

## **AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM “SMALL NON-ROAD ENGINE” OPERANDO COM MISTURAS GASOLINA E ETANOL**

Waldir Nagel Schirmer\*  
Luciano Zart Olanyk\*\*  
Camilo Bastos Ribeiro\*\*\*

**RESUMO:** O presente trabalho avaliou o desempenho de consumo de combustível e as emissões dos gases poluentes monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC) e óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) provenientes da combustão de combustíveis formulados a partir de gasolina pura e misturada a 5, 10, 15, 20 e 25% v/v de etanol anidro. Para tanto, empregou-se um “small non-road engine (SNRE)”, monocilíndrico, 4 tempos, de 196 cc, acoplado a um gerador de potência máxima de 2.400 W, operando sob cargas de 0, 600, 1.200, 1.800 e 2.000 W. Para determinação das emissões gasosas, utilizou-se um analisador automático similar aos normalmente usados em inspeções veiculares. Os resultados mostraram que, com o gradual aumento de etanol à gasolina, as reduções nas concentrações de CO, HC e NO<sub>x</sub> alcançaram 75, 67, e 7% para a menor carga (0 W) e 189, 3, e 43% para a maior carga (2000 W), respectivamente, apesar de ser verificado aumento médio de 10% no consumo mássico de combustível.

**PALAVRAS-CHAVE:** Biocombustíveis; Combustão; Emissões atmosféricas; Motores de ignição por centelha.

## **ASSESSMENT OF THE PERFORMANCE OF SMALL NON-ROAD ENGINE WITH A MIXTURE OF PETROL AND ETHANOL**

**ABSTRACT:** Fuel consumption and the emission of pollutant gases, carbon monoxide (CO), hydrocarbons (HC) and nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>), derived from fuel combustion formulated from pure petrol and mixed at 5, 10, 15, 20 and 25% v/v of dehydrated ethanol are evaluated. A monocylindric, four stroke, 196 cc, small non-road engine (SNRE), locked to a generator with maximum power of 2,400 W, at 0, 600, 1.200, 1.800 and 2.000 W, was employed. An automatic analyzer similar to that normally

---

\* Docente Associado do curso de Engenharia Ambiental e Mestrado em Bioenergia; Doutor em Engenharia Ambiental pela UFSC, Brasil; E-mail: [wanasch@hotmail.com](mailto:wanasch@hotmail.com)

\*\* Docente Assistente do curso de Engenharia Mecânica; UTFPR, Câmpus Guarapuava, PR, Brasil

\*\*\* Mestre em Bioenergia pela UNICENTRO, Irati, PR, Brasil.

---

employed in the inspection of engines was used to determine gas emission. Results showed that decreases in CO, HC and NO<sub>x</sub> concentrations reached 75, 67 and 7% for the lowest charge (0 W) and 189, 3 and 43% for the highest one (2000 W), respectively, due to the gradual addition of ethanol to petrol. However, a mean 10% increase in fuel consumption was reported.

**KEY WORDS:** Biofuels; Combustion; Atmospheric emissions; Spark-ignited engines.

## INTRODUÇÃO

Dentre os motores de combustão interna, os denominados motores não-rodoviários de pequeno porte (ou “small nonroad engines”) são assim definidos por possuírem potências inferiores a 19 kW (equivalente a 25 HP) e aplicações específicas (USEPA, 2008a; USEPA, 2008b), caso de motores de uso industrial, agrícola ou mesmo doméstico de pequeno porte, como geradores, equipamentos de jardinagem movidos à gasolina etc.

Diferentemente do que se observa nos Estados Unidos, onde há legislação que impõe limites para as emissões de gases poluentes, como monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC) e óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) emitidos a partir destes motores (USEPA, 2008b), no Brasil ainda não existe regulamentação ambiental para esta aplicação. Entretanto, os “nonroad engines” têm contribuição significativa na emissão de ozônio (oxidante fotoquímico, tendo como principais precursores os hidrocarbonetos – HC – e óxidos de nitrogênio – NO<sub>x</sub>) e monóxido de carbono (SBAR PANEL, 2001).

Além dos aspectos relacionados às emissões gasosas, ressalta-se que a diminuição das reservas de petróleo, aliada à oscilação de seu preço, reforçam a necessidade da diversificação da matriz energética mundial, motivada ainda pela busca de fontes de energia menos impactantes. No Brasil, as crises do petróleo e constatações de prejuízos ambientais associados ao seu uso fizeram com que o país, a exemplo de muitos outros, intensificasse pesquisas por combustíveis alternativos que assegurassem uma adequada correlação entre o desenvolvimento, preservação ambiental e a eficiência energética (ARGAWAL, 2007). A partir de 2003, o

desenvolvimento de novas tecnologias de motor permitiu a introdução de um novo tipo de veículo (o “flex-fuel”), capaz de utilizar como combustível a gasolina, etanol, ou ainda a mistura de ambos em qualquer proporção (BRASIL, 2012).

Ao longo dos anos, por determinação do governo federal, o percentual de álcool anidro (Álcool Etílico Anidro Combustível - AEAC) adicionado à gasolina tem variado bastante (desde 1990 tem se mantido acima dos 20%) (BRASIL, 2011). Quando adicionados à gasolina, biocombustíveis líquidos, como o etanol, alteram algumas propriedades da mistura (como densidade, volatilidade, octanagem e entalpia de combustão) que, em associação com o tipo de motor e condições de operação do mesmo, influenciam diretamente o consumo de combustível, bem como as emissões dos poluentes (CATALUÑA et al., 2008). Alguns autores, por exemplo, observaram a redução de CO e HC à medida que o etanol foi adicionado à mistura com gasolina (AL-HASAN, 2003; HSIEH et al., 2002; SCHIFTER et al., 2011; WU et al., 2004), correspondente ao aumento do teor de oxigênio proveniente do etanol, enquanto que as emissões de NO<sub>x</sub> dependem da razão ar-combustível (A/C), do estado de conservação e forma de operação do motor (HSIEH et al., 2002; MANAHAN, 2005; SILVA; MENEZES; CATALUÑA, 2008).

Segundo Silva, Menezes e Cataluña (2008), o conhecimento da razão A/C pode ser utilizado para avaliar novos combustíveis e formas de operação que melhorem o desempenho de um motor e reduzam as emissões de poluentes. O valor de lambda ( $\lambda$ ) é definido pela razão entre o A/C real pelo A/C teórico (condições estequiométricas) (HEYWOOD, 1988). Um motor do ciclo Otto pode operar desde regiões onde  $\lambda < 1$  (mistura rica, com combustível em excesso) até  $\lambda > 1$  (mistura pobre, com ar em excesso) passando por  $\lambda = 1$  (condições estequiométricas) (SILVA; MENEZES; CATALUÑA, 2008). Quando a combustão não é estequiométrica, uma fração da energia química do combustível não é liberada na câmara de combustão; assim, valores de  $\lambda$  distantes da unidade (afastados de  $\lambda = 1$ ) correspondem a menores temperaturas, enquanto que valores de  $\lambda$  próximos da unidade coincidem com as maiores temperaturas dentro da câmara de combustão (HEYWOOD, 1988).

Neste contexto, o presente trabalho visa avaliar, comparativamente, o consumo de combustível bem como as emissões gasosas (CO, HC e NO<sub>x</sub>) de um motor-gerador, classificado pela Usepa como “small non-road engine”, operando com misturas gasolina/etanol em diferentes proporções.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 GASOLINA, ETANOL E MISTURAS

Os ensaios empregaram os combustíveis gasolina tipo A (pura) e álcool etílico anidro combustível (AEAC), gentilmente cedidos pela Ipiranga Produtos de Petróleo S.A. de Guarapuava (PR). De modo a verificar a influência de um combustível oxigenado no consumo e emissões gasosas, optou-se por trabalhar com as seguintes misturas etanol/gasolina: 5, 10, 15, 20 e 25% (respectivamente correspondendo a E5, E10, E15, E20 e E25), além da gasolina pura como controle (E0). Ainda, conforme já reportado, nos últimos 25 anos os percentuais de AEAC adicionados à gasolina têm variado entre 20 e 25% (BRASIL, 2011; BRASIL, 2013); assim, a porcentagem de AEAC misturado à gasolina limitou-se a 25% v/v. Após a elaboração das misturas, estas foram acondicionadas em embalagens hermeticamente fechadas, em local refrigerado.

### 2.2 ENSAIOS DE COMBUSTÃO (CARACTERÍSTICAS E MONTAGEM DOS EQUIPAMENTOS)

O aparato experimental consistiu dos seguintes itens:

*a) Grupo motor-gerador (motor acoplado a um gerador):* modelo TG2800, marca Toyama, equipado com um motor monocilíndrico ciclo Otto, com deslocamento volumétrico de 196 cc, taxa de compressão de 8,5:1. Com um ciclo de 4 tempos e alimentação de combustível por carburador, desenvolve potência máxima de 6,5 Hp (4,8 kW) a uma velocidade constante de 3.600 rpm, controlada mecanicamente. Este motor está acoplado a um gerador, operando neste experimento com 110 Volts e com frequência de 60 Hz, derivada da velocidade constante do motor. O gerador possui potência máxima de operação de 2,4 kVA (TOYAMA, 2012).

*b) Painel de dissipação de energia:* tinha a função de dissipar a potência gerada pelo dínamo do gerador. A aferição da carga aplicada ao motor-gerador era continuamente realizada por meio de um medidor de potência, conectado ao painel de dissipação e ao computador.

c) *Analizador automático de gases*: a análise das emissões gasosas, assim como o processamento das informações deu-se por meio de um analisador de gases automático, modelo TM 132 (marca Tecnomotor), utilizado em inspeções veiculares, equipado com dispositivo infravermelho não-dispersivo (NDIR) para detecção de CO e HC e sensores eletroquímicos e eletrônicos para detecção de O<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>, respectivamente. As especificações técnicas do analisador são apresentadas no Quadro 1.

**Quadro 1.** Especificações técnicas do analisador automático de gases

| Especificações técnicas |                      |                           |                    |
|-------------------------|----------------------|---------------------------|--------------------|
| Gás                     | Técnica de medição   | Faixas de medição máximas | Resolução          |
| CO                      | NDIR                 | 10% vol.                  | 0,01%              |
| HC Totais               | NDIR                 | 20.000 ppm <sub>v</sub>   | 1 ppm <sub>v</sub> |
| NO <sub>x</sub>         | Célula eletrônica    | 5.000 ppm <sub>v</sub>    | 1 ppm <sub>v</sub> |
| O <sub>2</sub>          | Célula eletroquímica | 25% vol.                  | 0,01%              |

Fonte: Tecnomotor (2003).

d) *Termômetro digital infravermelho*;

e) *Balança digital de precisão*: para a medida do consumo de combustível.

f) *Computador portátil*: a aquisição de dados das concentrações dos gases, medidas continuamente, foi obtida por meio de software do equipamento instalado no computador.

## 2.3 PROCEDIMENTOS GERAIS DE ENSAIO COM O MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA

As cargas aplicadas ao sistema-motor gerador foram de 0, 240, 600, 1.200, 1.800 e 2.000 W. A literatura mostra que as emissões dos gases gerados em motores de combustão interna são diretamente proporcionais às cargas aplicadas no motor avaliado, daí a importância de variar as condições de carga (BEDOYA; ARRIETA; CADAVID, 2009; MIRANDA, 2007). Preliminarmente, antes da execução de cada ensaio, realizava-se o aquecimento do motor colocando-o em operação por um período aproximado de 40 minutos em carga de 2.000 W.

A coleta de dados cobria um período de 05 minutos para cada ciclo: a cada minuto, anotava-se a variação da massa de combustível na balança, media-se

a temperatura (na parede externa do escapamento do motor) e geravam-se três relatórios de emissões. O grande número de relatório de emissões é corroborado por Hsieh et al. (2002), que atribui súbitas variações nos valores de concentração dos gases pelo movimento recíproco de motores ciclo Otto e propõe várias coletas durante o ensaio para uma mesma carga. Assim, ao final de cada carga, havia cinco medidas de consumo mássico, cinco medidas de temperatura e 15 relatórios de emissões com as concentrações de CO, HC, NO<sub>x</sub> e lambda ( $\lambda$ ); este procedimento foi repetido para os seis ciclos de ensaio (0, 240, 600, 1.200 1.800 e 2.000 W). Uma vez finalizado o ciclo de ensaio, em um período de 05 minutos, trocava-se a mistura de combustível, aquecia-se o motor por 01 minuto e reiniciava um novo ciclo de ensaio; foram ensaiadas as misturas com gasolina A e AEAC, iniciando com E0 e finalizando com E25 e novamente em duplicata.

## 2.4 VERIFICAÇÃO DO CONSUMO DO MOTOR

A avaliação do consumo do motor foi obtida mediante cálculos de consumo mássico em função do tempo. Conforme Equação 1 (GAUER, 2012), o consumo mássico (Cm) foi determinado pela variação da massa de combustível na balança a cada período, com intervalos de 1 minuto.

$$Cm_n = \frac{(M_{n-1}) - (M_n)}{t} \quad \text{Equação (1)}$$

em que: Cm<sub>n</sub> é o consumo mássico [g.min<sup>-1</sup>] do período n; M<sub>n-1</sub> é a massa no início do período [g]; M<sub>n</sub> é a massa final [g] e t correspondente ao período de 01 minuto de ensaio [min].

## 2.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA DO EXPERIMENTO

O delineamento experimental deste trabalho considerou como tratamentos as misturas de combustíveis. Além disso, o planejamento estatístico incorporou a análise de variância, que averigua se as médias são iguais ou diferentes entre si, por meio do teste de Tukey, utilizando o software ASSISTAT.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 AVALIAÇÃO DOS DESEMPENHOS DE CONSUMO DO MOTOR

Os resultados de desempenho de consumo apresentados correspondem aos valores obtidos para todos os conjuntos de misturas de gasolina A com AEAC em associação com as cargas avaliadas (0 a 2000 W).

A Figura 1 apresenta os valores médios de consumo mássico ( $C_m$ ) para as misturas de gasolina A com AEAC em função da carga aplicada no motor-gerador, assim como os respectivos desvios-padrão acima de cada coluna. A análise de variância, realizada pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade, demonstrou grande significância estatística entre as médias.

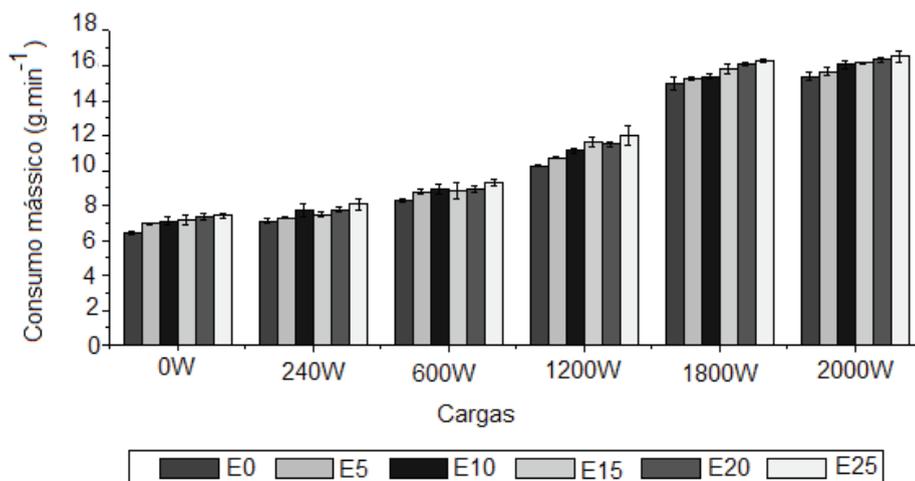


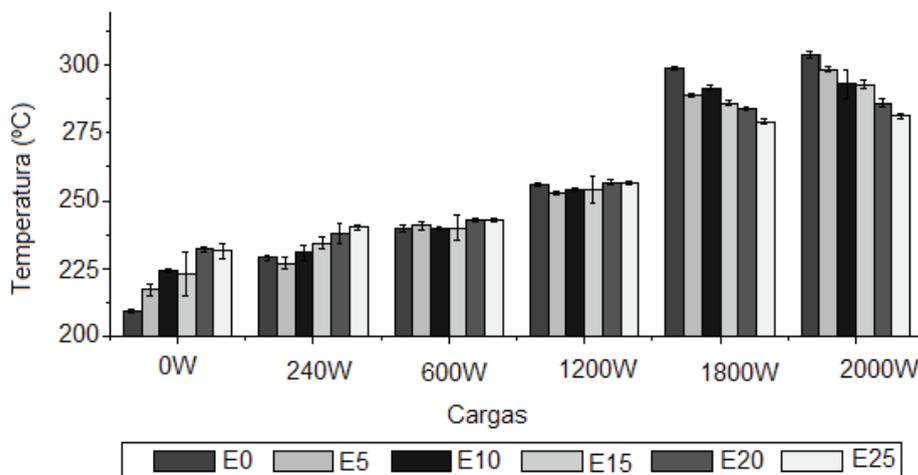
Figura 1. Consumo mássico ( $C_m$ ) para misturas de gasolina A e AEAC em função da carga aplicada.

Observa-se, pela Figura 1, que à medida que se elevam as porcentagens de AEAC na gasolina A, em geral há aumento no  $C_m$  para todos os seis ciclos de ensaio. Segundo Cataluña et al. (2008), a molécula de etanol possui aproximadamente 35% de oxigênio em massa, assim, o aumento do teor de oxigenados (nesse caso, promovido pela adição gradual de etanol à mistura) pode explicar esse aumento no

consumo, uma vez que a entalpia de combustão do etanol é inferior à da gasolina (30 MJ/kg do etanol contra 47 MJ/kg da gasolina pura). Ainda, o poder calorífico do etanol é bem inferior ao da gasolina; logo, para conseguir o mesmo rendimento no motor, maior quantidade de combustível é requerida no caso do etanol (MASUM et al., 2013).

Observa-se ainda aumento do  $C_m$  quando as cargas aplicadas ao motor (0 a 2.000W) sobem. Este fato se justifica pela maior intensidade do campo magnético no gerador, responsável pela geração de energia elétrica e que demanda maiores torques no eixo do motor.

O aumento no consumo de combustível para maiores cargas também se correlaciona à variação de temperaturas dos gases de exaustão (medidas na parede externa do escapamento do motor), como mostra a Figura 2.



**Figura 2.** Variação da temperatura dos gases de exaustão em função das cargas aplicadas e teores de AEAC na mistura.

Constata-se pela Figura 2 que as menores temperaturas foram obtidas na menor carga (0 W), estando entre 200 e 230°C. Em geral, conforme as cargas foram aumentando, as temperaturas dos gases do escapamento elevaram-se pela maior intensidade do campo magnético no gerador, responsável pela geração de energia elétrica para suprir a carga demandada.

A Figura 2 mostra, ainda, que para cada mistura de combustível e cargas avaliadas a temperatura variou de modo diferenciado. À medida que se aumentou a proporção de AEAC nas misturas para as menores cargas (0 e 240 W), notou-se a tendência de aumento nas temperaturas. Por outro lado, para as maiores cargas (1.800 e 2.000 W), esta tendência se inverteu, ocorrendo redução de temperatura. A tendência de aumento na temperatura – para as menores cargas (0 e 240 W) – pode estar associado à oxigenação na constituição do AEAC, promovendo a melhor qualidade na combustão, já que nas menores cargas foram encontradas condições de mistura rica (falta de oxigênio). Contudo, a tendência de redução de temperatura nas maiores cargas (1.800 e 2.000 W), quando se aumentou a proporção de AEAC, pode estar relacionada às alterações nos valores do fator  $\lambda$  de acordo com a carga, e nas maiores cargas, ocorreram as condições de  $\lambda$  abaixo da unidade (mistura pobre), implicando no excesso de oxigênio ao passo que o AEAC foi adicionado.

Segundo Heywood (1988), a qualidade da queima do combustível (ou aproveitamento termodinâmico do combustível) está relacionada com a temperatura e com a quantidade de mistura ar-combustível (A/C) injetada na câmara de combustão. Conforme a Figura 1, menores consumos de combustível (menores volumes de mistura A/C injetados) ocorrem nos regimes de menores cargas. Quanto maior o volume de mistura injetada (maior consumo), maiores são as temperaturas (Figura 2), pressões e torque produzido no eixo do motor. Assim, quanto maiores as quantidades de mistura A/C injetadas mais energia termodinâmica é entregue pelo combustível dentro da câmara de combustão. Heywood (1988) sugere que a melhora na qualidade da combustão proporciona a queima de uma parcela do combustível que eventualmente não seria queimada em regimes de menores cargas. Da mesma forma, por temperaturas maiores em regimes de maiores cargas, a literatura indica eventual queima de outros gases gerados durante o processo de combustão, como o CO e os HC, o que não ocorre em regimes de menores cargas (HEYWOOD, 1988).

O motor utilizado neste estudo opera com carburador, o qual não possui mecanismos capazes de compensar as misturas de A/C em função dos gases de exaustão (WEST et al., 2008), assim, a adição de combustíveis oxigenados (como o AEAC) à gasolina resulta em aumentos no fator  $\lambda$  para todas as cargas, podendo ocorrer variações, e, como consequência, aumento da temperatura dentro da

câmara de combustão (HEYWOOD, 1988). Este fato também foi observado em estudos semelhantes (SILVA; MENEZES; CATALUÑA, 2008; WU et al., 2004). Silva, Menezes e Cataluña (2008) utilizaram as misturas formuladas com 5, 10 e 15% (m/m) de AEAC na gasolina base e um motor monocilíndrico com potência nominal de 7,5Hp acoplado a um gerador de energia elétrica com 4.000W de capacidade máxima de geração. WU et al. (2004), por sua vez, utilizaram as formulações de 5,10, 20 e 30% (m/m) de AEAC na gasolina, operando em um motor de quatro cilindros comercializado no Nissan Sentra do respectivo ano do estudo.

Dessa forma, a Figura 3 apresenta as medidas obtidas para as cinco misturas de gasolina A com AEAC, mais o E0 considerando a variação da relação A/C, medida pelo fator lambda ( $\lambda$ ).

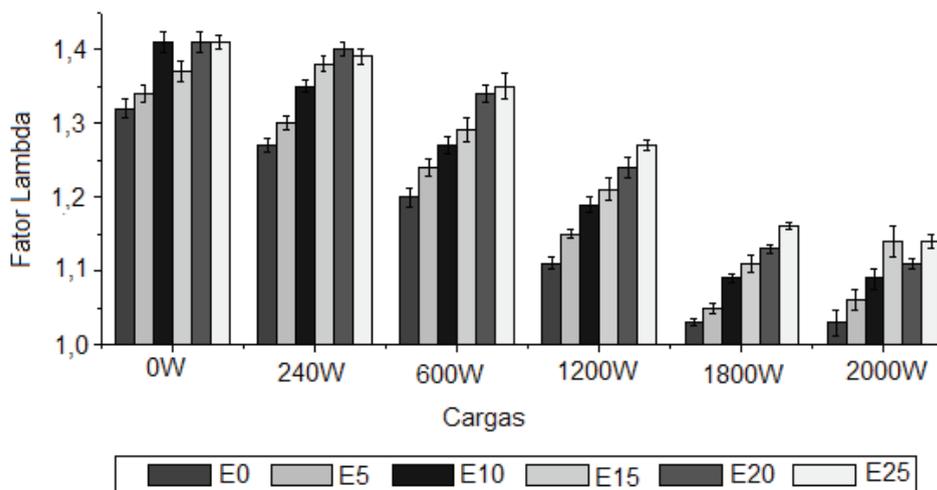


Figura 3. Variação dos fatores lambda em função das cargas aplicadas e teores de AEAC na mistura

Observa-se pelos resultados mostrados na Figura 3 que o valor do fator  $\lambda$  está acima da unidade para todas as misturas. À medida que a carga aplicada ao sistema motor-gerador aumenta, o fator lambda diminui, aproximando-se da unidade, principalmente nas misturas com menor teor de AEAC. O valor de  $\lambda$  mais próximo da unidade implica em uma combustão mais próxima da estequiométrica, resultando diretamente em melhor aproveitamento químico do combustível, uma

vez que a combustão estequiométrica está associada a maiores temperaturas dentro da câmara de combustão (HEYWOOD, 1988). Este fato condiz com as variações de temperatura observadas para as maiores cargas (1800 e 2000 W) na Figura 2, em que as maiores temperaturas são observadas para E0 e as menores temperaturas para E25. Hsieh et al., (2002) estudaram as misturas E0, E5, E10, E20 e E30 e concluíram que a adição de etanol torna a mistura A/C mais pobre para cargas mais altas, corroborando com os valores do fator  $\lambda$  encontrados neste estudo.

### 3.2 AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES GASOSAS DAS MISTURAS DE GASOLINA A COM AEAC

#### 3.2.1 Emissões de monóxido de carbono (CO)

As concentrações de CO para os gases de exaustão do motor de combustão quando operado com misturas de gasolina A com AEAC são mostrados na Figura 4. Em uma primeira análise, verifica-se alteração apenas na média referente à mistura E10 na carga de 0 W; para os outros valores, há significância estatística entre as médias, quando avaliadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

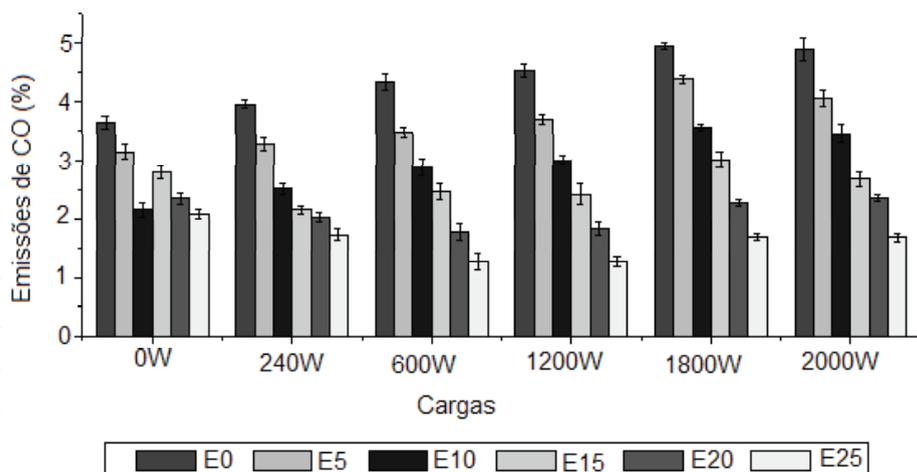


Figura 4. Emissões de CO para misturas com gasolina A e AEAC.

De acordo com a Figura 4, as concentrações de CO se alteram em função da diluição do AEAC à gasolina A. Observa-se que, com a adição de AEAC, menores concentrações de CO são encontradas (para mesmo valor de carga). Comparando os valores de emissões de CO entre E0 e E25, as reduções observadas foram de 75%, 130%, 238%, 254%, 192% e 189% para as cargas 0, 240, 600, 1200, 1800 e 2000 W, respectivamente. Estas reduções podem estar relacionadas à combustão mais eficiente, pelo maior conteúdo de oxigênio presente no AEAC. Outros autores também constataram a redução nas emissões de CO decorrente da adição de etanol na gasolina (HSIEH et al., 2002; JIA, et al., 2005; WU et al., 2004; YANG et al., 2012; ELFASAKHANY, 2015; HERNANDEZ; MENCHACA; MENDOZA, 2014; MASUM et al., 2015; NAJAFI et al., 2015).

Ainda é possível constatar na Figura 4 que as emissões de CO alteram conforme o incremento de cargas ao motor. Nas menores cargas se observam as menores emissões de CO e que elevam com o aumento das cargas. Este efeito pode ser comparado aos resultados concomitantemente às Figuras 2 e 3. Considerando apenas o E0, observa-se que para as maiores cargas (1.800 e 2.000 W), o fator  $\lambda$  está mais próximo da unidade (Figura 3), onde também se observam as maiores temperaturas (Figura 2), diferentemente do que ocorre para as menores cargas. Assim, observando a Figura 4, pode-se supor que nas menores cargas se observam as menores emissões de CO, já que estas reduzem quando  $\lambda$  assume valores crescentes, muito acima da unidade ( $\lambda > 1$ ). Também é razoável afirmar que o aumento do  $C_m$  pelo aumento das cargas, deveria proporcionar maiores concentrações de CO na exaustão do motor (dada a maior massa de combustível e quantidade de carbono presente dentro da câmara de combustão). Porém, com a elevação das cargas, o aumento das emissões de CO não seguiu a mesma proporção de aumento do  $C_m$ . Ou seja, enquanto o  $C_m$  aumentou 58% (comparando 0 e 2.000 W para E0 - Figura 1), as emissões de CO subiram apenas 25% (comparando 0 e 2.000 W para E0 - Figura 4). Este fato pode estar relacionado ao melhor aproveitamento termodinâmico do combustível, pois o fato de  $\lambda$  se apresentar mais próximo da unidade nas maiores cargas (1.800 e 2.000 W), indica que a combustão é aproximadamente estequiométrica, em que maiores temperaturas são observadas (Figura 2). Assim, para este procedimento, em que se variam as cargas, observou-se que apesar do fator  $\lambda$  estar muito acima da unidade

nas menores cargas e mais próximo da unidade para as maiores cargas (Figura 4), a variação das concentrações de CO também foi influenciada pela variação das cargas aplicadas ao motor.

### 3.2.2 Emissões de hidrocarbonetos (HC)

Os valores das médias das emissões para HC podem ser visualizados na Figura 5. Pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, percebe-se que alguns valores não apresentam significância estatística, mas há tendência destes valores se mostrarem na ordem decrescente quando se reduz o teor de AEAC na mistura de combustível.

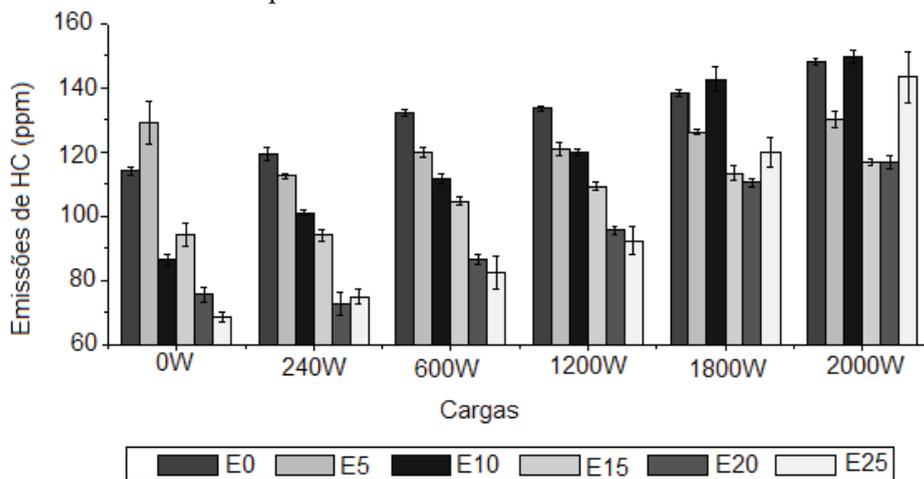


Figura 5. Emissões de HC para misturas com gasolina A e AEAC

Para um mesmo valor de carga, percebe-se que há tendência de redução nas emissões de HC em função do aumento do teor de AEAC na gasolina, embora tenham existido distorções nos resultados nas maiores cargas (1800 e 2000 W). Comparando os valores entre E0 e E25, estas reduções foram de 67%, 59%, 60%, 45%, 15% e 3% para as cargas 0, 240, 600, 1.200, 1.800 e 2.000 W, respectivamente. As reduções nas concentrações de HC obtidas em função da adição de AEAC à gasolina A são similares aos resultados encontrados por outros autores (HSIEH et al., 2002; JIA et al., 2005; WU et al., 2004; YANG et al., 2012; ELFASAKHANY, 2015; HERNANDEZ; MENCHACA;

MENDOZA, 2014; MASUM et al., 2015; NAJAFI et al., 2015). Assim como observado para as emissões de CO, este efeito também está associado ao maior teor de oxigênio na combustão, pela adição de AEAC. Quando o teor de oxigênio aumenta, a mistura se torna mais pobre e há a tendência de redução na emissão destes gases.

Semelhantemente às emissões de CO, as emissões de HC também são influenciadas pela variação nas cargas aplicadas ao motor. Realizando a mesma comparação efetuada para as emissões de CO, enquanto o Cm aumentou 58% (comparando as cargas de 0 e 2000 W, para E0 - Figura 1), as emissões de HC aumentaram menos da metade, 23% (comparando as cargas de 0 e 2000 W, para E0 - Figura 5). Ou seja, emissões de HC e Cm também não seguiram o mesmo aumento proporcional, tal como observado no caso do CO.

### 3.2.3 Emissões de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>)

A Figura 6 apresenta os valores de emissões de NO<sub>x</sub> para as misturas de gasolina A com AEAC. Verificou-se que as médias para as cargas de 0 e 1.200 W tiveram baixa significância estatística quando avaliadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, diferente das cargas 240, 600, 1.800 e 2.000 W, cujas médias diferiram estatisticamente.

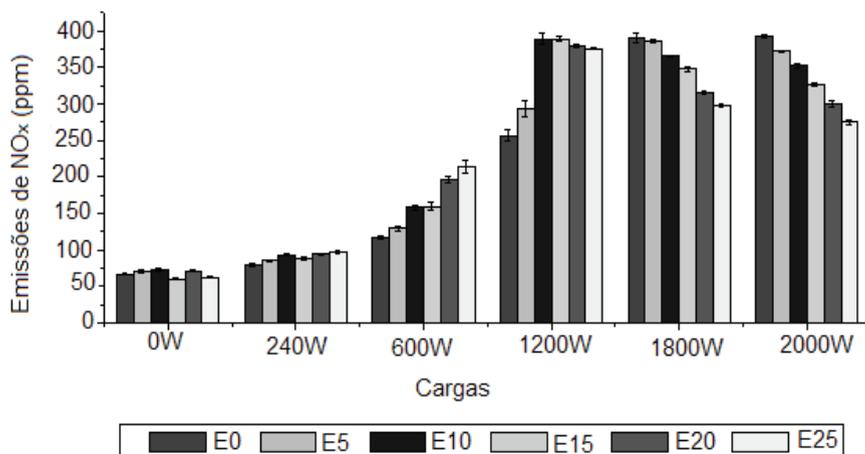


Figura 6. Emissões de NO<sub>x</sub> para misturas com gasolina A e AEAC.

Observa-se que a variação das emissões de  $\text{NO}_x$  é distinta daquela observada para CO e HC. Contudo, as emissões de  $\text{NO}_x$  se assemelham à variação de temperatura verificada na Figura 2. Pela Figura 6 constata-se menores concentrações de  $\text{NO}_x$  para as condições de menor carga (correspondendo também às menores temperaturas – Figura 2) e, conforme as cargas aumentam (concomitantemente às temperaturas dos gases de exaustão), as concentrações de  $\text{NO}_x$  aumentam, corroborando com a literatura, que reporta variação nas emissões de  $\text{NO}_x$  em função das temperaturas observadas nos gases de escape (HEYWOOD, 1988).

A Figura 6 também exhibe oscilação nas concentrações deste gás quando se aumenta a proporção de AEAC na gasolina A para as diferentes cargas, similar aos resultados encontrados por Costa e Sodré (2010). Tal oscilação pode estar relacionada tanto à entalpia de vaporização do etanol, quanto à variação do fator  $\lambda$  para este tipo de motor. Nas menores cargas, em que se verificam misturas A/C muito pobres (Figura 3), o aumento gradual de etanol à gasolina pode proporcionar maiores temperaturas de chama pela sua alta entalpia de vaporização (que confere aumento na densidade da mistura A/C, melhorando a qualidade da queima). Isto favorece a formação de maiores concentrações de  $\text{NO}_x$  nas menores cargas (SILVA, MENEZES e CATALUÑA, 2008). Verifica-se, portanto, neste estudo, que as menores emissões de  $\text{NO}_x$ , nas menores cargas, ocorreram justamente para as misturas com menor quantidade de etanol.

Por outro lado, para maiores cargas, o oxigênio presente na molécula do etanol pode ter maior influência sobre a queima, tornando a mistura A/C mais pobre e reduzindo a temperatura dentro da câmara de combustão. Segundo afirma Hsieh et al. (2002), as concentrações de  $\text{NO}_x$  ficam maiores à medida que  $\lambda$  se aproxima da unidade. Nestas condições, o processo de combustão é mais perto da estequiométrica produzindo uma chama de temperatura mais alta, que eleva as emissões de  $\text{NO}_x$ . Este fato é coerente com a variação de  $\lambda$  apresentado na Figura 3. Neste caso, observa-se correlação com os maiores valores de emissões de  $\text{NO}_x$  e valores nos quais  $\lambda$  se aproxima da unidade (predominantemente para E0), apesar de alguns autores concluírem que não existe uma correlação nítida entre o tipo de combustível e a capacidade de redução de emissões de  $\text{NO}_x$ , uma vez que possui alta dependência do estado e da operação do motor (HSIEH et al., 2002).

Koç et al. (2009) estudaram as concentrações nas emissões de  $\text{NO}_x$  considerando duas taxas de compressão (10:1 e 11:1), para E0, E50 e E85, variando entre baixas e a altas cargas. Seus resultados exibem maior redução nas emissões de  $\text{NO}_x$  quando se aumenta o teor de etanol nas misturas, principalmente para a menor taxa de compressão (10:1), já que, independente da carga aplicada, as temperaturas máximas de combustão para maiores taxas de compressão são ligeiramente mais elevadas (KOÇ et al., 2009).

## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 4.1 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE CONSUMO DO MOTOR

As avaliações exibiram aumento de consumo mássico em consequência do gradual aumento das cargas e do acréscimo do etanol à gasolina. Este aumento foi atribuído ao elevado teor de oxigênio contido no etanol (35% em massa), resultando em um poder calorífico aproximadamente 70% menor se comparado à gasolina A. Com o aumento das cargas aplicadas ao motor, constatou-se também melhor aproveitamento termodinâmico do combustível, correspondente ao aumento das temperaturas na câmara de combustão e, portanto, nos gases de exaustão aí formados. No entanto, em função da adição de AEAC nas misturas, estas temperaturas oscilaram: nas menores cargas, maiores temperaturas foram observadas para as misturas com maior teor de etanol; em contrapartida, nas maiores cargas, as maiores temperaturas foram atribuídas às misturas com menor teor de etanol.

### 4.2 AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES GASOSAS

Na avaliação das emissões gasosas, verificaram-se significativas alterações nas concentrações dos gases poluentes CO, HC e  $\text{NO}_x$ , com o progressivo aumento de AEAC à gasolina A.

As concentrações de CO e HC mostraram comportamento bastante similar à medida que AEAC foi adicionado à mistura (para todas as cargas avaliadas). Em geral,

as concentrações de CO e HC reduziram com o aumento do teor do combustível oxigenado à mistura. A maior concentração de oxigênio na mistura mostrou estreita relação com a eficiência de queima do combustível.

O comportamento das emissões de NO<sub>x</sub> se mostraram de forma distinta das emissões de CO e HC, sofrendo forte influência das altas temperaturas geradas dentro da câmara de combustão. De modo geral, as emissões de NO<sub>x</sub> parecem estar mais relacionadas ao tipo de motor às condições de operação do mesmo, mais do que a natureza da mistura utilizada.

## REFERÊNCIAS

AGARWAL, A. K. Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 33, p. 233–271, 2007.

AL-HASAN. M. Effect of ethanol–unleaded gasoline blends on engine performance and exhaust emission. **Energy Conversion and Management**, v. 44, p. 1547-1561, 2003.

BEDOYA, I. D.; ARRIETA, A. A.; CADAVID, F. J. Effects of mixing system and pilot fuel quality on Diesel-biogas dual fuel engine performance. **Bioresource Technology**, v. 100, n. 24, p. 6624-6629, 2009.

BIODIESELBR. **PróAlcool**: Programa brasileiro de álcool. 2006. Disponível em: <<http://www.biodieselbr.com/proalcool/pro-alcool/programa-etanol.htm>>. Acesso em: 10 fev. 2015.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Mistura carburante automotiva (Etanol Anidro/Gasolina)**: Cronologia. Brasília, 2011. 3p. Disponível em: <[http://www.agricultura.gov.br/arq\\_editor/file/Desenvolvimento\\_Sustentavel/Agroenergia/Orientacoes\\_Tecnicas/01-Mistura%20etanol%20anidro-gasolina-CRONOLOGIA\(Atualiz\\_02\\_09\\_2011\).pdf](http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/Desenvolvimento_Sustentavel/Agroenergia/Orientacoes_Tecnicas/01-Mistura%20etanol%20anidro-gasolina-CRONOLOGIA(Atualiz_02_09_2011).pdf)>. Acesso em: 18 fev. 2015.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Portaria n°105 de 1 de

março de 2013. Fixar em vinte e cinco por cento o percentual obrigatório de adição de álcool etílico anidro combustível à gasolina, a partir da zero hora do dia 1º de maio de 2013. **Diário Oficial da União**. Brasília, 2013.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Perfil do setor do açúcar e do álcool no Brasil**. Edição para a safra 2009-2010. 2012. 62p. Disponível em: <[http://www.agricultura.gov.br/arq\\_editor/file/Desenvolvimento\\_Sustentavel/Agroenergia/estatisticas/producao/JUNHO\\_2012/Publicacoes/Perfil%20Sucroalcoleiro%20-%20safra%202009-10.pdf](http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/Desenvolvimento_Sustentavel/Agroenergia/estatisticas/producao/JUNHO_2012/Publicacoes/Perfil%20Sucroalcoleiro%20-%20safra%202009-10.pdf)>. Acesso em: 21 fev. 2015.

CATALUÑA, R.; SILVA, R.; MENEZES, E. W.; IVANOV, R. B. Specific Consumption of Liquid Biofuels in Gasoline Fuelled Engines. **Fuel**, v. 87, p. 3362-3368, 2008.

COSTA, R. C.; SODRÉ, J. R. Hydrous ethanol vs. gasoline-ethanol blend: Engine performance and emissions. **Fuel**, v. 89, p. 287-293, 2010.

ELFASAKHANY, A. Investigations on the effects of ethanol-methanol-gasoline blends in a spark-ignition engine: Performance and emissions analysis. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, v.18, n.04, p. 713-719, 2015.

GAUER, M.A. **Avaliação do desempenho e das emissões gasosas decorrentes do uso de biodiesel de soja e de sebo bovino em diferentes misturas com o diesel em um motor gerador**. 2012. 155f. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava, 2012.

HERNANDEZ, M.; MENCHACA, L.; MENDOZA, A. Fuel economy and emissions of light-duty vehicles fueled with ethanol-gasoline blends in a Mexican City. **Renewable Energy**, v. 72, dec. p. 236-242, 2014.

HEYWOOD, J. B. **Internal combustion engine fundamentals**. New York: McGraw Hill, 1988. 930p.

HSIEH, W.-D.; CHEN, R.-H.; WU, T.-L.; LIN, T.-H. Engine performance and pollutant emission of an SI engine using ethanol–gasoline blended fuels. **Atmospheric Environment**, v. 36, p. 403-410, 2002.

JIA, L.-W.; SHEN, M.-Q.; WANG, J.; LIN, M.-Q. Influence of ethanol–gasoline blended fuel on emission characteristics from a four-stroke motorcycle engine. **Journal of Hazardous Materials**, A123, p. 29-34, 2005.

KOÇ, M.; SEKMEN, Y.; TOPGÜL, T.; YÜCESU, H. S. The effects of ethanol-unleaded gasoline blends on engine performance and exhaust emissions in a spark-ignition engine. **Renewable Energy**, v. 34, n. 10, p. 2101-2106, 2009.

MANAHAN, S. E. **Environmental Chemistry**. 8. ed. Boca Raton: CRC Press LLC, 2005. 783p.

MASUM, B. M.; MASJUKI, H. H.; KALAM, M. A.; PALASH, S. M.; HABIBULLAH, M. Effect of alcohol-gasoline blends optimization on fuel properties, performance and emissions of a SI engine. **Journal of Cleaner Production**, v. 86, p. 230-237, 2015.

MASUM, B. M.; MASJUKI, H. H.; KALAM, M. A.; RIZWANUL FATTAH, I. M.; PALASH, S. M.; ABEDIN, M. J. Effect of ethanol-gasoline blend on NO<sub>x</sub> emission in SI engine. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 24, p. 209-222, 2013.

MIRANDA, G. R. **Avaliação das emissões atmosféricas provenientes da combustão de diesel, biodiesel de resíduos de óleo de fritura e suas misturas**. 2007. 108f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

NAJAFI, G.; GHOBADIAN, B.; YUSAF, T.; ARDEBILI, S. M. S.; MAMAT, R. Optimization of performance and exhaust emission parameters of a SI (spark ignition) engine with gasoline-ethanol blended fuels using response surface methodology. **Energy**, v.90/ Part 02, October 2015, p. 1815-1829, 2015.

SBAR Panel. **Small Business Advocacy Review Panel on Control of emissions from nonroad large spark ignition engines, recreational engines (marine and land-based), and highway motorcycles**. [s.l.; s.n.], 2001. 60p.

SCHIFTER, I.; DIAZ, L.; RODRIGUEZ, R.; GÓMEZ, J. P.; GONZALEZ, U. Combustion and emissions behavior for ethanol–gasoline blends in a single cylinder engine. **Fuel**, v. 90, p. 3586-3592, 2011.

SILVA, R.; MENEZES, E. W.; CATALUÑA, R. Rendimento Térmico e Emissões de Contaminantes Atmosféricos de Gasolinas Formuladas com Etanol, MTBE e TAE. **Química Nova**, São Paulo, v. 31, n. 5, p. 980-984, 2008.

TECNOMOTOR. **Manual de operação, analisador de gases TM 132**. 2003. Disponível em: <<http://www.tecnomotor.com.br/novo/index.php/manuais-de-produtos>>. Acesso em: 20 set. 2012.

TOYAMA. **Manual de operação do gerador modelo TG2800CX**. Disponível em: <<http://www.toyama.com.br/imagens/produtos/manual/MA%20TOYO%20GAS%20GER%20TG2800CX%20TG4000CX%20TG6500CX.pdf>>. Acesso em: 20 set. 2012.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY. **Control of emissions from marine SI and small SI engines, vessels and equipment: final regulatory impact analysis**. EPA420-R-08-014. sep. 2008a. 808p.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY. EPA finalizes emission standards for new nonroad spark-ignition engines, equipment, and vessels. **Office of Transportation and Air Quality**, EPA420-F-08-013. sep. 2008b. 5p.

WEST, B.; KNOLL, K.; CLARK, W.; GRAVES, R.; ORBAN, J.; PRZESMITZKI, S.; THEISS, T. **Effects of Intermediate Ethanol Blends on Legacy Vehicles and Small Non-Road Engines: Report 1**. NREL/TP-540-43543, ORNL/TM-2008/117. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, 2008. 136p.

WU, C.-W.; CHEN, R.-H.; PU, J.-Y.; LIN, T.-H. The influence of air-fuel ratio on engine performance and pollutant emission of an SI engine using ethanol-gasoline-blended fuels. **Atmospheric Environment**, v. 38, p. 7093-7100, 2004.

YANG, H.-H.; LIU, T.-C.; CHANG, C.-F.; LEE, E. Effects of ethanol-blended gasoline on emissions of regulated air pollutants and carbonyls from motorcycles. **Applied Energy**, v. 89, p. 281-286, 2012.

*Recebido em: 07 de dezembro de 2015*

*Aceito em: 03 de outubro de 2016*