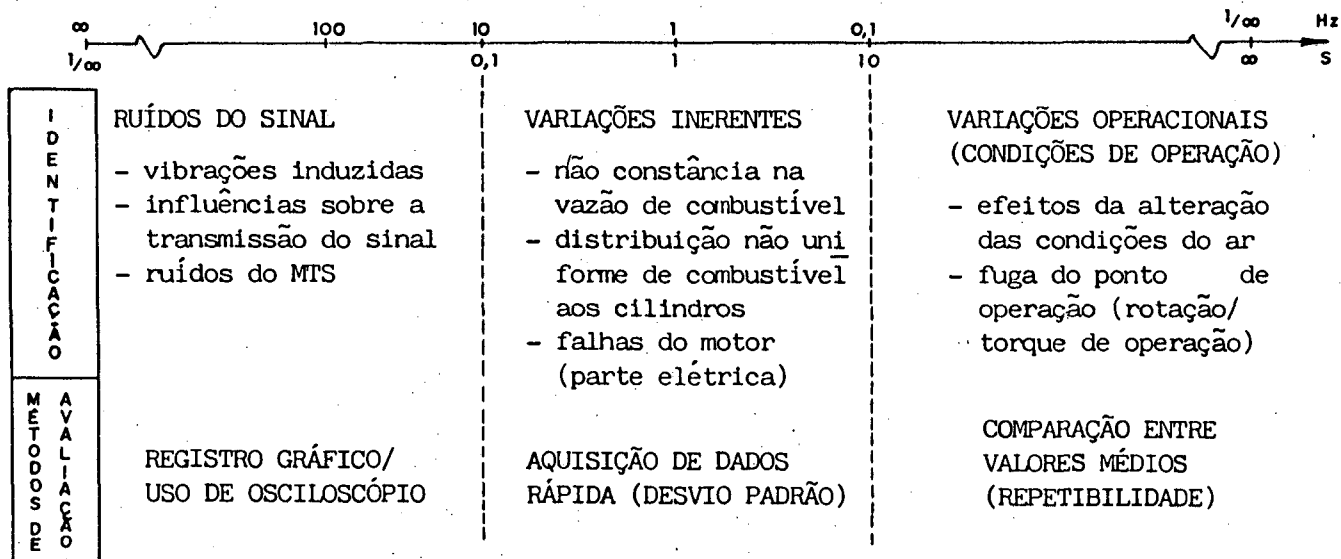


FIG. 5.12 - Análise do registro do sinal de torque e caracterização de suas variações.

resultados de algumas amostras com 50 medidas de torque, rotação e potência efetiva, igualmente distribuídas no intervalo de 5 segundos e obtidas quando o motor operava sob regime de plena carga e com o sistema de carburação bem regulado, são apresentados na figura 5.13. Constatou-se que o desvio padrão das medidas da potência DP. (P_e) era praticamente igual à soma algébrica dos desvios padrões de rotação e torque, comprovando a interdependência destas grandezas. Em média, as medidas de potência apresentaram um desvio padrão $- S = \pm 0,5\%$, e conseqüentemente para verificar se a avaliação do valor médio da potência efetiva poderia ser afetada pela pequena quantidade ou má distribuição das medidas, foi utilizada a expressão 2.8, e neste caso:

VARIÇÕES INERENTES DOS PARÂMETROS DO MOTOR - 100% abertura borboleta							
Regime	Rotação - R (rpm)		Torque - T (N.m)		Potência efetiva - Pe (Nm)		
	RB	DP (%)	RB	DP (%)	RB	DP (%)	DM 95 (%)
1	1993,8	0,28	96,3	0,28	20,07	0,53	±1,06
2	3074,0	0,20	98,4	0,25	31,7	0,44	±0,88
3	4530,5	0,17	81,3	0,26	38,6	0,41	±0,82

Ex.: Listagem de dados do microcomputador (regime 3)

Nº DE MEDIDAS: 50 grandezas

INTERVALO DE VARREDURA = 0,1 s

PARÂMETROS CALCULADOS:

RB - Resultado base = média das 50 medidas

DP - Desvio padrão do RB

DM(95) - Dispersão das medidas (faixa com 95% probabilidade)

Avaliação de VG
Tempo-aquisicao
[s] = 5.62

Grandeza: 1.0
4530.48 0.17
Grandeza: 2.0
81.30 0.26
Grandeza: 3.0
38.57 0.41

FIG. 5.13 - Avaliação experimental das variações inerentes à operação do MCI (período ~5s).

$$EA(Pe) = VG_{95} * n^{0.5}, \text{ logo considerando } VG_{95} = DM_{95}$$

$$EA(Pe) = + 0,01 * n^{0.5},$$

onde EA(Pe) - erro provável aleatório da potência efetiva média

n - número de medidas.

Desta forma verificou-se, que por exemplo para $n = 25$, medidas ter-se-ia $EA(Pe) = \mp 0,20\%$ e para $n = 50$, pode-se garantir com boa probabilidade (95%) que $EA(Pe) = \mp 0,15\%$.

5.3.3 Estimativa da Incerteza do Resultado nos Ensaio de Desempenho

Os fatores críticos para a reprodução eficaz de condições de operação, semelhantes em diferentes ensaios ou mesmo numa seqüência de regimes (ou ciclo) de um ensaio de desempenho para o Sistema de Ensaio em questão, foram apontados como sendo: a limitação de variações da densidade do ar de admissão e o controle da rotação do motor. Foram verificadas variações na temperatura do ar de admissão da ordem de $\pm 1,5^\circ \text{C}$ para regimes de operação semelhantes, que não podiam ser evitadas nem com o uso da plena capacidade do ventilador da sala de ensaio. Uma vez que o efeito destas variações sobre a dispersão de medidas da Potência efetiva, em períodos mais prolongados (por exemplo, maiores que 30 s), não permitiria a verificação isolada dos efeitos de erros na medição/controlado de torque e rotação sobre a dispersão das medidas da potência observada, tornou-se mais interessante e prioritária a avaliação da incerteza do resultado do consumo específico de combustível, por este ser considerado invariante frente a pequenas alterações na densidade do ar de admissão, para motores Otto (item 2.3.4). Neste caso as fontes de indeterminação provenientes do Sistema de Ensaio foram identificadas como sendo:

- Flutuação temporal da Potência Efetiva, a qual afeta a avaliação da Potência Média no intervalo de tempo estabelecido.
- Incertezas dos SM de torque, rotação e consumo de combustível, nas correspondentes faixas de operação.

Analisando-se as parcelas que poderiam contribuir para aumentar a dispersão das medidas do consumo específico de combustível, conclui-se que com meticolosas técnicas de compensação de erros sistemáticos, e de medição da potência efetiva a incerteza do resultado de $C_e - I_r$ (C_e) poderia ser reduzida à até $0,2\% \text{ VE}$. Não obstante, uma estimativa mais

realista de Ir (Ce) foi realizada através da combinação das seguintes parcelas aleatórias de incerteza, inerentes aos procedimentos de ensaio e instrumentos utilizados:

- incerteza no controle de rotação..... +/- 0,1%
- erro provável do resultado da potência
média (n = 50)..... +/- 0,2%
(tempo de observação 30s)
- faixa de dispersão das medidas do
SM de combustível..... +/- 0,2%
- efeitos de histerese do transdutor
de força/torque..... +/- 0,2%
(Admite-se VE \approx VFE, para os valores apresentados)

A combinação destas parcelas através da expressão 2.10 (soma quadrática das parcelas) fornece Ir(Ce) = +/- 0,4%, significando que uma indeterminação do resultado desta ordem de grandeza pode ser esperada.

5.4 PLANOS E PROGRAMAS DE ENSAIOS

Após os testes iniciais, tornou-se importante a especificação mais detalhada de planos de ensaio objetivando basicamente, uma melhor avaliação do comportamento operacional e metrológico do SEMCI, bem como a caracterização de transientes relativos e estabilização térmica do motor após a mudança de seu regime de operação.

5.4.1 Planos para Ensaio Específicos

Além dos testes do controle de rotação e torque com o microcomputador, foram estabelecidos os planos de dois ensaios visando a obtenção de informações específicas com relação a:

- a estabilização de temperaturas do motor,
- repetibilidade das medidas do consumo específico (rendimento) do motor.

Os métodos e planos utilizados para a obtenção de dados que se faziam necessários, em cada caso específico, são descritos a seguir:

a) Estabilização de temperaturas:

A súbita mudança do ponto de operação do motor, representa uma alteração no regime de trocas térmicas do MCI com o ambiente, sendo desejável conhecer como estas se comportam no período subsequente à mudança. Dentre as inúmeras alternativas para o estabelecimento da sequência e troca de regimes de operação, optou-se pela realização de ensaios com um regime inicial e outro final onde a variação na carga térmica correspondente a cada regime se apresentasse como extremamente desfavorável e favorável à estabilização térmica, respectivamente, conforme especificado:

- motor frio: após um breve período de operação do motor em marcha lenta, colocá-lo num ponto de operação com pelo menos 50% da máxima carga, realizando as medidas desejadas durante pelo menos 20 minutos.
- motor aquecido: após sua operação durante mais de 20 minutos num ponto definido, provocar um súbito degrau de 500 rpm e realizar as medidas necessárias no período subsequente.

Após algumas verificações preliminares, constatou-se que a variação das temperaturas do óleo, água e gases de descarga após a mudança do regime é relativamente lenta, sendo a distribuição das medidas em intervalos de no máximo 10 segundos em geral suficiente para caracterizar a evolução das temperaturas com o tempo, fato a ser considerado pelos programas de medição que se deseje utilizar para este fim.

b) Repetibilidade:

Na busca de informações significativas acerca da indeterminação de resultados, em especial das atribuídas ao próprio Sistema de Ensaio, como variações nas medidas originadas por imperfeições no controle das condições de

operação do motor e erros dos sistemas de medição, decidiu-se realizar um ensaio de desempenho a plena alimentação com 3 ciclos completos onde seriam repetidos os ajustes de pontos de operação (quer seja, da rotação do motor) conforme a seguinte sequência:

- ciclo zero ou inicial: aquecimento do motor, operando a 2.000 rpm em regime de plena alimentação.
- 1º ciclo: 1.500 até 4.500 rpm, com incrementos de 500 em 500 rpm.
- 2º ciclo: 4.500 até 1.500 rpm, com decrementos de 500 em 500 rpm.
- 3º ciclo: 1.500 a 4.500 rpm, idem ao 1º ciclo.
- 4º ciclo: 2.000 e 3.000 rpm, para finalizar.

Foi estabelecido um tempo de 5 minutos para permanência em cada regime de operação, tendo se estipulado a realização de pelo menos 3 medidas de potência efetiva (média), e de consumo(s) de combustível (no intervalo de 30 s) nos dois últimos minutos de cada regime de operação. Com isto seria possível avaliar:

- o desvio padrão das medidas em cada regime (DPR) em especial, relativo ao resultado base do consumo específico de combustível no regime.
- o desvio padrão das medidas dos vários ciclos (DPC) relativo às variações de resultados base (Cb e Ce) em regimes nominais idênticos reproduzidos em diferentes ocasiões e ciclos do ensaio de repetibilidade.

No que concerne ao tratamento e análise dos dados foi prevista que após a seleção das medidas para eliminação dos erros grosseiros, e uma vez admitida a representatividade dos desvios padrões obtidos, no tempo de observação estabelecido, seria possível efetuar comparações entre a provável faixa de indeterminação do consumo específico, avaliável com auxílio da expressão 2.13 e a estimativa realizada com base na análise de possíveis fontes de erros (item 5.3.3).

5.4.2 Programas para o Microcomputador

Havia sido desenvolvido, por ocasião de outros trabalhos, um Programa Universal de Medição (PUM) adequado para os sistemas de aquisição e microcomputador HP-9825. Este programa utiliza em uma de suas fases uma subrotina de aquisição de dados, que foi utilizada em alguns ensaios e testes iniciais do SEMCI em questão. As características da subrotina de aquisição do PUM, no entanto, motivaram o desenvolvimento de outra subrotina, específica para o sistema em implementação, utilizada no diagnóstico da operação do MCI e, capaz de realizar 50 medidas e calcular as médias e desvios padrões da rotação, torque e potência do motor, apenas cinco segundos após uma solicitação do operador. As grandezas medidas e dados comparativos destas subrotinas são apresentados na figura 5.14. A subrotina mais rápida foi integrada a um Programa específico de medição e controle - PEMCI. Este programa obtinha os dados desejados em intervalos de 5 em 5 s, no mínimo armazenando-os numa matriz adequada para posterior processamento. Uma subrotina de controle do BEMCI, também integrava este programa, utilizando dois algoritmos PID independentes para controle de rotação e torque exercido em intervalos estabelecidos por interrupções programadas (em geral 200 ms).

A programação das etapas do ensaio, com a definição de valores desejáveis de rotação, torque ou abertura da borboleta e duração de cada regime e a execução confiável do ensaio também foram viabilizados pelo PEMCI.

Para o processamento dos dados dos ensaios de estabilização de temperaturas e de desempenho, no entanto, foi prevista e efetivada a utilização da fase de processamento e de uma rotina universal para traçado de gráficos do PUM, devido às facilidades por estas proporcionadas.

Subrotina de Aquisição		Universal (PUM)			Específica (PEMCI)		
Grandezas medidas		nº de leituras	intervalo (ms)	método de aquisição	nº de leituras	intervalo (ms)	método de aquisição
- rotação		10	50	sequencial (lê rotação 10x e de pois o torque 10x)		1	paralela (lê rotação torque e potência, repete + 9x)
- torque		10	50		5	0	
- potência (tempo real)		-	-		0	0	
TEMPERATURAS	bulbo úmido	1	-	sequencial (fecha canal e efetua leitura na sequência)	1	-	Sequencial (idem subrotina universal)
	bulbo seco	1	-		1	-	
	ar admissão	1	-		1	-	
	óleo cárter.	1	-		1	-	
	água na saída	1	-		1	-	
	gases de descarga	1	-		1	-	
tempo de consumo comb.		informado pelo operador			capacidade para medição automática		
tipo de endereçamento (instrumentos, canais, etc)		indireto (consulta a arquivo de dados p/ endereçar leituras)			direto (cada grandeza diretamente associada a um endereço/canal)		
tempo total para aquisição de dados		12 segundos			5 segundos		

FIG. 5.14 - Características das subrotinas de aquisição de dados utilizadas.

5.5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Os resultados de testes realizados na implementação do controle do motor utilizando o microcomputador, e dos ensaios previstos no item anterior, são aqui apresentados e apreciados.

5.5.1 Controle de Rotação

Foi efetivada a determinação da função transferência-FT do controlador do freio sob o modo de operação "n=const", para se obter a relação (rotação controlada)/(tensão de referência). Encontrou-se um valor médio de aproximadamente 1.650 rpm/V, não coincidente com o da FT relativa ao sinal de rotação analógico de realimentação - 1.286 rpm/V. Além disso, conforme ilustra a

figura 5.15, constatou-se que o controlador não foi capaz de manter a rotação com a variação da carga. Para eliminar o problema foi implementado o controle digital em paralelo, no qual o microcomputador utilizava uma rotina de controle proporcional-integral para supervisionar a operação do controlador do freio no modo " $n = cte$ ", conseguindo-se manter a rotação constante para qualquer carga aplicada ao motor. Com o desenvolvimento de um algoritmo PID para controle de rotação pelo microcomputador, utilizando o controlador do freio no modo " $M \approx n^2$ ", o controle digital direto substituiu o processo de controle anterior, apresentando as seguintes vantagens e desvantagens:

- maior versatilidade na ajustagem de ganhos proporcional, integral e derivativo do controlador.
- menor incerteza no controle da rotação.
- menor segurança devido à possibilidade de falhas do controlador, quando exerce a supervisão simultânea de várias operações, em situações não previstas na sua programação.

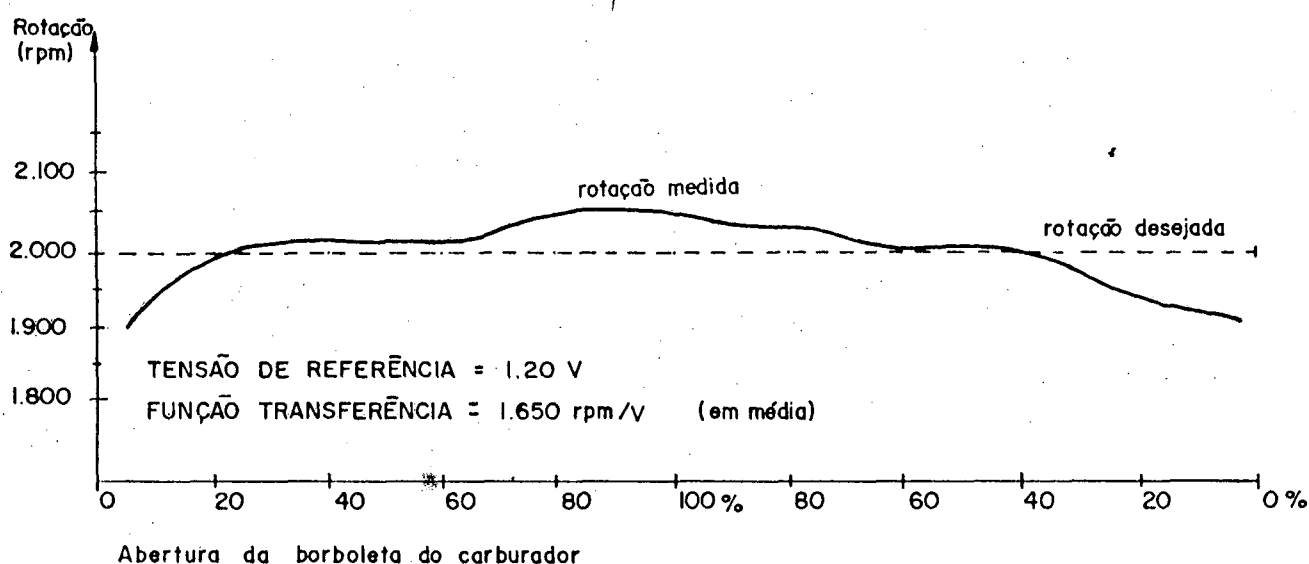
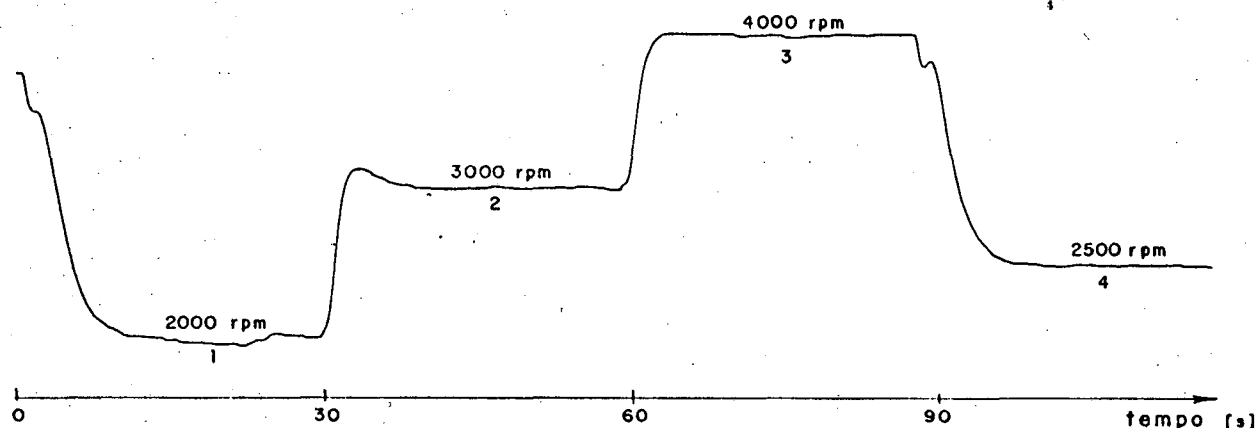


FIG. 5.15 - Desempenho do controlador analógico de rotação.

Na figura 5.16 é apresentado o registro da rotação controlada num ensaio com 4 regimes. Observa-se que não se verificaram sobrepassagens significativas na mudanças de uma para outra rotação, tanto no sentido ascendente como descendente da grandeza.

5.5.2 Controle de Torque e Rotação

Nos testes iniciais do controle de torque, os ganhos do algoritmo PID implementado no microcomputador não haviam sido ajustados, e o atuador da borboleta sempre oscilava entre os sentidos horário e anti-horário, sem permanecer em repouso sequer 5 segundos. Constatou-se que este comportamento era decorrente da combinação da sensibilidade do controlador de torque e a presença de folgas mecânicas: no fuso do cabo de acionamento e na conexão do cabo a alavanca do eixo do carburador.



DEFINICAO ENSAIO
TES-GT1-ROTACAO
Reg.Veloc.+Di= 2000
Posicao borboleta
a-fixa

Regime: 1
Duracao[s]= 30
Rotacao[rpm]= 2000
Regime: 2
Duracao[s]= 30
Rotacao[rpm]= 3000

Regime: 3
Duracao[s]= 30
Rotacao[rpm]= 4000
Regime: 4
Duracao[s]= 30
Rotacao[rpm]= 2500

FIG. 5.16 - Ensaio com controle digital da rotação.

Para evitar tal comportamento no controle de torque, foi necessário reduzir os ganhos do algoritmo PID e consequentemente a sensibilidade no controle de torque. Na figura 5.17 apresentam-se os registros do torque e rotação do motor simultaneamente controlados pelo microcomputador, obtidos num ensaio com 2 regimes de operação, após a modificação do algoritmo de controle de torque. Com isto, no entanto, o controle de torque apresentou um tempo de estabilização da ordem de 50 s e não conseguiu assegurar erros menores que 2% do valor efetivo a controlar, em regimes parciais da operação do motor. Observa-se também, na figura 5.17, as perceptíveis variações dos sinais do torque e, mais brandamente, da rotação. Constatou-se que estas variações são provocadas, em parte, pela interação entre os controladores

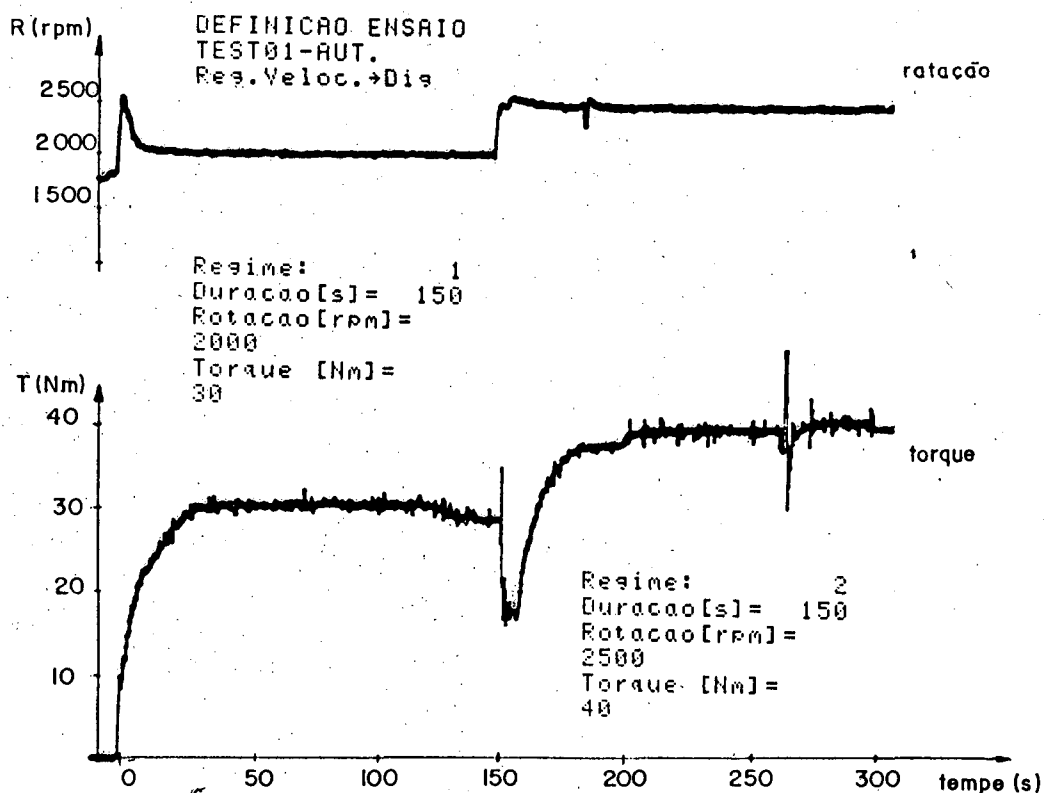


FIG. 5.17 - Ensaio com controle do torque e da rotação do motor pelo microcomputador.

de torque e rotação. Para minimizá-las deve-se otimizar conjuntamente a sensibilidade de ambos os controladores, sendo recomendável que o controlador de rotação tenha uma resposta mais rápida para evitar ultrapassagens indesejadas da velocidade máxima do motor.

5.5.3 Ensaios de Estabilização de Temperaturas

Com o motor frio, isto é, quatro minutos após o início da sua operação, e ajustando o controle de rotação em 2.000 rpm, a válvula borboleta foi aberta até que o torque do motor atingisse aproximadamente 50 Nm (fig. 5.18). A figura 5.19 ilustra como variaram as principais temperaturas do motor. Um termostato do próprio motor evitou que a temperatura da água na tubulação de

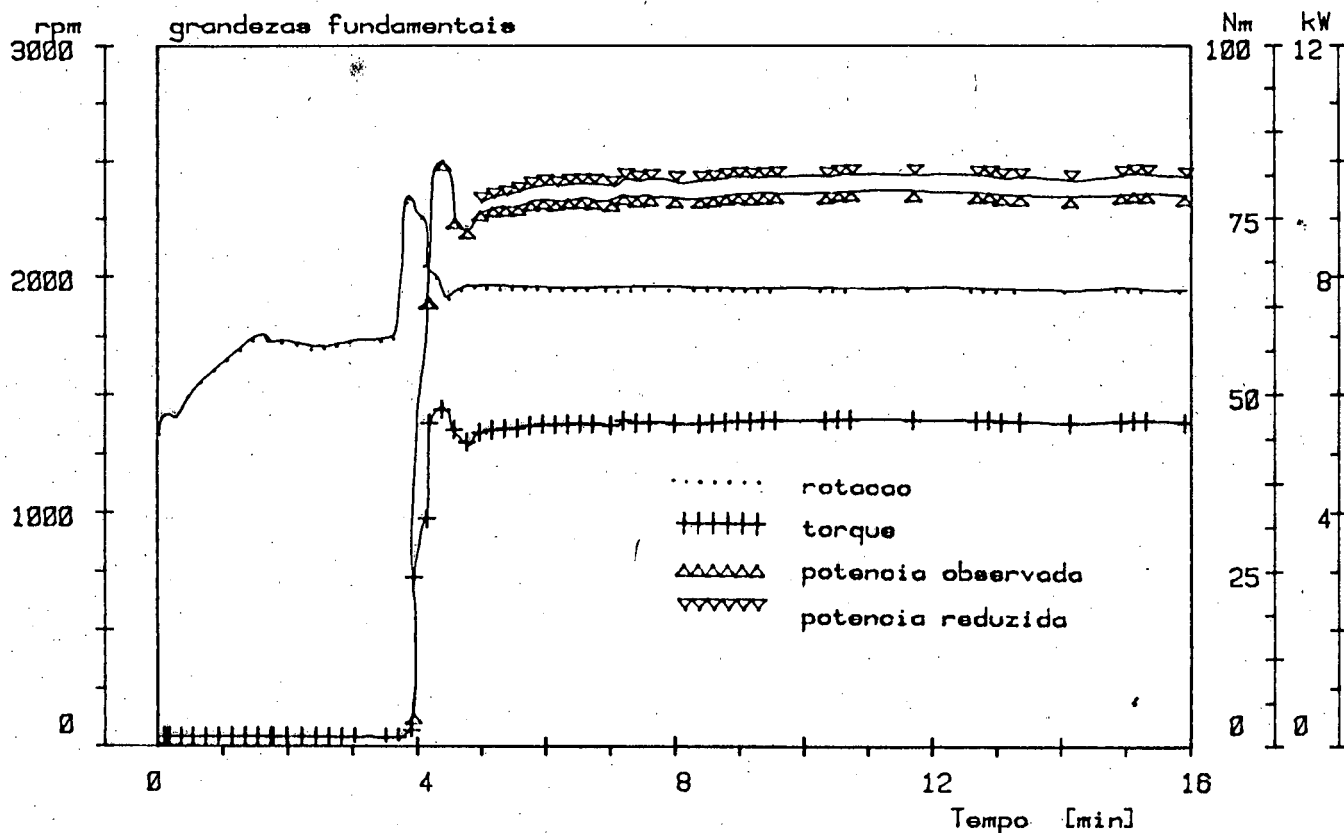


FIG. 5.18 - Registro da variação de grandezas de interesse durante a troca de regime no ensaio de estabilização de temperaturas.

saída apresentasse significativas variações. Por sua vez, a temperatura dos gases de escape elevou-se rapidamente, estabilizando-se 6 minutos após a mudança de regime de operação. A análise das figuras 5.18 e 5.19 mostra que, com a estabilização da temperatura dos gases, o torque e a potência do motor tendem a um valor médio constante. Embora 20 minutos fossem pouco para a estabilização da temperatura do óleo, não se constatou qualquer influência significativa desta no desempenho do motor,

Em outros ensaios realizados com o motor aquecido e com alterações de apenas 500 rpm na rotação, a temperatura dos gases se estabilizou rapidamente, num tempo menor que 1 minuto, enquanto as temperaturas da água e óleo praticamente não eram influenciadas.

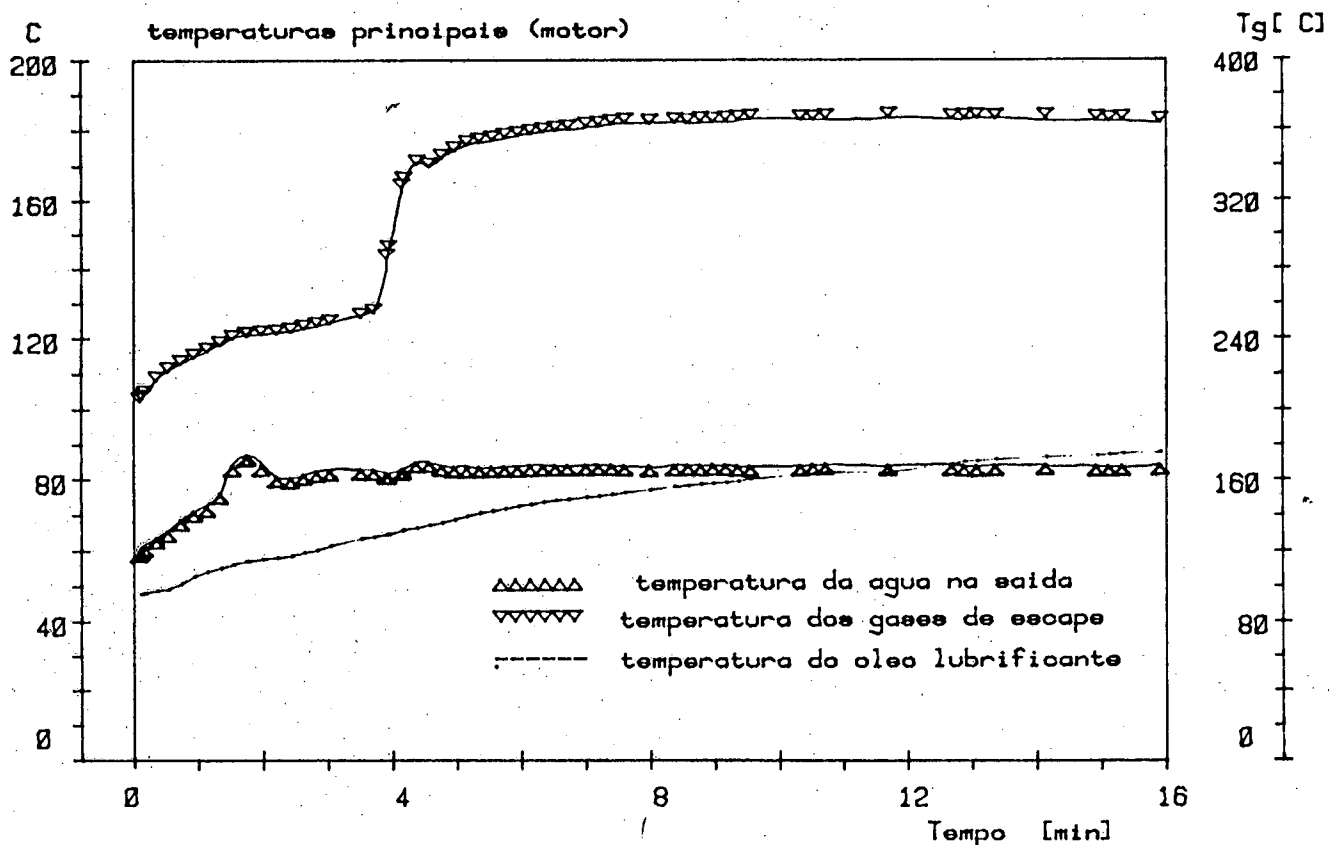


FIG. 5.19 - Registro das temperaturas da água, óleo e gases ao longo do ensaio de estabilização.

5.5.4 Ensaio de Desempenho

O motor FORD-CORCEL-1,6 foi ensaiado à plena carga, segundo os ciclos previstos no item 5.4.1, sendo realizadas algumas medidas complementares do consumo específico de combustível nas rotações de 2.000 e 3.000 rpm. O ensaio completo teve a duração de 90 minutos, tendo se verificado algumas ocorrências indesejáveis, entre os quais:

- variações na temperatura do ar de admissão, na faixa dos 32 a 36 ° C, mesmo com o sistema de ventilação do BEMCI operando a plena potência.
- necessidade de aliviar parcialmente a carga, entre os ciclos de medição, para evitar o superaquecimento do motor.
- leituras incorretas do peso consumido de combustível, na mudança da faixa operacional da balança (2-3 kg para 1-2 kg, por exemplo), as quais tiveram que ser abandonadas.

Apesar dos problemas enfrentados, foram realizadas n (em geral 3) medidas de torque, consumo de combustível, e também das temperaturas do ar de admissão e gases de descarga em cada ciclo e rotação de operação, cujas médias e desvios padrões foram analisados. Os resultados obtidos são apresentados por meio das curvas de desempenho da figura 5.20, tendo sido para a análise quantitativa da dispersão das medidas de consumo específico de combustível, elaborada a tabela da figura 5.21, com os dados de alguns regimes selecionados. Uma vez que cada regime foi reproduzido três vezes, foram obtidos três resultados base-RB (médias) e desvios padrões do regime (DPR) para cada rotação do motor. A partir destes valores foi calculado(a):

- o desvio padrão dos resultados base do consumo(s) de combustível do MCI nos vários ciclos do ensaio-DPC;
- a média ponderada dos desvios padrão do regime-DPR.

Verifica-se que, em geral, a ordem de grandeza dos desvios padrões resultantes é inferior a 0,5% VE (corresponde a faixa de dispersão-DM \approx +/- 1% VE), valor relativamente pequeno e logo o

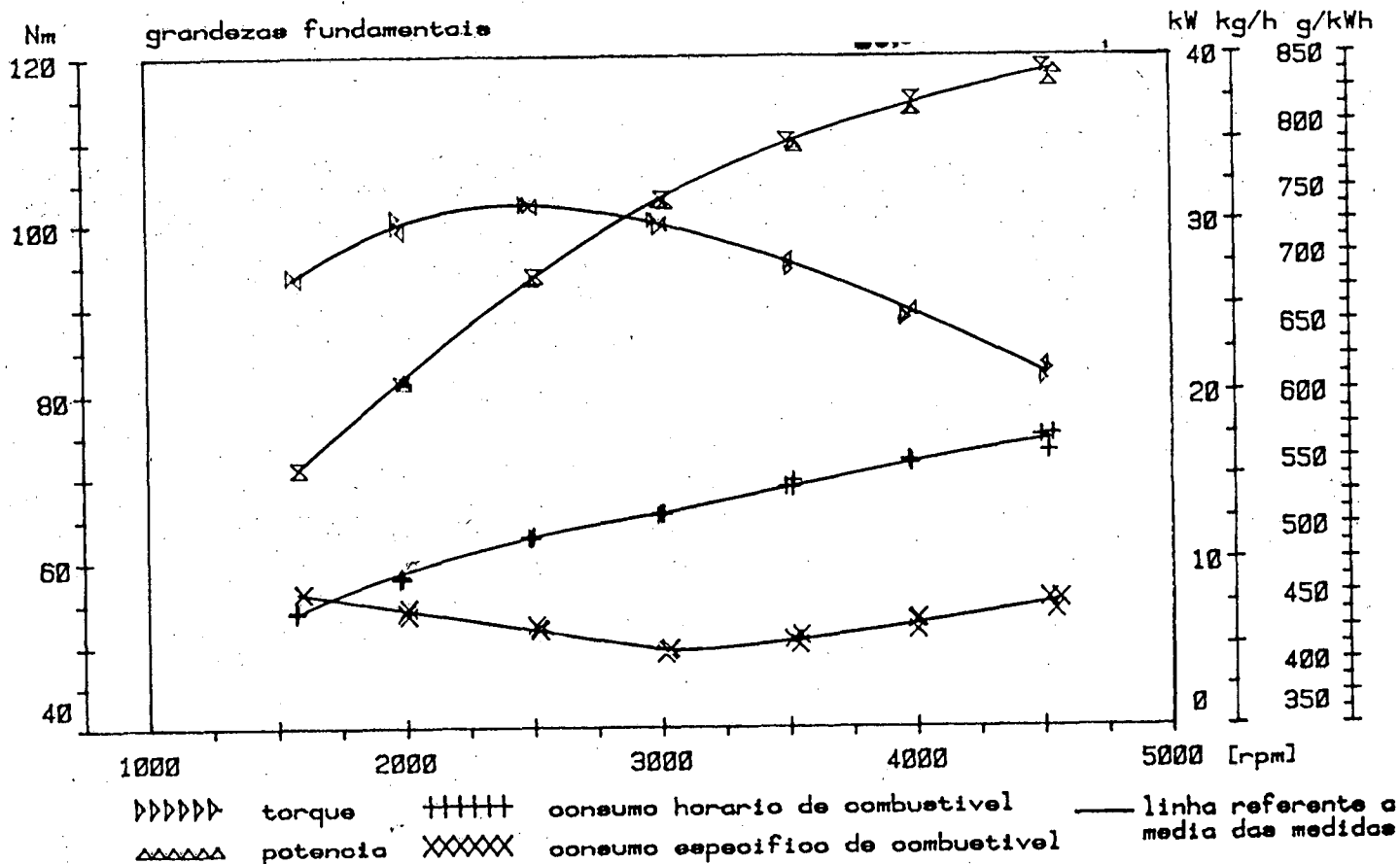


FIG. 5.20 - Apresentação gráfica dos resultados obtidos nos três principais ciclos do ensaio de desempenho.

REGIMES					TEMPERATURA (°C)		CONSUMO (kg/h)		C. ESPECÍFICO (g/kWh)		
Rotação (rpm)	DP	Ciclo	Tempo (min)	n	Ar	Gases	RB	DPR (%)	RB	DPR (%)	
2000		1	4	3	32,0	390,0	8,98	0,48	433,23	0,26	
		2	4	3	32,2	371,0	8,97	0,21	431,43	0,20	
		3	6	5	32,0	380,0	8,99	0,20	434,50	0,13	
		DPC(%)	-	-	-	-	-	0,11	-	0,36	-
		DPR(%)	-	-	-	-	-	-	0,28	-	0,18
3000		1	4	3	33,7	468,7	12,79	0,20	408,88	0,22	
		2	4	3	32,6	445,0	12,75	0,23	409,88	0,30	
		3	6	5	33,2	455,0	12,85	0,27	412,55	0,31	
		DPC(%)	-	-	-	-	-	0,38	-	0,45	-
		DPR(%)	-	-	-	-	-	-	0,24	-	0,28
4000		1	3,5	3	34,1	500,0	15,99	0,16	430,8	0,43	
		2	3,5	3	35,5	490,0	15,91	0,63	424,02	0,72	
		3	4	2	34,7	485,0	15,87	0,80	426,8	0,21	
		DPC(%)	-	-	-	-	-	0,38	-	0,79	-
		DPR(%)	-	-	-	-	-	-	0,51	-	0,46

FIG. 5.21 - Resultados numéricos do ensaio de desempenho (médias e desvios padrões).

efeito de qualquer fonte de erros pode ser significativo e difícil de ser identificado. No entanto, admitindo-se válida a análise comparativa de alguns valores, pode-se concluir que a repetibilidade dos resultados base do consumo específico foi afetada, no mínimo, pelos erros devidos a histerese do transdutor de força/torque. Isto é comprovado pelo fato do desvio padrão dos resultados do consumo específico-DPC (Ce), ser de modo geral maior que o desvio padrão dos resultados de consumo de combustível-DPC(Cb). Também, o fato de DPC(Ce) ter sido superior ao desvio padrão de suas medidas num regime-DPR (Ce), indica a presença de erros aleatórios significativos do SM de torque (neste ensaio de desempenho). Os dados da tabela da figura 5.21 mostram que condições operacionais praticamente idênticas foram estabelecidas nos três ciclos relativos a rotação 2.000 rpm e tomando como base $DPC(Ce) = \pm 0,36\%VE$ obtido nesta rotação, pode-se obter a partir da expressão 2.11, um valor de dispersão igual a $\pm 0,7\% VE$ para enquadramento de 95% das medidas do consumo específico, que nas condições operacionais do regime constitui-se na efetiva faixa de indeterminação do resultado obtido (conforme a expressão 2.13). Logo, admite-se a seguinte apresentação para o resultado em questão:

Consumo específico ... $433,0 \mp 3,0$ g/kWh a 2.000 rpm

E analogamente, para outras rotações:

Consumo específico ... $410,8 \mp 3,6$ g/kWh a 3.000 rpm

Consumo específico ... $427,4 \mp 6,0$ g/kWh a 4.000 rpm

Conclui-se que a estimativa da parcela $Ir(Ce) = \pm 0,4\% VE$ efetuada no item 5.3.3, é compatível com a ordem de grandeza da indeterminação obtida, lembrando-se que a faixa de indeterminação poderia ser reduzida para até duas vezes o valor do desvio padrão no regime (em média, $DPR = 0,2\% VE$), ou seja, aproximadamente $IR(Ce) = \pm 0,4\% VE$, com o aprimoramento da medição de torque, cujos erros foram subestimados, para o nível de probabilidade considerada.

5.5.5 Comentários Sobre a Especificidade dos Resultados Obtidos

Os resultados apresentados provém de ensaios realizados num sistema de ensaio e de um motor específicos. A análise destes resultados, pode trazer conclusões importantes para o aprimoramento da qualidade do sistema de ensaio e dos resultados por ele proporcionados. Em outros sistemas de ensaio, verificações e ensaios específicos podem ser realizados com este objetivo, e neste caso alguns dos métodos aqui utilizados poderão ser úteis para uma avaliação objetiva da confiabilidade de resultados proporcionada pelo sistema e para o estabelecimento dos passos para seu aperfeiçoamento. A título de exemplo, citam-se as principais providências quanto aos equipamentos que poderiam ser implementadas no SEMCI utilizado neste trabalho:

- um novo servoposicionador e conseqüentemente uma nova ajustagem do controle digital de torque e rotação visando sua otimização;
- um transdutor de força/torque com menor histerese e sensibilidade a alterações de temperatura;
- um transdutor foto-óptico (fig. 3.12) para permitir a medição confiável de eventos angulares;
- um conjunto de transdutores piezoelétricos para medição da pressão nas câmaras de combustão do MCI;
- tubulação para o ar de admissão, a ser coletado da sala de operação climatizada;
- desenvolvimento e calibração de uma balança eletromecânica, a ser utilizada na medição automatizada do consumo de combustível.

6. CONCLUSÕES

No decorrer deste trabalho procurou-se reunir informações acerca da instrumentação para ensaios automatizados de MCI, objetivando a obtenção de resultados que espelhem o efetivo desempenho do motor. Ao final, a implementação e operacionalização de um SEMCI experimental, teste dos programas aplicativos desenvolvidos e análise dos resultados de alguns ensaios específicos possibilitam alcançar amplo estudo e domínio de técnicas de medição e controle, permitindo apresentar as seguintes conclusões:

a) Sobre a validade dos resultados de ensaios:

- os métodos de ensaio da normalização vigente trazem especificações básicas para viabilizar a comparação do desempenho de MCI. Não explicitam, no entanto, de forma clara o nível de confiabilidade associado aos resultados, nem estabelecem como sua estimativa ou avaliação pode ser realizada. Em se desejando garantir, com maior objetividade, a validade dos resultados torna-se importante a caracterização da indeterminação do resultado de medição, a qual como definida no item 2.3.1, e avaliada experimentalmente em ensaios específicos (item 5.5.4), permite ao menos expressar o nível de confiabilidade dos parâmetros de desempenho obtidos no ensaio de um Motor a Combustão Interna.
- a avaliação sensata dos erros na medição, e/ou controle do torque, rotação, consumo de combustível e condições do ar, é um passo importante para a estimativa da incerteza provável de resultados do desempenho para cada tipo de motor e até mesmo para cada regime de operação considerados. A realização de ensaios com múltiplas medidas e ciclos repetidos permite, por outro lado, efetivar uma avaliação da prática da dispersão dos valores de grandezas

medidas/calculadas, que pode conduzir à identificação de fontes ou parcelas de erros significativos, subestimados na análise teórica.

- com o uso de aquisição de dados automática, variações inerentes da potência, do torque, do consumo de combustível e mesmo da pmi, podem ser melhor caracterizadas e com isto estabelecidos requisitos para técnicas de medição capazes de fornecerem valores médios mais confiáveis.

b) Sobre a instrumentação de Sistemas de Ensaio.

- o esforço tecnológico para o aprimoramento dos instrumentos e técnicas utilizados em SEMCI deve propiciar a eliminação das variações casuais das grandezas de interesse, através da implementação de sistemas de controle, que por sua vez, devem ter seu desempenho analisado e otimizado através da minimização da incerteza no controle e da incerteza de medição- I_m , em especial, dos transdutores utilizados.
- o aprimoramento dos sistemas de medição de grandezas do MCI deve ser fundamentado na minimização da sua incerteza de medição de forma a torná-la insignificante frente a variação inerente à grandeza medida ($I_m < VG/5$).
- os SM devem admitir leituras passíveis de serem efetuadas rapidamente, na aquisição automática, preferencialmente em tempos inferiores a 100 ms, para dinamizar a formação de valores médios e permitir a segura monitoração das diversas grandezas de interesse.
- para que se atinja o melhor nível de confiabilidade possível na avaliação do consumo específico de combustível (rendimento) do motor ensaiado, é preciso investir na qualidade dos SM de torque e consumo de combustível e em técnicas de aquisição de dados que permitam registrar as variações das grandezas medidas, e obter resultados base efetivamente representativos do valor médio da grandeza medida, no tempo de observação.

- Servoposicionadores para válvulas borboletas de carburadores não devem apresentar folgas mecânicas significativas, de modo a assegurar uma incerteza no posicionamento inferior a $\emptyset,1$. No caso de Motores Diesel, deve respeitar uma especificação análoga ou redefini-la segundo casos específicos para o posicionamento do comando de bombas injetoras.

c) Quanto a aspectos operacionais de sistemas de ensaio.

- os SEMCI permitem dinamizar o processo de execução de ensaios, ao viabilizar a apresentação imediata ou com rapidez de resultados e portanto a tomada de decisões rápidas relativas a possíveis modificações da regulagem ou de componentes do MCI. Por outro lado, para se tirar vantagem disto, é requerido do pessoal técnico envolvido na operação do sistema (engenheiros/programadores/operadores mecânicos) uma maior interação e envolvimento com o trabalho colaborativo, em equipe.
- o SEMCI pode ser capacitado a detectar através da aquisição de dados e/ou processamento em tempo real, o desempenho irregular do motor. Por exemplo, se o motor operar de forma instável, se o sistema de alimentação ou elétrico estiver mal-regulado, se os trocadores de calor do motor estiverem operando fora das temperaturas desejáveis, a análise pelo computador das grandezas do MCI ou de suas variações pode fornecer dados e índices que expressem quantitativamente, a gravidade do problema.

d) Quanto a sugestões para trabalhos futuros.

- assimilação e/ou desenvolvimento de tecnologias que permitam acelerar o processo de ensaios para obtenção de resultados confiáveis visando a elaboração de mapas multi-variáveis ou a representação paramétrica (modelos matemáticos) das principais características de operação de MCI /15/.

- análise das variações do torque e rotação ou pmi de motores com sistemas de injeção, correlacionadas a flutuação da pressão de combustível injetado em vários cilindros, visando o desenvolvimento de instrumentos para qualificação/diagnóstico destes sistemas.
- estudo de métodos e sequências de ensaios simplificados para medição de emissões de CO, HC, NOx e dos aspectos relativos a sua implementação em SEMCI.
- análise experimental da indeterminação dos resultados de ensaios de desempenho um mesmo motor em dois ou mais SEMCI, utilizando os procedimentos e formulação propostos neste trabalho.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- /01/ OBERT, E.F. Motores de Combustão Interna; Editora Globo; Porto Alegre; 1961.
- /02/ TAYLOR, C.F. The Internal Combustion Engine in Theory and Practice; Cambridge, Massachusetts; Volume I ; 1960, Volume II; 1966.
- /03/ PENIDO, Fº. P. Os Motores a Combustão Interna; Belo Horizonte; Editora Lemi; 1983
- /04/ BOYCE, M.P. Gas Turbine Engineering Handbook; Gulf Publishing Company; Houston, Texas; 1982.
- /05/ RAYMOND, L. Next Generation of Engines; Anais do Symposium of Technology - The Engine in the Future - da Metal Leve, São Paulo; 09/1980. ,
- /06/ FRENCH, C.C.J. The Engine Challenge of the Nineties; Anais do Symposium of Technology - The Engine in the Future - da Metal Leve, São Paulo; 09/1980
- /07/ SEIFFERT, U. The Future for Automotive Technology; Francis and Taylor (Publishers); London; 1984.
- /08/ WOLTERS, G. Heavy Duty Vehicle Engine Trend; Anais do Symposium of Technology - The Engine in the Future - da Metal Leve, São Paulo; 09/1980.
- /09/ DIVERSOS Anais do 1º Simpósio de Engenharia Automotiva Brasileira; 1983.
- /10/ AVL Engine Test Equipment; General Catalog; 1970.
- /11/ LARBORN, A. Automation in an Engine Laboratory; Development Laboratory, Volvo AB; SAE - 650458, 1965.
- /12/ JOSEPH, Jr. H. Determinação de Emissões em Veículos à Álcool; SIEKMANN, R.W. Anais do 1º Simpósio de Engenharia Automotiva, PISCHINGER, G.G. Brasília; 1983
- /13/ LINKE, R. Efeitos de Regulagem na Emissão e Concentração de Monóxido de Carbono de Veículos; NETO, L.C. Anais do 1º Simpósio de Engenharia Automotiva, WEISHAUPT, W. Brasília; 1983.

- /14/ ABNT Motores de Combustão Interna Alternativos, de Ignição por Compressores (Diesel) ou Ignição por Centelha (Otto) Veiculares não Turbo - Alimentados; Método de ensaio MB - 372; 1975.
- /15/ POWEL, J.D. Development And Validation of Engine Models
RAO, H.S. via Automated Dynamometer Tests; SAE - 790178;
TENNANT, J.A. 1979.
- /16/ SCHNEIDER, C.A. Técnicas em Pesquisa Experimental; curso de pós-graduação em Engenharia Mecânica; UFSC; 1985.
- /17/ SCHOELER, N. Estabilidade da Função Transferência de Sistemas de Medição; Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica; 1986.
- /18/ HOUFABAUER, P. Advanced Automative Power Systems; A Diesel
SATOR, K. for a Subcompact Car; SAE - 7701133; 1977.
- /19/ ULRICH, W. Einfluss des Totpunkfehlers auf die Bestimmung des indizierten Mitteldrucks; MTZ Motor Technische Zeitschrift, nº 44; 10/1983.
- /20/ DIEFFENBACH, K. The Use of Open and Closed Loop Control of Torque and Speed to Simulate Road Conditions on an Engine Brake Dynamometer; Weissach Development Centre; Porsche; International Symposium on Automotive Technology and Automation; ISATA-801297; 1980.
- /21/ HAGEMANN Rechnergestützte Motor prüfstände in Forschungs
LAGEMACK Zentrum der Volkswagen AG; MTZ, Motor Technische Zeitschrift, nº 45; 7/1984.
- /22/ HEATON , H.S. A Dynamic Test Facility With Motoring using a Digital Computer; Brigham Young Univ.; Provo; UT; SAE - 800412; 1980.
- /23/ SCHENCK Eddy Current Dynamometers; Catalog.
- /24/ AVL Smoke Meter 409; Austria; prospectus.
- /25/ SAE Instrumentation and Techniques for Exhaust Gas Emissions Measurement; SAE J254; 1971.
- /26/ AVL Blow-by Meter 413; Instruction Manual; Austria; 1981.

- /27/ AVL Digital Analyser System 656; Microprocessador controlled measuring System; prospectus; 1985.
- /28/ SOLIMAN, J.I. Digital Simulation of an Engine Test Rig for Optimised Control; University of London; Internacional Symposium on Automotive Technology and Automation, ISATA-78; 9/1978.
- /29/ KRATOS Células de Carga KRATOS (Transdutores de força); modelos MM; prospecto.
- /30/ INTERFACE Transdutores de Pressão e Força (células de carga); especificações técnicas; 1985.
- /31/ ALFA INSTRUMENTOS Células de Carga Alfa Instrumentos; série B; especificações técnicas.
- /32/ SCHNEIDER, C.A. Sistemas de Medição; Apostila de Curso de pós-graduação em Engenharia Mecânica; 1983.
- /33/ BAATZ, W. Automotive Turbine Fuel Flow Transducers; Floscan Instrument Co; SAE-760021; 1976.
- /34/ WITTKOWSKI, U. Fuel Flow Sensors for Automobile's and Problems of their Application; Research and Development, Volkswagen AG; 1982.
- /35/ DOSKI, Y.K. Digital Fuel Measurement System; SAE - 820767; HARVERDINK, W.K. 1982.
- /36/ ALFA INSTRUMENTOS Módulo de Medição de Combustível; prospecto.
- /37/ AVL Fuel Measurement System; Prospectus.
- /38/ AVL Dynamic Fuel Balance; Série 730; Austria; Prospectus.
- /39/ MARTE Balanças Eletrônicas; Prospecto; 1985.
- /40/ DATA INSTRUMENTS Pressure Transducers; short form catalog.
- /41/ SCHOPPE & FAESER Diaphragm Body Measuring Device and Eletronic Unit CMR for Inductive Half-bridges; instructions manual.
- /42/ SCHOPPE & FAESER CMR Transmitter for Pressure Measurement with Bourdon Tube Measuring Mechanism; brief instructions.

- /43/ SODMEX Transdutores de Pressão Extensométricos; catálogo geral.
- /44/ KISTLER Data Handbook; Kistler Instruments; código CH-8408; 1984.
- /45/ NIETO, A. Measure des Temperatures de la sonde a l'indicateur Numerique; Editions Radio; Paris, França, 1975.
PAUL, F.
- /46/ CASTRO, R.M. Medidas de Temperaturas em Motores de Combustão Interna; Apostila de Curso; ITA; 1970.
- /47/ SCHNEIDER, C.A. Sistema de Aquisição de Dados para Banco de Provas; Apostila Minicurso ENATEM-82; UFSC; 1982.
LUCKE, H.A.
FLESCH, C.A.
- /48/ SIEMENS Zundungstester 452; Messen von Drehzahl, Schliess und Zundwinkel.
- /49/ AVL Injection Timing Measurement Equipment; type 880/881; prospecto.
- /50/ FLOWTEC Especificações Técnicas para Medidores de Vazão tipo Turbina; prospecto; 1985.
- /51/ EISELE, H. Microprocessor Engine Application; Anais do Symposium of Technology - The Engine on the Future - da Metal Leve; São Paulo; 1980.
- /52/ FOX, D.M. The Automotive Applications of Sensors; Society of Automotive engineers; SP-41803/1977.
- /53/ CICHY, M. Development of Microcomputer Based Engine Test Stand Instrumentation; Technical University of Gdansk; Poland; Internacional Symposium on Automotive Technology and Automation; ISATA - 801061, 09/1980.
- /54/ BERG, P.S. The Dependability of Automatic Engine Test Beds; Truck Division; VOLVO AB; SAE-740696 ; 1974.
- /55/ AVL Indicating System for Low and High Pressure Measurement in Internal Combustion engines ; Prospectus.
- /56/ KUROIWA, S. Development of a Distributed Microcomputer Based Engine Performance Evaluation System ; Toyota Motor Corp.; SAE-831321; 1.983.
TUKUNAGA, K.
YAMAMOTA, H.

- /57/ DONNELLY, M.J. Computerised Data Acquisition and Processing System for Engine Beds; BL Technology; 1981.
JUNDAY, J.
TIDMARSH
- /58/ CERTI Interface Modular de Aquisição e Controle ;
Fundação Centro Regional de Tecnologia em In
formática em Santa Catarina (CERTI); prospec
to (3 pg); Florianópolis, 1985.
- /59/ TOMELIN, H.A. Análise de Esforços em Motores a Combustão In
ZANCHIN, C.I. terna Movidos a Álcool Hidratado; X Encontro
FARACO, JR.C.M.F. de Centros de Apoio Tecnológico; STI/MIC;
SEUGLING, S. Florianópolis; 1982.
- /60/ SCHENCK Operating Instruction for Eddy Current Dynamo
meters; Instruction Manual.
- /61/ ALFA Pirômetro Digital, modelo P31; prospecto.
INSTRUMENTOS
- /62/ STI/MIC Padrão de Comparação Para Motores Convertidos
a Álcool; motor FORD-CORCEL 1.4. L; revisão D;
Secretaria de Tecnologia Industrial do Ministr
tério de Indústria e Comércio; Brasília;1981.
- /63/ HOTTINGER Me verstärker KWA3082; Modulator TF-5KHz ;
BALDWIN Bedienungsanleitung (manual de instrução).
MESSTECHNIK-
HBM
- /64/ HBM Zug - und Druck-Kraftaufnehmer mit DMS-MeBsystem;
typ U2; Bedienungsanleitung (manual de Instruç
ção);