

PRESSÃO NO INTERIOR DO CILINDRO DE UM MOTOR DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO ALIMENTADO POR DIESEL, BIODIESEL E ETANOL

Rodrigo Fernando Estella dos Santos

Escola de Engenharia de São Carlos – USP – Av. Trabalhador Sancarlene, 400 – São Carlos – SP
santosrf@sc.usp.br

Antônio Moreira dos Santos

Escola de Engenharia de São Carlos – USP – Av. Trabalhador Sancarlene, 400 – São Carlos – SP
asantos@sc.usp.br

Keyll Carlos Ribeiro Martins

Centro Federal de Educação Tecnológica do Maranhão – CEFET/MA – São Luis – MA
kmartins@sc.usp.br

Gustavo Rodrigues de Souza

Escola de Engenharia de São Carlos – USP – Av. Trabalhador Sancarlene, 400 – São Carlos – SP
gustavor@sc.usp.br

Resumo. Neste trabalho é feita uma análise da influência da substituição parcial de diesel ou biodiesel por etanol no processo de combustão de um motor de ignição por compressão, através das curvas de pressão no interior do cilindro. O motor é alimentado por um sistema ternário de combustíveis, em que as misturas possuem desde 100% diesel ou biodiesel até misturas destes combustíveis com uma porcentagem de até 50% de etanol. Os resultados serão mostrados através das curvas de pressão no interior do cilindro para regimes de funcionamento de plena carga, nas rotações de 1500, 2000, 2500 e 3000 rpm.

Palavras chave: motores de combustão interna, diesel, biodiesel, etanol, pressão no interior do cilindro.

1. Introdução

Nos últimos anos o estudo sobre combustíveis alternativos tem sido objeto cada vez mais intenso de pesquisas pela indústria automobilística e centros de desenvolvimento tecnológicos. Esse processo foi desencadeado pela crise do petróleo na década de 70 e pelos constantes conflitos nos países árabes, grandes produtores de petróleo. Vários foram os estudos realizados e estes indicaram diversas alternativas como: utilização de célula combustível, célula foto-elétrica solar, etanol, hidrogênio, D-limoneno, óleos vegetais e biodiesel. O biodiesel é obtido através do processo de transesterificação dos óleos vegetais, processo este que ainda o torna um combustível mais caro que o Diesel. Porém, os avanços alcançados com esse processo químico têm permitido vislumbrar a possibilidade de utilização desse combustível em escala de mercado. Diante desse quadro, esse trabalho analisa o desempenho de um motor a combustão por compressão usando uma mistura de combustíveis (diesel, biodiesel e etanol). A utilização ternária dessa mistura busca associar as características positivas de cada componente. A adição de biodiesel visa, principalmente, contemplar a diminuição de emissões, já o etanol busca melhorar o adensamento da massa de ar admitida e diminuir emissão de particulados, além de melhorar o rendimento térmico do motor (Feitosa, 2003).

Diesel

O diesel, combustível obtido a partir do refino do petróleo, é usado em motores com uma taxa de compressão bem elevada (12 a 24), atingindo níveis de pressão na câmara de combustão superiores aos motores do ciclo Otto. Um dos aspectos do motor diesel é sua alta eficiência térmica, que chega a 54%, comparada com a do motor de ignição por centelha, que gira em torno de 34%. Motores diesel têm tido aplicações limitadas nos Estados Unidos devido a problemas de custo, peso, odor, barulho e emissões, característicos de seu projeto. Na Europa, carros de passageiros com motores diesel são mais comuns devido ao favorecimento aplicado nas taxas impostas ao diesel (Subrata, 2004). Esse combustível é utilizado fortemente no transporte de mercadorias no Brasil, representando um fator impactante no preço final dos produtos na cadeia produtiva.

Biodiesel

O biodiesel, que é obtido através do processo de transesterificação dos óleos vegetais, é um combustível renovável e traz benefícios ambientais, econômicos e sociais. O benefício ambiental reside no fato da redução das emissões de gases poluentes. A vantagem econômica é a possibilidade de redução das importações de petróleo e diesel refinado. No Brasil, segundo a ANP (Agência Nacional de Petróleo), o consumo nacional aumentou 42,5% no período de 1992 a 2001. Cada 5% de biodiesel misturado ao óleo diesel consumido no país, representa uma economia de divisas da ordem de US\$ 350 milhões/ano (Meirelles, 2003). Quanto à questão social, esse combustível contribui para a geração de empregos no setor primário, prioridade apontada pelo atual governo. Além dessas características, um motor originariamente movido a óleo diesel poderá, na grande maioria dos casos, operar normalmente com biodiesel, sem a necessidade de se efetuar qualquer modificação no motor e sem alterar significativamente seu desempenho (Pianovski, 2002).

Etanol

Etanol, $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$, é um álcool, um grupo de compostos químicos que possuem hidroxila em suas moléculas, -OH, ligada a um átomo de carbono. É usado como combustível automotivo sozinho ou misturado à gasolina. O Brasil já possui uma avançada tecnologia para obtenção do etanol a partir da cana, sendo esse combustível largamente utilizado no mercado nacional, não só nos motores movidos exclusivamente a álcool como também nos motores a gasolina, como aditivo por apresentar comprovadas características antidetonantes, na proporção de 25% de etanol e 75% de gasolina. Devido ao fato de a molécula de etanol conter oxigênio, ocorre uma melhor combustão no motor. É um combustível renovável e sua queima libera menos gases poluentes (American, 2004).

A seguir apresenta-se uma tabela com as propriedades dos combustíveis que compõem a mistura ternária estudada, permitindo avaliar as potencialidades de cada um.

Tabela 1. Características dos combustíveis usados.

Combustível	Diesel	Etanol	B100*	B10**	B20***
Densidade (g/ml)	0,848	0,785	0,86	0,8492	0,8504
Ar/Comb.	14,6	8,99	12,5	14,39	14,18
PCI (kJ/kg)	43000	25700	37714	42190	41942,8
Custo (R\$/l)	1,13	0,91	1,76	1,193	1,256

ABIOVE – (Associação Brasileira de Óleos Vegetais).

* B100 = 100% biodiesel.

** B10 = Mistura 90% Diesel 10% biodiesel, etanol no coletor.

*** B20 = Mistura 80% Diesel 20% biodiesel, etanol no coletor.

2. Metodologia

Os ensaios foram realizados em um motor diesel, 4 cilindros, de injeção direta, turboalimentado, com taxa de compressão 19,5:1, o qual sofreu adaptação no coletor de admissão, realizada por Feitosa (2003), para possibilitar a injeção de etanol pulverizado. Para controle das temperaturas, 6 termopares foram instalados no coletor de admissão, 1 no coletor de exaustão e 1 no sistema de arrefecimento. O consumo dos combustíveis foi determinado através do uso de um sistema volumétrico, construído a partir de tubos graduados, e do uso de um cronômetro, para determinação do tempo necessário para o consumo de um certo volume de combustível. Medições da temperatura dos combustíveis eram realizadas para correção da densidade e determinação do consumo mássico.

A Figura 1 mostra uma foto do motor utilizado e um esquema da bancada de testes é mostrado na Fig. 2.

Para a injeção de etanol no coletor de admissão, foi montado um segundo sistema de alimentação, idealizado por Feitosa (2003), formado por bicos injetores, bomba de combustível, reservatório de etanol e linhas de distribuição. O controle dos injetores era realizado por um gerador de pulsos de onda quadrada, o qual possibilitava o controle do tempo em que o injetor ficava aberto e que ficava fechado.

Os testes com substituição parcial do combustível principal (diesel ou biodiesel), injetado no interior dos cilindros por etanol hidratado injetado no coletor de admissão, tinham como referência a potência original do motor, ou seja, era visada a restituição do torque original para cada rotação ensaiada.

Os ensaios foram realizados para rotações de 1500, 2000, 2500 e 3000 rpm, e substituições de diesel (ou biodiesel) por etanol, em porcentagem de torque, de 20, 35 e 50%.

O consumo de ar foi determinado a partir da utilização de um anemômetro tipo turbina, adaptado em um tubo rígido, o qual foi aferido a partir da utilização de placas de orifício calibradas.



Figura 1. Foto do motor utilizado.

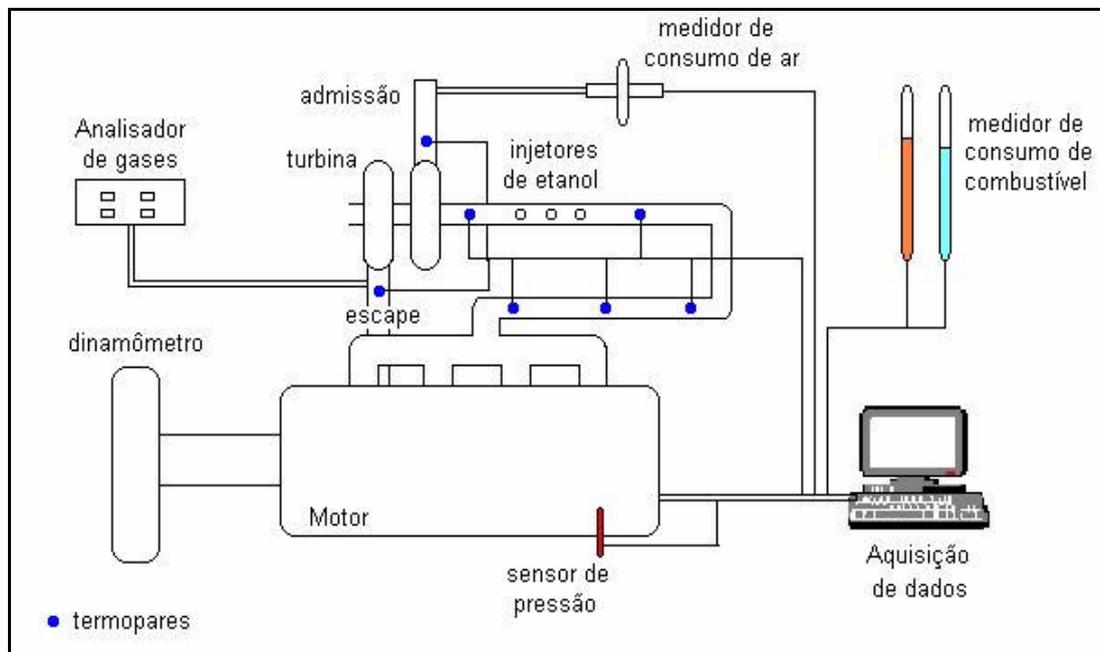


Figura 2. Esquema da bancada de teste e instrumentação.

3. Equipamento para medir pressão na câmara de combustão

A pressão no interior do cilindro foi medida e analisada utilizando-se um sensor de pressão piezoelétrico instalado no cilindro nº 1 (Figura 3), no local reservado para a vela aquecedora (equipamento opcional para este modelo). O sensor era da marca AVL, modelo 5Qp2002, com faixa de trabalho de até 600 bar.



Figura 3: sensor de pressão instalado no cilindro nº 1 do motor (FEITOSA, 2003).

O sinal gerado pelo sensor (carga elétrica) alimentava o conversor carga/voltagem e amplificador da marca AVL, modelo 3059C-A01.1, que o transformava em uma voltagem configurável. O sinal (em Volts) era captado pela placa de aquisição da marca National Instruments, modelo DAQScope AT-5102, que apresenta oito canais com conversores A/D de 16 bits, capazes de uma frequência de amostragem máxima de 20MSPS (Mega Samples Per Second – 20 milhões de amostras por segundo). Esta placa é conectada diretamente no conector AT do computador adquirido conforme NF 006079, ficando as entradas disponíveis na sua parte posterior, em conectores BNC.

O sinal proveniente do amplificador foi adquirido e a forma de onda obtida foi gravada em formato texto, para análise posterior. A aquisição de dados foi realizada utilizando-se o software VirtualBench-Scope v.2.1.1, que acompanha a placa de aquisição e é baseado em LabVIEW.

O programa de análise do sinal de pressão, de visualização e apresentação dos resultados, foi desenvolvido em ambiente LabVIEW. Ele lê os dados gravados em formato de texto (ASCII) pelo software de aquisição, e executa a análise.

4. Resultados e Discussões

As Figuras 4, 5, 6, 7 e 8 mostram as curvas da pressão em função do ângulo do girabrequim para o diesel, B10, B20 e B100, com e sem a substituição por etanol. As figuras mostram os dados obtidos no regime de 3000 rpm, uma vez que se fossem mostradas todas as curvas em todos os regimes ensaiados, seriam necessários muitos gráficos, e os que são mostrados são similares aos obtidos para as outras rotações.

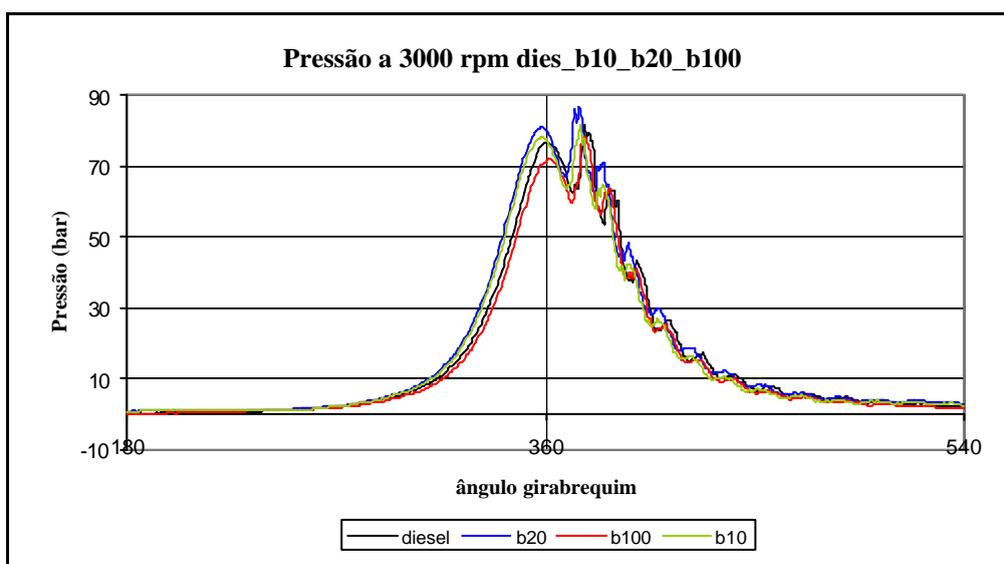


Figura 4: curvas de pressão do diesel, B10, B20 e B100, sem a substituição por etanol.

Numa primeira análise da figura acima se observa que existem dois picos de pressão. O primeiro causado pela compressão do ar e pelo início da combustão do combustível logo após sua injeção no cilindro, e o segundo causado pela combustão do restante do combustível vaporizado durante o intervalo entre os dois picos, onde se nota uma queda de pressão.

Analisando ainda a Fig. 4, pode-se ver que o combustível que gera a maior pressão dentro da câmara de combustão é a mistura B20, seguida da B10, do diesel e, finalmente, a mistura B100. Esta seqüência é a mesma apresentada nas curvas características obtidas nos ensaios do motor, que mostram que a mistura B20 foi a que deu maior potência, seguida da B10, do diesel e do B100.

Essa maior pressão alcançada pelas misturas B20 e B10 é devida a uma melhor queima durante a combustão, já que a molécula de biodiesel possui oxigênio na sua composição química. E a menor pressão alcançada pelo B100 é justificada pelo baixo poder calorífico deste combustível.

A Figura 5 mostra a curva da pressão em função do ângulo do girabrequim para o diesel puro e para a situação de substituição de 50% de diesel por etanol.

Observando-se a Fig 5, nota-se que a substituição de diesel por etanol fez com que diminuísse o primeiro pico de pressão e aumentasse o segundo. Isto indica que uma maior parte do combustível está sendo queimada após o ponto morto superior.

Segundo Feitosa (2003), essa aproximação do segundo pico de pressão ao PMS resulta em melhorias no rendimento térmico do motor.

As Figuras 6, 7 e 8 mostram as curvas da pressão em função do ângulo do girabrequim para o B10, B20 e B100, com e sem a substituição de 50% destes por etanol.

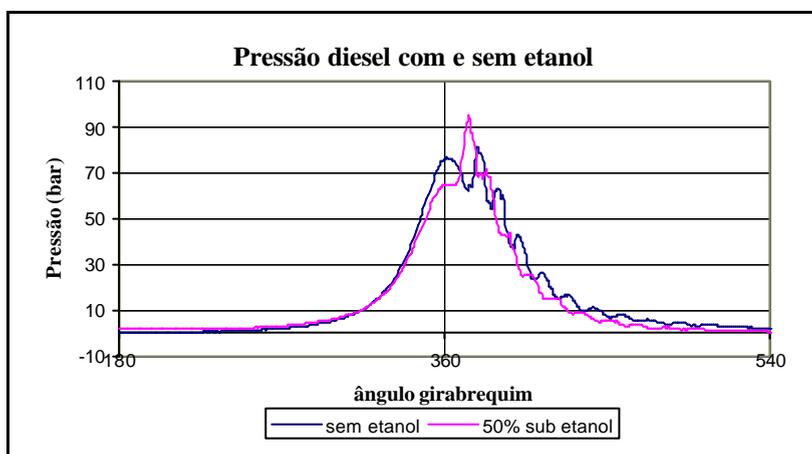


Figura 5: curvas de pressão do diesel, com e sem a substituição por etanol.

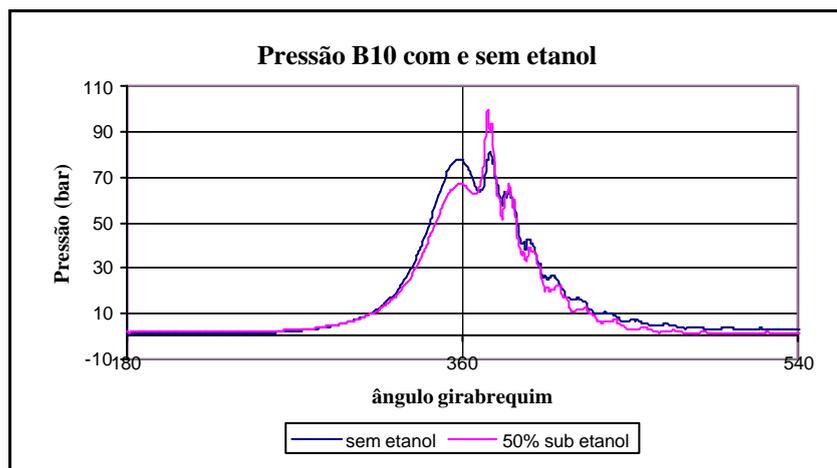


Figura 6: curvas de pressão do B10, com e sem a substituição por etanol.

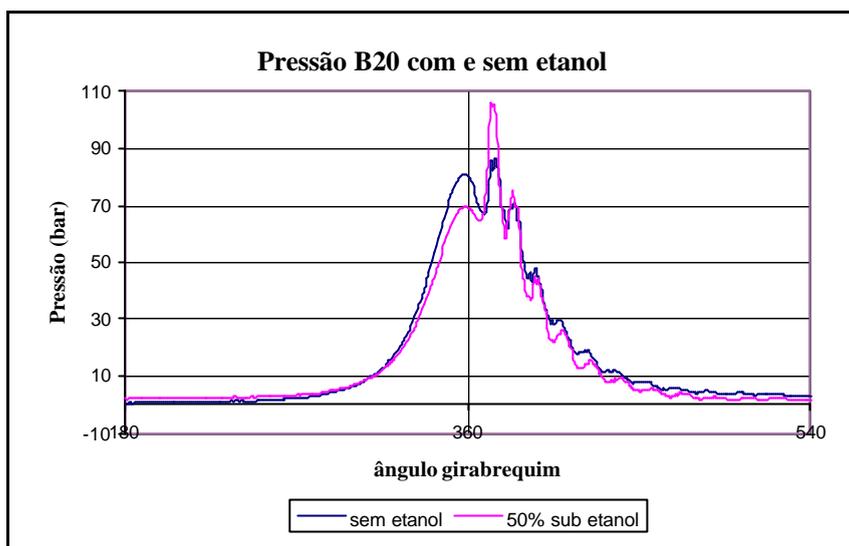


Figura 7: curvas de pressão do B20, com e sem a substituição por etanol.

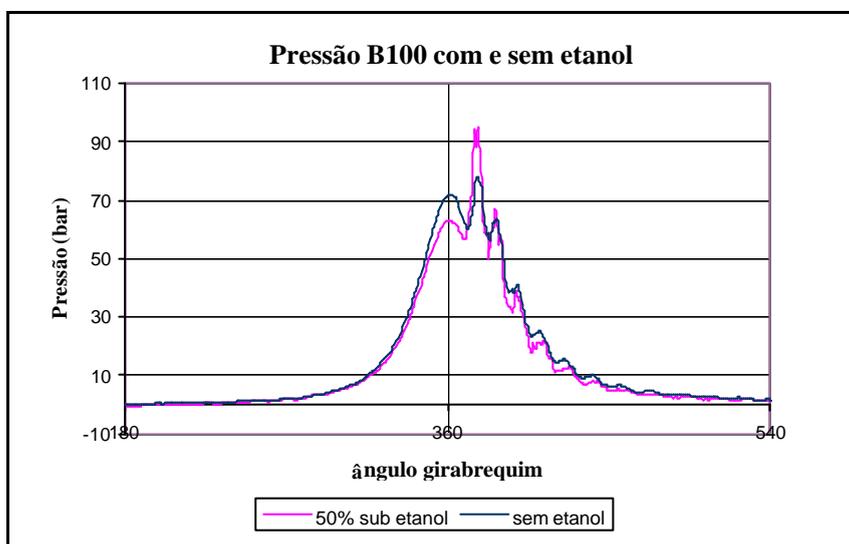


Figura 8: curvas de pressão do B100, com e sem a substituição por etanol.

Observando-se as Figuras 6, 7 e 8, nota-se o mesmo comportamento da Fig 5, ou seja, a substituição de B10, B20 ou B100 por etanol fez com que diminuísse o primeiro pico de pressão e aumentasse o segundo. Isto, como explicado anteriormente, indica que uma maior parte do combustível está sendo queimada após o ponto morto superior, o que resulta em melhorias no rendimento térmico do motor.

5. Conclusões

O combustível que gerou a maior pressão dentro da câmara de combustão foi a mistura B20, seguida da B10, do diesel e, finalmente, a mistura B100. Esta seqüência é a mesma da mostrada na potência do motor utilizando estes combustíveis. A substituição de diesel por etanol fez com que diminuísse o primeiro pico de pressão e aumentasse o segundo. Isto indica que uma maior parte do combustível está sendo queimada após o ponto morto superior. Essa aproximação do segundo pico de pressão ao PMS resulta em melhorias no rendimento térmico do motor. O mesmo comportamento ocorreu com o B10, B20 e B100.

6. Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela bolsa concedida para o curso de Doutorado.

7. Referências

- American Coalition for Ethanol, 2004, Ethanol information, <http://www.ethanol.org>.
- Feitosa, M.V. (2003), “Desenvolvimento do motor de ignição por compressão alimentado por injeção direta de óleo diesel e por etanol pós-vaporizado no coletor de admissão”. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Carlos, SP.
- Meirelles, F. S. (2003). *Biodiesel*. Federação da Agricultura do Estado de São Paulo. Brasília, DF. <http://www.faespsenar.com.br/faesp/economico/EstArtigos/biodiesel.pdf> (set/03).
- Pianovski JR, G. (2002); Velásquez, J. A. (2002). “Perspectivas de utilização de biodiesel como substituto parcial do óleo diesel em motores automotivos”. IX Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas. Paper CIT02-0053.
- Subrata Bhattacharjee, San Diego State University. Thermofluids.net, Introduction to diesel combustion web edition <http://eng.sdsu.edu/profs/Bhattacharjee/sooby/classes/>.

IN-CYLINDER PRESSURE MEASUREMENTS IN A COMPRESSION IGNITION ENGINE USING DIESEL, BIODIESEL AND ETHANOL.

Rodrigo Fernando Estella dos Santos

Escola de Engenharia de São Carlos – USP – Av. Trabalhador Sancarlense, 400 – São Carlos – SP
santosrf@sc.usp.br

Antônio Moreira dos Santos

Escola de Engenharia de São Carlos – USP – Av. Trabalhador Sancarlense, 400 – São Carlos – SP
asantos@sc.usp.br

Keyll Carlos Ribeiro Martins

Centro Federal de Educação Tecnológica do Maranhão – CEFET/MA – São Luis – MA
kmartins@sc.usp.br

Gustavo Rodrigues de Souza

Escola de Engenharia de São Carlos – USP – Av. Trabalhador Sancarlense, 400 – São Carlos – SP
gustavor@sc.usp.br

Abstract. *The influence of the partial substitution of diesel or biodiesel by ethanol in the process of combustion of a compression ignition engine is analyzed in this work, through the pressure curves inside the cylinder. The engine is supplied by a ternary system of fuels, in which the mixtures has since 100% diesel or biodiesel until mixtures of these fuels with a percentage of up to 50% of ethanol. It is shown the pressure curves inside the cylinder at engine speeds of 1500, 2000, 2500 and 3000 rpm with full loads.*

Keywords: *internal combustion engines, diesel oil, biodiesel, ethanol, in-cylinder pressure.*