

ANÁLISE DE DESEMPENHO E DE EMISSÕES EM UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA ALIMENTADO COM BIOGÁS

V. V. Barreto^a,
S. C. A. Almeida^a,
e C. R. P. Belchior^b

^a Universidade Federal do Rio de Janeiro,
Departamento de Engenharia Mecânica -
Brasil

^b Universidad Federal do Rio de Janeiro,
Programa de Engenharia Oceânica - COPPE -
Brasil

Contact Information
silvioa@gmail.com.
belchior@oceanica.ufrj.br
victor_v_barreto@poli.ufrj.br

ABSTRACT

The present work aims to optimize the performance of an internal combustion engine fueled with biogas. Tests were carried out in a 4 kW Otto cycle engine-generator powered initially with three different fuels: gasoline, compressed natural gas (CNG) and biogas. Fuel consumption and emissions were measured at four different engine nominal power loads (25%, 50%, 75% and 100%). In the performed tests, the values of CO and HC emissions measured with biogas were lower than the results obtained in the tests carried out with the CNG. NO_x emissions were higher in the tests performed with CNG due to the higher temperatures reached during the combustion process. The presence of CO₂ in the biogas has a diluent effect, which decreases the temperature in the combustion chamber. The biogas presented higher fuel consumption due to its low calorific value. In a second phase, more detailed tests were performed with the engine running on biogas only. Since biogas has specific characteristics, some engine parameters have been modified to determine its influence on engine performance and emissions. The studied parameters were the air-fuel ratio and the spark ignition timing. For both parameters studied a decrease in specific fuel consumption and an increase in overall efficiency was observed.

Keywords: biogas, biofuels and internal combustion engines

NOMENCLATURA

θ_{amps} graus antes do ponto morto superior
CEC consumo específico de combustível, kg/(kWh)
GNV gás natural veicular
 \dot{m}_{comb} vazão mássica de combustível, kg/h
 \dot{m}_v vazão volumétrica de combustível, m³/h
PCI poder calorífico inferior, MJ/kg
P_i potência indicada do motor, kW

Simbolos gregos

η_g eficiência global do motor
 λ razão de equivalência
 ρ massa específica, kg/m³

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 de resíduos. A desvantagem do biogás reside no seu baixo poder

calorífico e na 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 presente no biogás não exceda a 0,05 % em volume [1].

Diversos autores têm estudado o emprego de biogás em motores de combustão interna [2-6]. Porpatham *et al.* [2] estudaram a influência da taxa de compressão no desempenho de um motor alimentado com biogás. Coelho *et al.* [4] analisaram os sistemas de purificação que são empregados em motores alimentados com biogás. Souza *et al.* [5] estudaram a influência da mistura ar-combustível e do avanço de ignição um motor-gerador ciclo Otto, para operar com biogás. Machado [6] faz uma análise do desempenho de um motor ciclo Otto operando com

gasolina e biogás e apresenta os resultados do consumo específico e das emissões.

O presente trabalho apresenta os resultados dos testes de desempenho e de emissões 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.

MATERIAL E MÉTODOS

O aparato Experimental foi instalado na planta produtora de biogás, da Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) da Alegria (RJ). Deste modo, o motor é abastecido diretamente no local, evitando assim a necessidade de armazenar e transportar o combustível. A Figura (1) mostra o conjunto motor-gerador e o aparato experimental utilizado.

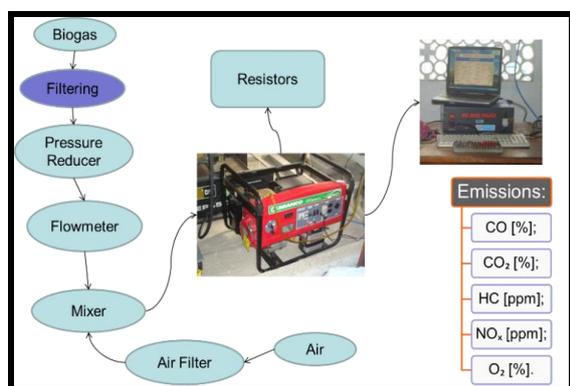


Figura 1. Bancada de Testes.

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

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.

Utilizou-se um grupo motor-gerador, ciclo Otto, modelo B4T 5000 Bio, fabricado pela empresa Branco. A Tab. (1) apresenta as principais características do motor.

Tabela 1. Características do motor.

Parâmetro	Valor
Potência máxima	4 kW
Potência nominal	3,6 kW
Voltagem	110/220 V
Frequência	60 Hz
Voltagem de carga	12 V
Corrente de carga	8,3 A
Cilindrada	389 cc
Comprimento	695 mm
Largura	555 mm
Altura	580 mm
Peso líquido	80 kg
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 por um 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 depois do processo de filtragem, ou seja, na entrada do gerador.

Tabela 2. Composição do biogás produzido na ETE da Alegria.

Característica	Entrada do Gerador
CH_4	67,5 %
CO_2	24,1 %
N_2	6,7 %
O_2	1,68 %
Massa específica (calculada)	1,0633 kg/m ³
PCI	24,59 MJ/kg

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

$$CEC = \frac{\dot{m}_{comb.}}{P_n} \quad (1)$$

onde CEC é o consumo específico de combustível [kg/kWh]; $\dot{m}_{comb.}$ a vazão mássica de combustível [kg/h] e P_n a potência nominal do motor [kW].

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:

$$\dot{m}_{comb.} = \dot{m}_v \rho \quad (2)$$

onde \dot{m}_v é a vazão volumétrica de combustível [m³/h] e ρ é a massa específica [kg/m³].

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

$$\eta_g = \frac{3600}{\text{CEC} \cdot \text{PCI}} \quad (3)$$

onde PCI é o poder calorífico inferior [MJ/kg].

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O consumo de gasolina foi medido através de pesagem em balança digital e a vazão de gás e biogás foram feitas através de um medidor de gás. As emissões foram medidas por um analisador de gases NAPRO.

Ensaio com Gasolina, Gás Natural 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 Figuras (2), (3) e (4), respectivamente.

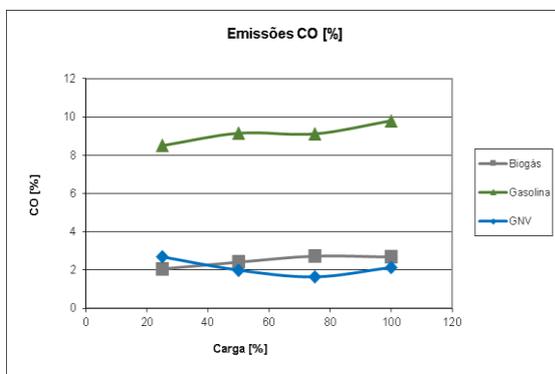


Figura 2. Emissões de CO para os combustíveis utilizados.

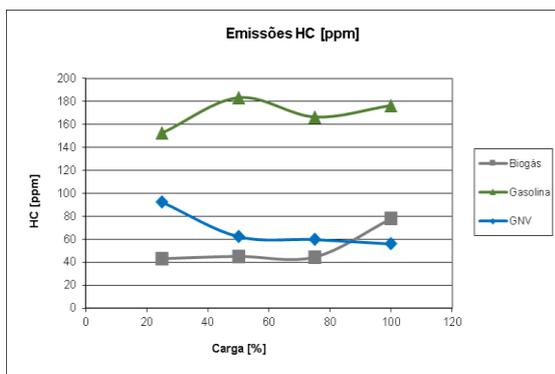


Figura 3. Emissões de HC para os combustíveis utilizados.

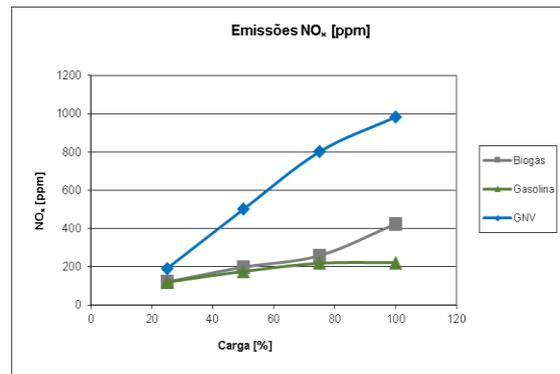


Figura 4. Emissões de NO_x para os combustíveis utilizados.

Segundo Korakianitis *et al.*[8], 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. Motores operando com GNV possuem maior temperatura de câmara de combustão, o que explica a formação de maiores concentrações de NO_x. Segundo Crookes [3], o fato do biogás apresentar alta concentração de CO₂ e, portanto, baixo poder calorífico, acarretaria uma menor a temperatura de combustão, o que explica os menores níveis de emissões de NO_x, conforme se observa na Figura (4).

As Figuras (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 se explica devido ao baixo poder calorífico do biogás em relação aos demais. Os resultados se mostraram semelhantes aos obtidos por Crookes [3], o que pode ser explicado pela melhor relação consumo/potência obtida pelo gás natural.

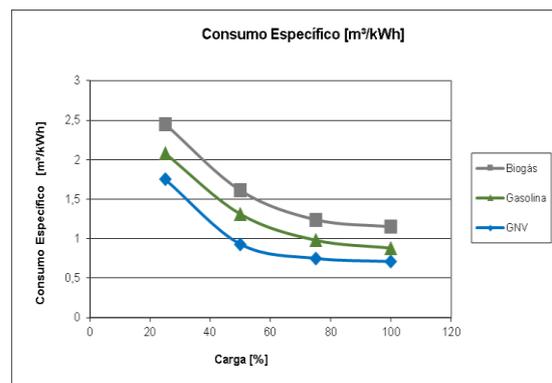


Figura 5. Consumo específico para os combustíveis utilizados.

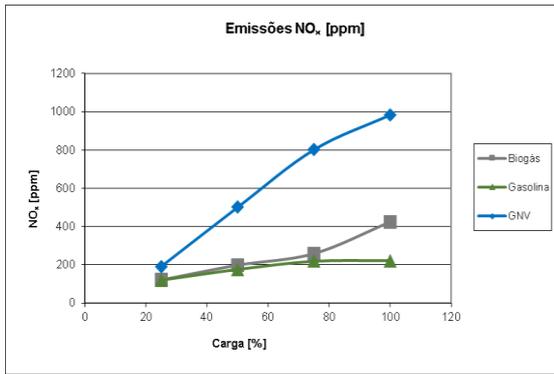


Figura 6. Eficiência global para os combustíveis utilizados.

Ensaio com Biogás – Influência da variação da Relação Ar-Combustível

As Figuras (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). A razão de equivalência varia na faixa de 0,95 a 1,07 e as medidas são feitas em diferentes cargas.

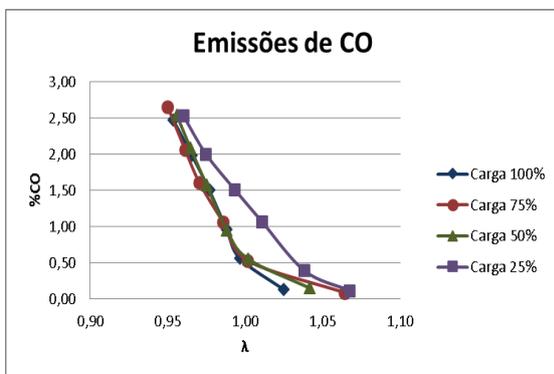


Figura 7. Emissões de CO em função da razão de equivalência (λ).

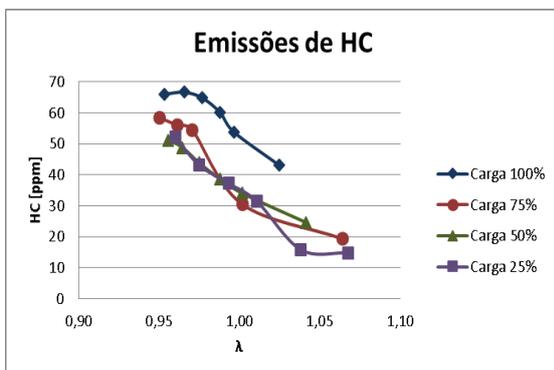


Figura 8. Emissões de HC em função da razão de equivalência (λ).

A diminuição das emissões de CO em função do empobrecimento da mistura era esperada e está de acordo com os dados reportados na literatura [9]. Em

misturas ricas ($\lambda < 1$) não há ar suficiente para queima completa da mistura, o que explica a elevada concentração de CO. Com relação às emissões de HC, o comportamento é semelhante ao das emissões de CO. A Figura (8) apresenta um decréscimo das emissões de HC com o aumento da razão de equivalência (λ).

A Figura (9) mostra um aumento das emissões de NO_x com o aumento da razão de equivalência. Isso se deve à maior quantidade de oxigênio livre (O_2) que irá se combinar com o nitrogênio (N_2) presente no ar, devido ao excesso de ar nas misturas pobres ($\lambda > 1$).

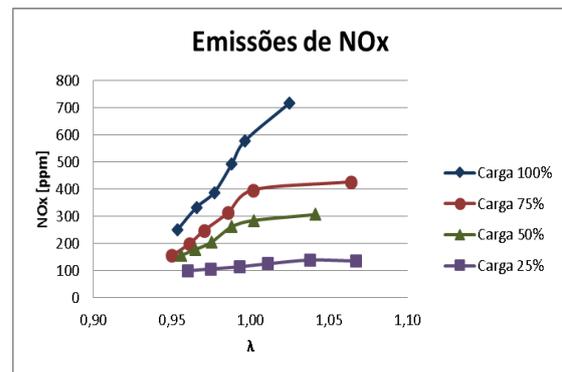


Figura 9. Emissões de NO_x em função da razão de equivalência (λ).

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

Conforme observado na Figura (10), o consumo de combustível diminui à medida que empobrecemos a mistura. No caso do experimento, como a vazão de ar é fixa, o empobrecimento da mistura ocorre através da diminuição da vazão de combustível.

Embora o consumo de combustível aumente com o aumento da carga, o consumo específico de combustível diminui com o aumento da carga. Isso se deve ao fato do aumento da potência ser maior do que o aumento do consumo de combustível [2].

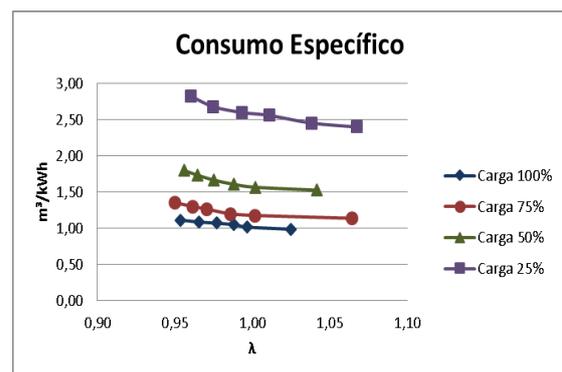


Figura 10. Consumo específico em função da razão de equivalência (λ).

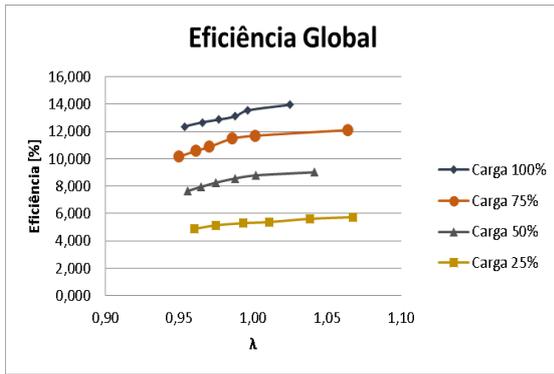


Figura 11. Eficiência global em função da razão de equivalência (λ).

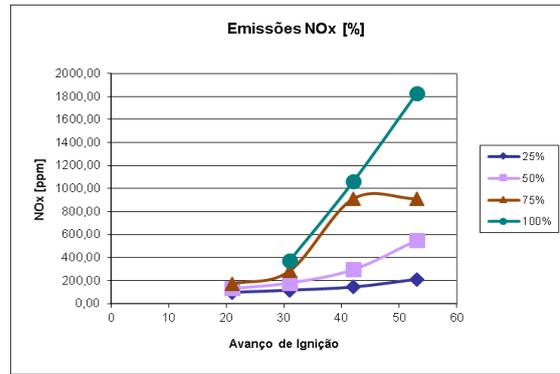


Figura 14. Emissões de NO_x em função do avanço de ignição.

Ensaio com Biogás – Influência da Variação do Avanço de Ignição

As Figuras (12) a (15) ilustram a influência do avanço de ignição nas emissões de CO, HC e NO_x e no desempenho do motor operando com biogás, em diferentes cargas.

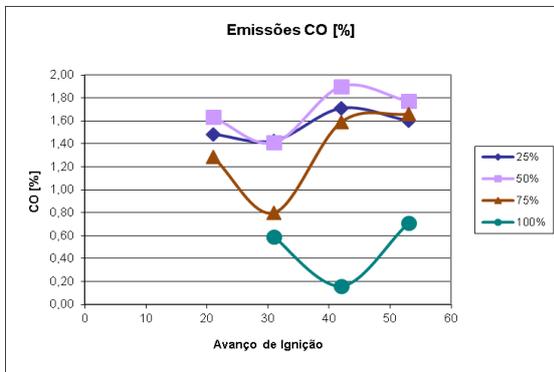


Figura 12. Emissões de CO em função do avanço de ignição.

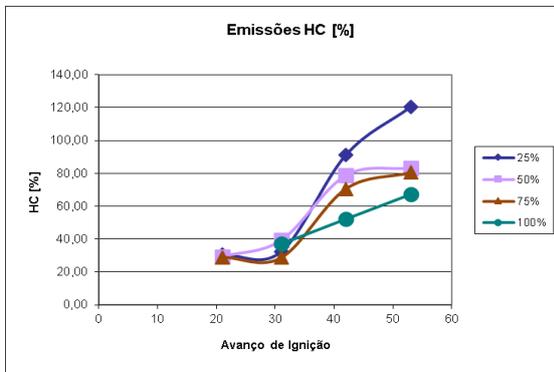


Figura 13. Emissões de HC em função do avanço de ignição.

Note-se que, na Figura (12), 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.

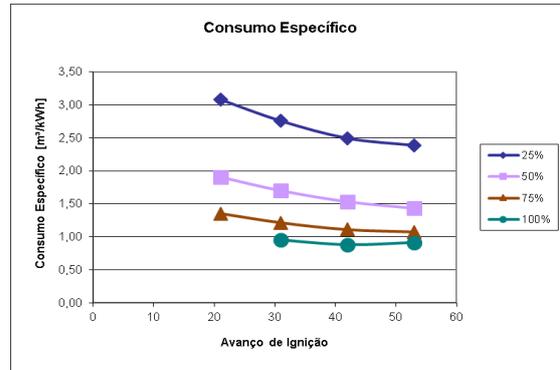


Figura 15. Consumo específico em função do avanço de ignição.

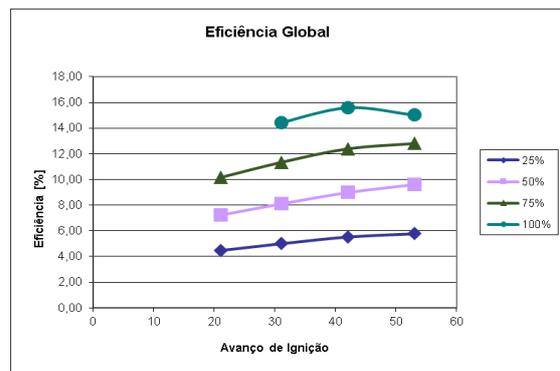


Figura 16. Eficiência global em função do avanço de ignição.

As Figuras (15) e (16) mostram, respectivamente, a diminuição do consumo específico e, conseqüentemente, o aumento da eficiência do motor com o do avanço de ignição.

Conforme observado na Figura (15), o consumo de combustível diminui à medida que aumentamos o avanço. Embora o consumo de combustível aumente com o aumento da carga, o consumo específico de combustível 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 [2].

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.

CONCLUSÕES

Um motor de combustão interna foi adaptado para operar com biogás. Foram feitos ensaios de forma a verificar a influência da relação ar/combustível e avanço de ignição na performance e nas emissões do motor.

Nos ensaios realizados, os valores das emissões de CO e HC nos gases de exaustão, utilizando biogás, foram inferiores aos do mesmo motor operando com gasolina e semelhantes aos resultados obtidos com o gás natural. Nos ensaios do motor com o gás natural, as emissões de NO_x apresentaram valores mais elevados devido às temperaturas mais altas atingidas durante seu processo de combustão, enquanto que se mantem mais baixas para a gasolina e o biogás. A presença de CO₂ no biogás tem um efeito diluente, o que diminui a temperatura na câmara de 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 NO_x seguem a tendência inversa, aumentando de valor.

Com relação ao avanço de ignição, o menor consumo específico de combustível é encontrado para o maior avanço de ignição (53° apms). 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.

REFERENCIAS

1. Deublein, D., and Steinhäuser, A., "Biogas from waste and renewable resources", Ed. Wiley-VCH, 2008, 443p.
2. Porpatham, E., Ramesh, A., e Nagalingam, B., "Investigation on the effect of concentration of methane in biogas when used as a fuel for a spark ignition engine," Fuel, Vol. 87, 2008, pp. 1651-1659.
3. Crookes, R., "Comparative bio-fuel performance in internal combustion engines," Biomass and Bioenergy, Vol. 30, 2006, pp. 461-468.
4. Coelho, S. T., Velazquez, S. M., Pecora, V., e De Abreu, F. C., "Geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do tratamento de esgoto," em XI Congresso Brasileiro de Energia, 2006, Rio de Janeiro.
5. Souza, R. G., Silva, F. M. e Bastos, A. C., "Desempenho de um conjunto motogerador adaptado a biogás," Ciência e Agrotecnologia, vol. 34, 2010, pp. 190-195.
6. Machado, D. O., "Análise de desempenho de um motor ciclo Otto com biogás," Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2014, São Leopoldo.
7. Dantas, F., e De Oliveira, E., "Relatório de ensaio N° 345," Instituto Nacional de Tecnologia, Rio de Janeiro, 2011.
8. Korakianitis, T., Namasivayam, A., e Crookes, R., "Natural-gas fueled spark-ignition (SI) and compression-ignition (CI) engine performance and emissions," Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 37, 2011, pp. 89-112.
9. Heywood, J.B., "Internal Combustion Engine Fundamentals", 1ª ed., New York: McGraw-Hill, Inc., 1988, 930 p.
10. Porpatham, E., Ramesh, A., e Nagalingam, B., "Effect of compression ratio on the performance and combustion of a biogas fuelled spark ignition engine," Fuel, Vol. 95, 2012, pp. 247-256.