

RECUPERAÇÃO E TESTE DE UM DINAMÔMETRO PARA ENSAIO DE
MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA A BIOCOMBUSTÍVEIS

César Cunha Pacheco

PROJETO FINAL SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO MECÂNICO.

Aprovado por:

Prof. Albino José Kalab Leiroz, PhD.

Prof. Marcelo José Colaço, DSc.

Prof. Flávio de Marco Filho, DSc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
SETEMBRO DE 2012

PACHECO, CÉSAR CUNHA

Recuperação e Teste de um Dinamômetro para Ensaio de Motores de Combustão Interna A Biocombustíveis.

XII, 51 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Albino José Kalab Leiroz

Projeto Final – Universidade Federal do Rio de Janeiro, DEM.

Referências Bibliográficas: p. 51.

1. Bancada de Teste Dinamométricas. 2. Biocombustíveis.

I. DEM/UFRJ. II. Título (série).

Dedicatória

Aos meus pais, Cézar e Elisabete, pela incansável dedicação em garantir educação e estrutura sem as quais jamais eu teria qualquer perspectiva de me tornar Engenheiro Mecânico, do apoio para que eu pudesse tomar a decisão de seguir na área de pesquisa e pela inspiração para me dedicar sempre ao máximo para me tornar um bom profissional. Também dedico este trabalho às minhas irmãs Flávia e Cristina que, juntamente aos meus pais, me ensinam dia após dia a importância da família para um bom desenvolvimento, seja profissional ou pessoal.

À Prof.^a Maria Helena Cunha e ao Prof. João Luiz Lincoln por terem exercido em sua plenitude a vocação de Professor que, além de ensinar, deve sempre inspirar seus alunos. Sem a presença destes dois, jamais teria encontrado a coragem e a força de vontade para buscar me tornar Engenheiro Mecânico e muito menos teria o entendimento de que somente dedicando-se à exaustão é possível tornar-se um profissional competente. Tenho a esperança de um dia conseguir propagar, ao menos, uma pequena parte desta inspiração para gerações futuras.

Agradecimentos à ANP

Este trabalho foi realizado no contexto do Programa de Recursos Humanos da ANP, que forma profissionais especializados para a indústria do Petróleo e Gás Natural.

A participação dos alunos bolsistas em seminários, simpósios e congressos foi muito importante no sentido de aumentar o contato dos bolsistas com os reais atributos e dificuldades das indústrias de Petróleo e Gás Natural.

O autor gostaria de agradecer ao Programa de Recursos Humanos da ANP, em especial PRH-37 por auxiliar o desenvolvimento dos conhecimentos relativos às indústrias de hidrocarbonetos e à conclusão deste Projeto Final.

Agradecimentos

Ao meu orientador, Prof. Albino Leiroz, pela sua sabedoria, atenção e dedicação dentro e fora de sala de aula.

Ao Prof. Marcelo José Colaço, pelo apoio como Professor e pela estrutura como Coordenador do PRH-37/ANP.

Ao Engenheiro Nauberto Pinto, do Laboratório de Máquinas Térmicas, por todo o aprendizado e participação ativa na reconstrução do dinamômetro e na montagem do banco de provas, sem a qual este projeto seria impossível.

Ao DPM/Cenpes/Petrobrás pela doação do Dinamômetro Hofmann I2D utilizado neste trabalho.

Ao José Alberto dos Santos Rocha e Edilson Caldas, do Núcleo Automotivo do SENAI Tijuca, pela atenção e disponibilidade para consertar do Motor de Combustão Interna.

Ao Prof. Ithamar Rangel do Instituto Militar de Engenharia, pelo empréstimo dos braços de calibração do Dinamômetro.

À Prof.^a Anna Carla Araújo e todos os funcionários do Laboratório de Tecnologia Mecânica da COPPE/UFRJ pela ajuda com a modificação da carcaça do Dinamômetro.

Aos Engenheiros Pedro Paulo e Wilson Vila Maior, e todos os técnicos e funcionários do Laboratório de Máquinas Térmicas da UFRJ.

A Camila Lacerda pela companhia e por ser um porto seguro durante os vários momentos de dificuldade.

Ao Jean, Vinícius, Jorge, Daniel, Andrés, Fabiana e a todos os colegas de graduação e pós-graduação do Laboratório de Máquinas Térmicas, pela convivência e amizade.

A todos os colegas de graduação pela companhia ao longo do curso, em especial para Kelvin, Renato e Pedro por também sempre terem sido referências de conhecimento.

Ao Guilherme, Jéssica, Francisco, Cecília, Alini, Martza, Lucas, Daniel, Victor, Mariana, Renata e Tatiana pela amizade que, mesmo depois de anos, continua se tornando mais importante dia após dia.

À Prof.^a Juliana Loureiro, do Núcleo Interdisciplinar de Dinâmica dos Fluidos pelo admirável comprometimento com seus alunos, passando conhecimentos que, embora fundamentais na formação de um Engenheiro em uma Escola Politécnica, eram impensáveis dentro de um Curso de Engenharia Mecânica.

À Prof.^a Lavínia Borges, por ter sido uma Orientadora Acadêmica impecável, me ajudando desde os primeiros períodos a tomar as decisões mais sensatas dentro do meu curso de graduação.

Ao Prof. Marcelo Savi e ao Engenheiro Anderson de Souza do Laboratório de Acústica e Vibrações da COPPE/UFRJ, por disponibilizar a estrutura do Laboratório para o teste do condicionador de sinais do sensor de rotação.

Aos Professores Hélcio Orlande, Sylvio José, Daniel Castello, Antônio Figueiredo, Nísio Brum, Renato Cotta, Átila Pantaleão e todos os Professores citados acima pela atenção, conhecimento e dedicação ao ensino que dá ao curso de Engenharia Mecânica da UFRJ o merecido nível de excelência.

Finalmente, deixo um agradecimento especial aos Professores Albino Leiroz, Marcelo Colaço, Lavínia Borges, Hélcio Orlande, Juliana Loureiro e Átila Pantaleão pela paciência e pelas muitas conversas e troca de experiências que me ajudaram a tomar a decisão de ingressar no curso de Mestrado na COPPE/UFRJ, dando início à caminhada rumo à carreira de Pesquisador.

ÍNDICE	Pág
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. O MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA	1
1.2. A NECESSIDADE DE ALTERNATIVAS AO COMBUSTÍVEL FÓSSIL	2
1.2.1. EFEITOS NOCIVOS AO HOMEM E MEIO AMBIENTE	2
1.2.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE O USO DE ETANOL	4
1.3. O BANCO DE PROVAS DINAMOMÉTRICO	8
1.3.1. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE UM DINAMÔMETRO	8
1.3.2. CRITÉRIO DE ESCOLHA DO DINAMÔMETRO	11
2. APARATO EXPERIMENTAL	13
2.1. DINAMÔMETRO	13
2.2. MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA	15
2.3. VERIFICAÇÃO DA COMPATIBILIDADE ENTRE OS DOIS EQUIPAMENTOS	16
3. MANUTENÇÃO CORRETIVA DOS EQUIPAMENTOS	18
3.1. O DINAMÔMETRO	18
3.1.1. LEVANTAMENTO INICIAL	18
3.1.2. FABRICAÇÃO DE NOVAS BUCHAS DE REFRIGERAÇÃO	18
3.1.3. MODIFICAÇÃO DO CIRCUITO DE REFRIGERAÇÃO À ÁGUA	20
3.1.4. SUBSTITUIÇÃO DE COMPONENTES PADRONIZADOS	22
3.1.5. DIAGNÓSTICO DA BOBINA	24
3.2. O MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA	25
4. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	26
4.1. SENSORES ORIGINAIS DO DINAMÔMETRO	26
4.2. EQUIPAMENTOS DISPONÍVEIS	26
4.3. ESPECIFICAÇÃO DOS NOVOS SENSORES	28
4.3.1. CÉLULA DE CARGA	28
4.3.2. SENSOR DE ROTAÇÃO	30
4.3.3. TERMOPARES	32
4.3.4. BLOCO TERMINAL	34
4.4. INSTALAÇÃO DOS NOVOS SENSORES NO DINAMÔMETRO	34
5. RESULTADOS	36
5.1. DINAMÔMETRO RECUPERADO E INSTALADO NO BANCO DE PROVAS	36
5.2. CENTRAL DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	39
5.3. CURVAS DE CALIBRAÇÃO DOS SENSORES	40
5.3.1. CÉLULA DE CARGA	40
5.3.2. MEDIDOR DE ROTAÇÃO	42
5.4. SOFTWARE PARA AQUISIÇÃO DE DADOS	47
6. CONCLUSÕES, COMENTÁRIOS E SUGESTÕES	49
6.1. CONCLUSÕES	49
6.2. COMENTÁRIOS E SUGESTÕES	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

ANEXOS

Pág

A1 Curva do Dinamômetro Hofmann I2D	I
A2 Estimativa de custo do projeto	II
A3 Distribuição de Qui-Quadrado	III

CD em Anexo

Manual da placa NI-4351
Manual do terminal NI CB-68T
Datasheet da Célula de Carga MK CSA/ZL-100
Datasheet do Condicionador de Sinais para Célula de Carga MK TC-05
Manual do Pick-up Magnético DLG SP02-5/8G1SM/80
Manual do Condicionador de Sinais para Pick-up Magnético DLG XM-100
Manual da Fonte de Corrente Instrutherm FA-3050

Lista de Símbolos

Símbolo	Significado	Unidade
b	Comprimento do braço de alavanca	m
e_i	Valor esperado	.
i	Corrente contínua	A
F	Força aplicada na extremidade do braço de alavanca	N
FC	Fator de conversão para o cálculo da potência	.
K	Constante geométrica do dinamômetro	.
N	Número de voltas da bobina	.
n	Tamanho de amostra	.
n_i	Valor obtido	.
S	Desvio-padrão populacional	.
T	Torque	N.m
V	Tensão elétrica (Diferença de potencial)	V
\bar{X}	Média populacional	.
\dot{W}	Potência	kW ou CV
z	Número de dentes da roda dentada	Dentes/Revolução

Símbolos Gregos

Símbolo	Significado	Unidade
ε	Força eletromotriz	V
ρ	Resistividade do rotor	Ωm
Φ_B	Fluxo magnético	Wb
ω	Rotação do eixo do dinamômetro	RPM

Lista de Figuras

- Figura 1.1. Motor de Combustão Interna Alternativo de Ignição por Centelha. Fonte: Traduzido de HEYWOOD [2]
- Figura 1.2. Frota nacional de veículos por tipo de combustível. Fonte: ANFAVEA (2009)
- Figura 1.3. Histórico dos Biocombustíveis no Brasil. Fonte: Adaptado de BARROSO [4]
- Figura 1.4. Evolução da demanda de energia e da taxa de crescimento econômico. Fonte: Adaptado de EPE - Empresa de Pesquisa Energética
- Figura 1.5. Resultados dos ensaios de Costa e Sodré. Fonte: Adaptado de COSTA, SODRÉ [8]
- Figura 1.6. Resultados dos ensaios de Costa e Sodré. Fonte: Adaptado de COSTA, SODRÉ [8]
- Figura 1.7. Esquema de um banco de provas dinamométrico. Fonte: PLINT [3]
- Figura 1.8. Freio de Prony. Fonte: JÚNIOR [12]
- Figura 1.9. Princípio de aferição do torque do eixo do motor. Fonte: PLINT [3]
- Figura 1.10. Curvas típicas de dinamômetros de corrente parasita. Fonte: PLINT [3]
- Figura 1.11. Resultado esperado na comparação entre uma curva típica de MCI com a curva de um dinamômetro. Fonte: Adaptado de PLINT [3]
- Figura 2.1. Parte do dinamômetro encontrado no depósito do LMT.
- Figura 2.2. Dinamômetro em funcionamento no CENPES/PETROBRÁS. Fonte: Acervo LMT/COPPE
- Figura 2.3. Dinamômetro de corrente parasita. Fonte: Adaptado de PLINT [3]
- Figura 2.4. Motor Peugeot 1.6 16 válvulas
- Figura 2.5. Verificação da Compatibilidade entre o Dinamômetro e o MCI.
- Figura 3.1. Bucha de refrigeração original
- Figura 3.2. Furo na bucha causado por corrosão
- Figura 3.3. Usinagem e acabamento das Buchas de Refrigeração.
- Figura 3.4. Máquina fotográfica equipada com boroscópio (a) e parte interna da carcaça do dinamômetro (b).
- Figura 3.5. Esquema de circulação de água: Original (a) e Modificado (b).
- Figura 3.6. Base do Dinamômetro: Original (a) e Modificada (b).
- Figura 3.7. Núcleo do dinamômetro com rotor exposto.
- Figura 3.8. Núcleo do dinamômetro montado.
- Figura 3.9. Fonte de Corrente Instrutherm FA-3050
- Figura 4.1. Experimento para avaliação do funcionamento da célula de carga
- Figura 4.2. Diagrama básico dos componentes de um sistema de aquisição de dados [15].
- Figura 4.3. Célula de Carga MK CSA/ZL-100
- Figura 4.4. Condicionador de Sinais MK TC-05
- Figura 4.5. Sensor Pick-Up Magnético DLG SP02-5 8G1SM/80
- Figura 4.6. Condicionador de sinais para pick-up magnético DLG XM-100. Fonte: DLG Automação
- Figura 4.7. Termopares de haste e de multímetro utilizados no banco de provas
- Figura 4.8. Bloco Terminal National Instruments CB-68T
- Figura 4.9. Instalação da célula de carga no dinamômetro
- Figura 4.10. Instalação do pick-up magnético no dinamômetro
- Figura 5.1. Comparação entre as buchas de refrigeração antiga e nova.

Figura 5.2. Dinamômetro montado e instalado no banco de provas.
Figura 5.3. Entrada da água de refrigeração
Figura 5.4. Detalhe da entrada e saída de água de refrigeração no núcleo.
Figura 5.5. Planta baixa do banco de provas onde o dinamômetro foi instalado.
Figura 5.6. Desenho da base do dinamômetro.
Figura 5.7. Central do sistema de aquisição de dados.
Figura 5.8. Dinamômetro com os Braços de Calibração Instalados
Figura 5.9. Curva de calibração estática da célula de carga
Figura 5.10. Verificação da curva de calibração estática da célula de carga
Figura 5.11. Curva de calibração do medidor de rotação.
Figura 5.12. Verificação da curva de calibração do sensor de rotação.
Figura 5.13. Novo experimento para validação da curva de calibração do sensor de rotação.
Figura 5.14. Leitura da tensão realizada diretamente no condicionador de sinais
Figura 5.15. Equipamento de referência TESTO 454. Fonte: TESTO Brasil.
Figura 5.16. Tela inicial do programa de aquisição de dados
Figura 5.17. Esquema ilustrativo do processamento dos dados dos sensores
Figura 6.1. Dinamômetro antes e depois da recuperação.

Lista de Tabelas

Tabela 1.1. Propriedades Físico-Químicas do E22 e AEHC. Fonte: Adaptado de COSTA, SODRÉ [8]

Tabela 1.2. Fases do PROCONVE. Fonte: MELO [6]

Tabela 1.3. Motor Flex de ignição por centelha usados nos ensaios de [8].

Fonte: COSTA, SODRÉ [8]

Tabela 1.4. Fatores de conversão para cálculo da potência. Fonte: JUNIOR [12]

Tabela 2.1. Especificação Técnica do Motor. Fonte: COSME [11]

Tabela 2.2. Valores para verificação de compatibilidade.

Tabela 4.1. Especificações técnicas da célula de carga CSA-ZL100. Fonte: MK Instrumentação e Controle

Tabela 4.2. Especificações técnicas do Condicionador de Sinais MK TC-05. Fonte: MK Instrumentação e Controle

Tabela 4.3. Especificações técnicas do Pick-Up Magnético DLG SP02-5 8G1SM/80. Fonte: DLG Automação

Tabela 4.4. Especificações técnicas do condicionador DLG XM-100. Fonte: DLG Automação

Tabela 4.5. Distribuição das medições de temperatura por tipo de termopar

Tabela 4.6. Especificações técnicas do bloco terminal NI CB-68T. Fonte: National Instruments

Tabela 5.1. Dados de calibração do sistema medidor de torque

Tabela 5.2. Verificação da curva de calibração estática da célula de carga

Tabela 5.3. Dados de calibração do sistema medidor de rotação

Tabela 5.4. Verificação da curva de calibração do sensor de rotação.

Tabela 5.5. Dados para verificação da calibração do sensor de rotação com o TESTO 350.

Tabela 5.6. Teste de Aderência.

1. INTRODUÇÃO

1.1. O MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA

O propósito do equipamento conhecido como motor de combustão interna (MCI) é transformar a energia química, contida no combustível, em energia mecânica [2]. Sua consolidação data da segunda metade do Século XIX, com os trabalhos dos engenheiros Nicolas Otto em 1876, desenvolvendo o motor de ignição por centelha e Rudolph Diesel em 1892, com o motor de ignição por compressão. Estes dois equipamentos, desde então, vem desempenhando um papel a cada dia mais importante nos setores como automobilística, navegação e de energia, sendo fonte de constantes linhas de pesquisa que buscam transformá-los em máquinas cada vez mais eficientes. De todos os tipos de MCIs desenvolvidos até hoje, o MCI de Ignição por Centelha, mostrado Fig. 1.1, é um dos mais conhecidos e sua participação é muito forte no setor automobilístico.

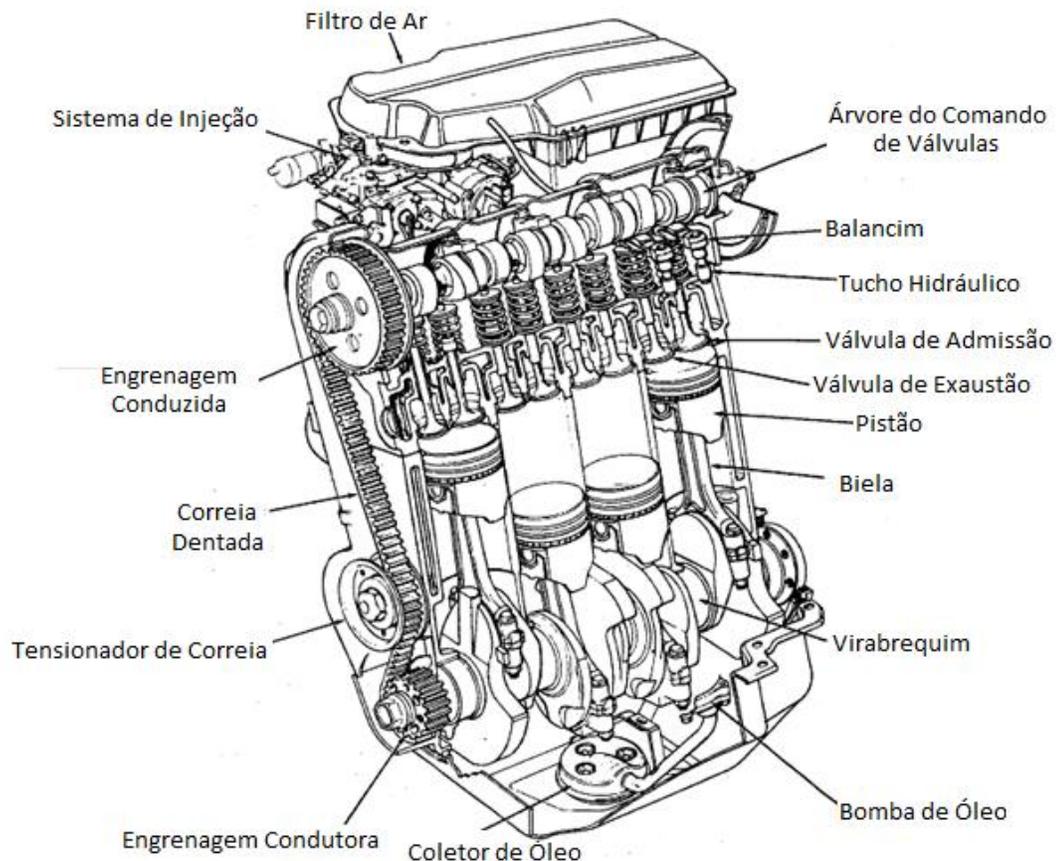


Figura 1.1. Motor de Combustão Interna Alternativo de Ignição por Centelha
Fonte: Traduzido de HEYWOOD [2]

1.2. A NECESSIDADE DE ALTERNATIVAS AO COMBUSTÍVEL FÓSSIL

1.2.1. EFEITOS NOCIVOS AO HOMEM E AO MEIO-AMBIENTE

Nos últimos anos, a demanda global de energia cresceu vertiginosamente, aumentando o consumo de produtos derivados do petróleo. Através da Fig. 1.2, é possível observar a participação de cada tipo de combustível na frota nacional de automóveis. Entretanto, estes combustíveis, assim como todos os derivados de petróleo, além de serem recursos não-renováveis, são altamente poluentes, sobretudo quando usados em escala global.

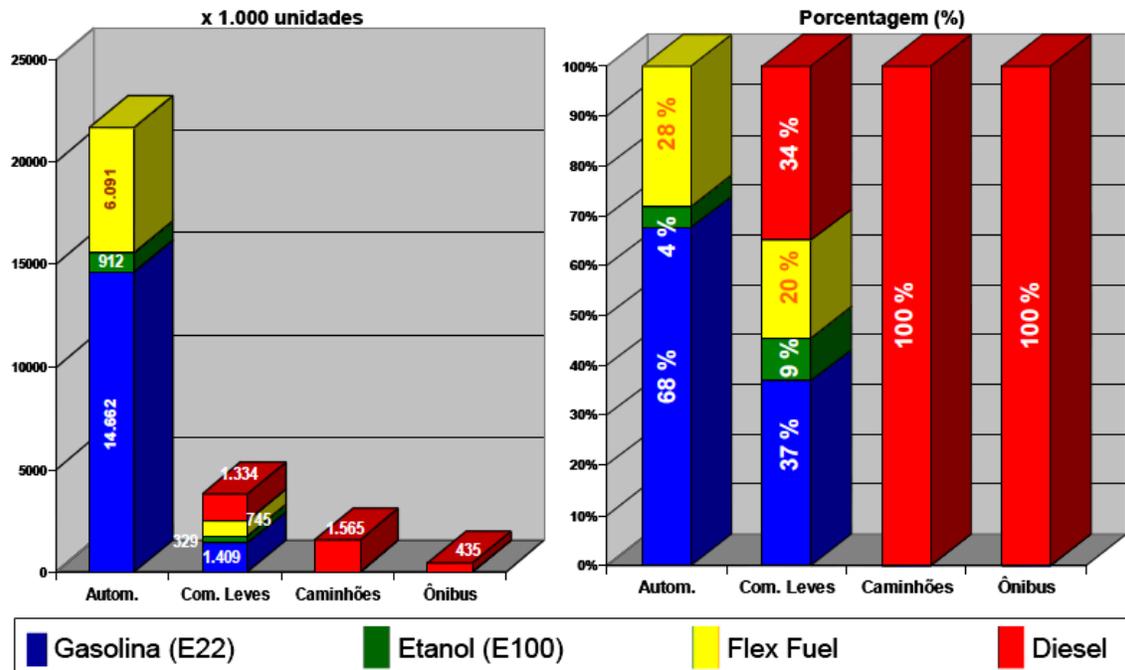


Figura 1.2. Frota nacional de veículos por tipo de combustível.
Fonte: ANFAVEA (2009)

A queima destes derivados resulta na emissão de produtos nocivos ao ser humano e ao meio-ambiente, como gases de efeito estufa, gases que atacam o sistema respiratório e material particulado. Ou seja, as consequências de seu uso caracterizam fortes argumentos contra a escala em que este é utilizado, e a redução drástica no seu consumo tem sido apontada como necessária, assim como a pesquisa e desenvolvimento para o uso de fontes alternativas menos nocivas e que sejam viáveis.

Além dos prejuízos à saúde e ao meio-ambiente, os combustíveis fósseis tem como matéria-prima o petróleo, foco de conflitos políticos e econômicos que afetaram significativamente os níveis de oferta e demanda de derivados deste produto. Os episódios conhecidos como Crises do Petróleo intensificaram a busca por meios de se reduzir o consumo de Gasolina. No Brasil, esta redução no consumo se deu através da adição de Etanol na Gasolina, cuja produção foi estimulada pelo Programa Pró-Álcool em 1974, logo após a

Primeira Crise. Observa-se também, em 1980, o aumento massivo no número de veículos a Etanol no país após a Segunda Crise, chegando a 96% da frota total. Esta participação, entretanto, decaiu nos anos seguintes, fruto da oferta insuficiente de Etanol, juntamente com o preço da Gasolina, que se tornara novamente competitivo [8]. Estes episódios, apresentados em ordem cronológica na Fig. 1.3, foram os primeiros resultados na busca de alternativas aos combustíveis fósseis.

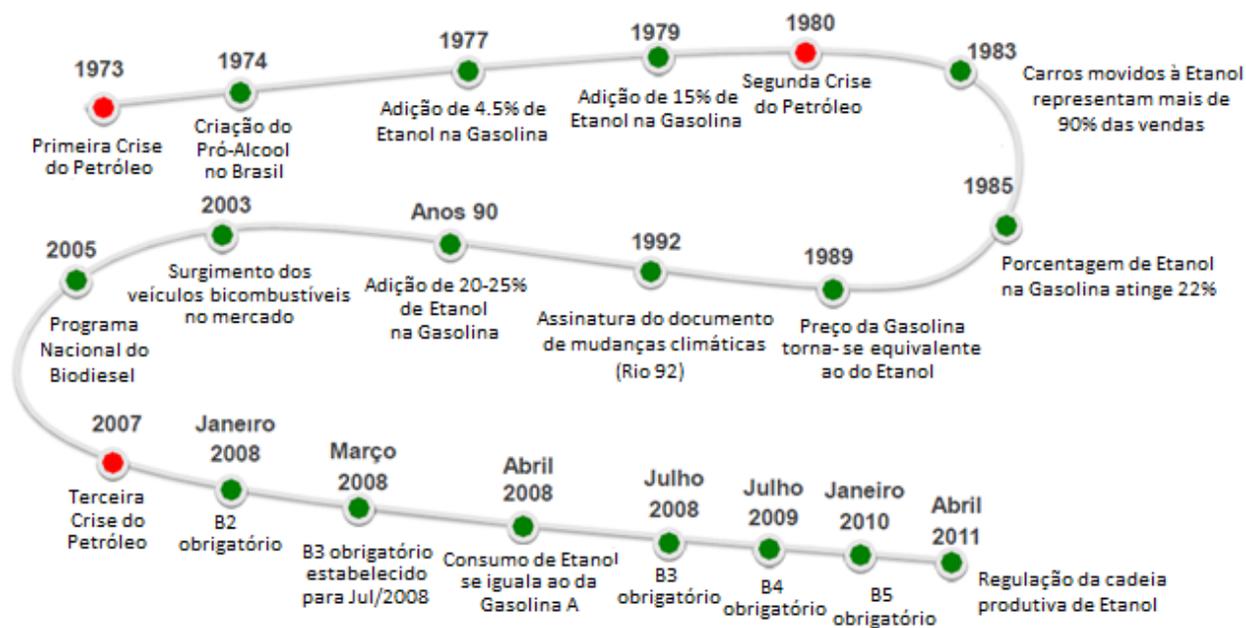


Figura 1.3. Histórico dos Biocombustíveis no Brasil
 Fonte: Adaptado de BARROSO [4]

Este conjunto de motivos econômicos, políticos, de saúde e meio-ambiente tornam-se ainda mais críticos quando se pensa no panorama energético do planeta em longo prazo, uma vez que o crescimento na demanda de energia, apresentado na Fig. 1.4 para o caso do Brasil, é cada vez mais acentuado trazendo a necessidade de se obter energia a taxas cada vez maiores, o que contrasta com as questões colocadas acima, principalmente com as questões de saúde e meio-ambiente, uma vez que vem sendo observados fatos como a constante degradação da qualidade de vida em grandes cidades, fruto do excesso de automóveis movidos à Gasolina ou Óleo Diesel.

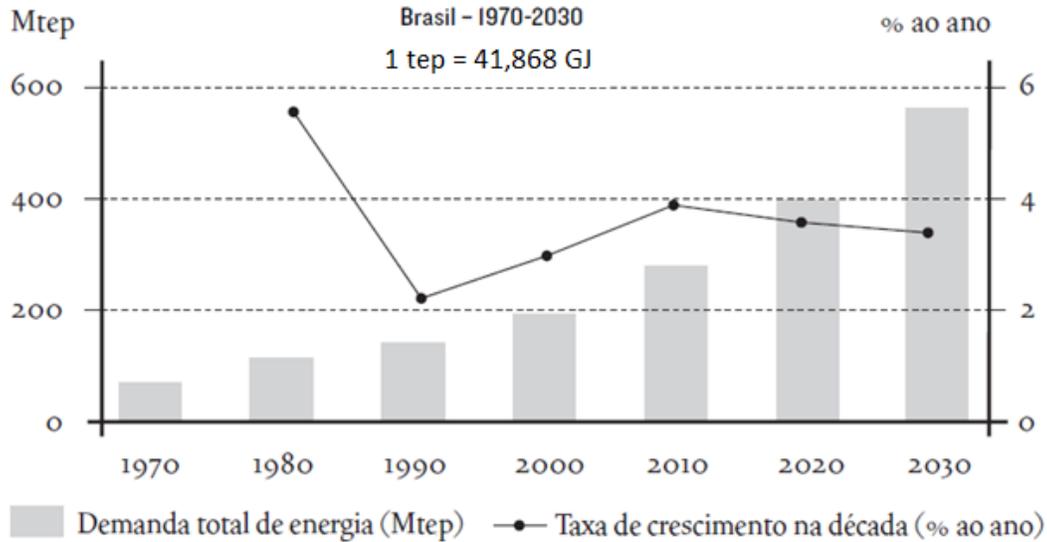


Figura 1.4. Evolução da demanda de energia e da taxa de crescimento econômico
Fonte: Adaptado de EPE - Empresa de Pesquisa Energética

1.2.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE O USO DE ETANOL

E fácil notar a importância que o Etanol vem ganhando, principalmente, no Brasil na questão de alternativas à Gasolina. Deve-se então perguntar quais as questões técnicas que a adição de Etanol à Gasolina ou a completa substituição da Gasolina pelo Etanol levanta. A Tab. 1.1 lista algumas das propriedades físico-químicas da Gasolina Padrão Brasileira (conhecida como E22) e o Etanol Hidratado, uma vez que estes dois combustíveis possuem algumas diferenças relevantes entre si.

Tabela 1.1. Propriedades Físico-Químicas do E22 e do Etanol Hidratado.
Fonte: Adaptado de COSTA, SODRÉ [8]

Parâmetro	E22	Etanol Hidratado
Massa específica (kg/m^3)	740	810
Poder Calorífico Inf. (kJ/kg)	39386	25014
Razão A/C estequiométrica	13.1	8.7
Estrutura química	$C_{6.39}H_{13.60}O_{0.61}$	$C_2H_{6.16}O_{1.08}$
Fração mássica de C (%)	76.0	50.59
Fração mássica de H (%)	13.6	12.98
Fração mássica de O (%)	9.7	36.42
Fração mássica de S (%)	0.09	0
Temperatura de autoignição ($^{\circ}C$)	400	420
Temperatura de vaporização ($^{\circ}C$)	40 – 220	78
Calor de vaporização (kJ/kg)	440	993
RON	–	106
MON	80	87
Pressão de Vapor (kPa)	2750	2900

- O Etanol Hidratado possui Poder Calorífico menor, o que implica maiores consumos de combustível.
- As diferenças de massa específica devem ser consideradas, visto que os bicos injetores controlam apenas a vazão em volume.
- A Estequiometria difere bastante e a quantidade ideal de Ar depende da concentração dos combustíveis utilizados.
- O Etanol Hidratado possui maior resistência à detonação de modo a permitir maiores razões de compressão, o que beneficiaria o uso deste combustível. Entretanto, a Gasolina não acompanha este padrão, sob o risco de causar detonação da mistura na câmara de combustão. Deve-se então, considerar o uso de taxas intermediárias, dependendo da concentração dos combustíveis.
- O sistema de alimentação deve ser capaz de balancear todos os itens acima em tempo real para que o motor possa funcionar em boas condições.
- O Etanol Hidratado é mais corrosivo que a Gasolina. As partes do motor que ficam em contato com o combustível serão agredidas mais intensamente. Deve-se desenvolver materiais mais resistentes para estas partes.

Também é necessário quantificar os níveis de emissões que a adição de Etanol ou substituição pelo Etanol Hidratado pode gerar, para que seja possível verificar os reais benefícios e quaisquer aspectos que necessitem de atenção. A resolução nº18 do CONAMA, de 06 de junho de 1986 [7] definiu o chamado Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE), que tinha objetivos:

- Reduzir a emissão dos veículos automotores
- Promover o desenvolvimento tecnológico nacional
- Promover a melhoria das características dos combustíveis
- Criar programas de inspeção dos veículos em uso
- Promover a conscientização popular quanto à poluição veicular
- Estabelecer condições de avaliação dos resultados alcançados

O PROCONVE estabeleceu limites para a emissão de poluentes por veículo para cada tipo de substância nociva. O programa foi dividido em várias etapas nas quais os limites vão se tornando cada vez mais rígidos, induzindo o desenvolvimento de tecnologias cada vez menos poluentes. Na Tab. 1.2 são apresentados os limites estabelecidos para veículos leves, classificados como veículos cuja massa não exceda 3.9 Toneladas.

Tabela 1.2. Fases do PROCONVE.
Fonte: MELO [6]

Fases do PROCONVE	Ano de Fabricação do Veículo	CO (g/km)	HC (g/km)	NMHC (g/km)	NOx (g/km)	HCHO (g/km)
L-1	1989	24.0	2.1	–	2.0	–
L-2	1992	12.0	1.2	–	1.4	0.16
L-3	1997	2.0	0.3	–	0.6	0.03
L-4	2007	2.0	0.3	0.16	0.25	0.03
L-5	2009	2.0	0.3	0.05	0.12	0.02
L-6	2013	1.3	0.3	0.05	0.08	0.02

Visando entender melhor os efeitos do tipo de combustível no funcionamento de MCIs, COSTA e SODRÉ apresentaram um comparativo entre os resultados de ensaios de um Motor Flex de Ignição por Centelha operando com E22 e com Etanol Hidratado [8]. Os experimentos foram realizados em bancada dinâmométrica, utilizando um MCI do tipo *Flex-Fuel*, cuja especificação técnica é apresentada na Tab. 1.3. Os resultados destes ensaios, apresentados nas Fig. 1.5 e 1.6 permitem apontar alguns fatos na utilização de Etanol Hidratado, comparado com o E22, listados abaixo.

- Definir o combustível que garante maior torque e pressão média efetiva (PME) depende da definição da rotação do eixo do motor. Ao passo que, para baixas velocidades, a Gasolina torna-se mais vantajosa, isto não ocorre acima de 4000RPM.
- No que diz respeito à potência disponível no eixo, não é possível apontar diferenças significativas entre o uso dos dois combustíveis, exceto para altas rotações (5000RPM), onde o Etanol Hidratado garante uma potência levemente maior.
- Ao longo de todos os testes, o consumo específico de Etanol Hidratado mostrou-se visivelmente maior, por conta do menor poder calorífico.
- O Etanol Hidratado garantiu um funcionamento mais eficiente do motor para praticamente todas as velocidades medidas.
- O uso do Etanol Hidratado proporcionou uma queda nas emissões de Hidrocarbonetos e CO, embora a emissão de CO₂ tenha aumentado levemente. Ou seja: No que diz respeito aos resultados obtidos neste teste, embora a substituição da Gasolina Padrão pelo Etanol Hidratado contribua para uma menor poluição do ar, não se trata de uma medida razoável contra a intensificação do efeito estufa.

Tabela 1.3. Motor Flex de ignição por centelha usados nos ensaios de COSTA, SODRÉ [8].
 Fonte: COSTA, SODRÉ [8]

Parâmetro	Descrição
Nº de cilindros	4 em linha
Diâmetro do pistão (m)	0.07
Curso do pistão (m)	0.0649
Volume deslocado (m ³)	999.057 10 ⁻⁶
Razão de compressão	12.00 ± 0.15
Volume da câmara de combustão (m ³)	25.490 10 ⁻⁶
Diâmetro da válvula de admissão (m)	0.0310
Diâmetro da válvula de exaustão (m)	0.0265
Levantamento da válvula (m)	0.0090
Abertura da válvula de admissão (°APMS)	2
Fechamento da válvula de admissão (°DPMS)	221
Abertura da válvula de exaustão (°APMS)	222
Fechamento da válvula de exaustão (°DPMS)	1

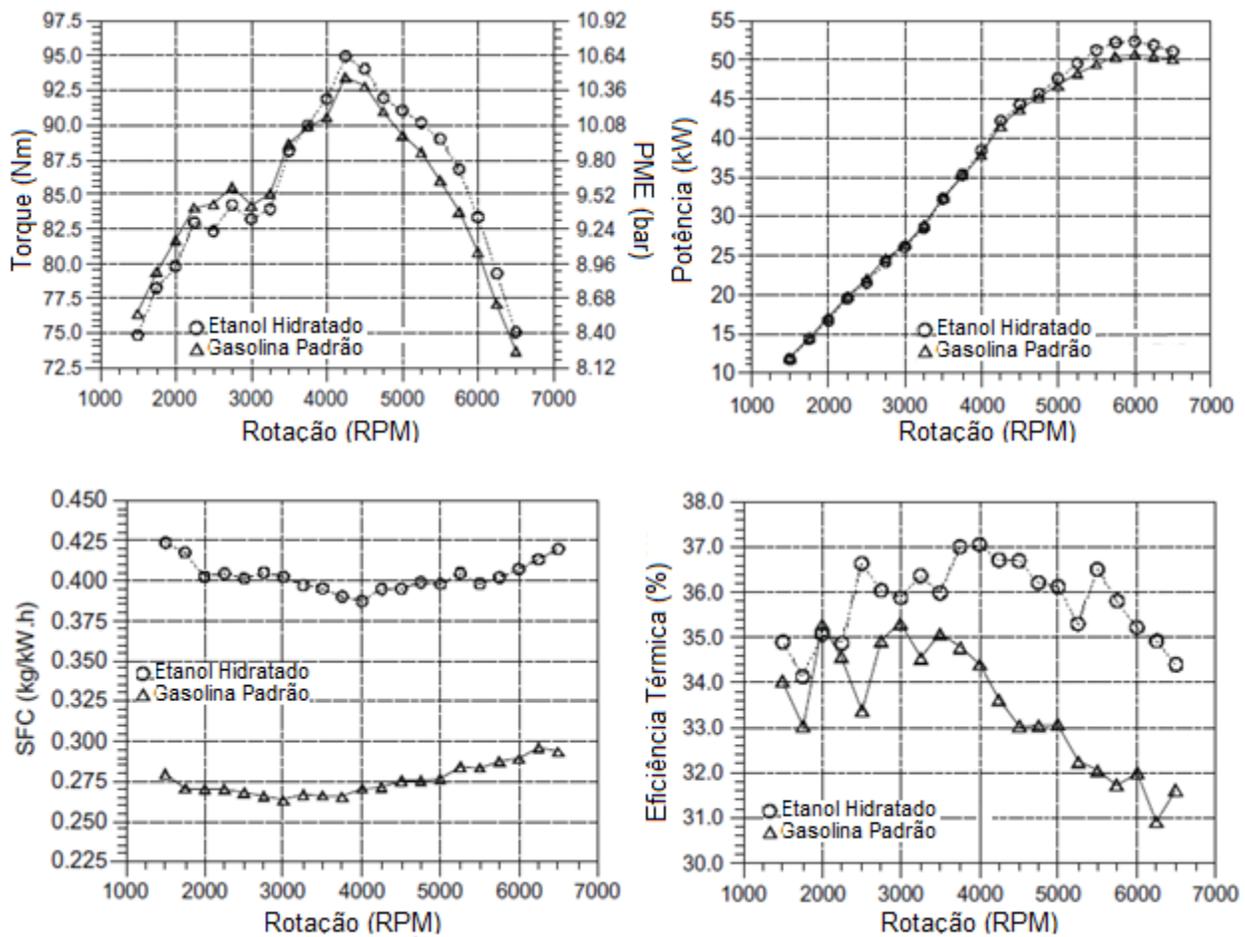


Figura 1.5. Resultados dos ensaios de Costa e Sodré. Fonte: Adaptado de COSTA, SODRÉ [8]

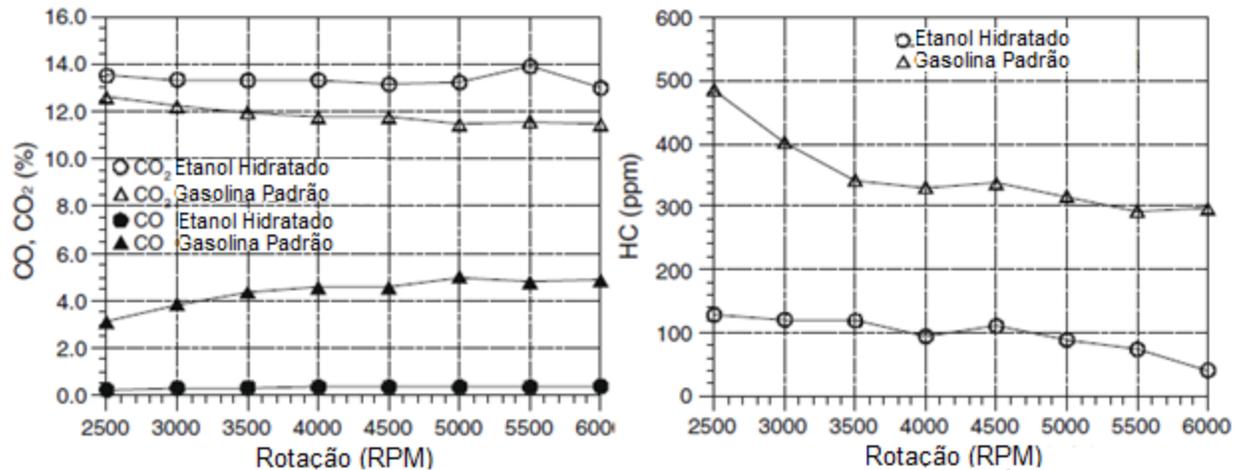


Figura 1.6. Resultados dos ensaios de Costa e Sodré
 Fonte: Adaptado de COSTA, SODRÉ [8]

1.3. O BANCO DE PROVAS DINAMOMÉTRICO

Na prática, estudar os efeitos do tipo de combustível no funcionamento de um MCI envolve o ensaio do mesmo em um ambiente controlado. Desta forma, somente através de um equipamento como um dinamômetro é possível ter a certeza sobre a validade das previsões teóricas. Um esquema de um banco de provas dinamométrico típico é apresentado na Fig. 1.7. Para que o projeto, construção e funcionamento do banco de provas ocorram de forma razoável e com uma boa relação custo-benefício, uma série de cuidados deve ser tomada para que os equipamentos envolvidos trabalhem dentro de uma faixa de operação recomendada e os ensaios forneçam os melhores resultados possíveis. A qualidade dos resultados no banco de provas é de alta importância, principalmente quando o objetivo a ser atingido é determinar alternativas que tornem o motor mais eficiente, uma vez que a diferença entre estes valores pode ser pequena.

1.3.1. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE UM DINAMÔMETRO

O Dinamômetro é o aparelho capaz de efetuar ensaios de funcionamento de motores de todos os tipos, garantindo uma medida exata de desempenho, bem como a medição da rotação [1]. Ao manter a rotação do eixo constante, têm-se da Mecânica Newtoniana que o torque resistivo deve possuir igual magnitude e sentido oposto em relação ao torque gerado pelo motor. Dessa forma, é simples verificar que o dinamômetro nada mais é do que uma ferramenta capaz de quantificar o torque gerado por um motor.

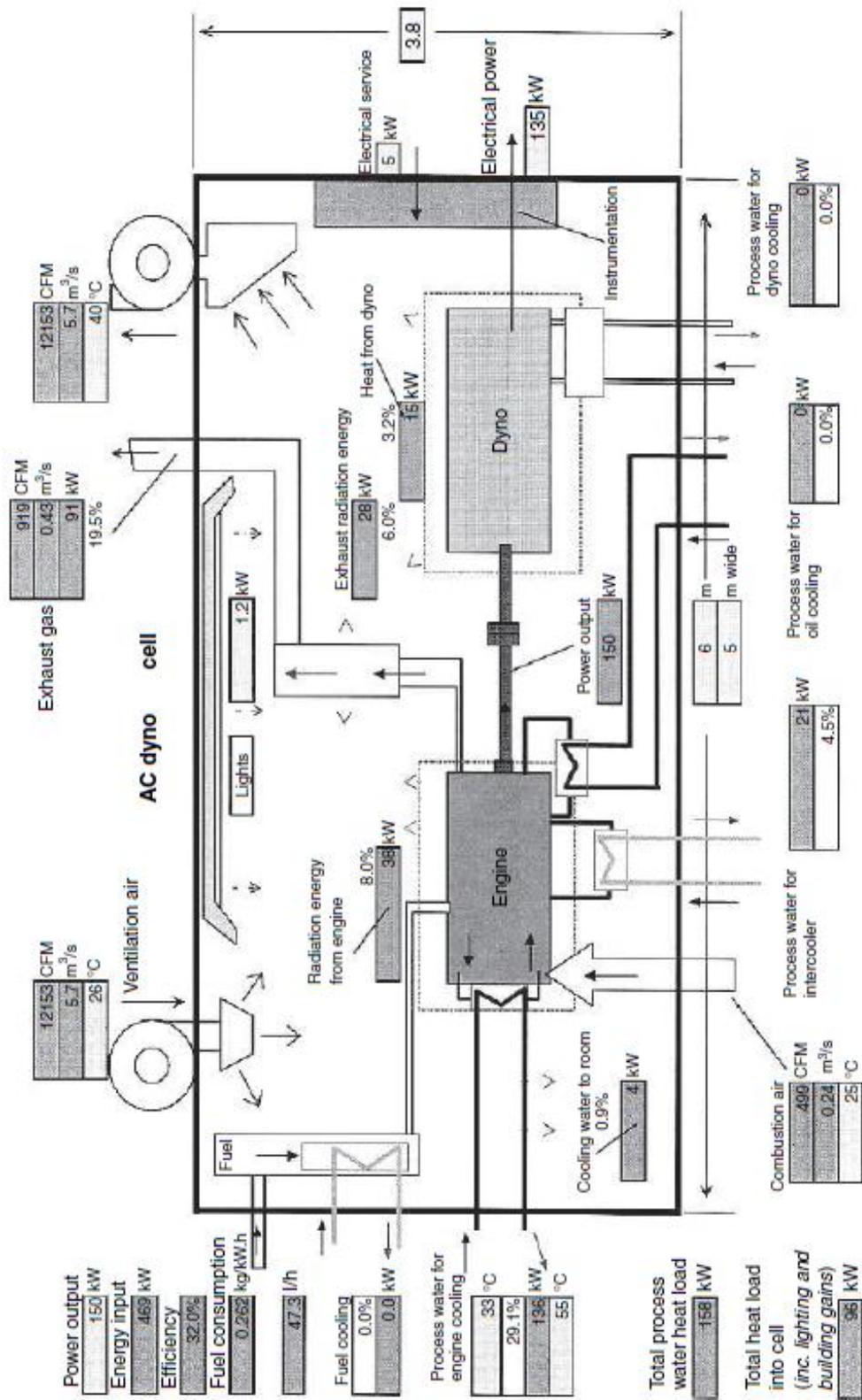


Figura 1.7. Esquema de um banco de provas dinâmométrico.
 Fonte: PLINT [3]

Um jeito simples de ilustrar este princípio é através do Freio de Prony, um dos primeiros modelos de dinamômetros construídos [3] cujo esquema é apresentado na Fig. 1.8. O produto entre o comprimento do braço de alavanca e a força aplicada no mesmo resulta no torque aplicado no próprio braço de alavanca, e o produto entre este torque resistivo e a rotação fornece a potência dissipada no eixo [12]:

$$T = Fb \quad (1.1)$$

$$\dot{W} = \frac{T\omega}{FC} \quad (1.2)$$

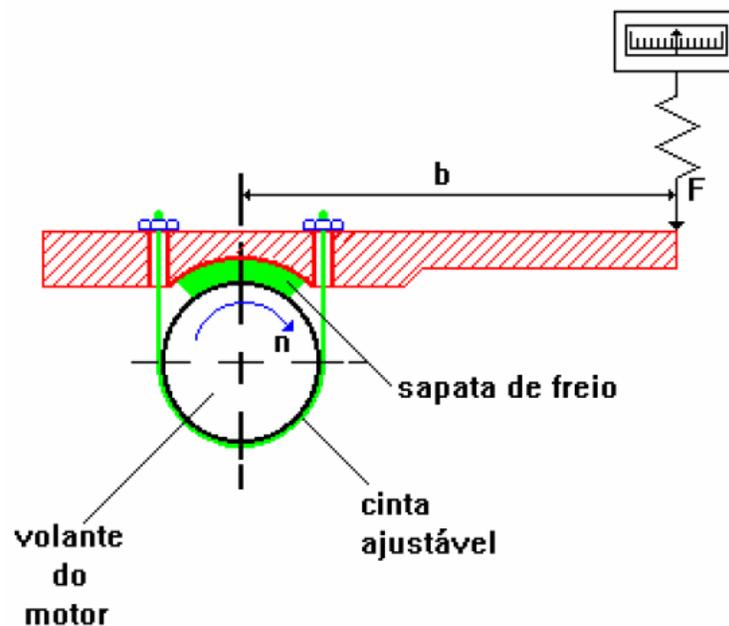


Figura 1.8. Freio de Prony
Fonte: JÚNIOR [12]

O valor do fator de conversão FC depende da unidade em que se deseja expressar a potência e seus valores podem ser encontrados na Tab. 1.4 tanto para as unidades utilizadas neste trabalho quanto para outras unidades típicas.

Tabela 1.4. Fatores de conversão para cálculo de potência
Fonte: JÚNIOR [12]

\dot{W}	T	ω	FC
<i>CV</i>	<i>kgf.m</i>	<i>RPM</i>	716.2
<i>HP</i>	<i>kgf.m</i>	<i>RPM</i>	726.2
<i>kW</i>	<i>N.m</i>	<i>RPM</i>	9549.0

A rigor, o dinamômetro é capaz de quantificar duas grandezas: A força aplicada na extremidade do braço de alavanca e a rotação do seu eixo, idêntica à rotação do MCI. Em outras palavras, os valores de Torque e Potência, que são os valores de maior interesse no ensaio de MCIs, são obtidos indiretamente, através das Eqs. (1.1) e (1.2). A grande variação no princípio construtivo dos Dinamômetros é o método utilizado para se aplicar este torque resistivo. A Fig. 1.9 apresenta um desenho esquemático de um dinamômetro, aonde também é possível observar o princípio de aferição da força aplicada no braço de alavanca.

O Dinamômetro a ser utilizado neste trabalho é do tipo elétrico de Corrente Parasita. Nestes, juntamente com outros tipos de Dinamômetros Elétricos, parte da potência no eixo pode ser transformada em energia elétrica, de modo a ser exportada para algum outro aparelho [3].

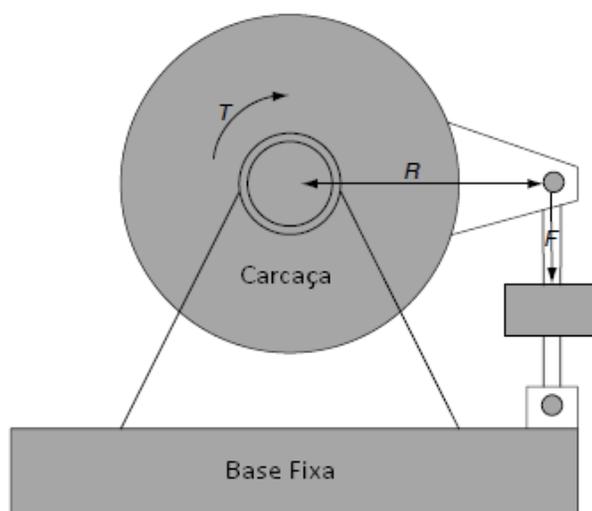


Figura 1.9. Princípio de aferição do torque do eixo do motor.
Fonte: PLINT [3]

1.3.2. CRITÉRIO DE ESCOLHA DO DINAMÔMETRO

Com uma rápida análise das informações presentes na literatura, é possível ter uma noção da aplicabilidade de certos tipos de dinamômetros. Entretanto, é essencial verificar a compatibilidade entre o MCI e o Dinamômetro de modo a garantir a compatibilidade entre os dois equipamentos. Os principais parâmetros que devem ser usados na seleção de um dinamômetro para um banco de provas são as curvas de torque e potência do mesmo, em função da faixa de rotação. Deve-se manter a atenção para alguns dos fatores que limitam estas curvas, como os valores máximos admitidos para torque, rotação e, portanto, potência. Estes valores devem ser até certo ponto superiores aos valores que regem o funcionamento do MCI. A Fig. 1.10 apresenta curvas típicas de dinamômetros elétricos.

A rigor, para um dinamômetro ser completamente capaz de ensaiar um MCI, é necessário que a curva deste último esteja dentro da região definida pela curva do próprio dinamômetro, como demonstrado na Fig. 1.11.

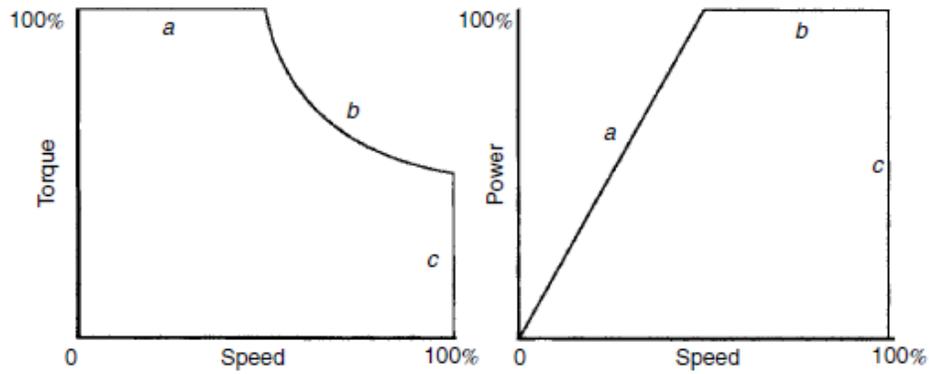


Figura 1.10. Curvas típicas de dinamômetros de corrente parasita.
 Fonte: PLINT [3]

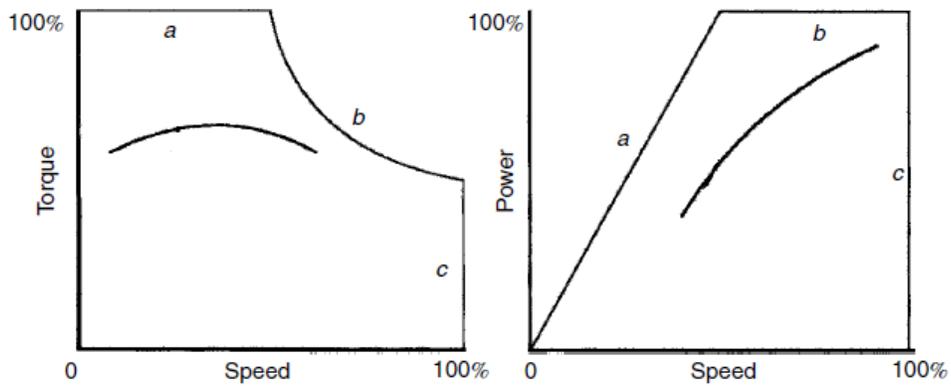


Figura 1.11. Resultado esperado na comparação entre uma curva típica de MCI com a curva de um dinamômetro. Fonte: Adaptado de PLINT [3]

2. APARATO EXPERIMENTAL

2.1. DINAMÔMETRO

O dinamômetro apresentado neste trabalho encontrava-se no depósito do Laboratório de Máquinas Térmicas (LMT) da COPPE/UFRJ (Fig. 2.1). Também foi encontrado no acervo do Laboratório o manual original do aparelho, junto com uma foto (Fig. 2.2) do Dinamômetro em operação no CENPES/PETROBRÁS.



Figura 2.1. Parte do dinamômetro encontrado no depósito do LMT.

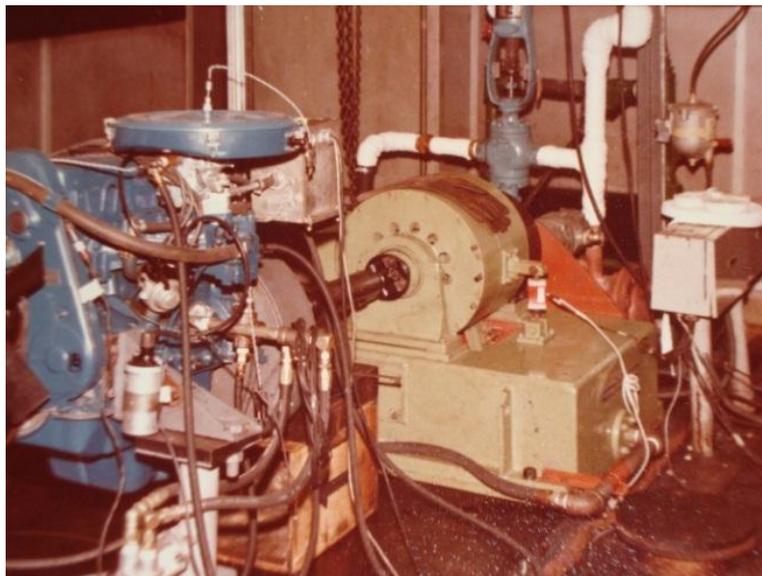


Figura 2.2. Dinamômetro em funcionamento no CENPES/PETROBRÁS
Fonte: Acervo LMT/COPPE

O Dinamômetro usado neste trabalho é o modelo I2D do fabricante Hofmann. Trata-se de um dinamômetro elétrico de corrente parasita, esquematizado na Fig. 2.3. Este, para aplicar o torque resistivo no rotor, utiliza-se de um campo magnético, gerado pela sua bobina. De acordo com o manual do fabricante [1], este dinamômetro possui limite de operação de 160kW (220CV)@9500RPM.

O dinamômetro foi encontrado desativado e desmontado, com necessidade de manutenção corretiva. Os detalhes deste processo estão detalhados no Capítulo 3.

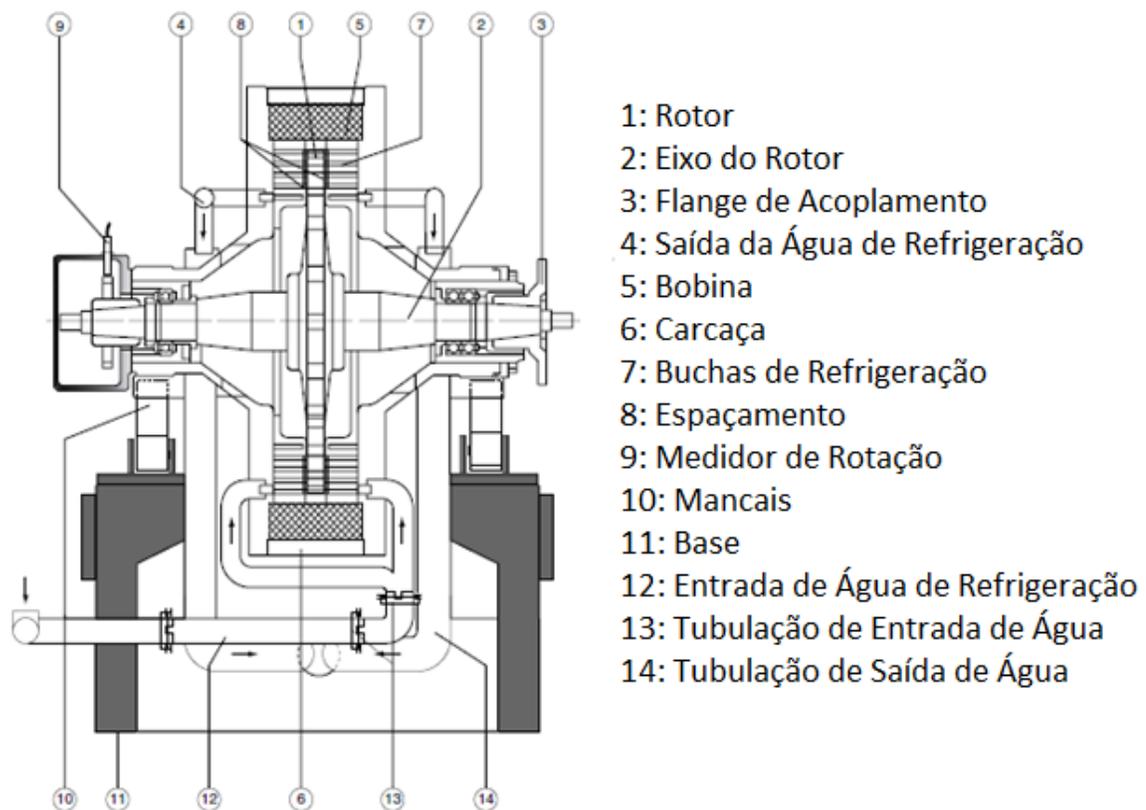


Figura 2.3. Dinamômetro de corrente parasita
 Fonte: Adaptado de PLINT [3]

De todos os elementos apresentados na Fig. 2.3, a bobina é, certamente, o coração do dinamômetro de corrente parasita, uma vez que é o elemento responsável por aplicar o torque resistivo ao eixo do motor. Deste modo, é necessário que ela se apresente em boas condições para que o dinamômetro seja capaz de funcionar apropriadamente. Ela também é responsável por praticamente todo o calor gerado no aparelho, que deve ser retirado pelo sistema de refrigeração, de modo que este tipo de dinamômetro requer um sistema de refrigeração adequado, para que se evite superaquecimento.

Seu funcionamento é simples quando observado do ponto de vista qualitativo. Ao excitar a bobina com certo valor de corrente contínua, forma-se um campo magnético e,

consequentemente, um fluxo magnético. Com o movimento do rotor, que é constituído de material condutor de eletricidade, este fluxo magnético sofre uma variação, induzindo o surgimento de corrente no rotor, conhecida como corrente induzida. Esta, por sua vez, tende a gerar outro campo magnético, desta vez de sentido oposto ao campo magnético original. O encontro destes dois campos magnéticos tem como resultado uma força e, consequentemente, um torque de carácter resistivo aplicado no rotor. A diferença entre os sentidos dos dois campos magnéticos pode ser verificada através da Eq. 2.1 (Lei de Lenz). [13,14]

$$\varepsilon = -N \frac{\partial \Phi_B}{\partial t} \quad (2.1)$$

Modelos matemáticos que relacionem a corrente de excitação ou o campo magnético da bobina com o torque resistivo de forma precisa não são simples e dependem de uma série de parâmetros. Além disso, o desconhecimento quantitativo da relação entre o torque resistivo e a corrente aplicada não impossibilita o ensaio de um motor de combustão interna, uma vez que o ajuste entre a corrente de excitação na bobina e a rotação desejada do motor pode ser realizado através de forma iterativa. [14]

2.2. MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA

O Laboratório tinha disponível, em sua oficina um MCI de ignição por centelha que também se encontrava desativado. A Tab. 2.1 apresenta a especificação técnica do motor. Na Fig. 2.4 é possível observar este MCI.

Tabela 2.1. Especificação Técnica do Motor
Fonte: COSME [11]

Modelo	Peugeot 1.6 16V
Nº Cilindros	4 em Linha
Nº Válvulas/Cilindro	4
Cilindrada Total	1587 cm ³
Potência Máxima	110CV@5750 RPM
Torque Máximo	15kgf.m@4000 RPM
Razão de Compressão	10.5
Sistema de Alimentação	Injeção Eletrônica Multiponto Sequencial
Diâmetro X Curso do Pistão	78.5 X 82 mm



Figura 2.4. Motor Peugeot 1.6 16 válvulas

2.3. VERIFICAÇÃO DA COMPATIBILIDADE ENTRE OS DOIS EQUIPAMENTOS

Para garantir que o dinamômetro seja completamente capaz de ensaiar o MCI descrito na seção anterior, deve-se verificar a relação entre as curvas de ambos os equipamentos. O método ideal para verificar isto é através da comparação entre as curvas de Potência e Torque do motor com as curvas de Potência e Torque do Dinamômetro, conforme a Fig. 1.14 [3]. Entretanto, este método nem sempre pode ser aplicado, pelo motivo de raramente se ter em mãos as quatro curvas citadas. Normalmente, se tem apenas a curva de Potência do Dinamômetro e os valores de Potência e Torque Máximos do MCI. Mas, apenas com estas informações, já é possível realizar uma estimativa satisfatória da compatibilidade, pelo seguinte método:

- Localizar o valor de Potência Máxima do MCI na curva de Potência do Dinamômetro.
- Calcular o valor de Potência desenvolvida no ponto de Torque Máximo, conhecida como a Potência de Torque Máximo.
- Localizar o valor da Potência de Torque Máximo na curva de Potência do Dinamômetro.
- Verificar o posicionamento desses dois pontos na curva de potência.

De posse dos dados do MCI, resta determinar a Potência de Torque Máximo, lembrando que, para este ponto, $T = 15\text{kgf.m}$ e $\omega = 4000\text{RPM}$. Passando para unidades do SI, obtém-se:

$$\tau = 15\text{kgfm} \frac{9.81\text{m}}{\text{s}^2} = 147.15 \text{ Nm} \quad (2.2)$$

$$\omega = 4000RPM = 4000 \frac{2\pi \text{ rad}}{60s} = 418.88 \text{ rad/s} \quad (2.3)$$

Logo:

$$\dot{W} = (147.15Nm) \left(418.88 \frac{\text{rad}}{s} \right) = 61.64kW \quad (2.4)$$

Através da relação $1CV = 0.7358kW$, é possível determinar a potência em Cavalos-Vapor (CV):

$$\dot{W} = 61.64kW = 83.77CV \quad (2.5)$$

Assim, têm-se dois pontos pertencentes à curva de potência do motor, mostrados na Tab. 2.2, a seguir:

Tabela 2.2. Valores para verificação de compatibilidade.

A	Potência Máxima	80.94 kW(110 CV) @ 5750 RPM
B	Potência de Torque Máximo	61.64 kW (83.77 CV) @ 4000 RPM

Colocando estes pontos na curva do Dinamômetro, é possível verificar, de forma aproximada, a compatibilidade entre os equipamentos, demonstrada na Fig. 2.5, sendo possível afirmar se o Dinamômetro e MCI selecionados são compatíveis e podem ser usados no projeto de um banco de provas. A curva completa do dinamômetro com os pontos A e B pode ser observada no Anexo A1.

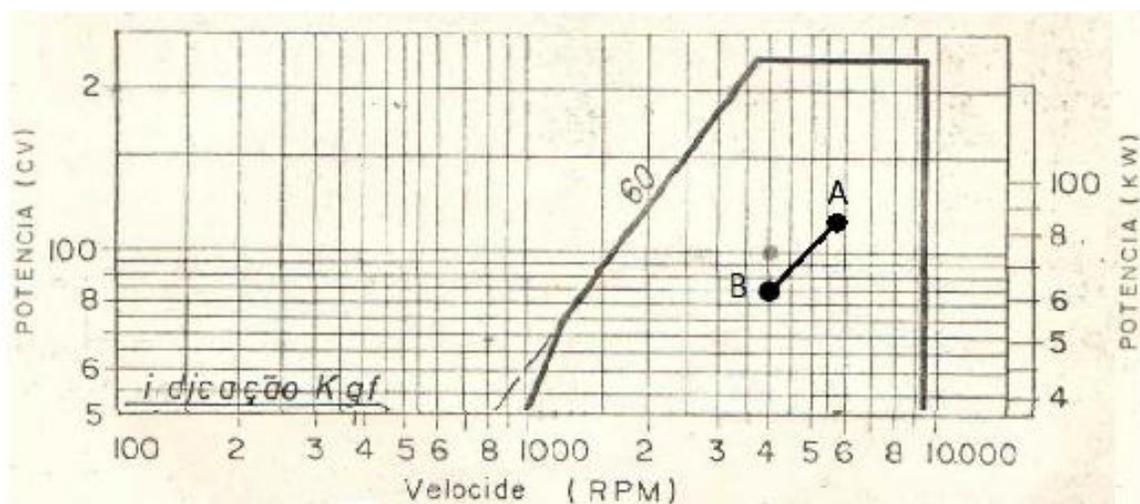


Figura 2.5. Verificação da Compatibilidade entre o Dinamômetro e o MCI.

3. MANUTENÇÃO CORRETIVA DOS EQUIPAMENTOS

3.1. DINAMÔMETRO

3.1.1. LEVANTAMENTO INICIAL

O levantamento feito a respeito do Dinamômetro consistiu na contagem e avaliação das peças, utilizando como base a listagem fornecida pelo fabricante [1]. Deste levantamento, são destacados os seguintes fatos:

- Os dois pares de rolamentos não foram encontrados.
- Das duas buchas de refrigeração, apenas uma foi encontrada e encontrava-se inutilizada, devido ao excesso de corrosão.
- Toda a parte do Sistema de Aquisição de Dados encontrava-se inutilizada.
- Algumas peças possuíam acúmulo de ferrugem, o que causava interferência excessiva e impossibilitava qualquer tentativa de montagem.
- Apenas um dos quatro anéis de vedação foi encontrado.

As buchas de refrigeração desempenham papel fundamental no funcionamento do dinamômetro, dissipando o calor gerado pela bobina durante seu funcionamento. Além de, no levantamento inicial, só ter sido encontrada uma das duas buchas existentes, esta apresentou sérios sinais de desgaste, como pode ser observado na Fig. 3.1. A Fig. 3.2 mostra, em detalhe, um furo encontrado na bucha devido à corrosão. Foi decidido, então, fabricar novas buchas de refrigeração. O material utilizado foi o mesmo da peça original, o Ferro Fundido.

3.1.2. FABRICAÇÃO DE NOVAS BUCHAS DE REFRIGERAÇÃO



Figura 3.1. Bucha de refrigeração original



Figura 3.2. Furo na bucha causado por corrosão

Tendo em vista a geometria complexa da peça em questão, a produção de novas buchas precisou ser dividida em etapas, envolvendo diferentes processos de fabricação.

- Dimensionamento e Desenho no software AutoCAD.
- Confecção de um Bruto de Fundição.
- Fundição.
- Usinagem.
- Acabamento.

Neste ponto do trabalho, deve-se ressaltar a dificuldade em se encontrar fundições que trabalhassem com Ferro Fundido Cinzento e fabricassem o bruto de fundição de acordo com o desenho desejado: Das fundições pesquisadas, apenas uma atendeu a estes critérios. Entretanto, devido à impossibilidade de se obter informações a respeito da qualidade do serviço feito pela empresa, optou-se por uma quantidade excessiva de sobremetal, de modo a evitar eventuais problemas com o bruto, por conta de possíveis falhas no processo de fabricação. Durante o processo de usinagem constatou-se que a peça, de fato, apresentou elevados níveis de excentricidade, que puderam ser sanados sem risco de comprometer a peça. Na Fig. 3.3 são apresentados os resultados obtidos nas etapas de Usinagem e Acabamento das buchas de refrigeração. O processo de usinagem não se limitou a garantir que a bucha tenha as dimensões especificadas. Juntamente com o processo de acabamento, a usinagem teve como objetivo adicional a confecção do percurso da água de refrigeração, de modo a garantir que este esteja semelhante ao da peça original.



Figura 3.3. Usinagem e acabamento das Buchas de Refrigeração.

3.1.3. MODIFICAÇÃO DO CIRCUITO DE REFRIGERAÇÃO À AGUA

Tendo como base as recomendações do manual, junto com as próprias observações dos danos ocorridos às buchas de refrigeração, entende-se que a água a ser usada no processo de resfriamento do dinamômetro deve ser controlada não apenas termicamente, mas também quimicamente. Deve-se tomar um cuidado especial com possíveis agentes que acelerem o processo de corrosão das buchas, de modo que é necessário garantir que os elementos envolvidos no circuito de água de refrigeração estejam em condições adequadas para garantir a integridade do equipamento.

Foi feito, então, um estudo do percurso que a água de refrigeração percorre dentro do dinamômetro. O circuito original, em grande parte, se encontra na parte interna da base do aparelho. Através de uma boroscopia, demonstrada na Fig. 3.4, realizada na base do dinamômetro, verificou-se que esta região apresentava uma concentração excessiva de oxidação, o que prejudicaria o tratamento da água de refrigeração. A dificuldade de acesso às regiões internas da base fez com que uma tentativa de limpeza manual fosse descartada. A circulação de água no equipamento com agentes químicos para combater a oxidação também

foi cogitada, mas esta alternativa foi descartada por não garantir nada em termos de novos acúmulos em longo prazo.

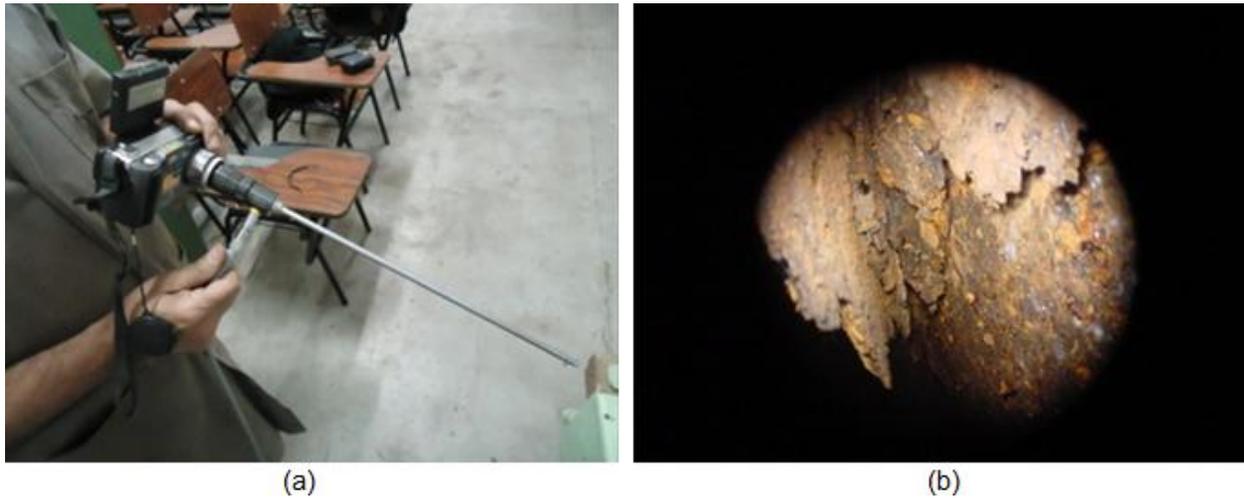


Figura 3.4. Máquina fotográfica equipada com boroscópio (a) e parte interna da carcaça do dinamômetro (b).

A solução adotada envolveu a alteração do circuito da água de refrigeração do aparelho, de modo a evitar ao máximo o contato da água com a parte interna do dinamômetro e é apresentada, junto com o esquema original na Fig. 3.5.

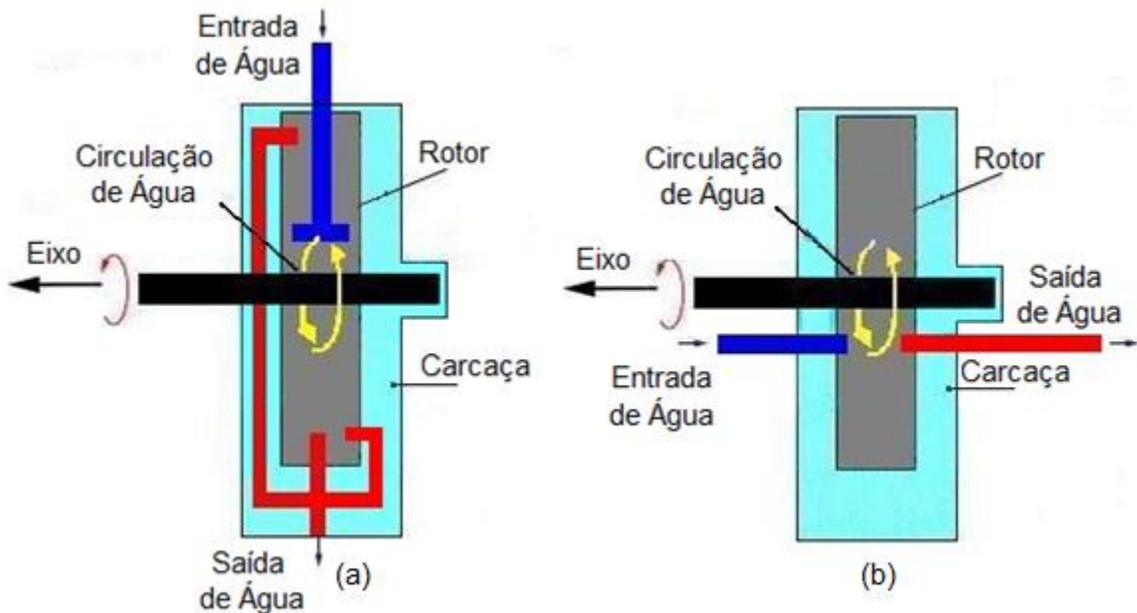


Figura 3.5. Esquema de circulação de água: Original (a) e Modificado (b).

Neste novo esquema de circulação, o contato da água com qualquer superfície do dinamômetro é mínimo, uma vez que a água não percorre mais as câmaras internas da base. Isto reduz consideravelmente a necessidade de preocupação com qualquer sinal de oxidação.

O procedimento de modificação foi feito com o auxílio de uma mandriladora, disponibilizada pelo Laboratório de Tecnologia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRJ (LTM). A Fig. 3.6 apresenta o a base do dinamômetro original e após as modificações. Com a remoção dos coletores originais e a inclusão de uma nova saída através de um duto circular, não há contato entre a água e a parte interna da carcaça.

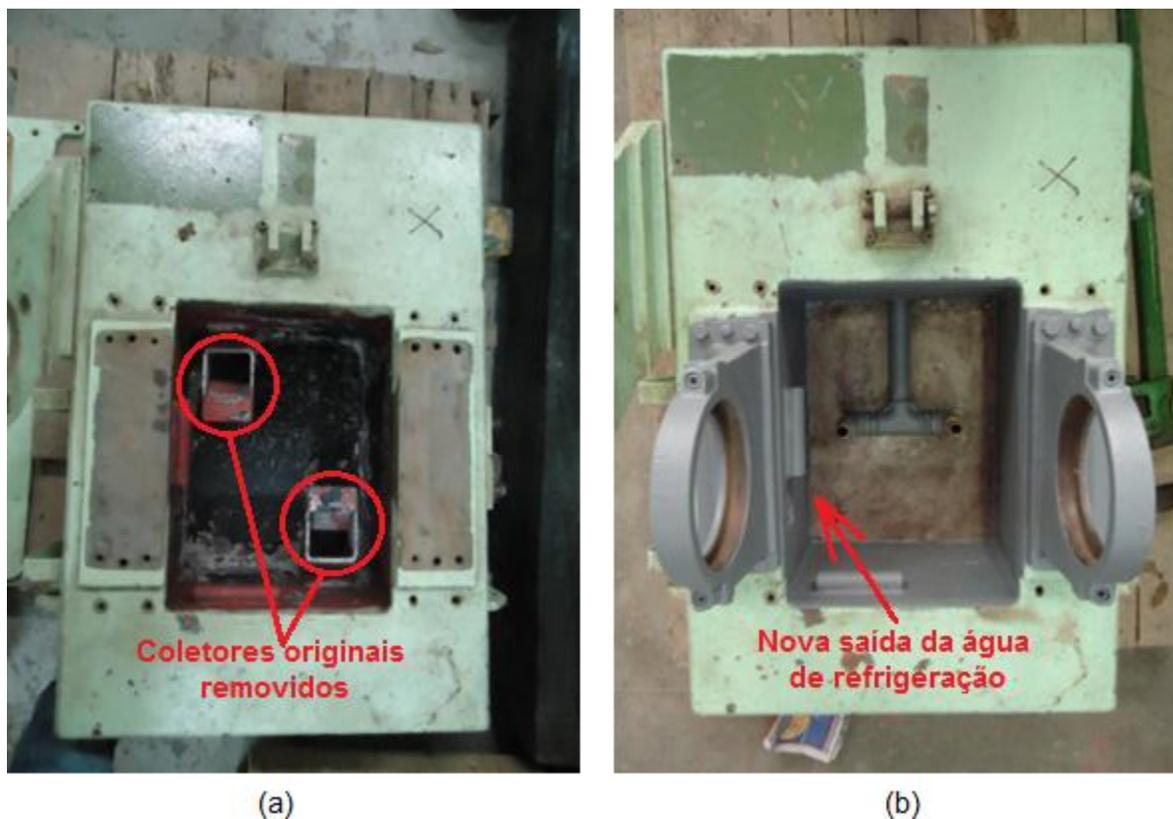


Figura 3.6. Base do Dinamômetro: Original (a) e Modificada (b).

3.1.4. SUBSTITUIÇÃO DE COMPONENTES PADRONIZADOS

Com exceção das buchas de refrigeração, todos os demais componentes do dinamômetro que necessitaram ser substituídos são padronizados, de modo que os novos componentes possuem a mesma especificação dos componentes antigos.

Os anéis de vedação do dinamômetro são responsáveis por evitar que a água de refrigeração vaze da câmara de refrigeração e danifique a bobina. Eles ficam fixos juntos à própria câmara e são especificados pelo próprio manual do aparelho. Estes anéis foram devidamente substituídos e instalados nas buchas de refrigeração. Foram utilizados 2 pares de anéis de vedação do fabricante Parker, um par modelo 2-377N0674-70 e o outro par 2-378N0674-70

Os dois pares novos de rolamentos foram adquiridos de acordo com as especificações encontradas no manual do aparelho. Ressalta-se que um dos pares de rolamento (DIN16021), além de ser de um tamanho não convencional para os revendedores, trabalha apenas para estabilizar a carcaça, não lhe sendo exigido um alto desempenho. Para este par de rolamentos, optou-se por marcas de preços mais baixos, visando reduzir o custo total dos componentes. O outro par de rolamentos (DIN6209), entretanto, opera em condições mais críticas e foram selecionados rolamentos de alto desempenho (marca NSK).

O processo de montagem mecânica do dinamômetro começou com a instalação dos pares de rolamentos e com o encaixe do rotor no núcleo (Fig. 3.7). Já na Fig. 3.8 possível observar o núcleo dinamômetro completamente montado, juntamente com o flange de acoplamento, a roda dentada do contador de rotações e o rolamento externo na proximidade da ponta do eixo.



Figura 3.7. Núcleo do dinamômetro com rotor exposto.



Figura 3.8. Núcleo do dinamômetro montado.

3.1.5. DIAGNÓSTICO DA BOBINA

Para verificar o estado de funcionamento da bobina, esta foi ligada a uma fonte de corrente modelo FA-3050, fabricante Instrutherm (Fig. 3.9). Para diferentes valores de corrente, foram observados torques resistivos distintos, confirmando o bom estado de funcionamento da bobina. A corrente e voltagem máxima na bobina especificadas pelo fabricante são 58V e 10A. Esta fonte foi instalada na sala de controle do banco de provas para também ser usada para frear o motor durante os testes.

A fonte de corrente utilizada neste trabalho possui dois canais, cada um capaz de alimentar um circuito em até 5A. Tendo em vista que a corrente máxima especificada para a bobina é de 10A e os dois canais da fonte de corrente podem trabalhar em série, é necessário verificar o valor de corrente mínima necessária para garantir a frenagem completa do motor. Como citado anteriormente, modelos matemáticos envolvendo os parâmetros de interesse costumam ser complicados e restritos a certas faixas de rotação. Entretanto, uma relação razoavelmente simples [14] pode ajudar a verificar a corrente de excitação necessária para a frenagem do motor especificado para este trabalho, apresentada na Eq. 3.1.

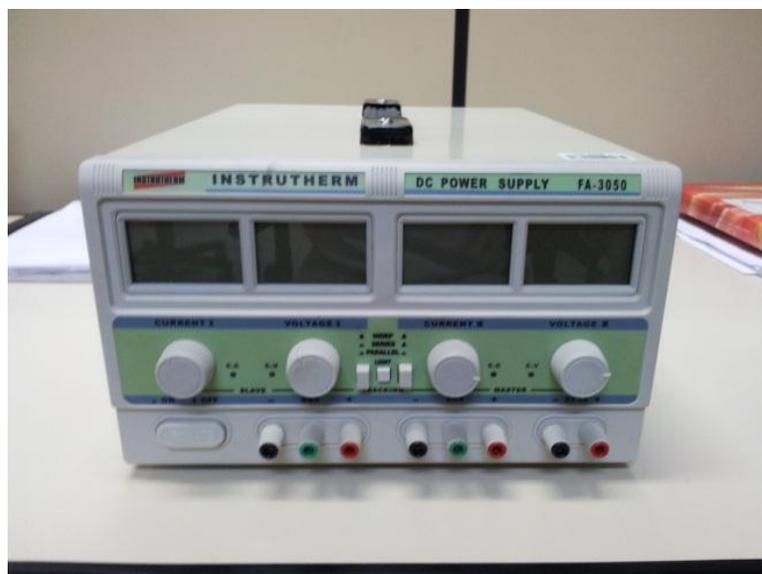


Figura 3.9. Fonte de Corrente Instrutherm FA-3050

$$\dot{W} = K \frac{\omega^2 i^2}{\rho} \quad (3.1)$$

Supondo que o valor de 10A esteja especificado para frear o eixo do dinamômetro na condição de torque máximo do aparelho, 42.972kgf.m [1], nota-se que uma corrente de 5A está limitada à frenagem de, no máximo, 10.743kgf.m. Este valor, entretanto, é menor que o valor do torque máximo do MCI. Desta forma, para que um ensaio adequado possa ser realizado, a fonte de corrente foi instalada utilizando seus dois canais, ligados em série.

3.2. O MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA

O MCI selecionado para este projeto foi encontrado em bom estado de conservação. Entretanto, por conta de um problema na central eletrônica, não era possível dar partida no motor. Equipamentos eletrônicos deste tipo são muito complexos e seu reparo foi considerado fora do escopo do presente Projeto. Entretanto, o motor foi enviado ao Núcleo Automotivo do SENAI Tijuca, que se prontificou a resolver esta questão, uma vez que possui pessoal técnico e contato com o fabricante do motor para este fim. Até a conclusão deste texto, o motor não retornou às Instalações do Laboratório de Máquinas Térmicas.

4. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

O Dinamômetro, originalmente, apresentava um sistema de aquisição de dados próprio para levantamento de Torque, Rotação e Potência, assim como monitoramento de outras variáveis de interesse. Devido ao estado deste sistema e à ideia de desenvolver um banco de provas com os ensaios controlados via software, optou-se por especificar um sistema de aquisição de dados que permita integração com o Software LabVIEW, da National Instruments. Desta forma, não haveria a necessidade de recuperar a parte eletrônica do Dinamômetro, substituindo-a por um sistema de aquisição mais moderno.

4.1. SENSORES ORIGINAIS DO DINAMÔMETRO

Os sensores utilizados originalmente no aparelho envolviam células de carga, sensores de rotação magnéticos e termopares. Destes, foi encontrada apenas a célula de carga e a roda dentada do sensor de rotação. Tentou-se, então, verificar o funcionamento da célula de carga. Foi montado um experimento simples (Fig. 4.1), na oficina do LMT, para verificar se o sensor apresentava qualquer tipo de resposta. Os resultados do experimento foram inconclusivos, possivelmente pela falta de resolução dos aparelhos envolvidos na leitura do sensor (Células de carga apresentam tensão de saída na ordem de milivolts [mV]). Desta forma, objetivando um diagnóstico preciso da célula de carga, foi feito um ensaio no Laboratório de Ensaios Dinâmicos e Análise de Vibração da COPPE (LEDAV), que constatou o mau-funcionamento do sensor.

4.2. EQUIPAMENTOS DISPONÍVEIS

Antes de especificar o novo sistema de aquisição de dados, foi feito um levantamento dos equipamentos disponíveis nas dependências do LMT para utilização no banco de provas. Um Sistema de Aquisição simples é ilustrado no diagrama da Fig. 4.2. Devido a trabalhos anteriores realizados no LMT, há a disponibilidade do Software LabVIEW versão 8.2, juntamente com uma placa de aquisição da National Instruments, modelo NI-4351. Assim, foi necessário adquirir o bloco terminal e os sensores. Além dos sensores de torque e rotação, também foram adquiridos e instalados termopares para medições tanto no MCI quanto no próprio Dinamômetro.

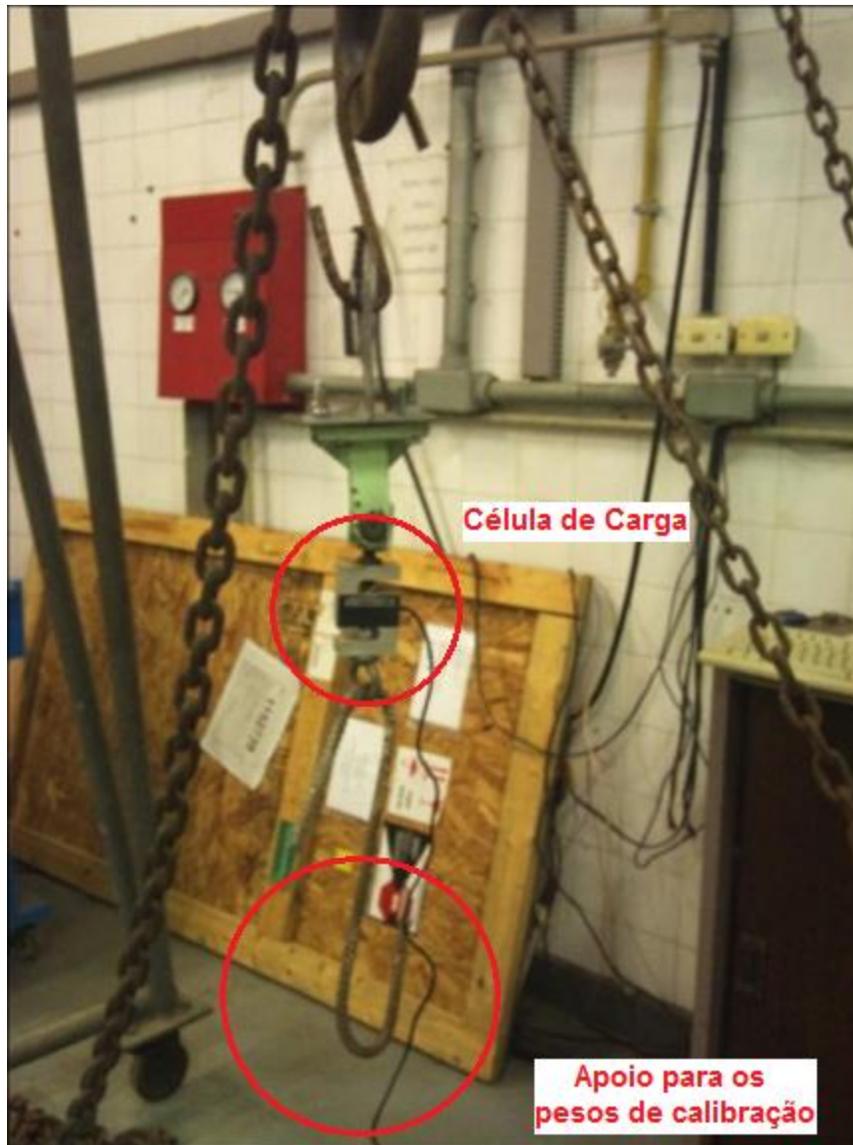


Figura 4.1. Experimento para avaliação do funcionamento da célula de carga



Figura 4.2. Diagrama básico dos componentes de um sistema de aquisição de dados. [15]

4.3. ESPECIFICAÇÃO DOS NOVOS SENSORES

4.3.1. CÉLULA DE CARGA

A especificação de uma célula de carga, de uma maneira simplificada, envolve a determinação da maior força que será sofrida por ela [16]. A carcaça do Dinamômetro é acoplada à célula de carga através de um braço de comprimento 286.5 mm [1]. Para o motor deste trabalho cujo torque máximo, de acordo com a Tab. 2.1, é de 15kgfm, a carga máxima na célula de carga seria:

$$F = \frac{15kgfm}{0.2865m} = 52.3 kgf,$$

As menores Células de Carga comerciais que atendem a este serviço, dentre os modelos mais comuns, são as de 100kgf. Escolher uma célula de carga com este limite garante, inclusive, que ela trabalhará sempre com folga, promovendo um aumento de sua vida útil. Deste modo, a célula de carga especificada para o banco de provas foi uma célula de carga modelo CSA-ZL100 da fabricante MK Controle e Instrumentação, apresentada na Fig. 4.3. As especificações técnicas encontram-se na Tab. 4.1



Figura 4.3. Célula de Carga MK CSA/ZL-100

Tabela 4.1. Especificações técnicas da célula de carga CSA-ZL100
 Fonte: MK Instrumentação e Controle

Sensibilidade Nominal	2.0 mv/v
Balanco Zero	± 1%
Repetibilidade	0.02 %
Erro de Fluência (20 minutos)	0.03 %
Efeito da Temperatura no Zero	0.002% °C
Efeito de Temperatura na Sensibilidade	0.002% °C
Temperatura de Operação	-10°C a + 80°C
Compensação de Temperatura	-10°C a + 50°C
Impedância de Entrada (25°C)	Chms 380 ± 30
Impedância de Saída (25°C)	Chms 350 ± 3
Resistência de Isolação	Mohm > 5.000
Tensão de Excitação	10V DC/AC
Tensão de Excitação Máxima	15V DC/AC
Material	Alumínio

Células de Carga apresentam como resposta a um estímulo de tração/compressão uma tensão, tipicamente na ordem de mV, que apresentam certa dificuldade na hora de serem quantificadas por um sistema de aquisição de dados. Deste modo, a célula foi conectada a um condicionador de sinais, modelo TC-05 da fabricante MK Instrumentação, com o objetivo de amplificar o valor de tensão deste sinal para uma ordem de grandeza adequada ao sistema de aquisição. O Condicionador de Sinais é mostrado em detalhe na Fig. 4.4 e suas especificações técnicas são apresentadas na Tab. 4.2. Tanto a célula de carga quanto o condicionador de sinais foram adquiridos especificamente para este projeto.



Figura 4.4. Condicionador de Sinais MK TC-05

Tabela 4.2. Especificações técnicas do Condicionador de Sinais MK TC-05
 Fonte: MK Instrumentação e Controle

Sinal de entrada	+/- 30mVcc
Temperatura de Operação	0 ~ 60°C / 20 ~ 90% UR
Impedância de saída	+/- 1K ohm
Tempo de resposta padrão	50ms
Alimentação	110/220Vac - 50/60Hz
Fonte Isolada p/ célula de carga	10Vcc / 200mA – (entre os bornes 1 e 2)
Sinalização	Led energizado
Sinal de saída	0 ~ 20mA / 4 ~ 20mA, 0 ~ 5Vcc, 0 ~ 10Vcc
Grau de proteção	IP40 (no frontal)
Interferência por	RF Rádio / celular @ 0,5m < 0,1% FS

4.3.2. SENSOR DE ROTAÇÃO

A medição de rotação do Dinamômetro é feita através de um conjunto roda dentada e sensor pick-up magnético, que pode ser observado no desenho do Dinamômetro, em detalhe na Fig. 4.5. A especificação deste sensor, dentro do escopo deste trabalho, consistiu em determinar a máxima frequência de operação necessária para este sensor. A roda dentada do Dinamômetro contém 60 dentes e a frequência do sinal de saída do sensor é diretamente proporcional à rotação do eixo do motor e pode ser expressa na seguinte forma:

$$f[Hz] = \left(\omega \left[\frac{Rev}{Min} \right] \right) \left(60 \frac{dentes}{Rev} \right) \quad (4.1)$$

$$f[Hz] = \omega[RPM] \quad (4.2)$$

Observando a Fig. 2.5, nota-se que a rotação máxima do Dinamômetro encontra-se próxima de 10000RPM. Desta forma, qualquer pick-up magnético cuja faixa de certificação inclua frequências até 10kHz é considerado adequado para uso no banco de provas deste trabalho. O Sensor selecionado para realizar este trabalho foi o sensor SP02-5 8G1SM 80 da DLG Automação, cuja frequência máxima de operação é, justamente, 10kHz e é apresentado na Fig. 4.5. As especificações técnicas são apresentadas na Tab. 4.3.



Figura 4.5. Sensor Pick-Up Magnético DLG SP02-5 8G1SM/80

Tabela 4.3. Especificações técnicas do Pick-Up Magnético DLG SP02-5 8G1SM/80
Fonte: DLG Automação

Máxima tensão de saída carga 100K	10 Vpp
Frequência mínima de comutação	2Hz
Frequência máxima de comutação	10000Hz
Distância de Comutação	2mm

O método mais simples para obter a frequência do sinal do pick-up magnético (e, assim, a rotação do motor) é através da Transformada Rápida de Fourier (FFT). Entretanto, a utilização desta técnica requer um sistema de aquisição de dados com taxa de aquisição de, pelo menos, o dobro da frequência que se deseja medir. Considerando que a faixa de rotações do MCI vai até, aproximadamente, 7000RPM (gerando um sinal de 7 kHz) e que o sistema disponível para este trabalho tem taxa de aquisição máxima de 60 Hz, o uso desta técnica não traria nenhum resultado significativo. Uma alternativa para isto é utilizar um condicionador de sinais para o sensor pick-up magnético, que relaciona a frequência do sinal de entrada (sinal do pick-up) com um sinal de corrente contínua, que pode ser lida pelo sistema de aquisição. O condicionador utilizado, modelo XM-100 do fabricante DLG, é apresentado na Fig. 4.6. As especificações técnicas deste equipamento encontram-se na Tab. 4.4.



Figura 4.6. Condicionador de sinais para pick-up magnético DLG XM-100
 Fonte: DLG Automação

Tabela 4.4. Especificações técnicas do condicionador DLG XM-100
 Fonte: DLG Automação

Consumo	2.4 VA
Isolação	Galvânica entre entrada e saída – 1500 Vrms
Alimentação	127/220 Vac 50/60 Hz
Temperatura de operação	Entre -10 e 60 °C
Grau de proteção	IP-30

4.3.3. TERMOPARES

Para um bom aproveitamento e funcionamento do banco de provas, desejou-se medir certo número de valores de temperatura, através de termopares do tipo J e K, como os da Fig. 4.7. São estes:

- Entrada e Saída de Água de Refrigeração do Dinamômetro
- Entrada e Saída de Água de Refrigeração do Motor
- Admissão de Ar e de Combustível
- Óleo do Motor
- Descarga dos Gases de Combustão
- Temperatura Ambiente



Figura 4.7. Termopares de haste e de multímetro utilizados no banco de provas

É sabido que a faixa de operação dos termopares J abrange temperaturas entre -40°C e 750°C , enquanto no caso dos termopares do tipo K esta faixa abrange temperaturas entre -40°C e 1200°C [16]. À exceção da temperatura de descarga dos gases de combustão, todas as temperaturas que se desejou medir neste trabalho encontram-se em faixas onde os termopares trabalham com folga. Para esta temperatura, a alocação de um termopar do tipo K ao invés de um termopar do tipo J resultaria em uma operação com uma faixa de segurança maior. Levando em consideração também a disponibilidade de termopares no LMT, as medições foram distribuídas de acordo com a Tab.4.5:

Tabela 4.5. Distribuição das medições de temperatura por tipo de termopar

Tipo de Termopar	Temperatura medida
J (Haste)	Entrada e Saída de Água do Dinamômetro, Descarga dos gases de combustão
K (Haste)	Entrada e Saída de Água do MCI
K (Multímetro)	Temperatura Ambiente, Óleo do MCI, Admissão de Ar e Combustível

Todos os termopares utilizados neste trabalho foram testados através da submersão dos mesmos em uma mistura de água e gelo que, em equilíbrio e à pressão atmosférica, encontram-se na temperatura de 0°C . Nenhum dos termopares registrou uma diferença maior do que 0.5°C em relação ao valor esperado. Como até o fechamento deste projeto, o motor não retornou ao LMT, foram instalados apenas os termopares referentes à monitoração da temperatura da água de refrigeração do dinamômetro.

4.3.4. BLOCO TERMINAL

Este equipamento tem como objetivo receber os sinais de todos os sensores conectados ao conjunto Motor-Dinamômetro e enviá-los para a placa de aquisição de dados. Foi escolhido o Terminal CB-68T da National Instruments (Fig.4.8), levando em consideração a compatibilidade deste equipamento com a placa de aquisição disponível no Laboratório. As especificações técnicas do bloco terminal encontram-se na Tab. 4.6.



Figura 4.8. Bloco Terminal National Instruments CB-68T

Tabela 4.6. Especificações técnicas do bloco terminal NI CB-68T

Precisão do sensor de compensação de junta fria	$0.06^{\circ}C$ entre $(15.0; 35.0)^{\circ}C$ $0.2^{\circ}C$ entre $(0.0; 15.0)^{\circ}C$ e $(35.0; 55.0)^{\circ}C$
Precisão Isotérmica	$0.1^{\circ}C$
Tensão Máxima de funcionamento	42V

4.4. INSTALAÇÃO DOS NOVOS SENSORES NO DINAMÔMETRO

A célula de carga e o pick-up magnético foram substituídos pelos novos sensores das Figs. 4.3 e 4.5. A instalação ocorreu sem problemas, devido ao fato de tais equipamentos serem intercambiáveis. Um cuidado especial que foi necessário nesta etapa do trabalho foi obedecer à especificação de distância mínima entre a roda dentada e o pick-up magnético (0.5mm), especificada pelo fabricante. A instalação destes sensores é mostrada na Figs. 4.9 e 4.10.

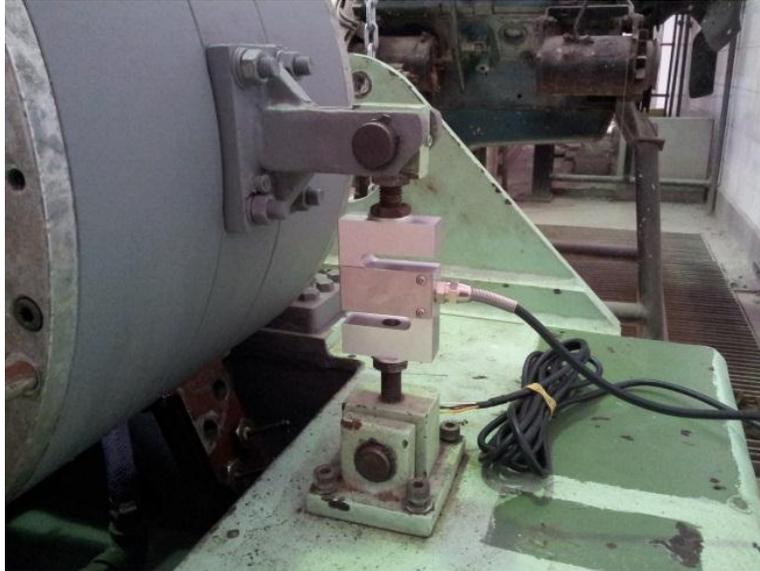


Figura 4.9. Instalação da célula de carga no dinamômetro

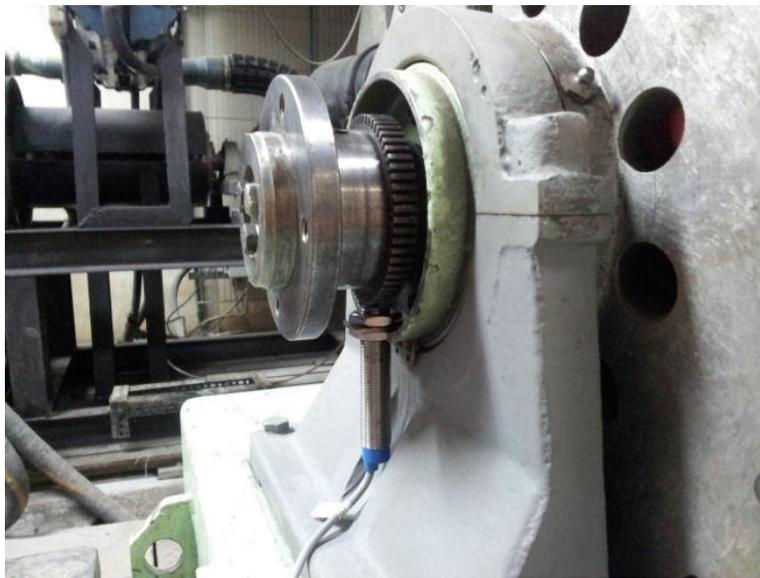


Figura 4.10. Instalação do pick-up magnético no dinamômetro

5. RESULTADOS

5.1. DINAMÔMETRO RECUPERADO E INSTALAÇÃO NO BANCO DE PROVAS

No que diz respeito ao Dinamômetro, todos os itens comentados no Cap. 3 foram atendidos satisfatoriamente. O encaixe das buchas de refrigeração, comentadas na Seç. 3.1.2, ocorreu de forma adequada, indicando que a fabricação das mesmas foi bem-sucedida. A Fig. 5.1 mostra a bucha antiga junto com a bucha nova. Após a substituição de todos os componentes mecânicos que se encontravam danificados, o dinamômetro foi instalado em um dos bancos de provas do LMT, como pode ser observado na Fig. 5.2.



Figura 5.1. Comparação entre as buchas de refrigeração original e nova.

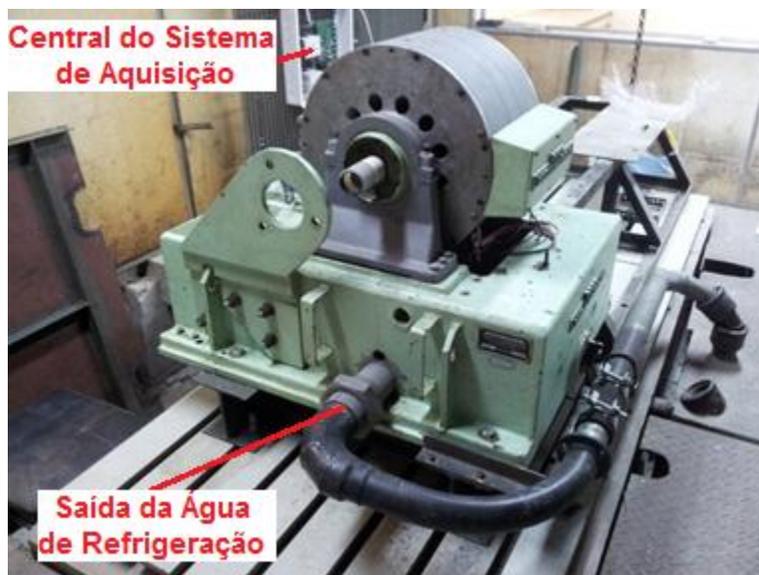


Figura 5.2. Dinamômetro montado e instalado no banco de provas.

A conexão entre a entrada de água de refrigeração e o circuito de água tratada é apresentada na Fig. 5.3, onde se busca mostrar de forma detalhada como esta entrada de água ocorre no dinamômetro: A água de refrigeração chega pela tubulação de baixo e encontra além da entrada de água do dinamômetro, um by-pass, controlado por uma válvula de esfera de alavanca. Este “by-pass” permite ao operador controlar a vazão de água que atravessa o dinamômetro. Além disto, também é possível observar o termopar instalado para medir a temperatura de entrada da água de refrigeração, que deve ser mantida em níveis especificados pelo fabricante do dinamômetro. A Fig. 5.4 apresenta em detalhe a entrada e saída de água de refrigeração no núcleo do dinamômetro e também mostra um dos termopares utilizados para medir a temperatura da saída de água do dinamômetro.

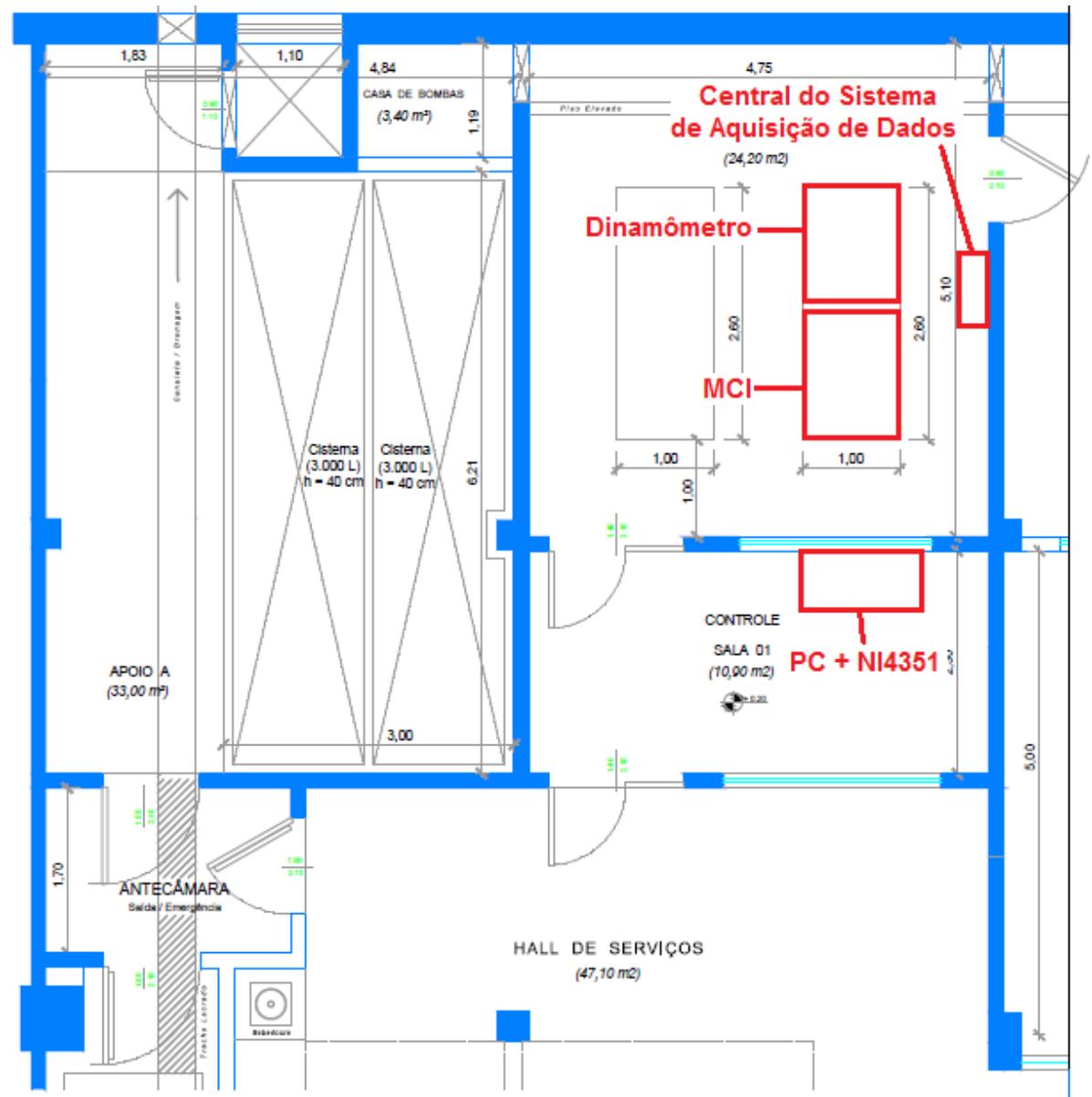


Figura 5.3. Entrada da água de refrigeração



Figura 5.4. Detalhe da entrada e saída de água de refrigeração no núcleo.

A Fig. 5.5 apresenta uma planta baixa da Sala 01 do conjunto de banco de provas do LMT, onde o dinamômetro está alocado. Estão indicados, de forma ilustrativa, os lugares onde os equipamentos principais estão instalados.



SUB-SOLO / LMT-UFRJ - SALA 2 PLANTA-BAIXA - Escala: 1 / 75
LAYOUT PRELIMINAR - A V L

Figura 5.5. Planta baixa do banco de provas onde o dinamômetro foi instalado.

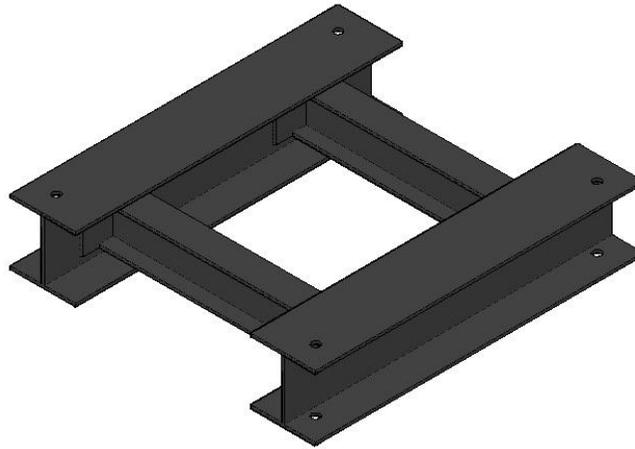


Figura 5.6. Ilustração da base do dinamômetro.

A instalação do dinamômetro no banco de provas foi realizada com o auxílio de uma base, fabricada na oficina do LMT e apresentada na Fig. 5.6.

5.2. CENTRAL DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Além dos novos sensores já citados, foi providenciada a instalação do bloco terminal e dos condicionadores no banco de provas. Estes foram montados em uma caixa e presos à parede próxima ao dinamômetro, como pode ser visto na Fig. 5.7. Desta forma, foi possível evitar ao máximo a necessidade de se realizar emendas nos cabos, melhorando a qualidade do sinal que chega à placa de aquisição de dados. Além disso, o fácil acesso a esta central facilita eventuais trocas ou modificações no sistema de aquisição que sejam necessárias.

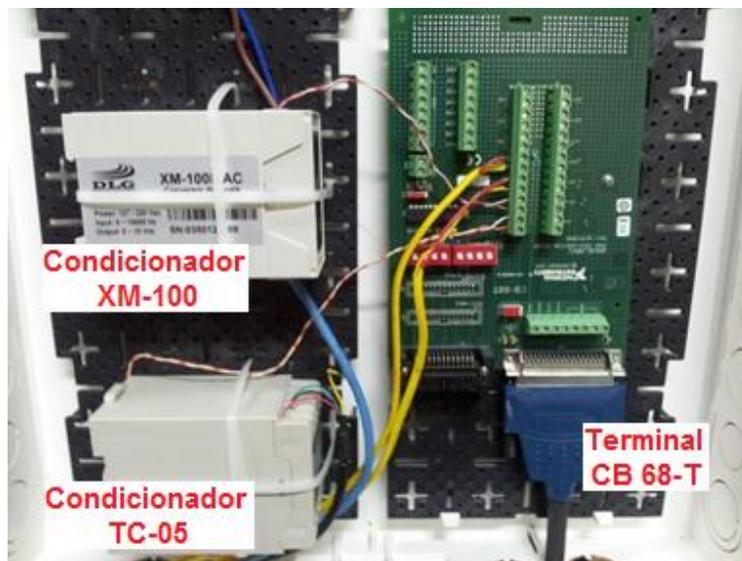


Figura 5.7. Central do sistema de aquisição de dados.

5.3. CURVAS DE CALIBRAÇÃO DOS SENSORES

5.3.1. CÉLULA DE CARGA

Tipicamente, a calibração de células de carga em dinamômetros é feita com o auxílio dos braços de calibração. Os braços de calibração utilizados neste projeto foram fornecidos via empréstimo pelo Instituto Militar de Engenharia, que possui em suas instalações um dinamômetro de modelo idêntico ao que é apresentado neste Projeto. A Fig. 5.8 apresenta o dinamômetro com os dois braços de calibração instalados.

A curva de calibração estática de célula de carga em dinamômetros é realizada adicionando-se pesos no braço de calibração que se encontra no mesmo lado que a célula de carga, cujo comprimento é de 716.2 mm . Após o levantamento dos pares $T[\text{kgf}] \times V[\text{V}]$, foi realizado um ajuste através do Método dos Mínimos Quadrados para obter a relação entre os dois parâmetros citados. Os resultados são apresentados na Tab. 5.1 e na Fig. 5.9.

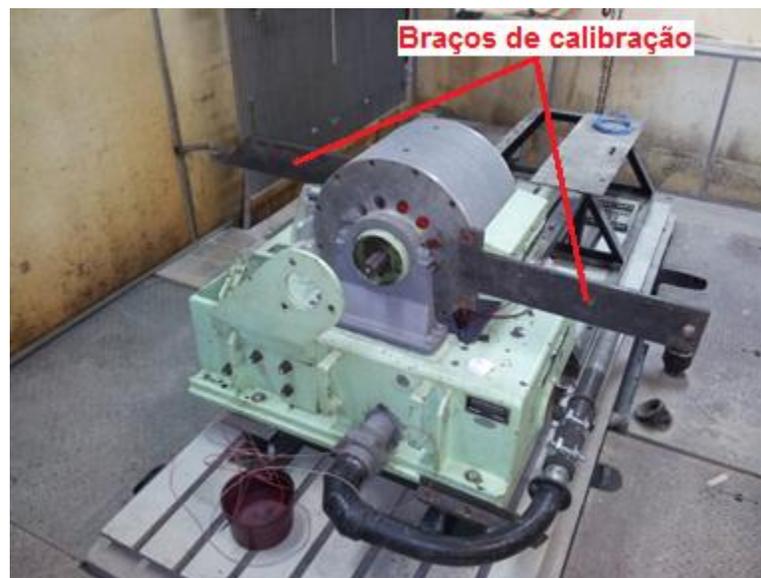


Figura 5.8. Dinamômetro com os braços de calibração instalados

Tabela 5.1. Dados de calibração do sistema medidor de torque

Massa de Calibração [kg]	Torque de Calibração [Nm]	Tensão Obtida [V]
0	0	0.5355
5	35.130	0.1051
10	70.259	-0.6691
15	105.389	-1.1373
20	140.518	-1.9681
25	175.648	-2.4025
30	210.778	-3.0210

Este procedimento culminou na determinação da curva de calibração para a faixa de torques testados, apresentada na Eq. 5.1.

$$T[\text{Nm}] = 34.915 - 57.648V[\text{V}] \quad (5.1)$$

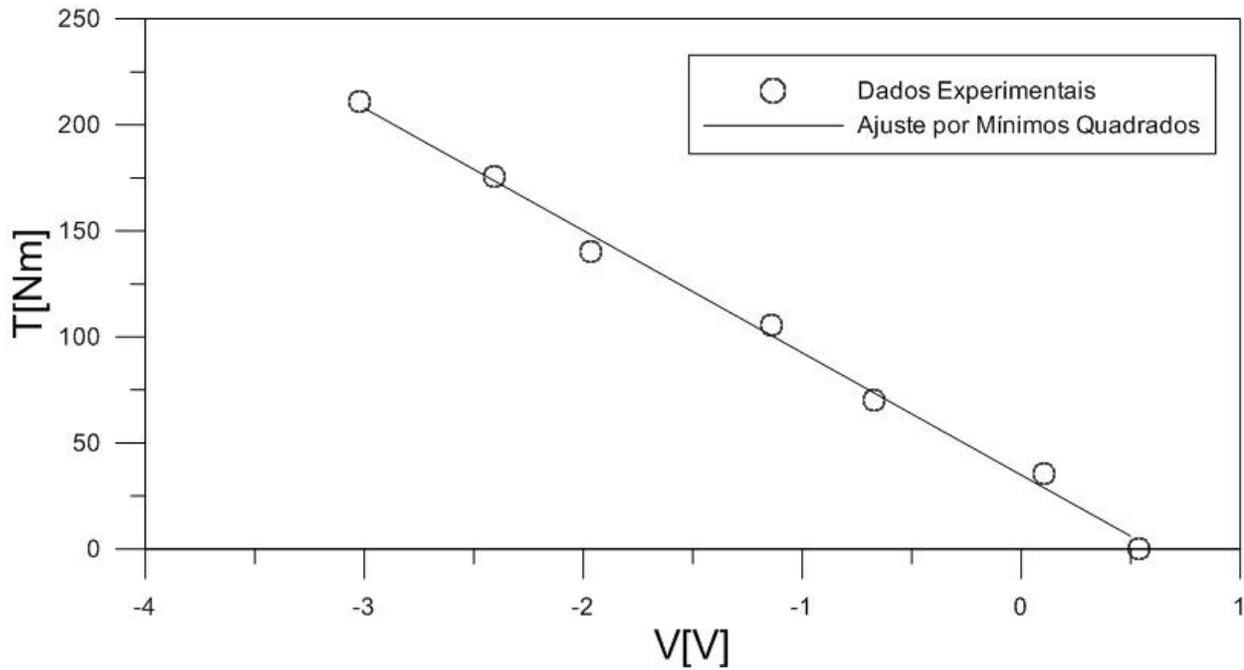


Figura 5.9. Curva de calibração estática da célula de carga

Para verificar a qualidade desta curva de calibração, os pesos usados na calibração foram recolocados no braço de calibração e o valor do torque correspondente foi comparado com a leitura da célula de carga. O resultado é apresentado na Tab. 5.2 e Fig. 5.10.

Tabela 5.2. Verificação da curva de calibração estática da célula de carga

Massa de Calibração [kg]	Torque Aplicado [Nm]	Torque Medido [Nm]	Desvio Relativo [%]
0	0	1.305	-
5	35.130	31.735	9.662
10	70.259	65.893	6.213
15	105.389	104.231	1.098
20	140.518	142.716	1.564
25	175.648	170.115	3.149
30	210.777	202.400	3.975

Os dados apresentados na Tab. 5.2 também foram ajustados a uma reta pelo método dos mínimos quadrados, sob o motivo de que o coeficiente angular obtido é um indicador da

qualidade da curva. No caso de uma calibração perfeita, isenta de erros, a reta deverá ter coeficiente angular unitário. Para os dados apresentados aqui, o ajuste obtido pode ser observado na Eq. 5.2.

$$T_{med}[kgf] = 0.0073 + 0.9729T_{apl}[kgf] \quad (5.2)$$

Com um coeficiente angular de 0.9729, obtém-se um indicativo de que a calibração está adequada.

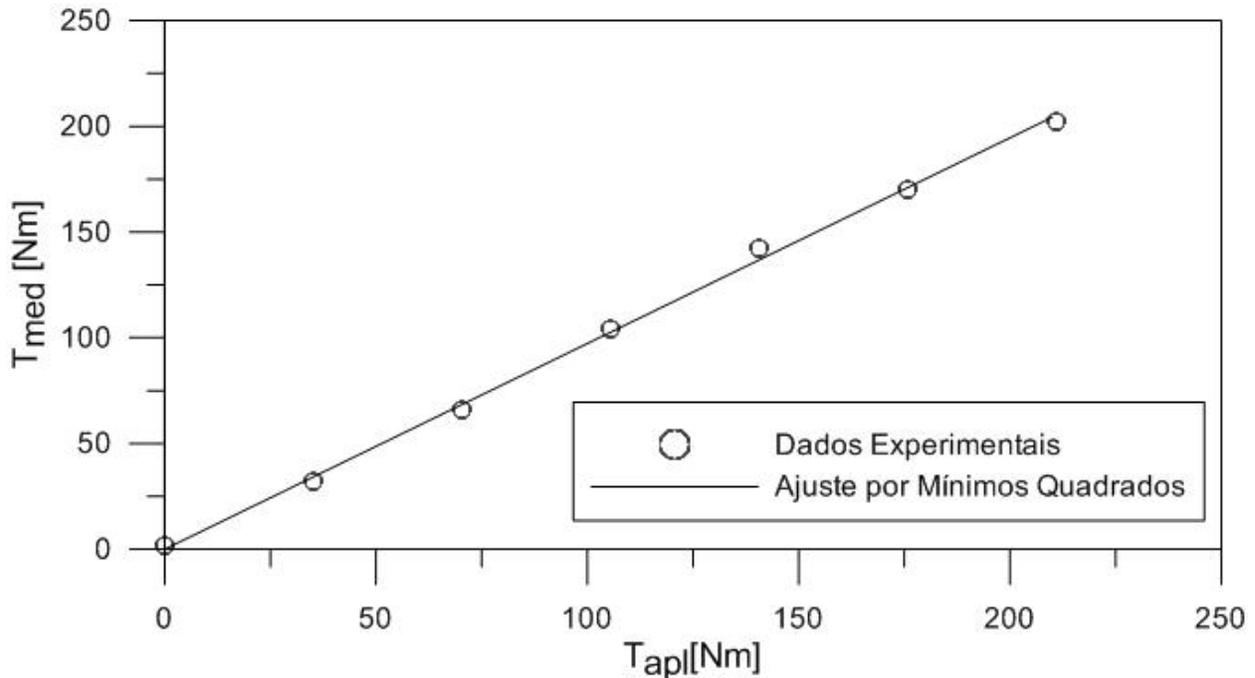


Figura 5.10. Verificação da curva de calibração estática da célula de carga

5.3.2. MEDIDOR DE ROTAÇÃO

A rigor, a calibração do sistema medidor de rotação deve ser feita com o MCI e dinamômetro em funcionamento, usando como base um medidor de rotação de referência. Entretanto, o fabricante comenta que a calibração do sistema também pode ser feita utilizando um multímetro e um gerador de sinais, este último com a função de simular o sinal emitido pelo pick-up magnético. Para este procedimento, foi utilizado o gerador de sinais do Laboratório de Acústica e Vibrações, da COPPE/UFRJ para levantar a curva de calibração. Foi avaliada a resposta do condicionador de sinais em frequências de até 7 kHz. Os resultados são apresentados na Tab. 5.3 e na Fig. 5.11.

Tabela 5.3. Dados de calibração do sistema medidor de rotação

Frequência do Sinal [Hz]	Tensão Obtida [V]
500	0.532
1000	1.071
1500	1.602
2000	2.141
2500	2.678
3000	3.201
3500	3.745
4000	4.28
4500	4.81
5000	5.32
5500	5.87
6000	6.41
6500	6.93
7000	7.48

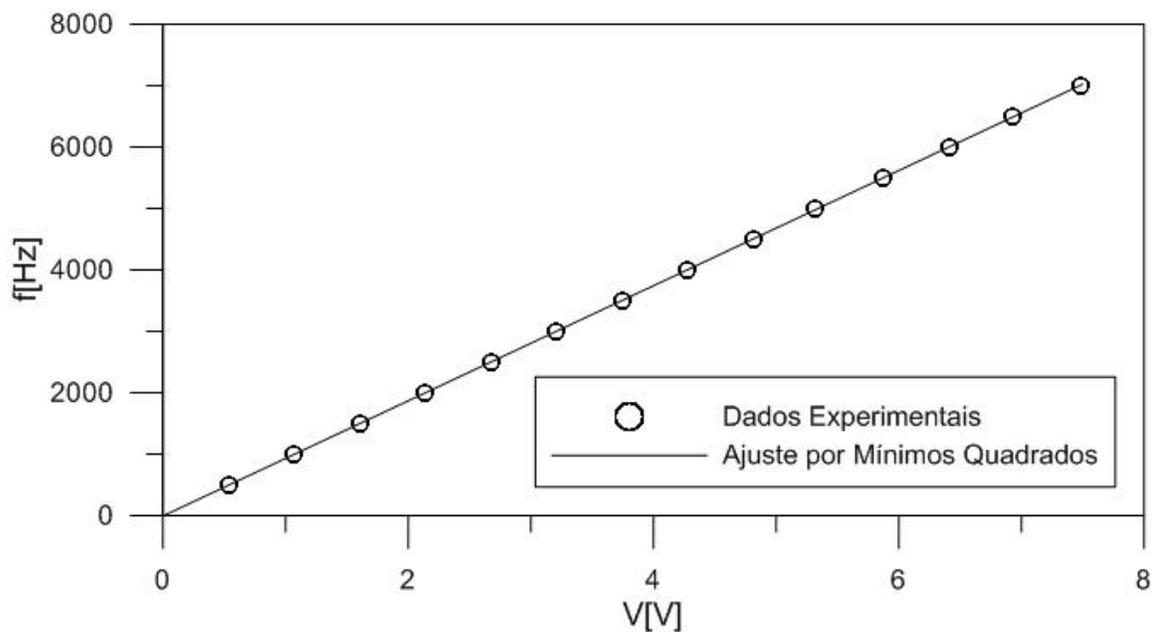


Figura 5.11. Curva de calibração do medidor de rotação.

Ajustando em uma reta os dados da Tab. 5.3, através do Método dos Mínimos Quadrados, obtém-se a equação de calibração do sensor de rotação, demonstrada na Eq. 5.3. Buscando verificar a qualidade do ajuste proposto pela Eq. 5.3, foi realizado um novo levantamento de dados. Estes dados foram comparados com os dados usados para determinar a equação de calibração e os resultados são apresentados na Tab. 5.4 e na Fig. 5.12.

$$f[\text{Hz}] = 936.5 V[\text{V}] \quad (5.3)$$

Tabela 5.4. Verificação da curva de calibração do sensor de rotação.

Frequência aplicada [Hz]	Frequência medida [Hz]	Desvio relativo [%]
500	500.09	0.02
1000	1000.18	0.02
1500	1502.15	0.14
2000	2004.11	0.21
2500	2505.14	0.21
3000	2996.80	0.11
3500	3502.51	0.07
4000	4008.22	0.21
4500	4504.57	0.10
5000	4991.55	0.17
5500	5506.62	0.12
6000	6002.97	0.05
6500	6499.31	0.01
7000	7014.39	0.21

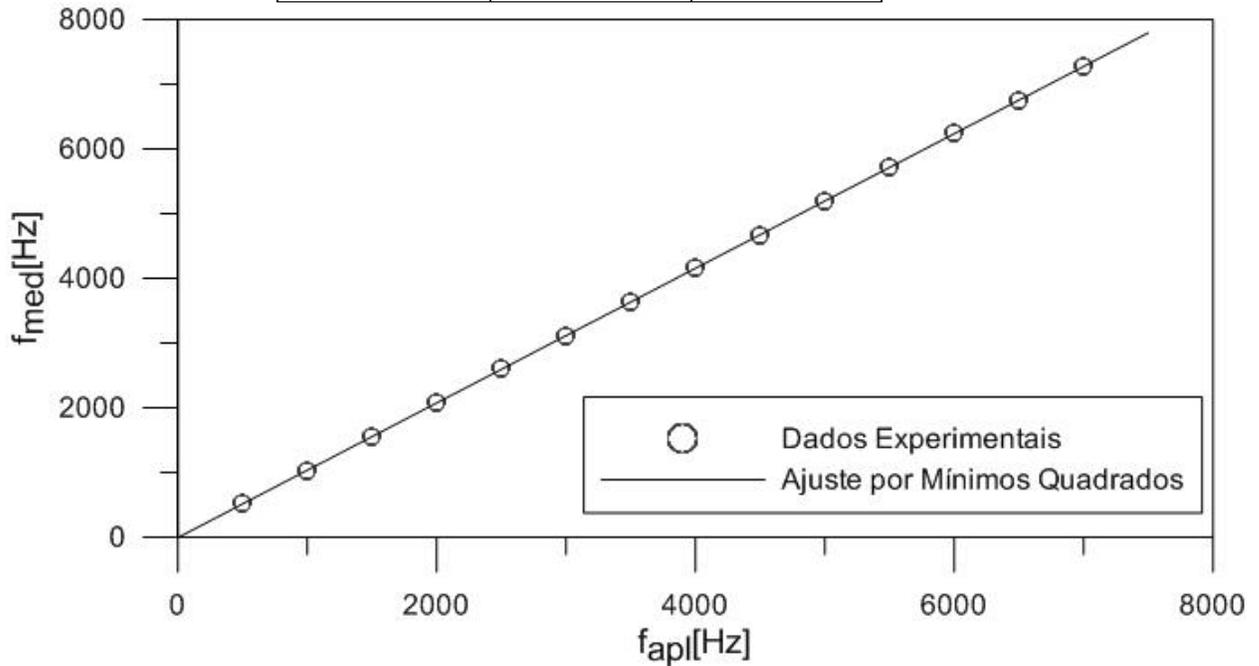


Figura 5.12. Verificação da curva de calibração do sensor de rotação.

$$f_{med}[Hz] = 0.999 f_{apl}[Hz] \quad (5.4)$$

O coeficiente de calibração encontrado demonstra que a calibração obtida para o condicionador de sinais é bem próxima da ideal. Entretanto, ressalta-se que a calibração do sistema medidor de rotação só pode ser validada se avaliada em conjunto com o sensor pick-up magnético. Frente ao fato de o MCI não ter retornado a tempo da manutenção, buscou-se

uma abordagem alternativa para testar o sistema medidor de rotação, através do acoplamento de uma furadeira ao eixo do motor (Fig. 5.13), visando mantê-lo a uma rotação constante. Este experimento apresenta o ponto negativo de permitir a leitura em somente um valor de rotação. Embora fosse possível aplicar, juntamente com a ação da furadeira, alguns valores de torques resistivos para medir outros valores de rotação, as preocupações envolvendo a segurança do operador e a integridade do equipamento utilizado levaram à não-realização da medição de vários valores de rotação, deixando esta etapa para ser verificada com a presença do MCI. Deste modo, foi realizada a leitura de alguns valores de rotação (Fig. 5.14), pelo sistema de aquisição e pelo sistema de referência, que consistiu do medidor de rotações do equipamento TESTO 454, apresentado na Fig. 5.15. A amostra possui 10 elementos.



Figura 5.13. Novo experimento para validação da curva de calibração do sensor de rotação.



Figura 5.14. Leitura da tensão realizada diretamente no condicionador de sinais



Figura 5.15. Equipamento de referência TESTO 454
 Fonte: TESTO Brasil

Os resultados do experimento permitiram observar que a curva de calibração, quando testada em conjunto com o sensor pick-up magnético, ainda não apresenta um comportamento ideal, visto que todos os valores calculados encontram-se acima do valor nominal, embora a média das diferenças relativas seja de 4.39%. A Tab. 5.5 apresenta os resultados do experimento.

Tabela 5.5. Dados para verificação da calibração do sensor de rotação com o TESTO 350

$\omega_{ref}[RPM]$	$V[V]$	$\omega_{med}[RPM]$	<i>Desvio Relativo [%]</i>
815.10	0.938	878.43	7.48
808.45	0.936	876.56	8.14
840.43	0.939	879.37	4.35
840.11	0.940	880.31	4.50
844.55	0.947	888.74	4.95
847.56	0.951	890.61	4.80
852.15	0.947	886.87	3.80
852.47	0.944	884.06	3.34
848.98	0.944	884.06	3.85
852.15	0.933	873.75	2.26

Entretanto, é possível fazer uma análise mais crítica dos dados levantados realizando um Teste de Aderência, através da distribuição de Qui-Quadrado e do teste da hipótese H_0 .

H_0 : Os dados coletados pelo sistema de aquisição estão de acordo com os dados fornecidos pelo medidor de referência.

H_1 : Os dados coletados pelo sistema de aquisição não estão de acordo com os dados fornecidos pelo medidor de referência.

Admite-se, então, que a hipótese H_0 é verdadeira para que seja possível testá-la. É, então, realizado o cálculo das discrepâncias através da Eq. 5.5. Os resultados se encontram na Tab. 5.6.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(e_i - n_i)^2}{e_i} \quad (5.5)$$

Tabela 5.6. Teste de Aderência

$\omega_{ref}[RPM]$	$\omega_{med}[RPM]$	$(e_i - n_i)^2/e_i$
817.24	875.35	4.58
810.58	873.48	5.37
842.65	876.29	1.60
842.32	877.23	1.71
846.77	885.66	2.08
849.79	887.54	1.96
854.39	883.79	1.23
854.71	880.98	1.01
851.21	880.97	1.27
854.39	876.66	0.44

Desta forma, observa-se que $\chi^2 = 21.26$. Como nenhum parâmetro foi estimado, a distribuição contém $\nu = 10 - 1 = 9$ graus de liberdade. Desta forma, através da tabela da distribuição de Qui-Quadrado, verifica-se que a hipótese H_0 pode ser tomada como verdadeira a um nível de significância de, por exemplo, 1.0%. A partir do nível de significância de 1.15% a hipótese H_0 não deve mais ser tomada como verdadeira e deve ser rejeitada.

Os cálculos utilizando a distribuição de Qui-Quadrado são feitos com o auxílio da tabela apresentada no Anexo A3, juntamente com o software *Mathematica*, através da função *ChiSquarePValue*. Este resultado confirma a ideia inicial de que, embora a curva de calibração ainda não seja a ideal ela pode ser considerada adequada, dentro de certa tolerância. Na prática, obter uma curva de calibração adequada significa efetuar a calibração do sistema medidor de rotação com a presença do MCI que, até o presente momento deste trabalho, foi inviável.

5.4. SOFTWARE PARA AQUISIÇÃO DE DADOS

A Fig. 5.16 apresenta a tela do software de aquisição de dados, desenvolvida no software LabView. Toda a informação dos sensores instalados no banco de provas será enviada à central do sistema de aquisição de dados, que as enviará para um computador dotado da placa NI-4351 que apresentará os dados do ensaio na tela, de acordo com o diagrama apresentado na Fig. 5.17. A rotina também está preparada para exportar os dados de

ensaio através de um arquivo de texto, que pode ser facilmente incorporado em qualquer outro programa permitindo a utilização dos resultados do ensaio para, por exemplo, a validação de modelos matemáticos.

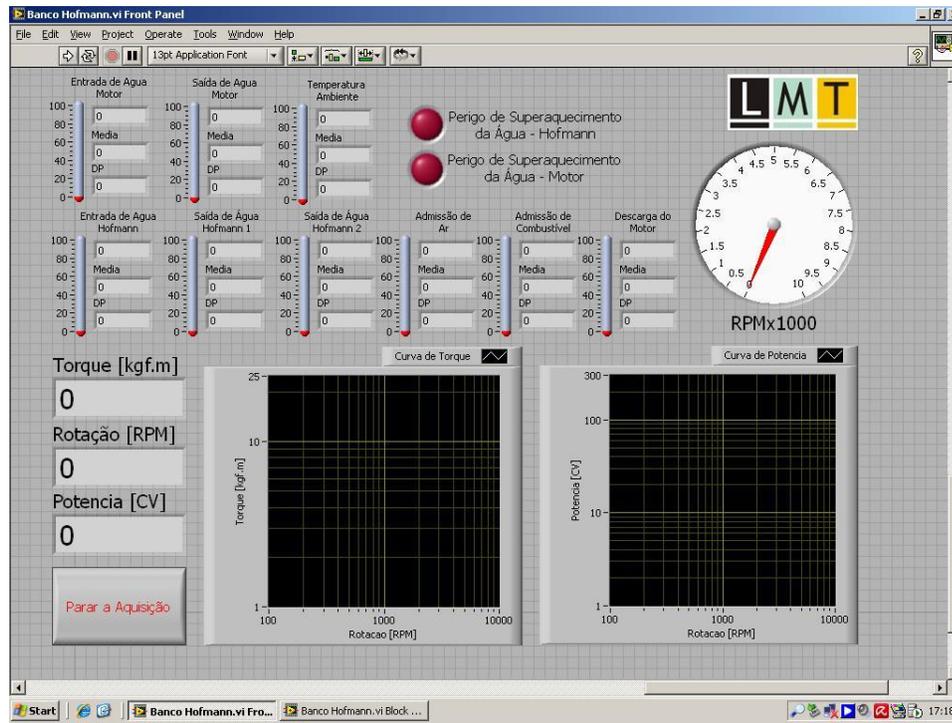


Figura 5.16. Tela inicial do programa de aquisição de dados

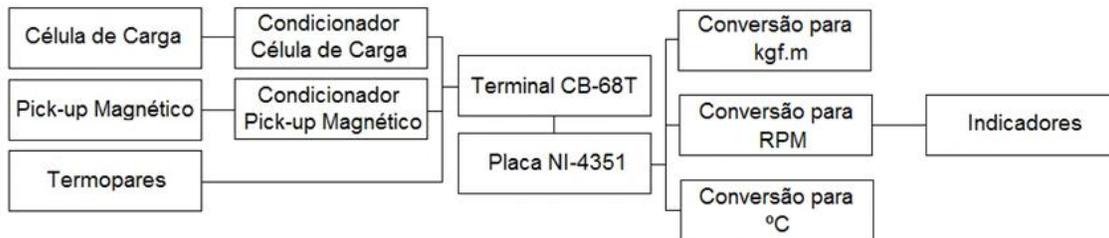


Figura 5.17. Esquema ilustrativo do processamento dos dados dos sensores

6. CONCLUSÕES, COMENTÁRIOS E SUGESTÕES

6.1. CONCLUSÕES



Figura 6.1. Dinamômetro antes e depois da recuperação.

Neste projeto, o dinamômetro Hofmann I2D teve sua parte mecânica recuperada, seu sistema de aquisição atualizado para operação com o Software LABVIEW e foi instalado em um dos bancos de provas do LMT. A Fig. 6.1 apresenta um comparativo entre o equipamento antes e após as etapas demonstradas neste projeto. Assim, o resultado deste trabalho é uma ferramenta moderna que pode ser utilizada para realizar testes e aulas práticas envolvendo MCIs. Embora não tenha sido possível até o presente momento recuperar o motor proposto para este dinamômetro, o propósito de recuperar e testar o dinamômetro foi devidamente alcançado, pois todos os aspectos importantes de seu funcionamento foram testados individualmente.

Realizando uma avaliação geral do projeto, o autor considera que vários impactos positivos foram observados, como a oportunidade de consolidar vários dos conhecimentos adquiridos ao longo da graduação. O maior mérito deste projeto, entretanto, foi o estímulo para o maior contato com a área experimental, uma das maiores deficiências do autor. Através da participação ativa no projeto de experimentos, montagem de equipamentos, utilização de diversos aparelhos, como multímetros, fontes de corrente, sistemas de aquisição e sensores diversos, uma série de aspectos relevantes à Engenharia Mecânica passaram a ser vistos também de outra perspectiva, também muito importante e que complementa o conhecimento teórico dentro do método científico. Todo e qualquer modelo matemático só pode ser validado ao ser comparado com a realidade, isto é, com dados experimentais. Além disso, é deixado para o LMT e para a Universidade algo que pode ser usado como ferramenta didática que aproximará os alunos da prática inerente à profissão de Engenheiro Mecânico.

6.2. COMENTÁRIOS E SUGESTÕES

Boa parte das possíveis modificações no projeto para o futuro provém da impossibilidade de implementá-las sem a presença do MCI no banco de provas. Após a chegada e instalação mecânica do MCI no banco de provas, deve ser providenciada a instalação dos termopares para monitoramento das temperaturas. Em seguida é necessário o levantamento da curva de calibração dinâmica da célula de carga, juntamente com a validação efetiva da curva de calibração do medidor de rotações. Tendo tomado estas providencias, as curvas de torque e potência do MCI poderão ser levantadas.

Conforme citado ao longo deste projeto, a temperatura da água de refrigeração do dinamômetro é um parâmetro que deve ser constantemente monitorado e mantido em níveis adequados. Uma sugestão de trabalho futuro para este banco de provas é a implementação de um sistema de controle capaz de monitorar esta grandeza da forma mais adequada possível.

Outros trabalhos possíveis de serem feitos no banco envolvem a atualização do sistema de aquisição desenvolvido no LabView, adicionando leituras de vazão de Ar e Combustível, permitindo o cálculo da razão Ar-Combustível, pressão no interior do cilindro e níveis de emissões.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Manual do Dinamômetro I2D, Hofmann do Brasil, Novembro/1981
- [2] HEYWOOD, J., B., *Internal Combustion Engines Fundamentals*. 1 ed, Ohio, McGraw-Hill, 1988
- [3] PLINT, M., MARTYR, A.J., *Engine Testing: Theory and Practice*. 2 ed. New York Society of Automotive Engineers Inc., 1999.
- [4] BARROSO, W.M., *Regulação e Desenvolvimento da Indústria de Biocombustíveis no Brasil*, palestra para o PRH37/ANP, COPPE/UFRJ, Out/2011
- [5] AGARWAL, A.K., “Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines”, *Progress in Energy and Combustion Science*, Volume 33, Issue 3, Pages 233-271, June 2007. doi:10.1016/j.pecs.2006.08.003
- [6] MELO, T.C.C., *Motores Flex*, palestra para o PRH37/ANP, COPPE/UFRJ, Nov/2011
- [7] JOSEPH JR., H., *PROCONVE – Fases passadas e futuras*, ANFAVEA, Seminário sobre emissões de veículos Diesel, São Paulo, 27/10/2009.
- [8] COSTA, R.C., SODRÉ, J.R., “Hydrous ethanol vs. gasoline-ethanol blend: Engine performance and emissions”, *Fuel*, Volume 89, Issue 2, Pages 287-293, February 2010. doi:10.1016/j.fuel.2009.06.017
- [9] PETROBRAS, Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico – FISPQ: Álcool Etílico Hidratado e Combustível, 03/01/2011
- [10] PEREIRA, J.C., *Motores e Geradores: Princípios de funcionamento, instalação, operação e manutenção de grupos diesel geradores*
- [11] COSME, R.S.B. 2004, *Determinação da Potência de Atrito de um Motor de Combustão Interna*, POLI/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- [12] JUNIOR, D.P.O., *Motores de Combustão Interna*, FATEC-SP, Fevereiro/1997
- [13] NUSSENZVEIG, H. M., *Curso de Física Básica – Volume 3*, 1 ed, Blücher, 1997.
- [14] GONZÁLEZ, M.I., “Experiments with eddy currents: The Eddy Current Brake”, *European Journal of Physics*, Volume 25, Pages 463–468, February 2004. doi: 10.1088/0143-0807/25/4/001
- [15] Manual da placa NI-4351, National Instruments, Dezembro/1998
- [16] BOYES, W., *Instrumentation Reference Book*, 3 ed., Butterworth-Heinemann, 2003.

Anexo A1

CURVA DO DINAMÔMETRO HOFMANN I2D

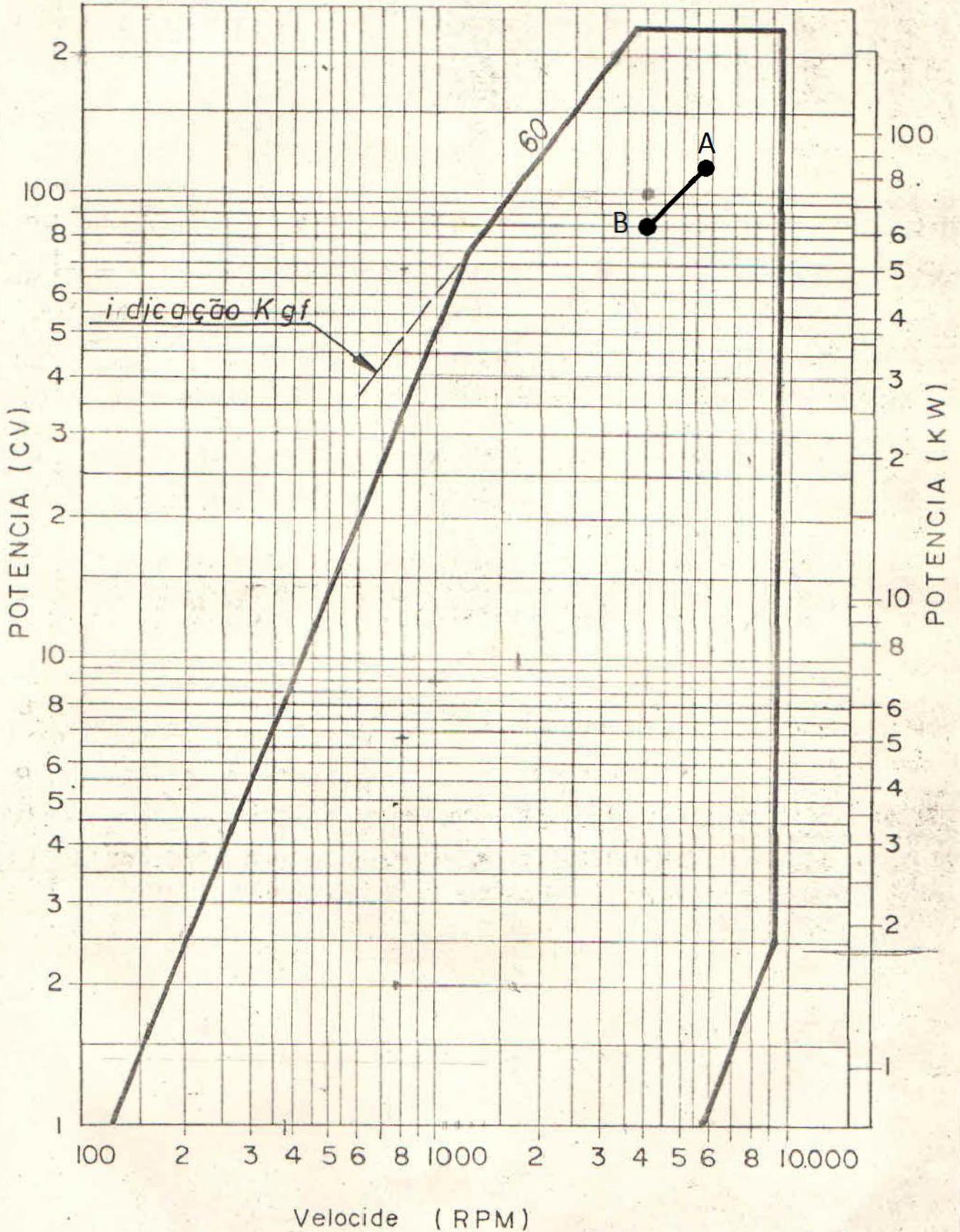


Freio Tipo - 12 d indutivo

Diagrama de funcionamento

DATA -

FOLHA -



Anexo A2

ESTIMATIVA DE CUSTO DO PROJETO

Estimativa de custo do projeto de restauração do dinamômetro Hofmann I2D

Equipamento	Preço Unitário (R\$)	Quantidade	Preço (R\$)
Bruto de Fundição em Ferro Fundido	400.00	2	800.00
Rolamento DPI 16021	135.00	2	270.00
Rolamento NSK 6209	40.60	2	81.20
Arruela de Segurança MB9	8.00	2	16.00
Porca Tensora KM9	15.00	2	30.00
Graxa p/rolamento	22.80	1	22.80
Terminal NI CB-68T	665.32	1	665.32
Cabo blindado NI SH6868, 5M, 68 pinos	738.84	1	738.84
Célula de carga MK CSA/ZL-100	291.00	1	291.00
Condicionador de sinal MK TC5 -10	475.00	1	475.00
Sensor pick-up DLG SP02-5/8G1SM/80.	563.50	1	563.50
Condicionador de sinal DLG XM-100	493.50	1	493.50
Total (R\$)			4447.20

Estimativa do número de horas de trabalho para o desenvolvimento do projeto:

Profissional	Carga Horária (Horas)
Autor	400
Engenheiro	400
Torneiro/Fresador	100
Soldador	50
Ajudante de Mecânica	50
Total	1000

Anexo A3

DISTRIBUIÇÃO DE QUI-QUADRADO

Distribuição Qui-Quadrado

$v \backslash \alpha$	0,995	0,99	0,975	0,95	0,90	0,75	0,50	0,25	0,10	0,05	0,025	0,01	0,005	0,001
1	0,0004	0,002	0,001	0,004	0,016	0,102	0,455	1,323	2,706	3,841	5,024	6,635	7,879	10,828
2	0,010	0,020	0,051	0,103	0,211	0,575	1,386	2,773	4,605	5,991	7,378	9,210	10,597	13,816
3	0,072	0,115	0,216	0,352	0,584	1,213	2,366	4,108	6,251	7,815	9,348	11,345	12,838	16,266
4	0,207	0,297	0,484	0,711	1,064	1,923	3,357	5,385	7,779	9,488	11,143	13,277	14,860	18,467
5	0,412	0,554	0,831	1,145	1,610	2,675	4,351	6,626	9,236	11,071	12,833	15,086	16,750	20,515
6	0,676	0,872	1,237	1,635	2,204	3,455	5,348	7,841	10,645	12,592	14,449	16,812	18,548	22,458
7	0,989	1,239	1,690	2,167	2,833	4,255	6,346	9,037	12,017	14,067	16,013	18,475	20,278	24,322
8	1,344	1,646	2,180	2,733	3,490	5,071	7,344	10,219	13,362	15,507	17,535	20,090	21,955	26,125
9	1,735	2,088	2,700	3,325	4,168	5,899	8,343	11,389	14,684	16,919	19,023	21,666	23,589	27,877
10	2,156	2,558	3,247	3,940	4,865	6,737	9,342	12,549	15,987	18,307	20,483	23,209	25,188	29,588
11	2,603	3,053	3,816	4,575	5,578	7,584	10,341	13,701	17,275	19,675	21,920	24,725	26,757	31,264
12	3,074	3,571	4,404	5,226	6,304	8,438	11,340	14,845	18,549	21,026	23,337	26,217	28,299	32,909
13	3,565	4,107	5,009	5,892	7,042	9,299	12,340	15,984	19,812	22,362	24,736	27,688	29,819	34,528
14	4,075	4,660	5,629	6,571	7,790	10,165	13,339	17,117	21,064	23,685	26,119	29,141	31,319	36,123
15	4,601	5,229	6,262	7,261	8,547	11,036	14,339	18,245	22,307	24,996	27,488	30,578	32,801	37,697
16	5,142	5,812	6,908	7,962	9,312	11,912	15,338	19,369	23,542	26,296	28,845	32,000	34,267	39,252
17	5,697	6,408	7,564	8,672	10,085	12,792	16,338	20,489	24,769	27,587	30,191	33,409	35,718	40,790
18	6,265	7,015	8,231	9,390	10,865	13,675	17,338	21,605	25,989	28,869	31,526	34,805	37,156	43,312
19	6,844	7,633	8,907	10,117	11,651	14,562	18,338	22,718	27,204	30,144	32,852	36,191	38,582	43,820
20	7,434	8,260	9,591	10,851	12,443	15,452	19,337	23,828	28,412	31,410	34,170	37,566	39,997	45,315
21	8,034	8,897	10,283	11,591	13,240	16,344	20,337	24,935	29,615	32,671	35,479	38,932	41,401	46,797
22	8,643	9,542	10,982	12,338	14,042	17,240	21,337	26,039	30,813	33,924	36,781	40,289	42,796	48,268
23	9,260	10,196	11,689	13,091	14,848	18,137	22,337	27,141	32,007	35,172	38,076	41,638	44,181	49,728
24	9,886	10,856	12,401	13,848	15,659	19,037	22,337	28,241	33,196	36,415	39,364	42,980	45,559	51,179
25	10,520	11,524	13,120	14,611	16,473	19,939	24,337	29,339	34,382	37,652	40,646	44,314	46,928	52,620
26	11,160	12,198	13,844	15,379	17,292	20,843	25,336	30,434	35,563	38,885	41,923	45,642	48,290	54,052
27	11,808	12,879	14,573	16,151	18,114	21,749	26,336	31,528	36,741	40,113	43,194	46,963	49,645	55,476
28	12,461	13,565	15,308	16,928	18,939	22,657	27,336	32,620	37,916	41,337	44,461	48,278	50,993	56,892
29	13,121	14,257	16,047	17,708	19,768	23,567	28,336	33,711	39,087	42,557	45,722	49,588	52,336	58,302
30	13,787	14,954	16,791	18,493	20,599	24,478	29,336	34,800	40,256	43,773	46,979	50,892	53,672	59,703
31	14,458	15,655	17,539	19,281	21,434	25,390	30,336	35,887	41,422	44,985	48,232	52,191	55,003	61,098
32	15,134	16,362	18,291	20,072	22,271	26,304	31,336	36,973	42,585	46,194	49,480	53,486	56,328	62,487
33	15,815	17,074	19,047	20,867	23,110	27,219	32,336	38,058	43,745	47,400	50,725	54,776	57,648	63,870
34	16,501	17,789	19,806	21,664	23,952	28,136	33,336	39,141	44,903	48,602	51,966	56,061	58,964	65,247
35	17,192	18,509	20,569	22,465	24,797	29,054	34,336	40,223	46,059	49,802	53,203	57,342	60,275	66,619
36	17,887	19,233	21,336	23,269	25,643	29,973	35,336	41,304	47,212	50,998	54,437	58,619	61,581	67,985
37	18,586	19,960	22,106	24,075	26,492	30,893	36,336	42,383	48,363	52,192	55,668	59,892	62,883	69,346
38	19,289	20,691	22,878	24,884	27,343	31,815	37,335	43,462	49,513	53,384	56,896	61,162	64,181	70,701
39	19,996	21,426	23,654	25,695	28,196	32,737	38,335	44,539	50,660	54,572	58,120	62,428	65,476	72,055
40	20,707	22,164	24,433	26,509	29,051	33,660	39,335	45,616	51,805	55,758	59,342	63,691	66,766	73,402
41	21,421	22,906	25,215	27,326	29,907	34,585	40,335	46,692	52,949	56,942	60,561	64,950	68,053	74,745
42	22,138	23,650	25,999	28,144	30,765	35,510	41,335	47,766	54,090	58,124	61,777	66,206	69,336	76,084
43	22,859	24,398	26,785	28,965	31,625	36,436	42,335	48,840	55,230	59,304	62,990	67,459	70,616	77,419
44	23,584	25,148	27,575	29,787	32,487	37,363	43,335	49,913	56,369	60,481	64,201	68,710	71,893	78,750
45	24,311	25,901	28,366	30,612	33,350	38,291	44,335	50,985	57,505	61,656	65,410	69,957	73,166	80,077
50	27,991	29,707	32,357	34,764	37,689	42,942	49,335	56,334	63,167	67,505	71,420	76,154	79,490	86,661
60	35,534	37,485	40,482	43,188	46,459	52,294	59,335	66,981	74,397	79,082	83,298	88,379	91,952	99,607
70	43,275	45,442	48,758	51,739	55,329	61,698	69,335	77,577	85,527	90,531	95,023	100,425	104,215	112,317
80	51,172	53,540	57,153	60,391	64,278	71,145	79,335	88,130	96,578	101,879	106,629	112,329	116,321	124,839
90	59,196	61,754	65,647	69,126	73,291	80,625	89,335	98,650	107,565	113,145	118,136	124,116	128,299	137,208
100	67,328	70,065	74,222	77,929	82,358	90,133	99,335	109,141	118,498	124,342	129,561	135,807	140,169	149,449