

Motores a combustão

O *motor* é um dispositivo que transforma energia em movimento. O *motor térmico* transforma energia térmica em movimento. Nos carros, ônibus e caminhões, o calor movimenta um pistão. O movimento de vai-e-vem do pistão está associado à compressão e à expansão do gás de trabalho dentro de uma câmara. Este movimento é transformado em movimento de rotação de um eixo que movimenta as rodas do veículo.

Nos motores a combustão, a injeção de calor para realização de trabalho é feita a partir da reação química de queima de oxigênio. Os dois motores a combustão mais importantes são o motor Diesel e o motor a gasolina.

Então, nos motores a combustão, temos a sequência:

- I. combustão da mistura de ar e combustível na câmara
- II. liberação de calor (a partir da transformação de energia química ou energia potencial das moléculas)
- III. expansão dos gases da câmara
- IV. para fechar o ciclo, e reiniciar a transformação, a troca dos gases da combustão por gás “novo” na câmara.

E qual é a diferença entre os dois motores?

No motor Diesel, a combustão é iniciada por compressão, ao passo que no motor a gasolina, a combustão é provocada por uma faísca elétrica. Observem os vídeos

http://www.stefanelli.eng.br/webpage/p_diesel.html

<http://www.youtube.com/watch?v=v4XNKDqKVt0&feature=related>

<http://www.youtube.com/watch?v=KQsUwKPUWQ8>

<http://www.youtube.com/watch?v=6-udN4cZ6HU>

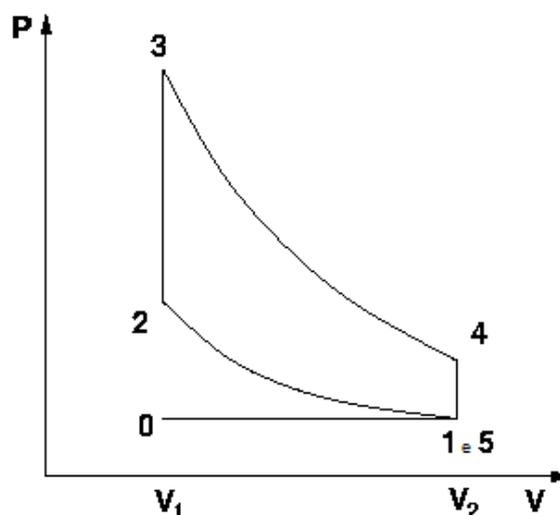
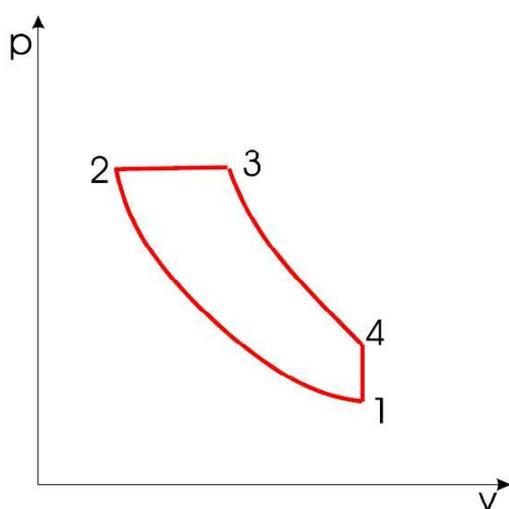
(procure por outros!)

e acompanhe na tabela:

Motor Diesel		Motor a gasolina (ciclo Otto)	
Étapas do motor	Transformações (ideais) termodinâmicas	Étapas do motor	Transformações (ideais) termodinâmicas
entrada de ar		entrada de ar + combustível	
compressão	compressão adiabática (sem troca de calor)	Compressão	compressão adiabática (sem troca de calor)
injeção de combustível seguida de ignição, manutenção de injeção de combustível com controle de pressão durante a combustão e expansão dos gases quentes	expansão a pressão constante	faísca e ignição, "instantânea" = sem variação de volume	aquecimento a volume constante
expansão dos gases quentes (final da expansão sem ingestão de combustível)	expansão adiabática	expansão dos gases quentes	expansão adiabática
troca de gás quente (exaustão ou escape) por gás frio (admissão): exaustão com compressão e admissão com expansão*	resfriamento a volume constante	troca de gás quente (exaustão ou escape) por gás frio (admissão) : exaustão com compressão e admissão com expansão*	resfriamento a volume constante

*observem que a compressão e expansão que ocorrem no ciclo "real" não comparecem no ciclo teórico – não envolvem fornecimento de calor.

Qual dos dois ciclos abaixo representa o ciclo Otto? E o ciclo Diesel?



Explique sua escolha.

Preencha a tabela abaixo para cada um dos dois ciclos, descrevendo aumento, diminuição ou constância de cada variável:

Nome do ciclo:		Nome do ciclo:	
----------------	--	----------------	--

Etapa 1-2			Etapa 1-2	
Pressão			Pressão	
Volume			Volume	
Temperatura			Temperatura	
Etapa 2-3			Etapa 2-3	
Pressão			Pressão	
Volume			Volume	
Temperatura			Temperatura	
Etapa 3-4			Etapa 3-4	
Pressão			Pressão	
Volume			Volume	
Temperatura			Temperatura	
Etapa 4-1			Etapa 4-1	
Pressão			Pressão	
Volume			Volume	
Temperatura			Temperatura	

Descrição matemática das transformações de energia

Ciclo II

Vamos calcular as transformações de energia no caso do **segundo ciclo** (vamos denominá-lo ciclo II) acima. Para isto, teremos que considerar o gás na câmara como ideal, para o qual valem as relações entre variáveis termodinâmicas:

$pV=nRT$, para a pressão, e

$U=cnRT$, para a energia interna, onde $c=3/2$ ou $5/2$, ou outro valor constante.

Temos duas transformações adiabáticas, e duas transformações isovolumétricas.

- **Transformações isovolumétricas:**

-> Variação de energia interna = calor recebido pelo gás, ou $dU=dQ$

-> $dU = cnRdT$

Portanto, nas etapas 2-3 e 4-1, temos

$$\Delta U_{2-3}=\Delta Q_{2-3}=ncR(T_3-T_2) > 0$$

$$\Delta U_{4-1}=\Delta Q_{4-1}=ncR(T_1-T_4) < 0.$$

- **Transformações adiabáticas:**

-> Variação de energia interna = -trabalho realizado pelo gás $dU=-dW=-pdV$

-> $dU = cnRdT$, e $pdV = (nRT/V)dV$, para o gás ideal, portanto $cnRdT = -(nRT/V)dV$

Da última igualdade, temos

$c(dT/T) = - (dV/V)$, que, na forma integral, leva a

$c \ln(T/T_0) = -\ln(V/V_0)$, ou ainda,

$$T^c V = T_0^c V_0.$$

-> o trabalho na transformação adiabática fica dado por

$$\begin{aligned} W(Q=0) &= \int_{V_i}^{V_f} p dV \\ &= \int_{V_i}^{V_f} (nRT/V) dV = nR \int_{V_i}^{V_f} T_i (V_i/V)^{1/c} (1/V) dV = nR T_i V_i^{1/c} \int_{V_i}^{V_f} T_i V^{-1-1/c} dV \\ &= -cnR T_i V_i^{1/c} (V_f^{-1/c} - V_i^{-1/c}) \\ &== -cnR T_i [(V_i/V_f)^{1/c} - 1] \end{aligned}$$

Portanto, nas transformações 1-2 e 3-4, temos

$$\begin{aligned} W_{1-2} &= -cnR T_1 [(V_1/V_2)^{1/c} - 1] < 0 \\ W_{3-4} &= -cnR T_3 [(V_3/V_4)^{1/c} - 1] = -cnR T_3 [(V_3/V_4)^{1/c} - 1] = -cnR T_3 [(V_2/V_1)^{1/c} - 1] \\ &= -cnR T_3 (V_2/V_1)^{1/c} [1 - (V_1/V_2)^{1/c}] > 0 \end{aligned}$$

Eficiência do ciclo

A eficiência de um motor é definida como a razão entre o trabalho líquido obtido (o objetivo do motor) e o calor fornecido ao gás (energia dispendida para obter o movimento), ou,

$$\eta = W(\text{líquido})/Q(\text{recebido}).$$

No caso do ciclo discutido acima, temos

$$\begin{aligned} \eta &= (W_{1-2} + W_{3-4})/Q_{2-3} \\ &= \{- cnR T_1 [(V_1/V_2)^{1/c} - 1] - cnR T_3 (V_2/V_1)^{1/c} [(V_1/V_2)^{1/c} - 1]\} / \{ ncR(T_3 - T_2) \}. \end{aligned}$$

Esta expressão pode ser muito simplificada, e escrita em função da razão de compressão V_1/V_2 .

Vamos definir

$$\alpha = (V_1/V_2)^{1/c}$$

e utilizar, da transformação adiabática 1-2,

$$T_1 (V_1)^{1/c} = T_2 (V_2)^{1/c} \rightarrow T_2 = T_1 (V_1/V_2)^{1/c} = T_1 \alpha.$$

Substituindo na expressão da eficiência acima,

$$\eta_{\text{teórica do ciclo II}} = \{ (1 - \alpha) (T_1 - T_3 / \alpha) \} / \{ (T_3 - T_1 \alpha) \} = 1 - 1/\alpha.$$

Este resultado diz que a eficiência depende apenas da razão de compressão (razão entre os volumes de gás frio antes e depois da compressão) e do calor específico dos gases. Esta é a previsão teórica, que, como vimos, baseia-se numa idealização dos processos. Essa idealização ocorre em várias hipóteses que utilizamos para construir o ciclo teórico: substituição de transformações de não-equilíbrio por uma sucessão de estados de equilíbrio; substituição das transformações “reais”, da máquina, por transformações idealizadas (sem perda de calor; sem variação de volume); substituição de misturas de gases reais, que se transformam através da reação química da combustão por gás ideal.

Pesquise sobre a eficiência de motores do tipo II e compare com a previsão teórica.

Ciclo I

Agora analise o ciclo da primeira figura, obtenha expressões para o trabalho líquido e o calor absorvido. Verifique que a eficiência deste ciclo Diesel teórico é dada por

$$\eta_{\text{teórica do ciclo I}} = 1 - \left\{ \frac{1}{\alpha} \left[c \left(\beta^{1+1/c} - 1 \right) \right] / \left[(c+1)(\beta - 1) \right] \right\},$$

onde $\beta = V_3/V_2$.

Quais são os parâmetros importantes deste motor, segundo a teoria?