

ANÁLISE DE DETONAÇÃO, TORQUE E POTÊNCIA EM UM MOTOR DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO TURBOALIMENTADO POR UM SISTEMA TERNÁRIO DE COMBUSTÍVEIS – DIESEL, BIODIESEL E ETANOL.

Rodrigo Fernando Estella dos Santos

Escola de Engenharia de São Carlos – USP

Av. Trabalhador Sancarlense, 400 – São Carlos – santosrf@sc.usp.br - Tel.: 016.2738229

Antônio Moreira dos Santos

Escola de Engenharia de São Carlos – USP - Tel.: 016.2739414

Keyll Carlos Ribeiro Martins

Centro Federal de Educação Tecnológica do Maranhão – CEFET/MA - Tel.: 098.2189044

José Antônio da Silva

Universidade Federal de São João del Rei - DCTEF/UFSJ - Tel.: 032.33792619

Resumo. *É analisado o desempenho de um motor de ignição por compressão, turboalimentado por um sistema ternário de combustíveis, comparando-se as curvas características do motor alimentado com misturas de diesel, biodiesel e etanol. Faz-se a identificação e quantificação do fenômeno da detonação utilizando análise espectral, através do sinal de pressão da câmara de combustão, processado por um filtro passa-faixa, aplicando-se a transformada de Fourier no sinal original de pressão. São mostradas curvas de torque e potência, para regimes de funcionamento em plena carga, analisado-se a influência da detonação no desempenho do motor. A mistura que mostrou melhor rendimento foi a que continha 20% de Biodiesel e 80% de Diesel.*

Palavras-chave: *motor combustão interna, biodiesel, etanol, detonação.*

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. Esse processo foi desencadeado pela crise do petróleo na década de 70 e pelos constantes conflitos nos países árabes, maiores produtores de petróleo. Vários foram os estudos 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, o que ainda o torna um combustível mais caro que o Diesel. 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 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 particulado (FEITOSA 2003). O efeito

da detonação será avaliado através de um índice obtido pelo tratamento numérico do sinal de pressão da câmara de combustão utilizando análise espectral aplicando-se Transformada de Fourier no sinal original.

2. CARACTERÍSTICAS DOS COMPONENTES E DA MISTURA COMBUSTÍVEL

O diesel, combustível obtido a partir do refino do petróleo, é usado em motores com uma taxa de compressão bem elevada (18 a 22), atingindo níveis de pressão na câmara de combustão superiores aos motores do ciclo Otto. Esse combustível é utilizado fortemente no transporte de mercadorias no Brasil, representando um fator impactante no preço final dos produtos na cadeia produtiva.

O biodiesel 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 que 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 originalmente movido a óleo diesel poderá operar com biodiesel sem necessidade de efetuar qualquer modificação no motor sem alterar significativamente seu desempenho (PIANOVSKI, 2002).

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.

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.

3. QUANTIFICAÇÃO DA DETONAÇÃO

Detonação é o nome dado ao fenômeno da auto-ignição da mistura não queimada, isto é, antes da passagem da frente de chama. Quando isto ocorre, há uma liberação extremamente rápida de grande parte da energia química contida na mistura não queimada, causando pressões locais muito altas e a propagação de ondas de pressão de amplitude substancial através da câmara de combustão Heywood (1988).

Segundo Ferguson (1986), esta propagação da chama muito mais rápida que a normal ocorre principalmente devido ao fato de vários focos de auto-ignição aparecerem quase simultaneamente (o que concorda com as medições de Spicher et al., (1992)) e, além disso, porque o gás não queimado está a uma temperatura elevada, e portanto a velocidade da frente de chama laminar é substancialmente aumentada.

A intensidade da detonação depende da massa de gás não queimado no momento da auto-ignição e da taxa de liberação de energia durante o fenômeno. Sun et al. (1996), mostram que a intensidade da detonação aumenta quando seu ângulo de início se aproxima progressivamente do ponto morto superior e a massa dos gases não queimados aumenta.

Durante a ocorrência da detonação, surgem oscilações de pressão cuja frequência está normalmente entre 5kHz e 10kHz segundo Heywood (1988). Esta frequência cai rapidamente devido à diminuição da temperatura dos gases e à variação da forma da câmara de combustão pela movimentação do pistão, o que constitui uma característica marcante do fenômeno Taylor (1968).

A intensidade da detonação tem sido caracterizada quantitativamente de diferentes formas. Tradicionalmente, esta medida é obtida a partir do sinal de pressão na câmara de combustão, identificando-se componentes frequenciais típicos do fenômeno. Estes estão relacionados com a frequência ressonante da câmara, devido à propagação e reflexão das ondas de pressão, característica do fenômeno Sun et al. (1996).

A análise numérica do sinal de pressão tem sido a forma mais utilizada e provavelmente a mais eficiente de se diagnosticar a detonação. Para detectar sua ocorrência, diferentes metodologias de análise do traço de pressão têm sido utilizadas.

A Transformada de Fourier (TF) é um método largamente utilizado para análise de sinais, tendo aplicações em várias áreas. Dentre elas, pode-se citar comunicações, radar, sonar, engenharia biomédica, processamento de imagem, espectroscopia, análise metalúrgica, mecânica, geofísica, de sistemas não-lineares, simulação, síntese de músicas e análise de dados do mercado de ações Brigham (1988).

A TF é a representação de uma função no domínio da frequência. Ela contém exatamente a mesma informação da função original, podendo, portanto, ser interpretada como a mesma informação (sinal) sob outra representação.

O tratamento numérico dado aos sinais de pressão adquiridos foi feito de maneira a contemplar as condições da aplicação do teorema da amostragem e minimizar os efeitos *aliasing*.

Um sinal periódico $x(t)$, de período T_0 , pode ser representado por uma combinação linear de exponenciais complexas harmonicamente relacionadas, chamada de Série de Fourier de $x(t)$:

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} a_k e^{jk\omega_0 t} \quad (1)$$

onde,

$$a_k = \frac{1}{T_0} \int_{T_0} x(t) e^{-jk\omega_0 t} dt \quad (2)$$

$$\text{e, } \omega_0 = \frac{2\pi}{T_0} \quad (3)$$

Na definição de a_k , é representada a integral sobre qualquer intervalo de comprimento T_0 . Os termos a_k são chamados de coeficientes de Fourier ou coeficientes espectrais de $x(t)$. Estes coeficientes complexos medem a “porção” do sinal $x(t)$ que está em cada harmônica¹ da componente fundamental.

¹ Associado a um sinal $x(t) = e^{j\omega_0 t}$, o conjunto de exponenciais complexas harmonicamente relacionadas é definido como $\phi_k(t) = e^{jk\omega_0 t}$, $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$. Assim, as harmônicas de uma componente fundamental são oscilações cujas frequências são múltiplas da fundamental.

4. 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, Fig. (1).

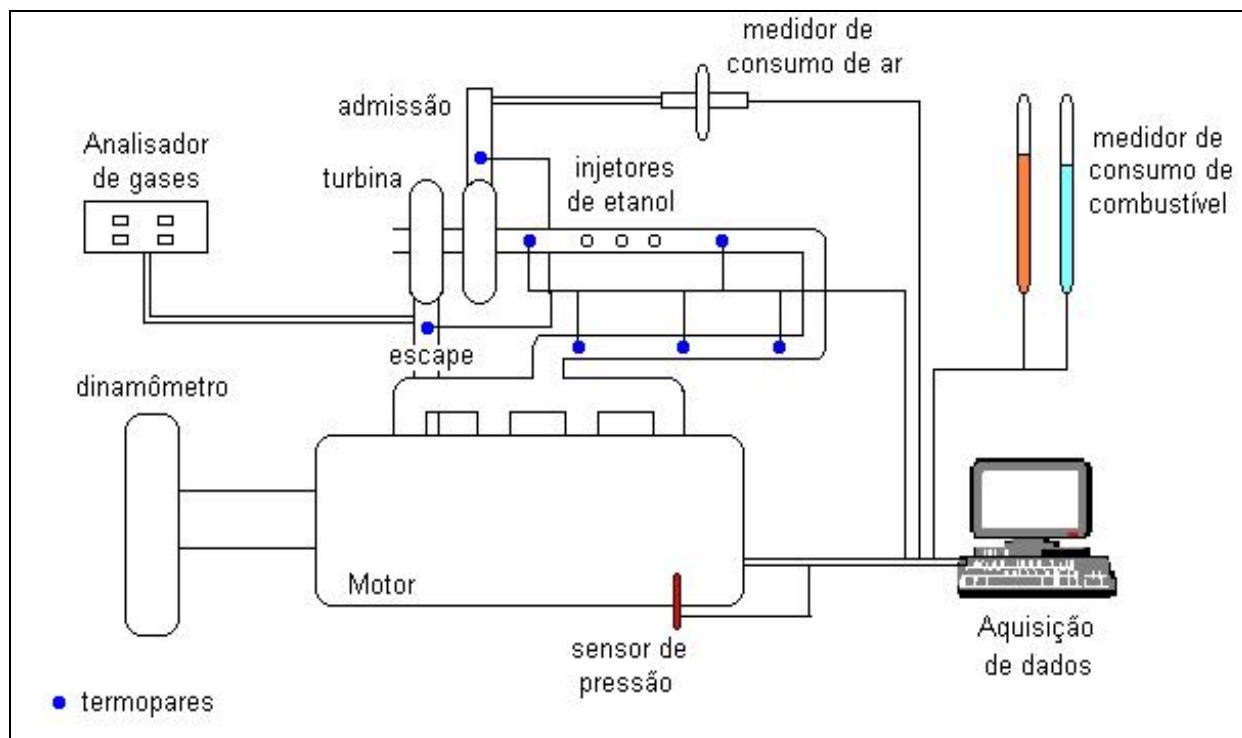


Figura 1 – Esquema da bancada de teste e instrumentação.

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. O ensaio foi feito fixando-se uma determinada condição original de funcionamento (com o combustível principal) para que fossem adquiridos os valores de torque, rotação, consumo, temperaturas. Depois, para a mesma condição de funcionamento, reduzia-se a vazão deste combustível para que fosse atingida uma condição de 20, 35 ou 50% de redução de torque. Como o dinamômetro estava programado para manter uma condição de rotação constante, a velocidade do motor não variava durante a redução da vazão de combustível, variando-se assim apenas o torque. Em seguida, foi restabelecido o torque original do motor através da injeção de álcool etílico hidratado no coletor de admissão. Para tal utilizou-se um dispositivo de ajuste da frequência de pulsação dos bicos injetores, através de uma onda quadrada.

As aquisições foram feitas de modo a permitir a definição da frequência de amostragem, de 20kHz, do ganho do filtro, do conversor carga / voltagem, da frequência de corte do filtro. A partir destas informações, foi realizada a amostragem da pressão na câmara de combustão e do sinal indicativo do ponto morto superior (PMS), para a condição de operação do motor a plena carga, 3000 rpm, para cada tipo de mistura de combustível usada.

Devido à variabilidade do comportamento do motor, evidenciada nos ensaios preliminares, realizou-se a aquisição durante um intervalo de tempo suficiente para uma amostragem de pelo menos 20 ciclos completos do motor, para a obtenção de um índice médio de detonação, muito mais representativo do que a condição de um único ciclo. Totalizaram-se portanto 160 ciclos amostrados.

A Fig. (2) mostra um exemplo de aquisição do sinal de pressão filtrada e detonação calculada, com seus respectivos espectros de potência.

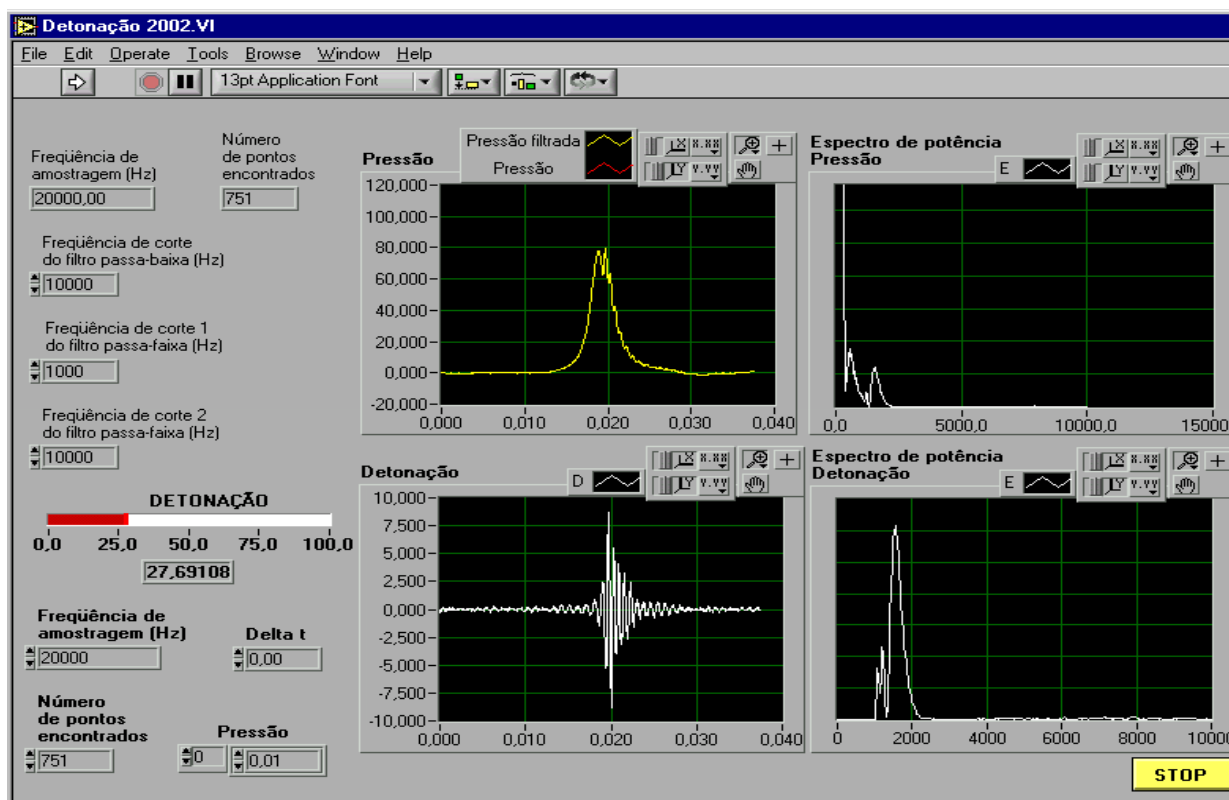


Figura 2. Curva de pressão filtrada com espectro de detonação

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise dos dados obtidos inicia-se pela curva de potência, que apresentou o comportamento mostrado na Fig. (3). Nela foi constatado um crescente aumento da potência com a rotação para todos os combustíveis. Verificou-se que a adição de biodiesel aumentou a potência para as misturas B10 e B20, principalmente para 3000 rpm, chegando a 7,5% de ganho para o B20 em relação ao diesel. Isto se deve ao fato de a molécula de biodiesel possuir oxigênio na sua composição química, o que melhora a queima durante a combustão, já que há maior disponibilidade de oxigênio para o processo. A curva do B100 foi a que apresentou menores valores de potência para toda a faixa ensaiada. Isso pode ser justificado pela característica energética deste combustível (o B100 possui o menor PCI; vide Tabela 1).

Analisando-se a curva de potência e considerando-se a vantagem de o biodiesel ser um combustível oxigenado e a desvantagem de possuir menor PCI, verificou-se que a mistura que mostrou melhor rendimento foi a B20.

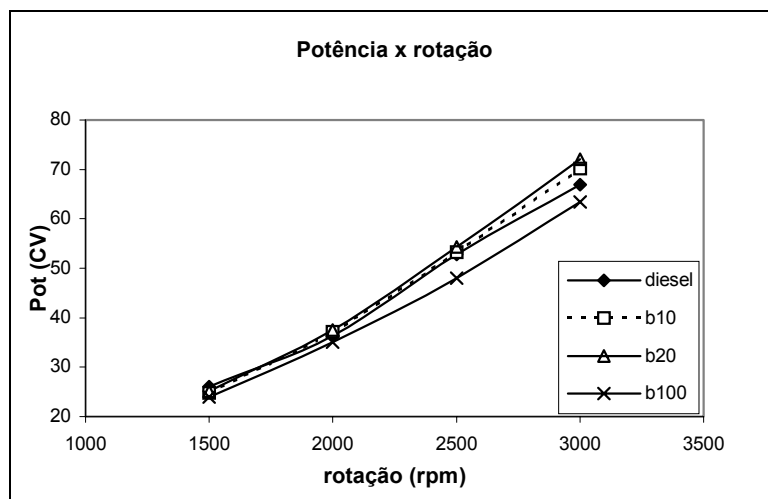


Figura 3. Potência para várias misturas de combustíveis.

A análise para o comportamento da curva de torque Fig. (4), acompanhou a mesma tendência da curva de potência, onde a mistura B20 mostrou o melhor desempenho, atingindo o seu valor máximo de 170 N.m a 3000rpm.

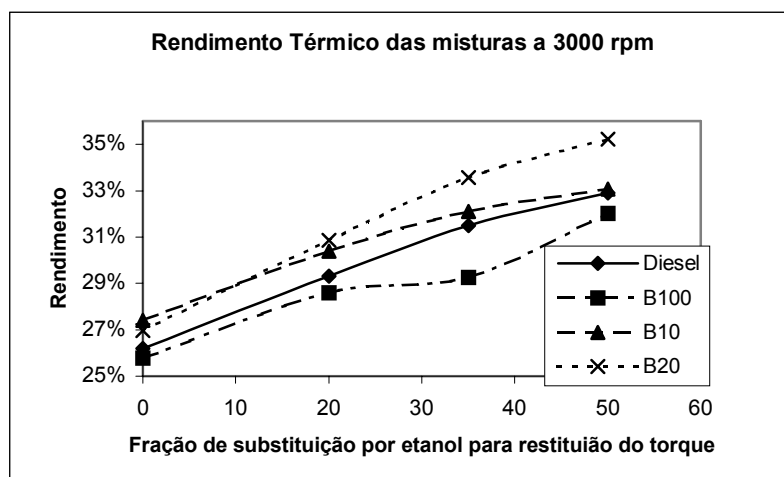


Figura 4. Rendimento térmico a 3000 rpm para as misturas, Diesel, Biodiesel, B10 e B20.

A mistura de combustível que apresentou melhor rendimento térmico foi a B20 obtendo valores superiores ao Diesel em até 4% para uma substituição 50% de etanol e a mesma diferença para o Biodiesel puro (B100) para uma substituição de 35% de etanol.

A seguir, através de figuras, será feita uma análise da detonação encontrada nas diversas situações testadas, onde se faz uma comparação da influência na detonação com a adição de etanol no combustível. Nas figuras a situação (a) representa o caso onde o combustível está sem etanol, e a situação (b) com a adição de etanol. O programa desenvolvido permite o cálculo do índice de detonação de cada ciclo individualmente e também efetua o cálculo da média dos 20 ciclos amostrados.

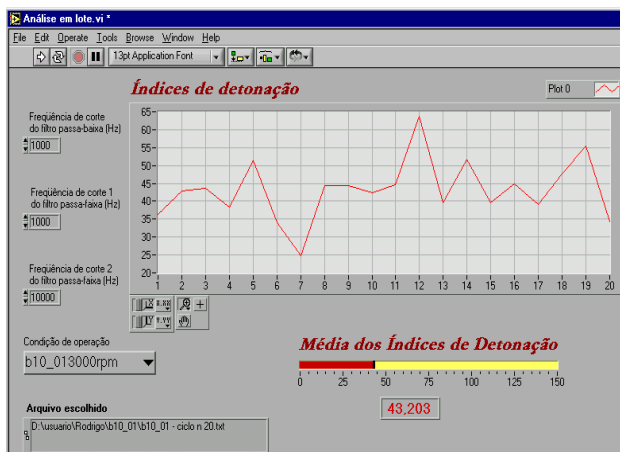
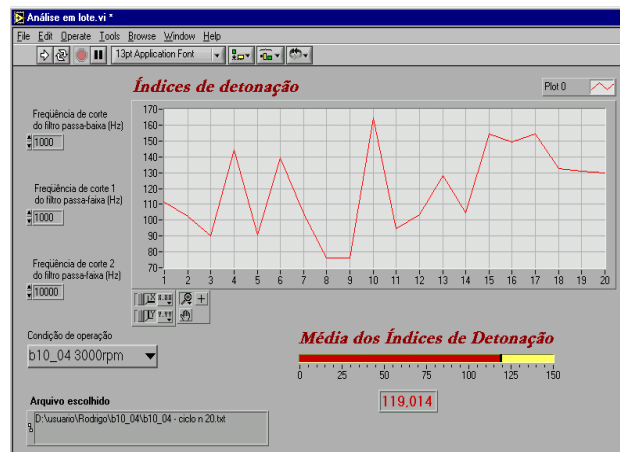


Figura 5. (a) Índice de detonação B10,



(b) Índice de detonação B10 com etanol

A análise da Fig. 5 mostra que a adição de etanol, no coletor de admissão, para a substituição de 50% no torque aumentou o índice de detonação em cerca de 2,7 vezes para a mistura B10. É importante salientar aqui que, apesar da detonação ter aumentado, estes valores não foram significativos, uma vez que o fenômeno não era sequer audível. A explicação para esse aumento será tratada pelos seguintes aspectos.

Segundo Taylor (1984), para um dado número de átomos carbonos, os arranjos em cadeias ramificadas são melhores do que os em cadeia em linha, e o valor antidetonante varia com o número de ramificações e suas posições na cadeia do carbono. Em geral, no caso dos compostos de parafina de cadeia em linha, o valor antidetonante aumenta com o decréscimo do número de átomos de carbono na molécula.

A ignição no motor de ciclo Diesel é resultado da reação da pré-chama. Teoricamente o combustível deve evaporar, sofrer a reação de pré-chama e espontaneamente inflamar à media em que o mesmo é injetado na câmara de combustão. Quando o combustível tem um longo tempo de reação de pré-chama, permite que uma quantidade considerável dele seja injetada antes que a parcela anteriormente injetada tenha inflamado. Esse retardo da ignição possibilita que partes distintas da mistura e em diferentes regiões da câmara entrem em ignição ao mesmo tempo resultando numa combustão com detonação mais intensa.

Lichty (1951), afirma que muitos fatores tais como: aumento da temperatura do ar admissão, temperatura do cilindro, sobre-alimentação, e taxa de compressão podem tornar a detonação mais severa nos motores de ignição por centelha e reduzir ou até eliminar a detonação nos motores ciclo Diesel. Combustíveis com alta qualidade antidetonante usados nos motores ciclo Otto assumem característica contrária quando usados para motores de ignição por compressão. A injeção indireta do etanol reduz portanto a temperatura da mistura admitida, aumentando o tempo de retardo da ignição favorecendo o aumento da detonação.

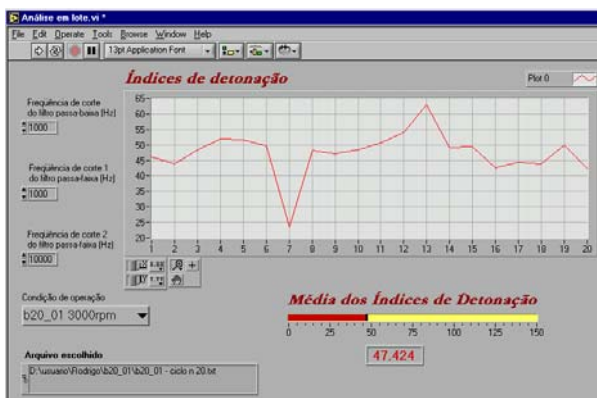
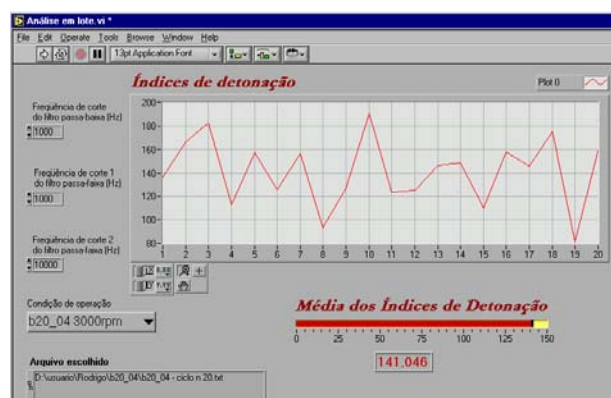


Figura. 6(a) Índice de detonação B20



(b) Índice de detonação B20 com etanol

O combustível que apresentou a maior média do índice de detonação, com a adição de etanol foi o b20 Fig.(6-b). Isto pode ser explicado pelo fato desta mistura ter apresentado o maior potencial detonante (47,424) das três misturas, ainda sem etanol. Esta adição, potencializou ainda mais a tendência à detonação da mistura b20. Justifica-se que a injeção do etanol diminuiu a temperatura da mistura fresca, pela sua vaporização, melhorando o rendimento térmico que por consequência aumentou a potência. Esse mesmo comportamento Ali et al. (1995), também observaram, mas demonstraram que há um limite para tal, onde para misturas com 30% ou mais de biodiesel a potência já cai substancialmente, atribuindo-se este efeito à menor energia presente nestas misturas comparada ao diesel.

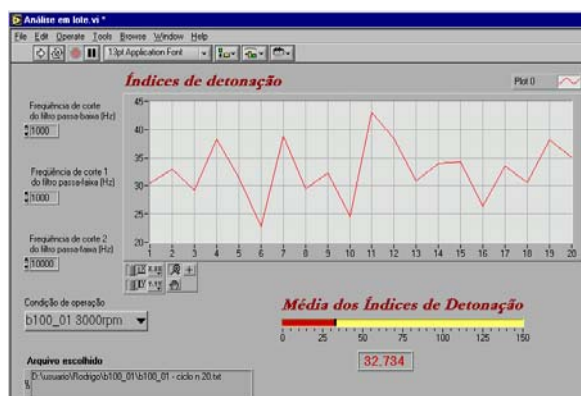
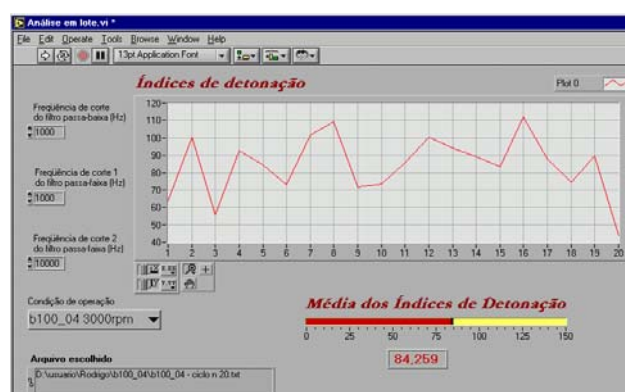


Figura 7 (a) Índice de detonação B100,



(b) Índice de detonação B100 com etanol

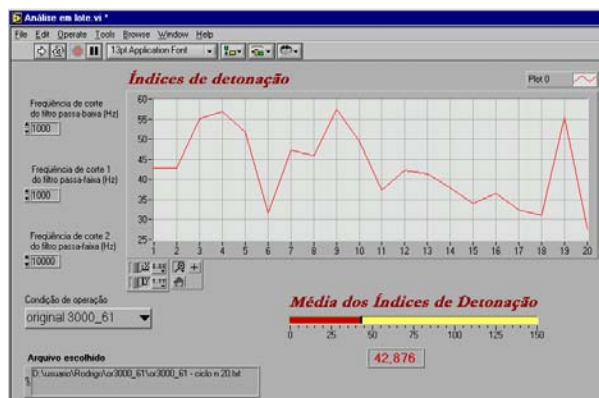
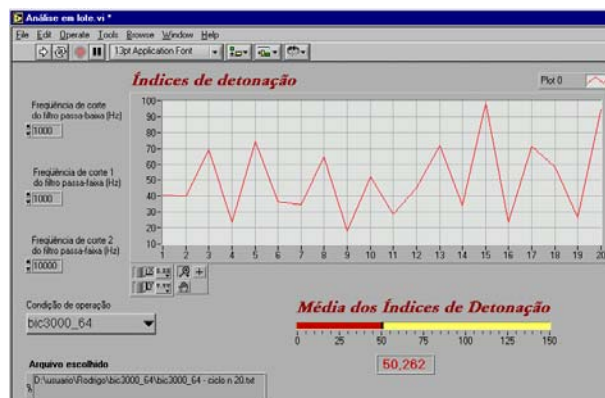


Figura 8 (a) Índice de detonação Diesel,



(b) Índice de detonação Diesel com etanol

As Figuras 4, 5 e 6 mostram que a adição de etanol aumentou o índice de detonação cerca de 3 vezes para a mistura B20; 2,5 vezes para o B100 e 1,17 vez para o diesel. Analisando ainda as figuras, nota-se que sem a adição de etanol, o combustível menos susceptível a detonação foi o B100. Pode-se notar também que o combustível que sofreu menor influência da adição de etanol foi o diesel.

6. CONCLUSÃO

De acordo com os resultados apresentados, verificou-se que com a adição de 10 ou 20% de biodiesel ao diesel, pode-se obter vantagens tanto no torque e na potência, quanto no rendimento térmico e no consumo específico do motor.

O uso do biodiesel puro (B100), leva a uma ligeira queda no torque e na potência do motor e um aumento no consumo específico. Porém, estas pequenas desvantagens são compensadas pelo fato de se estar usando um combustível 100% renovável, o que, além de trazer benefícios na redução das emissões de gases poluentes, também traz a possibilidade da redução das importações de petróleo e diesel refinado além de contribuir para a geração de empregos no setor primário, prioridade apontada pelo atual governo brasileiro.

Quanto à substituição de diesel ou biodiesel por etanol, houve um significativo aumento no rendimento térmico do motor, demonstrando ser uma alternativa potencialmente viável, além de permitir a utilização de combustíveis renováveis e diminuição dos índices de poluição.

7. AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo apoio aos projetos nº 460283/01-4 e nº 478161/01-8.

8. REFERÊNCIAS

- Ali, Y. ; Hanna M. A.; Leviticus, L. I. (1995). *Emissions and power characteristics of Diesel engines on methyl soyate and diesel fuel blends*. Elsevier Science Limited. Great Britain. Bioresource Technology, V.52, pp185-195.
- Brigham, E. O. (1988). *The Fast Fourier Transform and its applications*. Englewood Cliffs, Prentice Hall.
- 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.
- Ferguson, C. R. (1986). *Internal combustion engines - applied thermo sciences*. New York, John Wiley.
- Heywood, J. B. (1988). *Internal combustion engines fundamentals*. McGraw-Hill.
- Lichty, L.C. (1951). *Internal Combustion engines*. McGraw – Hill, Tokio.
- 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.
- Spicher, U. et al. (1992). *Investigation into the applicability of an optical fiber sensor for knock detection and knock control system*. SAE Paper 922370.
- Sun, Z.; Blackshear, P. L.; Kittelson, D. B. (1996). *Spark ignition engine knock detection using in-cylinder optical probes*. SAE Paper 962103.
- Taylor, C. F. (1968). *The internal-combustion engine in theory and practice*. Cambridge, The M. I. T. Press.

KNOCK, TORQUE AND POWER ANALYSIS OF A THREE-FUEL SYSTEM TURBOCHARGED COMPRESSION-IGNITION ENGINE - DIESEL, BIODIESEL AND ETHANOL

Rodrigo Fernando Estella dos Santos

Escola de Engenharia de São Carlos – USP

Av. Trabalhador Sancarlense, 400 – São Carlos – santosrf@sc.usp.br - Tel.: 016.2738229

Antônio Moreira dos Santos

Escola de Engenharia de São Carlos – USP - Tel.: 016.2739414

Keyll Carlos Ribeiro Martins

Centro Federal de Educação Tecnológica do Maranhão – CEFET/MA - Tel.: 098.2189044

José Antônio da Silva

Universidade Federal de São João del Rei - DCTEF/UFSJ - Tel.: 032.33792619

***Abstract.** The performance of a three-fuel system (diesel, biodiesel and ethanol) turbocharged compression-ignition engine is analyzed, being compared the characteristics curves of the engine supplied by mixtures since 100% diesel or biodiesel until mixtures of these fuels with a percentage of up to 50% of ethanol. It is shown torque, power, specific fuel consumption and thermal efficiency curves for part and load conditions. The best blend was 20% biodiesel and 80% diesel.*

***Keywords:** Biofuel, knock, ethanol, internal combustion engines*