

Análise da Operação de Motores Diesel com Misturas Parciais de Biodiesel

André Valente Bueno

Universidade Estadual de Campinas- Faculdade de Engenharia Mecânica- Departamento de Energia
valente@fem.unicamp.br

Jose A. Velásquez

Pontifícia Universidade Católica do Paraná- Departamento de Engenharia Mecânica
jose.velasquez@pucpr.br

Luiz Fernando Milanez

Universidade Estadual de Campinas- Faculdade de Engenharia Mecânica- Departamento de Energia
milanez@fem.unicamp.br

Resumo. As conseqüências da adição de biodiesel ao óleo diesel foram investigadas estabelecendo-se relações de causa e efeito entre o desempenho do motor e os processos de combustão e formação de mistura. Foram incluídos nesta discussão aspectos como emissões poluentes, formação de mistura, dinâmica do processo de combustão, eficiência de conversão do combustível, desempenho do motor e consumo específico. Utilizaram-se, sob tal propósito, técnicas tradicionalmente associadas à pesquisa e ao desenvolvimento dos motores de ciclo diesel, tais como a análise de liberação de energia, a análise exergética e ensaios dinamométricos. Os resultados obtidos no presente trabalho demonstram a atratividade, sob o ponto de vista operacional, da adição do éster etílico de soja ao óleo diesel na forma de misturas parciais.

Palavras chave: Biodiesel, Biocombustíveis, Motores Diesel, Análise Exergética

1. Introdução

Os ésteres de óleos oriundos de fontes biológicas, que recebem a denominação genérica de biodiesel, constituem uma alternativa promissora para a obtenção de combustíveis renováveis capazes de substituir o óleo diesel (Grabosky e McCormick, 1998). Estas substâncias possuem alto valor energético, são livres de enxofre e queimam de maneira similar à do óleo diesel. A sua aplicação em larga escala apresenta um grande potencial no Brasil, pois o país conta com uma ampla variedade de culturas para o fornecimento de óleos vegetais e possui tradição na produção de etanol a partir da cana de açúcar.

Dentre tais culturas, a soja apresenta escala suficiente para a produção imediata de biodiesel, respondendo por cerca de 90% da produção brasileira de óleos vegetais. Deste modo, o estudo dos efeitos da adoção do éster etílico do óleo de soja como um substituto parcial para o óleo diesel se revela consideravelmente oportuno. Foram conduzidos, sob tal propósito, testes em bancada nos quais se empregaram as técnicas experimentais de análise de liberação de energia e análise exergética (Bueno, 2006). Conforme se verá adiante, os resultados provenientes destes ensaios refletem os efeitos da introdução do biodiesel sobre as propriedades da mistura combustível, devendo-se destacar a importância da introdução de oxigênio na composição química do combustível, da redução de seu conteúdo energético e do acréscimo de sua viscosidade. As misturas parciais estudadas compreendem a adição de até 20% de biodiesel em volume, que corresponde à mistura B20. As propriedades destes combustíveis foram reportadas na Tabela 1. Vale ressaltar que a viscosidade das misturas parciais consideradas se encontra dentro dos limites estabelecidos pela norma ASTM D-445, que prevê um valor máximo de $4,1 \times 10^{-2}$ m²/s a 40°C para esta propriedade do combustível.

Tabela 1: Propriedades do óleo diesel, do éster etílico do óleo de soja (biodiesel) e das misturas parciais de interesse.

Combustível	%Biodiesel (Volume)	Fórmula Empírica	f_{st} [m_i/m_{ar}] _{st}	Densidade [kg/m ³]	Viscosidade [m ² /s @ 40°C]	Nº de Cetanas [ASTM D-613]	PCI [MJ/kg]	Exergia [MJ/kg]
Óleo Diesel	0%	C _{10,80} H _{18,70} O _{0,00}	$6,85 \cdot 10^{-2}$	850,0	$2,60 \cdot 10^{-2}$	45,00	43,30	44,98
B05	5%	C _{11,03} H _{19,16} O _{0,05}	$6,89 \cdot 10^{-2}$	851,3	$2,66 \cdot 10^{-2}$	45,33	43,00	44,65
B10	10%	C _{11,27} H _{19,64} O _{0,11}	$6,94 \cdot 10^{-2}$	852,6	$2,72 \cdot 10^{-2}$	45,60	42,69	44,33
B15	15%	C _{11,53} H _{20,15} O _{0,16}	$6,98 \cdot 10^{-2}$	853,9	$2,79 \cdot 10^{-2}$	45,80	42,38	44,00
B20	20%	C _{11,80} H _{20,69} O _{0,22}	$7,03 \cdot 10^{-2}$	855,2	$2,86 \cdot 10^{-2}$	46,30	42,06	43,35
Biodiesel	100%	C _{19,75} H _{36,59} O _{2,00}	$7,83 \cdot 10^{-2}$	876,0	$4,57 \cdot 10^{-2}$	48,20	37,20	38,48

2. Aparato Experimental

O levantamento de dados de pressão utilizados na análise de liberação de energia e na análise exergética foi efetuado utilizando-se um sistema AVL Indiset 619. A instrumentação de medição de pressão foi empregada em conjunto com uma bancada dinamométrica, responsável pelo controle do regime de operação do motor e pelo levantamento das variáveis de operação correspondentes ao regime selecionado. Utilizou-se, sob tal propósito, um dinamômetro ZÖLLNER ALFA-160 conectado a um motor diesel totalmente instrumentado. O controle do dinamômetro e do avanço da bomba injetora, bem como a aquisição de dados correspondentes às variáveis de operação do motor, foram realizados empregando-se o sistema AVL Puma 5. A parcela do aparato experimental correspondente à bancada dinamométrica foi representada na Figura 1, discriminando-se as variáveis de operação registradas durante os ensaios.

Utilizou-se um motor diesel rápido turbo-alimentado de injeção direta MWM 6.07T GMT-400 durante a condução dos experimentos. Este motor pertence à série MWM SPRINT e dispõem de fluxo cruzado dos gases na câmara de combustão, turbocompressor com válvula 'waste gate', bomba distribuidora do tipo Bosch VE, bicos injetores com 5 furos e conjuntos porta injetores de duplo estágio. Suas especificações foram apresentadas na Tabela 2.

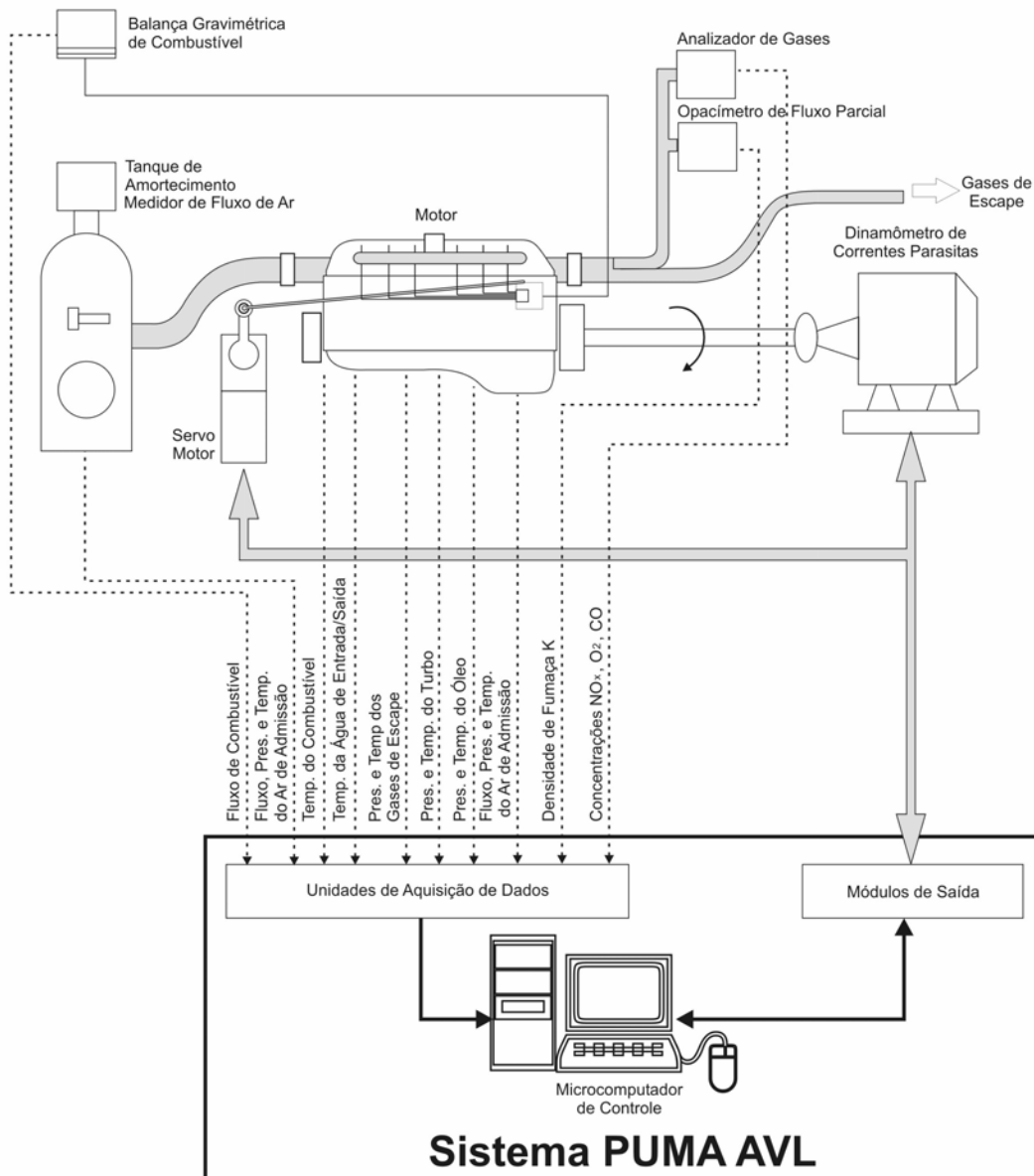


Figura 1: Representação esquemática da bancada de testes e das variáveis operacionais mensuradas.

Tabela 2: Especificações do motor utilizado nos experimentos.

Configuração	4 tempos de injeção direta turboalimentado
Volume Deslocado [dm ³]	4,2
Número de Cilindros	6
Válvulas por Cilindro (Admissão/Escape)	2/1
Pressão de Abertura dos Bicos Injetores (1° /2° Estágio) [bar]	220/300
Diâmetro do Pistão [m]	0,093
Curso [m]	0,103
Comprimento da Biela [m]	0,170
Relação de Compressão	17,8:1
Potência Máxima [kW]	123,0 a 3400rpm

3. Formação de Mistura

Os efeitos da adição do éster etílico de soja sobre a formação de mistura foram ilustrados a partir de dados coletados com o motor MWM 6.07 T operando a plena carga, tendo-se o óleo diesel e a mistura B20 como combustíveis. Devido à elevação de viscosidade promovida pelo biodiesel, verifica-se na Figura 2a uma redução na massa de combustível fornecida ao motor mediante a adoção da mistura B20, que se acentua em rotações superiores aos 3000 rpm. Outro aspecto relevante com respeito ao processo de queima das misturas estudadas é a presença de oxigênio na composição do biodiesel, que promove a elevação reportada na Tabela 1 para a relação mássica entre combustível e ar correspondente à combustão estequiométrica (f_{st}). Obteve-se, por conta da combinação destes dois fatores, um empobrecimento na mistura para o caso de se agregar biodiesel ao combustível, conforme se observa na Figura 2b. Esta tendência é confirmada pelas composições de gases de escape apresentadas na Tabela 3, que apontam um acréscimo na fração molar de oxigênio e uma redução nas emissões de CO mediante a operação com a mistura B20. Para as concentrações estudadas, o impacto da elevação na densidade do combustível com a adição de biodiesel não se mostrou relevante quanto à formação de mistura, observando-se um incremento de apenas 0,6% na densidade entre B20 e o óleo diesel.

Tabela 3: Composição dos gases de escape para a operação do motor a 2000 rpm e plena carga.

	Diesel	B20
CO [ppm]	3117	2378
O ₂ [fração molar]	0,069	0,074
ϕ_b (gases de escape)	0,66	0,63

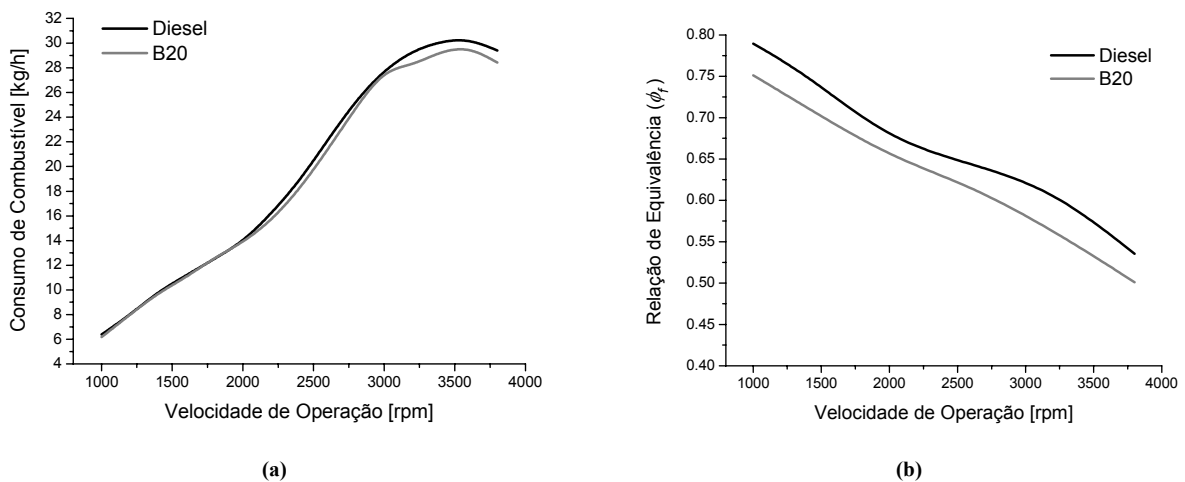


Figura 2: Consumo de combustível e relação de equivalência verificada no cilindro em condições de plena carga.

4. Dinâmica do Processo de Combustão

A Figura 3 traz resultados obtidos para a liberação de energia com o motor operando em plena carga e com valores moderados (1400 rpm) e elevados (3200 rpm) de rotação. A contribuição de cada mecanismo de queima (pré-misturado e difusivo) para a liberação de energia foi mapeada aproximando-se as curvas de taxa aparente de queima representadas nesta ilustração por meio de duas funções de Wiebe. Os valores verificados para a eficiência de combustão e para a fração do combustível injetado queimada no modo pré-misturado (χ_p) foram apresentados nas Tabelas 4 e 5.

O ganho de viscosidade promovido pelo biodiesel tem um impacto importante na dinâmica do jato de combustível, elevando a sua velocidade e distância de penetração (Chang e Farrell, 1997 e Choi e Reitz, 1999). Obtém-se, desta forma, um acréscimo na quantidade de movimento turbulenta do jato e, por conseguinte, um incremento na taxa de preparação de mistura ao se agregar biodiesel ao óleo diesel. Por conta das elevadas relações de equivalência verificadas no jato de combustível, a presença de oxigênio na composição do biodiesel também contribui para a aceleração da preparação e queima da mistura. Deve-se mencionar, ainda, que introdução de biodiesel no combustível promove um decréscimo no período de atraso da ignição, correspondente ao aumento no número de cetano reportado na Tabela 1. Tem-se, deste modo, um intervalo de tempo inferior para a preparação de combustível até o instante da ignição, ou seja, para a preparação de combustível disponível para o mecanismo de queima pré-misturada. Para as misturas parciais analisadas, a sobreposição destes três fatores resulta em uma leve redução na combustão pré-misturada com a elevação da concentração de biodiesel.

Esta redução na queima pré-misturada é compensada rapidamente durante a fase inicial da combustão difusiva, devido à aceleração na liberação de energia desencadeada pela maior taxa de preparação de mistura. Ainda por conta do favorecimento à combustão difusiva, observa-se que a adição de biodiesel promoveu um pequeno acréscimo na fração de combustível queimada até o instante de abertura da válvula de escape, ou seja, na eficiência de combustão. Verifica-se, deste modo, que a utilização de biodiesel sob a forma das misturas parciais estudadas altera positivamente a dinâmica do processo de combustão.

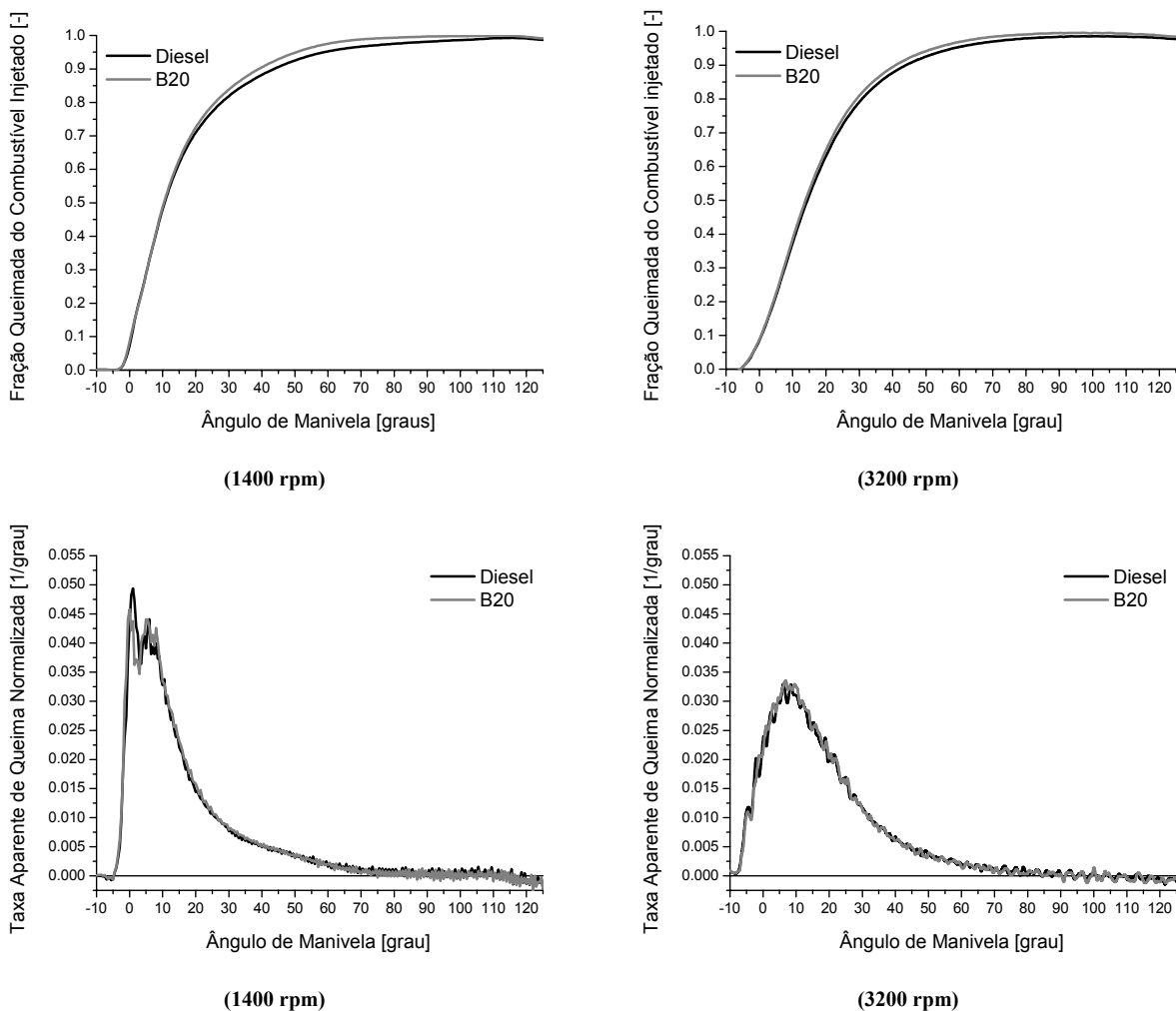


Figura 3: Resultados da análise de liberação de energia em plena carga.

Tabela 4: Parâmetros de liberação de energia para a operação do motor a 1400 rpm e plena carga.

	Diesel	B20
χ_p	19,00%	17,00%
Eficiência de Combustão	98,98%	99,11%

Tabela 5: Parâmetros de liberação de energia para a operação do motor a 3200 rpm e plena carga.

	Diesel	B20
χ_p	4,62%	3,86%
Eficiência de Combustão	97,73%	98,40%

5. Formação de Óxidos de Nitrogênio

Experimentos realizados em motores de ignição por centelha demonstram que a formação de óxidos de nitrogênio é favorecida em condições de mistura ligeiramente pobres nas quais se observem altas temperaturas (Benson e Whitehouse, 1983). Nos motores de ciclo diesel, o combustível preparado durante o atraso da ignição é queimado rapidamente através da passagem de uma chama pré-misturada. Este processo se dá em uma faixa de misturas e temperaturas propícias para a formação de óxidos de nitrogênio, contribuindo, portanto, para a formação desta substância poluente. Por este motivo, a proporção de queima pré-misturada foi reduzida de maneira considerável nos motores modernos. Após o estabelecimento da chama difusiva, a formação de óxidos de nitrogênio passa a ficar restrita à periferia do jato combustível (Dec, 1997).

Choi e Reitz (1999) examinaram as características de emissões das misturas entre o éster metílico do óleo de soja e o óleo diesel. Estes autores verificaram que devido às modificações impostas à trajetória do jato de combustível, a adição de biodiesel acresce a parcela da mistura exposta a altas temperaturas na periferia deste jato durante a combustão difusiva, levando a um leve favorecimento à formação de óxidos de nitrogênio com a operação do motor em cargas elevadas. Para condições de baixa carga, a combustão pré-misturada passa a ter uma participação importante no desenvolvimento de altas temperaturas no jato combustível, fazendo com que a menor temperatura de chama adiabática das misturas contendo biodiesel provoque uma redução na emissão de NO_x.

A Tabela 6 apresenta os valores mensurados para a emissão de NO_x e para a fração do combustível injetado queimada no modo pré-misturado com o motor operando a 2000 rpm e em condições de baixa, média e plena carga. Os valores verificados para as emissões de óxidos de nitrogênio demonstram a extensão dos efeitos apontados por Choi e Reitz para o biodiesel proveniente do metanol com o emprego do éster etílico de soja. Para o regime de plena carga, que foi dominado pela combustão difusiva, observa-se um leve favorecimento à formação de óxidos de nitrogênio com a adição de biodiesel. Com o acréscimo da participação da combustão pré-misturada em condições de carga parcial, verificou-se uma redução nas emissões de óxidos de nitrogênio para a mistura B20 com relação ao óleo diesel.

Deve-se mencionar, contudo, que a generalização destes resultados não se mostra adequada, pois a tecnologia formação de mistura aplicada em cada motor governa a morfologia do jato combustível e a dinâmica do processo de combustão, possuindo, portanto, pronunciada influência sobre as emissões de NO_x alcançadas com a aplicação do biodiesel. A relevância da configuração do motor sobre a formação deste poluente foi comprovada pela Agencia de Proteção Ambiental Estadunidense (EPA, 2002), que efetuou um estudo detalhado dos efeitos da utilização do biodiesel sobre as emissões de exaustão. Para a aplicação da mistura B20, por exemplo, registraram-se neste estudo alterações de +8% a -6% na emissão de NO_x de acordo com o motor utilizado (EPA, 2002).

Tabela 6: Emissão de Óxidos de Nitrogênio para a operação do motor a 2000 rpm.

Carga (fração do torque máximo)	χ_p (Diesel/B20) [%]	NO _x (Diesel/B20) [ppm]	Varição no NO _x p/ B20 [%]
33%	43,00/ 42,06	310/ 292	-5,8
66%	22,10/ 22,04	664/ 614	-7,53
100%	9,11/ 9,06	879/ 882	+0,4

6. Emissões de Monóxido de Carbono e Material Particulado

Os resultados obtidos para a emissão de monóxido de carbono com o motor operando a 2000 rpm e em condições de baixa, média e plena carga foram reportados na Tabela 7. Obteve-se uma redução média de 26% para esta substância poluente com a mistura B20. A origem de tal comportamento reside no empobrecimento da mistura no interior do jato combustível com o emprego do biodiesel. Estes dados também demonstram uma elevação gradual nos benefícios provenientes da adição de biodiesel com a redução da carga na qual o motor opera.

A utilização do biodiesel também pode contribuir para o abatimento da emissão de material particulado nos grandes centros urbanos. Por apresentar oxigênio em sua composição, o biodiesel introduz um oxidante nas regiões de mistura rica do jato de combustível, fornecendo um caminho alternativo para os percussores de fuligem. Obtém-se, deste modo, uma redução na fração não-solúvel do material particulado. De acordo com Choi e Reitz (1999), esta redução possui forte correlação com a concentração de oxigênio presente no combustível. A Tabela 8 apresenta valores mensurados para a densidade de fumaça nos gases de escape (k) utilizando-se a mistura B20 e o óleo diesel como combustíveis. Estes dados indicam uma ampliação nos benefícios da adição de biodiesel quanto à emissão de material particulado mediante o enriquecimento da mistura. A restrição obtida na emissão de material particulado também depende da configuração do motor empregado, constando na literatura reduções médias de 10,1% (EPA, 2002) a 25% (McCormick et al., 2005) mediante a utilização da mistura B20. Os dados reportados na Tabela 8 indicam que o motor empregado no presente estudo se encontra em uma região média quanto à redução na emissão de material particulado, assim como ocorreu com o comportamento registrado para o NO_x .

Tabela 7: Emissão de monóxido de carbono para a operação do motor a 2000 rpm.

Carga (fração do torque máximo)	ϕ_b (Diesel/B20) (gases de escape)	CO (Diesel/B20) [ppm]	Varição no CO p/ B20 [%]
33%	0,30/ 0,28	743/ 524	-29,48
66%	0,51/ 0,49	404/ 304	-24,75
100%	0,66/ 0,63	3117/ 2378	-23,70

Tabela 8: Emissão de material particulado para a operação do motor a 2000 rpm.

Carga (fração do torque máximo)	ϕ_b (Diesel/B20) (gases de escape)	k (Diesel/B20) [m-1]	Varição em k p/ B20 [%]
66%	0,51/ 0,49	0,49/ 0,44	-10,20
100%	0,66/ 0,63	3,34/ 2,71	-18,86

Eficiência Exergética do Processo de Combustão

Empregou-se o modelo de diagnóstico desenvolvido por Bueno (2006) durante a análise das eficiências do processo de combustão e da conversão da exergia do combustível em trabalho no interior do cilindro. Este modelo constitui uma extensão da análise de liberação de energia através da incorporação de conceitos relacionados à análise exergética, sendo baseado, portanto, no processamento de dados experimentais de pressão no cilindro.

A introdução de biodiesel no combustível apresentou efeitos negativos quanto à eficiência exergética do processo de combustão, ou seja, quanto à fração da exergia química da carga consumida pelo processo de combustão que é convertida em exergia termomecânica, tornando-se disponível para a transferência através de calor e trabalho. Apesar de possuir um comprimento médio das moléculas superior, a mistura B20 apresentou eficiência exergética instantânea de queima praticamente equivalente à do diesel sob as mesmas condições de temperatura. Esta convergência é ilustrada na Figura 4a, que traz os valores obtidos para a eficiência instantânea de queima em função da temperatura da carga.

Entretanto, ao se analisar o comportamento da eficiência exergética global de queima, que corresponde a toda a extensão do processo de combustão, observa-se que a adição de biodiesel reduz o valor deste parâmetro de desempenho. A Figura 4b exemplifica esta tendência, apresentando os valores obtidos para a eficiência exergética global de queima em condições de plena carga. Este fato tem origem na redução de temperatura da carga acarretada pelo emprego das misturas contendo o biodiesel, que foi ilustrada na Figura 5 juntamente com seu impacto na eficiência instantânea de combustão.

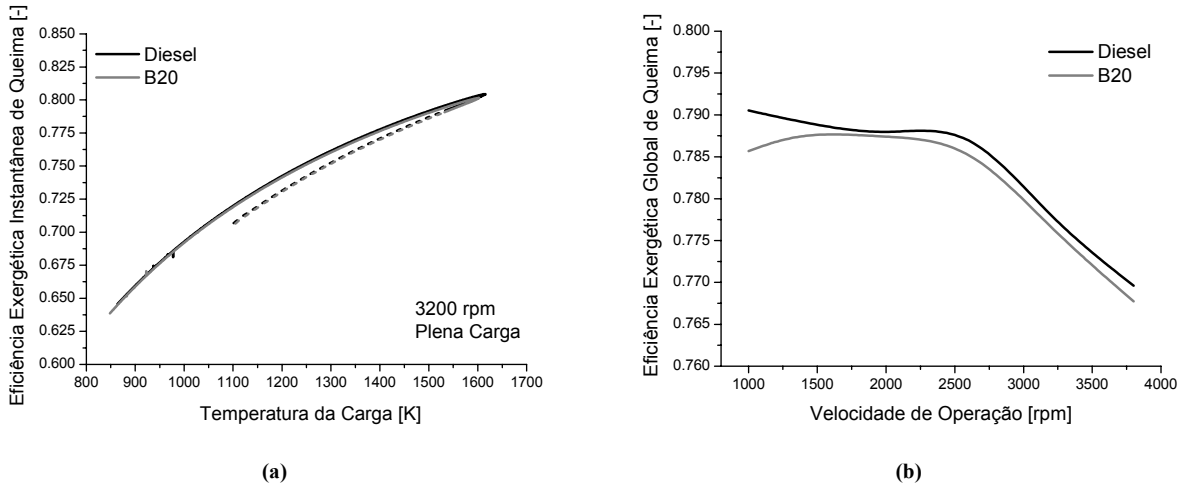


Figura 4: Variação da eficiência exergética do processo de combustão com a temperatura e rotação.

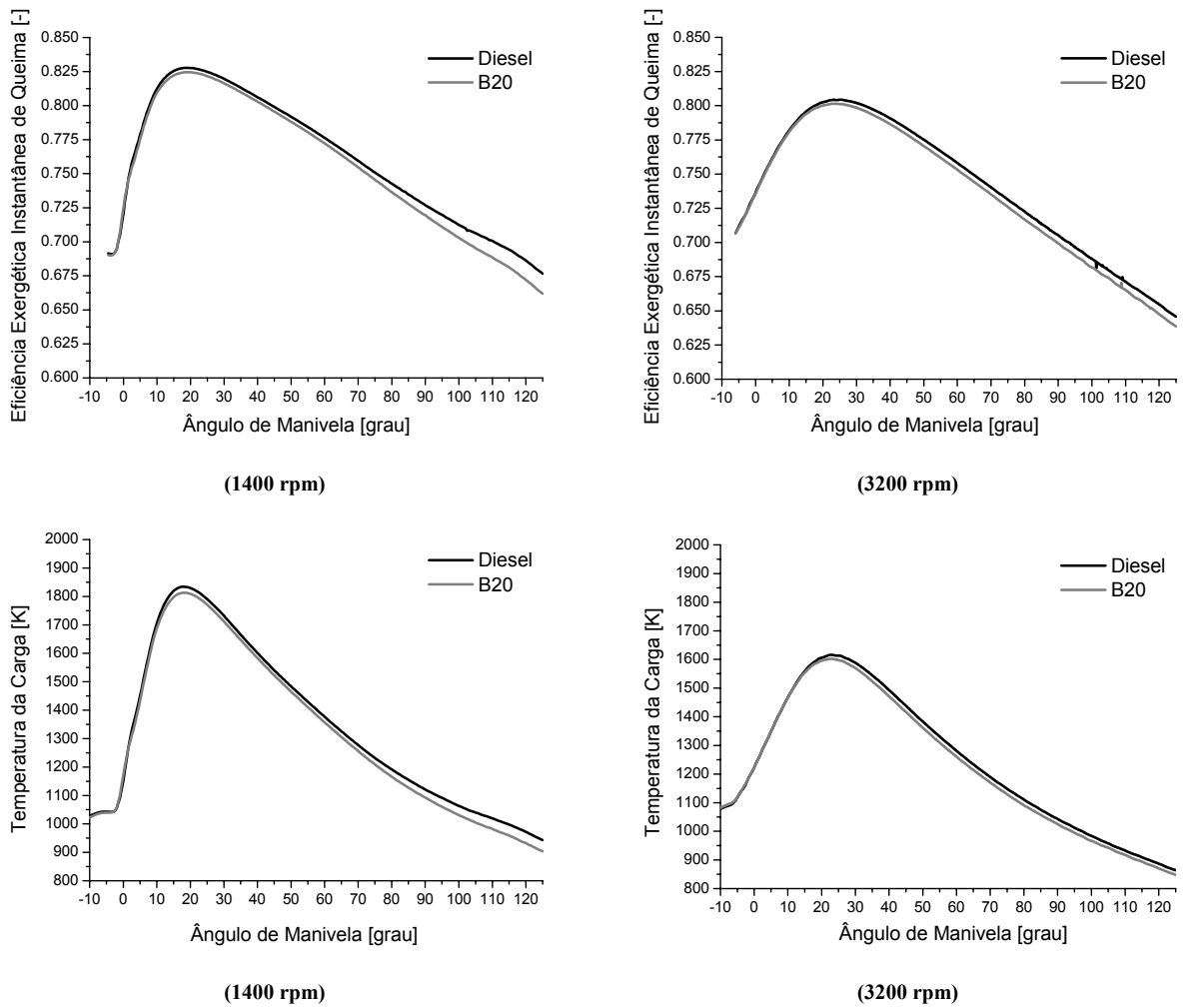


Figura 5: Eficiência exergética instantânea de queima e temperatura do fluido de trabalho em plena carga.

7. Eficiência de Operação

A exposição dos efeitos causados pelo biodiesel à eficiência de operação do motor tem início com uma análise, em condições de plena carga, da distribuição dada no cilindro à exergia fornecida com o combustível. O modelo de análise exérgica formulado por Bueno (Bueno, 2006) também foi aplicado nesta tarefa, obtendo-se como resultados os termos cumulativos do balanço de exergia no cilindro durante a fase fechada do ciclo. A Figura 6 traz os valores destes termos normalizados com relação à exergia fornecida com o combustível, onde ΔEx_Q representa a fração rejeitada através do calor, ΔEx_W a fração liberada sob a forma de trabalho indicado, ΔI a fração destruída por irreversibilidades, ΔEx_{tm} a fração acumulada na carga sob a forma de exergia termomecânica e ΔEx_{ch} a fração acumulada sob a forma de exergia química não convertida pela reação de combustão, que não pode ser aproveitada no interior do cilindro.

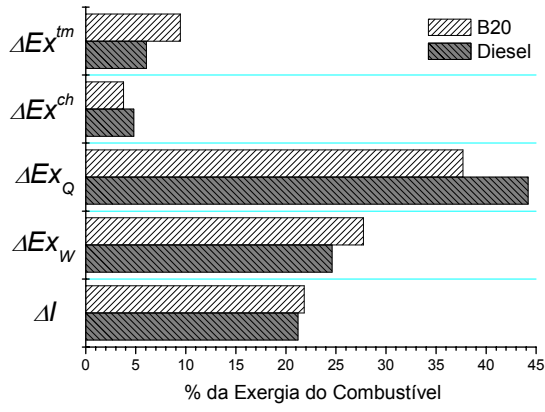
Devido à redução na eficiência exérgica de combustão descrita há pouco, observam-se nesta ilustração valores superiores para a irreversibilidade mediante a utilização da mistura B20. Entretanto, ao se analisar a eficiência de operação do motor, outros aspectos além da eficiência de combustão e da destruição de exergia devem ser levados em conta. Dentre tais aspectos, pode-se destacar o nível de consumo da exergia química da carga e a razão de conversão da exergia termomecânica em trabalho.

Por promover a formação de produtos de combustão com menor exergia química, a adição de biodiesel à mistura reduziu a parcela da exergia química da carga que não pôde ser consumida ao longo do processo de combustão. Este comportamento tem origem no empobrecimento da mistura e na redução da relação C/H do combustível ocasionados pela introdução do biodiesel. Vale ressaltar que o incremento no consumo da exergia química da carga suplantou os efeitos da redução na eficiência exérgica de combustão, obtendo-se uma quantidade superior de exergia termomecânica para a transferência através de fluxos de trabalho, calor e massa com o acréscimo de biodiesel ao combustível. Ainda por conta da redução na relação de equivalência proporcionada pelo biodiesel, verificou-se um decréscimo na rejeição de exergia termomecânica através do calor e uma elevação para a transferência por meio do trabalho de expansão com a mistura B20. Constatou-se, portanto, um favorecimento à conversão da exergia do combustível em trabalho no interior do cilindro mediante a utilização da mistura B20.

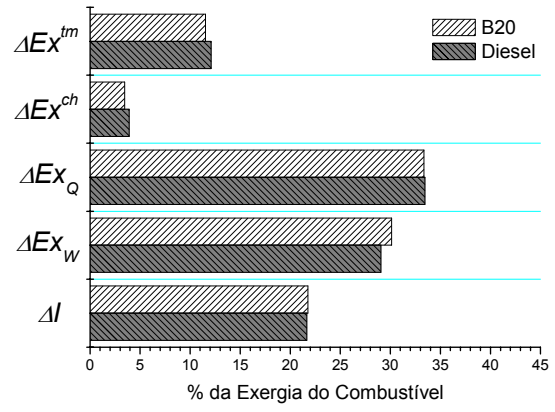
A avaliação dos termos fornecidos pelo modelo de análise exérgica para o balanço de exergia no cilindro, que podem ser considerados parâmetros indicados, proporcionou uma visão intensiva dos efeitos da adição de biodiesel sobre a eficiência de operação do motor. Todavia, resta acompanhar a ação destes efeitos sobre a eficiência global de operação do motor, isto é, sobre o comportamento observado nos ensaios em bancada para as variáveis de frenagem. Utilizou-se a seguinte expressão para a determinação da eficiência de conversão do combustível:

$$n_f = \frac{P_b}{m_f ex_f} \quad (1)$$

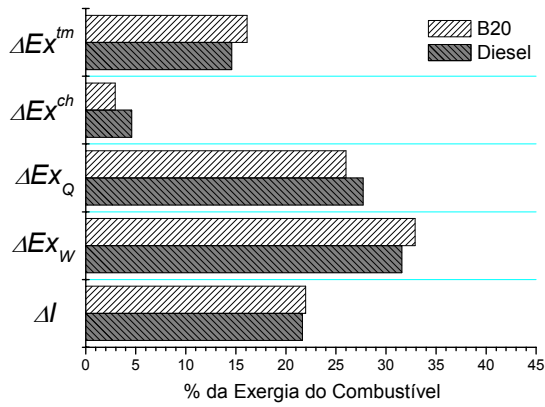
onde P_b representa a potência de frenagem, m_f a vazão mássica de combustível entregue ao motor e ex_f a exergia de fluxo deste combustível. Os mapas de eficiência obtidos para as misturas parciais de interesse foram apresentados na Figura 7. Estes mapas demonstram que o ganho de eficiência capturado pelo modelo de análise exérgica se estendeu para os parâmetros de frenagem do motor, em todo o seu campo de operação. Observa-se, ainda, uma rápida elevação na eficiência de conversão do combustível com a adição de biodiesel até a mistura B10, e um ganho modesto no campo de eficiências com o acréscimo da concentração de biodiesel entre este patamar e a mistura B20.



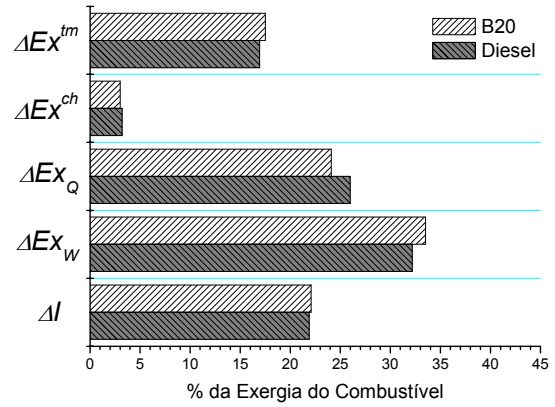
(1000 rpm)



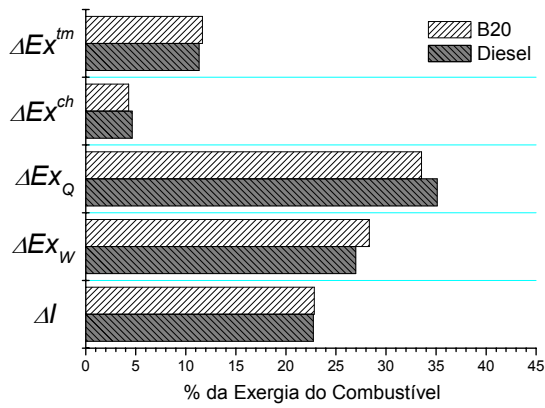
(1400 rpm)



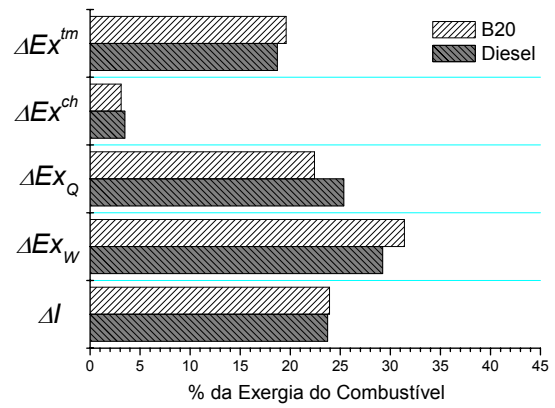
(2000 rpm)



(2600 rpm)



(3200 rpm)



(3800 rpm)

Figura 6: Termos cumulativos do balanço de exergia obtidos para a operação do motor em plena carga.

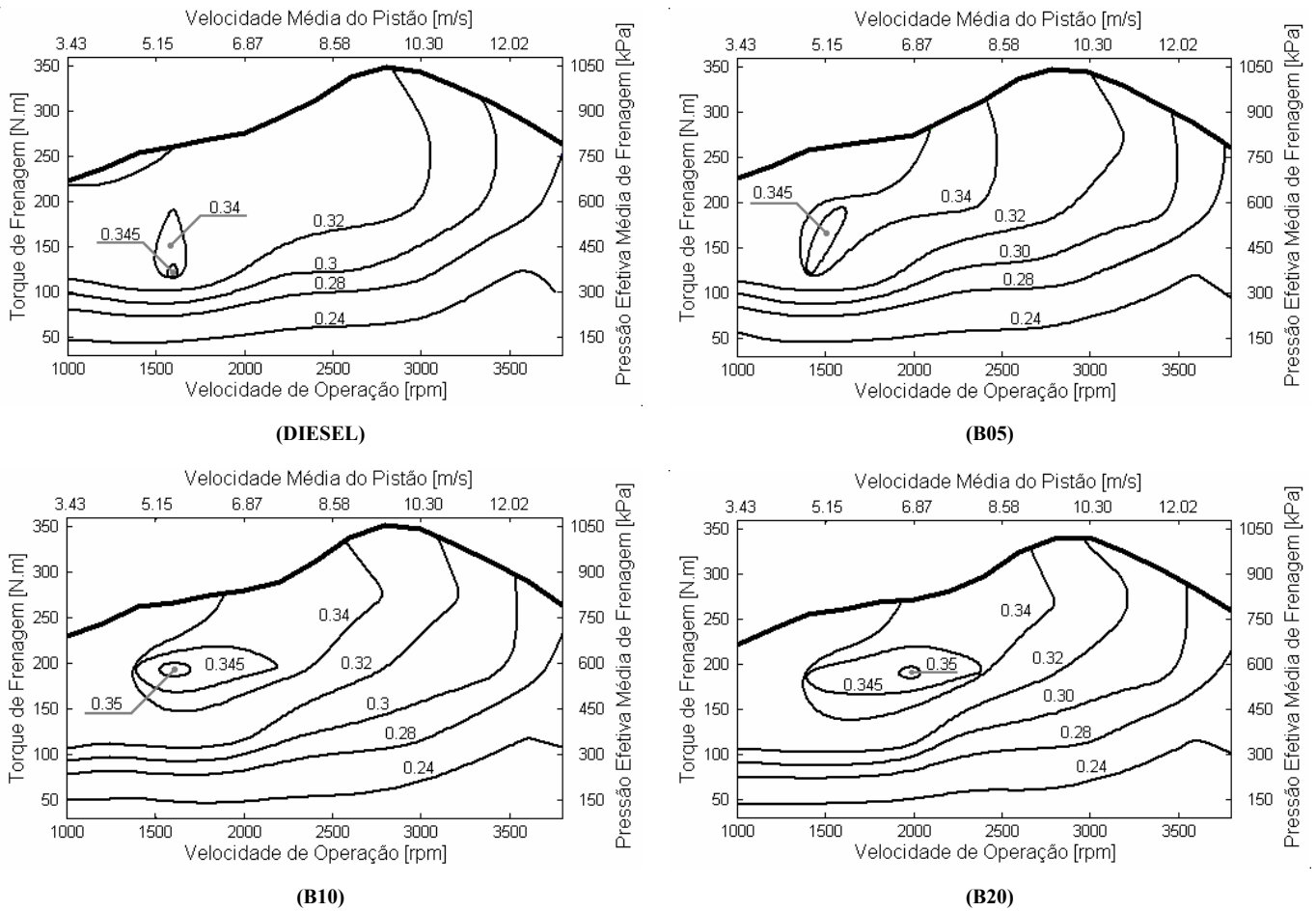


Figura 7: Mapas de eficiência de conversão do combustível para as misturas entre óleo diesel e biodiesel.

8. Desempenho e Consumo Específico

Os resultados obtidos em ensaios dinamométricos de plena carga foram apresentados na Figura 8. O desempenho registrado para as misturas parciais nesta ilustração traduz a contraposição entre os principais efeitos da adição de biodiesel ao óleo diesel: o ganho na eficiência de conversão e as reduções no fornecimento e no conteúdo energético do combustível. Graças à rápida elevação na eficiência de conversão do combustível verificada para a introdução de biodiesel até 10% em volume, a mistura B10 exibe o melhor compromisso entre os fatores mencionados acima, suplantando os demais combustíveis quanto ao desempenho. Para a adição de biodiesel em concentrações superiores à da mistura B10, o ganho de eficiência não se mostrou suficiente para compensar os efeitos da redução no influxo de exergia associado ao combustível, verificando-se uma pequena queda no desempenho com relação ao óleo diesel.

A Figura 9 traz os mapas de consumo específico obtidos com o óleo diesel e as misturas parciais em estudo. Para o consumo específico, a adição de biodiesel estabelece um compromisso entre a elevação da eficiência de conversão do combustível e a redução de seu conteúdo energético, que também favorece a mistura B10. A partir da mistura B10, a adição de biodiesel no combustível passa a ocasionar uma pequena deterioração no consumo específico. Todavia, neste caso, ainda se observa um benefício para as misturas B15 e B20 com relação ao óleo diesel.

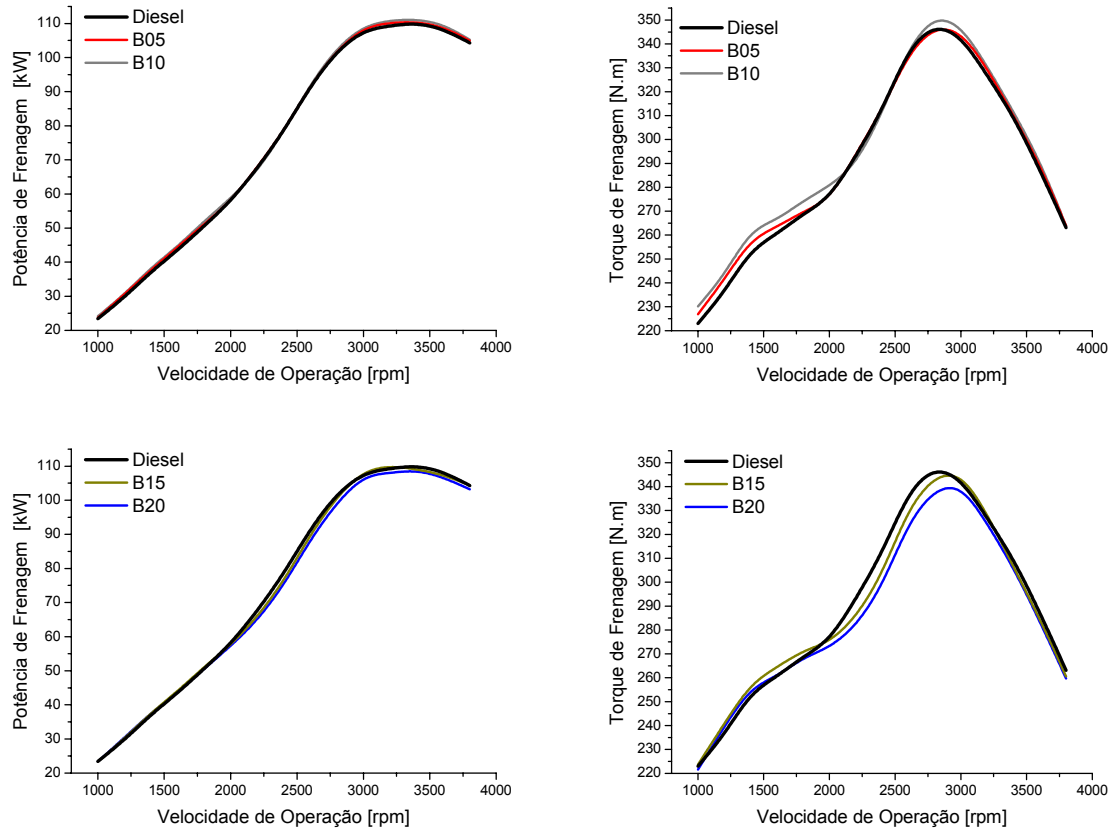


Figura 8: Diagramas de desempenho obtidos para as misturas entre óleo diesel e biodiesel.

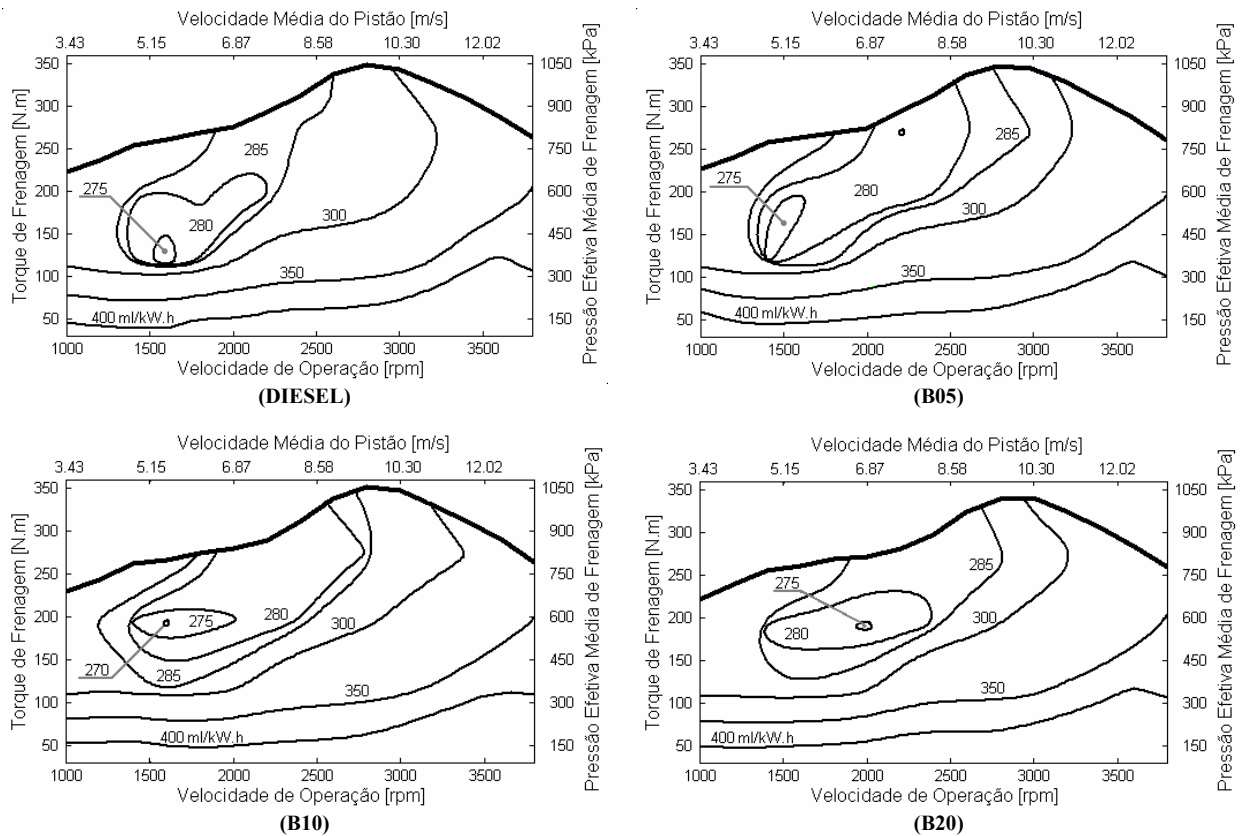


Figura 9: Mapas de performance obtidos para as misturas entre óleo diesel e biodiesel.

9. Conclusões

Os efeitos da adição do éster etílico de soja ao óleo diesel foram analisados utilizando-se dados coletados em ensaios realizados com um motor diesel rápido de injeção direta turbo-alimentado. Para as misturas combustíveis estudadas, que compreendem a adição de até 20% de biodiesel em volume, verificou-se uma aceleração na liberação de energia durante a queima difusiva e um acréscimo na fração queimada do combustível injetado. A introdução de biodiesel também promoveu um empobrecimento da mistura, além de uma redução no influxo de energia associado ao combustível.

Demonstrou-se que a adição de biodiesel nas concentrações estudadas favorece a conversão da exergia do combustível em trabalho de expansão no interior do cilindro, proporcionando uma elevação na eficiência de conversão do combustível. Esta elevação de eficiência possui um impacto operacional relevante, proporcionando uma redução no consumo específico de combustível para as misturas estudadas e um ganho de desempenho para a adição de biodiesel em concentrações abaixo da correspondente à mistura B10. Em patamares superiores ao da mistura B10, o impacto da eficiência de conversão é superado pelos efeitos da redução do influxo de energia com o combustível, obtendo-se um desempenho ligeiramente inferior ao verificado com o óleo diesel.

Os resultados apresentados reiteram a atratividade, sob o ponto de vista operacional, da adição do éster etílico de soja ao óleo diesel sob a forma de misturas parciais. Deve-se ressaltar, ainda, que dentre os combustíveis analisados a mistura B10 ofereceu as melhores características quanto ao desempenho e ao consumo específico.

10. Referências

- Benson, R. S., Whitehouse, N.D., 1983, "Internal Combustion Engines", Primeira Edição, Pergamon Press.
- Bueno, A. V., 2006, "Análise da Operação de Motores Diesel com Misturas Parciais de Biodiesel", Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Tese de Doutorado.
- Chang, C., Farrell, P., 1997, "A Study on the Effects of Fuel Viscosity and Nozzle Geometry on High Injection Pressure Diesel Spray Characteristics", SAE Paper 970353.
- Choi, C. Y., Reitz, R. D., 1999, "A Numerical Analysis of the Emissions Characteristics of Biodiesel Blended Fuels", J. of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 121, p. 31.
- Choi, C. Y., Reitz, R. D., 1999, "An Experimental Study on the Effects of Oxygenate Fuel Blends and Multiple Injection Strategies on DI Diesel Engine Emissions", Fuel, Vol. 78, p. 1303-1327.
- Dec, J. E., 1997, "A Conceptual Model of DI Diesel Combustion Based on Laser-Sheet Imaging", SAE Paper 970803.
- Grabosky, M., S., McCormick, R., L., 1998, "Combustion of Fat and Vegetable Oil Derived Fuels in Diesel Engines", Pog. Energy Combust. Sci., Vol. 24, pp. 125-164.
- McCormick, R.L., Tennant, C.J., Hayes, R.R., Black, S., Ireland, J., McDaniel, T., Williams, A., Frailey, M., Sharp, C.A., 2005, "Regulated Emissions from Biodiesel Tested in Heavy-Duty Engines Meeting 2004 Emission Standards", SAE Paper 2005-01-2200.
- United States Environmental Protection Agency (EPA), 2002, "A Comprehensive Analysis of Biodiesel Impacts on Exhaust Emissions", Draft Technical Report EPA420-P-02-001.

Analysis of Diesel Engine Operation with Biodiesel Blends

André Valente Bueno

Universidade Estadual de Campinas- Faculdade de Engenharia Mecânica- Departamento de Energia
valente@fem.unicamp.br

Jose A. Velásquez

Pontifícia Universidade Católica do Paraná- Departamento de Engenharia Mecânica
jose.velasquez@pucpr.br

Luiz Fernando Milanez

Universidade Estadual de Campinas- Faculdade de Engenharia Mecânica- Departamento de Energia
milanez@fem.unicamp.br

Abstract

The consequences of the biodiesel blends with diesel fuel were analyzed establishing cause and effect relationships between the engine performance and the combustion and mixture preparation processes. In this investigation, aspects like pollutant emissions, mixture preparation, dynamic of the combustion process, fuel conversion efficiency, performance under full load and specific fuel consumption were included. Techniques traditionally associated with diesel engines research and development were utilized for this purpose, including heat release analysis, exergetic analysis and dynamometric bench tests. The results obtained in the present work indicate operational benefits with the use of the biodiesel blends.

Keywords: Biodiesel, Biofuels, Diesel Engines, Exergetic Analysis