

### **3**

## **Aparato Experimental**

Todas as experiências foram realizadas na bancada de testes de motores, localizada no Laboratório de Engenharia Veicular (LEV) da PUC-Rio.

A seguir, na Figura 6, ilustra-se o esquema do arranjo experimental montado para a realização dos ensaios. Também estão representadas, além das grandezas básicas de desempenho medidas pelo dinamômetro (torque e rotação), os pontos onde se tomaram as demais medidas necessárias à avaliação completa do motor.

Posteriormente, serão detalhados os equipamentos de medição e controle, acompanhados por uma série de figuras que facilitarão um melhor entendimento dos experimentos.

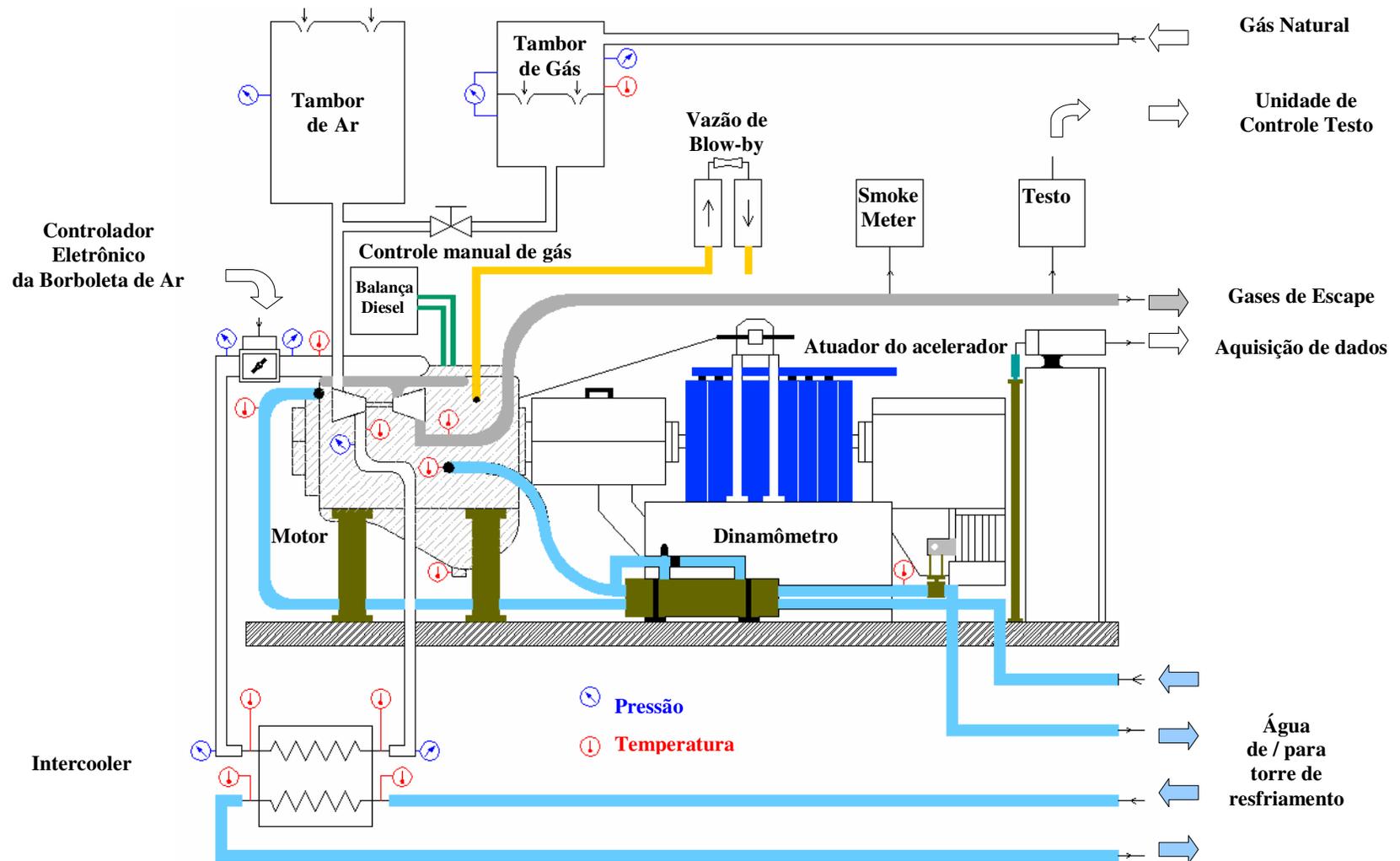


Figura 6 – Esquema do aparato experimental

### 3.1. Equipamentos e Dispositivos de Medição e Controle

#### 3.1.1. Motor Diesel

Foi utilizado para os testes um motor Diesel de quatro tempos, de fabricação MWM Motores Diesel e empregado na propulsão de diversos caminhões leves. Trata-se de um modelo com turbocompressor e *intercooler*.

A seguir, são apresentadas as fotografias e principais características técnicas do motor utilizado.

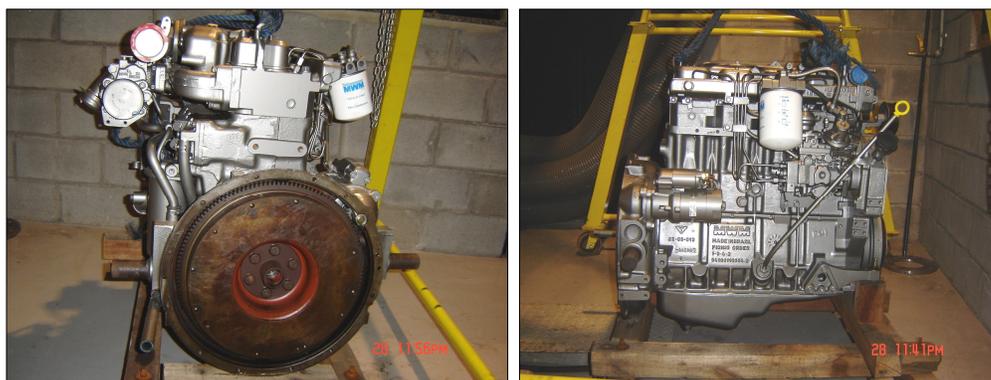


Figura 7 – Vistas do motor MWM, modelo 4.10 TCA.

Tabela 4 – Dados técnicos do motor (Fonte: MWM motores diesel, 2006).

<b>Ficha Técnica do Motor Veicular</b>	
Fabricante / Modelo	MWM Motores Diesel / 4.10 TCA
Aspiração	Turbo Aftercooler
Ciclo de Funcionamento	4 tempos
Número de cilindros e disposição	4 em linha
Cilindrada Total	4.3 litros
Diâmetro x Curso	103 x 129
Sistema de Injeção	Mecânico
Taxa de Compressão	17:1
Potência Máxima	107 kW (145 cv)
Rotação de Potência Máxima	2600 rpm
Torque Máximo	500 Nm
Rotação de Torque Máximo	1600 rpm
Peso Seco	380 kg

### 3.1.2. Dinamômetro Elétrico de Bancada

O dinamômetro elétrico empregado é da marca AVL, modelo Alpha 240. Este é refrigerado por água e têm capacidade de testar motores com potência efetiva de até 240 kW, torque máximo efetivo de 600 Nm e rotação máxima de 8000 rpm. A incerteza na medição do torque do motor é  $\pm 0,2\%$  do fundo de escala, enquanto a incerteza na medição da rotação é  $\pm 1$  rpm.



Figura 8 – Vistas da bancada do dinamômetro AVL, modelo Alpha 240.

### 3.1.3. Atuador Eletrônico da Bomba de Injeção Diesel

A regulagem do combustível Diesel é por meio de um atuador eletrônico, da marca LENZE e modelo MDSKRS050-23, que permite operar o motor sem a intervenção manual e com razoável precisão.

Para regular o curso do acelerador, o LEV dispõe de um regulador de curso linear, marca AVL e modelo THA 10. Este equipamento permite regular a posição entre 0 e 100% da haste da bomba injetora, informando o curso linear em milímetros.

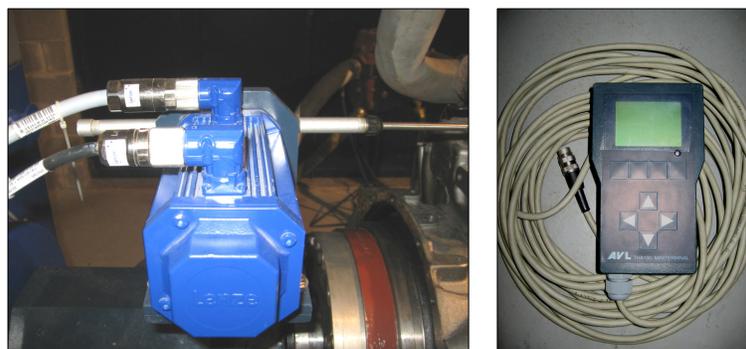


Figura 9 – Atuador eletrônico da bomba de injeção diesel (lado esquerdo) e regulador do curso do Acelerador (lado direito).

### 3.1.4. Controlador Eletrônico do Ar de Admissão

Para a regulação da vazão mássica do ar de admissão foi adquirida uma borboleta eletrônica da marca BOSCH, utilizada atualmente em motores do ciclo Otto. Tal dispositivo era controlado através de um circuito eletrônico, construído no próprio LEV, permitindo regular a vazão mássica do ar por meio da pressão no coletor de admissão.

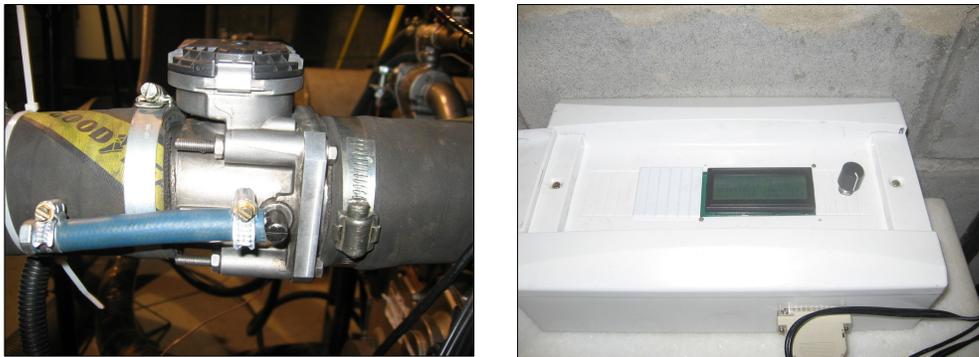


Figura 10 – Borboleta eletrônica do ar de admissão (lado esquerdo) e controlador eletrônico da borboleta (lado direito).

### 3.1.5. Medição do Consumo de Óleo Diesel

O consumo de Diesel foi determinado via balança de combustível AVL, modelo 733S, com capacidade de medição entre 0 a 160 kg/h e incerteza de  $\pm 0,2\%$ . No interior desta balança, existe um pequeno reservatório que mede, através de uma célula de carga em certo intervalo de tempo, a diferença entre o combustível de fornecimento e o de retorno. Assim, tinha-se o consumo efetivo de Diesel (kg/h) apresentado pelo motor. Este equipamento opera com o dinamômetro de bancada, enviando, através do software de controle, os valores médios de consumo de óleo Diesel.



Figura 11 – Balança do combustível diesel.

### 3.1.6. Medição do Consumo de Ar de Admissão

Para a medição do consumo de ar utilizou-se uma montagem, já existente no LEV, na qual o princípio da queda de pressão de escoamentos, através de orifícios, foi empregado. Tal sistema é composto de um tambor de amortecimento, que visa corrigir a natureza intermitente do processo de admissão. Este tambor é dividido internamente por uma placa que permite a instalação de até dois bocais de medição em paralelo, com diferentes diâmetros de orifício e uma conexão para tomada de pressão negativa. Especificamente nesta etapa experimental, foram utilizados dois bocais com diâmetro de orifício de 40 mm instalados em paralelo (vide Figura 12).

Para a correção da vazão mássica do ar, em relação às condições ambientais da sala de testes, foi necessária a medição da pressão atmosférica, temperatura ambiente e a umidade relativa. Estes dois últimos parâmetros foram medidos através de um sensor do tipo “microfone” da marca Omega Engineering, modelo HX94C, com capacidade para a medição de temperatura ambiente entre 0 a 100 °C ( $\pm 0,6$  °C de precisão), e para a umidade relativa, entre 3% a 95 % ( $\pm 2$  % de precisão). Estes dois sensores fornecem saída analógica (4 a 20mA).



Figura 12 – Tambor para a medição do consumo de ar do motor

1 – Tambor para a medição da vazão de ar; 2 – Bocais de  $\text{Ø}40$  mm de orifício; 3 – Tomada de pressão; 4 – Sensor de temperatura ambiente e umidade relativa, tipo “microfone”.

### 3.1.7. Medição do Consumo de Gás Natural

O LEV conta com gás natural encanado, fornecido pela Companhia Estadual de Gás do Rio de Janeiro (CEG), à pressão de 1 bar.

Para a medição do consumo de gás natural utilizou-se uma montagem também existente no LEV, com o mesmo princípio utilizado na medição do consumo de ar. Trata-se de um tambor de amortecimento que é dividido interiormente por uma placa que permite instalar até dois bocais de medição em paralelo com diferentes diâmetros de orifício. Nesta etapa experimental utilizou-se dois bocais com orifício de 5 mm de diâmetro instalados em paralelo para vazões entre 0 e 13 kg/h e um bocal com orifício de 10 mm de diâmetro para vazões entre 13 e 21 kg/h (vide Figura 13).

Depois de passar pelo tambor, o gás natural foi dosado no duto de ar de admissão do motor, através de válvulas manuais.

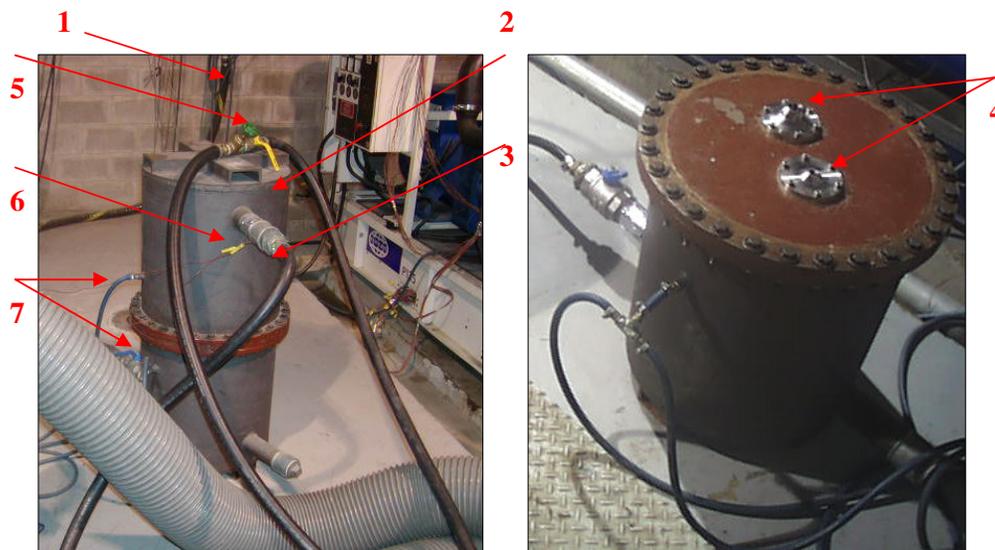


Figura 13 – Sistema de medição do gás natural

- 1 – Linha de fornecimento do gás natural; 2 – Tambor de gás; 3 – Linha de saída de gás para o motor; 4 – Arranjo dos bocais de medição de gás; 5 – Válvulas manuais para a dosagem do gás; 6 – Sensor de temperatura do gás; 7 – Tomadas de pressão do gás.

### 3.1.8. Medição da Pressão

Foram utilizados transdutores de pressão com saídas analógicas de 4-20mA, da marca HONEYWELL, os quais têm uma incerteza na medição de  $\pm 0,10\%$ .

A seguir é apresentado o arranjo dos transdutores utilizados (Figura 14) e as respectivas especificações técnicas (Tabela 5).



Figura 14 – Arranjo dos transdutores de pressão.

Tabela 5 – Especificações técnicas dos transdutores de pressão.

<b>Tipo de Transdutor</b>	<b>Modelo</b>	<b>Faixa de Operação</b>	<b>Medição</b>
Diferencial	FPA-1-UR-2p-5b-6q	26-32 inHg	Pressão barométrica.
Absoluta	FPA-1-BN-2p-5b-6q	0-50 psia	Pressão do ar na descarga do compressor.
Absoluto	FPA-1-BN-2p-5b-6q	0-50 psia	Pressão do ar na entrada do intercooler.
Absoluto	FPA-1-BM-2p-5b-6q	0-30 psia	Pressão do ar na saída do intercooler.
Absoluto	FPA-1-BM-2p-5b-6q	0-30 psia	Pressão do ar antes da borboleta.
Absoluto	FPA-1-BM-2p-5b-6q	0-30 psia	Pressão do ar depois da borboleta.
Absoluto	FPA-1-BN-2p-5b-6q	0-50 psia	Pressão do ar no coletor de admissão.
Absoluto	FPA-1-BM-2p-5b-6q	0-30 psia	Pressão no tambor de gás natural.
Diferencial	FDW-1-WA-2p-5a-6q	0-10 inH <sub>2</sub> O	Pressão diferencial no tambor de gás.
Diferencial	FDW-1-WA-2p-5a-6q	0-10 inH <sub>2</sub> O	Pressão diferencial no tambor de ar.

Fonte: (HONEYWELL, 2006).

### 3.1.9. Medição da Temperatura

Foram utilizados termopares tipo K (NiCr-NiAl), da marca Omega, com faixa de temperatura entre 0 e 750 °C e incerteza de  $\pm (0,75\%)$ .

A seguir, detalham-se a distribuição dos pontos para a medição da temperatura:

- ❑ Temperatura do ar na descarga do compressor.
- ❑ Temperatura do ar na entrada do intercooler.
- ❑ Temperatura do ar na saída do intercooler.
- ❑ Temperatura do ar no coletor de admissão.
- ❑ Temperatura de entrada do combustível Diesel.
- ❑ Temperatura de retorno do combustível Diesel.
- ❑ Temperatura da água de entrada ao motor.
- ❑ Temperatura do óleo no cárter do motor.
- ❑ Temperatura do tambor de gás natural.
- ❑ Temperaturas dos gases de escape (4 termopares instalados).

### 3.1.10. Computador e Software de Controle Start

O software Star de AVL, instalado no computador da bancada do dinamômetro, possui uma interface do tipo “Windows” de fácil manipulação e configuração. Entre suas principais funções, tem-se:

- ❑ Medição e controle da rotação e torque, definido pelo operador.
- ❑ Controle da bomba de injeção do óleo Diesel, através do atuador eletrônico.
- ❑ Monitorar e armazenar os valores do consumo de óleo Diesel, por meio da balança de combustível.
- ❑ Monitorar e armazenar os sinais de todos os sensores instalados (transdutores de pressão, termopares e sensor de umidade relativa), através de uma placa de aquisição de dados de 32 canais de entrada analógica.
- ❑ Monitorar e armazenar as medições das emissões do material particulado dos gases de escape, através do *Smoke Meter* e dos gases do cárter do motor por meio do *Blow-by*;
- ❑ Ativar os sistemas de alarmes para o caso de superaquecimento, limitações do torque e rotação, entre outras variáveis solicitadas pelo operador.



Figura 15 – Computador da bancada do dinamômetro.

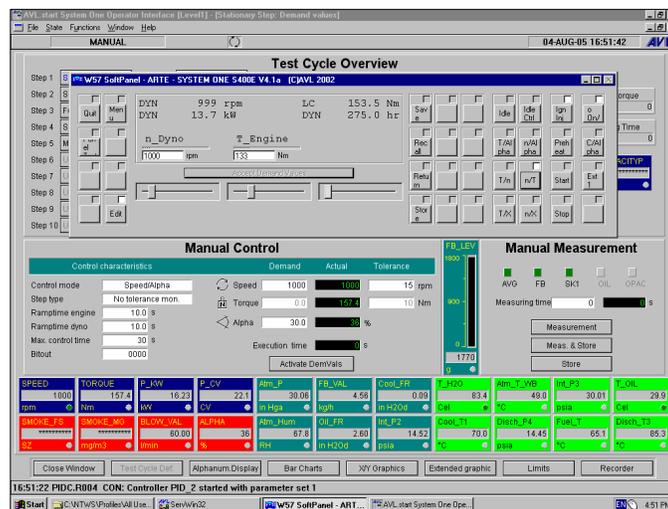


Figura 16 – Interface de controle e monitoramento do software “START”

### 3.1.11. Medição de Emissões

Mediante um sistema portátil da marca Testo, modelo 350 XL, foi possível analisar as concentrações das emissões de CO, HC e NO<sub>x</sub> nos gases de escape.

Para a avaliação do MP, foi utilizado o *Smoke Meter* da marca AVL, modelo 415s. Cabe mencionar que, com este equipamento não foi possível acompanhar todos os experimentos, devido a problemas técnicos apresentados pelo mesmo.

## Testo 350 XL

O sistema portátil Testo é composto por:

- ❑ A caixa analisadora dos gases de escape.
- ❑ Unidade de controle.
- ❑ Sonda de gases.
- ❑ Cabos de conexão de data e energia (vide Figura 17).

A caixa analisadora contém:

- ❑ Bomba para transporte da mostra dos gases de escape.
- ❑ Unidade condensadora.
- ❑ Bomba de purga de condensados.
- ❑ Filtros.
- ❑ Os sensores ou células de medição do gás (O<sub>2</sub>, CO, NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> e HC).
- ❑ Eletrônica de avaliação e armazenamento.

A unidade de controle tem como função ativar, monitorar e programar as medições das emissões.



Figura 17 – Equipamento de medição de emissões Testo.

1 - Unidade de controle; 2 – Caixa analisadora 350XL; 3 – Sonda dos gases de combustão.

4 – Conexão elétrica; 5 - Cabo de conexão para sinais de medição.

Através da sonda de gases, instalada no tubo de escape do motor, a bomba de transporte coleta a amostragem dos gases. Posteriormente, esta amostra de gás é levada até uma unidade condensadora, onde o gás é repentinamente resfriado, originando uma precipitação do condensado com adsorção baixa de NO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>. A seguir, os condensados são transportados por uma bomba peristáltica, a intervalos regulares, até o tanque de condensados localizado na parte inferior da caixa analisadora do Testo. Logo, o *gás seco* passa através do filtro de partículas e, estando liberado de MP, é bombeado até os sensores de medição do gás. Aqui, uma porção pequena se difunde através dos diafragmas destes sensores, os quais emitem um sinal para a unidade de controle do Testo. Finalmente, a insignificante porção do gás que não foi utilizado na medição, vai para a atmosfera através de um orifício de saída localizada na caixa analisadora.

A seguir, são apresentados alguns dados técnicos dos sensores utilizados:

Tabela 6 – Dados técnicos para a caixa analisadora Testo 350 XL

Sensor de Medição	Faixa de Medição	Resolução Mínima	Incerteza do valor medido
CO	0 – 10.000 ppm	1 ppm	±10 ppm (0-99 ppm) ±5% (100-2.000 ppm) ±10% (2001-10.000 ppm)
NO <sub>x</sub>	0 – 3.000 ppm	1 ppm	±10 ppm (0-99 ppm) ±5% (100-2.000 ppm) ±10% (2001-3.000 ppm)
HC	100 – 40.000 ppm	10 ppm	<400 ppm (100-4.000 ppm) ±10% (> 4.000 ppm)

Fonte: (Manual de Instruções Testo).

### Smoke Meter 415s

Este equipamento, após de recolher em um filtro a mostra dos particulados contidos nos gases de escapamento, é capaz de determinar pela reflexão de um feixe de luz, neste filtro “sujo”, a massa dos poluentes particulados emitidos por

unidade de volume dos gases de escape. A concentração da medição varia entre 0 e 32000 mg/m<sup>3</sup>, enquanto o nível de poluição varia entre 0 a 100%. Alternativamente mede-se o FSN (*filter smoke number*), que indica o grau de fumaça que enegrece o filtro de papel branco, numa escala que varia de 0 a 10. As respectivas resoluções de medição são 0,01 mg/m<sup>3</sup>, 0,01 % e 0,001 FSN.

O desvio padrão das medidas, em FSN, é  $\sigma \leq \pm (0,005 \text{ FSN} + 3\% \text{ do valor medido})$ .

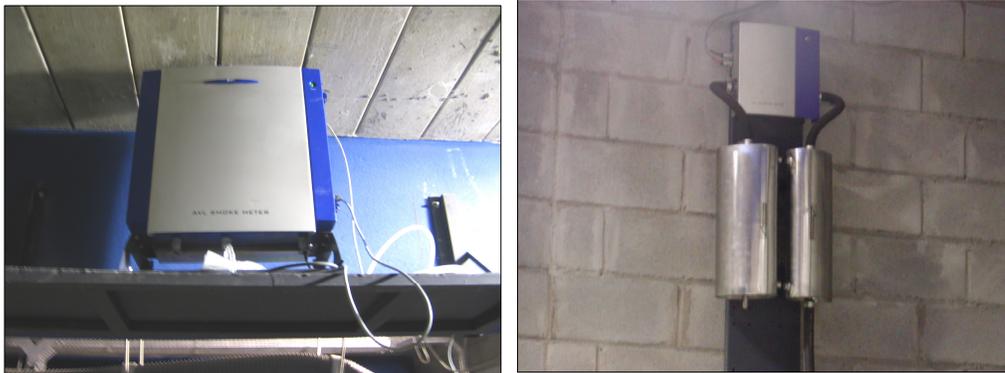


Figura 18 – *Smoke Meter* (lado esquerdo) e medidor de *Blow-by* (lado direito).

### 3.1.12. Medidor de *Blow-by*

Para a medição dos gases oriundo do cárter de óleo do motor, o LEV conta com um medidor *Blow-by* da marca AVL, modelo 442. A medida dessa vazão, nos testes de bancada, serve para o monitoramento do desgaste e desempenho do motor. O método de medição, utilizado neste equipamento, é baseado no princípio da medida do diferencial de pressão do fluxo que passa por um orifício. A unidade de medição é litro por minuto (l/min) com uma incerteza de 1,5 % do valor medido. Tais medidas não serão, entretanto, exploradas em detalhe uma vez que, fundamentalmente, em nada diferem das da operação original Diesel (Figura 18).

### 3.1.13. Equipamentos de Apoio

O sistema de refrigeração d'água do motor e do dinamômetro da bancada, é composto por uma bomba de motor elétrico marca WEG com potência de 15 cv e uma torre de arrefecimento, modelo 25/2-SG-11-INS-E, com vazão máxima de 10,8 m<sup>3</sup>/h e pressão de 1,2 mca.

A refrigeração do ar de admissão é através de um *intercooler*, refrigerada por água e interligada ao circuito da torre de arrefecimento através uma bomba, marca DANCOR de 1,5 cv.

O óleo Diesel é armazenado em dois tanques com capacidade de 125 litros cada uma, utilizados para suprir o motor em testes (vide Figura 15).



Figura 19 – Equipamentos de apoio

- 1 – Torre de arrefecimento; 2 – Bomba da torre; 3 – Bomba d'água do intercooler;  
4 – Compressor de ar; 5 – Tanques de óleo diesel.

A seguir, são apresentadas figuras adicionais que detalham a configuração do aparato experimental.



Figura 20 – Montagem do motor na bancada do dinamômetro

1 – Motor MWM 4.10TCA; 2 – Dinamômetro AVL Alpha 240.

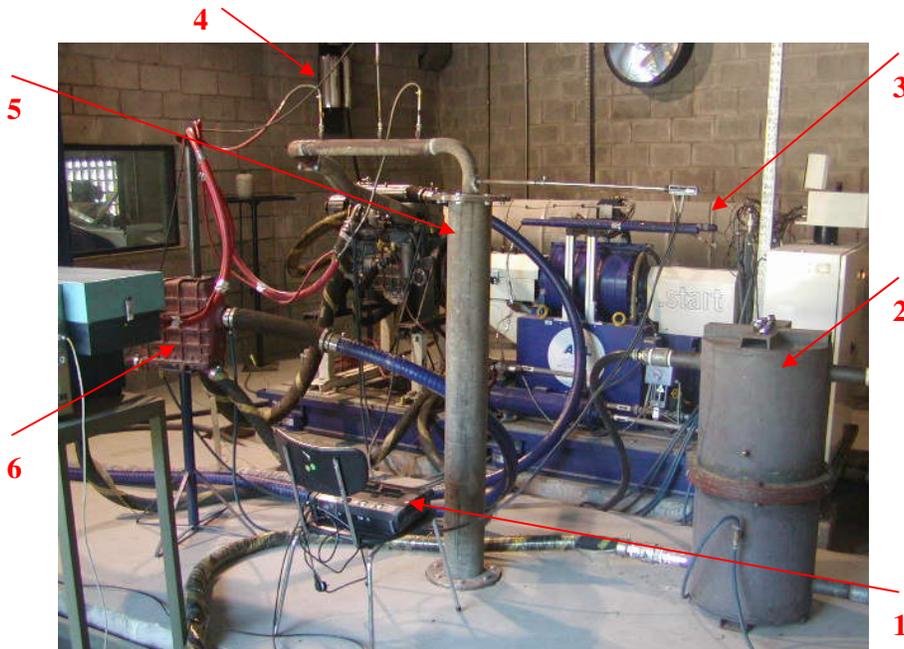


Figura 21 – Vista geral do experimento

1 – Caixa analisadora Testo 350XL; 2 – Tambor de medição de gás; 3 – Tambor de medição de ar; 4 – Blow-by; 5 – Tubo de escape; 6 – Intercooler.



Figura 22 – Cabine de controle e monitoramento

1 – Computador dedicado; 2 – Unidade de controle Testo 350XL; 3 – Válvula de controle de gás natural; 4 – Controlador eletrônico da borboleta de vazão de ar.

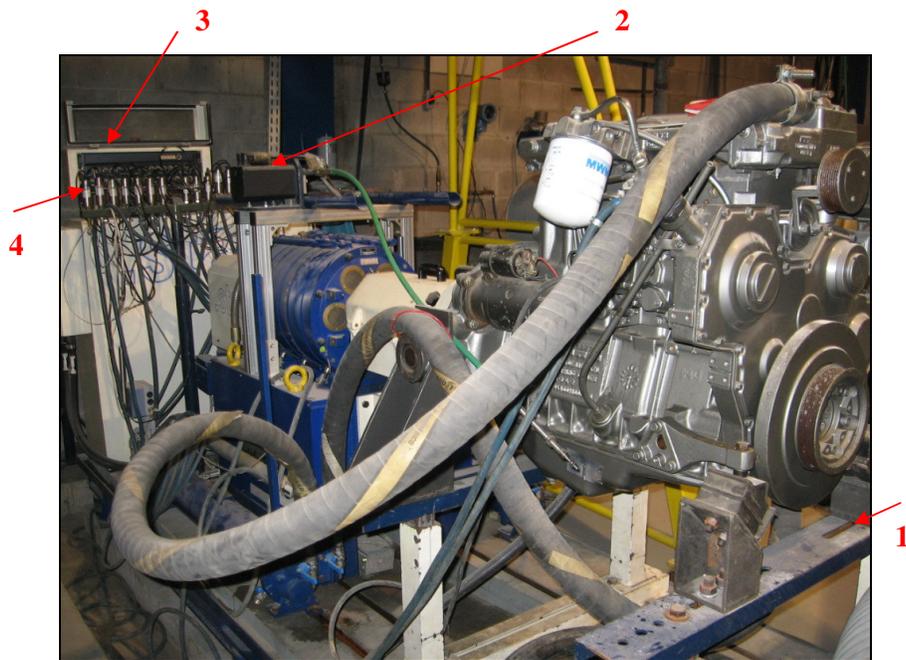


Figura 23 – Vista lateral esquerda do motor e dinamômetro

1 – Regulador de curso do acelerador; 2 – Atuador eletrônico da bomba de injeção diesel; 3 – Caixa de entrada analógica dos sensores; 4 – Transdutores de pressão.

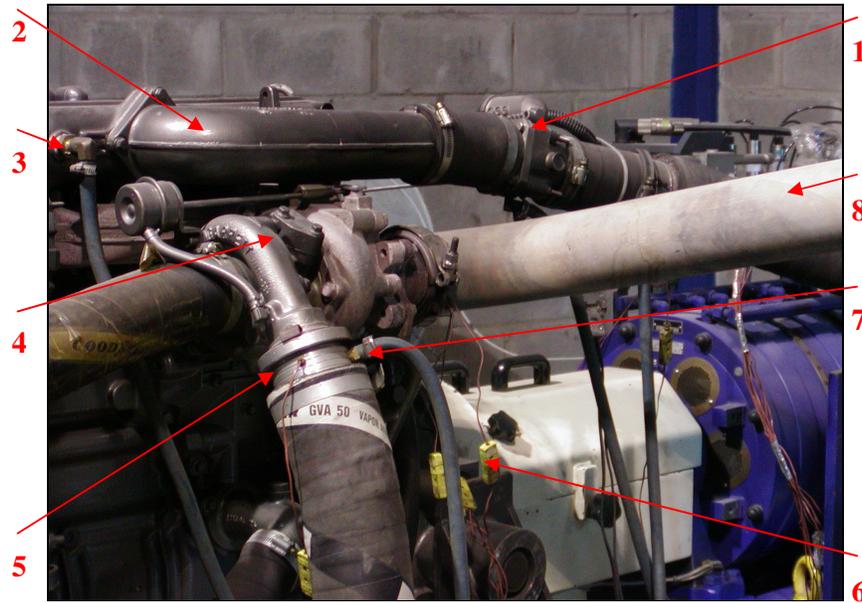


Figura 24 – Vista lateral direita do motor e dinamômetro

1 – Borboleta de controle eletrônico do ar; 2 – Coletor de admissão de ar; 3 – Tomada de pressão no coletor de admissão; 4 – Turbo - compressor; 5 – Termopar instalado na saída do turbo; 6 – Termopares instalados no escapamento; 7 – Tomada de pressão na saída do turbo; 8 – Tubo de escape.

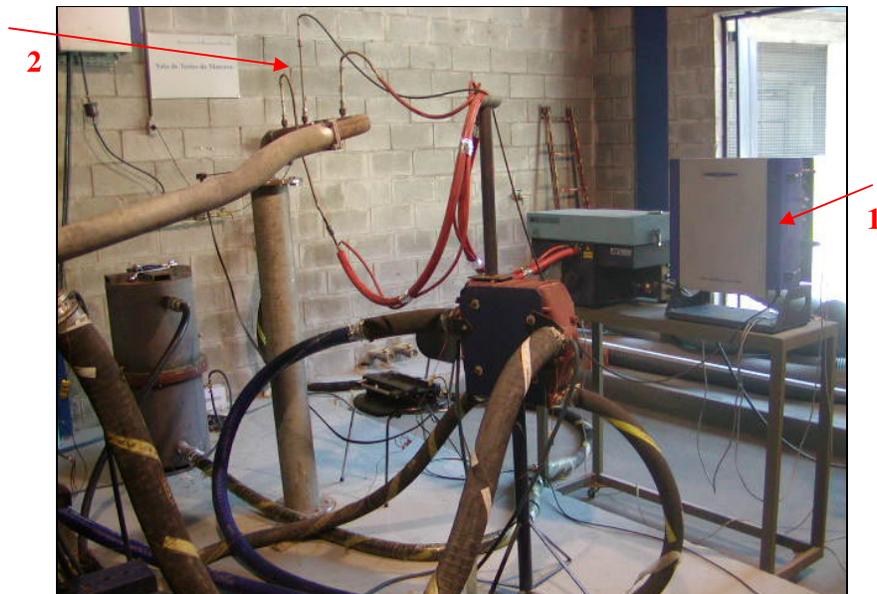


Figura 25 – Smoke Meter

1 – Smoke Meter; 2 – Sonda de gases do Smoke Meter.