

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA ALIMENTADO COM BIOGÁS

Victor Vasconcelos Barreto, victor_v_barreto@poli.ufrj.br¹

Sílvio Carlos Anibal de Almeida, silvioa@gmail.com¹

Carlos Rodrigues Pereira Belchior belchior@peno.coppe.ufrj.br²

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, Poli/COPPE/UFRJ, Centro de Tecnologia, Bloco G, sala 201, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, Brasil, CEP 21945-970

²Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Engenharia Oceanica - COPPE - UFRJ, Centro de Tecnologia, Bloco C, sala 209, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, Brasil, CEP 21945-970

Resumo: O presente trabalho tem como objetivo otimizar o desempenho de um motor de combustão interna alimentado com biogás. Foram feitos ensaios em um grupo motor-gerador, ciclo Otto 4 kW, operando inicialmente com três combustíveis distintos: gasolina, gás natural veicular (GNV) e biogás. As medições de emissões e consumo foram feitas para o motor operando em quatro cargas distintas, que correspondem a 25%, 50%, 75% e 100% da sua potência nominal. Quando comparado com gasolina e GNV, os valores das emissões nos gases de exaustão nos testes realizados com biogás foram inferiores aos do mesmo motor operando com gasolina e semelhantes aos resultados obtidos com o gás natural. A exceção é o das emissões de CO₂, o que pode ser explicado pelas grandes concentrações desse gás presentes no biogás. O biogás apresentou maior consumo de combustível em ao seu baixo poder calorífico (PCI). Numa segunda fase, foram feitos ensaios mais detalhados, com o motor operando apenas com biogás. Uma vez que o biogás apresenta características específicas, foram alterados alguns parâmetros do motor de forma a determinar a sua influência no desempenho e emissões. Os parâmetros estudados foram a relação ar-combustível e o avanço de ignição do motor.

Palavras-chave: Biogás Biocombustíveis, Motores de Combustão Interna

1. INTRODUÇÃO

A vantagem do biogás, em relação aos combustíveis fósseis, é o fato de ser renovável e poder ser produzido em diferentes locais onde haja disponibilidade de biomassa ou resíduos. A desvantagem do biogás reside no seu baixo poder calorífico e a presença de substâncias não combustíveis, tais como a água e o dióxido de carbono, que prejudicam o processo de queima, tornando-o menos eficiente. Além destas impurezas, a presença do sulfeto de hidrogênio (H₂S) é indesejável, por ser um gás corrosivo. Para viabilizar a utilização de biogás em motores, é necessário reduzir a concentração do H₂S através da utilização de filtros. Para ser utilizado em motores de combustão interna, é necessário que a percentagem de H₂S no biogás não exceda a 0,05 % em volume (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2008).

Diversos autores têm estudado o emprego de biogás em motores de combustão interna [PORPATHAM *et al.* (2008); CROOKES (2006); COELHO *et al.* (2006); SOUZA *et al.* (2010); MACHADO (2014)]. Porpatham *et al.* (2008) estudaram a influência da taxa de compressão no desempenho de um motor alimentado com biogás. Coelho *et al.* (2006) analisaram os sistemas de purificação que são empregados em motores alimentados com biogás. Souza *et al.* (2010) estudaram a influência da mistura ar-combustível e do avanço de ignição um motor-gerador ciclo Otto, para operar com biogás. Machado (2014) faz uma análise do desempenho de um motor a ciclo Otto operando com gasolina e biogás, e apresenta os resultados de consumo específico e emissões.

O presente trabalho apresenta os resultados dos testes de um motor-gerador ciclo Otto operando com três combustíveis distintos: gasolina, gás natural veicular (GNV) e biogás. Adicionalmente foram feitos outros dois ensaios com o mesmo motor, operando apenas com biogás, de forma a analisar a influência de parâmetros operacionais (razão ar-combustível e avanço da ignição) na combustão do biogás.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O grupo motor-gerador foi instalado em uma sala ao lado da planta produtora de biogás, na Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) da Alegria (RJ), para que o motor fosse abastecido diretamente e evitando, assim, a necessidade de armazenar e transportar o combustível. A Fig. 1 mostra o conjunto motor-gerador e o aparato experimental utilizado.

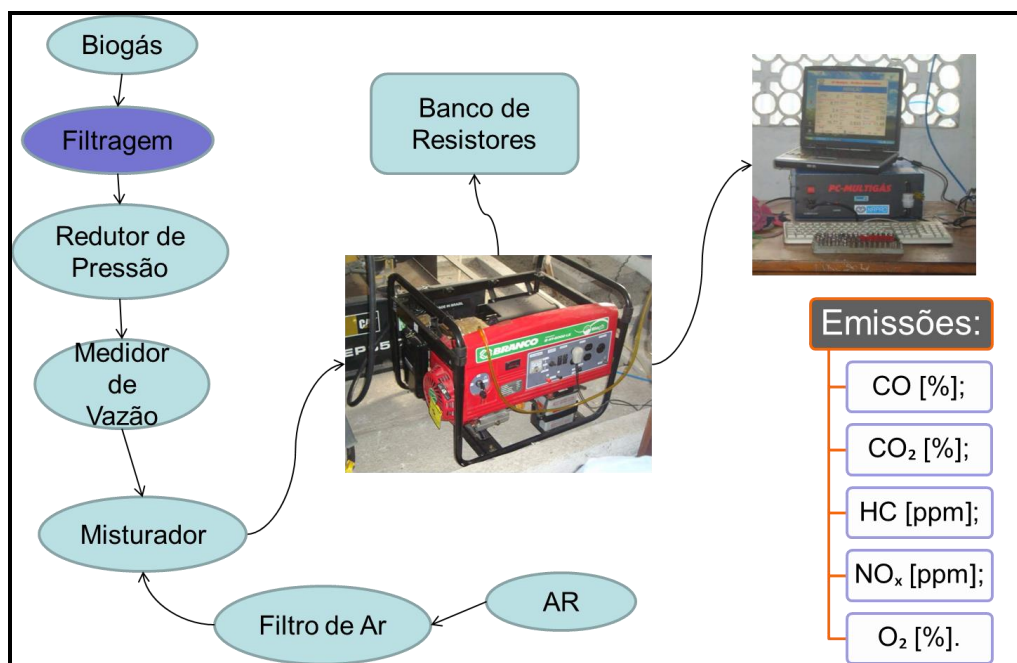


Figura 1. Bancada de testes.

O aparato experimental consiste em: medidor de vazão; motor-gerador; analisador de gases; e um banco de resistência.

Antes de ser admitido pelo motor, o biogás utilizado nos testes passa por um filtro de limalha de ferro, para eliminação do H_2S , e por um desumidificador, para diminuir a umidade do combustível. Também foi utilizado um redutor de pressão, para que a admissão do combustível fosse feita à pressão atmosférica, e um medidor de vazão volumétrica, que foi convertida em vazão mássica multiplicando-se pela densidade dos combustíveis, conforme indicado na Eq. (2).

Utilizou-se um grupo motor-gerador fabricado pela empresa Branco, ciclo Otto, modelo B4T 5000 Bio. A Tab. 1 contém as suas principais características:

Tabela 1. Características do motor modelo B4T 5000 Bio

Potência Máxima (kW)	4	Cilindrada (cc)	389
Potência Nominal (kW)	3,6	Comprimento (mm)	695
Voltagem (V)	110/220	Largura (mm)	555
Frequência (Hz)	60	Altura (mm)	580
Voltagem de carga (V)	12	Peso líquido (kg)	80
Corrente de carga (A)	8,3	Tipo	Monofásico

As medições de emissões e de consumo foram feitas para o grupo motor-gerador operando em quatro cargas distintas, que correspondem a 25%, 50%, 75% e 100% da sua potência nominal. Os gases de descarga foram analisados pelo analisador de gases NAPRO PC-MULTIGÁS, a fim de medir as emissões de CO_2 , CO, HC (hidrocarbonetos totais não queimados) e NO_x .

Na Tab. 2 é apresentada a composição do biogás produzido na ETE da Alegria em três pontos de amostragem (DANTAS e OLIVEIRA, 2011). Será utilizada, para os cálculos, a composição do biogás na entrada do gerador.

Tabela 2. Composição do biogás produzido na ETE da Alegria

Biogás		Entrada Gerador	Saída do 2º Leito Limalha de Ferro	Tubulação GNV
CH ₄	[%]	67,5	72,1	88
CO ₂	[%]	24,1	26	7,8
N ₂	[%]	6,7	1,6	4,2
O ₂	[%]	1,68	0,35	0
Massa Específica (Calculada)	[kg/m ³]	1,0633	1,0507	0,6481
PCI mássico	[MJ/kg]	24,59	22,69	37,69

O consumo específico de combustível é calculado pela Eq.(1):

$$CEC [kg/kWh] = \frac{\dot{m}_{comb.} [kg/h]}{P_n [kW]} \quad (1)$$

Como a medição da vazão de biogás foi realizada em base volumétrica, fez-se necessário o uso da Eq. (2) para o cálculo da vazão mássica:

$$\dot{m}_{comb.} [kg/h] = \dot{m}_v [m^3/h] * \rho [kg/m^3] \quad (2)$$

A eficiência de conversão energética, ou eficiência global, é calculada conforme a Eq. (3).

$$\eta_g = \frac{3600}{CEC [kg/kWh] * PCI [mJ/kg]} \quad (3)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados medidos pelo analisador de gases NAPRO foram convertidos em um arquivo para leitura no software EXCEL, onde também foram inseridas as equações para calcular o consumo e eficiência.

3.1. Ensaio com gasolina, GNV e biogás

Foram realizados ensaios de desempenho e emissões do grupo motor-gerador operando com os três combustíveis avaliados: biogás, gasolina e GNV. As emissões de CO, HC e NO_x são apresentadas nas Fig. 2, 3 e 4, respectivamente.

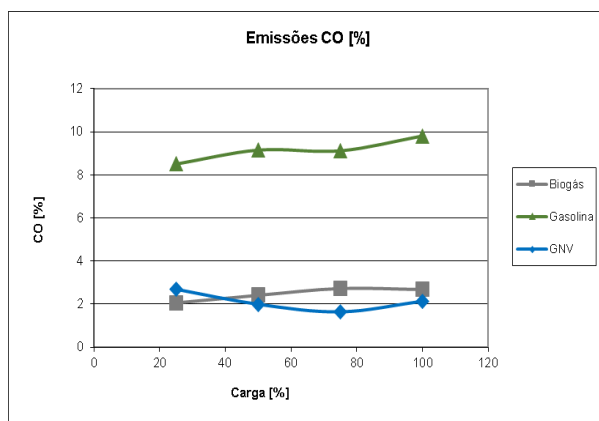


Figura 2. Emissões de CO para os combustíveis utilizados

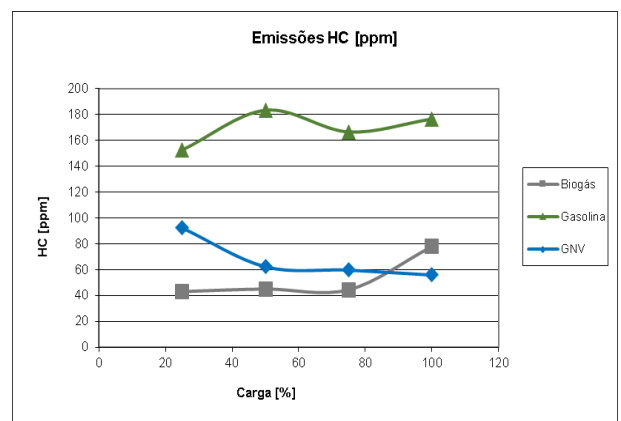


Figura 3. Emissões de HC para os combustíveis utilizados

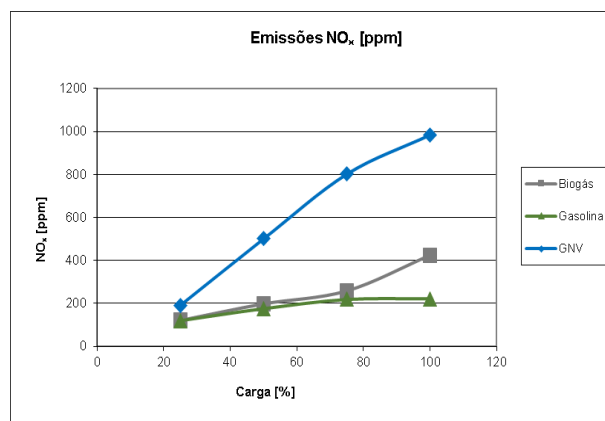


Figura 4. Emissões de NO_x para os combustíveis utilizados

Segundo Korakianitis *et al.* (2011), motores ciclo Otto operando com gás natural geralmente apresentam uma redução de 50 a 90% das emissões de CO em relação à gasolina. Isso pode ser explicado devido ao fato das misturas gasosas (biogás, GNV) serem mais homogêneas, propiciando uma melhor combustão e, por isso, uma redução das emissões de CO.

Temperaturas elevadas na câmara de combustão aumentam a formação de NO_x. No caso, motores operando com GNV possuem maior temperatura de câmara de combustão, o que explica a formação de maiores concentrações de NO_x. Segundo Crookes (2006), para o biogás, o fato de apresentar alta concentração de CO₂ e, portanto, baixo poder calorífico, acarreta uma menor temperatura de combustão na câmara, o que explica os menores níveis de emissões de NO_x.

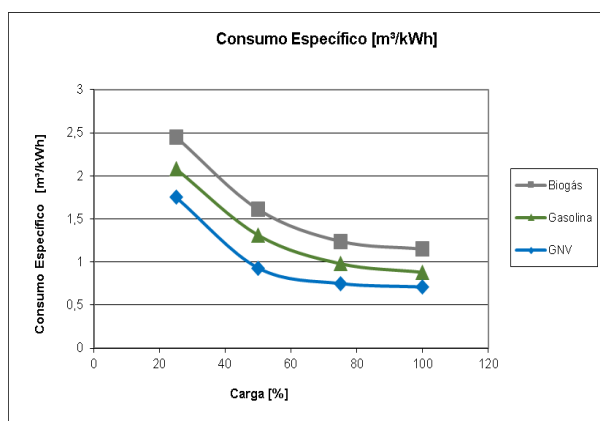


Figura 5. Consumo específico para os combustíveis utilizados

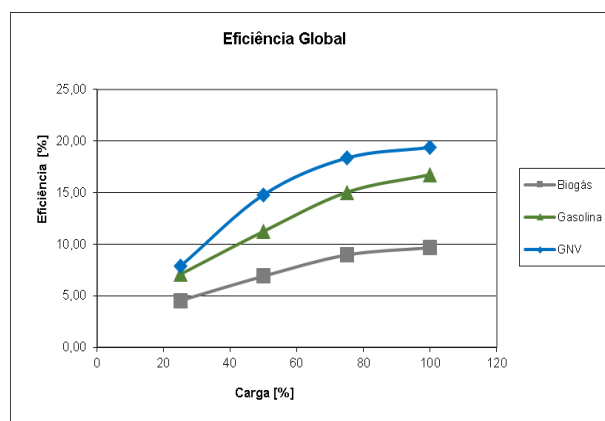


Figura 6. Eficiência global para os combustíveis utilizados

As Fig. 5 e 6 mostram que, operando com GNV, o motor apresenta valores inferiores de consumo específico, e superiores de eficiência, em relação ao motor utilizando gasolina. Já operando com biogás o motor apresentou maior consumo. Isto é devido ao baixo poder calorífico deste combustível em relação aos demais. Os resultados se mostraram semelhantes aos obtidos em Crookes (2006), o que pode ser explicado pela melhor relação consumo/potência obtida pelo gás natural.

3.2. Ensaio com biogás – influência da variação da relação ar-combustível

Nas Fig. 7, 8 e 9 mostram as variações das emissões e do consumo específico de combustível apresentadas pelo motor operando com biogás em função da razão de equivalência (λ). Os dados ilustrados nos ensaios apresentados neste capítulo mostram os resultados em função da carga do motor e com a razão de equivalência variando numa faixa de 0,95 a 1,07.

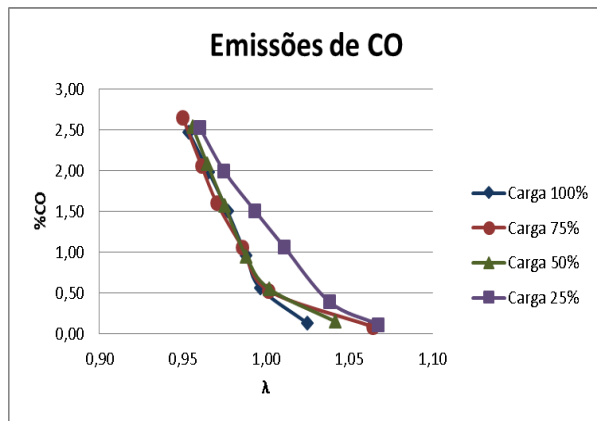


Figura 7. Emissões de CO em função da relação ar-combustível (λ)

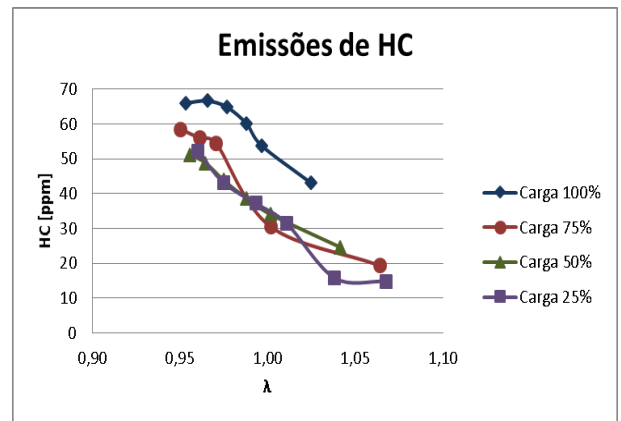


Figura 8. Emissões de HC em função da relação ar-combustível (λ)

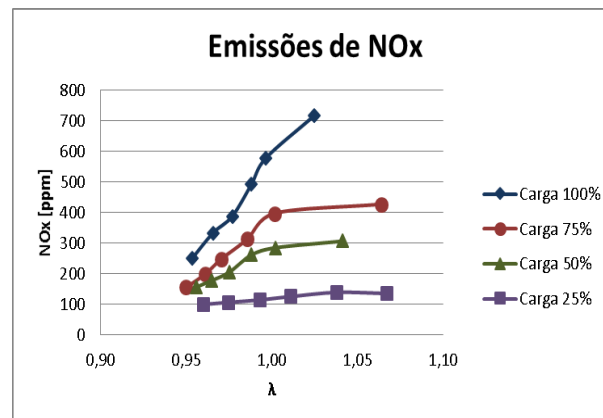


Figura 9. Emissões de NO_x em função da relação ar-combustível (λ)

A diminuição das emissões de CO em função do empobrecimento da mistura era esperada e está de acordo com os dados reportados na literatura Heywood (1988). Em misturas ricas ($\lambda < 1$) não há ar suficiente para queima completa da mistura, o que explica a elevada concentração de CO. O mesmo comportamento das emissões de CO acontece com a de HC, a Fig. 8 apresenta o decréscimo nas emissões de HC com o aumento da razão de equivalência (λ). A Fig. 9 mostra o aumento nas emissões de NO_x com o aumento da razão de equivalência. Isso se deve a maior quantidade de oxigênio livre (O₂) que irá se combinar com o nitrogênio (N₂) presente no ar devido ao excesso de ar.

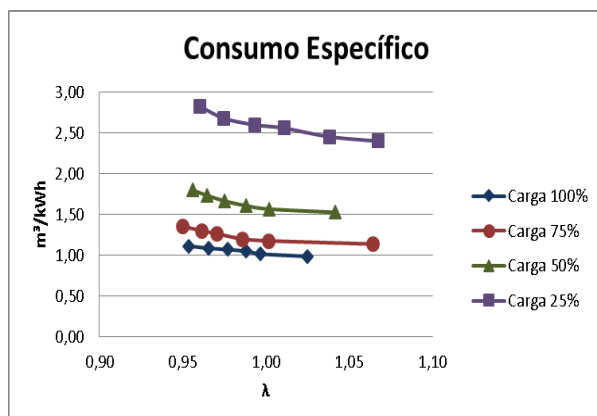


Figura 10. Consumo específico em função da relação ar-combustível (λ)

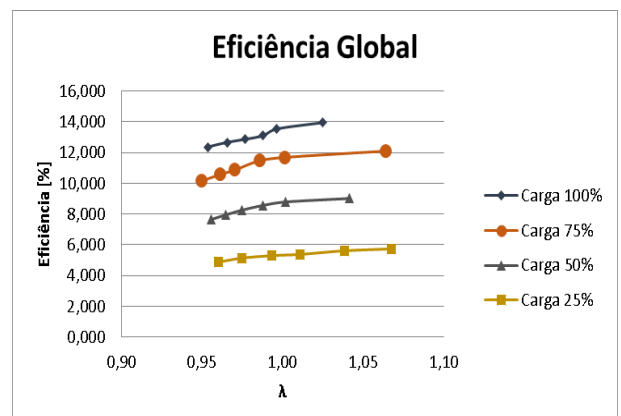


Figura 11. Eficiência global em função da relação ar-combustível (λ)

As Fig. 10 e 11 mostram, respectivamente, a diminuição do consumo específico, e consequentemente, o aumento da eficiência do motor, com o aumento da razão de equivalência (λ).

Embora o consumo de combustível aumente com o aumento da carga, o consumo específico de combustível (m^3/kWh) diminui com o aumento da carga. Isso se deve ao fato de que o aumento da potência é maior do que o aumento do consumo de combustível (PORPATHAM *et al.*, 2008).

A tendência mostrada na Fig. 10 é de diminuir o consumo de combustível à medida que empobrecemos a mistura. Como a vazão de ar é fixa, o empobrecimento da mistura ocorre através da diminuição da vazão de combustível.

3.3. Ensaios com biogás – influência da variação do avanço de ignição

A influência do avanço de ignição nas emissões de CO_2 , CO, HC e NO_x e desempenho do motor quando operando com biogás, em diferentes cargas e λ constante, serão analisados.

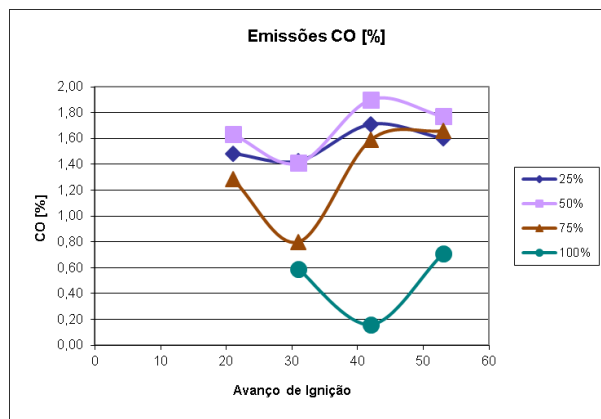


Figura 12. Emissões de CO em função do avanço de ignição

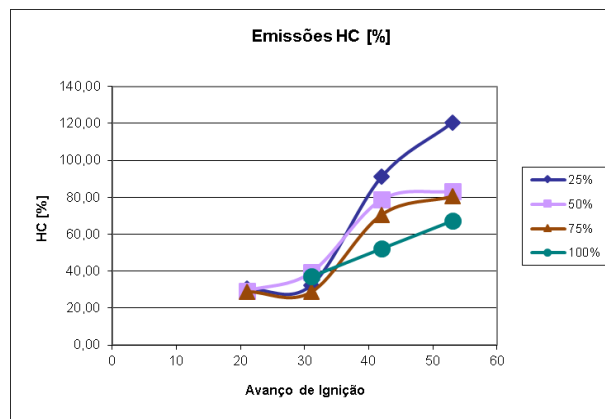


Figura 13. Emissões de HC em função do avanço de ignição

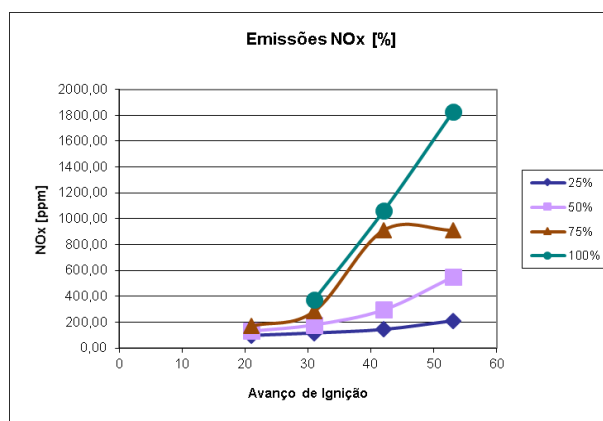


Figura 14. Emissões de NO_x em função do avanço de ignição

Percebemos na Fig. 12 que para todas as cargas, com exceção da carga máxima (100%), os menores níveis de emissões de CO são encontrados para o avanço de 31° apms. A Fig. 13 apresenta a evolução das emissões de HC conforme aumentamos o avanço de ignição. Podemos observar que os maiores níveis de HC são encontrados para o ponto de ignição de 53°. Podemos observar na Fig. 14 o aumento das emissões de NO_x para maiores avanços de ignição. Por ser um gás com baixa velocidade de propagação de chama (PORPATHAM *et al.*, 2012), o biogás usualmente apresenta maiores temperaturas de combustão para pontos de ignição adiantados, o que causará o aumento nos níveis de NO_x .

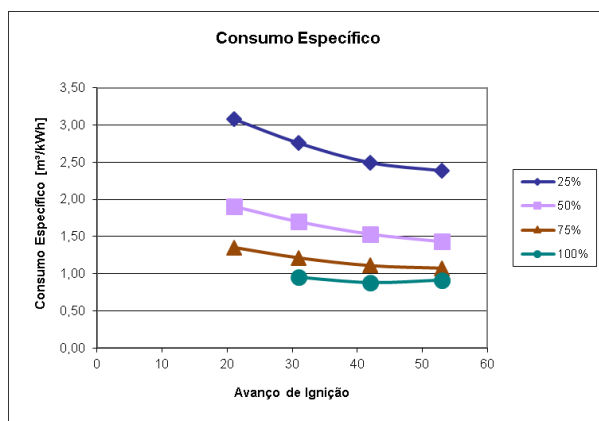


Figura 15. Consumo específico em função do avanço de ignição

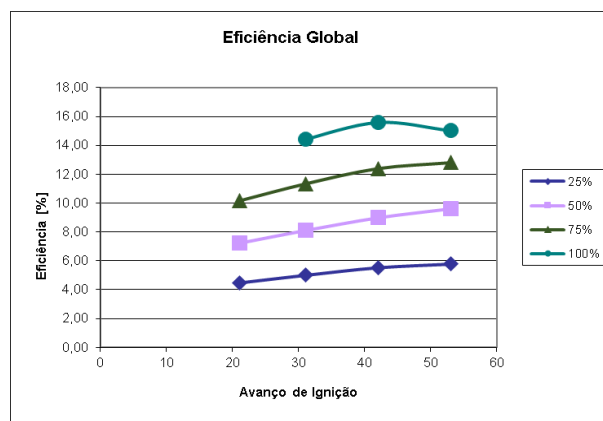


Figura 16. Eficiência global em função do avanço de ignição

O biogás apresenta baixa velocidade de propagação de chama, logo, maiores avanços tendem a minimizar os efeitos dessa propriedade, levando a ganhos no desempenho do motor. Pode-se afirmar que o consumo específico mínimo e eficiência máxima são apresentados para o motor operando com o avanço de 53° apms, com exceção para a operação em carga máxima.

4. CONCLUSÕES

Foram feitos estudos para otimizar a performance do motor de combustão interna e as emissões, por meio de alterações nos parâmetros operacionais do mesmo. Os parâmetros estudados foram a relação ar/combustível e avanço de ignição.

Quando comparado com gasolina e GNV, os valores das emissões nos gases de exaustão nos testes realizados com biogás foram inferiores aos do mesmo motor operando com gasolina e semelhantes aos resultados obtidos com o gás natural. A exceção é o caso das emissões de CO₂, explicado pelas grandes concentrações já presentes no biogás. No caso do NO_x, o gás natural apresenta valores mais elevados devido as temperaturas mais altas atingidas durante seu processo de queima, enquanto que se mantém praticamente constante para a gasolina e o biogás, uma vez que o CO₂ presente no biogás tem um efeito diluente, diminuindo a intensidade de sua combustão. O biogás apresentou maior consumo de combustível em relação ao mesmo motor operando com gasolina ou gás natural. O que já era esperado devido ao seu baixo poder calorífico (PCI) quando comparado com os outros combustíveis.

Variando-se a relação A/C, as emissões de HC e de CO diminuem com o aumento da relação A/C, ou seja, aumentando-se λ . O fato pode ser explicado pela melhora na qualidade da combustão, uma vez que, nessas condições, o motor opera mais próximo da região estequiométrica. As emissões de CO₂ e NO_x seguem a tendência inversa, aumentando de valor. Entretanto, as emissões de CO₂ tem um comportamento mais complexo, diminuindo após $\lambda=1$.

Com relação ao avanço de ignição, o menor consumo específico de combustível é encontrado para o maior avanço de ignição (53° apms), o que significa que para uma determinada potência, este avanço implica em menor consumo. Já as emissões de CO e HC são otimizadas no ponto de avanço original do motor, de 31° apms. Os valores mínimos de NO_x são encontrados em 21° apms, onde a combustão se apresenta ainda bastante incipiente, enquanto os níveis mais baixos de CO₂ são encontrados no avanço de 53° apms.

5. REFERÊNCIAS

- COELHO, S. T., VELÁZQUEZ, S. M., PECORA, V., e DE ABREU, F. C., 2006, "Geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do tratamento de esgoto," em XI Congresso Brasileiro de Energia, Rio de Janeiro.
- CROOKES, R., 2006, "Comparative bio-fuel performance in internal combustion engines," Biomass and Bioenergy, Vol. 30, pp. 461-468.
- DANTAS, F., e DE OLIVEIRA, E., 2011, "Relatório de ensaio N° 345," Instituto Nacional de Tecnologia, Rio de Janeiro.
- DEUBLEIN, D., and STEINHAUSER, A., 2008, "Biogas from waste and renewable resources", Ed. Wiley-VCH, 443 p.
- HEYWOOD, J.B., 1988, "Internal Combustion Engine Fundamentals", 1ª ed., New York: McGraw-Hill, Inc., 930 p.
- KORAKIANITIS, T., NAMASIVAYAM, A., e CROOKES, R., 2011, "Natural-gas fueled spark-ignition (SI) and compression-ignition (CI) engine performance and emissions," Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 37, pp. 89-112.
- MACHADO, D. O., 2014, "Análise de desempenho de um motor ciclo Otto com biogás," Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo.

- PORPATHAM, E., RAMESH, A., e NAGALINGAM, B., 2008, "Investigation on the effect of concentration of methane in biogas when used as a fuel for a spark ignition engine," Fuel, Vol. 87, pp. 1651-1659.
- PORPATHAM, E., RAMESH, A., e NAGALINGAM, B., 2012, "Effect of compression ratio on the performance and combustion of a biogas fuelled spark ignition engine," Fuel, Vol. 95, pp. 247-256.
- SOUZA, R. G., SILVA, F. M. e BASTOS, A. C., 2010, "Desempenho de um conjunto motogerador adaptado a biogás," Ciência e Agrotecnologia, vol. 34, pp. 190-195.

6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os trabalhos escritos em português ou espanhol devem incluir (após direitos autorais) título, os nomes dos autores e afiliações, o resumo e as palavras chave, traduzidos para o inglês e a declaração a seguir, devidamente adaptada para o número de autores.

"O(s) autor(es) é(são) o(s) único(s) responsável(is) pelo conteúdo deste trabalho".

Performance and Emission Analysis of Motor Generator Operating with Biogas

Victor Vasconcelos Barreto, victor_v_barreto@poli.ufrj.br¹

Sílvio Carlos Aníbal de Almeida, silvioa@gmail.com¹

Carlos Rodrigues Pereira Belchior belchior@peno.coppe.ufrj.br²

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, Poli/COPPE/UFRJ, Centro de Tecnologia, Bloco G, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, Brasil, CEP 21945-970

²Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Engenharia Oceanica - COPPE - UFRJ, Centro de Tecnologia, Bloco C, sala 209, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, Brasil, CEP 21945-970

Abstract: *This work aims to optimize the performance of an internal combustion engine fueled with biogas. Tests were performed on an engine-generator set Otto cycle model B4T 5000 Bio 4 kW, operating initially with three different fuels: gasoline, CNG and biogas. Measurements of emissions and consumption were made to the engine-generator set operating on four separate charges, which correspond to 25%, 50%, 75% and 100% of the nominal motor power. When compared to gasoline and CNG, emission values on the exhaust gases in the tests done with biogas were inferior than the same engine operating with gasoline and similar to the results obtained with natural gas. The exception is the CO₂ emissions, which can be explained by large concentrations already present in the biogas. Biogas presented increased fuel consumption because of your low heating value (LHV). In a second stage, more detailed tests were performed, operating only with biogas. Once the biogas has specific characteristics, some parameters were changed in order to determine their influence on performance and emissions. The parameters studied in addition to the load, were the air-fuel ratio and the engine ignition advance.*

Keywords: *Otto Engine, Biofuel, Biogas, Performance Analysis*