

### 3. Aparato Experimental

A caracterização e avaliação dos parâmetros do presente trabalho foram feitos no Laboratório de Engenharia Veicular (LEV) da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC).

Primeiro foi preciso projetar e construir um dinamômetro de bancada o qual pode avaliar motores de até 7,5 kW (10 cv). Assim, foi testado um motor de baixa potência o qual foi instrumentado com sensores e atuadores. O sistema de controle e registro foi feito com ajuda da equipe de automatização do LEV.

A bancada experimental é apresentada primeiramente em um esquema gráfico e depois através de uma foto panorâmica dos equipamentos utilizados, Figura 10 e Figura 11

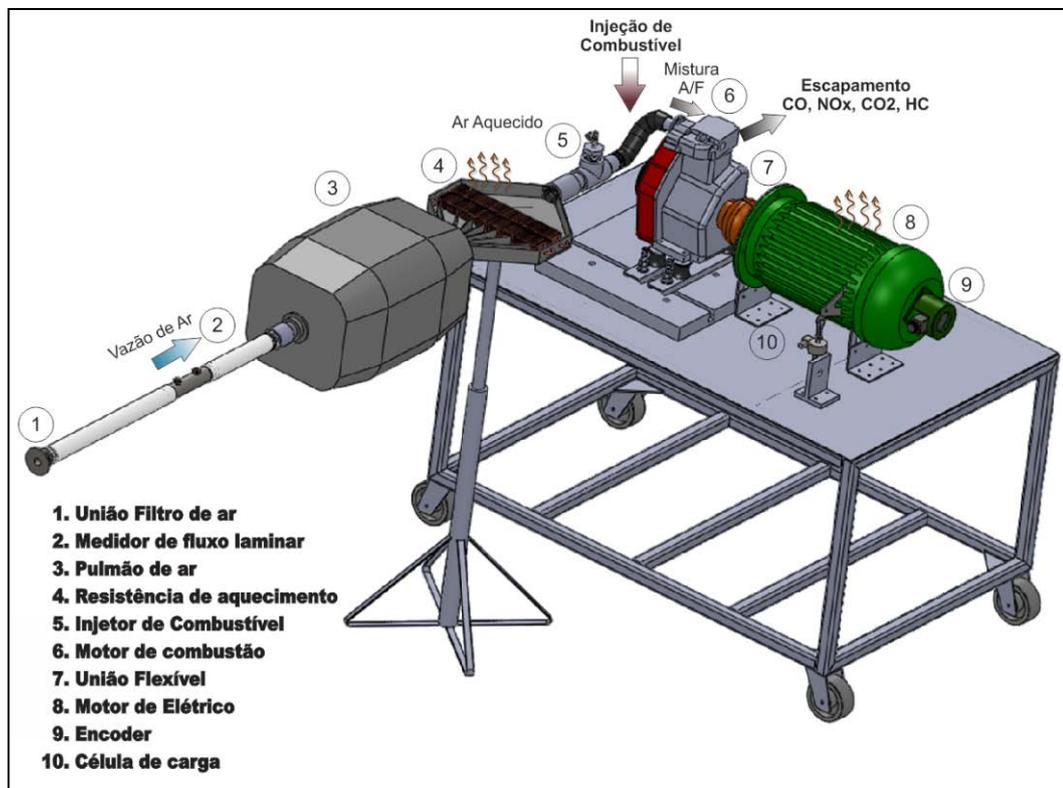


Figura 10 – Bancada experimental



Figura 11 – Bancada experimental com os equipamentos de controle

### **3.1. Sistema Motor**

#### **3.1.1. Motor diesel avaliado**

O motor utilizado foi modificado no sistema de alimentação do combustível para a injeção de gasolina em operação HCCI. Para a operação diesel convencional e HCCI o arranque foi feito através do motor elétrico. O sistema original de arranque era constituído de um manípulo de partida. A injeção de combustível em modo HCCI é feita diretamente no sistema de entrada de ar antes da válvula de alimentação (injeção indireta), porém o sistema de injeção é direta na câmara de combustão no modo Diesel. Foi incluído um medidor de vazão de ar depois do filtro de ar. As especificações técnicas do motor são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Dados técnicos do motor (Fonte: LINTEC)

<b>Ficha Técnica do Motor</b>	
Fabricante modelo	LINTEC / D5 Diesel
Ciclo de funcionamento	4 Tempos
Número de cilindros	1 (monocilíndrico)
Diâmetro: Curso	70 : 55
Cilindrada (cm <sup>3</sup> )	211
Taxa de compressão	20,5:1
Rotação do motor (RPM)	3600
Potência máxima (kW)	3,1
Pressão Efetiva Média (kPa)	430,9
Consumo de combustível (g/kW)	≤299,2(220)
Tempo das válvulas de Admissão	BTDC 18° 30' ATDC 45° 30'
Tempo das válvulas de Exaustão	BTDC 50° 30' ATDC 8° 30'



Figura 12 – Vista do motor

### 3.1.2. Dinamômetro

Projetou-se e construiu-se um dinamômetro de bancada, já que no LEV não se tinha nenhum que se adaptara ao tamanho e potência do motor avaliado. O dinamômetro de bancada pode ser utilizado para a avaliação dos motores com um nível máximo de velocidade de 3600 RPM, e é capaz de suportar uma potência máxima de 7,5 kW, isso fundamentalmente pelas características do motor elétrico.

O dinamômetro gira no sentido das agulhas do relógio, e pode ser acoplado a um motor por vez. A velocidade do motor elétrico é controlada por um inversor de frequências, assim também este último tem a função de realizar a frenagem do mesmo. As principais características dos equipamentos são fornecidas na Tabela 5. O equipamento que faz a medição dos RPM é um encoder DYNAPAR HS 35, o qual tem uma faixa de operação máxima de 3600 RPM.

Tabela 5 – Dados técnicos do inversor de frequência. (Fonte: Weg, 2007)

Ficha técnica do Inversor de frequência		
Tensão e frequência	Monofásica	200-240 V/+10%/-15% 1,5 a 3cv
	Trifásica	200-240 V/+10%/-15% 1 a 40 cv
		380-480 V/+10%/-15% 2 a 60cv
Frequência	50/60 Hz +-2% (48 a 63 Hz)	
Eficiência	Maior que 0,97	

O motor elétrico do dinamômetro tem as características que são apresentadas na Tabela 6

Tabela 6 – Dados técnicos do motor elétrico (Fonte: Weg, 2007)

Ficha técnica do motor Elétrico	
Marca	WEG
Potência	7355 W (10 cv)
Rotação máxima	3600 RPM
Tensão	220/380/440 V
Frequência	60 Hz
Número de polos	2

O torque gerado pelo motor é medido indiretamente por uma célula de carga, a qual é capaz de medir até uma carga de 200 kg-f. O dinamômetro e o motor estão unidos por um acoplamento Standar Rex Omega. O acoplamento é fácil de remover, e se encontra protegido por uma tampa metálica por motivos de segurança.

### 3.2. Sistema de condução Ar – Combustível

#### 3.2.1. Alimentação de Combustível

Na alimentação do combustível foi empregado o sistema que se apresenta na Figura 13. Na construção do mesmo se teve cuidado para que fosse suficientemente resistente a altas temperaturas e pressões de operação. É importante também assegurar que o sistema de condução de combustível seja completamente hermético para evitar vazamentos no interior da sala de ensaios, ou altas concentrações do combustível ao interior.

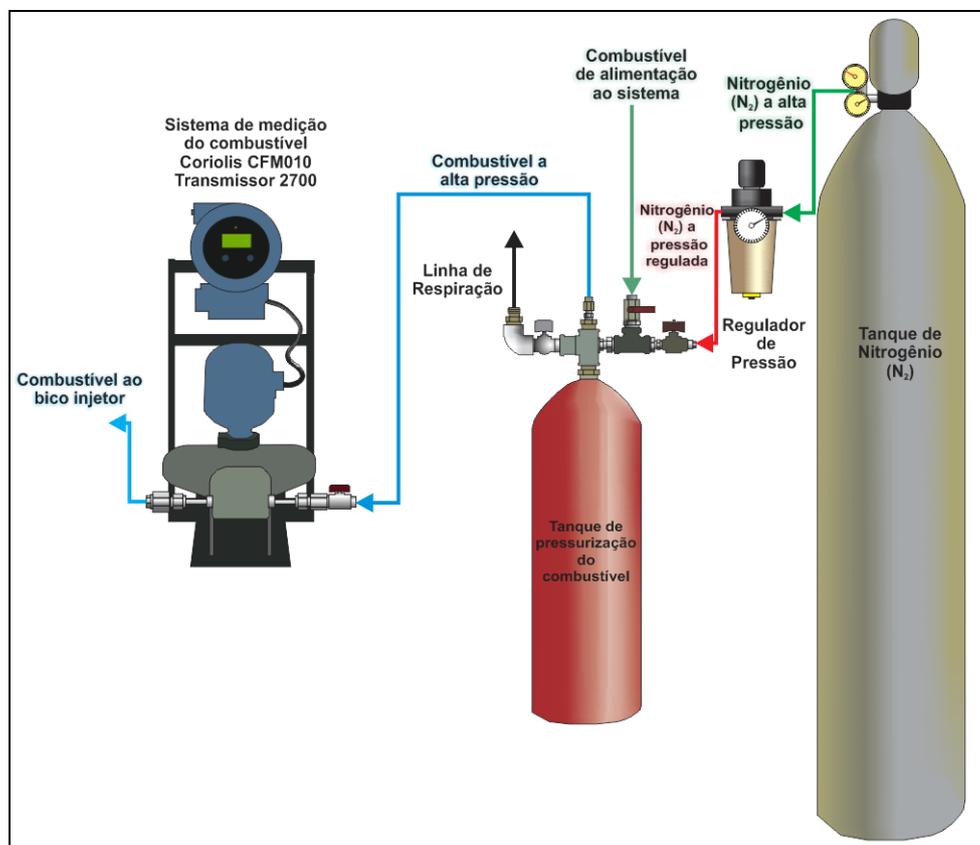


Figura 13 – Sistema de alimentação de combustível

Esvaziamentos de ar prejudicam as medições, e os esvaziamentos de combustível são perigosos para a saúde e apresentam risco de explosão.

A injeção do combustível é feita diretamente na corrente de entrada de ar, através de um bico injetor IWP Magneti Marelli, que opera na faixa de 2.7 até 5 bar. Para a medição do combustível que está sendo injetada foi acoplado um coreolli CFM010 Micromotion junto a um transmissor modelo 2700. Para atingir a pressão de funcionamento do bico injetor, um sistema de pressurização com nitrogênio e com regulador de pressão na saída foi acrescentado ao sistema (ver Figura 13). O sistema de injeção de diesel foi mantido sem variação, e foi muito útil para o aquecimento inicial do motor e os ensaios em modo Diesel.

### **3.2.2. Alimentação de Ar**

O sistema de alimentação de ar foi modificado para a inserção de um medidor de fluxo laminar, fornecido pela Meriam Instrument para determinar a vazão de ar; um tanque pulmão amortece as oscilações presentes em um motor de quatro tempos. Um sistema de resistências elétricas foi colocado imediatamente depois do tambor de ar para atingir as condições de aquecimento de ar necessárias para a auto-ignição em modo HCCI (ver Figura 10). Este sistema está constituído de duas resistências elétricas aletadas de 1000 W cada uma.

A aspiração de combustível é feita naturalmente, pelo qual a pressão inicial depois do fechamento da válvula de alimentação não tem grandes desvios da pressão atmosférica, mas se estima a diminuição da eficiência volumétrica pelos componentes (conexões, pulmão de ar e aquecedor principalmente) do sistema de condução de ar ao motor.

A mistura de ar – combustível é feita em uma conexão tipo T, onde o ar aquecido se mistura com o combustível injetado pelo bico, para depois ingressar através da válvula de admissão até o interior do cilindro, pronta para iniciar o processo de combustão homogênea.

### **3.2.3. Combustível**

O combustível utilizado no funcionamento HCCI foi gasolina tipo A, tendo em vista a vantagem quanto à volatilidade e resistência à detonação, que pode gerar melhores rendimentos no tipo de processo de combustão. O diesel se utilizou no aquecimento prévio do motor e testes para a avaliação do motor no ciclo convencional de melhor desempenho. As especificações segundo o regulamento técnico da ANP nº05 de 2001, da gasolina tipo A se acham na tabela do Apêndice B.

É bom reparar que no mercado de combustíveis a gasolina C é de uso automotivo e está constituída de uma mistura de gasolina A e álcool etílico anidro (AEAC). O álcool é adicionado à gasolina como um antidetonante, no lugar do Chumbo Tetraetila  $[Pb(C_2H_5)_4]$  que era usado antigamente. No Brasil o uso do álcool foi devido à procura de combustíveis substitutos depois dos choques do petróleo (PROÁLCOOL).

### **3.3. Sistema de controle e medição**

O sistema de controle e medição está constituído por um conjunto de sensores e medidores, os quais se encontram integrados através do LabView, programa fornecido pela National Instrument. Os valores dos dados capturados foram apresentados através das telas de dois computadores, principalmente pela quantidade e velocidade de registro nas medições.

#### **3.3.1. Medição da rotação**

O sistema de medição da rotação em RPM foi feito através de um encoder DYNAPA brand serie HS35, tipo incremental, o qual opera até 3600 RPM, onde a faixa da temperatura de operação normal é de -40 até 70 °C.



Figura 14 – Encoder HS35. Tipo incremental.

### 3.3.2. Medição do torque

A determinação do torque gerado pelo motor a combustão é feito com ajuda de uma célula de carga de marca HBM modelo U2A – 200, que mede a força aplicada sob ela. O valor desta força é multiplicado pelo braço de alavanca (cumprimento de 20 cm) para obter o valor do torque, o qual é salvo e mostrado na tela do computador em tempo real. A incerteza característica para o equipamento é de 0,1 %, mas se espera que este valor seja maior na faixa de operação.



Figura 15 - Célula de carga U2A – 200

### 3.3.3. Medição da Umidade Relativa

A importância na determinação deste parâmetro aumenta quando se precisa calcular a constante de excesso de ar ( $\lambda$ ) ou determinar alguns fatores de correção. Utilizou-se um equipamento da Omega (modelo HHM25) que permitiu a determinação da temperatura do ambiente por um termopar tipo k, e a umidade relativa através de uma sonda (ver Figura 16). A incerteza do equipamento na faixa de medição foi de 5 %.



Figura 16 – Medidor de umidade relativa e temperatura Omega HHM25

### 3.3.4. Medição de temperatura

Para a aquisição dos dados da temperatura se utilizou termopares de tipo K (NiCr –NiAl). No sistema de alimentação de ar aquecido, e depois da injeção de combustível se utilizaram o mesmo tipo de termopares, mas com um revestimento para suportar altas temperaturas.

Utilizou-se um PT-100 para o monitoramento da temperatura na saída do aquecedor e assim ter um melhor controle da temperatura de entrada. Na Tabela 7 se apresenta os pontos de registro de temperatura e o tipo de sensor utilizado.

Tabela 7 – Tipos de sensores de temperatura utilizados nos pontos de medição

<b>Tipo de transdutor</b>	<b>Fabricante</b>	<b>Medição</b>
Termopar K (NiCr – NiAl)	Omega	Temperatura na entrada ao medidor LFE. Temperatura da mistura ao ingresso ao motor. Temperatura da parede do motor de combustão Temperatura do óleo refrigerante. Temperatura do motor elétrico Temperatura dos Gases de Escapamento
Pt-100	Omega	Temperatura na saída do aquecedor do ar

### 3.3.5. Medição de Pressão

Para a medição da pressão foram utilizados dois tipos de transdutores; os de medida diferencial e de medida absoluta. Os pontos de registro foram: a pressão do bico injetor da gasolina, na linha de alimentação e no medidor de fluxo laminar. A pressão ao interior do cilindro foi determinada mediante a utilização de um sensor piezo-elétrico KISTLER, e suas características serão vistas na seção seguinte.

Tabela 8 – Especificações dos transdutores de pressão e os pontos de medição

Tipo de transdutor	Modelo	Fabricante	Medição
Diferencial	FDW/E004-02	Sensotec	Pressão no medidor de vazão de ar
Absoluto	PX 309-100AI	Omegadyne	Pressão na linha de alimentação
Absoluto	PX 309-100AI	Omegadyne	Pressão no bico injetor

### 3.3.5.1. Medição da Pressão de Combustão

Precisa-se de um sistema de medição para a pressão de combustão, o qual vai estar constituído de um transdutor de pressão piezométrico e de um amplificador de carga. O transdutor de pressão produz uma carga elétrica quando uma pressão é aplicada em seu diafragma. O amplificador gera uma tensão de saída proporcional a essa carga, mas com uma ordem de grandeza maior à entrada. O efeito piezométrico é baseado no fenômeno que ocorre com o cristal de quartzo, quando é submetido a uma pressão (pressão de compressão) gerando uma carga elétrica, essa carga é convertida em um sinal de tensão (voltagem). O sinal obtido pode ser analisado diretamente por um osciloscópio ou digitalizado por um conversor analógico digital. O referencial para a determinação do tempo requerido para cada revolução (360°) é fornecido por um sensor de movimento (Pick-Up) e assim foi possível a determinação do tempo total de ciclo para os quatro tempos do motor, o esquema do sistema utilizado é apresentado na Figura 17.

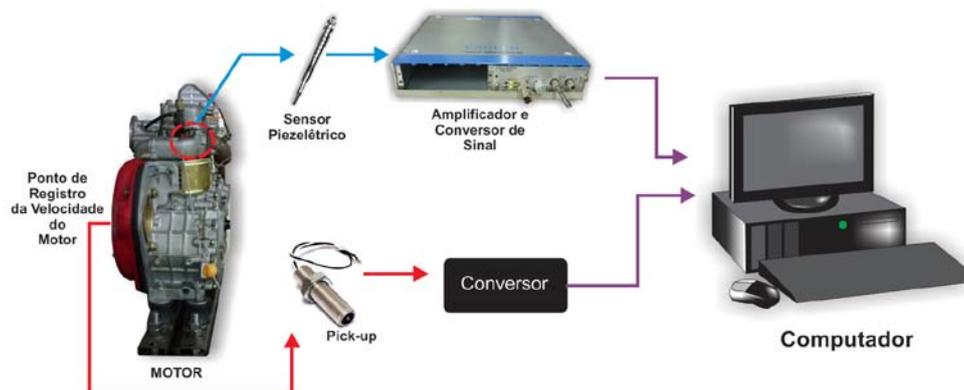


Figura 17 – Sistema de interligação dos equipamentos para o registro da pressão de combustão.

As características para o sensor piezo-elétrico são apresentadas na Tabela 9, o erro pelo choque térmico é devido à diferença de temperaturas no mesmo sensor, que tem uma parte em contato direto com a combustão, e outra se encontra fora ou exposta ao ambiente.

Tabela 9 – Especificações técnicas do sensor piezelétrico 6052CS31U20 KISTLER

<b>Características</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor</b>
Faixa de trabalho	bar	0 até 300
Sobrecarga	bar	350
Sensibilidade	pC/bar	≈ - 20
Temperatura de operação	°C	- 50 até 400
Erro por Choque Térmico Máximo	%	< ± 2

O encoder ótico foi instalado no eixo do motor elétrico e forneceu o sinal digital na forma de pulso para a medição da rotação do motor em RPM. O registro do sinal do encoder tem resolução mínima de 0,35°, a qual é enviada diretamente à placa de aquisição de dados do PXI. Uma sinalização para o TDC é necessária como referência para o encoder, assim primeiro se determinou o TDC com ajuda de um relógio comparador. Nesse ponto se fez uma marca como se apresenta na Figura 18. Um Pick up indica diretamente a posição do TDC.



Figura 18 – Marca de referência para a determinação do ponto morto superior.

O sinal do sensor de pressão é enviado a um amplificador de carga, modelo 5064A2 KISTLER, que está conectado a uma placa de aquisição de dados do sistema, com capacidade de 20 canais de entrada, e com conversor analógico digital de 12 bits. O software feito no LABVIEW é capaz de traçar a curva pressão – tempo. A mínima taxa de aquisição de dados para uma boa observação do comportamento da pressão no interior da câmara de combustão é obtida pela relação segundo o Kuratle & Märki (1992).

$$SR = \frac{N \times 360}{RES} \quad (3.1)$$

Onde SR é a taxa de aquisição em Hz, RES é a resolução angular em graus e N é a velocidade do motor em revoluções por segundo (RPS).

### 3.3.6. Medição de combustível

A medição da vazão de combustível foi feita mediante a utilização de um Corioli CFM010 Micromotion com transmissor modelo 2700, o qual tem uma precisão variável segundo a faixa de fluxo de combustível que se está operando sendo o limite máximo de operação de 108 kg/h.

A Tabela 10 mostra a variação da precisão nas escalas de medição do equipamento quando se aumenta ou diminui a faixa de medição.

Tabela 10 – Variação da precisão do Corioli CFM010 quando se diminui a faixa de fluxo

<b>Escala</b>	500:1	100:1	20:1	10:1	1:1
<b>Precisão (± %)</b>	2,40	0,50	0,10	0,10	0,10



Figura 19 – Corioli utilizado para a medição do combustível

### 3.3.7. Medição de vazão de Ar

A determinação da vazão de ar é feita com um medidor de fluxo laminar modelo Z50MH 10-1. Para a correta determinação da mesma precisa-se conhecer a temperatura do ar de entrada, sendo que a máxima pressão diferencial na qual pode operar de 8 inH<sub>2</sub>O. Apresenta uma precisão de  $\pm 0,86\%$ . O medidor é composto de uma matriz de dutos (capilares) onde se pode induzir um fluxo laminar. Ao determinar-se a diferença de pressão entre a entrada da matriz e a saída, pode-se calcular a vazão de ar. Sua aplicabilidade tem sido provada para fluxo de ar em motores de combustão interna. A deposição de partículas finas ou dano físico pode estragar o correto funcionamento do equipamento.



Figura 20 – Medidor de Fluxo Laminar

### 3.3.8. Controlador do aquecedor de Ar

O controle da temperatura do ar aquecido foi feito mediante um controlador eletrônico digital (PID) com microprocessador modelo HW4900 da marca COEL, totalmente configurável de ação simples ou dupla (para aquecimento e resfriamento). A entrada é configurável para sensores de temperatura, como termopares tipo K ou PT100. Tem uma precisão de 0,5% a 23 °C.

### 3.3.9. Medidor de gases de exaustão

A medição foi feita utilizando um sistema portátil composto de caixa analisadora e unidade de controle de marca TESTO, o qual consta de sensores que permitem a determinação de gases como o O<sub>2</sub>, CO, NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S e HC.

Foi mediante este equipamento que se conseguiu determinar as emissões específicas para o NO<sub>x</sub> e CO. A determinação dos hidrocarbonetos não foi possível devido a uma descalibração do sensor.



Figura 21 – Sistema de medição de emissões.

(a) Instalação da sonda. (b) TESTO 350XL: Caixa analisadora e unidade de controle.

### 3.3.10. Software de controle e medição

A integração e o registro dos distintos pontos de medição foi feito no software LABVIEW da National Instrument. O pós-processamento dos dados foi feito no DIADEM 11.6 e no Excel da Microsoft.

A vantagem de trabalhar com LABVIEW é a interface que oferece de poder juntar graficamente a visualização dos parâmetros avaliados, junto com a capacidade de controlar as variáveis de interesse. Os sinais foram adquiridos por um PXI1052, que é uma estrutura que suporta um micro processador core dois duo PXI8106, junto a uma placa de entrada e saída (analógica/digital) de informação PXI6229, que tem uma taxa de aquisição de 350000 dados por segundo, divididos entre os canais utilizados para atuadores, transdutores e medidores de vazão.

A captura dos dados da pressão interna foi feita em outro computador que continha uma placa que tem uma alta velocidade de aquisição dos dados (1 mega-sample por segundo, 1 MHz).



Figura 22 – Unidade de controle do dinamômetro (esquerda) e unidade de registro e visualização da pressão interna (direita).