

5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

5.1. COMBUSTÍVEIS

No presente trabalho foram utilizados como combustíveis de teste o etanol anidro e o etanol hidratado utilizados como padrão para ensaios de emissões e consumo de combustível, especificados conforme Resolução ANP n°5/2005. Os certificados de análise desses combustíveis encontram-se no Apêndice I.

5.2. METODOLOGIA DE TESTE

Decidiu-se pela realização dos testes nas rotações de 2250rpm (torque máximo) e 5500rpm (potência máxima), ambas em plena carga, ou seja, com 100% de abertura de borboleta do acelerador (α). Também foi utilizada uma rotação denominada rotação de cruzeiro, 1900rpm, com 8° de abertura da borboleta do acelerador. A rotação de cruzeiro foi obtida a partir de dados coletados do veículo Siena tetrafuel, equipado com o mesmo motor utilizado no presente trabalho, a uma velocidade de 60km/h, em quinta marcha no dinamômetro de chassis. Para cada um desses pontos operacionais do motor, foi utilizado o etanol anidro e o etanol hidratado. A Tabela 5.1 resume os pontos operacionais testados.

Tabela 5.1 – Pontos operacionais testados.

Descrição	Rotação (RPM)	α (%) / (°)
Potência Máxima	5500	100%
Torque Máximo	2250	100%
RPM Cruzeiro	1900	8°

Dessa forma, espera-se observar o comportamento dos combustíveis em situações de performance máxima de torque e potência do motor, bem como em situação real de utilização. Para cada condição de teste serão ajustados, pela central programável, o avanço de ignição e o parâmetro lambda para se obter as condições de melhor torque. A seguinte seqüência será observada:

- 1 – Estabilizar o motor na condição de rotação e carga desejada. Esta condição será controlada automaticamente pelo dinamômetro do banco de provas;
 - 2 – Ajustar o avanço de ignição pela central programável;
 - 3 – Registrar torque, potência e consumo no AVL PUMA, emissões no Horiba OBS 2200 e curva de pressão de combustão no AVL Indimodul, entre outros parâmetros, para vários valores de lambda ajustados através da central programável.
 - 4 – Uma vez obtido o valor de lambda correspondente ao maior torque do motor, deve-se variar o avanço de ignição, buscando aquele que também maximize o torque medido no motor.
- As Figuras 5.1 e 5.2 exemplificam duas telas do software da central programável usado na calibração do motor.

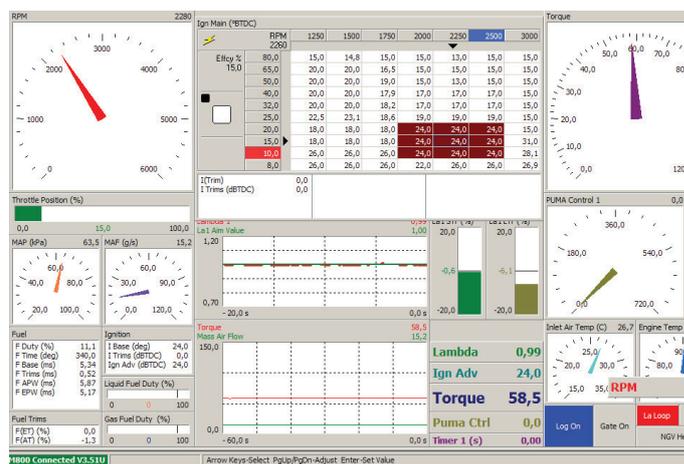


Figura 5.1 – Tela de operação do software da central programável para ajuste do avanço de ignição.

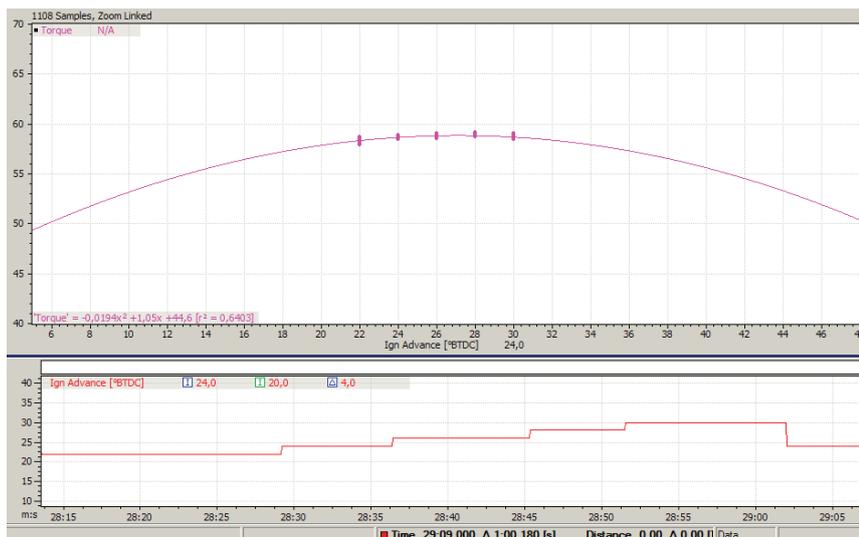


Figura 5.2 – Tela de operação do software da central programável para maximizar o Torque em função do avanço de ignição.

Ao final desse procedimento é estabelecido, portanto, o par avanço de ignição-lambda de máximo torque para o ponto operacional. Nessas condições, o sistema AVL PUMA realizará oito medições dos parâmetros de desempenho, cada uma com duração total de trinta segundos a uma taxa de aquisição de 1Hz. Dessa forma, o resultado final será composto por oito médias de 30 medições cada. Os ensaios e resultados seguirão as determinações da norma ABNT NBR 1585. Simultaneamente, o sistema de análise da combustão AVL Indicom registrará oito medições de trezentos ciclos de compressão/expansão (2400 ciclos). Os ciclos 1, 150 e 300 de cada uma das oito medições serão selecionados, de forma a obter uma curva média de pressão baseada em um total de vinte e quatro válidas, cujo coeficiente de variação da pressão máxima não deverá ultrapassar 10% (HEYWOOD *et al.*, 1979). A curva de pressão, dentre as vinte e quatro, que tiver tanto aspecto quanto pressão máxima mais semelhantes à curva média será selecionada para que, a partir de seus dados, sejam realizados os cálculos dos parâmetros de combustão. Os dados de pressão serão adquiridos em intervalos de $0,2^\circ$ do ângulo do eixo de manivelas. Também em paralelo, o sistema Horiba OBS 2200 realizará aquisição das emissões instantâneas de THC, CO, NO_x e CO₂. O resultado final será a média de sessenta medições com 3 segundos de duração cada.

Conforme descrito acima, as medições foram realizadas para o etanol anidro (EA) e para o etanol hidratado (EH) nos pontos operacionais de potência máxima e torque máximo. No ponto RPM Cruzeiro, foi adotado lambda igual a um (mistura estequiométrica) em ambos os casos, sendo apenas o avanço de ignição otimizado. Tal escolha foi feita para que esse ponto de operação refletisse as condições coletadas no veículo Siena tetrafuel em dinamômetro de chassi, o qual registrou mistura estequiométrica nas condições em questão. Além disso, o etanol anidro foi testado reproduzindo-se as condições de avanço de ignição e lambda otimizadas para o etanol hidratado (EAMap_EH), de forma a simular um motor mapeado para o etanol hidratado funcionando com etanol anidro. A Tabela 5.2 resume as configurações de teste adotadas.

Tabela 5.2 – Configurações de teste adotadas.

Configuração	Combustível	Otimização	Ponto de Operação	Avanço de Ignição (°)	Lambda
EA	Etanol Anidro	Etanol Anidro	Potência Máxima	31,7	0,89
			Torque Máximo	21,1	0,91
			RPM Cruzeiro	24,0	1,00
EH	Etanol Hidratado	Etanol Hidratado	Potência Máxima	33,0	0,89
			Torque Máximo	21,8	0,91
			RPM Cruzeiro	28,0	1,00
EA Map_EH	Etanol Anidro	Etanol Hidratado	Potência Máxima	33,0	0,89
			Torque Máximo	21,8	0,91
			RPM Cruzeiro	28,0	1,00

A Figura 5.3 apresenta os gráficos utilizados para determinação dos lambdas e ângulos de avanço de ignição ótimos mencionados na Tabela 5.1 para potência máxima, contendo os coeficientes de correlação R^2 .

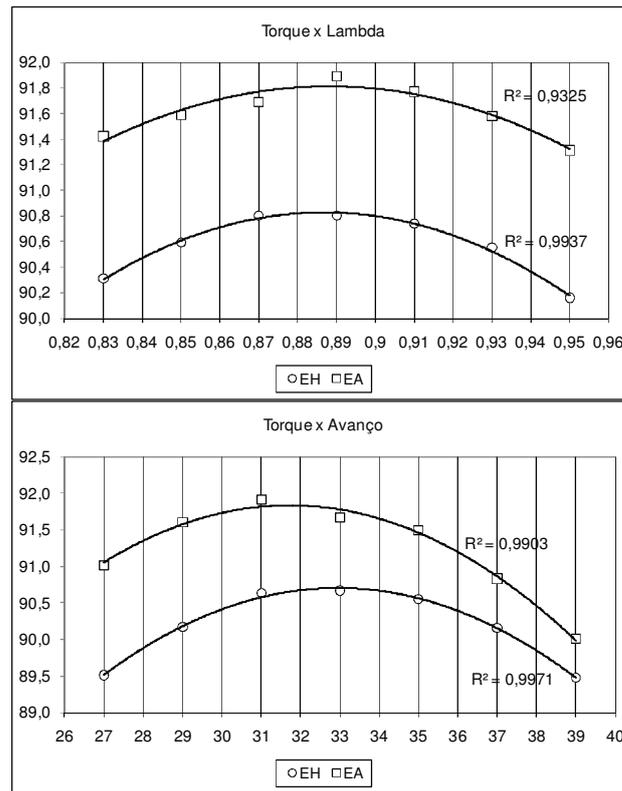


Figura 5.3 – Gráficos usados para determinação de lambda e avanço ótimos para potência máxima.

A Figura 5.4 apresenta os gráficos utilizados para determinação dos lambda e ângulos de avanço de ignição ótimos mencionados na Tabela 5.1 para torque máximo, contendo os coeficientes de correlação R^2 .

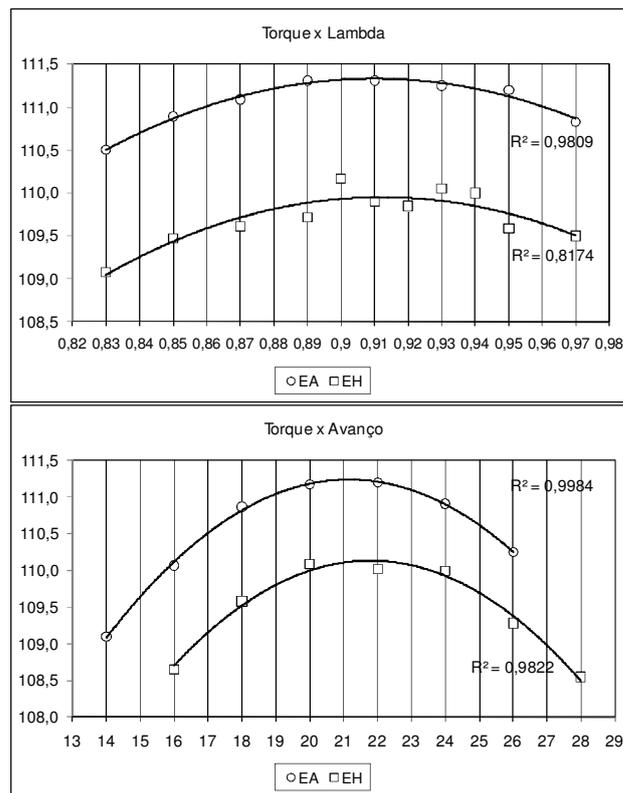


Figura 5.4 – Gráficos usados para determinação de lambda e avanço ótimos para torque máximo.

A Figura 5.5 apresenta os gráficos utilizados para determinação dos lambda e ângulos de avanço de ignição ótimos mencionados na Tabela 5.1 para RPM de cruzeiro, contendo os coeficientes de correlação R^2 .

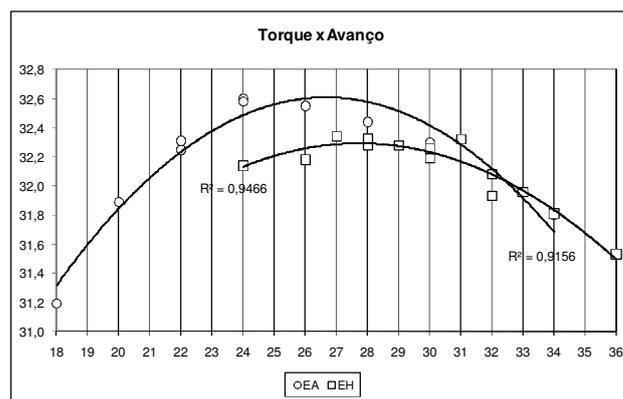


Figura 5.5 – Gráfico usado para determinação de avanço ótimo para RPM de cruzeiro.

Durante os ensaios a temperatura de água do motor foi mantida em $90 \pm 2^\circ\text{C}$. A temperatura do óleo do motor foi estabilizada em seu valor máximo obtido para cada regime de funcionamento, limitada a 120°C . Essa metodologia é justificada pela calibração usualmente adotada pelas montadoras, privilegiando potência em

plena carga e emissões em carga parcial. Em plena carga, para o etanol, o lambda de maior potência situa-se normalmente na faixa de 0,88 a 0,92. Em carga parcial, o lambda adotado para maximizar a eficiência do catalisador e reduzir emissões é 1,00 (MELO, 2007). Para a manutenção do lambda constante, os testes foram executados em “closed-loop”, modificando-se apenas o valor alvo para o lambda na central programável.

5.3. INCERTEZAS DE MEDIÇÃO

A norma ABNT NBR 17025, exigida pelo Inmetro para obtenção de acreditação de laboratórios, tem como um de seus requisitos o cálculo das incertezas de medição. No presente trabalho as incertezas de medição dos parâmetros de desempenho foram calculadas conforme MELO *et al.* (2004, 2006). De acordo com o autor, as incertezas de medição podem ser divididas em incertezas do tipo A (I_A) e incertezas do tipo B (I_B). As incertezas do tipo A se referem à repetitividade da medição, enquanto as incertezas do tipo B dizem respeito às calibrações, resoluções e padrões dos instrumentos utilizados. Ainda de acordo com MELO (2004, 2006), os dois tipos de incerteza mencionados acima podem ser combinados, obtendo-se a incerteza combinada (I_C). Por fim, através da aplicação do fator de abrangência k multiplicando o valor da incerteza combinada, é possível calcular a incerteza expandida (I_E). O valor de k pode ser adotado como igual a 2 para um grau de confiança de 95%.

$$I_A = \frac{DP}{\sqrt{n}} \quad (5.1)$$

$$I_B = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + \dots + S_i^2} \quad (5.2)$$

$$I_C = \sqrt{I_A^2 + I_B^2} \quad (5.3)$$

$$I_E = kI_C \quad (5.4)$$

Onde,

DP – desvio padrão das medições;

n – número de pontos medidos;

S_1, S_2, \dots, S_i – componentes de calibração, resolução e padrões dos instrumentos.

As incertezas do tipo A podem ser obtidas a partir dos dados medidos utilizando-se planilhas eletrônicas, enquanto as incertezas do tipo B foram calculadas e constam do Apêndice II.

Os parâmetros de combustão, por terem sido obtidos a partir de uma única curva de pressão, conforme apresentado no Item 5.2, tiveram as suas incertezas calculadas de acordo com o método de Kline e McClintok (1953).

$$iR = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} i_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} \times i_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} \times i_n\right)^2} \quad (5.5)$$

Onde,

iR – incerteza de medição da variável dependente R ;

i_n – incerteza de medição da variável independente “ n ”.