

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

ANÁLISE ENERGÉTICA E EXERGÉTICA DE MOTORES DO CICLO OTTO UTILIZANDO DIFERENTES COMBUSTÍVEIS

Wesley Rick Viana Sampaio, wesley_rick@hotmail.com¹
Hugo Lima Moreira, hugolima@ufpi.edu.br²

¹Universidade Federal do Piauí, Rua Milcíades Lopes, 3049, Primavera I, CEP: 64003-390. Teresina-PI.

²Universidade Federal do Piauí, Edifício San Telmo Apto. 2001, Travessa Mauriti, 2832, CEP: 66093-180. Belém-PA.

Resumo: Neste trabalho é apresentada uma análise energética e exergética de motores do ciclo Otto com faixa de potência de 40 a 400 kW que utilizam diferentes combustíveis. Com a inserção das equações termodinâmicas governantes e a definição dos parâmetros iniciais, gerou-se um código em plataforma EES (Engineering Equation Solver) que permitiu uma melhor organização na etapa de cálculos e dos resultados obtidos. Através do programa EES foi possível obter um controle automatizado das sequências de tarefas para a criação de um histórico de dados que foi utilizado para comparar os diversos tipos de motores analisados. Os resultados obtidos foram analisados através de tabelas geradas pelo programa EES e gráficos gerados pelo programa Microsoft Excel, o que permitiu determinar os melhores valores de eficiência térmica, observar a configuração de motor que fornece a maior eficiência exergética, e identificar o combustível que fornece os melhores valores de exergia química. Os motores que utilizam o gás natural apresentaram os melhores valores de eficiência térmica e exergética e uma menor taxa de destruição de exergia. Os motores a etanol apresentaram resultados razoáveis em ambas as análises. Já os motores a gasolina apresentaram os menores valores de eficiência térmica e exergética e uma maior taxa de destruição de exergia. A análise exergética apresentada foi apropriada para analisar a influência de um determinado combustível na eficiência exergética de motores do ciclo Otto e serve como base para estudos posteriores de viabilidade econômica.

Palavras-chave: termodinâmica, motores de combustão interna, exergia, análise energética, análise exergética.

1. INTRODUÇÃO

No cenário econômico nacional o Brasil vem passando por uma espécie de conscientização acerca da utilização racional dos recursos não renováveis como petróleo e o gás natural, onde medidas em prol do melhoramento no uso desses recursos passam a ser cada vez mais necessárias. Em aplicações de sistemas térmicos e máquinas térmicas essa necessidade se torna um fator de destaque, pois influencia diretamente na capacidade de produção de trabalho pelos equipamentos que fazem uso desses recursos, na eficiência desses equipamentos e nos custos envolvidos no processo. Nesse sentido, o emprego das análises energética e exergética se mostram como uma alternativa apropriada para um estudo analítico voltado para maximizar o uso mais eficiente desses recursos, quantificar os níveis de energia, identificar e diminuir as fontes de ineficiência dos sistemas permitindo uma melhor medida da qualidade ou do desperdício do ponto de vista termodinâmico e possibilitar a análise dos sistemas em termos de custos.

O presente trabalho apresenta uma análise energética e exergética de motores do ciclo Otto com faixa de potência de 40 a 400 kW que utilizam como combustível a gasolina, o etanol e o gás natural, a fim de analisar qual a influência de um dado combustível nas eficiências energética e exergética desses motores, bem como avaliar o comportamento de outras propriedades termodinâmicas, tais como: taxa de produção de entropia, eficiência de combustão, exergia dos combustíveis, exergia associada ao fluxo de calor nos motores e nos produtos de combustão, destruição de exergia, etc. Este trabalho consiste em uma simulação numérica que também tem a finalidade de desenvolver uma rotina de cálculo para aplicações que envolvam a utilização das análises em sistemas reagentes.

Em primeira análise, foi realizado um balanço energético dos motores, onde as abordagens da Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica aplicadas a volumes de controle são apresentadas de um modo diferente, uma vez que o objeto de estudo desse trabalho é o motor de combustão interna e este envolve reações químicas que incluem a combustão de combustíveis hidrocarbonados. Desse modo, o balanço energético é baseado na análise termodinâmica de sistemas

reagentes onde foram escritas as reações químicas para cada combustível. Essa análise faz uso dos princípios da conservação de massa e da conservação de energia juntamente com as relações entre as propriedades. De acordo com Moreira (2006), essa análise se baseia no efeito quantitativo não se preocupando com o qualitativo nem com os níveis de energia ou de temperatura em que os processos ocorrem. Em segunda análise foi realizada uma avaliação da entropia para sistemas reagentes, essa análise desempenha importante papel nas avaliações quantitativas em que se utiliza a Segunda Lei da Termodinâmica. Em última etapa é apresentada a análise de exergia ou de Segunda Lei que utiliza os princípios da conservação de massa e da conservação de energia juntamente com a Segunda Lei da Termodinâmica. Nesta análise é levada em consideração a contribuição das exergias termomecânica e química, sendo esta última relacionada à composição química das substâncias.

Após a definição das sequências de análise e determinação das equações termodinâmicas governantes, uma simulação numérica em plataforma EES (*Engineering Equation Solver*) foi utilizada para calcular os parâmetros termodinâmicos. Os resultados obtidos foram analisados através de tabelas geradas pelo software EES e gráficos gerados pelo Microsoft Excel, o que permitiu identificar, dentre outros resultados, a eficiência térmica dos motores, o combustível que fornece os melhores valores de exergia, a taxa de destruição de exergia e analisar a influência dos combustíveis na eficiência exergética dos motores em estudo.

2. ANÁLISE TERMODINÂMICA

Esta seção apresenta a abordagem termodinâmica dos motores de combustão interna do ciclo Otto proposta neste trabalho, esta se baseia na aplicação do balanço energético para sistemas reagentes utilizando os princípios da conservação de massa e da conservação de energia, seguido da aplicação da análise exergética ou de Segunda Lei para sistemas reagentes que utiliza os conceitos da Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica.

2.1. Análise Energética dos Motores

As análises energéticas de motores de combustão interna envolvem reações químicas, que incluem a combustão de combustíveis hidrocarbonados. Segundo Moreira (2006), como os motores de combustão interna são dispositivos geradores de potência, a análise termodinâmica de sistemas reagentes é basicamente uma extensão da Primeira e Segunda lei da termodinâmica. A Fig. 1 ilustra esquematicamente a superfície de controle envolvendo o motor de combustão interna, apresentando os fluxos de entrada de ar e combustível e as saídas dos produtos de combustão, calor e trabalho no eixo de transmissão do motor.

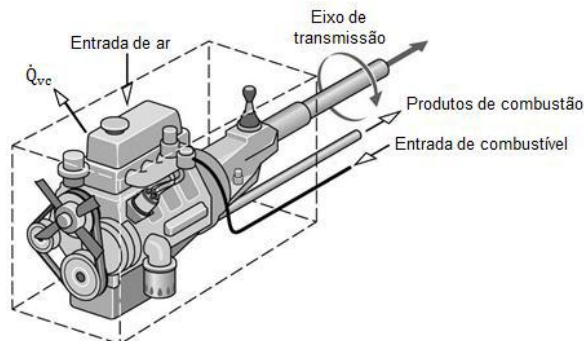
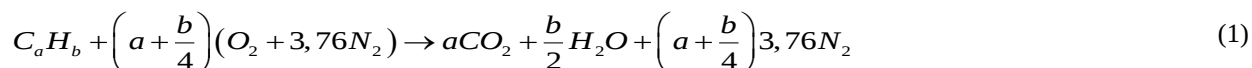


Figura 1. Superfície de controle envolvendo um motor de combustão interna.

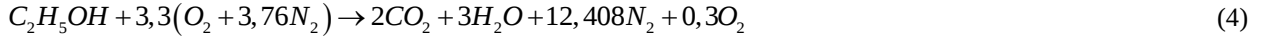
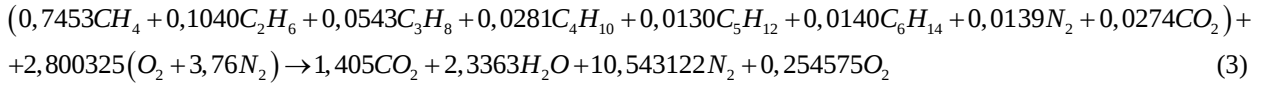
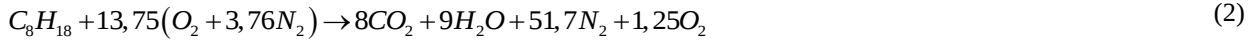
Fonte: Adaptado de Moran *et al.* (2013)

No decorrer do processo de combustão a massa de cada elemento se mantém a mesma. Desse modo, escrever uma reação química consiste na conservação da massa de cada elemento constituinte no combustível e no comburente. Assim, para a combustão de um combustível de hidrocarbonetos do tipo C_aH_b , com quantidade de ar teórico, que representa a quantidade mínima de ar que fornece oxigênio (O) suficiente para a combustão completa de todo carbono (C) e hidrogênio (H), a Eq. (1) fornece a seguinte reação química padrão:



Onde a e b são as incógnitas a serem determinadas para balancear a reação química.

Garcia (2002), afirma que em um processo de combustão nunca se usa a quantidade estequiométrica e sim em excesso, de modo a garantir a queima completa nas condições reais de mistura ar-combustível, temperatura e de tempos de permanência da mistura na zona de combustão. Portanto, as reações de combustão dos combustíveis deste trabalho, considerando 10% de excesso de ar, estão representadas nas equações Eq. (2), Eq. (3) e Eq. (4), respectivamente para a gasolina, gás natural e etanol.



O balanço energético para sistemas reagentes em regime permanente pode ser avaliado admitindo as hipóteses de que a mistura ar-combustível e os produtos de combustão são considerados gases ideais e desprezando os efeitos da energia cinética e potencial. Assim, a Eq. (5) fornece a Primeira Lei para sistemas reagentes.

$$\frac{\dot{Q}_{VC}}{\dot{n}_{comb}} - \frac{\dot{W}_{VC}}{\dot{n}_{comb}} = \sum_P n_e \left(\bar{h}_f^\circ + \Delta \bar{h} \right)_e - \sum_R n_i \left(\bar{h}_f^\circ + \Delta \bar{h} \right)_i \quad (5)$$

O primeiro termo do lado direito da Eq. (5) representa a entalpia dos produtos gasosos de saída de combustão por mol de combustível. O segundo termo do lado direito representa a entalpia do ar de combustão por mol de combustível. O índice “i” indica os fluxos de entrada do combustível e do ar e o índice “e” indica o fluxo de saída dos produtos da combustão. $\dot{Q}_{VC}$ é a taxa de transferência de calor para o volume de controle, $\dot{W}_{VC}$ é a potência do volume de controle (motor), $\dot{n}_{comb}$ é a vazão molar de combustível, n_e é o número de moles dos produtos, n_i e o número de moles dos reagentes, $\bar{h}_f^\circ$ corresponde à entalpia de formação molar e $\Delta \bar{h}$ é a diferença de entalpia molar.

Considerando o motor de combustão interna em regime permanente ilustrado na Fig.1, para o qual a reação de combustão é dada pela Eq. (1). Supõe-se que o ar de combustão e os produtos de combustão formam, cada qual, misturas de gases ideais. O balanço da taxa de entropia para o motor em estudo pode ser expresso em uma base por mol de combustível conforme mostra a Eq. (6).

$$0 = \sum \frac{\dot{Q}_j / T_j}{\dot{n}_{comb}} + \bar{s}_{comb} + \left[\left(a + \frac{b}{4} \right) \bar{s}_{O_2} + \left(a + \frac{b}{4} \right) 3,76 \bar{s}_{N_2} \right] - \left[a \bar{s}_{CO_2} + \frac{b}{2} \bar{s}_{H_2O} + \left(a + \frac{b}{4} \right) 3,76 \bar{s}_{N_2} \right] + \frac{\dot{\sigma}_{VC}}{\dot{n}_{comb}} \quad (6)$$

Todos os termos de entropias da Eq. (6) são de entropias absolutas. O primeiro termo do lado direito representa a entropia do ar de combustão por mol de combustível. O segundo termo representa a entropia dos produtos de combustão de saída por mol de combustível.

Borgnakke e Sonntag (2013) estabelecem que, na prática, a eficiência ($\eta_{térmica}$) de um motor de combustão interna é definida como a relação entre o trabalho real (w) e o valor da entalpia de combustão ($\bar{h}_{RP}^\circ$) do combustível com sinal negativo, ou seja, o seu poder calorífico inferior (PCI). A Eq. (7) apresenta esta relação.

$$\eta_{térmica} = \frac{w}{\bar{h}_{RP}^\circ} = \left(\frac{w}{PCI} \right) \cdot 100 \quad (7)$$

Para o cálculo das parcelas da transformação de energia fornecida pelo combustível associadas à energia na forma de calor, a Eq. (8) representa o percentual da energia do combustível que sai do volume de controle. O percentual da energia do combustível que é transformada em calor nos gases de exaustão é dado pela Eq. (9). $\dot{E}_C$ corresponde à energia fornecida pelo combustível, ou seja, a energia química do combustível, sendo dada pelo produto da vazão mássica de combustível pelo poder calorífico inferior do combustível.

$$Q_{VC(\%)} = \left(\frac{\dot{Q}_{VC}}{\dot{E}_C} \right) \cdot 100 \quad (8)$$

$$Q_{\text{exaustão}}(\%) = \left(\frac{\dot{Q}_{\text{exaustão}}}{\dot{EC}} \right) \cdot 100 \quad (9)$$

Na Eq. (9) $\dot{Q}_{\text{exaustão}}$ representa a taxa de transferência de calor dos gases de exaustão. O calor nos gases de exaustão é dado pela Eq. (10).

$$\dot{Q}_{\text{exaustão}} = \dot{n}_{\text{comb}} \cdot \overline{PCI} \cdot \dot{Q}_{VC} \cdot \dot{W} \quad (10)$$

Segundo Çengel e Boles (2013), a eficiência de combustão é dada pela Eq. (11).

$$\eta_{\text{combustão}} = \left(\frac{|\dot{Q}_{VC}|}{\dot{m}_{\text{comb}} \cdot \overline{PCI}} \right) \cdot 100 \quad (11)$$

Na Eq. (11) $\dot{m}_{\text{comb}}$ é a vazão mássica de combustível em kg de combustível/segundo.

2.2. Análise Exergética dos Motores

Em aplicações de motores de combustão interna a estimativa da exergia deve incluir não apenas a parcela de exergia termomecânica, mas também a parcela de exergia química uma vez que esses dispositivos geradores de potência envolvem processos de combustão em sua operação.

Moran *et al.* (2013), estabelecem que a exergia associada a determinado estado de um sistema é a soma de duas contribuições: a contribuição termomecânica e a contribuição química. Em uma base por unidade de massa, a exergia total (e) é dada pela Eq. (12).

$$e = \underline{(u - u_0) + p(v - v_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + g \cdot z + e^{ch}} \quad (12)$$

Em que o termo sublinhado indica a contribuição termomecânica da exergia e e^{ch} é a contribuição química. Os termos u e u_0 representam a energia interna específica e a energia interna específica de referência, respectivamente. p_0 é a pressão de referência, v e v_0 representam o volume específico e o volume específico de referência, respectivamente. T_0 é a temperatura do ambiente de referência. s e s_0 representam a entropia específica e a entropia específica de referência. V e g representam a velocidade e a gravidade, respectivamente.

Analogamente, o fluxo de exergia total associada a um dado estado, desprezando as parcelas da exergia cinética e potencial, é a soma representada na Eq. (13).

$$e_f = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + e^{ch} \quad (13)$$

Na Eq. (13) h e h_0 representam a entalpia específica e a entalpia específica de referência, respectivamente. Segundo Kotas (1985), a exergia química (ϵ^0) pode ser determinada através da Eq. (14).

$$\epsilon^0 = \phi \cdot PCI \quad (14)$$

Para os combustíveis líquidos o parâmetro multiplicador para a exergia química do combustível (ϕ) é dado pela Eq. (15).

$$\phi = 1,0401 + 0,1728 \frac{h}{c} + 0,0432 \frac{o}{c} + 0,2169 \frac{s}{c} \left(1 - 2,0628 \frac{h}{c} \right) \quad (15)$$

Onde h , c , o e s são os valores de fração mássica de hidrogênio, carbono, oxigênio e enxofre presentes no combustível. O parâmetro ϕ equivale à relação entre a exergia química do combustível e o seu poder calorífico inferior. Para o caso do Gás Natural, Kotas (1985), estabelece que o parâmetro ϕ assume valores de $1,04 \pm 0,5\%$. Para este trabalho o valor de ϕ para o Gás Natural será de 1,045.

A exergia associada à transferência de calor ($\dot{E}_{\text{calor}}$) do volume de controle é dada pela Eq. (16).

$$\dot{E}_{VC} = \left| \dot{Q}_{VC} \right| \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \quad (16)$$

A exergia associada aos gases de escapamento ($\dot{E}_{VC}$) é dada pela Eq. (17).

$$\dot{E}_{gases} = \dot{Q}_{exaustão} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \quad (17)$$

A taxa de destruição de exergia ($\dot{E}_{destruída}$) nos motores foi determinada através da Eq. (18) obtida por meio da aplicação de um balanço de exergia no volume de controle.

$$\dot{E}_{destruída} = \dot{E}_{comb} - \dot{E}_{calor} - \dot{W} - \dot{E}_{gases} \quad (18)$$

Na Eq. (18) $\dot{E}_{comb}$ é a taxa de exergia que entra com o combustível e $\dot{W}$ representa a potência desenvolvida pelo motor.

Para o cálculo da eficiência exergética (ϵ) de um motor de combustão interna tomando a potência desenvolvida como sendo o produto do motor, e considerando a transferência de calor e os produtos gasosos de saída como perdas, uma expressão para a eficiência exergética proposta por Moran *et. al.* (2013), mede quanto da exergia de entrada do combustível no motor é convertido em produto. A Eq. (19) fornece a eficiência exergética.

$$\epsilon = \frac{\dot{W}}{\dot{E}_{comb}} \quad (19)$$

3. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Neste trabalho foi utilizado o software *Engineering Equation Solver* (EES) como ferramenta para a realização das rotinas de cálculo e obtenção dos resultados. Os parâmetros de entrada utilizados para a simulação, mostrados na Tab. 1, foram obtidos da literatura que tange os conceitos associados a motores de combustão interna do ciclo Otto e da Termodinâmica.

Tabela 1. Dados de entrada para a simulação computacional.
Fonte: Elaborado pelos autores.

Parâmetro de entrada	Motor a Gasolina	Motor a Gás Natural	Motor a Etanol
Potência [kW]	40 a 400	40 a 400	40 a 400
Temp. de entrada do ar [K]	298	298	298
Temp. de entrada do combustível [K]	298	298	298
Temp. dos gases de exaustão [K]	945	830	892
Temp. de referência [K]	298	298	298
Pressão de referência [kPa]	100	100	100
Vazão mássica de combustível [kg/s]	0,0036 a 0,0279	0,0025 a 0,0196	0,0046 a 0,0361

Na Tab. 1 os valores de potência variam com um incremento de 40 kW. As vazões mássicas dos combustíveis e as temperaturas dos gases de exaustão foram estimadas com base nos resultados experimentais do trabalho de Carvalho (2011). Para as vazões mássicas de combustível, o incremento foi determinado como sendo 75% da vazão mássica inicial para cada combustível.

A utilização dos dados experimentais do trabalho de Carvalho (2011), tem como objetivo fornecer resultados satisfatórios da simulação computacional desenvolvida neste trabalho e que possam ser analisados com uma boa aproximação com os possíveis resultados que se pode obter de forma experimental para cada uma das configurações de motores aqui apresentada.

4. RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados obtidos com a simulação computacional desenvolvida neste trabalho. O primeiro tópico aborda os resultados relacionados à análise energética dos motores, onde foi feita uma comparação dos parâmetros de taxa de transferência de calor, taxa de calor nos gases de exaustão, eficiência de combustão, eficiência térmica e taxa de produção de entropia para as diversas configurações de motores. No segundo tópico foi realizada a discussão dos resultados associados à análise de Segunda Lei dos motores, onde foi feita uma comparação dos

parâmetros de exergia química dos combustíveis, exergia devido ao calor, exergia dos gases de escape, taxa de destruição de exergia e eficiência exergética dos motores.

4.1. Parâmetros Energéticos

A Fig. 2 mostra os resultados da taxa de transferência de calor e da taxa de calor nos gases de exaustão associados à faixa de potência em estudo.

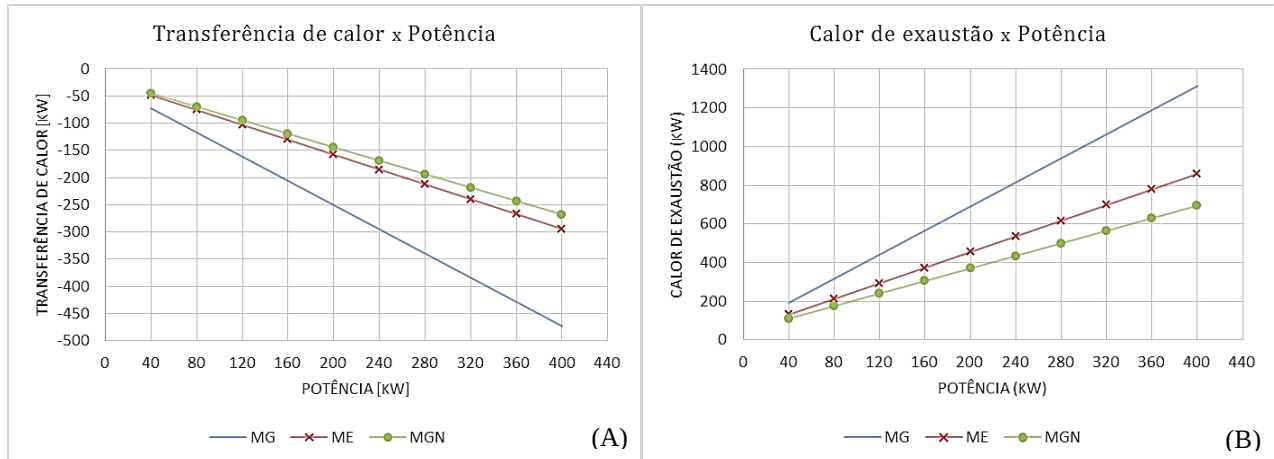


Figura 2. (A) Taxa de transferência de calor x Potência. (B) Taxa de calor dos gases de exaustão x Potência.
Fonte: Elaborado pelos autores.

Por convenção termodinâmica, o calor cedido de um sistema/volume de controle para o ambiente possui o sinal negativo (uma vez que o sistema perde calor). Porém, se tomarmos o módulo desses valores observa-se pela Fig. 2 (A) que os motores a gasolina (MG) possuem a maior taxa de transferência de calor para o bloco do motor e deste para o ambiente, em toda a faixa de potência selecionada. Por outro lado, os resultados da taxa de transferência de calor para os motores a gás natural (MGN) e motores a etanol (ME), embora estes utilizem combustíveis em fases diferentes (gás e líquido), apresentaram um comportamento bastante semelhante em toda a faixa de potência selecionada e também apresentaram valores relativamente menores em relação aos motores a gasolina.

A Fig. 2 (B) mostra que a energia dos gases de exaustão nos motores a gasolina é superior àquelas dos motores a gás natural e a etanol em toda a faixa de potência selecionada. Essa energia é normalmente perdida para o ambiente, todavia, a mesma pode ser utilizada para o fornecimento de calor em um sistema de cogeração onde essa quantidade de calor pode ser fornecida para outro sistema a fim de gerar potência para uma determinada finalidade. Nesse sentido, os motores a gasolina em estudo proporcionam um maior potencial de energia que pode ser aproveitado para geração de potência em um sistema de reaproveitamento da energia dos gases de escape. Para esta análise, os motores a gás natural apresentaram os menores valores de energia dos gases de exaustão.

A Fig. 3 mostra os resultados da eficiência de combustão e da eficiência térmica dos motores.

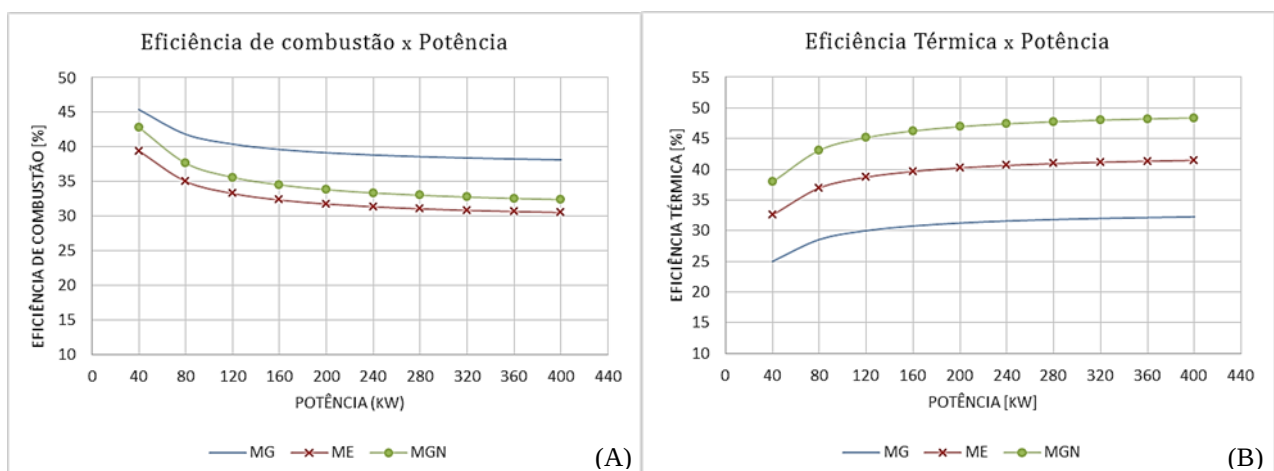


Figura 3. (A) Eficiência de combustão x Potência. (B) Eficiência térmica x Potência.
Fonte: Elaborado pelos autores.

O desempenho de um equipamento de combustão pode ser analisado através da sua eficiência de combustão. Observa-se da Fig. 3 (A) que os motores a gasolina apresentaram os melhores valores de eficiência de combustão, isso é devido ao módulo da taxa de transferência de calor nos motores a gasolina, como visto na Fig. 2 (A), ser bem maior do que nos motores a etanol e a gás natural, ou seja, quanto maior a taxa de transferência de calor maior será o resultado da eficiência de combustão. Embora os motores a gás natural apresentem uma energia calorífica semelhante aos motores a gasolina ($PCI_{MGN} = 42180 \text{ kJ/kg}$; $PCI_{MG} = 44448 \text{ kJ/kgT}$), sua eficiência de combustão é menor devido ao módulo da taxa de transferência de calor nesses motores ser menor do que nos motores a gasolina. Os motores a etanol apresentaram os menores valores de eficiência de combustão. Embora o módulo da taxa de transferência de calor nos motores a etanol seja ligeiramente maior do que nos motores a gás natural, estes resultados podem ser explicados pelo fato de que o etanol combustível possui uma energia do combustível (produto da vazão mássica de combustível pelo seu poder calorífico inferior) maior do que a energia do gás natural e como existe uma relação inversa entre a eficiência de combustão e a energia do combustível, quando ocorre um aumento desse potencial de energia, a eficiência de combustão decresce.

Em análises de eficiência térmica de motores, deve-se levar em consideração não apenas a energia correspondente ao combustível, mas também as propriedades químicas de cada combustível utilizado. Da Fig. 3 (B), observa-se que os combustíveis líquidos apresentaram valores de eficiência térmica menores em comparação aos valores de eficiência dos motores a gás natural. Esse fato pode ser explicado devido às boas características de octanagem do gás natural e, Segundo Carvalho (2011), a menor energia associada ao combustível está relacionada à menor vazão mássica devida à relação A/C do gás natural em comparação ao etanol e à gasolina. Esse menor valor de vazão mássica proporciona menores valores de energia do combustível e como a relação entre a eficiência térmica e a energia do combustível é inversamente proporcional, a redução do potencial energético do combustível implica no aumento da eficiência térmica do motor.

Entre os combustíveis líquidos, o etanol apresentou valores de eficiência térmica superiores aos dos motores a gasolina. Segundo Owen e Coley (1995), devido à alta octanagem, capacidade de queimar com misturas ricas e seu alto calor latente de vaporização, o etanol possibilita a transformação de maior potência quando comparado com a gasolina. Outra característica que se pode observar da Fig. 3 (B) é que para determinados valores de potência, a eficiência térmica passa a apresentar um comportamento praticamente constante, ou seja, com poucas variações de eficiência com o aumento da potência. Isso mostra que os motores do ciclo Otto são vantajosos para aplicações que requerem potências não muito elevadas. Para altas potências recomenda-se o uso de motores do ciclo Diesel para obtenção de melhores valores de eficiência térmica.

O gráfico da Fig. 4 apresenta resultados que estão vinculados a uma importante propriedade da avaliação quantitativa da Primeira Lei da Termodinâmica que serve como base para as avaliações que utilizam a Segunda Lei da Termodinâmica, essa propriedade é a entropia.

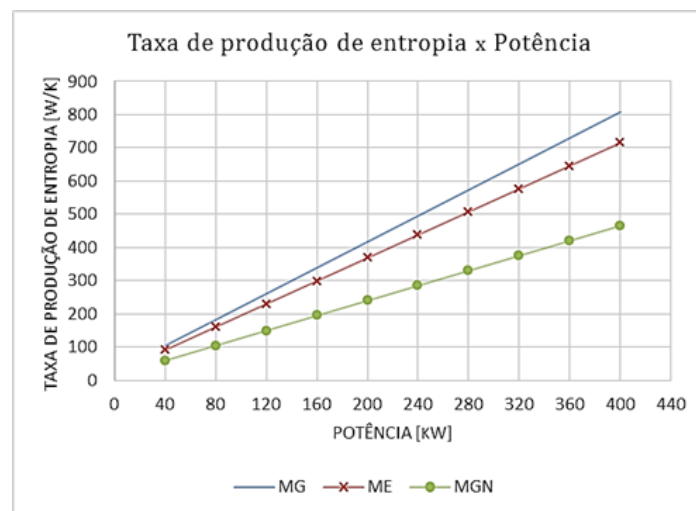


Figura 4. Taxa de produção de entropia x Potência.

Fonte: Elaborado pelos autores.

A taxa de produção de entropia fornece um indicativo do grau de destruição de exergia. Através da análise da Eq. (20) pode-se concluir que uma maior produção de entropia implica numa maior destruição de exergia, pois tudo que gera entropia destrói exergia. Na Eq. (20) $X_{destruída}$ é a exergia destruída e S_{gerada} representa a entropia gerada.

$$X_{destruída} = T_0 \cdot S_{gerada} \geq 0 \quad (20)$$

Entre os três tipos de combustíveis utilizados, verifica-se que os motores a gás natural apresentam uma menor taxa de produção de entropia e, conseqüentemente, é de se esperar que numa posterior análise dos resultados de destruição

de exergia, esses motores apresentem a menor taxa de trabalho perdido em comparação aos motores a etanol e à gasolina. De modo análogo, como os maiores valores de produção de entropia foram obtidos com os motores que utilizam gasolina, é de se esperar que a destruição de exergia nesses motores seja maior em comparação aos motores a gás natural e a etanol.

4.2. Parâmetros Exergéticos

A Fig. 5 mostra a taxa na qual a exergia entra com o combustível e os resultados da taxa de exergia devido ao calor para os três combustíveis em estudo.

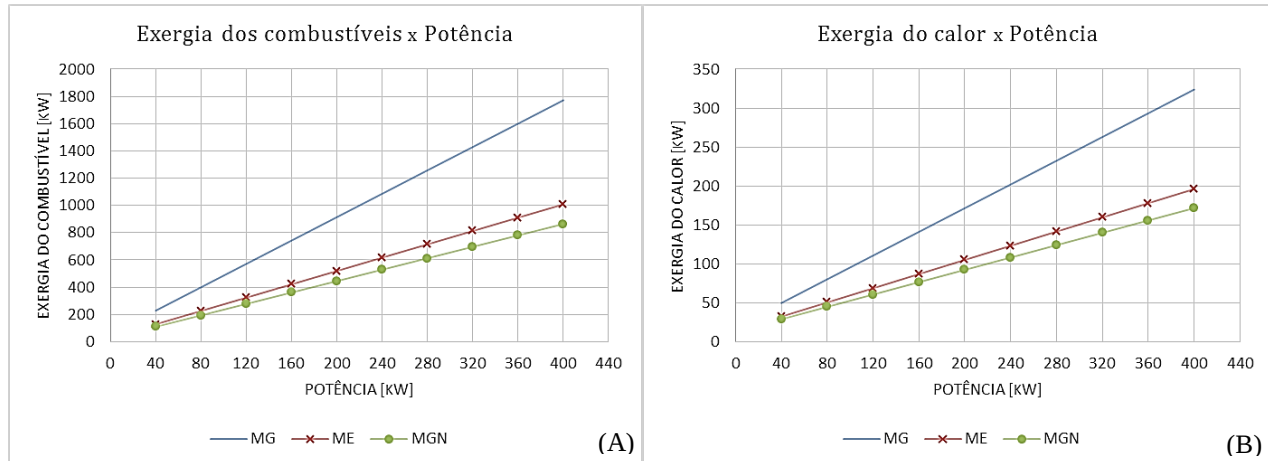


Figura 5. (A) Taxa de exergia dos combustíveis x Potência. (B) Taxa de exergia do calor x Potência.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Pela análise da Fig. 5 (A) nota-se um perfil de comportamento semelhante ao gráfico da taxa de transferência de calor dos motores (Fig. 2 (A)). Para os combustíveis líquidos, observa-se a maior exergia para a gasolina, a exergia do etanol apresenta valores bem menores quando comparados à exergia da gasolina. A exergia do gás natural apresentou valores inferiores em relação aos combustíveis líquidos em toda a faixa de potência selecionada.

O comportamento do gráfico da Fig. 5 (B) é semelhante ao gráfico da exergia dos combustíveis. Observa-se que, mais uma vez, entre os combustíveis líquidos os motores a gasolina apresentaram os maiores valores de exergia, agora, associada ao calor transferido para o bloco dos motores. Esse comportamento é devido à alta taxa de transferência de calor nesses motores. Os motores a gás natural apresentaram valores inferiores em relação aos combustíveis líquidos.

A Fig. 6 mostra os resultados da taxa de exergia dos gases de exaustão e os resultados da taxa de destruição de exergia dos motores.

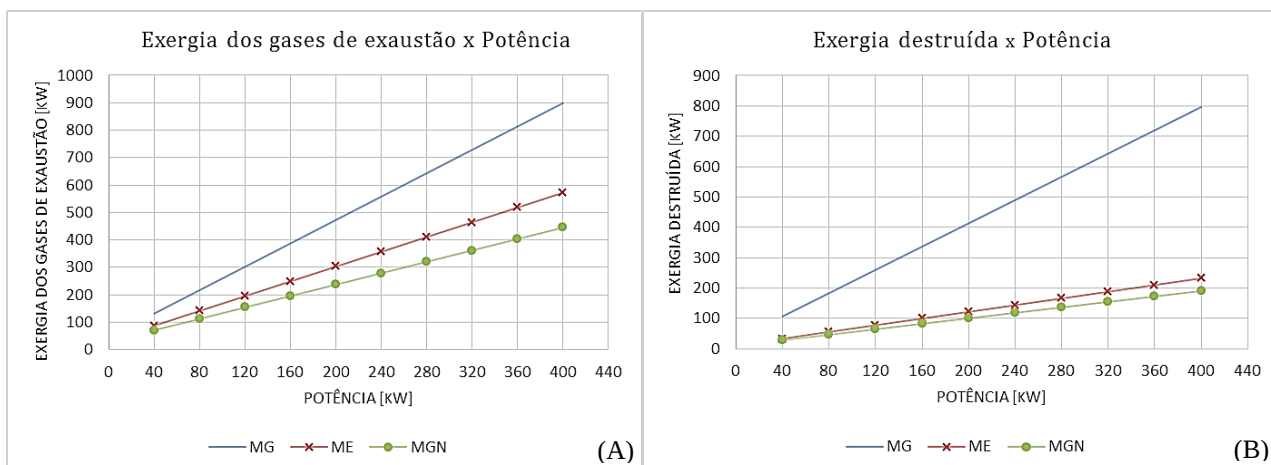


Figura 6. (A) Taxa de exergia dos gases de exaustão x Potência. (B) Taxa de destruição de exergia x Potência.

Fonte: Elaborado pelos autores.

A Fig. 6 (A) mostra que os maiores valores de exergia dos gases de exaustão foram encontrados para os motores a gasolina. Os motores a gás natural apresentaram os menores valores de taxa de exergia associada aos gases de exaustão.

A Fig. 6 (B) mostra, conforme esperado a partir dos resultados obtidos para a taxa de produção de entropia dos motores (Fig. 4), que os motores a gás natural apresentaram uma menor destruição de exergia, pois foram os motores que menos produziram entropia. Em contrapartida, os motores a gasolina, como apresentaram a maior taxa de produção de entropia, foram os motores que mais destruíram exergia. Observa-se que a destruição de exergia nos motores a gasolina é bastante superior em relação aos motores a etanol e a gás natural. Os motores a etanol apresentaram os menores valores entre os combustíveis líquidos e também apresentaram uma baixa destruição de exergia, apresentando um comportamento semelhante em relação aos motores a gás natural.

A Fig. 7 mostra os valores de eficiência exergética dos motores em estudo.

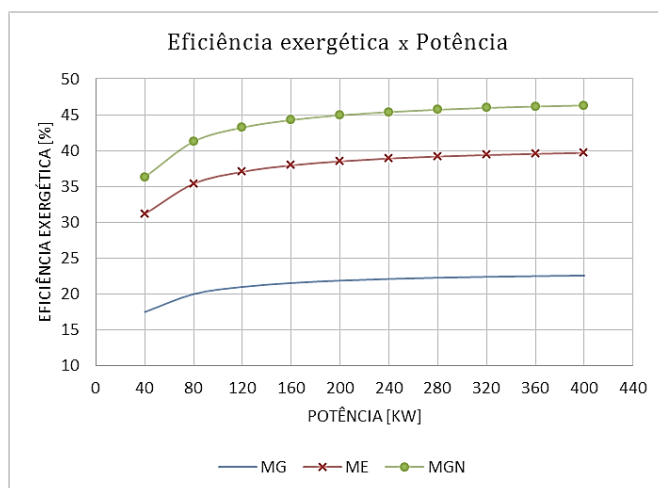


Figura 7. Eficiência exergética x Potência.

Fonte: Elaborado pelos autores.

O gráfico de eficiência exergética apresentou um comportamento semelhante ao gráfico de eficiência térmica. Observa-se que entre os combustíveis líquidos, os melhores valores de eficiência foram alcançados com os motores a etanol. Os motores a gás natural apresentaram as maiores eficiências entre todos os combustíveis e em todas as faixas de potência selecionadas.

5. CONCLUSÃO

A elaboração de um algoritmo em plataforma EES permitiu o desenvolvimento de um código computacional adequado para avaliações de motores de combustão interna do ciclo Otto utilizando as análises de Primeira e Segunda Lei da Termodinâmica para sistemas reagentes e com a variação do tipo de combustível.

A utilização de diferentes combustíveis em motores de combustão interna permite realizar um comparativo entre propriedades como eficiência térmica, eficiência de combustão, taxa de produção de entropia, destruição de exergia, eficiência exergética, dentre outras.

A partir dos resultados obtidos neste trabalho observou-se que os motores a gás natural possuem melhores valores de eficiência, tanto térmica quanto exergética, em todas as faixas de potência selecionadas. Portanto, a utilização do gás natural como combustível para motores de combustão interna do ciclo Otto se mostra viável, principalmente por ser uma fonte de energia alternativa em relação aos combustíveis comerciais, podendo ser obtido de fontes como o petróleo e através da biodigestão. Outros fatores importantes para sua utilização são a sua abundância na matriz energética mundial e um processo de combustão com uma queima mais limpa, reduzindo a emissão de gases que contribuem para o aumento do efeito estufa.

Entre os combustíveis líquidos, a gasolina apresentou os menores valores de eficiência térmica e exergética e, ainda, apresentou a maior taxa de produção de entropia que proporciona uma maior destruição de exergia, ou seja, uma maior quantidade de trabalho perdido. Os motores a etanol apresentaram bons resultados de eficiência bem como uma baixa destruição de exergia, semelhante ao comportamento do gás natural, e bons resultados de eficiência exergética.

Na prática, para que os motores a gasolina apresentem melhores resultados de eficiência, adiciona-se um percentual de etanol em sua composição a fim de alterar a estrutura de seus hidrocarbonetos e, assim, obter valores satisfatórios de eficiência térmica e exergética.

6. REFERÊNCIAS

- Borgnakke, C. e Sonntag, R.E., 2013, "Fundamentos da Termodinâmica", 8 ed, São Paulo, Blucher, p. 730.
- Carvalho, M.A.S.de., 2011, "Avaliação de um motor de combustão interna ciclo Otto utilizando diferentes tipos de combustíveis", Dissertação de mestrado – Universidade Federal da Bahia, Salvador.
- Çengel, Y.A. e Boles, M.A., 2013, "Termodinâmica", 7 ed, Porto Alegre, AMGH.

- Garcia, R., 2002, "Combustíveis e combustão industrial", Rio de Janeiro: Interciência.
- Kotas, T.J., 1985, "The exergy method of thermal plant analysis", London, Boston, Butterworths.
- Moran, M.J. et. al., 2013, "Princípios de termodinâmica para engenharia", Rio de Janeiro, LTC.
- Moreira, H.L., 2006, "Comparação exergoeconômica entre motores de combustão interna com ignição por compressão e ignição por centelha", Artigo científico – CONEM, Recife.
- Owen, K.. and Coley, T., 1995, "Automotive Fuels Reference Book", SAE, 2nd ed.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

ENERGETIC AND EXERGETIC ANALYSIS OF OTTO CYCLE ENGINES USING DIFFERENT TYPES OF FUELS

Wesley Rick Viana Sampaio, wesley_rick@hotmail.com¹
Hugo Lima Moreira, hugolima@ufpi.edu.br²

¹Federal University of Piauí, Milcíades Lopes st, 3049, Primavera I, 64003-390. Teresina-PI,

²Federal University of Piauí, Edifício San Telmo Apto. 2001, Travessa Mauriti, 2832, 66093-180. Belém-PA.

Abstract. In this paper, an energetic and exergetic analysis of Otto cycle engines with a power range from 40 to 400 kW which use different types of fuels is presented. With the insertion of the main thermodynamic equations and the definition of the initial parameters, a code in EES platform (Engineering Equation Solver) was generated. This allowed for a better organization on the calculus step and of the results obtained. With the EES software it was possible to obtain automated control of the task sequences, which enabled the creation of a database that was used to compare the various types of engines analyzed. The results obtained were analyzed through tables generated by the EES software and graphics generated by the Microsoft Excel, this allowed for analysis of the best values of thermal efficiency, observation of an engine configuration that provides the highest exergetic efficiency, and identification of fuel that provides the best values of chemical exergy. The engines that use natural gas presented the best values of energetic and exergetic efficiency and a lower destruction rate of exergy. The ethanol engines presented reasonable results in both analyzes. The gasoline engines presented the lowest values of energetic and exergetic efficiency and a greater destruction rate of exergy. The exergetic analysis presented in this paper was appropriate to analyze the influence of a given fuel on the exergetic efficiency of Otto cycle engines, and it serves as a basis for subsequent studies of economic viability.

Keywords: thermodynamics, internal combustion engines, exergy, energetic analysis, exergetic analysis.