

## 4. Condições Experimentais e Redução de Dados

A metodologia experimental dos ensaios foi planejada com o intuito de atingir os objetivos propostos no início da dissertação. Os testes foram projetados para avaliar o comportamento do motor diesel operando em modo HCCI, utilizando gasolina como combustível, centrando a atenção na potência gerada e o rendimento do motor, quando se varia a temperatura de entrada e a quantidade de combustível presente na mistura.

Em resumo, o experimento foi dividido em duas etapas. A primeira em operação normal do motor, isto é em modo diesel. A operação em modo HCCI corresponde à segunda etapa. O objetivo da primeira etapa foi obter parâmetros específicos de referência do desempenho de um motor, para depois ser comparados com os obtidos em modo HCCI. Foi nesta segunda etapa que se estabeleceu a faixa de trabalho do HCCI, assim como as condições que se precisam para o arranque deste novo tipo de combustão.

Para o mapeamento do motor em modo HCCI (segunda etapa) foram selecionadas as rotações de 1200 até 2200 RPM, em intervalos de aumento de 100 RPM, com variações na quantidade de combustível na alimentação, medidas pelo fator lambda, para determinar a faixa de operação, assim como as variáveis que condicionaram a estabilidade da combustão. Utilizaram-se três temperaturas na entrada 75 °C, 85 °C e 95 °C.

### 4.1. Parâmetros experimentais

Os parâmetros experimentais podem ser classificados em dois grupos: os parâmetros fixos ou independentes e as que são variáveis.

#### 4.1.1. Parâmetros Fixos

São aqueles cujo valor não muda ou não se espera que apresente grandes variações, por exemplo, a pressão na alimentação, a qual pode-se assumir que é

mantida constante. Câmbios nesta variável produzem variações na pressão de saída do escapamento, e no diferencial de pressão que se precisa manter entre a entrada e saída de gases, quando se está utilizando técnicas de retenção de EGR (Chialva, 2006).

Manter a temperatura da parede e do óleo constante assegura poder comparar a combustão entre os distintos testes, nos quais se pode atingir o processo HCCI mudando a temperaturas na admissão. Nosso motor é resfriado por ar, pelo qual se vai trabalhar a uma temperatura média, isso para rotações não maiores a 2000 RPM, como vai ser visto, a temperatura do óleo aumenta consideravelmente acima de 2000 RPM quando se trabalha à maior temperatura na admissão (95 °C).

Os ângulos de abertura e fechamento de válvulas foram mantidos sem variação, para ter a certeza de que as características de areação do motor e perdas pelo trabalho de bombeamento, fossem reproduzidas através de toda a dispersão de ensaios. Na Tabela 11 se apresentam todos os parâmetros importantes que se mantiveram fixos ou que se podem considerar como tais, por exemplo, a temperatura do refrigerante e a pressão da alimentação podem variar por condições ambientais, e pela quantidade de combustível presente na mistura (pressão parcial).

Tabela 11 – Parâmetros Experimentais Fixos

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor estimado</b>
Pressão na alimentação	0,92 atm
Temperatura de refrigerante (resfriado a ar)	28 °C
Combustível	Gasolina tipo A
Pressão de injeção Bico Injetor (HCCI)	2,7 bar
Ponto de injeção de combustível (Diesel)	20° BTDC
Tempo das válvulas de Admissão	BTDC 18° 30' ATDC 45° 30'
Tempo das válvulas de Exaustão	BTDC 50° 30' ATDC 8° 30'

#### 4.1.2. Parâmetros Variáveis

A variação da velocidade é estabelecida para a faixa de trabalho de 1200 até 2200 RPM. Com incrementos a cada 100, a velocidade do motor foi mantida fixa para cada condição do teste quando se cambiava a quantidade de combustível, desde uma baixa até uma alta concentração. Isso por sua direta implicância para atingir as condições de estado estável de funcionamento, também para não afetar a repetibilidade dos ensaios. Câmbios na velocidade poderiam produzir oscilações da pressão na entrada e no duto de saída do escapamento.

A vazão de combustível é mudada pela variável Duty Cycle (DC), a qual é fácil de manipular manualmente, ou através da pressão de trabalho no bico injetor (2,7 bar). Um aumento no DC se entende como um incremento na carga do motor, se a velocidade é mantida constante, porém, o risco de a detonação acontecer se incrementa. A variação do parâmetro no desenvolvimento de um teste não é muito representativa para pós-análise, já que muda ao variar de velocidade; um parâmetro mais interessante e representativo é o fator lambda ( $\lambda$ ). São valores característicos de  $\lambda$ , de 2 até 4 para operar em HCCI, o que indica diretamente baixas concentrações de combustível na entrada segundo Hultqvist, et al. (2002), Thirouard & Cherel (2006) e Hou, et al. (2006).

Tabela 12 – Parâmetros experimentais variáveis

Parâmetro	Faixa de trabalho
Temperatura da carga de entrada °C	75; 85 e 95
Rotação do motor	1200 até 2200
Lambda	Depende da quantidade de combustível a utilizar.
Temperatura do Óleo	Depende das condições de operação.

A variação do parâmetro temperatura na carga de entrada é importante no controle do início da auto-ignição (Machrafi, 2008).

## 4.2. Ensaio Motor Diesel

Os testes projetados em modo diesel convencional foram feitos com a intenção de avaliar o desempenho do motor normal com o processo estudado. Assim, com as modificações feitas no sistema de alimentação para obter os valores de vazão de ar e combustível na alimentação para os dois tipos de combustão (seção 3.2.2), e com a instrumentação feita, se obteve os principais dados que permitiram a posterior análise. As principais variáveis registradas pelo sistema de aquisição de dados se apresentam na Tabela 13, onde também se faz referência se a variável permaneceu fixa, ou muda no desenvolvimento do ensaio.

Tabela 13 – Variáveis registradas no ensaio modo Diesel

	<b>Variável</b>	<b>Unidade</b>	<b>Condição</b>
1.	Velocidade de rotação do eixo do motor	RPM	Condicionada
2.	Torque	N.m	A se determinar
3.	Potência efetiva	kW	A se determinar
4.	Consumo de combustível	kg/h	A se determinar
5.	Umidade Relativa	%	A se determinar
6.	Temperatura do ar de admissão na entrada ao LFE	°C	A se determinar
7.	Temperatura do bloco do motor	°C	A se determinar
8.	Temperatura de óleo lubrificante	°C	A se determinar
9.	Temperaturas dos gases de escape	°C	A se determinar
10.	Pressão barométrica	bar	A se determinar
11.	Pressão no interior do cilindro	bar	A se determinar
12.	Pressão diferencial do LFE na alimentação	inH <sub>2</sub> O	A se determinar
13.	Concentração de Monóxido de carbono	ppm	A se determinar
14.	Concentração de Óxidos de Nitrogênio	ppm	A se determinar
15.	Concentração de Hidrocarbonetos não queimados	ppm	A se determinar

A denominação “condicionada” é dada para indicar que já se tinha previsto avaliar o teste em um valor predefinido, por exemplo, 1200 RPM na velocidade de rotação. As variáveis, cujo valor vai depender das condições de operação do

processo de combustão, tem em sua coluna de condição “a se determinar”, pelo fato que seu valor é desconhecido até depois de feito o ensaio.

O fato de estar trabalhando com um motor estacionário não permite mudar a quantidade de combustível a se injetar no modo Diesel, dito de outra forma, só se consegue trabalhar a plena carga. O acelerador mecânico que tinha o motor só existe para permitir a entrada ou cortar o ingresso de combustível.

### 4.3.

#### Arranjos experimentais para a avaliação do processo HCCI

Como já foi dito, o tipo de injeção é indireta (port fuel injection, PFI), a qual tem a desvantagem de não ter controle do processo de combustão, depois de fechada a válvula de alimentação, além do tempo de resposta ser superior quando se compara a um sistema de injeção direta, segundo Zao, H (2007).

Para a avaliação do desempenho da combustão HCCI, por efeito de variações na temperatura e concentração de alimentação, precisou-se do registro das variáveis mostradas na Tabela 13 (seção anterior 4.2). Além disso, teve-se que controlar e registrar as variáveis que aparecem na Tabela 14.

Tabela 14 – Variáveis adicionais registradas no modo HCCI

	Variável	Unidade	Condição
1.	Temperatura da mistura na entrada	°C	Condicionada
2.	Temperatura do ar aquecido	°C	Condicionada
2.	Lambda	---	Condicionada
3.	Pressão de Injeção no bico injetor	psia	Fixa

A condição fixa indica que o valor não vai mudar para nenhum ensaio.

Uma simplificação do arranjo experimental é apresentado na Tabela 15, onde se percebe que a faixa de operação foi condicionada pela estabilidade da combustão a que foi avaliada pela estabilidade da bancada experimental, em conjunto aos perfis das curvas de pressão interna x tempo, e o som emitido pelo motor de combustão, que é muito característico na detonação.

As variáveis de temperatura de ingresso mudaram e foram estabelecidas em função dos testes desenvolvidos previamente, aleatoriamente, e sem nenhuma

ordem, a temperatura máxima de 95 °C foi estabelecida em função de não prejudicar a estrutura do motor até o término dos ensaios, porém se poderia ligar o HCCI a maiores temperaturas.

A faixa de operação para a constante de excesso de ar foi determinada experimentalmente em função da estabilidade observada, como já foi dito. Como é apresentado na Tabela 15, isso também condicionou a faixa de trabalho para as velocidades ensaiadas.

Tabela 15 – Arranjo experimental do processo HCCI variando a temperatura de ingresso

Faixa de operação		Parâmetro	Condição
Avaliado principalmente pelo som produzido pelo motor, vibração e a forma das curvas de pressão interna.	75, 85 e 95 °C	Temperatura de alimentação	Constante
	2 – 4	Fator Lambda ( $\lambda$ )	Variável na faixa de velocidades.
	---	Temperatura da parede	Variável (motor resfriado a ar)
	1200 – 2200 RPM	Velocidade do motor	Variável (com incrementos cada 100 RPM)

Para uma temperatura na entrada, quando se fixava uma velocidade se mudava a quantidade de combustível injetado, mantendo sempre em consideração a estabilidade da operação. Uma vez determinada as concentrações suportadas pelo motor em HCCI (sem tentar atingir a detonação), se aumentou a velocidade em 100 RPM, e assim por diante até atingir o limite para a velocidade.

#### 4.4. Redução de dados

A presente seção apresenta as relações que se podem estabelecer com os dados obtidos pela instrumentação através do software LabView. Assim, o conjunto de dados foi utilizado para a obtenção dos parâmetros de interesse.

#### 4.4.1. Potência

A potência entregue pelo motor e absorvida pelo dinamômetro é o produto do torque com a velocidade angular.

$$P = 2\pi T \frac{N}{60} \times 10^{-3} \quad (4.1)$$

Onde N é a velocidade rotacional do eixo medida em revoluções por minuto (RPM). O torque é ingressado na fórmula em unidades de Newton por metro (N.m).

#### 4.4.2. Pressão Média Efetiva

A pressão média efetiva é um bom parâmetro para comparar motores no seu projeto, e a sua saída efetiva de trabalho, porque é independente do tamanho e a velocidade. É obtida da divisão do trabalho feito em cada ciclo ( $W_c$ ) e o volume deslocado ( $V_d$  a cilindrada).

$$pme = \frac{W_c}{V_d} = \frac{P \times 10^3}{30V_d N} \quad (4.2)$$

Onde P é a potência efetiva do ponto anterior (4.4.1) expressada em kilowatts (kW), o volume deslocado deve estar em  $\text{cm}^3$ , e a velocidade angular média (N) em RPM.

Se o torque é utilizado em uma comparação, um motor de grande porte sempre aparenta ser a melhor opção. Se a potência é utilizada, a velocidade se torna muito importante na comparação.

#### 4.4.3. Consumo de Ar Úmido e Ar Seco

A determinação do parâmetro de consumo de ar úmido foi feita com um medidor de fluxo laminar (LFE), onde é obtido o diferencial de pressão. Precisa-se também da temperatura do fluido gasoso para determinar o fluxo volumétrico  $Q_f$  ( $\text{ft}^3/\text{min}$ ). Utilizando a relação que fornece o manual de instruções do LFE:

$$\dot{Q}_f = \frac{1}{2118,9} (B \times \Delta P + C \times \Delta P^2) \left( \frac{181,87}{\mu_f} \right) \quad (4.3)$$

Sendo B e C constantes específicas para cada equipamento de medição,  $\Delta P$  é o diferencial de pressões em polegadas de água (in H<sub>2</sub>O) e  $\mu_{std}/\mu_f$  é a razão entre a viscosidade do gás escoando a 70 °F em micro-poiseis ( $\mu_{std}$ ) e a viscosidade do fluido escoando nas condições de operação ( $\mu_f$ ). O valor dessa viscosidade de referência é 181,87 micro-poiseis.

A viscosidade do fluxo de ar úmido ( $\mu_f$ , normalmente se trabalha com ar úmido) é produto da equação que determina a viscosidade do ar seco e a razão de viscosidades ( $\mu_u/\mu_s$ )

$$\mu_f = \mu_{ar,u} = \left( \frac{14,58 \times T_{ar,u}^{3/2}}{110,4 + T_{ar,u}} \right) \left( \frac{\mu_u}{\mu_s} \right) \quad (4.4)$$

Onde  $\mu_u/\mu_s$  é a razão entre a viscosidade para o ar saturado ( $\mu_u$ ) e a viscosidade do ar seco ( $\mu_s$ ). O valor de esta razão de viscosidades e os valores para as constantes B e C são obtidas do manual de instruções do LFE.

O fluxo mássico de ar nas condições de operação é determinado pelo produto da massa específica do ar e o fluxo volumétrico do ar:

$$\dot{m}_{ar,u} = \rho_{ar,u} \dot{Q}_f \quad (4.5)$$

Finalmente, o consumo de ar seco estará em função da vazão mássica do ar e a umidade específica ou absoluta ( $w$ , quantidade de massa de vapor de água presente em uma unidade de massa de ar seco):

$$\dot{m}_{ar,s} = \frac{\dot{m}_{ar,u}}{1 + w} \quad (4.6)$$

#### 4.4.4. Massa Específica do Ar Ambiente

A massa específica do ar ambiente em kg/m<sup>3</sup> pode ser determinada segundo Cuisano, (2006) pela seguinte relação:

$$\rho_{ar} = \frac{P_{ar}}{R_{ar} \times (273,15 + T_{amb})} \quad (4.7)$$

$P_{ar}$  é a pressão barométrica em kPa,  $T_{amb}$  é a temperatura ambiente em °C e  $R_{ar}$  é a constante do ar ambiente em kJ/kg.K. Onde  $R_{ar}$  pode se corrigir através da umidade absoluta ( $w$ )



$$R_{ar} = \frac{1}{m_{ar,u}} (m_v R_v + m_{ar,s} R_{ar,s}) = \frac{R_{ar,s} + R_v \times w}{1 + w} \quad (4.8)$$

Onde  $R_{ar,s}$  é a constante do ar seco em kJ/kg.K, e  $R_v$  é a constante do vapor de água nas mesmas unidades;  $m_v$  representa a massa de vapor contido no fluxo de ar úmido.

A determinação da umidade absoluta para uma mistura ar – vapor de água é feito com a seguinte relação que apresenta Cengel & Boles (2006):

$$w = \frac{0,622 \times RH \times P_{sat}}{P_{ar} - RH \times P_{sat}} \quad (4.9)$$

Na anterior relação,  $RH$  é a umidade relativa e  $P_{sat}$  é a pressão de saturação do vapor de água à temperatura ambiente em kPa, que pode ser determinada com a relação:

$$P_{sat} = 10^{(30,59051 - 8,21 \log T_{amb} + 0,0024804 \times T_{amb} - 3142,31/T_{amb})} \quad (4.10)$$

Com  $T_{amb}$  expressada em K.

#### 4.4.5. Consumo específico de Combustível

O consumo específico de combustível mede o quanto eficientemente é utilizado o combustível, alimentado a um motor para produzir trabalho efetivo no eixo. É definido por:

$$cec = \frac{\dot{m}_c}{P} \quad (4.11)$$

Onde  $m_c$  é o consumo de combustível, dado em g/h e  $P$  é a potência no eixo em kW

#### 4.4.6. Eficiência de conversão do combustível

Também chamada *rendimento térmico* (Cuisano, 2006), é uma medida muito útil que relaciona o trabalho produzido em um ciclo com a quantidade de energia liberada pelo combustível fornecido para o ciclo. Importante reparar que a quantidade liberada de calor em um processo ideal (combustão completa) considera uma combustão ao 100 %, mas na realidade a combustão sempre é incompleta. Este tipo de eficiência é definido com a seguinte relação:

$$\eta_c = \frac{P}{\dot{m}_c \times PCI_c} = \frac{1}{cec \times PCI_c} \quad (4.12)$$

Onde P é a potência efetiva no eixo em kW,  $m_c$  o consumo de combustível em kg/h, e  $PCI_c$  é o poder calorífico inferior do combustível em kJ/kg.

#### 4.4.7. Eficiência Volumétrica

Maior quantidade de ar no interior do motor significa que maior quantidade de combustível pode ser queimado, e maior quantidade de energia pode se converter em trabalho útil. Devido ao menor tempo disponível para fazer um novo carregamento de uma mistura fresca (isto quando se incrementa a velocidade) e a presença de interferências (LFE, o pulmão de ar, a resistência elétrica e o filtro de ar) no sistema de alimentação, o cilindro não pode se encher em sua totalidade e a eficiência volumétrica tende a diminuir, seu valor pode ser determinado com o emprego da seguinte relação:

$$\eta_v = \frac{\dot{m}_{ar,u}}{30\rho_{ar}V_dN} \quad (4.13)$$

Onde  $\dot{m}_{ar,u}$  é a vazão de ar úmido em kg/s,  $\rho_{ar}$  é a massa específica do ar de entrada,  $V_d$  é a cilindrada do motor em  $m^3$  e N é a rotação do motor em RPM.

#### 4.4.8. Fator lambda

Também chamado razão relativa ar – combustível. Devido ao fato da composição ser diferente quando se trabalha em misturas pobres e em misturas ricas, e porque a razão estequiométrica ar – combustível depende da composição do combustível. A relação da razão ar – combustível (A/C) sobre a razão estequiométrica, é um parâmetro de maior informação para definir a composição da mistura (Lee & Lee, 2006).

$$\lambda = \phi^{-1} = \frac{(A/C)_r}{(A/C)_e} = \frac{m_{ar,s}/m_c}{(C/A)_e^{-1}} \quad (4.14)$$

Onde  $m_{ar,s}$  é a vazão de ar seco na entrada ao motor em kg/h e  $m_c$  é a vazão de combustível em kg/h. O inverso do fator lambda é a conhecida taxa equivalente ( $\phi$ ).

#### 4.5. Emissões específicas

As concentrações das emissões gasosas nos gases de exaustão do motor são usualmente medidas em partes por milhão ou porcentagem de volume. Indicadores normalizados de níveis de emissões são mais úteis (emissões específicas e os índices de emissões). As emissões específicas relacionam a vazão mássica do poluente por unidade de potência de saída.

$$\begin{aligned} sNO_x &= \frac{\dot{m}_{NO_x}}{P} \\ sCO &= \frac{\dot{m}_{CO}}{P} \\ sHC &= \frac{\dot{m}_{HC}}{P} \end{aligned} \quad (4.15)$$

O tratamento para obtenção dos resultados procurados foi feito segundo a norma NBR – 14489 da Associação Brasileira de Normas Técnicas, e que é utilizado por Cuisano (2006). Os três tipos de poluentes que foram considerados são característicos na análise de uma combustão do tipo homogênea, através dos quais se podem apresentar as vantagens e desvantagens na faixa de operação.

A vazão mássica do escapamento é estimada de forma indireta por um balanço de massa entre o ar e o combustível que são ingressados ao motor.

$$\dot{m}_{escp,u} = \dot{m}_{a,u} + \dot{m}_c \quad (4.16)$$

O sistema utilizado para a determinação das concentrações de contaminantes faz a captura dos dados em partes por milhão (ppm) base seca. Para poder fazer as contas utilizando as equações em 4.15 utilizou se as relações 4.17 e 4.18 para fazer a conversão a base úmida.

$$X_{i,u} = X_{i,s} \times k_w \quad (4.17)$$

$X_{i,u}$  é a concentração de qualquer dos poluentes considerados em base úmida em ppm,  $X_{i,s}$  é a concentração do poluente em base seca e  $k_w$  é o fator

para a conversão de concentrações medidas em base seca para base úmida, cujo valor é determinado utilizando a relação 4.18.

$$k_w = 1 - 1,85 \times \left( \frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_{ar,s}} \right) \quad (4.18)$$

Onde  $m_c$  é a vazão mássica de combustível (gasolina) e  $m_{ar,c}$  é a vazão de ar seco ambos em kg/h. Ou poderia se utilizar a relação 4.19 para a conversão à base úmida da Diretiva 2005/55/EC estabelecida para a EURO 4 e EURO 5.

$$k_w = \left( 1 - \frac{1,2442(w \times 1000) + 111,19(\%H) \left( \frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_{a,s}} \right)}{773,4 + 1,2442(w \times 1000) + k_f \left( \frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_{a,s}} \right) 1000} \right) \times 1,008 \quad (4.19)$$

Onde a umidade absoluta do ar de entrada ( $w$ ) está expressa em g/kg; %H, sendo o conteúdo de hidrogênio no combustível em porcentagem mássico. O valor da constante  $k_f$  é determinado a partir do conteúdo de hidrogênio, carbono, enxofre, nitrogênio e oxigênio.

Finalmente se consegue chegar às relações que permitem determinar as vazões mássicas dos poluentes em g/h, utilizando a vazão mássica de escape da equação 4.16.

$$\begin{aligned} \dot{m}_{NO_x} &= 0,001587 NO_{x,u} \times \dot{m}_{escp,u} \\ \dot{m}_{CO} &= 0,000966 CO_u \times \dot{m}_{escp,u} \\ \dot{m}_{HC} &= 0,000478 HC_u \times \dot{m}_{escp,u} \end{aligned} \quad (4.20)$$

Mesmo não tendo sido possível a determinação dos hidrocarbonetos no escapamento, o procedimento de cálculo foi apresentado.