

# Ciclo de Otto: aplicação teórica e utilidade prática

Jorge Luiz Gomes Dias – julho 2009

Mestrado Profissional em Ensino de Física / Universidade Federal do Rio de Janeiro

## Resumo

Neste trabalho é apresentada, mais que alguma informação sobre o comportamento de um gás ideal, uma **proposta de divulgação** para um dos ciclos termodinâmicos mais utilizados pelo homem para seu conforto e desenvolvimento. **O ciclo de Otto**, apesar de ser pouco divulgado, é utilizado para movimentar máquinas agrícolas e também indústrias, automóveis, geradores de energia elétrica, entre outros. Tendo como base o **modelo do gás ideal**, o assunto é atraente e representa uma oportunidade de mostrar aos estudantes, inclusive do ensino médio, um emprego das evoluções gasosas que permite a aplicação e uma interpretação comparativa de gráficos e expressões das leis relacionadas aos gases ideais.

## Abstract

This paper presents, more than some information about an ideal gas behavior, a proposal to make public one of the thermodynamic cycle most used by men in order to provide mankind's comfort and development. The Otto cycle, although little publicized is used to move agricultural engines and also industries, cars, electric energy generator, and others. Based on the ideal gas model, the issue is interesting and represents an opportunity to show students, including the high school ones, an application of gas evolutions which allows comparative analysis in graphics and laws related to ideal gases.

## 1. Apresentação

A utilização da ciência em benefício da humanidade deve estar sempre em primeiro plano dentre os objetivos de nossos pesquisadores; no entanto, nem sempre é esta a realidade dos centros de pesquisa. Partindo do pressuposto da importância da pesquisa científica para a vida do homem, vamos abordar a evolução das máquinas térmicas pelo viés que julgamos ser de maior utilidade prática, enfatizando o comportamento de um gás ideal tomado como modelo para o funcionamento de tais máquinas.

## 2. Principais nomes do ciclo

### 2.1. Alphonse Beau de Rochas

Foi este engenheiro francês quem idealizou, em 1862, o ciclo fechado termodinâmico em que se alternavam duas evoluções adiabáticas e outras duas isocóricas, assim como apresentado na figura 1.



Fig. 01. Alphonse Beau de Rochas

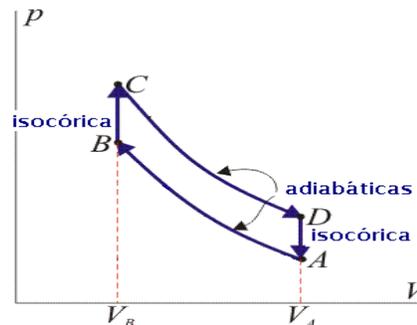


Fig.02. gráfico: pressão x volume

### 2.2. Nikolaus August Otto

Engenheiro alemão que, juntamente com seu assistente Gottlieb Daimler e com Wilhelm Maybach, de forma independente, concluiu seus trabalhos em 1876 na construção de um motor com o mesmo ciclo do francês de Alphonse Beau de Rochas. Ganhou uma medalha de ouro por seu “motor de gás atmosférico de quatro fases”, ou quatro tempos, como também é conhecido, na Exposição de Paris em 1867.

O motor de ciclo Otto usa combustíveis leves, tais como gasolina, álcool, gás natural.



Fig. 03. Nikolaus A. Otto

### 2.3. Daimler e Maybach

Saíram da empresa de Otto e abriram a Companhia Daimler de motores. Desenvolveram um carburador que vaporizava o petróleo e o misturava com ar.

O novo motor de Daimler, movido a gasolina, acelerava 900 rpm (rotações por minuto) – sete vezes mais rápido do que a máquina de Otto.

Em 1886, acoplaram sua invenção revolucionária a uma carruagem a cavalo e assim aumentaram sua potência, atingindo 16 km/h.



Fig. 04. Daimler

### 2.4. Sir Dugald Clerk:

Engenheiro escocês, que no mesmo ano de 1886 lançou o primeiro motor de dois tempos de sucesso.



Fig. 05. motocicleta Terrot

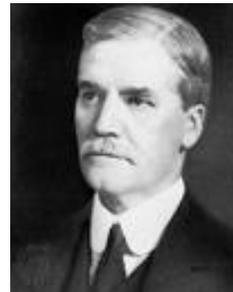


Fig. 06. Sir Dugald Clerk

### 2.5. Carl Benz

Também alemão, formado na Escola Politécnica de Karlsruhe, após trabalhar como desenhista numa fábrica de balanças e como construtor de pontes, em 1871 fundou, com o "mecânico" August Ritter, sua primeira firma, em Mannheim. Como Ritter não se mostrou um sócio confiável, Carl Benz comprou a parte de Ritter com a ajuda de sua noiva, Bertha Ringer, e continuou com a empresa sozinho. A participação de Bertha seria, então, crucial para o sucesso da jovem empresa que, em 1886, recebeu a patente e lançou seu primeiro "veículo Benz motorizado e patenteado" ao público, alcançando 1200 unidades.

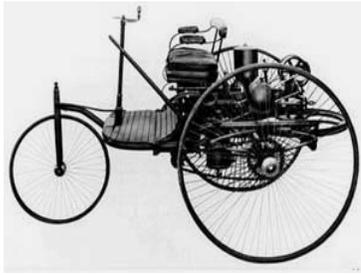


Fig. 07. triciclo motorizado



Fig. 08. 1º automóvel em série



Fig. 09. Karl Benz

### 3. Esquema simplificado da máquina de Otto

A Figura 10 dá uma idéia da operação de um cilindro básico de um motor de ciclo Otto: dispões de 2 válvulas (admissão no lado esquerdo e escape no lado direito) e de um dispositivo de centelha elétrica para ignição (vela).

A mistura de ar e combustível é fornecida por um sistema de alimentação (carburador ou sistemas de injeção eletrônica).

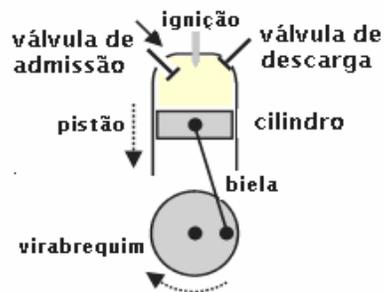


Fig. 10

### 4. Fases do ciclo

#### 4.1. 1ª fase: admissão

A vélula de admissão está aberta e o movimento do pistão aspira a mistura de ar e combustível para o interior do cilindro. É uma transformao (EA) praticamente isobárica.

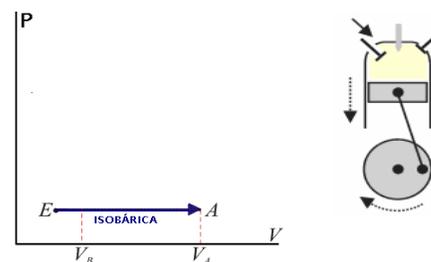


Fig. 11

#### 4.2. 2ª fase: compressão

Ao atingir a posição mais inferior (ponto morto inferior), a válvula de admissão é fechada e o movimento ascendente comprime a mistura. Esse processo (AB) é aproximadamente adiabático, porque a velocidade do pistão é alta, havendo pouco tempo para a troca de calor.

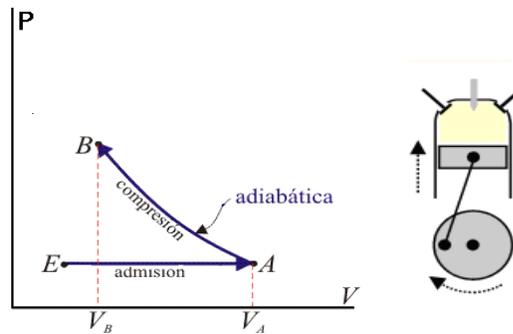


Fig. 12

#### 4.3. 3ª fase: explosão

Ao atingir a posição mais superior (ponto morto superior), tem-se o final do movimento ascendente do êmbolo que comprime ao máximo a mistura. Nesse instante a ignição emite a centelha que provoca a combustão da mistura. O processo é praticamente isocórico.

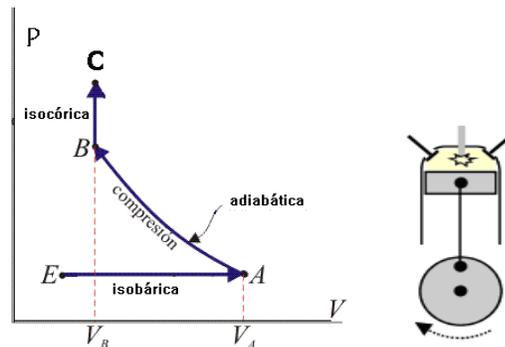


Fig. 13

#### 4.4. 4ª fase: expansão

O fornecimento de calor eleva a pressão da mistura, que se expande, forçando o pistão para baixo como na figura 14. Como na compressão, a transformação pode ser suposta adiabática.

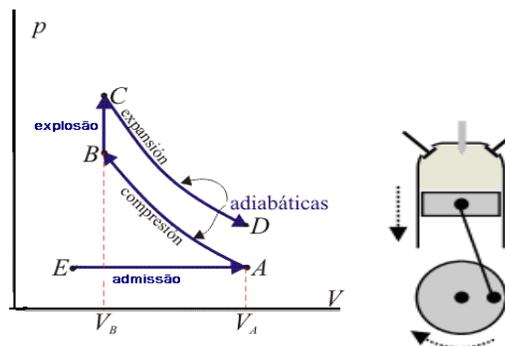


Fig. 14

#### 4.5. 5ª fase: descarga

O pistão atinge o ponto morto inferior, quando a válvula de escape é aberta, reduzindo rapidamente a pressão do gás. Pode-se supor um processo sob volume constante, durante o qual o ciclo cede calor ao ambiente.

O movimento ascendente com a válvula de escape aberta remove a maior parte dos gases da combustão e o ciclo é reiniciado quando o pistão chega ao ponto morto superior.

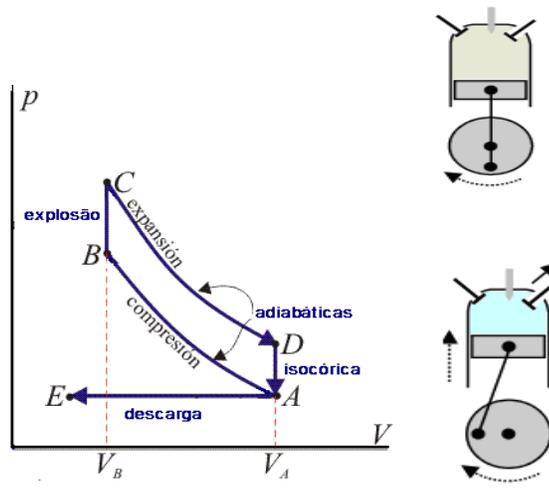


Fig. 15

### 5. Eficiência, Gráficos e cálculos

#### 5.1. Fatores relevantes para um bom desempenho do motor

##### 5.1.1. Combustível

Um bom combustível deve resistir à alta pressão sem explodir espontaneamente, permitindo que a mistura (ar + combustível) atinja o volume mínimo, para só então explodir com o centelhamento da vela de ignição. Tal combustível é dito de alta octanagem

##### 5.1.2. Taxa de Compressão do Motor (r)

Também conhecida como relação de compressão, é a razão entre o volume máximo e o volume mínimo verificados durante o ciclo do interior do cilindro. Na prática a taxa de compressão é limitada pela ocorrência de auto-ignição da mistura (baixa octanagem).

$$r = V_A / V_B$$

### 5.1.3. Período do Ciclo (T)

Quanto menor o intervalo de tempo necessário para que o pistão execute um ciclo completo maior será a eficiência do motor o que também depende diretamente da qualidade do combustível.

### 5.2. Gráfico Pressão x Volume

Para analisar o ciclo de Otto vamos omitir as evoluções isobáricas (EA e AE) correspondentes à admissão (injeção) e à descarga. Considerando conhecidos o calor específico a volume constante e a pressão constante do gás ( $c_v$  e  $c_p$ ), as temperaturas (T) e os volumes (V) nos estados A, B, C e D, aplicando o primeiro princípio podemos calcular o trabalho (W) do gás em cada ciclo.

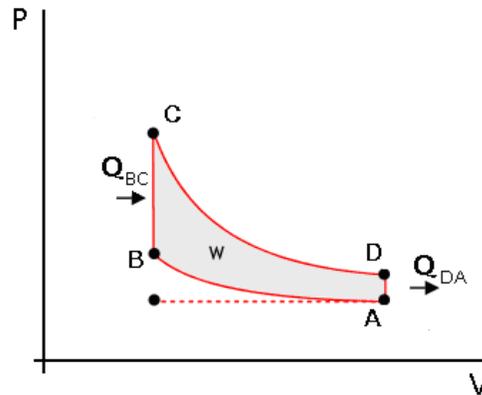


Fig. 16

### 5.3. Cálculo do Trabalho e Eficiência

Sabemos que durante as evoluções consideradas adiabáticas o gás não troca energias sob forma de calor com o meio externo. Ocorre apenas troca de energia sob forma de energia mecânica.

Nas transformações isocóricas, ao contrário não há realização de trabalho mas há troca de calor. Assim sendo. Temos:

**Calor absorvido:**  $Q_{BC} = c_v (T_C - T_B)$

**Calor cedido:**  $Q_{DA} = c_v (T_D - T_A)$

Atendendo ao primeiro princípio, escrevemos:  $W_{ciclo} = dQ - dU$

**Trabalho:**  $W_{\text{ciclo}} = dQ - dU$ , sendo a variação da energia interna do gás durante cada ciclo fechado  $dU = 0$  e  $dQ = Q_{BC} - Q_{DA}$ . Substituindo, temos:

$$W = dQ = c_v [(T_C - T_B) - (T_D - T_A)]$$

A eficiência ( $\eta$ ) do ciclo é dada pela relação entre o trabalho realizado e o calor total fornecido. Assim, obtemos:

$$\eta = W / Q_{BC} = (Q_{BC} + Q_{DA}) / Q_{BC} = 1 + Q_{DA} / Q_{BC}$$

$$\eta = 1 + c_v [(T_A - T_D) / c_v [(T_C - T_B)$$

$$\eta = 1 + T_A [1 - (T_D / T_A) / T_B [(T_C / T_B) - 1].$$

Considerando que  $T_C / T_B = T_D / T_A = (V_A / V_B)^{(h-1)}$

Assim a eficiência ou rendimento pode ser escrita:

$$\eta = dQ / Q_{BC} = 1 - (T_A / T_B) = 1 - [(V_A / V_B)]^{-(h-1)}$$

em que  $h$  é a relação  $c_p/c_v$ .

O termo  $(V_A / V_B)$  equivale à relação entre os volumes máximo e mínimo do interior do cilindro. É comumente denominado relação de compressão ou taxa de compressão do motor, que se simboliza com  $r$ . Portanto, a eficiência é dada por :

$$\eta = 1 - 1 / r^{(h-1)}$$

## 6. Gráfico do rendimento x Taxa de compressão

O gráfico da figura 17 mostra a variação da eficiência ou rendimento  $\eta$  com a taxa de compressão  $r$ , para  $h = 1,35$  (valor típico para uma mistura ar e combustível comum). Entretanto, na prática, a taxa de compressão é limitada pela ocorrência de auto-ignição da mistura. Valores reais estão na faixa de 9 a 11. Mesmo com essa limitação, a eficiência real do ciclo é significativamente inferior à calculada por essa fórmula.

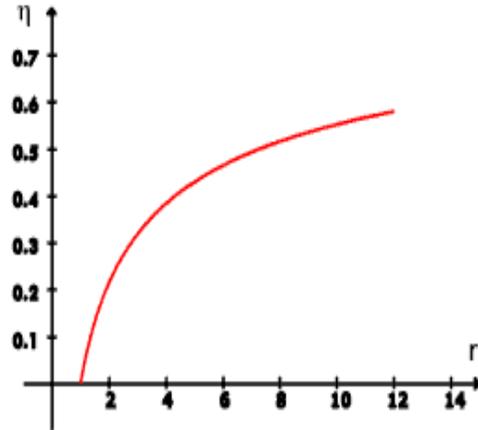


Fig. 17

## 7. Gráficos: Entropia x Temperatura e Pressão x Volume

A correspondência entre os gráficos das figuras 18 e 19 mostra como VARIA A ENTROPIA nas evoluções isocóricas BC e DA, e que nas transformações adiabáticas, AB e CD, a VARIAÇÃO da ENTROPIA é NULA.

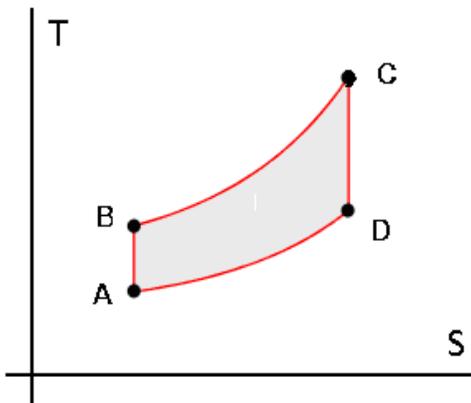


Fig. 18

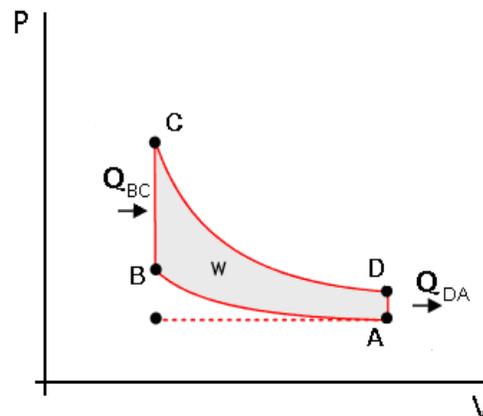


Fig. 19

## 8. Pequeno Resumo

A figura 20 dá uma idéia da operação de um cilindro básico de um motor de ciclo Otto: dispõe de duas válvulas (admissão no lado esquerdo e escape no lado direito) e de um dispositivo de centelha elétrica para ignição (vela). A mistura de ar e combustível é fornecida por um sistema de alimentação (carburador ou sistemas de injeção).

Esse é o princípio de operação do motor de quatro tempos

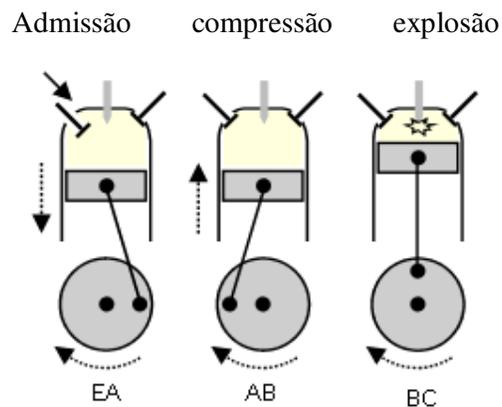


Fig. 20

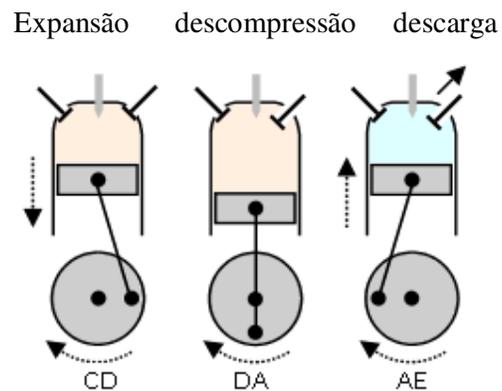


Fig. 21

## 9. Considerações finais

O principal objetivo deste trabalho foi descrever uma importante contribuição dos estudos termodinâmicos para o progresso científico. Espera-se, com essa discussão, colaborar para uma maior divulgação do ciclo de Otto e mostrar aos estudantes por que

e para que alguns homens passam seu tempo pensando, modelando e experimentando em laboratórios; fazendo seus cálculos e refazendo-os sempre que necessário. Ainda, revelar que, muitas vezes, uma observação em princípio irrelevante pode futuramente ser de grande importância para proporcionar conforto, aperfeiçoar descobertas na área da saúde, enfim, contribuir para o desenvolvimento geral do ser humano.

Despertar nos estudantes o interesse pela pesquisa científica é crucial para o reconhecimento da importância do estudo das ciências naturais. E, nesse sentido, o estudo de máquinas térmicas pode incluir o ciclo de Otto como um elemento atrativo no aprendizado das transformações de gases ideais, pois sua utilização prática em automóveis e no funcionamento de máquinas tende a ser um assunto de interesse dos estudantes do ensino médio.

## 10. Referências

SILVEIRA, Fernando Lang da. *Máquinas térmicas à combustão interna de Otto e de Diesel*. Instituto de Física da UFRGS.

RISSO, P.L. Curto; MEDINA A. & HERNÁNDEZ, A Calvo. **Theoretical and simulated models for na irreversible Otto cycle**. In: *Journal of applied physics*, n. 104, 094911/2008. Disponível em: [www.msps.eng.br/termo/termod0520](http://www.msps.eng.br/termo/termod0520) .

PAULI, FARID, & HEILMANN. Calor e Termodinâmica. EPU. 1979, p. 176-177.