

## AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE NO<sub>x</sub>, CO E CO<sub>2</sub> NA QUEIMA DE MISTURAS B7/ETANOL EM UM MOTOR CICLO DIESEL

Lucas Santos Fonseca<sup>1</sup>

Lílian Lefol Nani Guarieiro<sup>2</sup>

### RESUMO

A preocupação com a demanda crescente de queima de combustíveis de origem fóssil e redução de emissões de poluentes move estudos em todo o mundo com o intuito de encontrar alternativas renováveis para substituição desse tipo de combustível. O presente estudo foi realizado em um motor diesel de quatro cilindros, turbo alimentado e com injeção direta, com objetivo de determinar o comportamento das emissões de NO<sub>x</sub>, CO e CO<sub>2</sub>. Foram avaliadas as emissões da mistura de biodiesel B7 através da variação da rotação do motor e em seguida as misturas B7, B7E3 e B7E10 foram testadas em rotação de 1500 rpm e carga fixa. Para os resultados com variação da rotação, os valores de emissões apresentaram crescimento acentuado em rotações elevadas. As misturas contendo etanol apontaram para um crescimento da concentração de NO<sub>x</sub>, CO e CO<sub>2</sub> com o aumento da quantidade de etanol.

**Palavras-chave:** Motor diesel. Emissões. Biodiesel. Etanol.

### 1 INTRODUÇÃO

A crescente necessidade de consumo de energia que movimenta as indústrias e o comércio do mundo leva a uma tendência de escassez dos combustíveis de origem fóssil e danos ambientais causados pela queima do mesmo. O diesel como combustível largamente usado para abastecer ônibus, caminhões, máquinas e

---

<sup>1</sup> Engenheiro Mecânica (UNIFACS) E-mail: [ls\\_fonseca@hotmail.com](mailto:ls_fonseca@hotmail.com)

<sup>2</sup> Pos doutorado INCT de Energia e Ambiente (UFBA) – SENAI CIMATEC E-mail: [lilian.guarieiro@fieb.org.br](mailto:lilian.guarieiro@fieb.org.br)

equipamentos da indústria, vêm sendo alvo de constantes pesquisas com o intuito de encontrar um substituto de origem renovável e que seja menos agressivo ao ambiente e a saúde da população. Graças às baixas emissões de poluentes e suas propriedades biodegradáveis, não tóxicas e características próximas ao combustível fóssil, o biodiesel vem sendo uma alternativa promissora a substituição do diesel mineral (CANDEIA et al., 2009, p. 738).

O etanol, por sua vez, também é uma fonte renovável a base de biomassa, o qual, sendo utilizado como suplemento ao diesel, promove vantagens pelo fato de ser livre de enxofre, apresentar alta quantidade de oxigênio em sua composição e potencial de redução de material particulado (DE OLIVEIRA et al., 2015, p.67). Estudos relatam que devido a sua miscibilidade e diferente estrutura química, a mistura de etanol e diesel pode apresentar separação de fase, em baixas temperaturas. Essa separação pode ser evitada com o uso do biodiesel na composição do combustível. A molécula do biodiesel é polar assim como a de etanol, desta forma, os dois possuem uma afinidade para se misturar o que acaba gerando uma estabilidade na composição (Diesel – Biodiesel – Etanol), prevenindo a separação do etanol com o óleo diesel (TSE; LEUNG; CHEUNG, 2015, p.343).

Estudos anteriores mostram também que as emissões de poluentes são muito influenciadas pela concentração da mistura de combustível usada e não só pelas condições de operação do motor. Misturas de diesel e biodiesel contendo álcool aumentam as emissões de monóxido de carbono (CO) (YILMAZ, et al, 2014, p.790) e reduzem a quantidade de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)(FERREIRA et al., 2013, p.649), em comparação com o diesel puro. Labeckas, Slavinskas, e Mazeika (2014) relatam ainda que experimentos em motores diesel de quatro cilindros, turbo alimentado, abastecidos com 10 e 15% de etanol na mistura Diesel – Etanol mostraram que com a adição desse combustível (etanol) ocorre uma redução de 12,5% da potência do motor e 20%, das emissões de CO, dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), e da densidade de fuligem devido à alta quantidade de massa de oxigênio e a menor relação Carbono/Hidrogênio na mistura Diesel – Etanol. Entretanto, devido ao baixo número de cetano e ao atraso da ignição, seguidos de maior pressão e temperatura no cilindro, ocorreu um leve aumento nas emissões de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>).

Por outro lado, foi apontado que a mistura de 15% de etanol, 80% de diesel e 5% de biodiesel pode ser usado eficientemente na alimentação de motores diesel.

Desta forma, o objetivo do presente trabalho foi avaliar os impactos do uso de misturas B7/etanol emitidos na exaustão de um motor diesel nas emissões de NO<sub>x</sub>, CO e CO<sub>2</sub>.

## 2 METODOLOGIA

Neste estudo foram avaliadas 3 diferentes misturas de Diesel, Biodiesel e Etanol. Foram utilizadas as misturas B7 (Diesel S10 comercial, o qual possui 7% de biodiesel), B7E3 (3% de etanol adicionado no B7) e B7E10 (10% de etanol adicionado no B7). As características dos combustíveis encontram-se descritas na Tabela 1.

Tabela 1. Características dos combustíveis utilizados.

Combustível	Massa específica	Viscosidade
	(20 °C kg/m <sup>3</sup> )	(40 °C mm <sup>2</sup> /s)
Biodiesel (B100)	879,2	4,30
Etanol Anidro (99,9%)	791,7	1,27
B7 (S10)	836,7	2,70
B7E3	835,7	2,47
B7E10	837,9	2,70

A avaliação do impacto do uso de misturas de B7/etanol nas emissões de poluentes foram conduzidos utilizando um motor diesel MWM, modelo MS 3.9T, para gerador, com 4 cilindros, turbo alimentado e sistema de injeção mecânica (Tabela 2).

Tabela 2. Características do motor diesel.

<b>Característica</b>	<b>Motor</b>
Potência (Stand-by - 1500RPM - cv/kW/kVA)	80/59/66
Cilindrada Total (L)	3,87
Número de Cilindros	4, em linha
Sistema de Combustão	4 tempos, Injeção Direta
Ciclo	Turbo Alimentado
Taxa de Compressão	15:1
Arrefecimento	Líquido
Temperatura de Operação (°C)	77/95

O motor foi acoplado através de um eixo tipo cardã a um dinamômetro de bancada AVL DP 240 (Tabela 3), o qual manteve o controle da rotação e torque do motor. O Sistema AVL Puma Open foi usado para gestão automática do dinamômetro, o qual permitiu, por meio de seus sensores, o monitoramento de variáveis como temperatura ambiente, umidade do ar, temperatura e pressão dos fluidos do processo, assim como o consumo de combustível.

Tabela 3. Características do dinamômetro conforme fabricante

<b>Característica</b>	<b>Dinamômetro</b>
Categoria do produto	Dinamômetro passivo
Medição de torque	Célula de carga
Potência (kW)	20 – 500
Torque (Nm)	25 – 2.000
Velocidade (rpm)	8.000 – 17.000

Os testes foram feitos inicialmente com o combustível B7 (S10 comercial com 7% de Biodiesel), nas rotações de 1100, 1500 e 1750 rpm e torque de 185Nm para avaliar o impacto do aumento da rotação nas emissões dos gases NO<sub>x</sub>, CO E CO<sub>2</sub>. Em seguida, para avaliar o impacto do uso dos diferentes tipos de combustíveis nas emissões dos gases, foi adotado o regime permanente de velocidade de 1500 rpm e torque de 185 Nm. As condições para estes ensaios foram escolhidas com base nas condições adotadas por grande parte das pesquisas estudadas nos referenciais teóricos. Os filtros de combustível e o óleo lubrificante do motor foram trocados a cada ensaio. A temperatura do ar durante o ensaio foi de  $29 \pm 2$  ° C, enquanto a umidade foi mantida em 46%.

Um túnel de diluição parcial a volume constante foi conectado ao escapamento do motor, captando parte dos gases de exaustão e diluindo com ar limpo em uma proporção de 1/30 (exaustão/ar de diluição) (Figura 1).

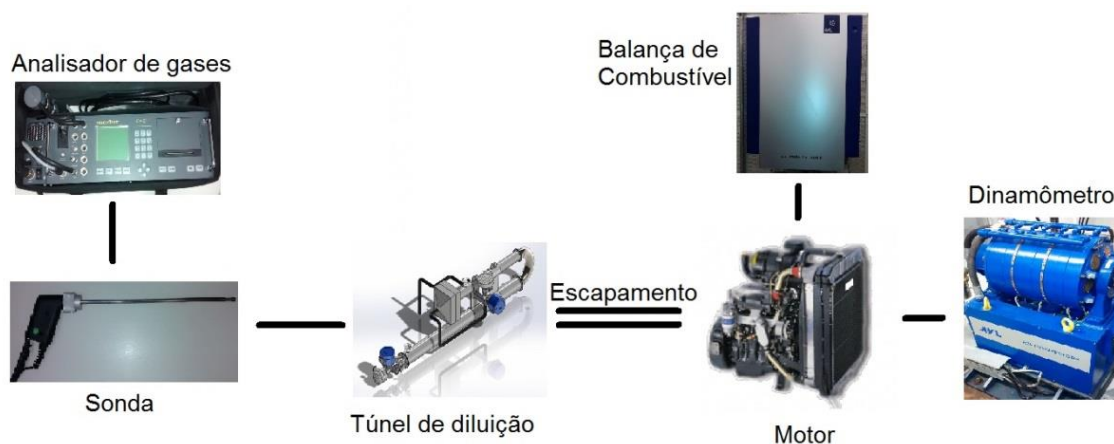


Figura 1. Diagrama da bancada de testes

Para medição da concentração dos gases poluentes (CO<sub>2</sub>, CO, NO e NO<sub>2</sub>) foi utilizado um analisador de gases multifuncional modelo GA-21plus, da Madur Electronics, o qual possui sensores e intervalo de medição conforme exibido na Tabela 4. A sonda do analisador de gases foi acoplada ao final do túnel de diluição, permitindo assim mensurar a concentração de poluentes presentes na mistura de ar (ar da exaustão + ar de diluição).

Tabela 4: Sensores e seus intervalos de medição.

Gás	Sensor	Range
CO	5F	0-20000 ppm
CO <sub>2</sub>	Madir C01	0-100%
NO	5NF	0-5000 ppm
NO <sub>2</sub>	5ND	0-1000 ppm

Fonte: Manual Madur Electronics

Antes do início da coleta, o motor trabalhou por cerca de 30 minutos com o combustível a ser ensaiado para que o mesmo atingisse a temperatura de operação (80°C) e estabilizasse nas condições determinadas de rotação e torque. O ar de diluição do túnel de diluição foi medido pelo analisador de gases, sem interferência da exaustão do motor, para que fosse verificado que o mesmo se encontra livre de poluentes.

Para o experimento proposto, foram feitas coletas em triplicata para cada tipo de mistura de combustível, sendo que análise representou a média de 3 minutos de coleta. O túnel de diluição onde a coleta foi realizada foi ajustado para diluir aproximadamente uma parte da exaustão do motor para 30 partes de ar atmosférico (diluição 1/30). Esse ajuste foi feito através do controle de válvulas e sensores de vazão presentes no túnel de diluição.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Avaliação do perfil de emissão de NO<sub>x</sub>, CO e CO<sub>2</sub> com a variação da rotação do motor

Os resultados apresentados na Figura 2 apresentam o aumento significativo das emissões dos poluentes estudados com aumento da rotação (de 1100 a 1750 rpm), o que pode ser explicado, a princípio, como reflexo da maior quantidade de mistura combustível e ar injetado na câmara de combustão, nessa rotação.

A formação de  $\text{NO}_x$  é muito influenciada pela temperatura interna do cilindro, concentração de oxigênio e tempo que leva para a reação acontecer (AJAV; SINGH; TK, 1998, p.493). O aumento da rotação do motor gera uma elevação da temperatura e pressão enquanto a turbina injeta uma maior quantidade de ar na mistura. Estes fatores podem ter influenciado na elevação da exaustão de  $\text{NO}_x$  com o aumento da rotação do motor (Figura 2a). Buyukkata (2010), por sua vez, aponta que com o aumento da velocidade do motor, o tempo de reação em cada ciclo é reduzido, levando a uma diminuição no tempo de permanência da mistura ar-combustível sob altas temperaturas e conseqüente menor formação de  $\text{NO}_x$ .

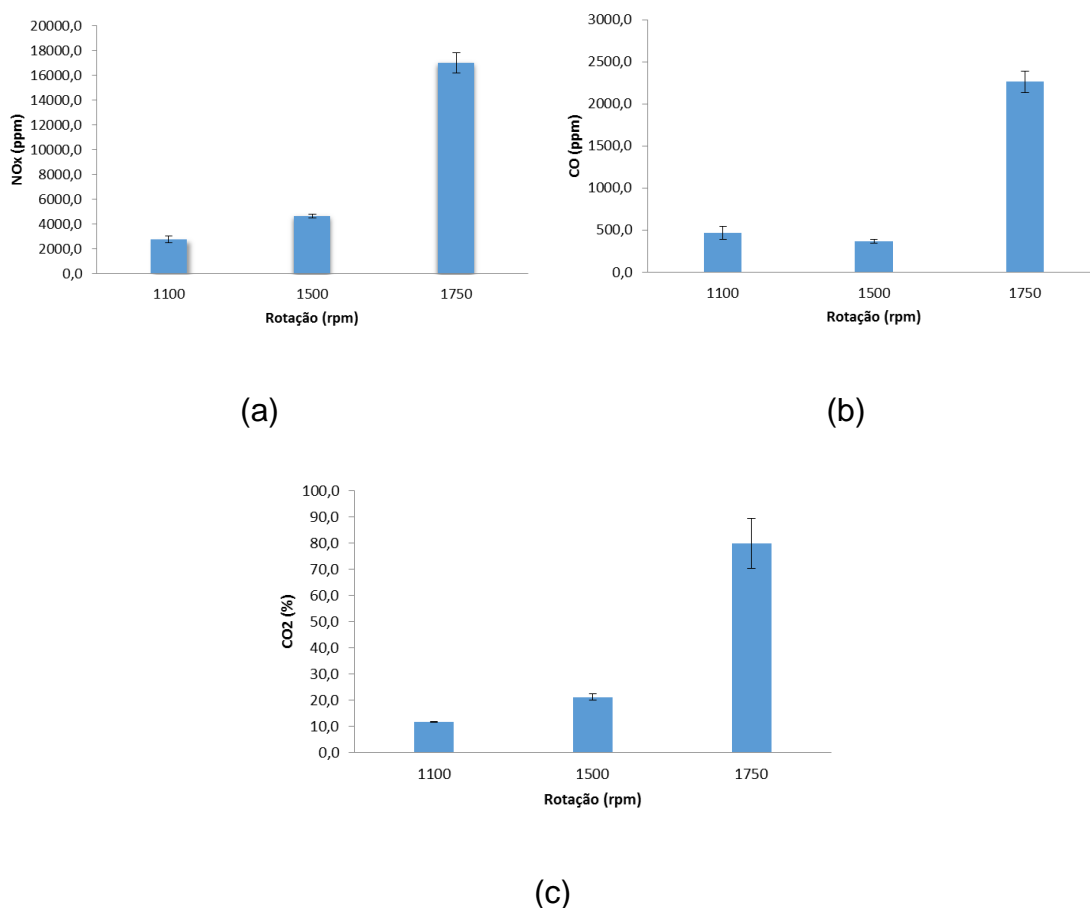


Figura 2. Emissões dos gases poluentes com aumento da rotação utilizando B7: (a)  $\text{NO}_x$ ; (b) CO; e (c)  $\text{CO}_2$ .

As emissões de CO também apresentaram aumento acentuado na rotação máxima ensaiada (Figura 2b). Este crescimento também foi encontrado por Man et al. (2016), os quais justificam esse comportamento no aumento da taxa de



combustível/ar, associado a redução da eficiência volumétrica e maior consumo de combustível em consequência do aumento da rotação do motor.

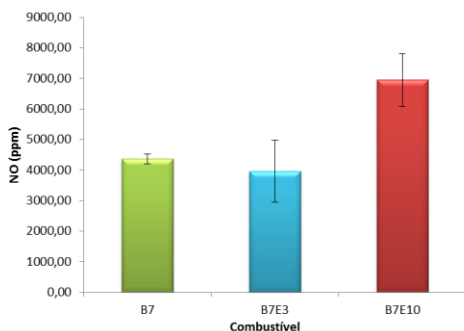
Para o CO<sub>2</sub>, sabe-se que a combustão completa dentro do cilindro determina sua formação. Apesar dessa reação ser impossível em um motor, uma combustão quase completa pode ser atingida, dependendo das condições de funcionamento da máquina e da natureza do combustível (DATTA; MANDAL, 2016, p.670). O crescimento das emissões de CO<sub>2</sub> nos resultados obtidos em função do aumento da rotação aponta para uma combustão mais completa em rotações mais elevadas, além de existir, nessas rotações, uma maior queima de combustível, o que levaria a formação de maiores concentrações de dióxido de carbono.

### 3.2 Avaliação das emissões na queima das misturas B7/etanol

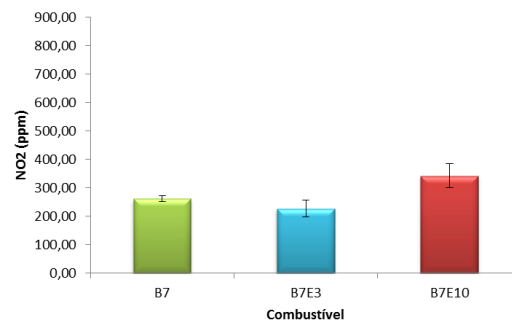
Os resultados obtidos para as emissões dos gases poluentes utilizando as misturas B7/etanol estão apresentados na Figura 3. O NO<sub>x</sub> se apresenta como um dos poluentes mais críticos nas emissões de motores alimentados por diesel. Composto por óxido nítrico (NO) e dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>) (LI D-G ZHEN, et al, 2005, p.967, 2005), a concentração de NO<sub>x</sub> apresentou uma tendência de crescimento com o aumento da porcentagem de etanol na mistura (Figura 3c). As emissões de NO (Figura 3a) foram superiores em relação às emissões de NO<sub>2</sub> (Figura 3b) para todas as misturas combustíveis estudadas.

Resultados de pesquisas anteriores apontam valores inconclusivos em relação às emissões de NO<sub>x</sub> em motores alimentados com misturas de diesel/etanol. Shi et al. (2005) e Lapuerta, Armas e Herreros (2008), observaram um aumento nas emissões de NO<sub>x</sub>, embora Guarieiro *et al.* (2009) e Agarwal (2007) tenham observado um decréscimo desse poluente em suas pesquisas quando da adição de etanol nas misturas diesel/biodiesel. Existem também pesquisadores que encontraram valores semelhantes de NO<sub>x</sub> para misturas ternárias, em relação ao diesel puro (BHALE; DESHPANDE; THOMBRE, 2009, p.794). É importante destacar que tais divergências de resultados podem estar associadas às concentrações de etanol utilizadas, bem como as características e condições do motor diesel avaliado.

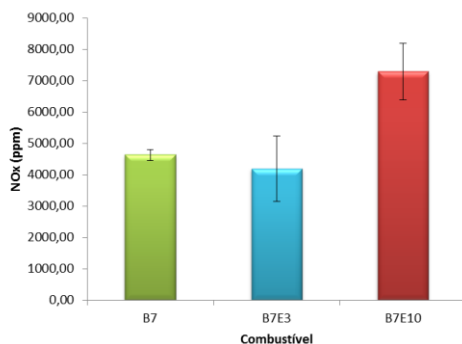




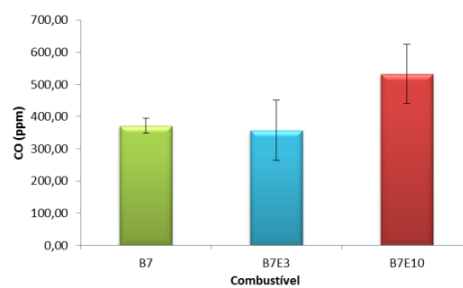
(a)



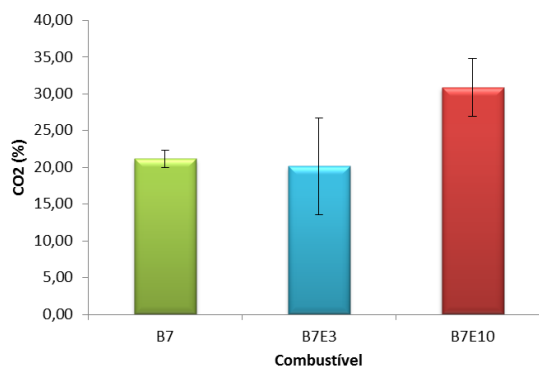
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 3: a) Emissões de NO<sub>x</sub> para cada combustível; b) Emissões de CO para cada combustível; c) Emissões de CO<sub>2</sub> para cada combustível.

A adição do etanol no diesel leva a redução do numero de cetano e isso aumenta o atraso na ignição do combustível, promovendo uma combustão de menor qualidade e conseqüente aumento das emissões de NO<sub>x</sub> (XING-CAI et al., 2004, p.2013). Por outro lado, o etanol possui um alto calor latente de vaporização e baixo

valor calorífico que propicia a redução das emissões de óxido de nitrogênio [GUARIEIRO et al., 2014, p.94).

As emissões de CO obtidas neste estudo estão apresentadas na Figura 3d. Resultados semelhantes de elevação das emissões de monóxido de carbono em consequência da adição de etanol na mistura também foram encontrados por outros pesquisadores (GUARIEIRO et al., 2009, p.2754). Devido ao baixo poder calorífico e alto calor latente do etanol, a mistura apresenta baixa temperatura de combustão e velocidade de queima, o que torna a combustão mais incompleta e com isso, maiores índices de monóxido de carbono são emitidos (WANG et al., 1997, p.3132).

O crescimento dos níveis de CO<sub>2</sub> através do aumento da quantidade de etanol na mistura foi constatado nos resultados apresentados na figura 3e. Alguns autores citados nas pesquisas anteriores aqui descritas também encontraram um comportamento de crescimento das emissões de dióxido de carbono à medida que a porcentagem de etanol/bioetanol era acrescido a misturas de diesel-biodiesel, em comparação ao diesel puro (BARABÁS; TODORUT; BALDEAN, 2010, p.3827). Outros pesquisadores, entretanto, encontraram valores decrescentes de CO<sub>2</sub> para misturas ternárias [GUARIEIRO et al., 2009, p.2754]. Segundo Kowalewicz (2005), a queima de combustíveis oxigenados apresenta uma leve redução nas emissões de CO<sub>2</sub> já que o biodiesel possui menos carbono em suas moléculas e o produto da combustão do etanol apresenta menos CO<sub>2</sub> e mais H<sub>2</sub>O. Entretanto, para motores em alta carga e rotação, quando a quantidade de combustível queimado é maior sem excesso de ar, esse efeito não é notado, resultando em altas emissões de CO<sub>2</sub> (CHEENKACHOM; FUNGTAMMASAN, 2009, p.57).

#### 4. CONCLUSÃO

O estudo do perfil das emissões com uso de B7 através da variação de rotação do motor mostrou uma tendência de elevação das emissões desses poluentes em altas rotações. Este fato pode ser explicado, dentre outros fatores, pela maior quantidade de combustível queimado em maiores rotações.

As emissões de NO<sub>x</sub> apontaram para um crescimento com o aumento da quantidade de etanol na mistura, sendo os valores de NO foram significativamente

maiores que o NO<sub>2</sub>. Os índices de CO e CO<sub>2</sub> também apresentaram crescimento com o incremento do etanol na mistura. O baixo poder calorífico e alto calor latente do etanol propicia a emissão de mais CO, enquanto para o CO<sub>2</sub>, sua concentração pode variar conforme quantidade de combustível e ar queimado.

De forma geral, através do estudo realizado, é possível observar que na rotação máxima do motor, as emissões de poluentes crescem significativamente. Além disso, nota-se também que o acréscimo de 3% de etanol na mistura não gera aumentos consideráveis nas emissões, enquanto a adição de 10% gerou uma elevação substancial nas emissões.

## EVALUATION OF NO<sub>x</sub>, CO AND CO<sub>2</sub> EMISSION FROM BURNING OF B7/ETHANOL FUEL BLENDS IN A DIESEL ENGINE

Lucas Santos Fonseca  
Lílian Lefol Nani Guarieiro

### ABSTRACT

The concern with the growing demand of burning fossil fuels and reducing emissions of pollutants has been moving studies around the world with the objective to find renewable alternatives to replace this type of fuel. This study was conducted in a diesel engine in order to determine the behavior of NO<sub>x</sub>, CO and CO<sub>2</sub>. Emissions of B7 biodiesel blend were evaluated by the engine speed variation and then the B7, B7E3 and B7E10 fuel blends were tested at a speed of 1500 rpm and fixed charge. The results with variation of the rotation suggest that the emission values showed strong growth at high speed. Blends containing ethanol pointed to an increase in the concentration of NO<sub>x</sub>, CO and CO<sub>2</sub> with increasing amount of ethanol.

**Keywords:** Diesel engine. Emissions. Biodiesel. Etanol

### REFERÊNCIAS

- AGARWAL, A.K. *Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines*. Prog Energy Combust Sci v.33 233, 2007.
- AJAV E.A, SINGH B, TK B. *Performance of a stationary diesel engine using vaporized ethanol as supplementary fuel*. Biomass Bioenergy v.15, 493, 1998.
- BARABÁS, I; TODORUT, A; BALDEAN, D. *Performance and emission characteristics of an CI engine fueled with diesel–biodiesel–bioethanol blends*. Fuel v.89, 3827, 2010.
- BHALE, P.V; DESHPANDE, N.V; THOMBRE, S.B. *Improving the low temperature properties of biodiesel fuel*. Renewable Energy, v.34, 794, 2009.

BUYUKKAYA E. *Effects of biodiesel on a DI diesel engine performance, emission and combustion characteristics*. Fuel, 89:30 99–105, 2010.

CANDEIA, R.A.; SILVA, M.C.D.; FILHO, J.R.C.; BRASILINO, M.G.A.; BICUDO, T.C. SANTOS, I.M.G. *Influence of soybean biodiesel content on basic properties of biodiesel–diesel blends*. Fuel v.88, 738, 2009.

CHEENKACHOM, K; FUNGTAMMASAN, B. *Biodiesel as an additive for diesohol*. Int J Green Energy, v.6, 57, 2009.

DATTA, A; MANDAL, B.K. *Impact of alcohol addition to diesel on the performance combustion and emissions of a compression ignition engine*. Applied Thermal Engineering, v.98, 670, 2016.

DE OLIVEIRA, A.; MORAIS, A.M.; VALENTE, O.S.; SODRÉ, J.R. *Combustion characteristics, performance and emissions from a diesel power generator fuelled by B7-ethanol blends*. Fuel Processing Technology, v. 139, 67, 2015.

FERREIRA, V.P.; MARTINS,J.; TORRES, E.A.; PEPE, I.M.; SOUZA, J.M.S.R. *Performance and emissions analysis of additional ethanol injection on a diesel engine powered with A blend of diesel-biodiesel*. Energy for Sustainable Development v.17, 649, 2013.

GUARIEIRO, L.L.N; DE SOUZA, A.F; TORRES, E.A; DE ANDRADE, J.B. *Emission profile of 18 carbonyl compounds, CO, CO<sub>2</sub>, and NO<sub>x</sub> emitted by a diesel engine fueled with diesel and ternary blends containing diesel, ethanol and biodiesel or vegetable oils*. Atmos Environ; v.43, 2754, 2009.

GUARIEIRO, L.L.N; GUERREIRO, E.T.A; AMPARO, K.K.S; MANERA, V.B; REGIS, A,C,D; SANTOS, A.G; FERREIRA, V.P; LEÃO, D.J; TORRES, E.A; DE ANDRADE, J.B. *Assessment of the use of oxygenated fuels on emissions and performance of a diesel engine*. Microchemical Journal v.117 94, 2014.

KOWALEWICZ, A. *Eco-diesel engine fueled with rapeseed oil methyl ester and ethanol*. Part1: Efficiency and emission. Proc Inst Mech Eng Part D J Automob Eng, v.219, 715, 2005.

LABECKAS, G.; SLAVINSKAS, S.; MAZEIKA, M. *The effect of ethanol–diesel–biodiesel blends on combustion, performance and emissions of a direct injection diesel engine*. Energy Conversion and Management v.79, 698, 2014.

LAPUERTA, M; ARMAS, O; HERREROS, J.M. *Emissions from a diesel–bioethanol blend in an automotive diesel engine*. Fuel; v.87, 25, 2008

LI D-G ZHEN, H; XINGCAI, L; WU-GAO, Z; JIAN-GUANG, Y. *Physico-chemical properties of ethanol–diesel blend fuel and its effect on performance and emissions of diesel engines*. Renewable Energy v.30, 967, 2005.

MAN, X.J; CHEUNG, C.S; NING, Z; WEI, L; HUANG Z.H. *Influence of engine load and speed on regulated and unregulated emissions of a diesel engine fueled with diesel fuel blended with waste cooking oil biodiesel* Fuel , v.180, 41, 2016.

SHI, X; YU, Y; HE, H; SHUAI, S; WANG, J; LI, R. *Emission characteristics using methyl soyate–ethanol–diesel fuel blends on a diesel engine*. Fuel v.84, 1543, 2005.

TSE, H.; LEUNG, C.W.; CHEUNG, C.S.; *Investigation on the combustion characteristics and particulate emissions from a diesel engine fueled with diesel–biodiesel–ethanol blends*. Energy, v.83, 343, 2015.

WANG W.G; CLARK, N; LYONS, D; YANG, R; GAUTAM, M; BATA, R, et al. *Emissions comparisons from alternative fuel buses and diesel buses with a chassis dynamometer testing facility*. Environ Sci Technol, v.31, 3132, 1997.

XING- CAI, L; JIAN-GUANG, Y; WU-GAO, Z; ZHEN, H. *Effect of cetane number improver on heat release rate and emissions of high speed diesel engine fueled with ethanol–diesel blend fuel*. Fuel, v.83, 2013, 2004.

YILMAZ, N.; VIGIL, F.M.; DONALDSON, B.; DARABSEH, T. *Investigation of CI engine emissions in biodiesel–ethanol–diesel blends as a function of ethanol concentration*. Fuel, v.115, 790, 2014.