



# EMIÇÃO DOS GASES DE COMBUSTÃO EM MOTOR DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO: ENSAIO COMPARATIVO ENTRE DIESEL, BIODIESEL E BIODIESEL COM INJEÇÃO DE ETANOL

**Gilberto Hirotugu Azevedo Koike**

Açucareira Virgolino de Oliveira S.A., Fazenda Canoas, s/n,  
CEP 15200-000, José Bonifácio, SP, e-mail: gkoike@gvo.com.br

**Afonso Lopes**

Bolsista de Produtividade do CNPq – Nível II, Departamento de Engenharia Rural,  
UNESP, CEP 14884-900, Jaboticabal, SP, e-mail: afonso@fcav.unesp.br

**Luís Carlos Passarini**

Departamento de Engenharia Mecânica, EESC-USP, Avenida Trabalhador São-carlense, 400,  
CEP 13566-590, São Carlos, SP, e-mail: luca@sc.usp.br

**Felipe Thomaz da Camara**

Departamento de Engenharia Rural, UFCE, *Campus* do Cariri, s/n, CEP 14884-900,  
Juazeiro do Norte, CE, e-mail: felipetdacamara@yahoo.com.br

**Leônidas Hildebrand Júnior**

Núcleo Design do Produto, Centro Universitário Belas Artes, Rua José Antonio Coelho, 879,  
CEP 04011-062, São Paulo, SP, e-mail: leonidas.junior@belasartes.br

**Armando José Dal Bem**

Virgolino de Oliveira S.A. Açúcar e Álcool, Fazenda Santo Antonio, s/n,  
CEP 15800-000, Ariranha, SP, e-mail: armando@gvo.com.br

## Resumo

O presente trabalho tem por objetivo avaliar a emissão em motor de ignição por compressão, sem modificação no sistema de injeção, funcionando com biodiesel e posteriormente com injeção suplementar de etanol hidratado para a recuperação de potência, em comparação com o combustível original.

*Palavras-chave:* biodiesel, emissão, etanol.

## Introdução

A mudança global do clima é um dos mais graves problemas ambientais do século, com consequências possivelmente catastróficas. Esse problema vem sendo causado pela intensificação do efeito estufa, que, por sua vez, está relacionado ao aumento da concentração na atmosfera da Terra de gases cujas características são específicas. Esses gases permitem a entrada da luz solar, mas impedem que parte do calor em que a luz se transforma volte para o espaço. Esse processo de aprisionamento do calor é análogo ao que ocorre em uma estufa, daí o nome atribuído a esse fenômeno e também aos gases que apresentam essa propriedade de aprisionamento parcial de calor, chamados de gases de efeito estufa (GEE), dentre

os quais destaca-se o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (Pereira, 2008). Na Figura 1 esquematiza-se o efeito estufa.

É importante ressaltar que o efeito estufa é um fenômeno natural e bem-vindo, pois sem ele o sol não conseguiria aquecer a Terra o suficiente para que a mesma fosse habitável.

Porém, a intensificação do efeito estufa é de fato um problema, e a principal causa é a queima de combustíveis fósseis utilizados sobretudo nos setores de geração elétrica, industrial e de transporte. Com a revolução industrial e o advento do motor de combustão interna, as emissões de GEE decorrentes da queima desses combustíveis vêm aumentando de forma abrupta e, com isso, é maior a quantidade desses gases concentrada na atmosfera. É

justamente esse aumento da concentração de GEE na atmosfera que vem causando a intensificação do efeito estufa e, em decorrência, o aumento da quantidade de calor aprisionado na atmosfera da Terra. Esse calor adicional ou, dito de outra forma, essa variação de energia térmica tem influência determinante sobre o funcionamento do clima do planeta, já que essa energia é responsável pela circulação dos ventos e dos oceanos, pela evaporação e pela precipitação (Pereira, 2008). Na Figura 2 ilustra-se o comportamento do efeito estufa com a emissão de gases provocada por motores que utilizam combustíveis fósseis.

Uma maneira de neutralizar o efeito estufa é por meio da utilização de combustíveis renováveis, como o biodiesel e o etanol, este último fabricado a partir da cana-de-açúcar. O  $\text{CO}_2$  gerado na combustão seria consumido na fotossíntese da planta que deu origem ao combustível.

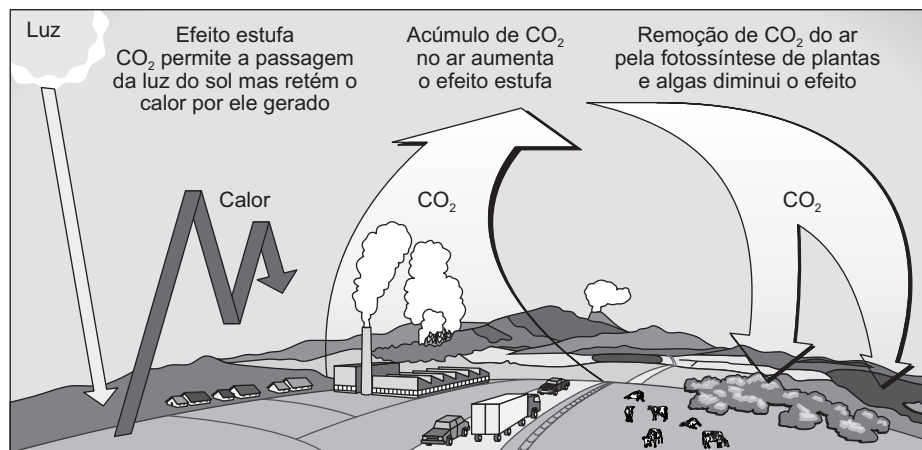
Na Figura 3 ilustra-se o comportamento do efeito estufa com a emissão de gases provocada por motores que utilizam combustíveis renováveis.

### Metodologia

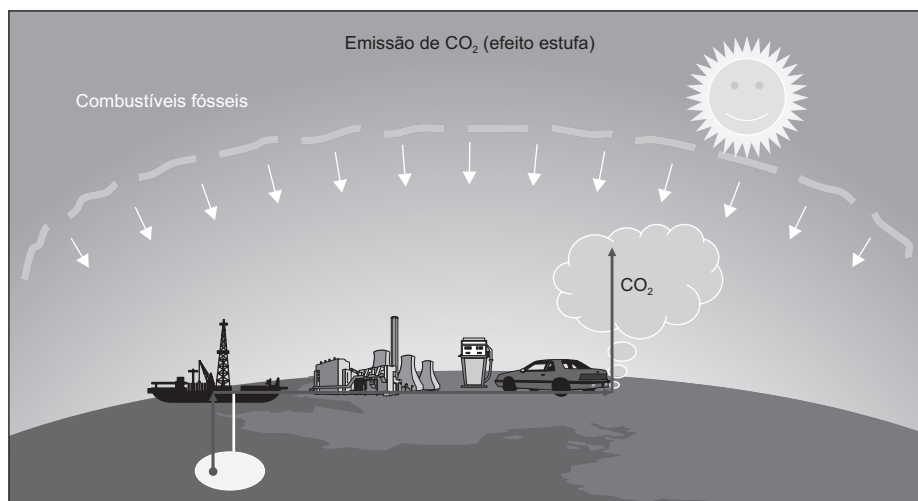
O ensaio foi realizado no município de Catanduva, estado de São Paulo, nas dependências do concessionário Pedro Monteleone Veículos e Motores Ltda., representante da marca Mercedes-Benz do Brasil.

A sequência de operações obedeceu à cronologia: levantamento das curvas de torque, de potência à plena carga, utilizando diesel e biodiesel de soja. Depois, injetou-se etanol hidratado em paralelo com biodiesel até o motor atingir a potência de quando movido a diesel.

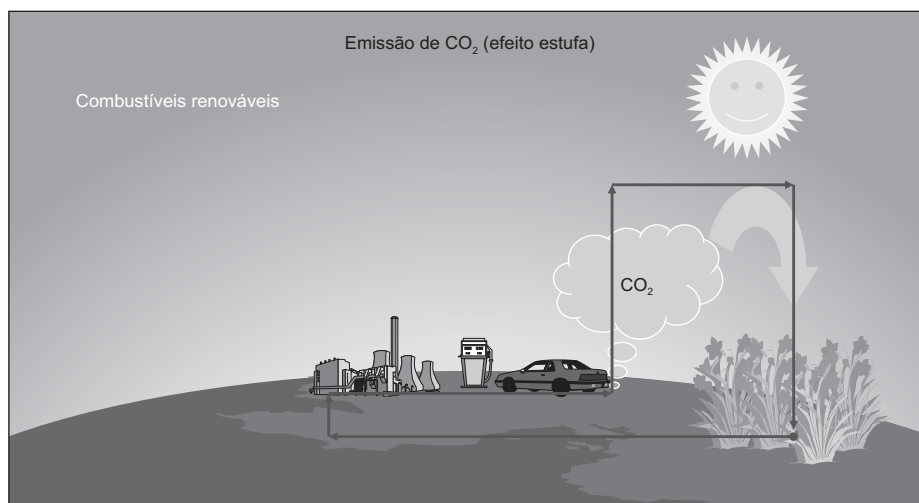
Em seguida, realizaram-se os testes de emissões utilizando-se diesel, biodiesel e etanol hidratado em conjunto com biodiesel.



**Figura 1** Efeito estufa. Fonte: Mossmann (2003).



**Figura 2** Efeito estufa. Fonte: Joseph Jr. (2003).



**Figura 3** Efeito estufa. *Fonte:* Joseph Jr. (2003).

O passo seguinte foi a medição da opacidade, utilizando-se diesel, biodiesel e injeção complementar de etanol para a recuperação de potência.

Nos testes, o motor esteve conectado a um aparelho de acompanhamento denominado “Star Diagnose” com a função de monitorar o comportamento do motor. As variáveis monitoradas foram: pressão atmosférica, pressão do turbo, temperaturas de arrefecimento, temperatura do combustível, temperatura do óleo lubrificante, temperatura do ar, pressão e nível do óleo lubrificante, rotação de trabalho e posição do pedal de aceleração. Além disso, esse equipamento identifica defeitos e corrige parâmetros necessários ao correto funcionamento do sistema eletrônico de controle do motor.

Para o fornecimento do combustível suplementar do motor, quando movido a biodiesel, instalou-se o conjunto para injeção de etanol hidratado. Foi utilizado um conjunto de bomba de combustível marca Delphi, referência 06443402, com pressão de trabalho de até 6 bar; uma válvula reguladora de pressão Bosch, referência 0 280 160 560, que pressuriza a linha de combustível em 3 bar; um filtro de combustível marca Schuck, modelo SK 109; um tubo distribuidor de combustível utilizado no Fiat Palio, referência FIAT 46434655; e válvulas injetoras Magnetti Marelli, referência IWP 058, de quatro orifícios. É importante ressaltar que as quatro válvulas estavam colocadas no tubo distribuidor de combustível, porém, apenas um estava operante, porque a vazão foi suficiente para abastecer o volume de álcool necessário ao funcionamento do motor. A injeção de etanol hidratado foi efetuada pelo Controle Automático de Injeção Eletrônica. O esquema do ensaio está ilustrado na Figura 4.

O ensaio de medições foi realizado de acordo com o ciclo de 13 pontos da NBR-14489, em bancada dinamo-métrica, que prescreve o método de análise e fixa o procedimento para a determinação de gases de escapamento,

como hidrocarbonetos (HC), monóxido de carbono (CO) e óxidos de nitrogênio (NOx) emitidos por motores do ciclo diesel, utilizados em veículo rodoviário automotor. Pela norma, as emissões dos gases são medidas simultaneamente.

Inicialmente, pela norma, deve-se medir o torque máximo do motor e ter conhecimento da rotação máxima. Assim, a primeira leitura de emissões deve ser efetuada com o motor em marcha lenta, sem carga, por 6 minutos, e tempo de amostragem de 83 segundos, com fator de ponderação 0,25/3.

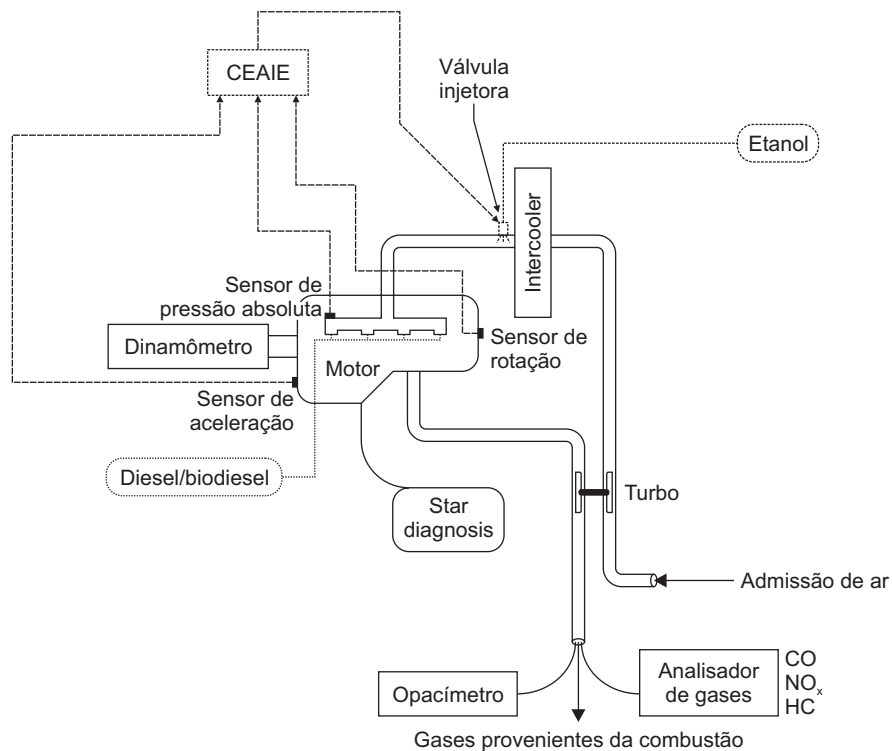
A segunda leitura deve ser realizada com o motor em rotação intermediária (próxima ao limite de 60% da rotação nominal) e 10% do torque máximo medido nessa rotação, por 6 minutos, e tempo de amostragem de 80 segundos, com fator de ponderação 0,08.

A terceira leitura deve ser realizada com o motor em rotação intermediária (próxima ao limite de 60% da rotação nominal) e 25% do torque máximo medido nessa rotação, por 6 minutos, e tempo de amostragem de 80 segundos, com fator de ponderação 0,08.

A quarta leitura deve ser realizada com o motor em rotação intermediária (próxima ao limite de 60% da rotação nominal) e 50% do torque máximo medido nessa rotação, por 6 minutos, e tempo de amostragem de 80 segundos, com fator de ponderação 0,08.

A quinta leitura deve ser realizada com o motor em rotação intermediária (próxima ao limite de 60% da rotação nominal) e 75% do torque máximo medido nessa rotação, por 6 minutos, e tempo de amostragem de 80 segundos, com fator de ponderação 0,08.

A sexta leitura deve ser realizada com o motor em rotação intermediária (próxima ao limite de 60% da rotação nominal) e 100% do torque máximo medido nessa rotação, por 6 minutos, e tempo de amostragem de 25 segundos, com fator de ponderação 0,25.



**Figura 4** Sistema montado para a realização do experimento.

A sétima leitura deve ser efetuada com o motor em marcha lenta, sem carga, por 6 minutos, e tempo de amostragem de 83 segundos, com fator de ponderação 0,25/3.

A oitava leitura deve ser realizada com o motor na rotação nominal do fabricante e 100% do torque máximo medido nessa rotação, por 6 minutos, e tempo de amostragem de 100 segundos, com fator de ponderação 0,1.

A nona leitura deve ser realizada com o motor na rotação nominal do fabricante e 75% do torque máximo medido nessa rotação, por 6 minutos, e tempo de amostragem de 20 segundos, com fator de ponderação 0,02.

A décima leitura deve ser realizada com o motor na rotação nominal do fabricante e 50% do torque máximo medido nessa rotação, por 6 minutos, e tempo de amostragem de 20 segundos, com fator de ponderação 0,02.

A décima primeira leitura deve ser realizada com o motor na rotação nominal do fabricante e 25% do torque máximo medido nessa rotação, por 6 minutos, e tempo de amostragem de 20 segundos, com fator de ponderação 0,02.

A décima segunda leitura deve ser realizada com o motor na rotação nominal do fabricante e 10% do torque máximo medido nessa rotação, por 6 minutos, e tempo de amostragem de 20 segundos, com fator de ponderação 0,02.

A décima terceira e última leitura de emissões deve ser efetuada com o motor em marcha lenta, sem carga, por 6 minutos, e tempo de amostragem de 83 segundos, com fator de ponderação 0,25/3. Na Tabela 1 apresenta-se o ensaio de emissão.

As medições de emissão do motor foram efetuadas em sequência: diesel, biodiesel de soja e injeção de etanol hidratado em conjunto com biodiesel, até recuperar a potência do diesel.

Na medição de emissão na injeção de etanol hidratado em conjunto com biodiesel de soja, manteve-se, em cada ponto medido, a mesma posição do acelerador obtida no teste com biodiesel e chegou-se à potência equivalente do motor movido a diesel, adicionando-se etanol.

No motor ensaiado, a rotação de marcha lenta foi de 800 rpm, a intermediária, 1.500 rpm; e a nominal, 2.500 rpm. O escapamento do motor estava voltado para fora da sala do dinamômetro, fazendo com que as medições fossem realizadas na parte externa do prédio.

No procedimento de medição da opacidade, utilizou-se o método de aceleração livre, que é o regime em que o motor é submetido com o débito máximo de combustível, segundo o Manual de Operação – TM 133 – Tecnomotor. Esse método consiste em medir a opacidade, acelerando rapidamente até o fim, até que a rotação máxima se estabilize (corte da bomba) e o equipamento mostre a mensagem para desacelerar.

Foram três séries de dez medições para cada combustível (diesel e álcool em paralelo com diesel). O software IGOR, da Tecnomotor, efetua o cálculo da opacidade, não considerando as três medidas iniciais, analisando as últimas sete, desde que em quatro medições consecutivas a diferença entre o valor máximo e o mínimo não ultrapasse 0,25 K, e não estejam em ordem decrescente.

**Tabela 1** Características do ciclo de ensaio segundo a norma NBR 14489.

Ponto do ciclo (i)	Rotação (rpm)	Porcentagem de torque (%)	Tempo em regime (minutos)	Tempo acumulado (minutos)	Fator de ponderação (WF)	Tempo de amostragem (s)
1	Marcha lenta	0	6,0	6,0	0,25/3	83
2	Intermediária	10	6,0	12,0	0,08	80
3	Intermediária	25	6,0	18,0	0,08	80
4	Intermediária	50	6,0	24,0	0,08	80
5	Intermediária	75	6,0	30,0	0,08	80
6	Intermediária	100	6,0	36,0	0,25	25
7	Marcha lenta	0	6,0	42,0	0,25/3	83
8	Nominal	100	6,0	48,0	0,1	100
9	Nominal	75	6,0	54,0	0,02	20
10	Nominal	50	6,0	60,0	0,02	20
11	Nominal	25	6,0	66,0	0,02	20
12	Nominal	10	6,0	72,0	0,02	20
13	Marcha lenta	0	6,0	78,0	0,25/3	83

Fonte: NBR-14489 (ABNT, 2000).

A sequência de operações obedeceu à cronologia: levantamento das curvas de torque, de potência e de consumo específico à plena carga, utilizando diesel e biodiesel de soja. Depois, injetou-se etanol hidratado em paralelo com biodiesel até o motor atingir a potência de quando movido a diesel. Os volumes de etanol foram determinados em função da posição do acelerador, da pressão do turbo e da rotação do motor, ajustando-se o tempo da válvula injetora aberta/fechada para conseguir essa vazão. Posteriormente, automatizou-se a injeção de etanol, de acordo com os parâmetros levantados.

## Considerações Finais

### *Emissões de CO<sub>2</sub>, HC e NOx*

Efetuar-se as medições de emissões utilizando-se diesel, biodiesel etílico de soja e etanol hidratado em conjunto com biodiesel etílico de soja. Foram realizadas três medições para cada combustível.

### *Medições de emissões utilizando diesel como combustível*

Na Tabela 2 apresentam-se os valores médios de emissão obtidos com diesel.

Como os valores medidos de CO ficaram próximos da resolução do aparelho (0,01%) em várias medições, descartaram-se as medidas realizadas.

### *Medições de emissões utilizando biodiesel etílico de soja como combustível*

Na Tabela 3, apresentam-se os valores médios de emissão obtidos com biodiesel etílico de soja.

Como os valores medidos de CO ficaram próximos da resolução do aparelho (0,01%) em várias medições, descartaram-se as medidas realizadas.

### *Medições de emissões utilizando biodiesel etílico de soja com injeção complementar de etanol hidratado*

Efetuiu-se a medição de emissão na injeção de etanol hidratado em conjunto com o biodiesel etílico de soja. Os resultados encontrados estão mostrados na Tabela 4.

### *Comparação das medições de emissões realizadas*

Na Tabela 5 apresenta-se a comparação das emissões de HC e NOx entre diesel e biodiesel. Houve redução de emissão de HC e aumento na emissão de NOx, quando se utilizou o biodiesel etílico de soja como combustível, em comparação com o diesel. Leal (2007), substituindo totalmente diesel por biodiesel de soja, em motor gerenciado eletronicamente, marca Mercedes-Benz, modelo OM-904 LA, ciclo diesel de injeção direta, obteve redução de cerca de 32% nas emissões de CO, 18% nas emissões de HC e aumento de cerca de 23% nas emissões de NOx. Os resultados foram diferentes, pois as condições de medições também foram diferentes, inclusive as normas de medições adotadas. Os combustíveis usados também foram diferentes (biodiesel metílico de soja x biodiesel etílico de soja).

Na Tabela 6, apresentam-se as emissões medidas utilizando-se diesel e depois etanol hidratado em conjunto com biodiesel etílico de soja como combustível.

Houve aumento na emissão de HC e diminuição na emissão de NOx quando se utilizou o etanol hidratado

em conjunto com biodiesel de soja como combustível, em comparação ao diesel.

Chen *et al.* (1981), Broukhiyan *et al.* (1981) e Odaka (1992) obtiveram redução na emissão de NOx quando injetaram álcool juntamente com diesel em motor de ignição por compressão. Heisey *et al.* (1981) e Odaka (1992) obtiveram redução na emissão de NOx e aumento na emissão de CO na injeção de etanol em motor do ciclo diesel. Além

disso, Odaka (1992) também observou aumento na emissão de HC. Os autores, com exceção desse último, que não explica os motivos, atribuem a diminuição de NOx à queda na temperatura de combustão.

Heisey *et al.* (1981) atribuem o aumento na emissão de CO ao alto calor latente de vaporização do álcool e à possível diminuição da temperatura na câmara de combustão.

**Tabela 2** Medição de emissões de poluentes no motor quando movido a diesel.

Ponto	CO	HC (ppm)	NOx (ppm)
1	0,01%	19	2,05
2	0,01%	16	5,36
3	0,01%	15	10,19
4	0,02%	19	14,76
5	0,03%	43	9,71
6	0,05%	21	7,46
7	0,01%	27	2,29
8	0,00%	17	7,57
9	0,00%	17	6,91
10	0,00%	11	6,07
11	0,01%	9	4,71
12	0,01%	10	4,33
13	0,01%	10	2,07
Média	0,02%	20	6,80

**Tabela 3** Medição de emissões de poluentes no motor quando movido a biodiesel etílico de soja.

Ponto	CO	HC (ppm)	NOx (ppm)
1	0,00%	1	1,29
2	0,00%	0	5,27
3	0,00%	4	11,06
4	0,01%	6	17,66
5	0,02%	1	11,97
6	0,01%	1	7,32
7	0,00%	5	1,61
8	0,00%	1	7,94
9	0,00%	4	7,48
10	0,00%	7	6,40
11	0,00%	3	5,53
12	0,01%	7	4,41
13	0,00%	2	0,94
Média	CO	2	7,10

**Tabela 4** Medição de emissões de poluentes no motor quando movido a biodiesel de soja, com injeção suplementar de etanol hidratado.

Ponto	CO	HC (ppm)	NOx (ppm)
1	0,00%	16	0,88
2	0,05%	63	4,49
3	0,03%	29	9,78
4	0,03%	27	16,10
5	0,03%	14	10,24
6	0,03%	7	6,97
7	0,01%	24	1,43
8	0,05%	34	7,18
9	0,06%	41	6,24
10	0,06%	53	5,31
11	0,00%	5	5,64
12	0,01%	4	4,66
13	0,00%	3	1,28
Média	0,03%	21	6,45

**Tabela 5** Comparação de emissões utilizando-se como combustível diesel e depois biodiesel etílico de soja.

Combustível	HC (ppm)	NOx (ppm)
Diesel	20	6,80
Biodiesel	2	7,10
Diferença (%)	90,00%	-4,41%

**Tabela 6** Comparação de emissões utilizando-se como combustível diesel e depois biodiesel etílico de soja com injeção de etanol hidratado.

Combustível	HC (ppm)	NOx (ppm)
Diesel	20	6,80
Biodiesel e etanol	21	6,45
Diferença (%)	-5,00%	5,15%

### Medição de opacidade

Os resultados de opacidade da fumaça estão apresentados na Tabela 7, na qual se encontram as leituras médias de cada tratamento e as médias das quatro últimas medidas, conforme metodologia proposta.

Para verificar a influência da injeção de álcool na opacidade, realizaram-se os testes com diesel, injetando-se a quantidade que seria introduzida no biodiesel.

De acordo com a Tabela 7, quando se injetou álcool no diesel, a opacidade da fumaça reduziu-se em 17,4% em virtude da maior eficiência da combustão, confirmando a afirmação de Lestz (1984). Para os tratamentos biodiesel e biodiesel com injeção de álcool, a opacidade teve redução a ponto de as medidas serem menores do que o limite de sensibilidade do equipamento. Esses últimos resultados estão de acordo com os encontrados por Lopes (2006).



**Tabela 7** Opacidade da fumaça: diesel e diesel com injeção de álcool.

Leitura	Rotação (rpm)		Opacidade		
	Lenta	Corte	Diesel	Diesel Injeção de etanol	Limite
1	800	2.500	0,40	0,36	2,00
2	800	2.500	0,39	0,33	2,00
3	800	2.500	0,41	0,38	2,00
4	800	2.500	0,45	0,35	2,00
5	800	2.500	0,43	0,37	2,00
6	800	2.500	0,44	0,38	2,00
7	800	2.500	0,50	0,41	2,00
8					
9					
10					
Média geral			0,46 (m <sup>-1</sup> )	0,38 (m <sup>-1</sup> )	2,00 (m <sup>-1</sup> )

### Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 14489*: Motor diesel – análise e determinação dos gases e do material particulado emitidos por motores do ciclo diesel – Ciclo de 13 pontos. Rio de Janeiro, 2000.

CHEN, J.; GUSSERT, D.; GAO, X.; GUPTA, C.; FOSTER, D. *Ethanol fumigation of a turbocharged diesel engine*. Paper SAE 810680, Peoria, Illinois, abril 1981. 14 p.

HEISEY, J. B.; LESTZ, S. S. *Aqueous alcohol fumigation of a single-cylinder di diesel engine*. Paper SAE 811208, Pennsylvania, 1981. 14 p.

JOSEPH Jr. H. *Vehicular application of ethanol fuel – Volkswagen do Brasil*. In: ISSCT Co-Products Workshop Ethanol Production and Use, Piracicaba, 2003.

LEAL, G. *Tecnologia de motores Mercedes-Benz para uso de biodiesel*. Disponível em: <[http://www.transportes.rj.gov.br/downloads/Biodiesel%20B5\\_Rio%20de%20Janeiro\\_Gilberto%20Leal.pdf](http://www.transportes.rj.gov.br/downloads/Biodiesel%20B5_Rio%20de%20Janeiro_Gilberto%20Leal.pdf)>. Acesso em: 9 ago. 2007.

LESTZ, S. S. *Utilization of alternative fuels in diesel engines*. Pennsylvania: The Pennsylvania State University, 1984. 69 p.

LOPES, A. *Biodiesel em trator agrícola: desempenho e opacidade*. 2006. 157 f. Tese (Livre-docência) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal.

MOSSMANN, A. *Efeito estufa*. Disponível em : <<http://www.alexmossmann.com>>. Acesso em: 17 ago. 2003.

ODAKA, M.; KOIKE, N.; TSUKAMOTO, Y.; NARUSAWA, K. *Optimizing control of nox and smoke emissions from di engine with egr and methanol fumigation*. Paper SAE 920486, Detroit, Michigan, fev. 1992. p. 121-129.

PEREIRA, A. S. *O Brasil e o Protocolo de Quioto*. Disponível em: <<http://www.comciencia.br/reportagens/clima/clima12.htm>>. Acesso em: 17 fev. 2008.