

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM MOTOR CICLO OTTO ALIMENTADO COM ETANOL DE 75 INPM E COM TAXA DE COMPRESSÃO AUMENTADA

Armando José Dal Bem

Gilberto H. A. Koike

Virgolino de Oliveira S/A Açúcar e Álcool, e-mails: armando@gvo.com.br, gkoike@gvo.com.br

Fabiano Tadeu Mathias Costa

Marcos Ferreira Polito

Luís Carlos Passarini

Escola de Engenharia de São Carlos, USP, e-mails: fabianoc@sc.usp.br, mfpolito@sc.usp.br, luca@sc.usp.br

Afonso Lopes

Bolsista de Produtividade do CNPQ – Nível II, UNESP, e-mail: afonso@fcav.unesp.br

Resumo

Motor a etanol teve grande aplicação no Brasil com a implantação do PROÁLCOOL, programa lançado na década de 1970 com o intuito de reduzir a dependência externa do petróleo. Desde então, o etanol utilizado tem sido o de 92,8 INPM. O presente trabalho teve por objetivo avaliar o desempenho e a emissão de um motor ciclo Otto funcionando com dois tipos de etanol, 92,8 INPM e 75 INPM, sendo o último considerado de baixo teor alcoólico, possibilitando variar a taxa de compressão. O ensaio foi realizado com motor de 1.000 cm³ de quatro cilindros, em bancada dinâmométrica, no Laboratório de Motores da EESC/USP, Campus de São Carlos. Os resultados evidenciaram que o combustível de baixo teor alcoólico aceitou aumento na taxa de compressão de 13,5:1 para 16,2:1, ressaltando-se que nessa condição houve aumento de torque e da potência máxima, redução de emissão de NOx e aumento de consumo e de emissão de hidrocarboneto.

Palavras-chave: motores a etanol, etanol combustível, produção de etanol, emissões de motores a etanol, mistura etanol e água, etanol hidratado combustível.

Introdução

Em 1975, o governo brasileiro lançou o PROÁLCOOL, um programa para utilização de álcool como combustível, com a finalidade de reduzir a dependência externa do petróleo, propiciando, assim, o desenvolvimento do veículo a etanol, por meio de incentivos fiscais e preços subsidiados para esse combustível. Aliado aos incentivos criados pelo programa, o melhor desempenho dos motores a etanol, em termos de potência e eficiência termodinâmica, (Penido Filho, 1991) e as vantagens ambientais tornaram-no o carro-preferência do usuário. Mas o etanol foi perdendo a vantagem econômica para o consumidor à medida que o governo retirava os subsídios. Além disso, o desabastecimento ocorrido no final dos anos 1980 gerou certa desconfiança nos consumidores em adquirir esse tipo de veículo. Ao longo da década de 1990 e início deste século, o setor de produção de etanol tem melhorado sua produtividade e reduzido os custos diante do crescente preço do petróleo, tornando o etanol novamente competitivo. Apesar disso, o consumidor não parecia disposto a adquirir um carro a etanol novamente.

A partir da década de 1990, o vantajoso preço do etanol em determinadas épocas, ou regiões, e a tecnologia de controle digital aplicada aos motores Otto levaram a uma prática popular, a de adicionar etanol à gasolina durante o abastecimento, promovendo o popular “rabo-de-galo” (Dal Bem, 2003). No cenário permeado por esses fatores surgiu o veículo flexível, cuja principal capacidade é ter um motor capaz de funcionar com qualquer mistura de etanol e gasolina. Entretanto, uma das críticas ao uso do motor flexível é que ele não foi projetado para trabalhar com taxa de compressão otimizada para o etanol. Assim, o motor flexível, quando funcionando com etanol, perderia parte da vantagem termodinâmica que o motor a etanol tem sobre o motor à gasolina.

No contexto apresentado, assim como ocorreu no Brasil, o etanol poderia vir a se tornar relevante alternativa à gasolina também em nível mundial, necessitando, para isso, de grande expansão de sua produção. A produção de etanol de menor teor alcoólico que o de 92,8 INPM exige menor consumo de energia; já a planta industrial teria sua capacidade aumentada em virtude do menor

tempo de processamento para atingir o grau desejável. Por outro lado, o etanol mais hidratado traz a expectativa de poder ser operado com um motor com taxa de compressão maior e, conseqüentemente, com melhor rendimento termodinâmico. Portanto, o que se pode esperar da operação do motor de ciclo Otto com um etanol mais hidratado?

O objetivo deste trabalho é contribuir para a resposta a essa questão.

Metodologia

Descrição do experimento

A realização do experimento processou-se por meio de ensaio de um motor de combustão interna ciclo Otto, a etanol, modelo VW AT 1000 8V, de taxa de compressão de 13,5:1, em bancada dinamométrica em duas condições:

- motor na condição original de fábrica, funcionando com etanol de padrão comercial, ou seja, etanol de 92,8 INPM;
- motor com taxa de compressão aumentada para 16,2:1, funcionando com etanol de 75 INPM, com variações no ajuste de ponto de ignição e tempo de injeção.

O ensaio foi realizado com o motor funcionando em plena carga e visou ao levantamento de torque em função da rotação, do consumo horário de combustível e das emissões de gases. Do torque, da rotação e do consumo horário de combustível derivaram a potência, o consumo específico e o rendimento global do motor. A faixa de rotação escolhida foi de 2000 rpm a 4000 rpm, com intervalos de 500 rpm.

Foram levantados dados da umidade do ar, por meio da temperatura de bulbo úmido e de bulbo seco, e da pressão atmosférica, com a finalidade de realizar a correção da potência e do torque em função das condições atmosféricas, segundo a norma técnica NBR ISO 1585 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Ensaio em bancada dinamométrica com o motor operando na condição original de fábrica e com etanol de 92,8 INPM

Determinação do torque do motor

A determinação do torque do motor, em função da rotação, foi realizada por dinamômetro de corrente Foucault marca Schenck, modelo W70 de 70 kW, de potência máxima e resolução de 200 rpm composto por célula de carga marca Alfa Instrumentos, modelo IC331/0 de carga máxima de 99,1 mV e resolução de 0,1 mV. O processo de calibração desse dinamômetro resultou em equação que fornece o torque do motor para as diversas rotações e variações do teste, em função da tensão lida no mostrador da célula de carga. Essa equação, associada ao erro inerente ao processo de calibração adotado, é mostrada a seguir:

$$\text{Torque do motor [N.m]} = 1,9735 \cdot \text{tensão [mV]} + 0,5699 \pm 0,77 \quad (1)$$

Determinação do consumo horário de combustível

O consumo horário de combustível foi realizado por um sistema composto por computador PC compatível com placa de aquisição PCI-1200 da National Instruments e algoritmo de aquisição desenvolvido em linguagem gráfica Lab VIEW pelo Laboratório de Motores e Laboratório de Eletrônica Embarcada da EESC e balança digital marca Toledo, modelo 9094-I, de carga máxima de 15 kg, com resolução de 5 g.

Determinação da emissão de gases de exaustão

Os gases de exaustão foram analisados por equipamento da marca Tecnomotor, modelo TM131. Foram coletados no duto de saída do escapamento e conduzidos até o aparelho por mangueira de silicone de ½ polegada, passando por sistema de serpentina e filtro com a finalidade de separar a água condensada formada como produto de combustão.

Determinação da eficiência de conversão de combustível

A eficiência de conversão de combustível foi determinada pela expressão definida por Heywood (1988) como:

$$\eta = \frac{3600}{C_s \cdot P_{ci}} \quad (2)$$

em que:

η = eficiência de conversão de combustível;

C_s = consumo específico [g/(kW.h)];

P_{ci} = poder calorífico inferior (MJ/kg).

O procedimento para a determinação do consumo horário de combustível foi descrito no item “Determinação do consumo horário de combustível”. Para a determinação do consumo específico de combustível, basta dividir esse consumo horário pela potência medida do motor, obtida por meio do torque e da rotação. O poder calorífico inferior, para este trabalho, foi determinado pelo Laboratório do Centro de Tecnologia Canaveira (CTC). Além do poder calorífico, foi determinado, também, o teor alcoólico do etanol utilizado no experimento.

Ensaio em bancada dinamométrica com o motor funcionando com taxa de compressão aumentada para 16,2:1 e com etanol de 75 INPM

Esta fase do ensaio, na qual o motor funcionou com taxa de compressão aumentada e etanol de 75 INPM, seguiu o mesmo procedimento do item “Ensaio em bancada dinamométrica com o motor operando na condição original de fábrica e com etanol de 92,8 INPM” e subitens, para a determinação do torque, das emissões, do consumo de combustível e eficiência de conversão energética. No entanto, foi necessário “formular” o novo combustível, ou seja, etanol de 75 INPM, e aumentar a taxa de compressão do motor original de fábrica de 13,5:1 para 16,2:1.

Obtenção de etanol de 75 INPM, a partir de etanol de 92,8 INPM

A obtenção de etanol de 75 INPM foi processada a partir de etanol 92,8 INPM. Para isto, foi diluída e homogeneizada certa quantidade de água destilada ao etanol de 92,8 INPM. A quantidade de água necessária foi determinada por cálculo de balanço de massa, conforme Dal Bem (2008), e o valor do teor alcoólico final da mistura foi comprovado pelo Laboratório de Centro de Tecnologia Copersucar.

Procedimento para aumento da taxa de compressão

A taxa de compressão é definida por Martins (2006) como:

$$\rho = \frac{(V_c + v_{cc})}{v_{cc}} \quad (3)$$

em que:

ρ = taxa de compressão;

V_c = volume unitário do cilindro;

v_{cc} = volume da câmara de combustão.

No caso do motor ensaiado neste experimento, o volume da câmara de combustão é formado pela combinação de quatro volumes menores que podem ser visualizados, esquematicamente, pela Figura 1.

Os volumes, v_1 , v_2 e v_3 foram determinados pela medição da quantidade de líquido necessário para preencher esses espaços. O volume v_4 , assim como o volume do cilindro (V_c), foi determinado pelas medidas do diâmetro e curso do cilindro e da altura h , com os devidos cálculos volumétricos. De posse dos volumes parciais, a taxa de compressão desejada, de 16,2:1, foi alcançada pela usinagem da face do cabeçote, a qual resultou na diminuição do volume v_1 . Esse volume parcial foi novamente medido para confirmar o valor desejado.

O ensaio do motor foi então realizado de modo a se obter a curva de torque do motor em função da rotação. Essa curva de torque foi obtida buscando-se o valor máximo de torque para cada rotação do ensaio por meio da variação do fator lambda e do ponto de ignição. A variação do fator lambda e do ponto de ignição, por sua vez, foi realizada

por meio do *software* ECM 2001 e de um emulador de EPROM. O software tem a capacidade de modificar os mapas da unidade de controle eletrônico (ECU) e, conseqüentemente, do fator lambda e ponto de ignição, em tempo real, com o motor em funcionamento. O emulador atua como “interface” entre o PC e a ECU, fazendo a comunicação entre a central eletrônica de injeção e o software ECM2001, de modo que o veículo trabalhe sem a EPROM na ECU, ficando sua função comandada pelo computador. O sistema permite que toda a modificação realizada no mapa de injeção seja atualizada no mesmo instante, na memória do emulador de EPROM da ECU.

Assim, realizou-se o ensaio, desenvolvendo-se em três modalidades:

- ajustagem do fator lambda e do ponto de ignição para cada parâmetro de rotação do ensaio de modo a obter a melhor curva de torque;
- ajustagem do fator lambda para o valor fixo de 1,00, variando-se o ponto de ignição para cada parâmetro de rotação do ensaio, de modo a obter a melhor curva de torque;
- ajustagem do fator lambda para o valor fixo de 1,10, variando-se o ponto de ignição para cada parâmetro de rotação do ensaio, de modo a obter a melhor curva de torque.

Resultados e Discussões

As comparações entre os ensaios foram subdivididas em desempenho e emissões e colocadas em forma de gráfico. Como desempenho estão dispostos os dados de torque, potência, consumo horário de combustível, consumo específico de combustível e eficiência de conversão de combustível (ou rendimento global do motor). As comparações de emissões de gases de exaustão englobaram emissões HC, NOx.

Resultados do torque corrigido em função da rotação

Ao avaliar a Figura 2, nota-se que o torque máximo do motor com taxa de compressão de 13,6:1 funcionando com etanol de 92,8 INPM ocorreu, aproximadamente, em 3.500 rpm, confirmando a informação do manual do fabricante.

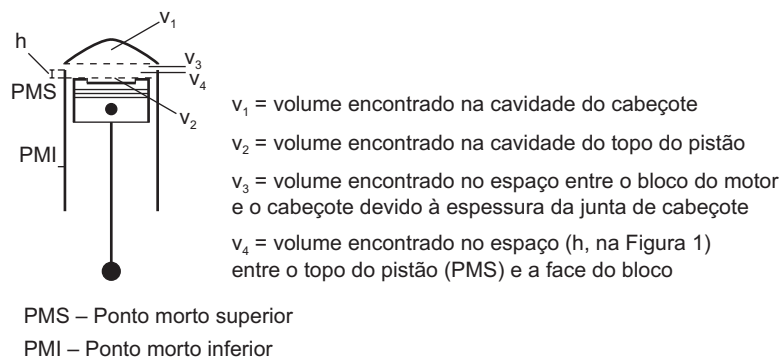


Figura 1 Volumes parciais que compõem a câmara de combustão.

Já para o motor com taxa de compressão de 16,2:1 funcionando com etanol 75 INPM, o torque máximo ocorreu em 4000 rpm. Observa-se, ainda, que o motor com taxa de compressão de 16,2:1 apresentou torque máximo ligeiramente superior ao motor com taxa de compressão de 13,6:1 com etanol 92,8 INPM.

A comparação do torque corrigido é mostrada na Figura 3. A curva mais acima é a referência. É o resultado da operação do motor de taxa de compressão 13,6:1 funcionando com etanol 92,8 INPM e fator lambda 0,95. As outras duas curvas são resultado do motor com taxa de compressão 16,2:1 e etanol 75 INPM. A curva do meio refere-se à mistura estequiométrica (fator lambda igual a 1,00) e a de baixo, mistura pobre (fator lambda igual a 1,10). Vê-se que ocorreu decréscimo no torque corrigido para os dois casos. O decréscimo mais significativo ocorreu para o fator lambda igual a 1,10,

como esperado, uma vez que a mistura ar-combustível ficou mais pobre.

Resultado da potência corrigida em função da rotação

A Figura 4 traz os resultados da potência corrigida, em função da rotação. Nota-se que as curvas apresentam valores bastante próximos quando se comparam os ensaios. Essas curvas demonstram que foi possível manter, e até ganhar, potência mesmo com uso de combustível de menor poder calorífico. No caso, o ganho de potência do motor com taxa de compressão 16,2:1 com etanol 75 INPM se deu na rotação máxima do ensaio.

Quando o motor com taxa de 16,2:1 funcionou com mistura estequiométrica (fator lambda igual a 1,00) e mistura pobre (fator lambda igual a 1,10), houve queda na potência para todas as rotações, sendo mais expressiva para o segundo caso (Figura 5).

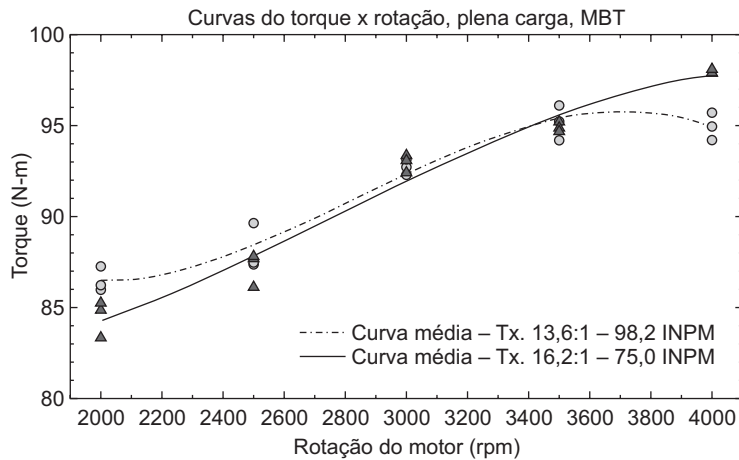


Figura 2 Torque corrigido para o motor com taxa de compressão 13,6:1/etanol 92,8 INPM e 16,2:1/etanol 75 INPM (MBT = *Maximum Brake Torque*)..

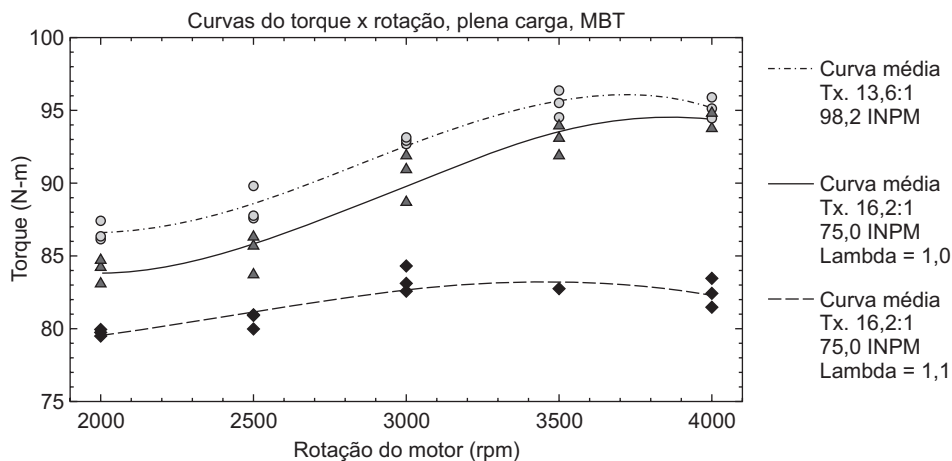


Figura 3 Torque corrigido para o motor com taxa de compressão 13,6:1/etanol 92,8 INPM comparado com o torque corrigido para o motor com taxa 16,2:1/etanol 75 INPM com fator lambda de 1,00 e 1,10.

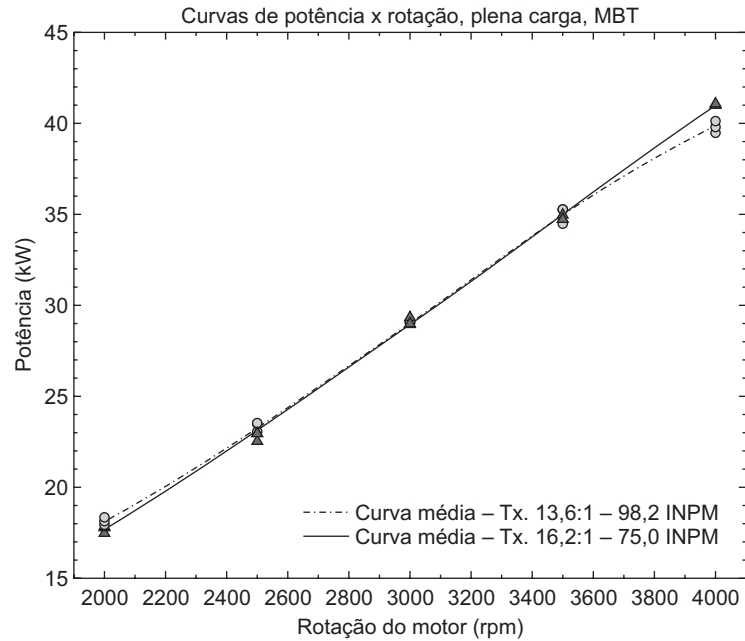


Figura 4 Potência corrigida para o motor com taxa de compressão 13,6:1/etanol 92,8 INPM e 16,2:1/etanol 75 INPM.

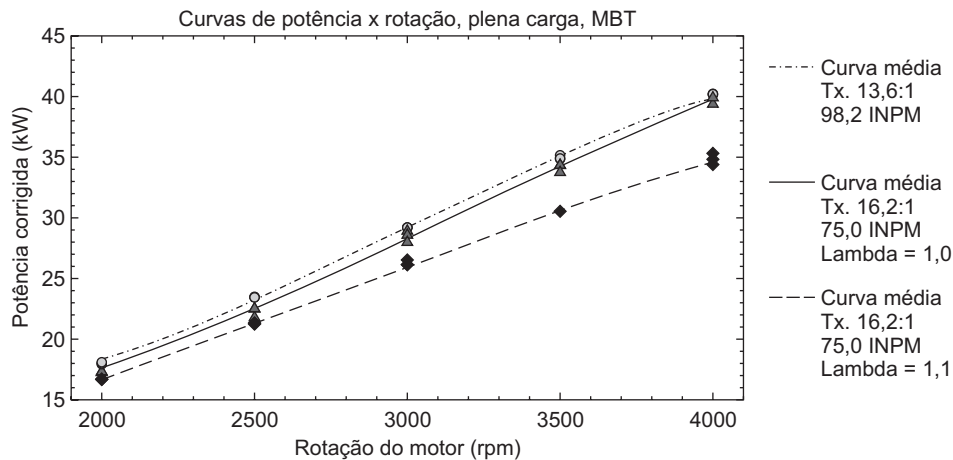


Figura 5 Potência corrigida para o motor com taxa de compressão 13,6:1/etanol 92,8 INPM e 16,2:1/etanol 75 INPM com fator lambda de 1,00 e 1,10.

Resultados do consumo horário de combustível em função da rotação

O menor consumo horário de combustível, como era de se esperar, apareceu durante o funcionamento do motor com taxa de compressão de 13,6:1 e álcool 92,8 INPM, conforme pode ser visualizado pela Figura 6. Isso é esperado, porque o etanol 92,8 INPM possui mais energia por massa que o etanol 75 INPM. Esse fato foi atenuado quando o motor com taxa de compressão 16,2:1 funcionou com mistura ar-combustível pobre (fator lambda de 1,10), em que apresentou valores muito próximos de consumo em relação ao motor com taxa de compressão de 13,6:1 e etanol 92,8 INPM.

Resultado do consumo específico de combustível em função da rotação

O motor com taxa de compressão de 13,6:1 funcionando com etanol 92,8 INPM apresentou consumo específico de combustível significativamente menor que o motor com taxa de compressão de 16,2:1 funcionando com etanol 75 INPM, como pode ser observado na Figura 7. Como o consumo específico é dado pelo consumo horário de combustível dividido pela potência, esse resultado mostra que o aumento do consumo horário de combustível, apresentado pela Figura 6, para o motor com taxa de compressão de 16,2:1 funcionando com etanol 75 INPM foi mais significativo que o ganho de potência mostrado

pela Figura 4. O motor com taxa de compressão de 16,2:1 funcionando com etanol 75 INPM e ajuste do fator lambda em 1,00 e 1,10 apresentou, também, consumo específico superior ao motor com taxa de 13,6:1 funcionando com etanol 92,8 INPM, conforme apresentado na Figura 8. Verifica-se que, com ajuste do fator lambda em 1,10, a curva foi ascendente. É possível que não tenha ocorrido bom aproveitamento do combustível durante o teste, uma vez que é esperada uma curva quase horizontal ao longo da faixa de rotações.

Resultado da eficiência de conversão de combustível ou rendimento global do motor

Na Figura 9 pode-se ver o comportamento da eficiência de conversão de combustível dos ensaios. As curvas indicam que o motor com taxa de compressão de 16,2:1 funcionando com álcool 75 INPM perdeu eficiência

de conversão de combustível em relação ao motor com taxa de compressão de 13,5:1 funcionando com álcool de 92,8 INPM. Os pontos de maior proximidade das curvas estão nas rotações de 2000 rpm e 3700 rpm, aproximadamente, e os de maior afastamento, na rotação de 3000 rpm, indicando, nesta rotação, perda de eficiência inferior a 2% (0,6 ponto percentual), aproximadamente.

A Figura 10 mostra que a mudança da relação ar-combustível tem bastante influência na eficiência de conversão do combustível, podendo-se observar significativa melhora do motor com taxa de compressão de 16,2:1 funcionando com etanol 75 INPM quando foi ajustado o fator lambda para 1,00 e 1,10 em relação ao motor com taxa de compressão de 13,6:1 funcionando com etanol 92,8 INPM. Com fator lambda de 1,10, porém, observa-se decréscimo acentuado da eficiência de conversão do combustível com o aumento da rotação.

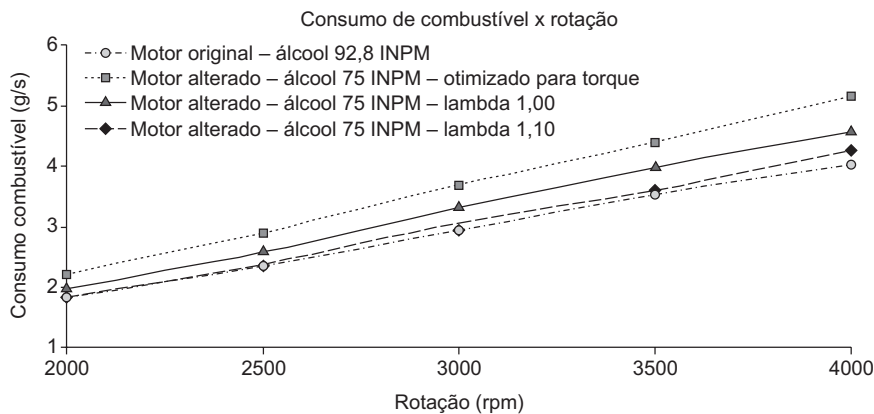


Figura 6 Consumo horário de combustível em função da rotação.

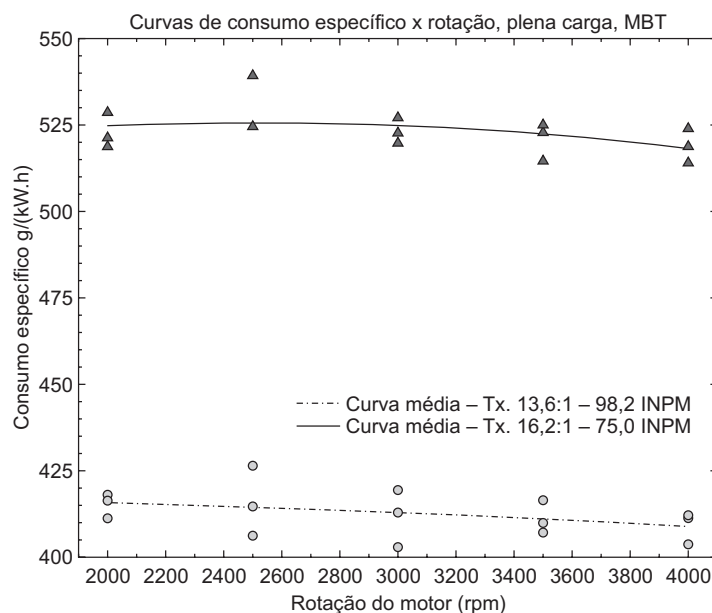


Figura 7 Consumo específico de combustível para motor com taxa de compressão de 13,6:1/etanol 92,8 INPM e 16,2:1/etanol 75 INPM.

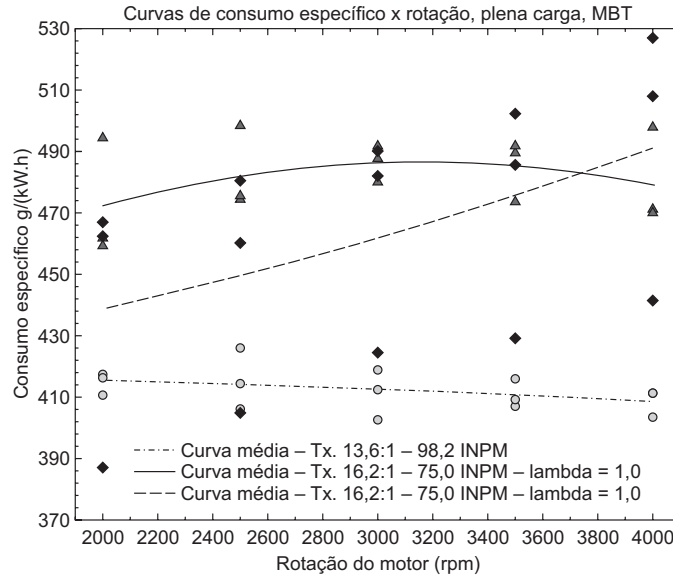


Figura 8 Consumo específico de combustível para motor com taxa de compressão de 13,6:1/etanol 92,8 INPM e 16,2:1/etanol 75 INPM com fator lambda de 1,00 e 1,10.

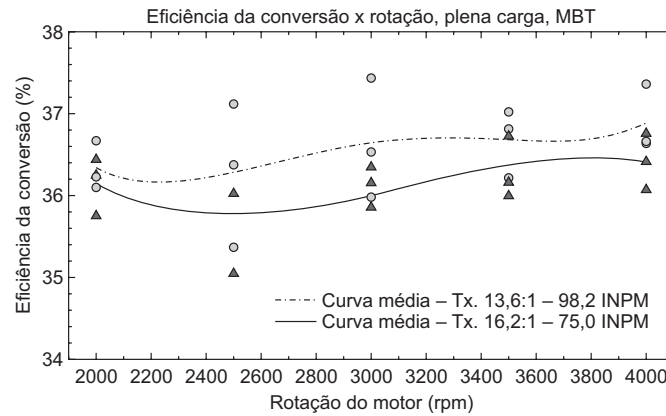


Figura 9 Eficiência de conversão do combustível para o motor com taxa de compressão de 13,6:1/etanol 92,8 INPM e 16,2:1/etanol 75 INPM.

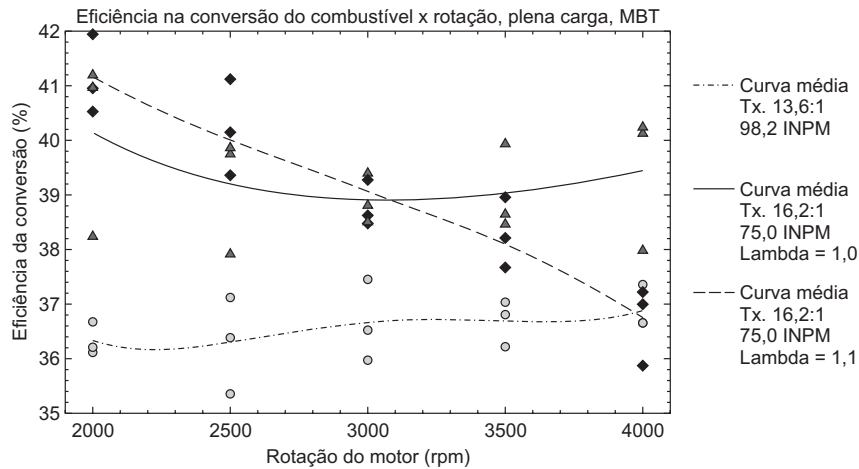


Figura 10 Eficiência de conversão do combustível do motor com taxa de compressão de 13,6:1/etanol 92,8 e 16,2:1/etanol 75 INPM com fator lambda de 1,00 e 1,10.

Havia expectativa de aumento da eficiência de conversão do combustível quando a taxa de compressão fosse aumentada porque, pelo menos teoricamente, um aumento da taxa de compressão determina um aumento do rendimento térmico que compõe a eficiência de conversão do combustível. Dois fatores podem ter influenciado negativamente essa eficiência. Primeiro, o aumento da taxa de compressão pode ter provocado diminuição do rendimento mecânico, uma vez que os esforços nos mancais e pontos de atrito são maiores em virtude do aumento da taxa de compressão. Segundo, a mudança no tipo de combustível pode ter sido acompanhada pela diminuição do rendimento de combustão. Porém, seria preciso investigar melhor para esclarecer esses fatos e também para descobrir por que houve queda acentuada da eficiência de conversão do combustível com a rotação quando o fator lambda foi ajustado para 1,10.

Emissão de HC

A mudança no teor do etanol, de 92,8 INPM para 75 INPM, associada ao aumento da taxa de compressão provocou aumento significativo de HC. Isso pode ser verificado por meio da Figura 11, quando se compara o motor com taxa de compressão 13,6:1 funcionando com etanol 92,8 INPM e o motor com taxa de compressão de 16,2:1 funcionando com etanol 75 INPM. O mesmo resultado pode ser observado na Figura 12, quando foi ajustado o fator lambda para 1,00 e 1,10.

Bernhardt (1977) apresentou resultado semelhante, relatando elevação na quantidade de HC à medida que aumenta a quantidade de água misturada ao combustível. Porém, o combustível utilizado em seu trabalho foi o metanol (um tipo de álcool composto por 1 átomo de

carbono na molécula), sendo citado somente como uma analogia, uma vez que o combustível utilizado neste trabalho foi o etanol (um tipo de álcool composto por 2 átomos de carbono na molécula).

Emissão de NOx

Analisando as curvas de emissão de NOx dos ensaios realizados no presente trabalho, apresentadas na Figura 13, pode-se constatar redução de emissão desse gás para o motor com taxa de compressão de 16,2:1 funcionando com etanol 75 INPM, em relação ao motor com taxa de 13,6:1 funcionando com etanol 92,8 INPM. A Figura 14 mostra que também houve redução de NOx quando o fator lambda foi ajustado para 1,00 e 1,10, com exceção da rotação de 2000 rpm.

Retornando à analogia feita com o trabalho citado no item “Emissão de HC”, Bernhardt (1977) afirmou que o NOx teve significativo decréscimo ao se aumentar a porcentagem de água no metanol.

Conclusão

Como objetivos deste trabalho, foram analisados o desempenho e as emissões de gases poluentes durante o funcionamento de um motor original de fábrica com etanol de 92,8 INPM e o desempenho e as emissões de gases poluentes ao se combinar o funcionamento do motor com etanol de 75 INPM com o aumento da taxa de compressão. Concluiu-se, como quesitos de desempenho, que ocorreu aumento do torque máximo, da potência máxima, do consumo horário de combustível e do consumo específico de combustível e redução na eficiência de conversão de combustível. No quesito emissões de gases poluentes, houve redução de NOx e aumento de HC.

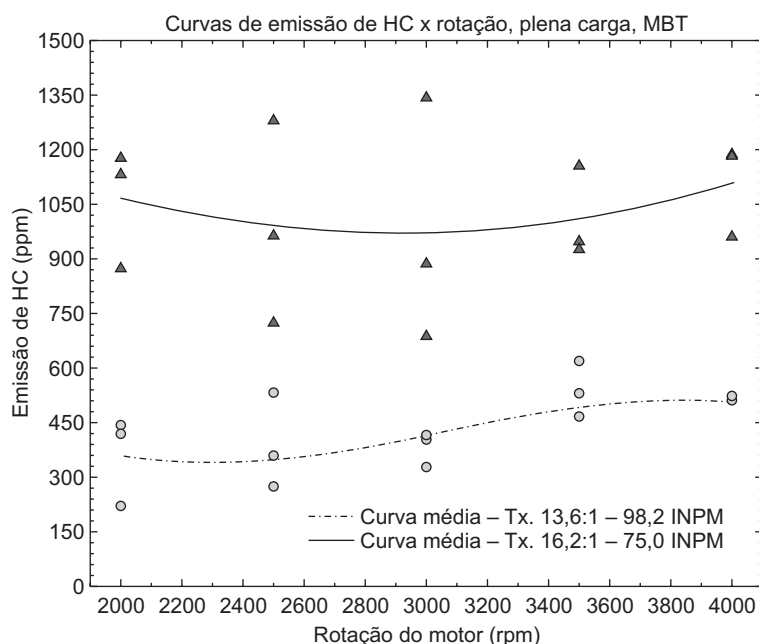


Figura 11 Emissão de HC para o motor com taxa de compressão de 13,6:1/etanol 92,8 INPM e 16,2:1/etanol 75 INPM.

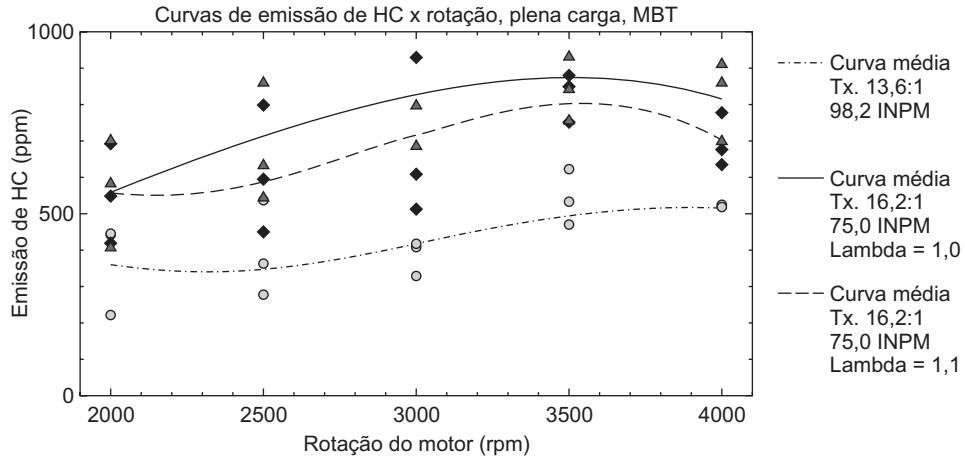


Figura 12 Emissão de HC para o motor com taxa de compressão de 13,6:1/etanol 92,8 INPM e 16,2:1/etanol 75 INPM com fator lambda de 1,00 e 1,10.

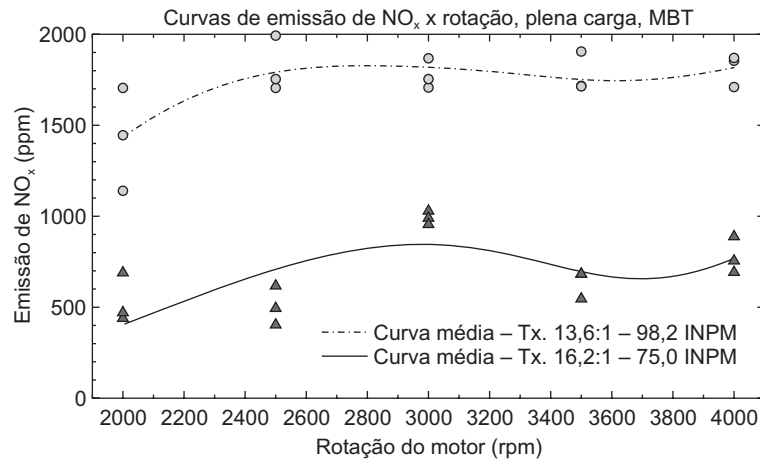


Figura 13 Emissão de NOx para o motor com taxa de compressão de 13,6:1/etanol 92,8 INPM e 16,2:1/etanol 75 INPM.

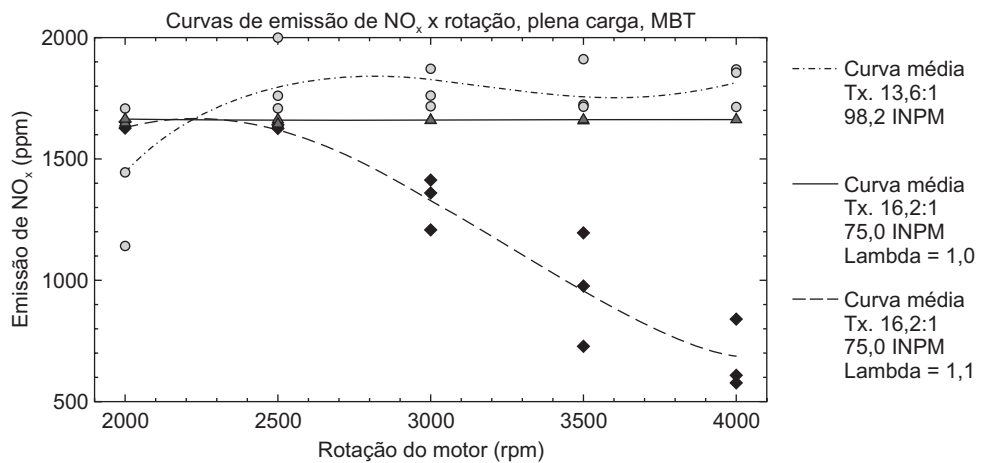


Figura 14 Emissão de NOx para o motor com taxa de compressão de 13,6:1/etanol 92,8 INPM e 16,2:1/etanol 75 INPM com fator lambda de 1,00 e 1,10.

Os grandes atrativos da utilização de etanol mais hidratado como combustível renovável alternativo de baixo custo e produção em larga escala são o próprio custo e a redução significativa das emissões de NOx. A potência do motor é praticamente recuperada com a elevação da taxa de compressão. Como desvantagem têm-se o aumento do consumo de combustível e a elevação significativa das emissões de HC. Tendo em vista que todas essas variáveis são dependentes do fator lambda e do avanço de ignição, estes serão os grandes operadores que viabilizarão a utilização do etanol mais hidratado em motores ciclo Otto com taxa de compressão mais elevada.

Referências Bibliográficas

- BERNHARDT, W. Futuro fuels and mixture preparation methods for spark ignition automobile engines. *Prog. Energy Combust. Science*, Wolfsburg, v. 3, p. 139-150, May 1977.
- DAL BEM, A. J. *Um estudo da adaptabilidade dos sistemas eletrônicos de controle de malha fechada pelo sensor de oxigênio de motores ciclo Otto à gasolina ao receber álcool etílico hidratado como combustível alternativo*. 2003. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – EESC, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- DAL BEM, A. J. *Análise de desempenho de um motor ciclo Otto alimentado com álcool etílico de 75 INPM*. 2008. 231 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – EESC, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- HEYWOOD, J. B. *Internal combustion engine fundamentals*. New York: MacGraw-Hill Inc., 1988. 930 p.
- MARTINS, J. *Motores de combustão interna*. 2. ed. Porto: Publindústria Edições Técnicas, 2006. 438 p.
- PENIDO FILHO, P. *Os motores a combustão interna*. 2. ed. Belo Horizonte: Lemi S.A., 1991. v. 2, 699 p.