

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Lucas Oliveira Goes Neno

**DESENVOLVIMENTO DE UM
PROTÓTIPO DE SIMULAÇÃO DE UM
MOTOR HCCI
(Homogeneous Combustion Compression
Ignition)**

Relatório Anual Iniciação Científica

Engenharia Mecânica da PUC-Rio

Professor Orientador: Sérgio Leal Braga

Departamento de Engenharia Mecânica

Rio de Janeiro, 08 de agosto de 2009

Índice Geral

ÍNDICE DE FIGURAS	3
1 INTRODUÇÃO	4
1.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA	5
1.2 MOTORES DE COMBUSTÃO	6
1.2.1 <i>Ciclo Padrão Ar de Motor Otto</i>	7
1.2.2 <i>Ciclo Padrão Ar de Motor Diesel</i>	8
1.2.3 <i>Motor HCCI</i>	8
2 MODELO EXPERIMENTAL	11
NA FIG. 4, ABAIXO, PODE-SE OBSERVAR UMA FOTOGRAFIA DA BANCADA EXPERIMENTAL	11
2.1 SEÇÃO DE TESTE	11
2.1.1 <i>Motor de Combustão Interna</i>	11
2.1.2 <i>Dinamômetro</i>	12
2.2 SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE AR	15
2.2.1 <i>Medidor de vazão</i>	15
2.2.2 <i>Aquecedor</i>	15
2.3 SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE COMBUSTÍVEL	16
2.4 SISTEMA DE AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE SINAIS	17
2.4.1 <i>Sensores de temperatura e pressão</i>	18
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	20
4 RESULTADOS	22
FIGURA 17. DESEMPENHO NO INICIO DO MODO HCCI, 1600 RPM, $T_{AR-AQUEC.} = 140\text{ }^{\circ}\text{C}$.....	23
FIGURA 18. TEMPERATURAS NO INICIO DO MODO HCCI, 1600 RPM, $T_{AR-AQUEC.} = 140\text{ }^{\circ}\text{C}$.	23
5 CONCLUSÕES	24
6 REFERÊNCIAS	25

Índice de Figuras

FIGURA 1. CICLO OTTO A)TEÓRICO B) REAL.....	7
FIGURA 2. CICLO DIESEL TEÓRICO.....	8
FIGURA 3. COMPARAÇÃO ENTRE MOTOR DIESEL, OTTO E HCCI.	9
FIGURA 4. DETALHE DO MODELO EXPERIMENTAL.....	11
FIGURA 5. DETALHE DO MOTOR.	12
FIGURA 6. DETALHES DE MONTAGEM DO MOTOR.....	12
FIGURA 7. DINAMÔMETRO.....	13
FIGURA 8. DETALHES DO DINAMÔMETRO EM BALANÇO.....	13
FIGURA 9. INVERSOR DE FREQUÊNCIA.	14
FIGURA 10. DETALHE DO DISSIPADOR DE POTENCIA.....	14
FIGURA 11. MEDIDOR DE VAZÃO DE AR.....	15
FIGURA 12. DETALHE DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA.	15
FIGURA 13. DETALHE DO TANQUE DE COMBUSTÍVEL.	16
FIGURA 14. PROGRAMA LABVIEW UTILIZADO.	17
FIGURA 15. SENSOR DE TORQUE.	18
FIGURA 16. DETALHE DO ENCODER.....	19
FIGURA 17. DESEMPENHO NO INICIO DO MODO HCCI, 1600 RPM, $T_{AR-AQUEC.} = 140\text{ }^{\circ}\text{C}$	23
FIGURA 18. TEMPERATURAS NO INICIO DO MODO HCCI, 1600 RPM, $T_{AR-AQUEC.} = 140\text{ }^{\circ}\text{C}$	23

1 INTRODUÇÃO

O motor HCCI (Homogeneous Charge Compression-Ignition), também é chamado de motor diesel-otto, justamente por ser uma combinação dos atuais motores a diesel e a gasolina. Neste tipo de motor, a mistura de ar e combustível se dá fora da câmara de combustão para que ela se torne mais homogênea. A compressão, aliada à temperatura proporciona a auto-ignição da gasolina e a combustão ocorre em diversos pontos da câmara de combustão de forma simultânea. Nesta característica encontra-se uma das grandes vantagens desse tipo de motor.

O rendimento do HCCI em cargas médias é muito maior que o do motor a gasolina e pelo fato de se atingir a autoignição com temperaturas mais baixas e maiores taxas de compressão, as emissões de NOx e de particulados são consideravelmente menores que em um motor a diesel.

Devido às pesquisas em universidades e centros de pesquisas, o mercado de automóveis já possui carros com motor HCCI e como exemplo, temos: o Saturn Aura e o Opel Vectra, da GM, equipados com motor de 2.2 litros Ecotec HCCI de 180 cavalos; o Motor Mercedes-Benz DiesOtto carro conceito F700, baseado em um sedã da Classe S com motor 1.8 l, capaz de desenvolver 241 cv de potência e realizar uma média de consumo na casa dos 16,6 km/l; e um Volkswagen.

Os excelentes resultados obtidos em relação ao rendimento e às emissões de poluentes, aliados à economia significativa do consumo de combustível proporcionada por esse novo conceito de motor e às múltiplas possibilidades de configuração, leva a crer que este é o próximo passo na evolução dos motores de combustão interna.

1.1 Pesquisa Bibliográfica

Uma nova tecnologia pela qual temos bastante interesse é a do motor de ignição por compressão de carga homogênea, cuja sigla em inglês é HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition), por suas diversas vantagens e benefícios para o ambiente [1][2][3][4]; este motor tem característica de duas das formas mais populares de combustão usada em motores: ignição por centelha e injeção de combustível.

A principal vantagem que apresenta é sua flexibilidade para se adaptar ao tipo de combustível com que trabalha, além de sua alta eficiência e seus baixos índices de emissão de material particulado (MP) e óxidos de nitrogênio (NOx) [1].

A principal característica de um HCCI consiste na ignição do combustível que ocorre em vários pontos, de forma simultânea, devido à compressão aplicada. Não existe controle direto da ignição, e essa é uma particularidade que torna o processo intrinsecamente desafiador ao controle. Ainda, com avanços dos microprocessadores e a compreensão física do processo de ignição, o HCCI pode ser controlado para alcançar baixas emissões e alta eficiência apresentadas nos ciclos Otto e Diesel, respectivamente.

Nos processos de ignição por centelha, (spark ignition, SI), acontece a propagação da combustão; ver Fig. 1-a, onde se observa um processo de ignição por centelha em que há propagação da frente de chama de combustão; já no HCCI a massa total de combustível se torna ativa para a reação [2], ao contrário do que acontece num processo de ignição por compressão, esta se dá em um mesmo momento por todo o volume disponível no cilindro. Por ele há um processo de liberação de calor ao longo do volume total (figura 1-b, note a integração para o cálculo do calor total liberado).

É interessante notar que a temperatura de auto-ignição depende muito pouco da relação ar-combustível [2], por isso, a necessidade de estudos sobre o controle da temperatura da autoignição, que se alcança para combustão, pois de outro modo aumentaria a eficiência, mas também a produção de CO e para aquelas superiores a 1800 graus Celsius, há produção de NOx

Se a mistura ar-combustível pode chegar a ser homogênea, a combustão está longe de sê-la, pois ainda muda de comportamento no decorrer do processo [2].

Na universidade de Lund, na Suécia, há testes feitos com velocidade de 17000 RPM e cargas máximas de 20.4 bar IMEP / 16 bar BMPE.

Johansson B. [2] também sinala que a mistura homogênea do combustível e do ar leva a uma combustão mais limpa com emissões mais baixas. No entanto, são geradas maiores quantidades de hidrocarbonetos (HC) e monóxido de carbono (CO) que aquelas em um motor de SI, que devem ser tratadas para atender às regulamentações de emissões automotivas como a EURO 5 [3].

1.2 Motores de Combustão

Os motores térmicos transformam a energia calorífica dos combustíveis em energia mecânica que aparece como trabalho do eixo. Esta transformação se obtém por uma mudança de estado (vaporização), de volume (compressão), de temperatura (combustão).

Os motores térmicos se classificam em duas categorias principais: de combustão externa e de combustão interna.

O foco desse trabalho será neste último, no qual a combustão acontece no interior da câmara de combustão. O primeiro tipo a ser discutido é o de ignição a vela, o segundo é o motor a diesel, também chamado de motor de ignição por compressão, com combustão espontânea e mais lenta que o primeiro. O terceiro tipo é o de turbinas.

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma configuração que reúne os melhores pontos dos dois primeiros tipos apresentados.

Os motores a álcool ou gasolina são compostos por um pistão, ligado a uma biela que está ligada ao virabrequim e uma câmara de combustão que possui duas

válvulas, um cilindro e uma vela de ignição. Os motores a diesel não possuem vela de ignição e sim uma bomba injetora de óleo.

Uma seqüência de quatro movimentos do pistão no cilindro completa um ciclo. Esse ciclo de funcionamento foi aplicado por Nikolaus Otto, em 1876, e por isso também são chamados de "**motor de 4 tempos**" ou "**motor Otto**".

1.2.1 Ciclo Padrão Ar de Motor Otto

- 1 - 2 compressão isoentrópica.
- 2 - 3 fornecimento de calor a volume constante.
- 3 - 4 expansão isoentrópica.
- 4 - 1 rejeição de calor a volume constante.

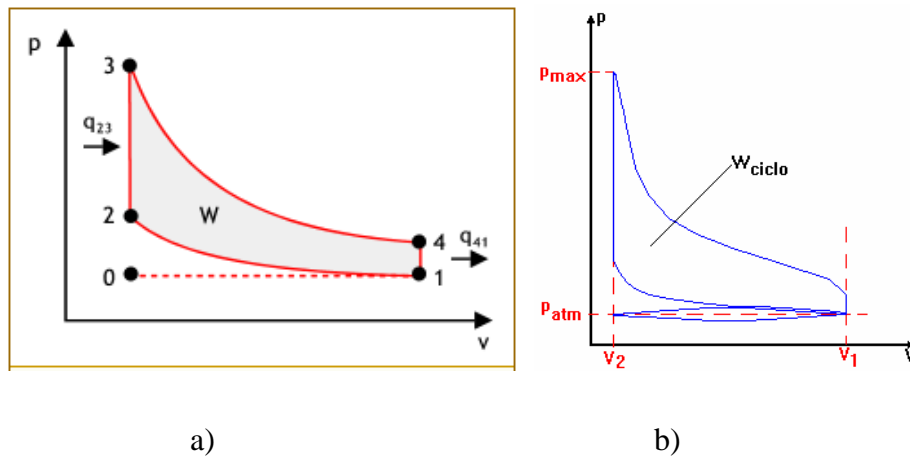


Figura 1. Ciclo Otto a) teórico b) real

O rendimento térmico deste ciclo é representado pela equação:

$$\eta = 1 - \frac{q_{41}}{q_{23}} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - (r)^{1-\frac{c_p}{c_v}} \quad (1)$$

1.2.2 Ciclo Padrão Ar de Motor Diesel

- 1 - 2 compressão isentrópica
- 2 - 3 fornecimento de calor a pressão constante
- 3 - 4 expansão isentrópica
- 4 - 1 rejeição de calor a volume constante

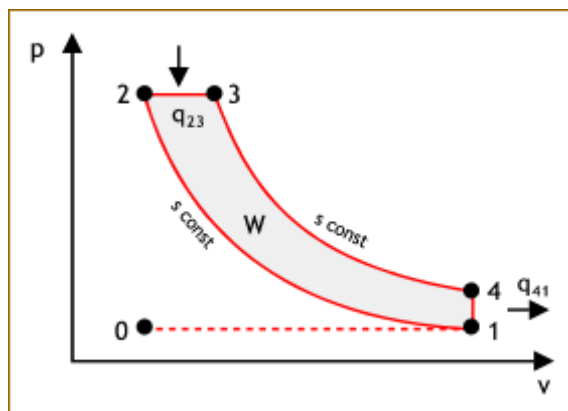


Figura 2. Ciclo Diesel teórico.

Para motores Otto, o rendimento real situa-se entre 22 a 30%, enquanto para os motores Diesel situa-se na faixa dos 30 a 38%. As perdas térmicas ocorrem devido à energia interna dos gases que escapam a altas temperaturas na explosão e na troca de calor entre o motor e o meio ambiente pelo sistema de refrigeração, além das perdas mecânicas devido ao atrito das peças.

1.2.3 Motor HCCI

Na Fig. 4., pode-se observar a diferenças entre os três tipos de motores no tocante à combustão e emissões de poluentes. O terceiro funciona a partir da ignição por compressão de carga homogênea.

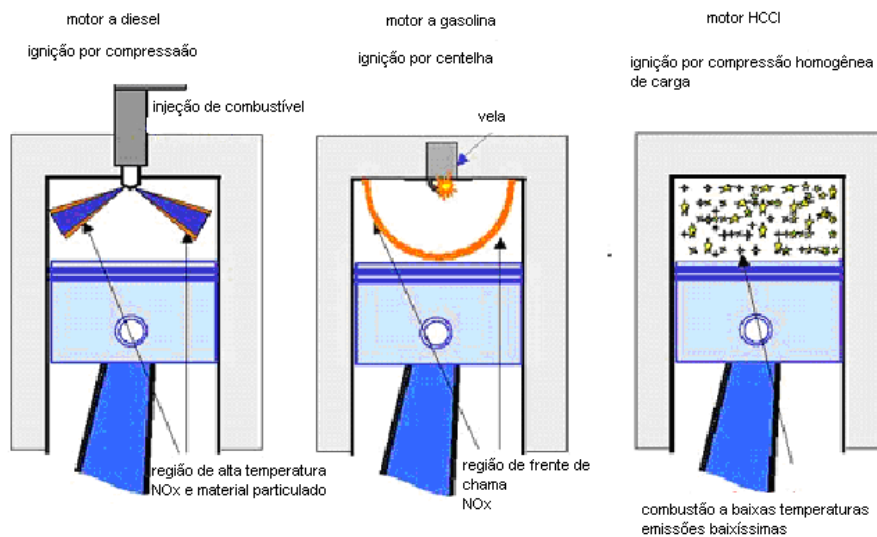


Figura 3. Comparação entre motor Diesel, Otto e HCCI.

Em um motor HCCI, o combustível e o ar são misturados e injetados no interior do cilindro. O pistão comprime a mistura até que ocorra uma combustão espontânea. Ele, então, combina a pré-mistura ar-combustível com a ignição espontânea (como acontece em um motor diesel). O resultado é que a combustão ocorre simultaneamente em vários pontos no interior da câmara de combustão.

A mistura ar-combustível, que deve ser pobre, é feita no tubo de admissão; após isso, essa mistura mais homogênea é injetada a baixa pressão no cilindro e comprimida até que se atinja o ponto de autoignição e aconteça a combustão espontânea com o pistão próximo ao ponto morto superior.

A ignição do combustível acontece de forma simultânea em todo o volume da câmara de combustão e não somente em um ponto localizado, como é observado nos motores a diesel. Consecutivamente, não há propagação de frente de onda e nem estratificação da mistura.

O motor não possui a borboleta e o fluxo de ar é sempre o máximo; o controle de carga é feito através da variação na quantidade de combustível que é levada à mistura. Se a mistura é muito pobre, é necessária uma maior taxa de compressão.

Diferentemente dos outros tipos de motores, nesse caso não há necessidade de que o combustível esteja aquecido com o propósito de que a chama se espalhe rapidamente na câmara, visto que a combustão já acontece de forma simultânea em toda a região.

A temperatura mais baixa na câmara de combustão garante a redução da perda de energia térmica durante o processo de combustão, a diminuição nos índices de emissões dos gases derivados do Nitrogênio (NOx) e torna a emissão de particulados desprezível. Assim, pode-se observar mais uma vantagem que é o fato de prescindir dos dispendiosos sistemas de tratamento dos gases de combustão.

Outra característica bastante notável é eficiência superior no que diz respeito ao consumo de combustível que também se deve à queima total do mesmo. Em mesmas condições de funcionamento, este motor mostrou um menor consumo quando comparado com o Diesel.

2 MODELO EXPERIMENTAL

Aqui, haverá uma descrição do aparato experimental para a construção da bancada e realização dos testes necessários realizados na sala de testes do Laboratório de Engenharia Veicular (LEV) da PUC-Rio.

Na Fig. 4, abaixo, pode-se observar uma fotografia da bancada experimental.

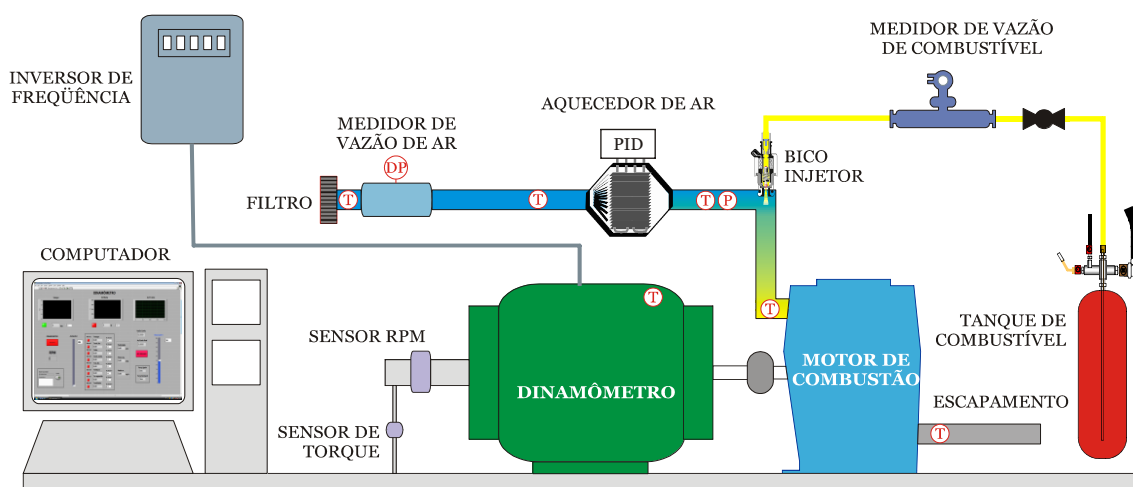


Figura 4. Detalhe do modelo experimental

2.1 Seção de teste

2.1.1 Motor de Combustão Interna

É um motor mono cilindro (Fig. 5) de 3,1 kW em 3600 RPM com uma Taxa de compressão: 17:1



Figura 5. Detalhe do motor.

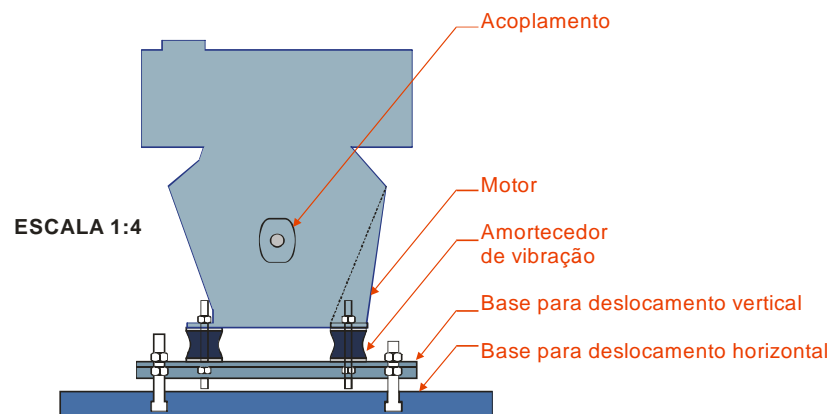


Figura 6. Detalhes de montagem do motor

2.1.2 Dinamômetro

Destinado a determinar o torque, a velocidade rotacional do motor de combustão interna e conseqüentemente a potência efetiva. Basicamente se compõe de um rotor e um estator com um elemento de acoplamento entre eles, fluxo elétrico. Este dinamômetro é, dependendo da necessidade, um gerador ou um motor elétrico. Variando a alimentação de campo e rotor, se consegue ampla gama de velocidades e potências absorvidas.

A velocidade rotacional será medida através de um encoder, que fornecerá um sinal elétrico proporcional à velocidade. Com torque e velocidade como sinais disponíveis, os dados podem ser transmitidos a um sistema de aquisição de dados.

Possui um suporte em balanço (Figs. 7 e 8), célula de carga para aquisição do Torque e da Velocidade Angular.



Figura 7. Dinamômetro.

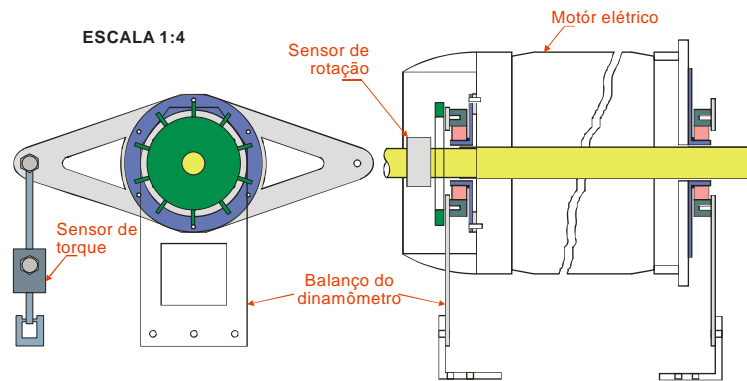


Figura 8. Detalhes do dinamômetro em balanço

O controle elétrico do dinamômetro é realizado com o inversor de frequência (Fig. 9), este equipamento converte os sinais elétricos dos sensores em sinais digitais por meio do software LabView.



Figura 9. Inversor de frequência.

A potência que o motor elétrico dissipa é absorvida pelo componente da Figura 10.



Figura 10. Detalhe do Dissipador de Potencia.

A conexão mecânica entre o motor e o dinamômetro é realizada com o acoplamento flexível, marca fuccke, modelo E5-M da empresa Tecfin, é posicionado externamente e tem a função de se romper sem danificar o equipamento em caso de travamento dos eixos.

2.2 Sistema de alimentação de ar

2.2.1 Medidor de vazão

É um medidor tipo laminar, produz um diferencial de pressão que é recebido pelo transdutor de pressão diferencial que envia um sinal em mA ao SAD.



Figura 11. Medidor de vazão de ar

2.2.2 Aquecedor

O aquecedor de ar é composto por 2 resistências aletadas de 2 kW cada uma, com um total de 4 kW.

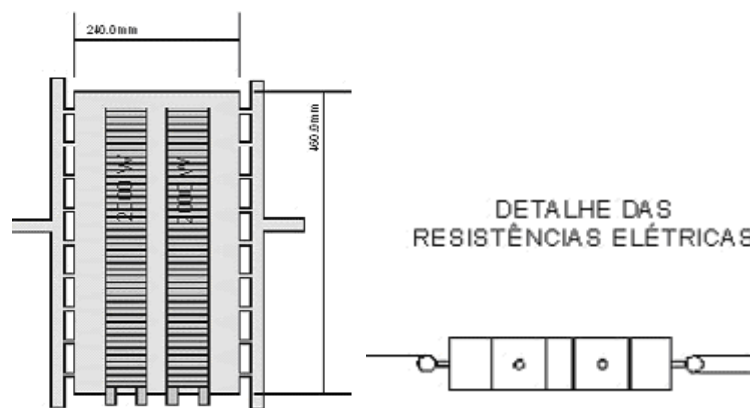


Figura 12. Detalhe da resistência elétrica.

2.3 Sistema de alimentação de combustível

O sistema de alimentação através dos seus componentes que atuam em conjunto fornece combustível pressurizado de forma constante para a combustão no cilindro. Este processo ocorre a partir do tanque de combustível, até a queima da mistura ar-combustível na câmara de combustão.

Entre os principais componentes deste sistema, podemos citar o tanque, bomba e filtro de combustível, além do regulador de pressão e injetor de combustível.

O tanque de combustível (Figura 13) é um reservatório pressurizado com ar que contém o combustível a estudar, logo, o combustível passa pelo medidor de vazão e chega ao bico injetor atuando na base da agulha. Quando a pressão do combustível for suficiente para vencer a força da mola, a agulha se levanta debitando o combustível. A pressão de abertura do bico pode ser aumentada ou reduzida atuando-se no parafuso de regulagem sobre a mola. Geralmente, a pressão de injeção é regulada entre 150 e 250 kgf/cm². Quanto maior a pressão de injeção menor será o diâmetro médio das gotas injetadas.



Figura 13. Detalhe do tanque de combustível.

2.4 Sistema de aquisição e processamento de sinais

Um Sistema de Aquisição de dados (SAD) recebe os sinais de temperatura, pressão, rotação, etc. A ferramenta computacional LabView (Figura 14) foi programada para as seguintes funções:

- Controle da rotação do motor;
- Controle da injeção de combustível;
- Controle do duty-cycle;
- Monitoramento dos valores de pressão e temperatura coletados;
- Monitoramento dos valores de vazão de ar;
- Monitoramento da relação ar-combustível;
- Gráfico de Torque e Potência;
- Ativação dos sistemas de segurança e alarme;
- Armazenamento de todos os dados.

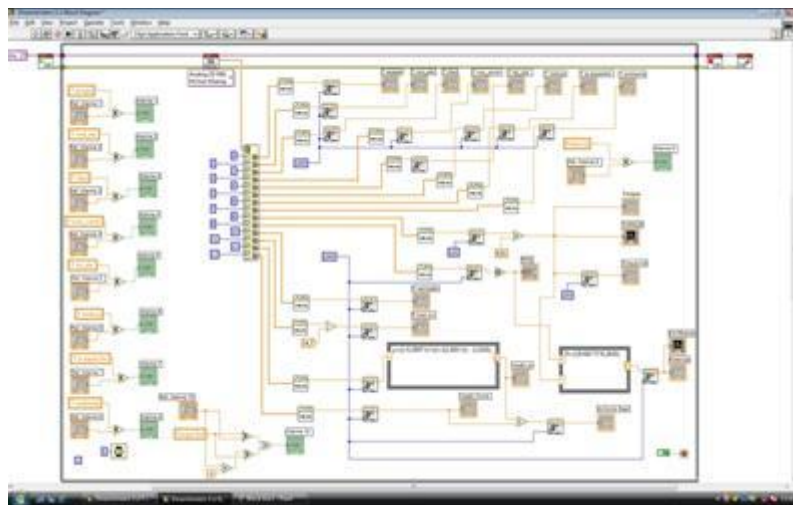


Figura 14. Programa LabView utilizado.

2.4.1 Sensores de temperatura e pressão

Os termopares tipo K, com faixa de temperatura entre -200 e 750° C e incerteza de $\pm 0,2$ °C foram usados para medir e controlar parâmetros de pontos importantes do motor como:

- Temperatura dos gases de escapamento;
- Temperatura do bloco do motor elétrico;
- Temperatura do óleo;
- Temperatura do bloco do motor de combustão interna;
- Temperatura da resistência elétrica;
- Temperatura da mistura ar-combustível;
- Temperatura do ar aquecido;
- Temperatura do ambiente.

Os Sensores de pressão usados no experimento foram:

- Pressão de admissão da mistura de ar-combustível(**Erro! Fonte de referência não encontrada.**);
- Pressão do bico injetor.

A Célula de carga é um Sensor (Figura 15) que mede o torque com variação de – 100 N a 100 N.



Figura 15. Sensor de torque.

O Sensor de rotação é um encoder (Figura 16) que recebe o sinal mecânico do eixo de rotação.



Figura 16. Detalhe do encoder.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este capítulo discursará a respeito dos testes primários de cada componente realizados para o cumprimento dos objetivos.

O primeiro procedimento para os testes foi a verificação do correto funcionamento dos seguintes componentes:

- Bico injetor: calibração com verificação da vazão utilizando uma balança de precisão e um cronômetro
- Medidor de vazão de ar e combustível: calibração
- Sensor de torque: calibração feita com o motor elétrico em balanço utilizando diferentes valores de massa.
- Sensor de rotação: verificar o valor zero com rotação zero.
- Sensor de pressão: calibração
- Sensor de temperatura: calibração.
- Motor: verificação com o auxílio do manual do fabricante.

A partir desses testes preliminares foi possível dar início à experiência, que será melhor detalhada nas subseções posteriores.

Os testes foram feitos para as rotações de 1800 a 3600 rpm, e iniciaram-se com o acionamento do mesmo no software LabView.

As três possíveis maneiras de se controlar a reação cinética química se dão através do controle da temperatura, da pressão e da concentração das espécies reativas e produtos. Durante os testes podemos alterar os valores da concentração das espécies reativas, alterando o valor do duty-cycle.

É acionado pelo dinamômetro e sua rotação, controlada pelo Labview, é aumentada pelo operador até que se atinja o valor de teste.

O valor da taxa de compressão no cilindro foi mantido constante (17:1) durante todo o teste.

O pré-aquecimento do ar é feito por uma resistência elétrica de 4 KW.

Segundo a literatura, é aconselhável não ultrapassar 400°C, que corresponde ao limite máximo para a temperatura de entrada do ar na câmara de combustão.

A injeção de combustível foi controlada a partir do duty-cycle. Foram usados valores entre 0,1 e 1,5 kg/h. A vazão foi medida com o Coriolis.

4 RESULTADOS

Na Fig. 17 é apresentado Desempenho no modo HCCI em 1600 RPM e com $T_{\text{Tar-aquec.}} = 140 \text{ }^\circ\text{C}$. No tempo 10 h 05 aproximadamente, se inicio o funcionamento em modo HCCI. Pode-se observar que a potência no inicio da combustão teve um valor de 2000 W aproximadamente, posteriormente, uma vez atingido o equilíbrio, o valor ficou em 800 W, isto pode ser devido ao acúmulo de combustível na câmara de combustão antes da primeira auto-ignição. Na mesma Fig. 17, se observa que com o torque acontece o mesmo que com a potência, o valor no inicio da combustão no modo HCCI é de 11 N·m para depois atingir o regime permanente com 5 N·m. O valor da vazão de combustível equivalente ao *dutycycle* de 15% é de 0,5 kg/h.

Na mesma Figura 17, pode-se observar que a temperatura dos gases de escapamento para estas condições é de $173 \text{ }^\circ\text{C}$ o qual se considera um valor muito menor quando comparado com as mesmas condições de funcionamento com o ciclo Diesel. Este valor de temperatura observado, indicaria a diminuição substancial na emissão de NOx.

Na Fig. 18, podem-se observar as diferentes temperaturas no do modo HCCI para uma rotação de 1600 RPM e um valor de $T_{\text{Tar-aquec.}} = 140 \text{ }^\circ\text{C}$. O valor da temperatura do óleo foi de $60 \text{ }^\circ\text{C}$ e da carcaça do motor de combustão $167 \text{ }^\circ\text{C}$. Estes valores observados estão dentro dos parâmetros de funcionamento e poderiam aumentar a durabilidade tanto do óleo como do próprio motor de combustão.

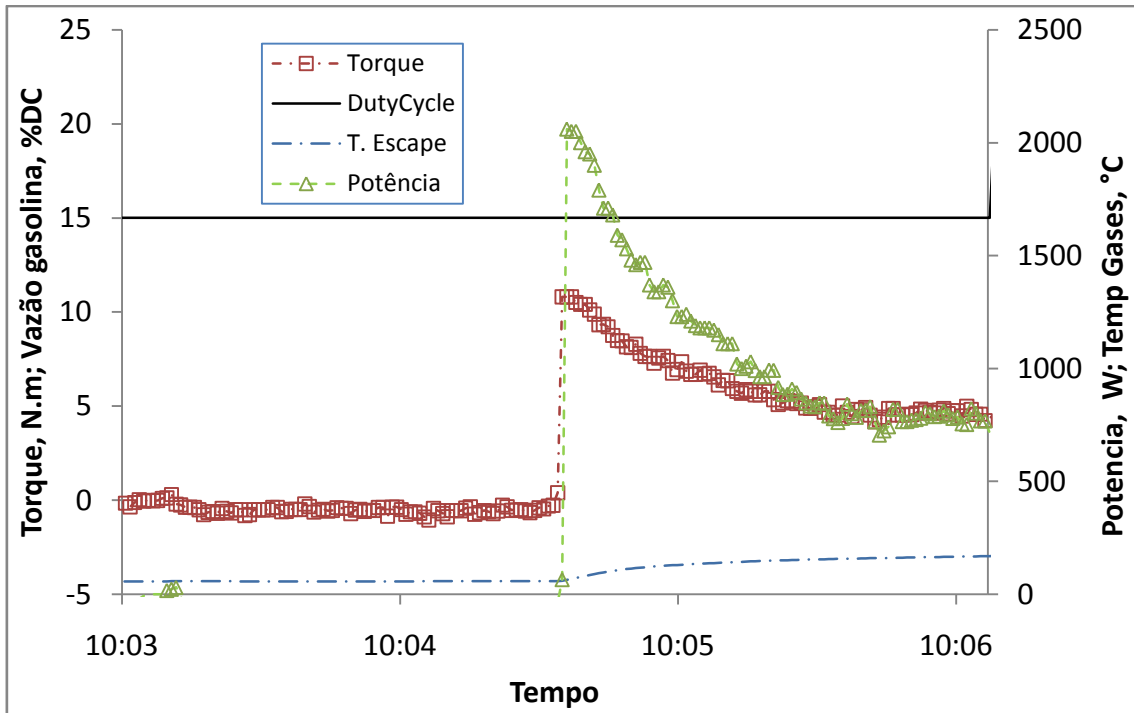


Figura 17. Desempenho no início do modo HCCI, 1600 RPM, $T_{ar-aquec.} = 140\text{ }^{\circ}\text{C}$.

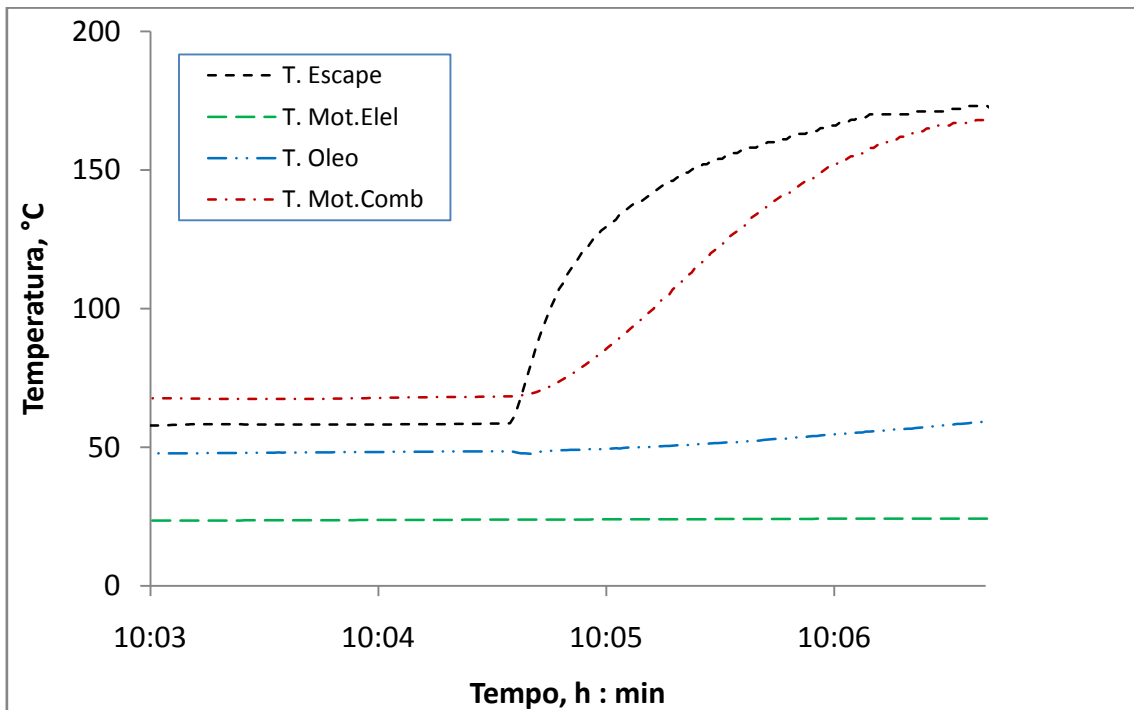


Figura 18. Temperaturas no início do modo HCCI, 1600 RPM, $T_{ar-aquec.} = 140\text{ }^{\circ}\text{C}$.

5 CONCLUSÕES

Foi desenvolvida uma bancada experimental para avaliar o desempenho de um motor de combustão por compressão de uma mistura homogênea de ar e gasolina (HCCI).

O trabalho experimental incluiu a construção do dinamômetro e a adequação do motor a combustão para trabalhar com auto-ignição.

Foram realizados diferentes testes para avaliar o desempenho da gasolina como combustível. Os parâmetros controlados foram: a rotação, temperatura de ar aquecido, e a vazão mássica de combustível. Foram analisados: a Potência gerada e as temperaturas dos diferentes componentes.

Os resultados indicam um funcionamento adequado no modo HCCI em determinadas condições (de rotação, vazão de combustível e temperatura de ar aquecido).

A temperatura dos gases de escapamento diminuiu drasticamente no modo HCCI, considerando-se fator importante para a diminuição do NO_x.

Um sensor de pressão dentro da câmara de combustão deve ser colocado para avaliar o processo de auto-ignição.

6 REFERÊNCIAS

- [1] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, ENERGY EFFICIENCY AND RENEWABLE ENERGY & OFFICE OF TRANSPORTATION TECHNOLOGIES. Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Technology
- [2] JOHANSSON B. *Homogeneous Charge Compression Ignition – the future of IC engines?* Lund Institute of Technology at Lund University
- [3] ALKIDAS A. *Combustion advancements in gasoline engines.*
- [4] MOTYL K. & RYCHTER T. *HCCI engine – A preliminary analysis.* Journal of KONES Internal Combustion Engines 2003, vol. 10, 3-4
- [5] H ZHAO, HCCI and engines for the automotive industry.
- [6] NAJT PM, FOSTER DE. *Compression ignited homogeneous charge combustion.*
- [7] THRING RH. *Homogeneous-charge compression-ignition (HCCI) engines.*
- [8] CHRISTENSEN M, HULTQVIST A, JOHANSSON B. *Demonstrating the multi fuel capability of a homogeneous charge compression ignition engine with variable compression ratio.*
- [9] ZHAO H, PENG Z, WILLIAMS J, LADOMMATOS N. *Understanding the effects of recycled gases on the controlled autoignition (CAI) combustion in four-stroke gasoline engines.*
- [10] LADOMMATOS N, ABDELHALIM S, Zhao H. *The effects of exhaust gas recirculation on diesel combustion and emissions.*