

4 Procedimento Experimental

Com o motor de combustão montado na bancada experimental, a sequência dos testes foi planejada e projetada para avaliar o comportamento do motor de ciclo Diesel operando em modo HCCI, estudando assim, os principais parâmetros de desempenho e os respectivos parâmetros de controle.

4.1. Operação Modo HCCI

O objetivo básico do presente trabalho foi avaliar o desempenho do motor de ciclo Diesel operando em combustão HCCI, utilizando gasolina como combustível. O motor foi adaptado à bancada experimental utilizando-se a configuração apresentada no capítulo três. Diferentes condições de operação e parâmetros de controle (temperatura da mistura, vazão de combustível, rotação do motor, entre outros) foram estudadas em modo de combustão HCCI.

Para o início dos testes do motor em modo HCCI era necessário um “período de aquecimento” para atingir as condições térmicas necessárias para desenvolver a combustão HCCI. Como já foi mencionado nos trabalhos de Aguilar (2010) e Roque (2010), o período de aquecimento é necessário para poder atingir aquelas condições que permitem o início da ignição e por tanto a combustão em modo HCCI.

O período de aquecimento é realizado com o motor funcionando na sua forma original (ciclo Diesel). Por tanto, não foi feito nenhum tipo de alteração no motor.

Para a realização dos ensaios, a partida é realizada com o motor elétrico do dinamômetro. Logo do período de aquecimento, se iniciam os diferentes testes. Aqui foram avaliadas diferentes rotações, diferentes temperaturas do ar de admissão e diferentes vazões de combustível.

Os limites de operação HCCI para estes ensaios foram determinados pela detonação (audível) e a batida de pino (vibração), caracterizado pelas altas vazões de combustível e elevados níveis de pressão, por outro lado, a falha de ignição (indicada com flutuações de torque), adverte a dificuldade do motor de manter a combustão HCCI.

Para cada ensaio em modo HCCI, o sistema de aquisição permitiu registrar os seguintes dados em intervalos de 30 segundos:

- Rotação do motor (RPM)
- Torque (N·m)
- Potência efetiva (kW)
- Vazão de combustível (kg/h)
- Vazão de ar (kg/h)
- Fator Lambda (-)
- Temperatura de ambiente (°C)
- Temperatura de ar no canal de admissão do motor (°C)
- Temperatura do óleo lubrificante (°C)
- Temperatura dos gases de escapamento (°C)
- Temperatura da água de refrigeração (°C)
- Temperatura da mistura de entrada ar/combustível (°C)
- Temperatura do ar aquecido (°C)
- Pressão de admissão (kPa)
- Pressão no cilindro do motor (kPa)
- Pressão no bico injetor (kPa)

4.2. Parâmetros Estudados

Os parâmetros independentes são:

- Pressão de Admissão (pressão atmosférica)
- Pressão no Escapamento (pressão atmosférica)
- Combustível (Gasolina Tipo C)
- Pressão de injeção do bico injetor HCCI (2 bar)

- Pressão de injeção do bico Injetor diesel (dado não fornecido pelo fabricante)
- Temperatura Ambiente (22°C)

Os parâmetros dependentes, aqueles que apresentam variações ou mudanças durante o desenvolvimento dos testes são apresentados à continuação.

- Temperatura de Admissão
- Rotação do Motor
- Torque
- Fator Lambda
- Vazão de Combustível (HCCI)
- Vazão de Ar
- Sinal de Pressão na Câmara
- Temperatura do Óleo
- Temperatura do Refrigerante (água)
- Temperatura dos Gases de Escape
- Injeção de Combustível (Diesel)
- Posição do Ângulo

4.3. Redução de Dados

Os valores obtidos através do software LabView® em função dos testes realizados são os seguintes:

- Torque (T): [N·m]
- Velocidade Angular (N): [RPM]
- Vazão de Combustível (\dot{m}_g): [kg/h]
- Vazão de Ar (\dot{m}_{ar}): [kg/h]
- Posição do Ângulo (θ): [rad]
- Pressão em pontos estratégicos da bancada (P): [kPa]
- Temperaturas em pontos estratégicos da bancada (T): [°C]

4.3.1. Potência

A potência entregue pelo motor e absorvida pelo dinamômetro e conhecida como potência líquida ou potência no freio. Esta potência é medida no eixo do motor e é obtida do produto do torque com a velocidade angular.

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

Onde:

P = Potência efetiva do motor [kW]

T = Torque [N·m]

N = Velocidade angular [RPM]

4.3.2. Pressão Média Efetiva

A Pressão Média Efetiva é um parâmetro utilizado para comparar motores, independentes de seu tamanho e rotação. Basicamente é definida como a pressão hipotética constante que seria necessária no interior do cilindro para desenvolver uma potência igual no eixo. É obtida a seguir.

$$mep = \frac{W_c}{V_d} = \frac{2 \cdot P \cdot 60}{V_d \cdot N} \quad (4.2)$$

Onde:

mep = Pressão média efetiva [kPa]

P = Potência efetiva do motor [kW]

V_d = Volume deslocado [m³]

N = Velocidade angular [RPM]

4.3.3. Consumo Específico de Combustível

Parâmetro que mede como eficientemente o motor usa o combustível para a produção de trabalho útil, o consumo específico é dado por:

$$cec_G = \frac{\dot{m}_G}{P} \quad (4.3)$$

Onde:

cec = Consumo específico de combustível [g/kW·h]

P = Potência [kW]

\dot{m}_c = Vazão de combustível [g/h]

4.3.4. Rendimento Térmico

Conhecido também como a eficiência de conversão do combustível (Heywood, 1988), é aquele parâmetro que relaciona a potência obtida no eixo do motor com o calor total obtido pela combustão do combustível.

$$n_t = \frac{3,6P}{\dot{m}_c \cdot PCI_c} = \frac{3600}{cec_c \cdot PCI_c} \quad (4.4)$$

Onde:

n_t = Rendimento térmico [%]

cec = Consumo específico de combustível [g/kW·h]

PCI_c = Poder calorífico inferior do combustível [MJ/kg]

Assim, o consumo específico de combustível é inversamente proporcional ao rendimento térmico.

4.3.5. Vazão de Ar Úmido e Ar Seco

Para o cálculo da vazão de ar úmido foi utilizado um medidor tipo laminar com saída em pressão diferencial, que junto com um transdutor diferencial de pressão e um sensor da temperatura do fluido pode-se determinar a vazão volumétrica Q_f :

$$Q_f = B \cdot \Delta P + C \cdot \Delta P^2 \left(\frac{\mu_{std}}{\mu_f} \right) \quad (4.5)$$

Onde:

Q_f = Vazão volumétrica do ar úmido [m³/s]

B, C = Constantes específicas

ΔP = Diferencial de pressão [kPa]

$\left(\frac{\mu_{std}}{\mu_f}\right)$ = Razão da viscosidade do gás escoando a 20°C e o fluido escoando nas condições de operação.

A viscosidade do ar úmido nos testes (μ_f) é calculada com:

$$\mu_f = \left(\frac{14,58 \cdot T^{3/2}}{110,4 + T}\right) \left(\frac{\mu_u}{\mu_s}\right) \quad (4.6)$$

Por conseguinte os valores das constantes assim como das viscosidades são obtidos do manual do medidor do tipo laminar. Finalmente a vazão mássica de ar úmido é calculada a seguir.

$$\dot{m}_{ar,u} = \rho_{ar} \cdot Q \quad (4.7)$$

Por outro lado, o consumo de ar seco estará em função da vazão mássica do ar úmido e a umidade absoluta:

$$\dot{m}_{ar,s} = \frac{\dot{m}_{ar,u}}{1 + w} \quad (4.8)$$

4.3.6. Massa específica do Ar Ambiente

A massa específica do ar ambiente pode-se calcular através da seguinte relação (Wylen, 1995):

$$\rho_{ar} = \frac{P_{ar}}{R_{ar} \cdot T_{amb}} \quad (4.9)$$

Onde:

ρ_{ar} = Massa específica do ar ambiente [kg/m³]

P_{ar} = Pressão atmosférica [kPa]

R_{ar} = Constante do ar ambiente [kJ/kg.K]

T_{amb} = Temperatura ambiente [K]

A constante R_{ar} pode-se corrigir através da umidade absoluta (w):

$$R_{ar} = \frac{R_{ar,s} + R_{vapor} \cdot w}{1 + w} \quad (4.10)$$

Onde,

$R_{ar,s}$ = Constante do ar seco (0,287 kJ/kg·K)

R_{vapor} = Constante do vapor da água (0,46152 kJ/kg·K)

W = Umidade absoluta para a mistura ar-vapor de água

A determinação da umidade absoluta para uma mistura ar-vapor de água é calculado por (Wyllen, 1995):

$$w = \frac{0,622 \cdot \frac{U_r}{100} \cdot P_{sat}}{P_{ar} - \left(\frac{U_r}{100} \cdot P_{sat} \right)} \quad (4.11)$$

Nesta ultima relação:

U_r = Umidade relativa em [%]

P_{sat} = Pressão de saturação do vapor de água á temperatura ambiente [kPa],

$$P_{sat} = 10^{30,59051 - 8,21 \log T_{amb} + 0,0024804 T_{amb} - 3142,31/T_{amb}} \quad (4.12)$$

Onde

T_{amb} = Temperatura ambiente, [K]:

4.3.7. Eficiência Volumétrica

Parâmetro utilizado para medir a eficácia do processo de indução do motor e a taxa efetiva de volume de ar deslocado pelo embolo (Cuisano, 2006). É a relação entre a massa de ar aspirado por um cilindro e a massa de ar que ocuparia o mesmo volume nas condições normais de pressão e temperatura.

$$n_v = \frac{2 \cdot \dot{m}_{ar,u}}{\rho_{ar} \cdot V_d \cdot N \cdot 60} \quad (4.13)$$

Onde:

n_v = Eficiência volumétrica [%]

$\dot{m}_{ar,u}$ = Vazão de ar úmido [kg/h]

ρ_{ar} = Massa específica do ar [kg/m³]

V_d = Volume deslocado [m³]

N = Velocidade angular [RPM]

4.3.8. Razão Ar-Combustível

Em ensaios de motores, a vazão mássica de ar seco (\dot{m}_{ar}) e a vazão mássica de combustível (\dot{m}_c) são medidas. A relação destas taxas é útil na definição das condições de operação do motor (Cuisano, 2006).

$$A / C = \frac{\dot{m}_{ar,s}}{\dot{m}_c} \quad (4.14)$$

Onde:

A / C = Relação ar-combustível

$\dot{m}_{ar,s}$ = Vazão de ar seco [kg/h]

\dot{m}_c = Vazão de combustível [kg/h]

4.3.9. Razão de Equivalência e Fator Lambda

Para a combustão em motores, os produtos de combustão são significativamente diferentes para misturas ricas e pobres por tanto a relação da razão ar-combustível (A/C) é um parâmetro útil para definir a composição da mistura nos testes HCCL.

A razão de equivalência é uma medida da mistura ar-combustível às condições estequiométricas sendo definida como:

$$\phi = \frac{A / C_{est}}{A / C_{real}} \quad (4.15)$$

Onde:

ϕ = Razão de equivalência

A / C_{est} = Relação ar combustível estequiométrica, [kg/h]

A / C_{real} = Relação ar combustível real, [kg/h].

Quando $\phi < 1$, a mistura ar-combustível é pobre em combustível, é dizer tem-se ar em excesso e haverá oxigênio presente nos gases de escapamento do motor. Se $\phi = 1$, a mistura é estequiométrica e a energia liberada pelo combustível é máxima e, quando $\phi > 1$, a mistura é rica em combustível e o excesso não será queimado e haverá CO_2 e combustível presente nos gases de escapamento.

O inverso da razão equivalente é conhecido como o fator lambda (λ). O fator lambda é um parâmetro conhecido também como a relação de ar e o combustível, é muito utilizado já que permite obter uma maior informação para definir a composição da mistura. Basicamente é definido como a razão entre o ar-combustível a condições reais e a razão ar-combustível a condições estequiométricas.