

METODOLOGIA PARA O ESTUDO DO RENDIMENTO TERMODINÂMICO DE MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA CICLO OTTO

Márcio Augusto Sampaio de Carvalho, marcio.carvalho@cimatec.fieb.org.br¹
Ednildo Andrade Torres, ednildo@ufba.br²
Felipe Soto Pau, sotopauf@hotmail.com³

¹SENAI CIMATEC, Av. Orlando Gomes, 1845, Piatã. CEP:41650-010, Salvador-Ba.

²UFBA, Av. Aristides Novis, 2, Federação. CEP: 40210-630. Salvador-Ba.

Resumo: Diante do cenário mundial, onde questões como aquecimento global, emissões de poluentes e sustentabilidade são cada vez mais discutidos, torna-se evidente a necessidade de máquinas mais eficientes e fontes de energias menos poluentes.

Motores de combustão interna aparecem como grandes vilões do aquecimento global devido à sua utilização como energia motriz de uma enorme frota de veículos existentes e à sempre crescente produção anual mundial de veículos automotores, resultando entre outros problemas, na enorme quantidade de emissão de CO₂.

Muitas modificações de projetos aconteceram ao longo da evolução dos motores de combustão interna que propiciaram aumento da eficiência do sistema, tais como a utilização de materiais mais adequados às trocas térmicas e à dinâmica dos fluidos, coletores de admissão e de válvulas variáveis e sistema de gerenciamento eletrônico do motor. Porém ainda há um espaço considerável entre o que os motores apresentam em termos de rendimento e o máximo rendimento possível, ou eficiência segundo o ciclo de Carnot.

Este trabalho apresenta uma metodologia para o estudo do rendimento energético e exergético de motores de combustão interna ciclo Otto que utilizam mais de um combustível (Flexíveis). Os tópicos são apresentados através da exposição sobre o rendimento de motores de combustão interna, com considerações de Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica, demonstrações de pontos possíveis de otimização do rendimento através das possibilidades de melhoria do que o motor entrega (Work Output), bem como através da contribuição entrópica de cada sistema do motor. Os resultados são apresentados em termos qualitativos e quantitativos dos pontos críticos ao rendimento do sistema.

A fundamentação teórica do trabalho é baseada numa revisão bibliográfica obtida em periódicos e na literatura técnica científica especializada sobre motores de combustão interna, combustíveis e análises termodinâmicas.

Palavras-chave: Motores de Combustão Interna, Rendimento, Exergia

1. INTRODUÇÃO

Motores de combustão interna (MCI) ainda utilizam o mesmo princípio de funcionamento desde a sua concepção e primeiros protótipos: mistura entre ar, combustível e uma fonte de ignição.

São máquinas térmicas que cumprem satisfatoriamente a função básica de servir como energia motriz de diversos tipos de veículos, apresentando variações de dimensões, ciclos de trabalho e características de projetos. Porém são máquinas que apresentam baixa eficiência quando comparadas a máquinas elétricas, por exemplo. Gallo (1985) aborda os fatores que contribuem para a diminuição da eficiência dos motores de combustão interna, tais como, atritos entre os diversos componentes, trocas térmicas entre componentes e fluidos, geração de entropia no sistema de escapamento e expansões não resistidas.

As questões relacionadas com o Meio Ambiente e Sustentabilidade tem cada vez mais apontado e demandado fontes de energia mais eficientes e menos poluentes. O desenvolvimento tecnológico aplicado nos motores de combustão interna tem mostrado a tendência da utilização de motores cada vez menores e mais eficientes (Downsizing), com menor consumo de combustíveis e menores índices de emissões de poluentes.

Outra inovação nos MCI foi a preparação dos motores para a utilização de mais de um tipo de combustível, chamados de motores flexíveis. O comportamento dos processos dos motores que influenciam na combustão apresenta diferenças de acordo com o combustível utilizado, que alteram características de consumo, rendimento e emissões.

Numa análise dos fatores que contribuem para a diminuição da eficiência dos motores de combustão interna deve-se utilizar a combinação das análises termodinâmicas de Primeira e Segunda Leis da termodinâmica. Ao aplicar-se a análise de Segunda Lei, com conceitos de entropia, irreversibilidades e utilização da análise exérgica, torna-se possível uma análise minuciosa dos pontos críticos relacionados ao rendimento do sistema dos motores de combustão interna e às oportunidades de melhorias dos projetos.

A análise exérgica é ferramenta de grande utilidade na comparação entre o rendimento de motores de combustão interna, podendo indicar de forma quantitativa e qualitativa os principais pontos onde ocorrem as irreversibilidades do sistema.

2. RENDIMENTO DE MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

O rendimento de um sistema corresponde ao aproveitamento da energia ou recurso que foi fornecido. Uma maneira simplificada de se definir o rendimento ou, eficiência, de um motor de combustão interna é através da relação do que o motor entrega em forma de trabalho (*work output*) pelo que o motor recebe de energia para o seu funcionamento (*Fuel Energy*). A equação abaixo (HEYWOOD, 1988) define basicamente o enunciado:

$$n_f = \frac{W_c}{m_f \cdot Q_{HV}} \quad (1)$$

Onde, W_c , representa o trabalho de saída do motor (*Work Output*); m_f corresponde à massa de combustível em um ciclo; Q_{HV} representa o poder calorífico do combustível. Heywood (1988) apresenta também o rendimento do motor com base no consumo específico de combustível (*sfc*), explicitando que quanto maior a eficiência de um motor, menor será o valor do *sfc*.

$$sfc(g/kW.h) = \frac{m_f(g/h)}{P(kW)} \quad (2)$$

As análises de rendimento de MCI passam tanto por análises dos fatores que influenciam as variáveis de entrada do motor – ar, combustível e ignição -, quanto pelas análises dos combustíveis e dos processos internos dos motores.

3. VARIÁVEIS DE ENTRADA QUE INFLUENCIAM NO RENDIMENTO DE MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

Na análise dos parâmetros importantes do motor, como torque e potência, as características da pressão de combustão no interior da câmara são fatores importantes a serem estudados. Oriunda da energia da reação química da combustão, a pressão na câmara de combustão se transforma na força aplicada sobre os pistões. Na equação do rendimento do motor, o que será entregue pelo motor será o trabalho, ou potência de saída. Silva (2006) desenvolveu uma metodologia para determinação da potência indicada e estudou a obtenção de outros parâmetros dos motores de combustão interna.

Os estudos dos processos de combustão basicamente trabalham com a influência das variáveis de entrada do motor. Também devem ser observados os fenômenos da combustão, como detonação, auto-ignição e “*misfire*” (falhas de combustão), que também afetam o rendimento e a durabilidade dos motores. Para melhorar-se o trabalho (*work output*), pode-se buscar a melhoria da eficiência volumétrica, taxa de compressão e variação do ponto de ignição, entre outros.

3.1. Eficiência Volumétrica

Com relação à quantidade de ar admitida pelo motor, o parâmetro que a define é a eficiência volumétrica. A melhoria desse parâmetro está diretamente relacionada com o aproveitamento da pressão de combustão e, logo, ao desempenho e rendimento do motor.

Heywood (1988) define a eficiência volumétrica como o volume admitido pelo cilindro dividido pelo volume disponível pelo pistão dentro do cilindro:

$$n_v = \frac{2 \dot{m}_a}{\rho_{a,i} V_d N} \quad (3)$$

Onde, $\rho_{a,i}$ é a densidade do ar na entrada do cilindro. Pode-se também descrever a eficiência volumétrica como:

$$n_v = \frac{m_a}{\rho_{a,i} V_d} \quad (4)$$

Onde, m_a é a massa de ar introduzida no cilindro a cada ciclo.

Heywood (1988) menciona que, tipicamente, os valores máximos de eficiência volumétrica para motores naturalmente aspirados de ignição por centelha estão na faixa de 80% a 90%. A eficiência volumétrica é também afetada por características do combustível, projeto do motor e outras variáveis de operação do motor, tais como: 1) características da mistura ar/combustível; 2) transferência de calor; 3) Relação de pressões entre os sistemas de admissão e exaustão do motor; 4) Taxa de compressão; 5) velocidade do motor (*RPM*); 6) Projetos dos sistemas de admissão e exaustão do motor; 7) Geometrias, tamanhos e tempo de aberturas das válvulas de admissão e escapamento do motor.

Nos motores de combustão interna de aplicações veiculares, os regimes de trabalho variam constantemente as rotações e cargas do motor. Conseqüentemente, a eficiência volumétrica também apresenta diferenças de valores de acordo com cada regime de trabalho do motor.

Inovações tecnológicas como variação do sincronismo de válvulas de admissão e escapamento, coletor dos gases de admissão variável, turbo - compressores e compressores de ar ligados ao motor aparecem para a melhoria da eficiência volumétrica em diferentes condições de trabalho do motor.

3.2. Taxa de Compressão

Através da fórmula abaixo, verifica-se que quanto maior a razão, ou, taxa de compressão aplicada no motor, melhor será o rendimento termodinâmico. Isso pode ser explicado pelo fato da reação de combustão ser exotérmica, onde, quanto maior for a pressão e a temperatura da reação, mais rápida será a reação, aumentando a potência do motor.

$$E = 1 - \left(\frac{1}{R^{K-1}} \right) \quad (5)$$

Onde, R é a razão de compressão; K o coeficiente de expansão adiabática; E é a eficiência térmica (Ciclo Otto).

Pode se considerar que a melhoria da eficiência volumétrica num motor de combustão interna tem efeito análogo ao efeito do aumento da taxa de compressão, na medida em que, consegue-se colocar mais massa de ar para uma mesma taxa de compressão. Como exemplo, em alguns motores com equipados com sistema de turbo - compressor, utiliza-se a taxa de compressão nominal do motor menor, visto que, a eficiência volumétrica é melhorada com a sobre alimentação de ar. A octanagem do combustível é fator limitante à taxa de compressão do motor, para evitar-se a detonação (Knocking).

3.3. Ponto de Avanço de Ignição

Mantidas constantes as quantidades de ar e combustível, pode-se obter a otimização da pressão de combustão através da variação do ponto de avanço de ignição do motor em relação ao ângulo de giro do virabrequim. Antecipando-se o ponto de ignição em relação ao Ponto Morto Superior do Motor (PMS), obtém-se a antecipação do início da combustão. A otimização da pressão média efetiva nos cilindros é obtida variando-se a posição do avanço de ignição até um "ponto ótimo", denominado *MBT* (*minimum advance for best torque*) onde a máxima pressão média efetiva é alcançada. A partir do "ponto ótimo", podem ocorrer detonações na câmara de combustão (*Knocking*), fenômeno anormal da combustão associado a características limitantes dos combustíveis em relação à pressão. A detonação é fator prejudicial ao rendimento e pode causar danos a componentes do motor.

Outro efeito provém do excesso de antecipação da combustão ao ponto que a resultante da força para o determinado projeto do motor começa a diminuir, resultando na diminuição de torque e rendimento do motor. Stone (1999) menciona que com o adiantamento excessivo do ponto de avanço de ignição, o trabalho necessário no tempo de compressão vai ser maior do que o trabalho liberado no tempo de expansão, resultando em diminuição do rendimento do motor.

No comportamento dos motores de ignição por centelha o funcionamento do avanço de ignição é estabelecido de acordo com a rotação e carga do motor. Mantendo o motor numa mesma faixa de carga e eficiência volumétrica, à medida que a rotação aumenta haverá um correspondente aumento do ângulo de avanço de ignição.

De acordo com o combustível utilizado, os motores flexíveis apresentam em sua calibração, mapas de avanço diferenciados para cada combustível ou misturas de combustíveis.

Uma outra característica é que variando-se o ponto de avanço de ignição, pode-se trabalhar com outros fatores como temperatura de chama na câmara de combustão e temperatura dos gases de escapamento, de forma a também melhorar-se as emissões de gases nocivos ao meio ambiente.

4. DISCUSSÕES DE ANÁLISES DE PRIMEIRA E SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA E DA EXERGIA NO ESTUDO DE MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

Em máquinas térmicas a aplicação da Primeira Lei da Termodinâmica deve ser utilizada nas análises de eficiência dos processos. Em muitos aspectos dos motores de combustão, a Primeira Lei permite que se entendam processos e possam ser realizadas equações que modelem a geração de calor e ou trabalho segundo o princípio de conservação da energia:

$$dE = \delta Q - \delta W \quad (6)$$

Para volume de controle em regime de escoamento uniforme e não permanente a Primeira Lei da Termodinâmica aparece como:

$$\delta Q + \sum_V me.he = \delta W + \sum_V ms.hs + U_f - U_i \quad (7)$$

Onde me e ms são as massas que entram e saem do cilindro e as somatórias se estendem para todas as válvulas do motor (GALLO, 1985).

A Segunda Lei da Termodinâmica, outra ferramenta, permite a obtenção de muitos argumentos para o estudo de observações físicas que têm larga faixa de implicações com respeito a projetos de engenharia e operação de sistemas térmicos. A Segunda Lei pode, por exemplo, ser utilizada na determinação da direção de processos, no estabelecimento das condições de equilíbrio, para especificar o máximo desempenho possível de sistemas térmicos e para identificar aqueles aspectos do processo que trazem detrimientos para a performance do sistema (CATON, 2000).

A exergia, conforme Kotas (1985), “é o máximo trabalho que pode ser obtido de uma dada forma de energia usando como referência os parâmetros do ambiente”. O método da exergia é uma alternativa baseada no conceito de exergia, popularmente definida como uma medida universal do potencial de trabalho. A medição da perda de exergia, ou irreversibilidade, proporciona uma medida da ineficiência de um determinado processo.

4.1. Geração de Entropia nos Motores de Combustão Interna

A crescente preocupação em questões como meio ambiente, conservação de energia útil e cumprimento de normas regulamentares têm aumentado as exigências de projetos e otimização de processos e sistemas térmicos.

“A energia se conserva quantitativamente mas não qualitativamente. O conceito de exergia (ou disponibilidade) considera e avalia a qualidade da energia e, portanto, é de grande valor na análise de sistemas e processos térmicos” (Gallo, 1985).

A entropia, do ponto de vista microscópico, pode ser vista como uma medida microscópica do grau de incerteza e aleatoriedade de um determinado estado ou processo, Kotas (1985).

Quanto maior a entropia gerada num determinado processo, maiores serão as irreversibilidades, ou exergia perdida..

Através da transformação da equação da desigualdade de Clausius numa igualdade, pode-se chegar à entropia gerada num sistema (Gallo, 1985):

$$S_g = S_2 - S_1 - \int_1^2 \delta Q / T \quad (8)$$

Martins and Ribeiro (2009) estudaram o modelo de geração de entropia aplicado a motores de combustão interna. No estudo, certa quantidade de massa que entra e outra que sai pelas válvulas devem também ser consideradas como parte do sistema.

$$\underbrace{\frac{dS}{dt}}_{\text{Variação de entropia no volume de controle.}} = \underbrace{\sum \frac{\dot{Q}_i}{T_i}}_{\text{Variação de entropia devido a transferência de calor.}} - \underbrace{\left(\sum_{out} \dot{m} s - \sum_{in} \dot{m} s \right)}_{\text{Variação de entropia devido a fluxo de massa no volume de controle.}} + \underbrace{\dot{S}_{gen}}_{\text{Geração de Entropia}} \quad (9)$$

A variação de entropia gerada dentro do modelo teórico do ciclo Otto é representada conforme a figura abaixo.

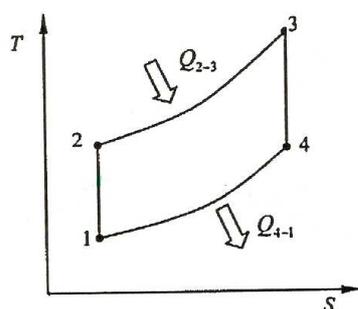


Figura 1 – Diagrama TS teórico de um ciclo Otto Padrão (Martins e Ribeiro, 2009).

Nesse modelo, os processos de compressão e expansão são considerados adiabáticos.

Martins e Ribeiro (2009) consideram que para os processos entre 1 e 4 (compressão, combustão e expansão) a variação de entropia do ciclo real é similar ao do ciclo teórico. No caso do processo entre 4 e 1 (exaustão), o autor explica que não se pode fazer comparações entre o teórico e o real devido aos motores reais serem modelados como sistemas abertos onde ocorre fluxo de massa que entra e sai do sistema, que conduz a um diagrama T - S bastante diferente do ciclo teórico.

A figura abaixo representa a diferença entre um processo real e um processo teórico.

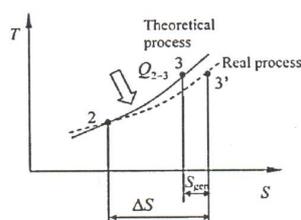


Figura 2 – Geração de entropia num processo real do motor.

Em todos os processos de um motor real são esperadas variações de entropia. No entanto o valor da entropia final entre os sistemas real e o teórico não é a mesma (diferenças entre os pontos 3 e 3'). Isso se deve principalmente à entropia gerada durante o processo real entre os pontos 2 e 3'.

Para calcular a taxa total de entropia gerada no sistema, deve-se somar a entropia gerada devido a cada processo particular.

4.2. Contribuições Entrópicas nos Sistemas dos Motores de Combustão Interna

A eficiência global de um motor de combustão interna no caso real difere da eficiência teórica do Ciclo Padrão Otto. A entropia gerada em cada sistema em particular irá corresponder à parcela de irreversibilidade ou de perda de exergia no sistema.

Martins e Ribeiro (2009) apresentam um estudo dos principais pontos de geração de entropia nos motores de combustão interna. A figura abaixo mostra as contribuições da geração de entropia em cada mecanismo:

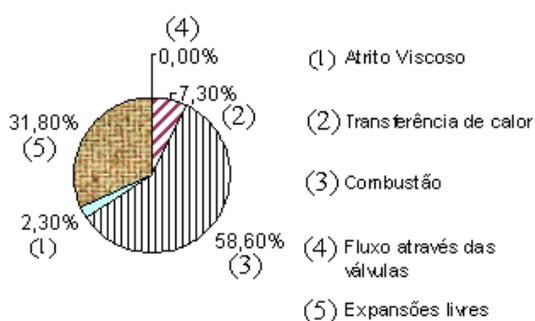


Figura 3 – Percentual de contribuição de entropias geradas em motores de combustão interna (Martins, 2009).

A interpretação qualitativa e quantitativa da figura conduz ao entendimento de quais os principais pontos onde ocorrem as irreversibilidades do sistema, ou destruições de exergia.

Nos desenvolvimentos dos estudos de rendimento de motores de combustão interna, é importante o aprofundamento em cada um dos itens que contribuem na geração de entropia (irreversibilidades) do sistema.

Através dos estudos de geração e variação de entropia nos processos irreversíveis que ocorrem dentro do sistema, Martins e Ribeiro (2009) obtiveram o modelo de irreversibilidades do ciclo Otto para um modelo de motor térmico. O modelo mostrou que o processo de combustão foi responsável por 54% do total da entropia gerada. Expansões livres dos gases de escape, transferência de calor e fluxo de massa através das válvulas foram os mecanismos de ordem de importância consecutivos. Atrito viscoso do fluido de trabalho dentro do motor não teve impacto significativo no total de entropia gerada.

Nos estudos de Gallo (1985), o autor observou que no processo de combustão “a irreversibilidade aumenta violentamente: de uma a duas ordens de grandeza em relação aos demais processos”. O Autor explica que embora haja um aumento de irreversibilidade devido à temperatura da combustão, a própria reação de combustão é a principal fonte de irreversibilidade. O autor ainda complementa afirmando que “uma forma bastante conveniente de analisar cada processo que compõe o ciclo completo consiste em empregar os conceitos de eficiências exergéticas”.

5. APLICAÇÃO DE ANÁLISE ENERGÉTICA E EXERGÉTICA EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

Segundo Torres (1999), a eficiência energética é uma relação entre a energia efetivamente útil e a energia transferida ao sistema térmico.

$$n = \frac{\text{energia útil}}{\text{energia na entrada}} \quad (10)$$

Esse critério informa quanto um equipamento ou uma planta utiliza bem ou mal uma energia disponibilizada. O parâmetro apresentado conduz a uma imperfeição na análise porque trata-se de uma relação entre energias onde nem toda energia disponível na entrada é utilizável.

Torres (2001) explica que a eficiência exergética ou racional é uma relação entre exergias e, portanto, como toda exergia pode teoricamente ser utilizável, esse parâmetro informa melhor o que está acontecendo com a operação do equipamento ou com o sistema térmico.

A relação irreversibilidade/exergia do processo mostra a perda total que o sistema ou a planta tem de acordo com os parâmetros operacionais. A diferença entre a unidade e as perdas do processo é a eficiência exergética.

$$\varepsilon = 1 - \frac{I}{\text{Insumo}} \quad (11)$$

A perda de eficiência exergética é dada pela parcela restante entre a diferença da unidade e a eficiência.

$$\delta = 1 - \varepsilon = \sum_j \delta_j \quad (12)$$

A aplicação das análises energéticas e exergéticas em motores de combustão interna exigem uma série de considerações importantes. MCI são máquinas térmicas que devido à sua concepção de projeto e características de funcionamento apresentam durante os vários regimes de funcionamento variações a cada ciclo e de cilindro para cilindro, entre as variações estão trocas térmicas, fluxos, atritos, e trabalho de saída.

Gallo (1985) desenvolveu análises exergeticas comparativas entre um motor a álcool e a gasolina. No estudo foi desenvolvida uma análise de irreversibilidades em cada processo do motor. Assim como nos estudos de Martins e Ribeiro (2009), o estudo de eficiência exergetica de Gallo (1985) também mostrou que as irreversibilidades durante o processo de combustão é da ordem de 2 vezes maior do que nos processo de admissão e escapamento.

5.1. Balanço de Exergia Aplicado nos Motores de Combustão Interna

Um balanço de exergia é similar a um balanço de energia, porém possui diferenças fundamentais que, enquanto um balanço de energia utiliza o princípio da lei da conservação da energia, um balanço de exergia pode ser entendido como um princípio de lei da degradação da energia, Kotas (1985).

Segundo Teh (2009), a equação do balanço descrevendo a evolução da exergia do fluido de trabalho deve ser escrita como:

$$X_f - X_i = \int_i^f dX = \int_i^f (\delta X_{in} - \delta X_{out} - \delta X_{dest}) \quad (13)$$

Onde:

X_i é a exergia inicial do sistema; X_f representa a exergia do fluido de trabalho que permanece no final do ciclo de operação do motor; o termo dX que representa a mudança diferencial de exergia.

Os termos δX representam as quantidades diferenciais de exergia transferida internamente ou externamente ou destruídas por irreversibilidades do processo (isto é, geração de entropia). A exergia destruída δX_{dest} é devido principalmente à entropia gerada durante o processo de combustão e não pode nunca ser recuperada.

Teh (2009) considera um sistema adiabático e nas considerações de Primeira lei, onde $dU = -PdV$, modelou o sistema como:

$$\delta X_{in} - \delta X_{out} = -(P - P_0)dV = dU + P_0dV \quad (14)$$

Transferências de calor não apareceram nessas considerações. A exergia destruída considerando-se a temperatura ambiente (T_0):

$$\delta X_{dest} = T_0 \delta S_{gen} = T_0 dS \quad (15)$$

As equações podem ser reduzidas pelo balanço de equação a:

$$X_f - X_i = (U_f - U_i) + P_0(V_f - V_i) - T_0(S_f - S_i) \quad (16)$$

5.2. Variáveis para Abordagem em Estudos Exergeticos de Motores de Combustão Interna

Motores de Combustão Interna apresentam como características de funcionamento variações de fluxos nos gases de entrada e saída a cada ciclo do motor. De forma análoga ocorrem também alterações do fluxo mássico de combustível e do ponto de ignição (por centelha ou por compressão). Observam-se alterações na frequência de trabalho – RPM, valores de torque, potência, consumo de combustível, temperaturas e vazões nas variáveis de saída do motor. Dessa forma a realização de um estudo de eficiência exergetica em motores de combustão interna requer a aquisição de dados para os cálculos necessários ao entendimento da eficiência de cada processo do motor.

O estudo de Gallo (1985) é um exemplo de aplicação de análise exergetica em motores de combustão interna. Na pesquisa, foram comparados os resultados de rendimentos exergeticos de um motor utilizando álcool e gasolina. O estudo comparou a influência de diferentes variáveis do processo para comparar as eficiências exergeticas. Se exemplos de variáveis que foram utilizadas e que influenciam exergeticamente no sistema:

- Rotação: De acordo com a rotação (RPM), o motor apresenta diferenças em parâmetros como carga, eficiência volumétrica, consumo e torque. No estudo foram comparados os resultados para duas rotações diferentes, onde foi constatado que houve aumento de irreversibilidades nas rotações menores em comparação com rotações maiores. Esse fato foi atribuído a haver maior troca térmica em rotações menores.

- Coeficiente de ar teórico: Entende-se como a relação entre a mistura ar e combustível, também conhecido como fator *Lambda*. Foram observadas diferenças nas irreversibilidades geradas decorrentes das diferenças nas relações estequiométricas, porém, o modelo encontrado não foi linear e a tendência foi variar de acordo com o combustível utilizado.

- Efeito do tempo de abertura e sincronismo das válvulas de admissão e escape: São observadas alterações em velocidades e pressões das vazões mássicas tanto no processo de admissão quanto de escapamento, que influenciam nas irreversibilidades do processo.

Muitos outros fatores também influenciam e devem ser observados no estudo de rendimento, tais como, influência do ponto de avanço de ignição, trocas térmicas entre os materiais, atritos entre os diversos componentes e entre o lubrificante, ângulo de abertura da borboleta de aceleração e contra-pressão no escapamento.

Dessa forma nas análises de irreversibilidades é importante também ser realizada a análise global que deve levar em consideração os valores de rendimento exergético e do rendimento mecânico (leva em consideração atrito e outros) em cada processo e na análise global do ciclo. Como exemplo, rotações mais elevadas apresentam valores de exergia maiores do que rotações menores devido a menor tempo para trocas térmicas, porém, os atritos em rotações mais elevadas são maiores, aumentando as perdas por atritos.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A aplicação das análises energéticas de Primeira e Segunda Lei da Termodinâmica têm se mostrado ferramentas úteis para o entendimento dos fatores responsáveis pelo rendimento dos motores de combustão interna. Gallo (1985) realizou um estudo de análise exergética de motor a álcool e a gasolina. Seguem discussões dos resultados:

- Os processos de compressão e expansão têm suas irreversibilidades devidas à transmissão de calor; sendo que as irreversibilidades são menores na compressão do que na expansão devido a menores temperaturas;

- Na combustão, a destruição de exergia é devida fundamentalmente às reações químicas, sendo que há também uma parcela devido às temperaturas elevadas;

- Com relação à velocidade do motor (*RPM*), do ponto de vista do desempenho global do motor, quando a rotação aumenta, ocorre um ligeiro aumento do rendimento térmico indicado devido a uma menor transmissão de calor.

O rendimento mecânico diminui em função do aumento do atrito tendo como consequência o rendimento térmico efetivo decrescente. A forma como a rotação afeta as irreversibilidades internas para cada um dos processos (admissão, compressão, combustão, expansão e escape) pode ser avaliada pelas análises exergéticas que indicam o que ocorre em cada processo e como os processos se afetam mutuamente;

- A comparação entre o motor a álcool e a gasolina mostrou que o motor a álcool possui melhor desempenho do que o motor a gasolina sob qualquer critério adotado (rendimento térmico indicado e efetivo, eficiências exergéticas global ou indicada, pressão média efetiva);

- A análise exergética mostra que a eficiência de combustão no motor a álcool é melhor do que na versão a gasolina, quando comparados numa mesma faixa de coeficiente de ar teórico para a combustão;

- Os estudos comparativos entre álcool e gasolina também foram realizados utilizando-se um motor com a mesma taxa de compressão, ainda assim o desempenho com álcool foi superior à gasolina. As eficiências exergéticas são maiores com álcool e as irreversibilidades por unidade de massa que queima também são menores. Isso mostra que o álcool possui uma combustão menos irreversível do que a gasolina.

7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Os estudos de rendimento de motores de combustão interna envolvem muitos fatores e variáveis. *MCI* são máquinas térmicas que apresentam variações ciclo a ciclo originadas, entre outros fatores, por sua concepção de projeto, onde sempre ocorrem diferenças de fluxos, atritos e rendimentos de ciclo a ciclo e de cilindro para cilindro.

A aplicação da análise exergética com a realização das análises entrópicas, cálculos de irreversibilidades e verificações das perdas nos sistemas é ferramenta de grande utilidade para verificação da eficiência dos processos do motor e da eficiência global do sistema.

Os estudos de Gallo (1985) mostrou um desempenho superior do motor quando utilizando álcool comparado com a gasolina. Muitos outros estudos, como Martins and Ribeiro (2009), Teh (2009), e Caton (2000) também utilizaram as análises de Segunda Lei para a observação de *MCI*.

Através das análises exergéticas, pode-se observar que o processo de combustão interna tem a maior contribuição na geração entrópica, ou geração de irreversibilidades do sistema.

Os resultados conclusivos dos estudos também conduzem a pontos que podem ser utilizados na otimização de novos projetos de *MCI* ou na melhoria de atuais projetos.

Na medida em que se otimizam o rendimento de *MCI*, otimizam-se também o aproveitamento do combustível. Dessa forma, as tendências futuras relacionadas a veículos que utilizam *MCI*, tendem a cada vez mais utilizar motores menores e mais eficientes (*Down-sizing*), onde ao serem melhorados os índices de rendimento, melhoram-se também o consumo de combustível e as emissões de gases poluentes ao meio ambiente.

8. REFERÊNCIAS

HEYWOOD JOHN B. Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw-Hill International ed, 1988, 930p.

- MORAN, M. J., SHAPIRO, H. N. Fundamentals of Engineering Thermodynamics. 5th ed. 2004.
- ÇENGEL Y.A., BOLES M. A. Termodinâmica, Quinta edição, MC Graw Hill, 2006.
- MILHOR C. E. Sistema de Desenvolvimento para Controle Eletrônico dos Motores de Combustão Interna Ciclo Otto. (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2002.
- GALLO W.L.R. Análise Exergética de Motores de a Gasolina e a Álcool, Tese de Doutorado Apresentada na Unicamp, 1985.
- SOTO F.P. Apresentação no Seminário SAE, 2008.
- TORRES E. A., Avaliação exergética e termoeconômica de um sistema de cogeração de um pólo petroquímico, Tese de Doutorado Apresentada na Unicamp, 1999.
- MARTINS J.J.G. Thermodynamic Analysis of Spark Ignition Engines Using the Entropy Generation Minimisation Method. Int. J. Exergy, Vol. 6, N°. 1, 2009.
- TEH K-Y, Miller S. L., Edwards C. F. Thermodynamic Requirements for Maximum Internal Combustion Engine Cycle Efficiency. Part 1: Optimal Combustion Strategy.
- TEH K-Y, Miller S. L., Edwards C. F. Thermodynamic Requirements for Maximum Internal Combustion Engine Cycle Efficiency. Part 2: Work Extraction and Reactant Preparation Strategies.
- TEH K-Y, Edwards C. F. An Optimal Control Approach to Minimizing Entropy Generation in an Adiabatic Internal Combustion Engine.
- CATON J. A. A Review of Investigations Using the Second Law of Thermodynamics to Study Internal Combustion Engines. SAE 2000 (2000-01-1081).
- CATON J. A. On The Destruction of Availability (exergy) Due To Combustion Processes – With Specific Application to Internal-Combustion Engines. Energy 25 (2000) 1097-1117.
- GALLONI, E. Analysis About Parameters That Affect Cyclic Variation In a Spark Ignition Engine. Applied Thermal Engineering 29 (2009) 1131-1137.
- TAYLOR, A. M. K. P. Science review of Internal Combustion Engines. Energy Policy 36 (2008) 4657-4667.
- GONZÁLES, G. A., PALMA, A. C., GALICIA, A. L. Máximum Irreversible Work and Efficiency in Power Cycles. J. Phys. D: Appl. Phys. 33 (2000) 1403 – 1409.

METHODOLOGY TO STUDY THE THERMODYNAMIC EFFICIENCY OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES

Márcio Augusto Sampaio de Carvalho, marcio.carvalho@cimatec.fieb.org.br¹

Ednildo Andrade Torres, ednildo@ufba.br²

Felipe Soto Pau, sotopauf@hotmail.com³

¹SENAI CIMATEC, Av. Orlando Gomes, 1845, Piatã. CEP:41650-010, Salvador-Ba.

²UFBA, Av. Aristides Novis, 2, Federação. CEP: 40210-630. Salvador-Ba.

Resumo: *Global Warming, emissions and sustainability are issues increasingly discussed considering environmental problems. It becomes evident the need of machines more efficient and energy sources less polluting. Internal combustion engines appear as great evils of global warming due to its use as driving energy of a huge fleet of existing and ever increasing annual worldwide production of automobiles, resulting among others problems, the enormous of CO₂ emissions.*

Many design changes occurred during the evolution of the internal combustion engines that increased the efficiency of the system, such as the use of more appropriate materials for heat exchange and fluid dynamics, intake manifolds and variable valve timing and electronic management engine control. But there is still considerable gap between a real engine efficiency and a theoretical maximum efficiency, or second Carnot Cycle.

This paper presents a methodology to study energy efficiency and exergy efficiency of internal combustion Otto Cycle using more than one fuel (flexible). The topics are presented through the exhibition on the performance of internal combustion engines, with considerations of the First and Second Laws of thermodynamics.

Keywords: *Internal combustion engine, efficiency, exergy.*