

Análise de emissões em grupo gerador utilizando diesel e etanol fumegado

Vinícius Rückert Roso (Universidade Federal de Santa Maria) vinicius.roso@mecanica.ufsm.br
Adriano Pacheco Burger Meurer (Universidade Federal de Santa Maria) aburgermeurer@gmail.com
Mario Eduardo Santos Martins (Universidade Federal de Santa Maria) mario@mecanica.ufsm.br

Resumo:

Este estudo teve como objetivo a comparação de emissões de carbono em um motor utilizando diesel como combustível e o mesmo motor utilizando combustível renovável, no caso, o etanol. Os resultados foram obtidos através de simulação computacional em software unidimensional, amparado por ensaios realizados experimentalmente utilizando um motor Cummins 3.9 4BT.

Apesar de praticamente extinguir a emissão de Óxido de Nitrogênio (NO_x) quando utilizado o etanol, os demais gases, estes contribuintes para o efeito estufa, como por exemplo o Dióxido de Carbono (CO₂), têm sua emissão potencializada devido ao incremento no consumo de combustível. Assim, em termos de emissões de poluentes, o uso do etanol como combustível pode ser tornar-se viável se comparado ao Diesel caso analisada sua cadeia produtiva, oriunda de fontes renováveis. Entretanto, o uso de motores adaptados ao consumo de etanol apresenta desvantagens que podem ser eliminadas com a elaboração de um motor dedicado à utilização do etanol como combustível.

Palavras chave: Emissões, etanol, simulação, experimental.

Emission analysis in a generator set running with diesel and ethanol fumigated

Abstract

This study aimed at comparing carbon emissions on an engine using diesel as fuel and the same engine using renewable fuel, in this case ethanol. The results were obtained by computer simulation on one-dimensional software, supported by tests performed experimentally using a Cummins 4BT 3.9 engine. Despite virtually extinguish the emission of oxides of nitrogen (NO_x) when used ethanol, other gases, these contributors to greenhouse gases, such as carbon dioxide (CO₂), have its issue due to the increment increased fuel consumption. So, in terms of pollutant emissions, the use of ethanol as a fuel can be become feasible when compared to Diesel case analyzed its productive chain, from renewable sources. However, using engines adapted to consumption of ethanol presents disadvantages that can be eliminated with the development of a dedicated engine the use of ethanol as fuel.

Key words: emissions, ethanol, simulation, experimental.

1. Introdução

Alterações climáticas foram discutidas em 1991 no chamado *Intergovernmental Panel on Climate Change* – IPCC, onde ferramentas e soluções foram geradas a fim de regulamentar a redução de emissões do principal gás de efeito estufa, o dióxido de carbono (CHANG, 2002). Como discutido por Ferreira (2009), sendo o meio ambiente diretamente ligado à economia, a sua degradação representa despêndios sociais, devendo o poluidor ser estimulado a reduzi-los.

Apesar do Brasil ser o pioneiro em projetos para redução nas emissões de CO₂ e outros gases do efeito estufa, está atrás de países também em desenvolvimento, como China e Índia. Grande parte dos países executa uma estratégia alternativa, não somente reduzindo as emissões, mas também criando alternativas para captura destes gases, como por exemplo, o aumento da área verde (SAID; DZIEDZIC, 2007).

Em 2005 foram estabelecidos no Brasil alguns projetos prioritários, como a utilização de fontes renováveis de energia bem como a busca do aumento da eficiência. Os mais recentes desenvolvimentos no setor de biocombustíveis apontam como uma transformação na estrutura do país, atingindo não somente a economia, mas também questões políticas, culturais, sociais e ecológicas. Já em 2006, o Brasil apresentou como sendo 47,5% de sua energia primária oriunda de fontes renováveis, como a cana de açúcar, a energia hidráulica e a lenha, por exemplo. Com interesses em estabelecer o etanol como *commodity* no mercado mundial, em 2007 o Brasil associou-se ao Fórum Internacional de Biocombustíveis, onde são analisadas alternativas para solucionar questões referentes à logística, infraestrutura e garantias de fornecimento (SILVA, 2007).

O crescente desenvolvimento das atividades que demandam consumo de energia elétrica, aliada à conscientização perante aos fatores ambientais, tem promovido a busca por fontes limpas e renováveis de produção de energia (HEYWOOD, 1988). Segundo Seleglim Jr. e Polikarpov (2009), o emprego de 1 joule de energia fóssil proveniente da gasolina ou óleo diesel, é capaz de produzir 9,3 joules de etanol através da cana-de-açúcar. Com a mesma quantidade de energia fóssil, poderia produzir-se apenas 2 joules de etanol de beterraba ou de trigo, sendo considerada portanto, a cana de açúcar como uma das mais viáveis matérias-primas para a extração de etanol. Alternativa ainda mais rentável é o reprocessamento do bagaço da cana, o que poderia praticamente dobrar o volume de etanol extraído. Ainda de acordo com Seleglim Jr. e Polikarpov (2009), de 500 toneladas de cana-de-açúcar são produzidos aproximadamente 45 mil litros de etanol. Com o emprego de novas tecnologias e realização do reprocesso, poderia ser produzida quantidade equivalente de etanol de segunda geração, praticamente dobrando o volume de etanol extraído da matéria-prima.

Segundo o Fórum de Mudanças Climáticas do Amazonas, somente na produção de energia elétrica no ano de 2008, foram enviados no estado mais de 3,97 milhões de toneladas de CO₂ para a atmosfera, sendo que seria necessária uma área verde equivalente a 25 mil campos de futebol para que estas emissões fossem neutralizadas. Este fato é alarmante, ainda mais se considerando que o Amazonas está na 15^a posição no ranking de geração de energia elétrica no Brasil (EPE, 2013).

Um estudo feito para o Mercado Norte Americano de Eletricidade mostra a viabilidade prática da utilização de geradores acionados por motores de combustão interna Diesel para o suprimento de energia no Mercado de Curto Prazo (MCP). Este estudo considera geradores já existentes em locais como hospitais, centros de processamento de dados, shoppings e outros, onde é necessária uma geração distribuída para aumentar a confiabilidade do sistema de suprimento de energia.

No Brasil, o uso de geradores de energia movido a combustíveis fósseis foi incrementado após o “apagão” ocorrido no ano de 2001. Entretanto, o que era paliativo acabou tomando caráter definitivo em indústrias, comércio e até residências, isto influenciado pela variação do sistema de cobrança, onde o valor cobrado pela energia elétrica difere de acordo com os horários de consumo. Se mantida a atual política, há uma previsão de aumento de 97% das emissões provenientes dos setores de energia e transporte até 2030. A adoção de energia proveniente de fontes renováveis pode ajudar a reverter este quadro, sendo o uso do etanol um fator de grande contribuição (ALISSON, 2013).

No que tange a desenvolvimento de motores de combustão interna, Blair et al (1996) definem como sendo a simulação numérica computacional essencial na elaboração de projetos mais apurado, otimizando variáveis, reduzindo a necessidade de ensaios experimentais dispendiosos, contribuindo para um menor tempo total de projeto e redução de custos de desenvolvimento. Sendo assim, adota-se para este trabalho a simulação computacional como mecanismo de análise dos efeitos da utilização de etanol em um motor Diesel, com foco em emissões de poluentes.

2. Materiais e Métodos

2.1. Ensaios Experimentais

O objeto de estudo para os ensaios experimentais e para a modelagem computacional é um motor Cummins 3,92 litros, 4 cilindros em linha e turbo alimentado. Originalmente operando com óleo Diesel como combustível e conectado a um gerador de energia elétrica, ao qual são impostas diferentes cargas. As cargas no gerador são emuladas através de um conversor “back to back”, utilizando do lado do gerador um retificador com modulação por largura de pulso (PWM), e do lado da rede um inversor PWM. Assim, garante-se que a energia elétrica que chega a rede está na mesma frequência e tensão, não ocorrendo defasagem entre o gerador e a rede de energia. A injeção de diesel é controlada eletronicamente, mantendo o motor a rotação constante de 1800 RPM, estando de acordo com a frequência da rede brasileira, que é de 60Hz. Através deste sistema, pode-se variar a carga aplicada ao motor em estudo, sendo assumidos valores entre 10 kW e 50 kW, com incremento de 10 kW.

Objetivando a substituição do combustível fóssil por um combustível renovável, como o etanol, a conversão pode efetuar-se de diversas maneiras. Através da fumegação, o Diesel é parcialmente substituído pelo etanol, sendo este injetado no coletor de admissão através de um injetor eletrônico ou um carburador (SAHIN, 2009). A quantidade de etanol injetada é limitada pela ocorrência do fenômeno de detonação, podendo trazer sérios danos ao motor. Outro método possível de ser utilizado baseia-se na substituição completa da injeção de Diesel pela injeção de etanol como combustível único, onde maiores alterações são necessárias, a fim de que o ciclo de operação do motor seja alterado, de Diesel para Otto.

Para a elaboração de um modelo computacional que possa representar o motor de forma leal, além das características descritas em Cummins® Inc. (2004), tornou-se imprescindível o uso da instrumentação para aquisição de dados experimentais de consumo, pressões na admissão, cilindro e escape, temperaturas em diversos pontos do motor, vazão mássica de ar e emissões de gases de exaustão. Estes dados são fundamentais para que o modelo corresponda com maior fidelidade ao motor simulado. A Figura 01 representa o motor e o posicionamento da instrumentação utilizada, sendo “T” e “P” utilizados para sensores de temperatura e pressão, respectivamente.

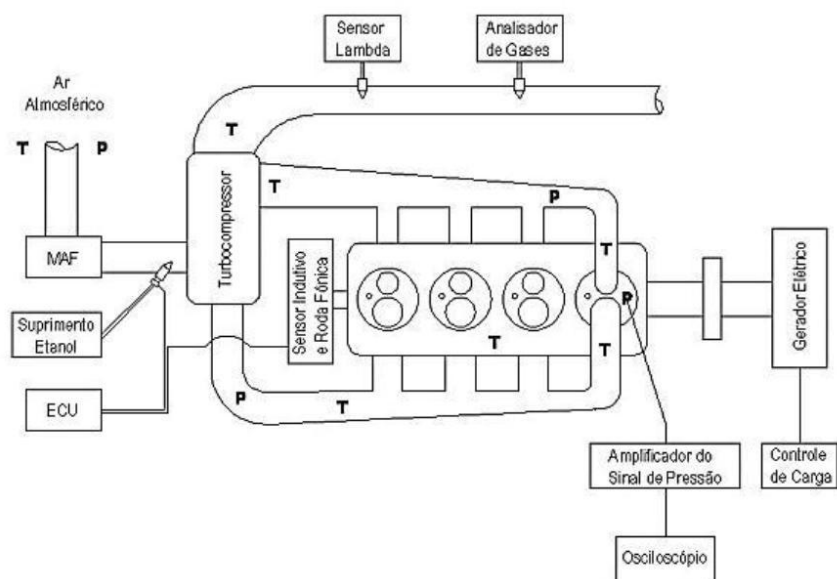


Figura 01 – Posicionamento da instrumentação no motor para aquisição de dados

Para o caso da fumação, o fornecimento de Diesel pela bomba de combustível é reduzido automaticamente na medida em que ocorre a inserção do etanol através do injetor, este controlado por uma central eletrônica. Entretanto, para a alteração do ciclo de operação, de Diesel para Otto, uma série de alterações se fazem necessárias, como a colocada de bicos injetores adequados, velas e demais mecanismos responsáveis pela ignição e combustão adequada do novo combustível.

Os ensaios realizaram-se com variações de potência, partindo de 10kW até 50 kW com um incremento de 10kW. Após a completa instrumentação do motor, realizaram-se experimentos utilizando o Diesel B5, sendo posteriormente adicionado o injetor de etanol na admissão (fumação). Sendo os *softwares* cada vez mais utilizados na elaboração de fiéis modelos, também se tornam imprescindíveis na aquisição de dados não medidos experimentalmente, além de tornar possível o monitoramento do comportamento do motor. A aquisição destes dados, tanto práticos quanto teóricos, resultou na modelagem computacional do motor por meio de programa avançado de simulação, o GT_Power.

2.2. Simulação Computacional

Como dados de entrada para o modelo computacional se utilizam dados geométricos, como razão de compressão, dimensões de cilindro e demais tubulações. A instalação de sensores possibilitou a aquisição de parâmetros de operação do motor, tais como temperaturas e pressões nos coletores de admissão e exaustão, consumo de combustível, pressão no cilindro, fluxo de massa de ar, temperaturas na entrada e saída do compressor e turbinas. Estes dados tornaram mais fiel a representação do modelo computacional.

Os sensores são conectados a entradas analógicas de uma placa de aquisição de dados e esta ligada ao computador. A aquisição e o tratamento dos dados é realizada através do software LabVIEW®, que a cada pulso fornecido pelo sensor acoplado ao eixo de manivelas recebe os sinais oriundos dos canais utilizados, garantindo assim que todos os sinais medidos correspondam a um dado ângulo do eixo de manivelas.

O software GT-POWER® calcula a taxa de queima da mistura de duas maneiras, ambas delas em função das medições de pressão provenientes do cilindro. Ambas geram o mesmo resultado, mas diferem no modo de aquisição das pressões. O método *Stand-Alone* calcula

através da medição de pressão no cilindro em um ciclo, ou então através de uma média de ciclos, considerando a eficiência volumétrica. Entretanto, esta aproximação é válida quando as frações residuais são conhecidas ou facilmente estimadas. Para o caso em questão, adotou-se o método denominado TPA (*three pressure analysis*), o qual utiliza pressões coletadas nos coletores de admissão e exaustão e no interior do cilindro, não sendo necessário estimar a fração residual da combustão, já que neste caso ela é calculada. A simulação roda por múltiplos ciclos até convergir e como resultados são dados vários valores referentes à combustão. O principal benefício desta aproximação é que as quantidades existentes no cilindro podem ser preditas pela simulação, inclusive a fração residual. Isto é mais bem realizado isolando-se um cilindro do modelo com suas respectivas válvulas e pórticos, como representado na Figura 02, já que as condições na admissão e exaustão são de extrema importância no desenvolvimento deste método.

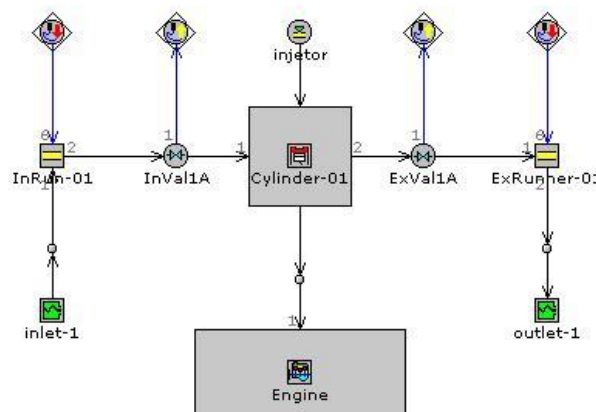


Figura 02 – Modelo TPA através do software GT-Power

A abordagem mais comum do TPA é a análise de uma condição de funcionamento em estado estacionário, no qual se podem utilizar dados de apenas um ciclo ou então montar-se uma média. Esta abordagem é utilizada devido a geralmente as temperaturas nos três pontos não sofrerem grande variação depois de estarem estabilizadas, ou seja, com o motor em condições plenas de funcionamento. O principal propósito deste tipo de simulação é a obtenção de um modelo de combustão para cada condição de operação, através da análise dos dados medidos. Como principal desvantagem se comparado ao método *Stand-Alone*, o TPA requer a coleta de uma maior quantidade de dados experimentais, o que deixa o cálculo da simulação mais lenta. Entretanto, foi escolhido por tornar-se mais preciso e fiel ao encontrado na prática.

Na Tabela 01 estão representados os dados obtidos experimentalmente e através de simulação, para cargas de 20 e 50kW imposta ao gerador e utilizando o Diesel como combustível. Os resultados do modelo TPA mostraram uma excelente correlação com os dados experimentais, com mínimas variações que podem ser atribuídas a transferência de calor e outras pequenas incertezas.

Variável	20kw		50kW	
	Simulado	Medido	Simulado	Medido
Potência Líquida(kw)	21.69	20	51.95	50
Consumo de combustível (g/s)	1.82	1.73	2.97	2.81
BSFC (g/kW.h)	302.07	311.4	205.95	202.32
MAF (kg/h)	300.24	300.6	423.53	424.8
Lambda	3.01	3.18	2.61	2.76
Pressão no cilindro (MPa)	7.68	7.07	9.97	9.65
Pressão na admissão (MPa)	0.15	0.14	0.21	0.2
Pressão na exaustão (MPa)	0.21	0.17	0.14	0.18
Temperatura no coletor de admissão (°C)	70.2	64.7	106	114
Temperatura no coletor de escape (°C)	382	327	428	470

Tabela 01 – Diferentes parâmetros adquiridos experimentalmente e simulados através de software

3. Resultados

Na Figura 03 estão representados os valores de pressão adquiridos experimentalmente com o motor operando com diesel como combustível. Estes são correspondentes aos ângulos do virabrequim, onde o PMS do pistão corresponde à posição angular zero, nos valores negativos o pistão está posicionado antes do PMS e nos valores positivos após o PMS. Como já mencionado, os dados foram obtidos com o motor operando a uma rotação constante de 1800 RPM, sendo a variação no comportamento dado através da imposição de carga no gerador elétrico acoplado ao motor.

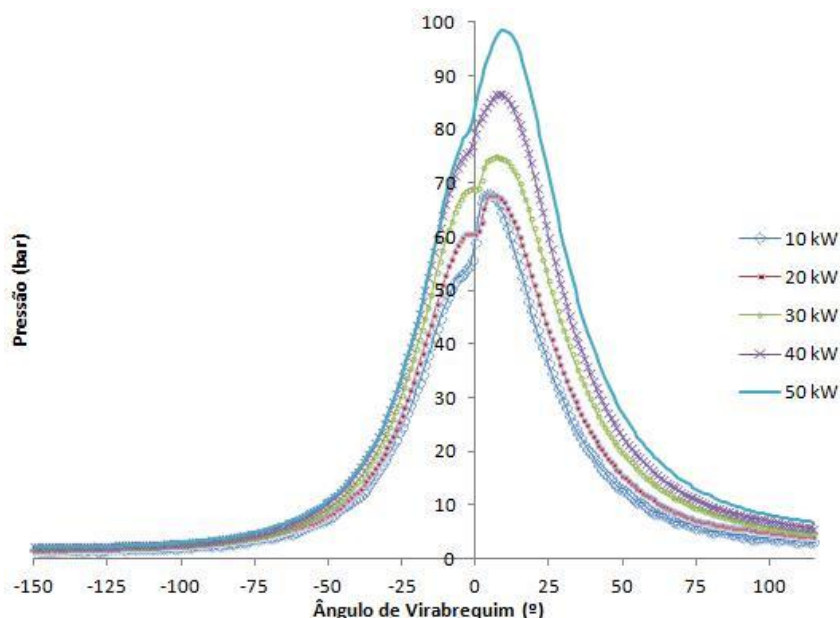


Figura 03 – Dados de pressão no cilindro para diferentes condições de carga

Como esperado, o aumento do pico de pressão ocorreu de maneira gradativa de acordo com o acréscimo de carga. Para os motores diesel em geral, o pico de pressão é atingido em torno de 5° depois do PMS, não diferindo dos resultados encontrados.

O diagrama relacionando pressão e volume expresso na Figura 04 representa os dados obtidos para uma carga de 50kW no gerador e pode ser utilizado para analisar o comportamento das válvulas de admissão e escape durante o ciclo do pistão. Hsu et al (2002), afirma que se as aberturas e fechamentos ocorrerem em tempos não ideais, haverá perdas de trabalho e potência.

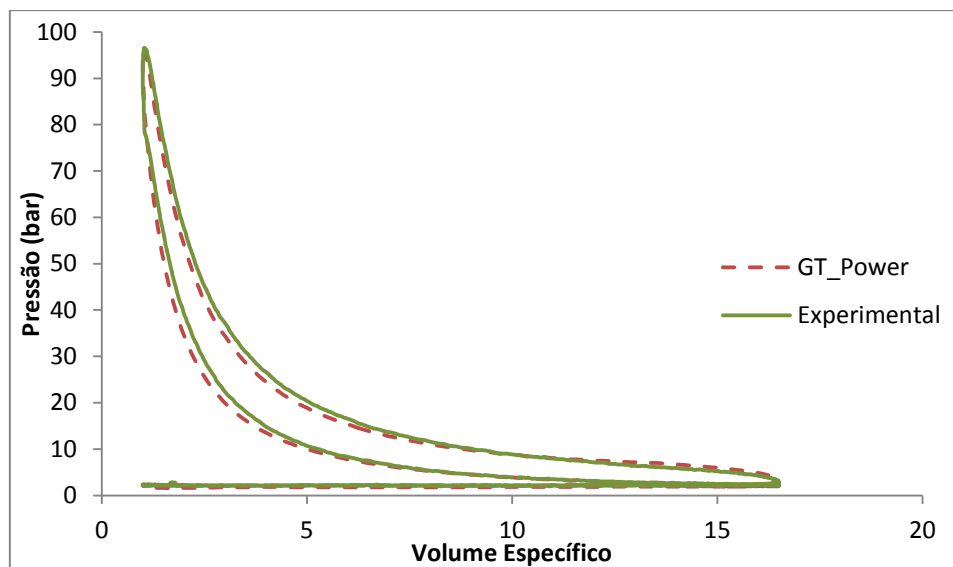


Figura 04 – Dados de pressão no cilindro para diferentes condições de carga

Como observado, a maior parte dos valores obtidos através das simulações computacionais é bem correlacionada aos obtidos experimentalmente, diferindo apenas em alguns pontos, sendo uma possível causa ligada ao modelo utilizado para liberação de calor durante a combustão. A simulação foi realizada através do uso do modelo Woschini de combustão, indicado pelo *software* GT-Power® e desaconselhado por Heywood (1988) que sugere o uso do modelo de Hohenberg para injeção direta com *swirl*. Brambila (2006) afirma que a correlação de Woschini permite uma estimativa mais apurada da média das velocidades dos gases do cilindro usando como parâmetro o número de Reynolds para as correlações de transferência calor, enquanto Nilsson e Eriksson (2004) sugerem o uso do modelo de Hohenberg devido a uma melhor representação das perdas de calor no ciclo.

De acordo com ROSO (2012), a fração mássica queimada (MFB) pode ser representada pelo percentual de combustível consumido versus o ângulo de virabrequim durante o processo de combustão. Este e alguns parâmetros como a pressão absoluta, a razão de compressão e a sensibilidade dos sensores são fundamentais na determinação do início e no fim do processo de combustão, além de identificar o momento de ignição. A velocidade da combustão é diretamente influenciada pela quantidade de combustível injetada na câmara, uma vez que é necessário que a rotação seja mantida constante. Portanto, para maiores cargas ou condições que propiciem uma maior injeção de massa de combustível a combustão tende a um maior período de duração, como demonstrado na Figura 05. Com isso, no processo de fumação, apesar de ocorrer redução na injeção de Diesel com a inserção do etanol, a fração mássica queimada se reduz tornando a combustão mais lenta. Este fato limita a injeção de etanol a 11,3%, evitando que ocorram falhas na ignição.

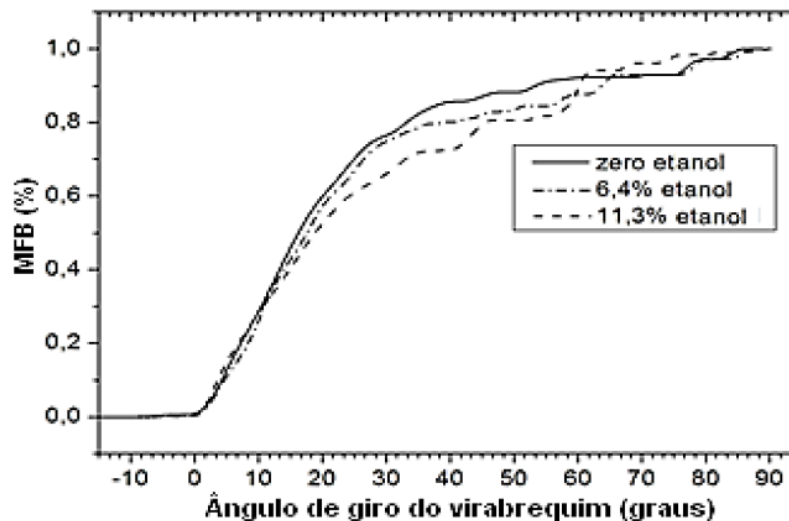


Figura 05 – MFB para diferentes injeções de etanol na admissão

Se tratando de emissões de gases residuais, os ensaios foram realizados impondo cargas de 20 kW ao gerador, mostrando a completa transformação do motor para o uso de etanol favorável para redução nas emissões de determinadas substâncias, dentre elas o dióxido de carbono. Sendo um dos principais gases responsáveis pelo efeito estufa, o CO₂ teve suas emissões reduzidas em mais de duas vezes. A alteração também pode ser considerada benéfica na emissão de Óxido de Nitrogênio (NO_x), sendo emitida uma quantidade aproximadamente dez vezes menor se queimado etanol, fato ligado à redução da temperatura na câmara de combustão. Entretanto, esta redução de temperatura na câmara de combustão resultou num aumento de combustível não vaporizado, havendo depósitos de combustível líquido em espaços onde a frente de chama não atingiria, gerando incremento nas emissões de hidrocarbonetos não queimados (HC). A vaporização do combustível poderia ser intensificada caso a câmara de combustão fosse propícia para a queima de etanol.

3. Conclusão

O uso do etanol na geração de energia traz grandes benefícios ambientais, pois além de ser um combustível renovável, contribui para a redução na emissão de poluentes. Apesar dos gases produzidos em um motor movido a etanol serem menos nocivos que os emitidos em motores Diesel, o motor deve explorar adequadamente as propriedades do etanol, sendo necessário o desenvolvimento de um motor dedicado ao uso deste combustível. Caso contrário, o excesso de consumo de combustível acaba contribuindo negativamente na quantidade de poluentes emitidos. Mesmo assim, segundo estudos já desenvolvidos, é possível aumentar a eficiência destes motores, ficando em alguns casos na ordem de motores a diesel (aproximadamente 40%), sem muitas alterações nos projetos originais.

O uso de motores de ciclo Otto, podem-se beneficiar características em função do uso do etanol, fazendo com que seja mais bem explorado seu alto calor latente de vaporização, sua alta resistência à detonação, alta velocidade de propagação de chama, entre outros fatores.

A simulação computacional presente na pesquisa, realizada através do software GT-Power®, mostrou-se uma ferramenta eficaz, uma vez que aproximou em muito a condição real de funcionamento do motor com biodiesel daquela modelada virtualmente. Isto se tornou evidente diante do quadro comparativo (Tabela 1) entre a simulação e os dados experimentais

do motor, onde 90% das variáveis apresentadas tiveram uma variação menor que 10%, levando a concluir que o modelo apresentado pode ser considerado fiel ao motor ensaiado.

Referências

- ALISSON, E.** *Mudanças no clima do Brasil até 2100*. Publicado em: 10/09/2013. Disponível em: http://agencia.fapesp.br/mudancas_no_clima_do_brasil_ate_2100/17840/. Acesso em 04/09/2014.
- BLAIR, G.P.** *Design and Simulation of Four-Stroke Engines*. Society of Automotive Engineers Int., 1999.
- BRAMBILA, J. A.** *Estudo experimental e simulação termodinâmica de desempenho em um motor de combustão interna operando com diesel e etanol*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- CHANG, M.** *Seqüestro de Carbono Florestal: oportunidades e riscos para o Brasil*. R. paran. Desenv., Curitiba, n. 102, p. 85-101, jan./jun. 2002
- CUMMINS® INC.** *4BT3.9-G4 Engine Performance datasheet*, 2004.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética.** *Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2013*. Rio de Janeiro; 2013.
- HEYWOOD, J. B.** *Internal combustion engines Fundamentals*. 2. ed., New York: McGraw-Hill, 1988.
- HSU, B.** *Practical Diesel-Engine Combustion Analysis*, Society of Automotive Engineers Int., 2002.
- NILSSON, Y. and ERIKSSON, L.** *Determinig TDC position using symmetry and other methods*. Society of Automotive Engineers, 2004.
- SAHIN, Z.; DURGUN, O.** *Prediction of the Effects of Ethanol-Diesel Fuel Blends on Diesel Engine Performance Characteristics, Combustion, Exhaust Emissions and Cost*. Energy & Fuels, p. 1707–1717, 2009.
- SAID, A. A.; DZIEDZIC, M.** *A Importância da Utilização de Créditos de Carbono no Brasil*. IX ENGEMA – Encontro Nacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente. Curitiba, 19 a 21/11/2007.
- SILVA, L. A. M.; BACARJI, A. G.; MOURA, J. M.; HALL, R. J.** *Crédito de carbono: Reflexões teóricas acerca do mercado brasileiro*. XIX SIMPEP – Bauru, SP, Brasil, 5 a 7 de Novembro de 2012.
- ROSO, V. R.; FRÖLICH, G. K.; DALLA NORA, M. ; BALEN, G. ; MARTINS, M. E. S. ; MACHADO, P. R. M.; BISOGNO, F. E.** *Combustion analysis of a Diesel Engine using computer simulation*. SAE Technical Paper 2012-36-0370, 2012.