

### **3 Bancada Experimental**

Foi projetado e construído um aparato experimental para avaliar o desempenho de um motor originalmente ciclo Diesel operando em modo HCCI. Todos os experimentos foram realizados nas instalações do Laboratório de Engenharia Veicular (LEV) da PUC – Rio.

O aparato experimental (Figura 3) está conformado basicamente por quatro módulos: a seção de testes (a, b, c, d, e, f, g, h, i), o sistema de alimentação de ar (j, k, l, m, n), o sistema de alimentação de combustível (o, p, q, r, s, t) e, a seção de aquisição e processamento de sinais (u). Um esquema é apresentado nas Figura 3 e Figura 4, onde se pode observar a distribuição de cada modulo. Cada um destas seções e sistemas tem objetivos específicos e indispensáveis para a realização de cada experiência. Embora a aquisição de dados e os controles sejam automáticos, a execução do experimento requer supervisão constante.

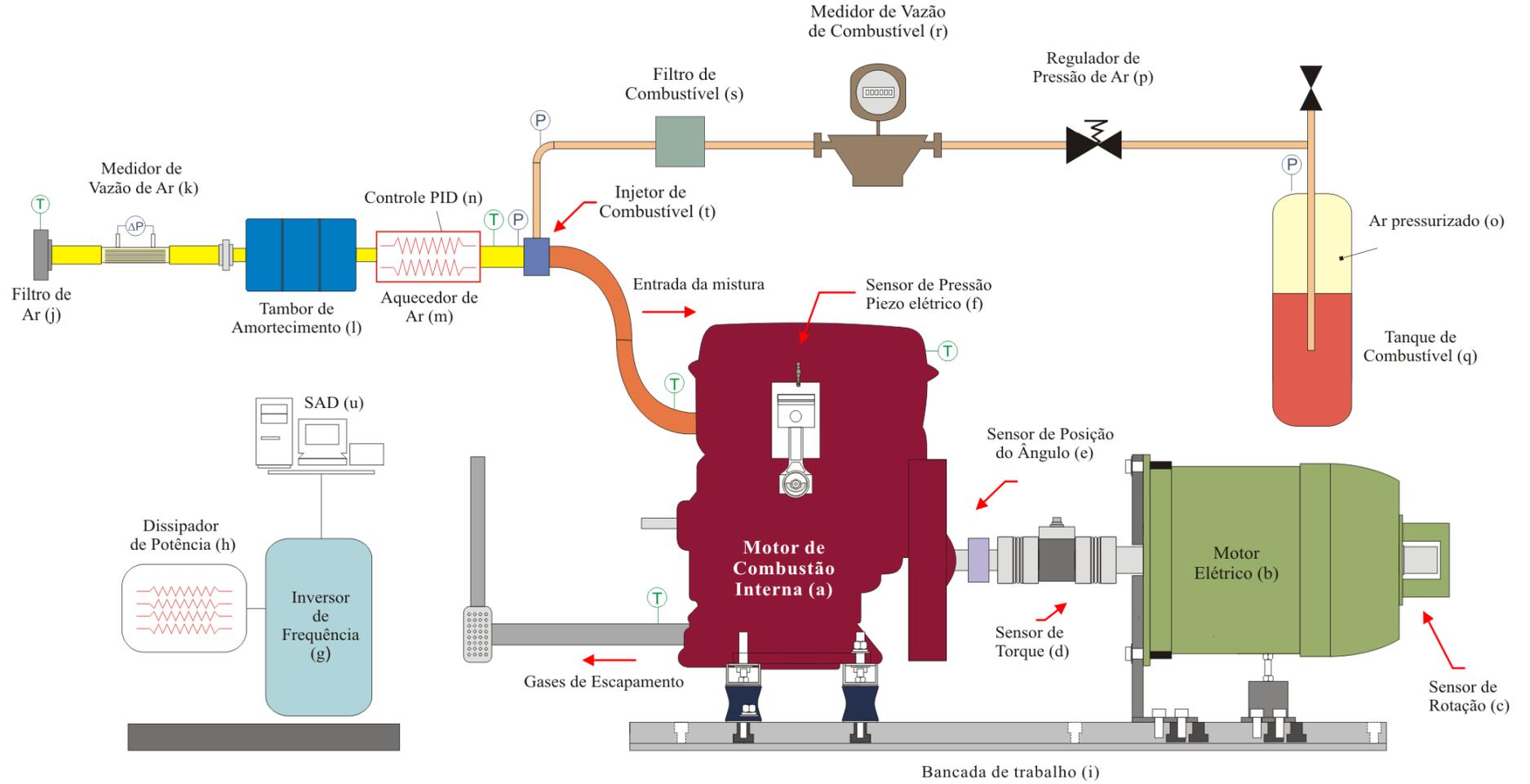


Figura 3. Esquema do Aparato Experimental.



Figura 4. Fotografia do Aparato Experimental.

### 3.1. Seção de Testes

A seção de testes (Figura 3) está composta pelo motor de combustão acoplado ao dinamômetro elétrico e a base metálica, todos eles descritos a continuação.

#### 3.1.1. Motor Diesel

Para o desenvolvimento dos testes foi utilizado um motor de ciclo Diesel monocilíndrico estacionário da marca YANMAR, modelo NSB50 refrigerado à água (Figura 5). Este motor é utilizado geralmente em aplicações para geração de eletricidade, bomba de água, compressor, etc. Na Tabela 3 são apresentadas as principais especificações técnicas do motor.

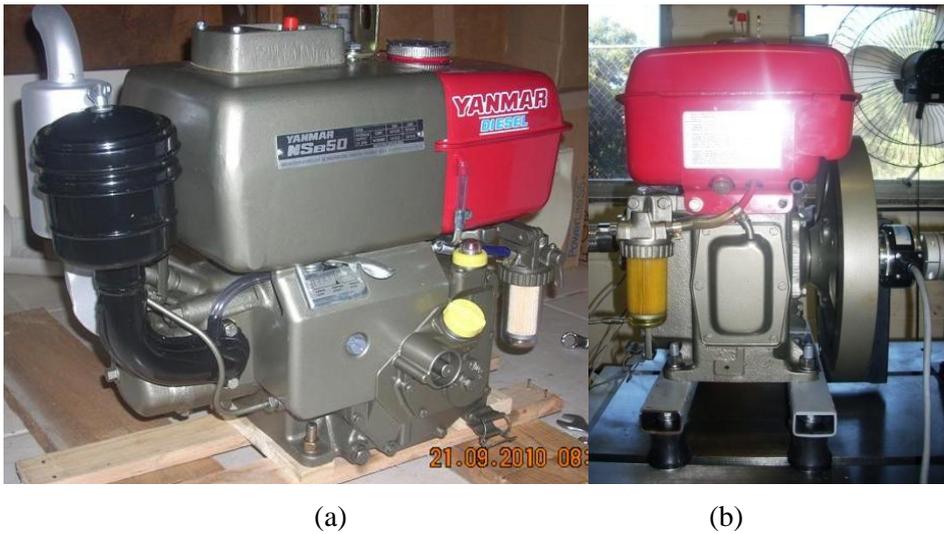


Figura 5. Motor Diesel. (a) Perspectiva de frente; (b) Perspectiva lateral.

Tabela 3. Dados técnicos do motor de combustão (Fonte: YANMAR)

<b>Ficha Técnica do Motor</b>	
<b>Descrição</b>	<b>Característica</b>
Fabricante	YANMAR
Modelo	NSB50
Ciclo de Funcionamento	4 tempos
Número de cilindros	1
Tipo	Monocilíndrico horizontal
Cilindrada Total	331 cm <sup>3</sup>
Diâmetro x Curso	75 mm x 75 mm
Sistema de Injeção	Indireta
Razão de Compressão	23,1: 1
Potencia Máxima	4,0 kW (2400 RPM)
Sistema de Partida	Manual
Sistema de Refrigeração	Tanque de Água
Consumo de combustível	267 g/kW.h
Peso do Motor	77 kg

A posição do ângulo da manivela é determinada pelo encoder ótico tipo incremental da marca Veeder-root, serie HS35N instalado no eixo do virabrequim. Este tipo de encoder tem uma resolução de 360 pulsos por revolução, o que corresponde à leitura de um pulso para cada grau da manivela na rotação do motor, permitindo assim, unir o sinal da pressão na câmara de combustão respeito ao ângulo da manivela.

A posição do ponto motor superior (TDC) do motor, determinada previamente pelo relógio comparador, é alinhada com o sinal do encoder para a respectiva leitura. Por tanto, para todos os dados apresentados, 0° CA é definido como o TDC no final da fase de compressão e, 360° o início da fase de admissão.



Figura 6. Sensor de Posição do Ângulo.

A pressão no cilindro do motor foi medida por um sensor de pressão tipo piezo elétrico da marca KISTLER, modelo 6052C instalado no interior da câmara de combustão. Sua função é visualizar os valores de pressão desenvolvidos durante o funcionamento do motor.

No presente trabalho, a pressão na câmara foi medida com uma taxa de aquisição de 70000 a 350000 dados por segundo, podendo ser visualizado na tela do computador, gerenciado pelo software LabView®.

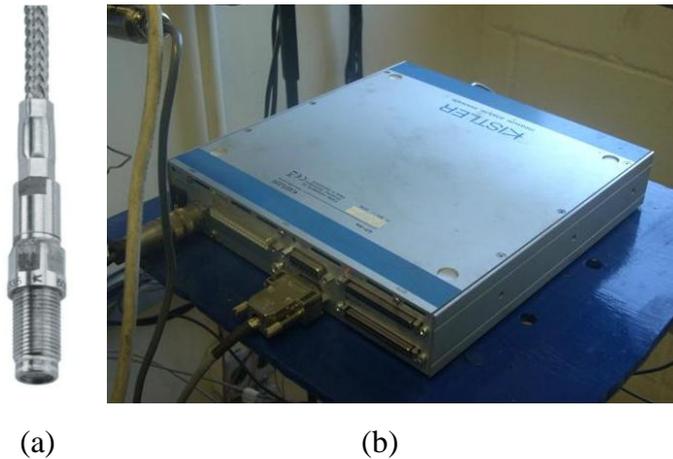


Figura 7. Sensor de Pressão Piezo Elétrico. (a) Sensor; (b) Amplificador de carga.

### 3.1.2. Dinamômetro Elétrico

O dinamômetro elétrico de bancada é composto pelo motor elétrico, o sensor de rotação (encoder), o sensor de torque, o inversor de frequência e o dissipador de potência (Figura 3). Este dinamômetro de bancada pode ser utilizado na avaliação de motores de combustão com rotações de até 3600 RPM e uma potência máxima de 7,5 kW (10 HP).

O motor elétrico do dinamômetro é um motor de alto rendimento, sendo suas características apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4. Dados técnicos do motor elétrico (Fonte: WEG).

Ficha Técnica do Motor Elétrico	
Descrição	Característica
Potência	7,5 kW (10 cv)
Tensão	220/380/440 V
Frequência	60 Hz
Rotação	3600 RPM

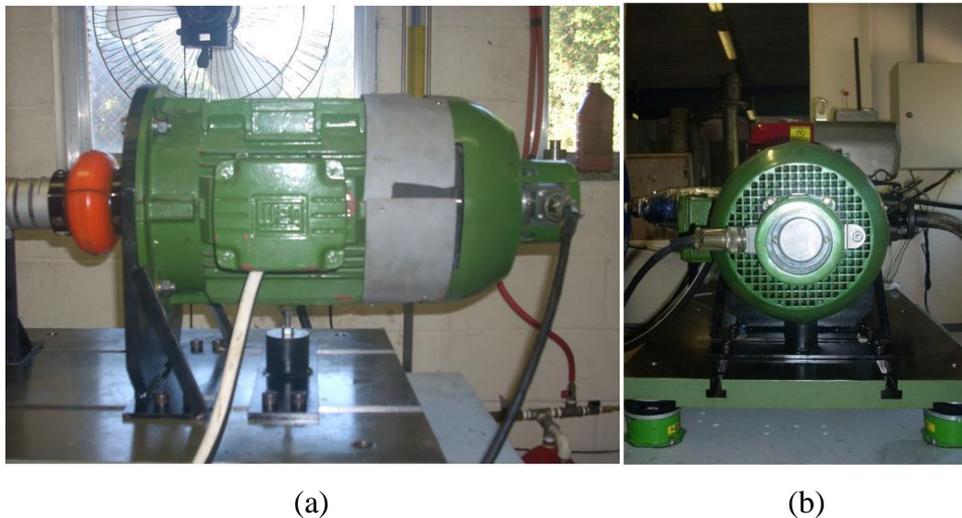


Figura 8. Dinamômetro Elétrico. (a) Vista Frontal; (b) Vista Lateral.

Nesta bancada experimental, o motor elétrico e o motor de combustão estão conectados em linha por um transdutor de torque (Figura 9). Este acoplamento é simples de remover e a instalação se encontra protegida por uma tampa metálica por motivos de segurança.

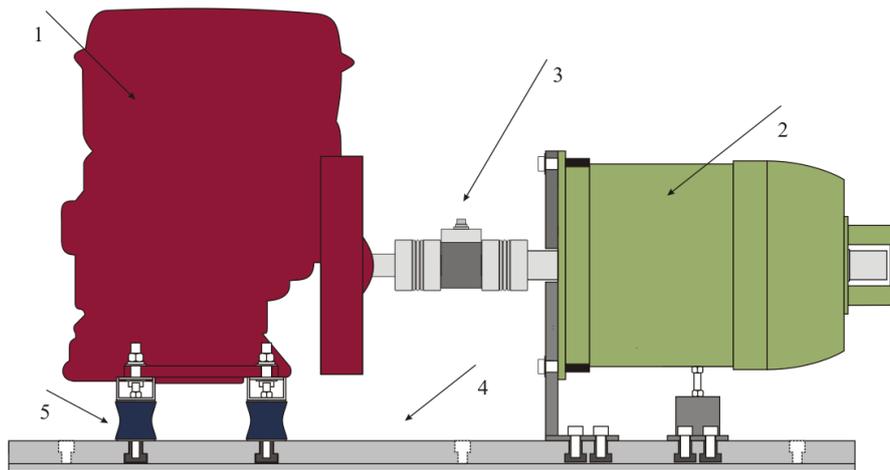


Figura 9. Conexão Motor Combustão – Dinamômetro Elétrico.

1- Motor de Combustão, 2- Dinamômetro, 3- Transdutor de torque, 4- Bloco de aço, 5- Amortecedores.

Um inversor de frequência da marca WEG, modelo CFW-11 (Figura 10), é responsável por comandar e controlar a rotação do motor elétrico e de sua própria frenagem. Também permite distribuir a carga para o motor elétrico ou para o dissipador de potência.



Figura 10. Inversor de Frequência.

Tabela 5. Dados Técnicos do Inversor de Freqüência (Fonte: WEG)

Ficha Técnica do Inversor de Freqüência	
Descrição	Característica
Tensão	
Monofásica	200-240 V
Trifásica	200-240 V / 380-480 V
Freqüência	50/60 Hz ± 2%
Fator de deslocamento	Maior que 0,98
Eficiência	Maior que 0,97

O dissipador de potência é uma resistência elétrica de 7,5 kW, igual à potência do dinamômetro elétrico. Tem a função de dissipar o excesso de energia no freio do motor, evitando que qualquer componente seja afetado.



Figura 11. Dissipador de Potência.

Para a medição do torque (Figura 12) foi utilizado um transdutor de toque em linha (conectado aos eixos do motor de combustão e do motor elétrico) da marca HBM, modelo T22 com uma capacidade de medição até 50 N·m. Este transdutor permite medir o torque dinâmico e estático em rotação.



Figura 12. Sensor de Torque.

Para medir a rotação utilizou-se um encoder da marca DYNAPAR BRAND serie HS35B, tipo incremental, que opera com rotação de até 3600 RPM. A tarefa do sensor é medir a rotação com que o motor elétrico está trabalhando.



Figura 13. Sensor de Rotação.

A base metálica (Figura 14) é um suporte fixo para o motor-dinamômetro, tem uma massa aproximada de 200 kg.

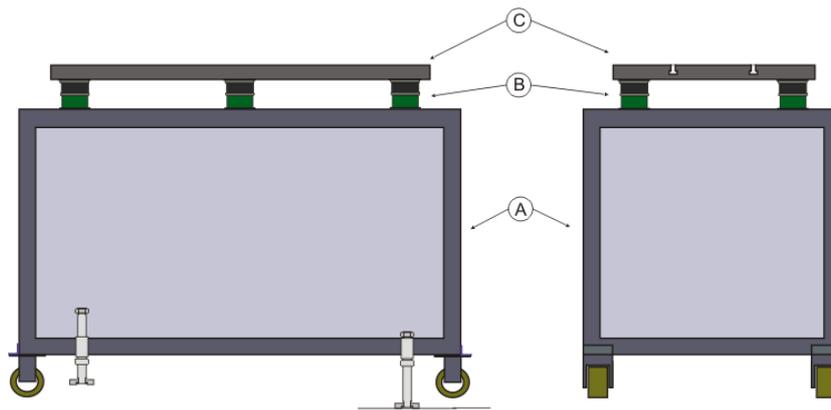


Figura 14. Bancada Experimental. (a) Bancada; (b) Amortecedor; (c) Bloco de Aço.

Para fixar o motor de combustão e o dinamômetro elétrico foi desenhado e construído um bloco de suporte de aço 1020 de 1,1 m x 0,6 m x 0,04 m (comprimento x largura x altura) que tem uma massa aproximada de 195 kg. O bloco foi colocado sobre a base (Figura 14) e apresenta canais em forma de T que permitem o ajuste vertical e horizontal do motor e do dinamômetro para o respectivo alinhamento dos eixos. Para diminuir a vibração da base metálica, foram instalados seis amortecedores ou “vibra-stops” da marca GERB (Figura 14) os quais foram projetados especificamente para as condições do trabalho. Eles conseguem suportar uma massa superior a 345 kg que foi a carga estática média calculada.

### 3.2. Sistema de Alimentação de Ar

O sistema de alimentação de ar (Figura 3) foi projetado para medir a vazão de ar, amortecer as oscilações no processo de aspiração e atingir as condições de temperatura do ar. O sistema está constituído pelo filtro de ar, o medidor de vazão, o cilindro de amortecimento e o aquecedor de ar.

O filtro (Figura 15) tem a tarefa de evitar que impurezas no ar entrem no medidor de vazão e no motor causando danos irreversíveis.



Figura 15. Filtro de Ar.

Para a medição da vazão de ar utilizou-se um medidor de vazão tipo laminar, marca Meriam Instrument, modelo Z50MH10-1. É composto por uma matriz de dutos capilares de 1 mm de diâmetro dentro de um tubo reto, os quais convertem o fluxo em um fluxo laminar. A queda de pressão (entrada e saída da matriz) é medida por um transdutor de pressão diferencial e convertida em vazão.

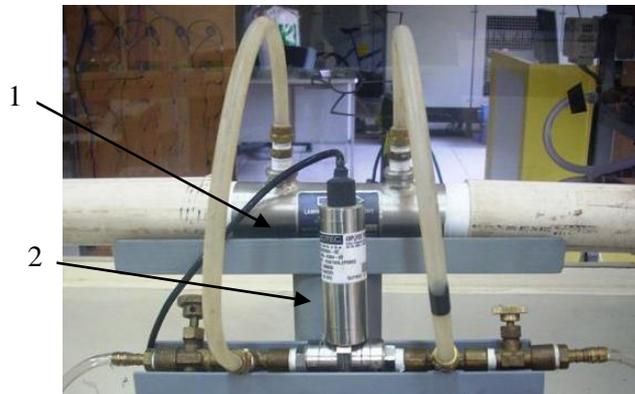


Figura 16. Sistema Medidor de Vazão de Ar. 1) Medidor de fluxo laminar; 2) Diferencial de pressão.

Também foi utilizado um cilindro de amortecimento chamado tanque pulmão. Este cilindro tem a função de corrigir a natureza intermitente do processo de aspiração de ar, diminuindo as oscilações presentes durante a sua sucção pelo motor.

O aquecedor elétrico de ar (Figura 17) devidamente isolado para possibilitar a menor perda de calor, é composto por duas resistências de 1000 W que permitem elevar a temperatura até 400°C. Este equipamento é usado nos ensaios para aumentar a temperatura do ar de admissão até atingir o valor desejado, em função do tipo de combustível utilizado.



Figura 17. Aquecedor de Ar.

Para o controle da temperatura do ar de admissão utilizou-se um dispositivo eletrônico chamado controle PID, da marca COEL, modelo HW4900 (Figura 18). Este dispositivo regula a temperatura do ar aquecido que entra no motor para sua posterior mistura com o combustível.



Figura 18. Controle de Temperatura PID.

### 3.3. Sistema de alimentação de combustível

O sistema de alimentação de combustível (Figura 3) é responsável pelas tarefas de armazenar, medir e controlar a vazão de combustível para o desenvolvimento da operação do motor, em modo HCCI. O sistema é composto pela linha de pressurização, depósito de combustível, medidor de vazão, filtro de combustível e bico injetor.

A linha de pressurização é responsável por comprimir o nitrogênio no depósito de combustível. A partir das válvulas de controle do tanque, a pressão de saída do nitrogênio pode ser controlada, permitindo pressurizar toda a linha de combustível de acordo com as condições desejadas.

O depósito de combustível é um tanque pressurizado com nitrogênio, com 12 litros de capacidade, e tem a função de armazenar o combustível.



Figura 19. Tanque de Combustível Pressurizado.

Na Figura 20 pode-se observar os detalhes das conexões no depósito de combustível. Este reservatório possui uma mangueira transparente para verificar o nível de combustível no tanque. Para encher o tanque novamente com combustível utiliza-se a linha de retorno que vem do tanque de restituição. Um tubo de ventilação é instalado para liberar os vapores acumulados quando a bancada não se encontra em funcionamento. Para a utilização do combustível, o bico injetor é acionado e o nitrogênio comprime o combustível no tanque, saindo

pela mangueira de conexão instalada na base do tanque e passa através do medidor de vazão, do filtro de combustível e, finalmente pelo bico injetor.

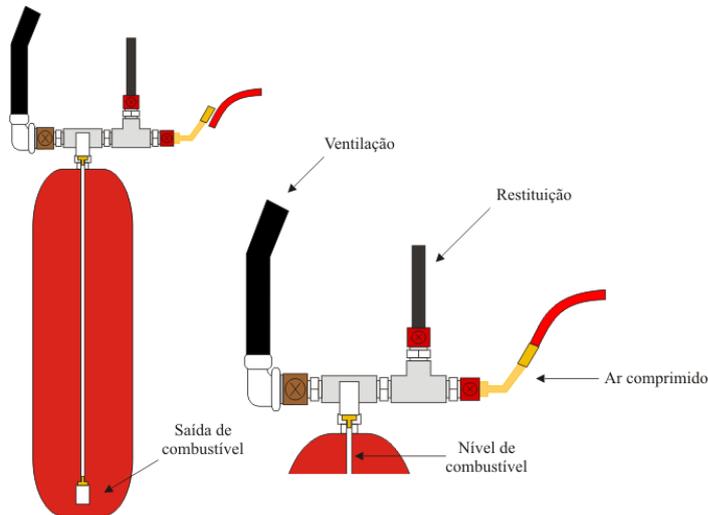


Figura 20. Detalhe Tanque de Combustível (esquerda), detalhe de válvulas (direita).

O regulador de pressão (Figura 21) tem a tarefa de controlar a pressão de nitrogênio a fim de pressurizar todo o sistema. Para o trabalho foi estabelecida uma pressão de 2 bar (29 psi).



Figura 21. Regulador de Pressão e Tanque de Nitrogênio.

A medição da vazão do combustível foi realizada por um medidor tipo CORIOLIS, da marca Micro Motion, modelo 2200S. Este equipamento tem uma capacidade de medição entre 0 a 108 kg/h e uma incerteza de  $\pm 0,05\%$ , permitindo assim, determinar o consumo de combustível utilizado nos ensaios.



Figura 22. Medidor de Vazão de Combustível.

O filtro de combustível (Figura 23) é instalado para proteger o sistema de sujeira, ferrugem, incrustações e outros elementos que podem entupir o bico injetor, causando falhas no funcionamento do sistema de alimentação.



Figura 23. Filtro de Combustível.

Nos testes experimentais em modo HCCI foi utilizado um sistema de injeção eletrônico, constituído por um bico injetor de moto, podendo operar na faixa de 2 até 3,5 bar (Figura 24). Sua função principal é fornecer o combustível para dar início ao processo de auto-ignição na câmara de combustão.

O sistema de injeção diesel (forma original) foi mantido sem variação e utilizado para o aquecimento inicial do motor em modo Diesel. O bico injetor é posicionado sobre uma base em forma de T onde a mistura ar-combustível se forma. No caso dos ensaios em modo HCCI, a injeção do combustível é realizada diretamente na entrada do ar (depois do filtro e do medidor de vazão). Por tanto,

um sensor de pressão é instalado antes do bico injetor para medir a pressão do combustível durante sua entrada no motor.

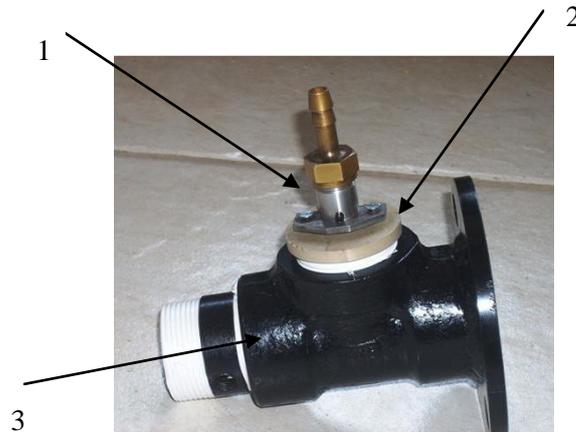


Figura 24. Posição Bico Injetor (Base "T"). 1) Bico injetor; 2) Isolante; 3) Base T.

O combustível utilizado para os ensaios HCCI foi gasolina tipo C. A escolha da gasolina deve-se a sua volatilidade e resistência á detonação, permitindo gerar melhores parâmetros de rendimento. No Brasil, a gasolina tipo C é de uso automotivo e está constituída de uma mistura de gasolina A e álcool etílico anidro (etanol). Basicamente o álcool é adicionado à gasolina com o objetivo de melhorar suas propriedades antidetonantes, permitindo assim trabalhar com motores de altas razões de compressão. Atualmente, usa-se  $25\% \pm 1\%$  de etanol na mistura do combustível (gasolina tipo C).

### 3.4. Seção de Aquisição e Processamento de Dados Experimentais

O Sistema de Aquisição de Dados é composto por dois componentes: o sistema de aquisição de dados e o computador pessoal (PC). O equipamento de aquisição é ligado ao PC (Figura 25) e recebe os dados dos sensores instalados no aparato experimental. Estes dados são enviados ao PC onde são armazenados e posteriormente processados. O software utilizado para a integração e aquisição dos dados foi o LABVIEW<sup>®</sup> da fabricante National Instrument (Figura 26 e Figura 27). Este possui uma interface que permite uma fácil configuração. Também se trabalhou com o Excel, da Microsoft, para o pós-processamento.

A vantagem de trabalhar com LABVIEW é sua interface que permite juntar graficamente a visualização dos parâmetros avaliados, junto com a capacidade de

controlar as variáveis de interesse. Os sinais são adquiridos por uma placa PXI1052, que é uma estrutura que suporta um micro processador core dois duo PXI8106, junto a uma placa de entrada e saída analógica/digital PXI6229 que tem uma taxa de aquisição de 350000 dados por segundo e apresenta 32 canais analógicos que podem ser divididos para a aquisição de valores de temperatura, pressão e vazões de combustível e de ar. No caso dos dados da pressão interna na câmara, os dados foram capturados em outro computador com uma placa de alta velocidade de aquisição dos dados de 1 mega-sample por segundo.



Figura 25. Visualização do Sistema de Aquisição e Processamentos de Dados.

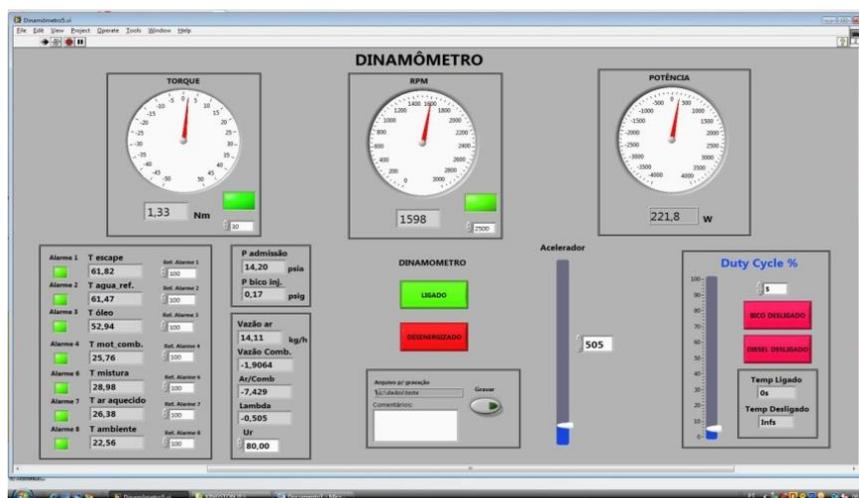


Figura 26. Imagem do Gerenciamento em LabView®, controle e medição.



Figura 27. Imagem do Gerenciamento em LabView®, pressão no cilindro Vs. ângulo do virabrequim.

### 3.5. Equipamentos de Apoio

#### 3.5.1. Sensores de Temperatura e Pressão

Para a medição da temperatura foi utilizado termopares tipo K (NiCr-NiAl) e o sensor de temperatura PT-100, todos da marca OMEGA. Estes sensores foram distribuídos em diversos pontos estratégicos, em acordo com a Tabela 6. Alguns tiveram que ser revestidos para suportar altas temperaturas.

Tabela 6. Distribuição e Especificações dos Sensores de Temperatura.

Sensor de Temperatura	Intervalo de Operação	Ponto de Medição (Temperatura)
Termopar Tipo K	0-1250 °C	Mistura ar-combustível Água de refrigeração Óleo do motor Gases de Escapamento Temperatura ambiente
PT-100	(-)200-650 °C	Saída do aquecedor de ar

Para a medição da pressão em diferentes partes da bancada experimental foram utilizados transdutores de pressão de medida diferencial e absoluta da marca SENSOTEC e Omegadyne respectivamente. Estes também foram localizados estrategicamente (Tabela 7).

Tabela 7. Distribuição e Especificação dos Transdutores de Pressão.

Tipo de Transdutor de Pressão	Faixa de Operação	Ponto de Medição (Pressão)
Diferencial	0 – 10 in H <sub>2</sub> O	Medidor de vazão de ar
Absoluta	0 – 100 psi	Entrada linha de admissão Entrada do bico injetor

### 3.5.2. Medidor de Umidade Relativa

Para a medição da umidade relativa do ar foi utilizado um equipamento da marca Omega, modelo HHM25 com uma incerteza na medição de 5%. Este equipamento permitiu a determinação da constante de excesso de ar.



Figura 28. Medidor de Umidade Relativa.