



Termodinâmica e Estrutura da Matéria

Aula 14 – Motores de combustão interna

Carlos A. Santos Silva

Professor Associado Convidado

Cátedra WS – Energia

Departamento de Física

carlos.santos.silva@tecnico.ulisboa.pt



Sumário

- Motores de combustão interna
- Ciclos de Otto
- Ciclo Diesel
- Ciclo de Stirling
- Laboratório 2

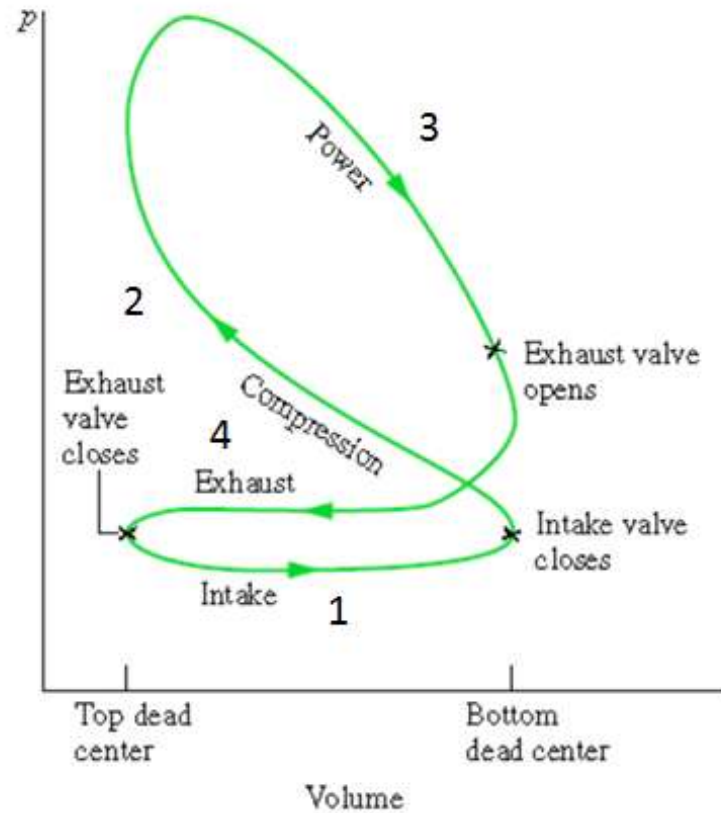
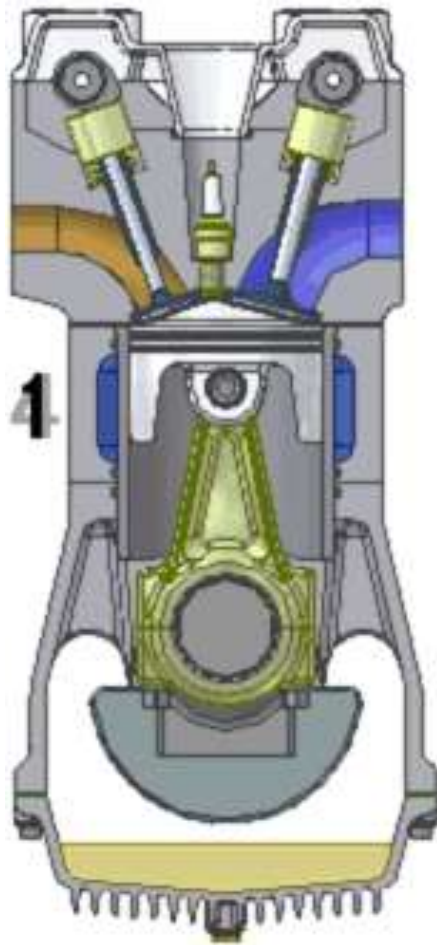
MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

Definição

- Motores de combustão interna são máquinas térmicas em que o fluido de trabalho são os próprios gases de combustão
 - Os ciclos de gás são também motores de combustão interna
 - Os ciclos a vapor são de combustão externa
- São sistemas que produzem movimento recíproco
- Os processos termodinâmicos ocorrem todos no mesmo sistema
- Dois tipos de ignição da combustão
 - Por faísca (ciclo Otto, *motor a gasolina*)
 - Mais leves, mais baratos, potências até 225kW (300hp)
 - Por compressão (ciclo Diesel, *motor a gasóleo*)
 - Mais potência, mais eficiência



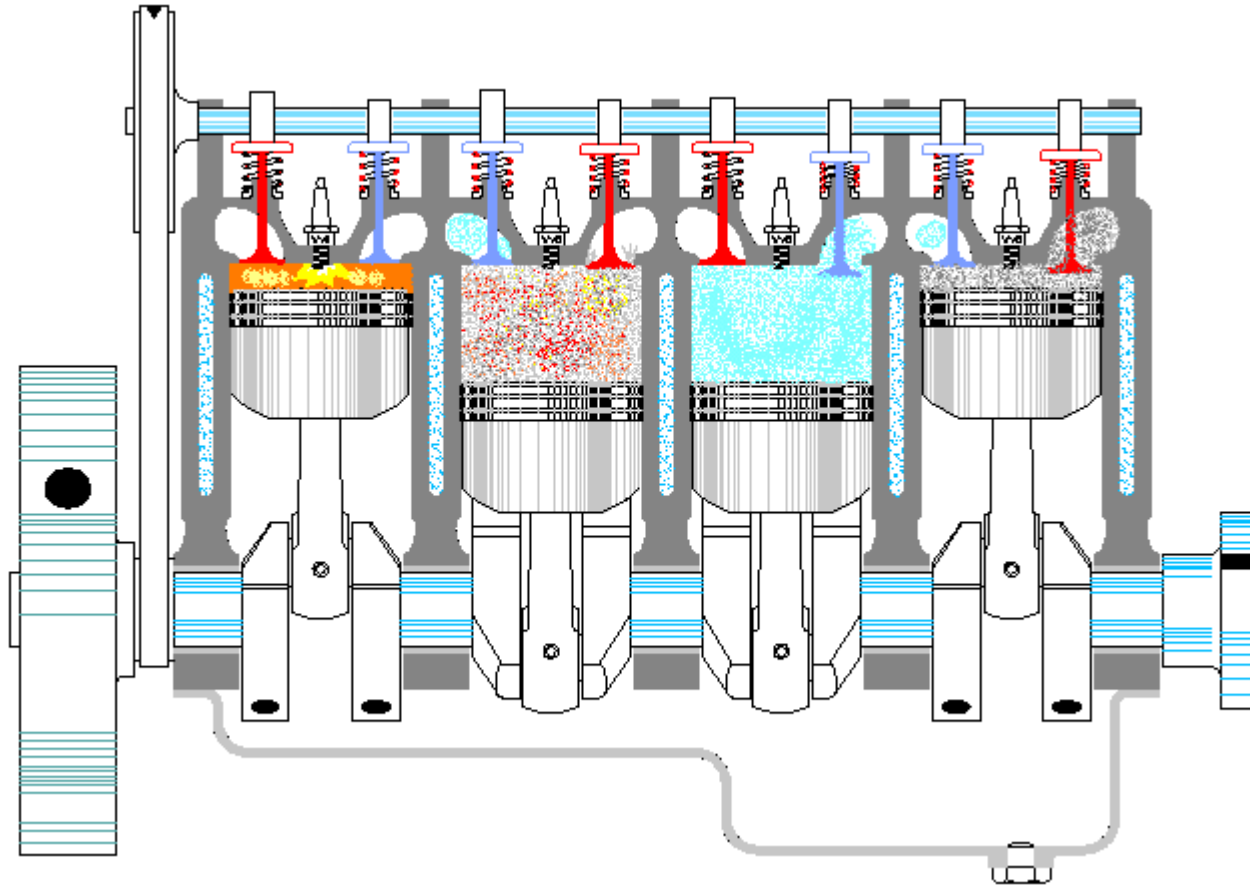
Funcionamento de um motor combustão interna



Motores a 4 tempos

1. Quando a válvula de admissão abre, o pistão desce e recebe ar novo (Diesel) ou mistura ar/fuel (Otto)
2. Com ambas as válvulas fechadas, o pistão comprime a mistura (requer trabalho fornecido por outro cilindro). É iniciado o processo de combustão por faísca (Otto) ou auto-ignição por injeção do combustível (Diesel)
3. A combustão provoca uma expansão e é realizado trabalho
4. A válvula de exaustão é aberta e os gases são libertados, por compressão do pistão

Motor a 4 cilindros

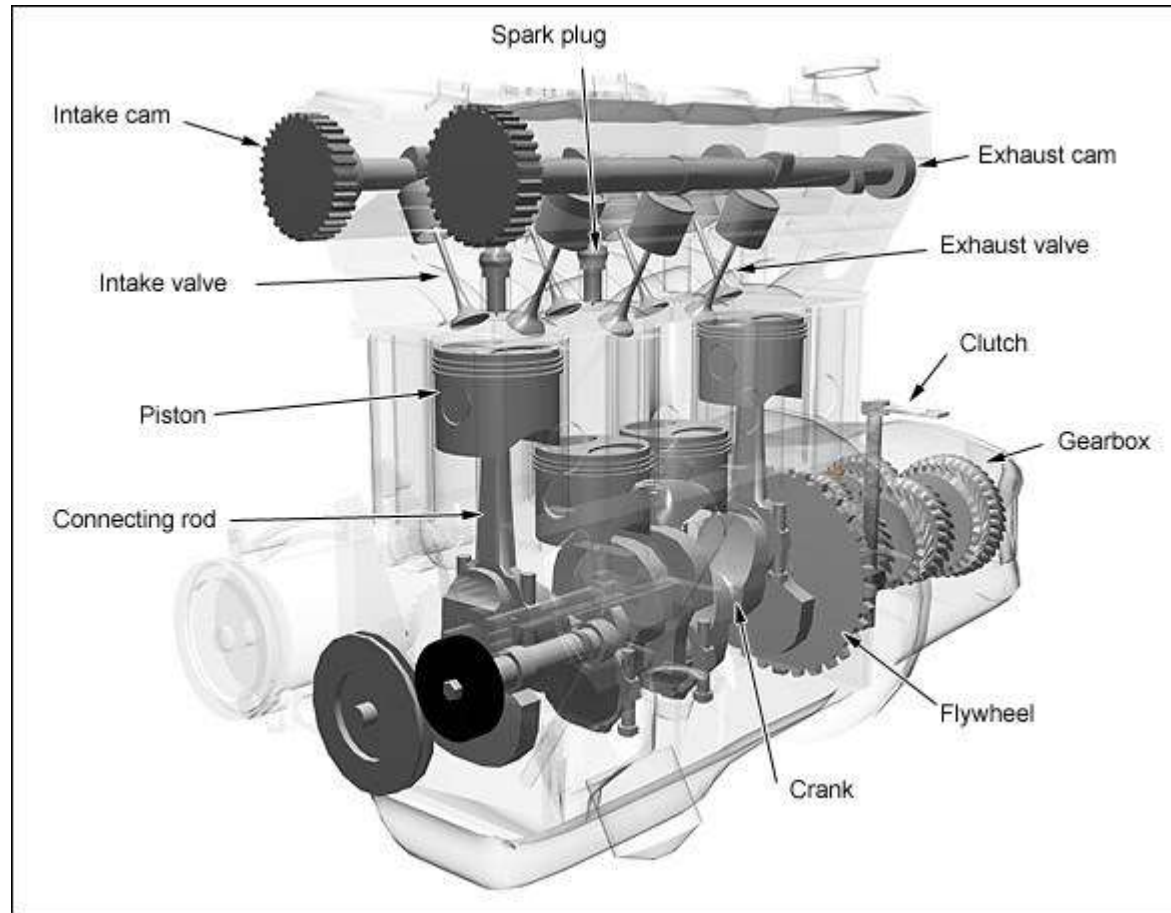


Componentes do motor

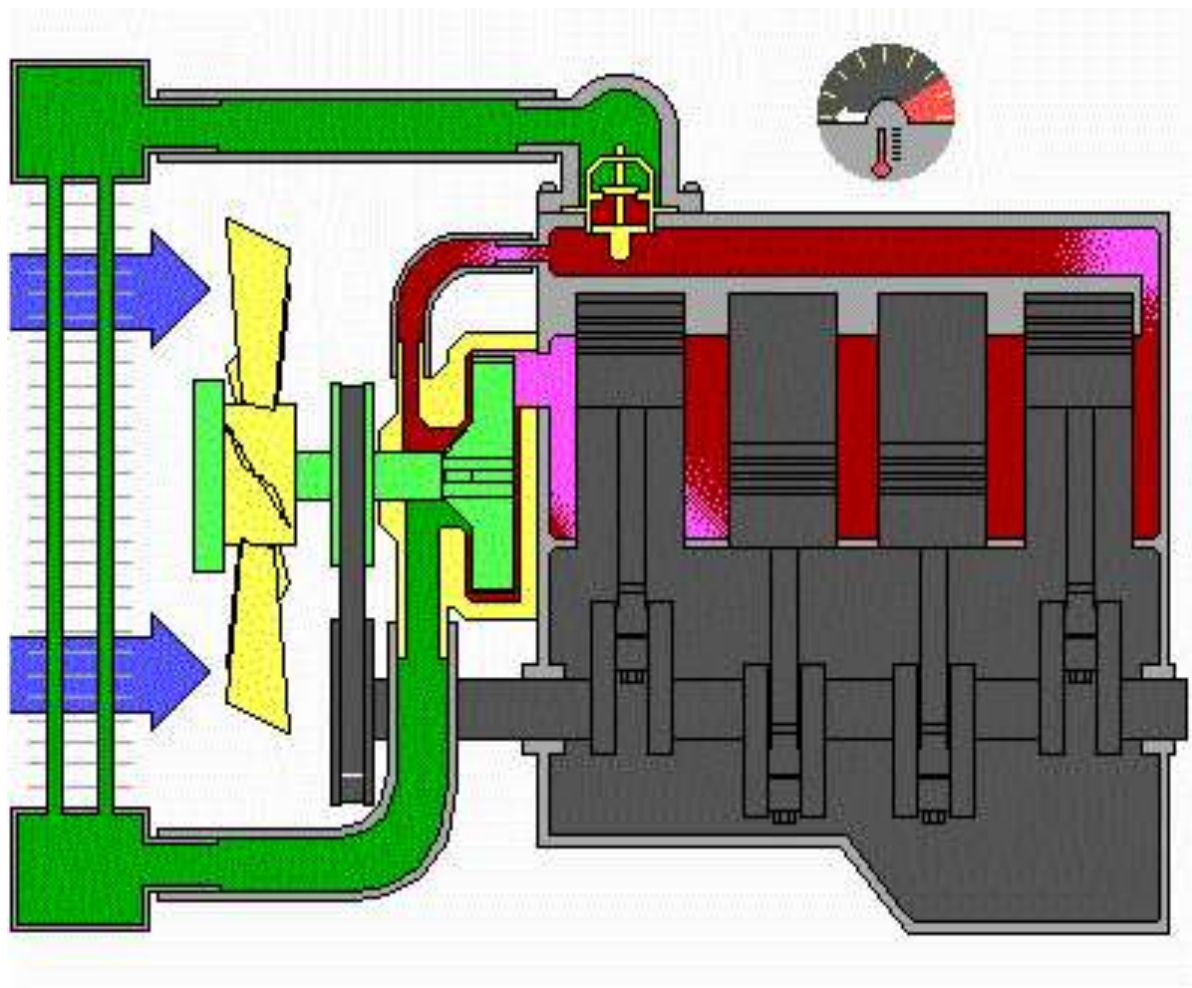


Figura 1

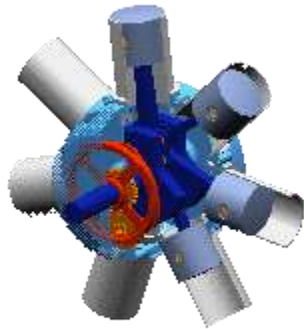
Motor 4 cilindros linear (típico)



Arrefecimento do motor



Diferentes tipos de configuração



6 cilindros

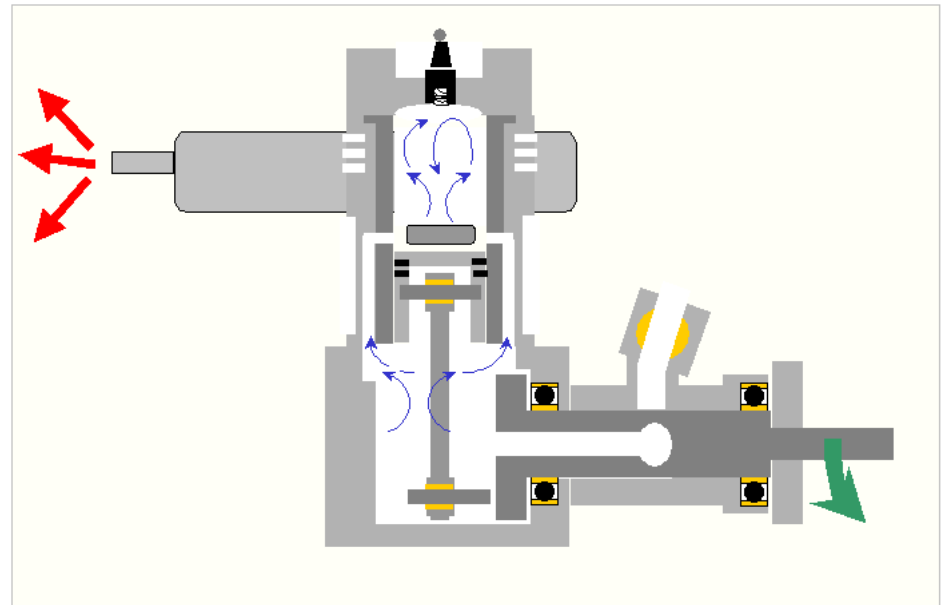


8 cilindros



Motores a 2 tempos

1. Quando a válvula de admissão abre, o pistão desce e recebe ar novo ou mistura ar/fuel
2. Com ambas as válvulas fechadas, o pistão comprime a mistura (requer trabalho fornecido por outro cilindro). É iniciado o processo de combustão por faísca ou auto-ignição por injeção do combustível
2. A combustão provoca uma expansão e é realizado trabalho
1. A válvula de exaustão é aberta e os gases são libertados, por compressão do pistão



Pressão média efectiva (MEP)

- Medida de desempenho dos motores de combustão interna
 - Pressão constante teórica que, caso aplicada na altura da explosão/combustão, resultaria no mesmo trabalho

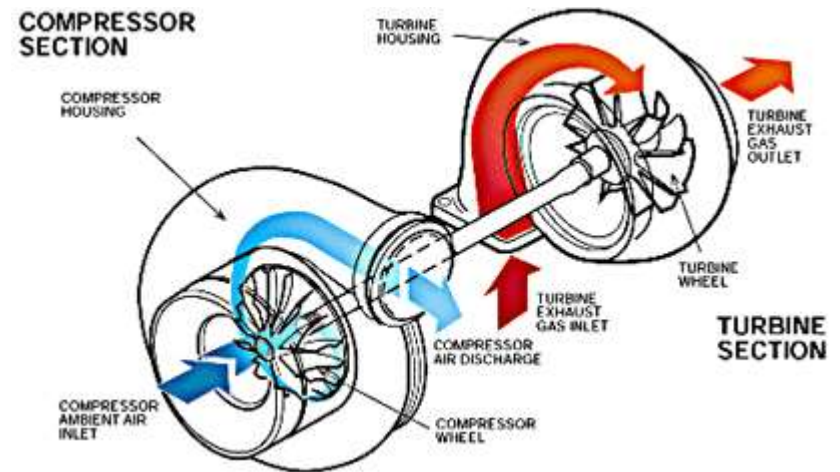
$$mep = \frac{\textit{trabalho produzido num ciclo}}{\textit{volume deslocado}}$$

Análise ar-padrão

- Para analisarmos os motores de combustão interna como ciclos, podemos assumir a análise ar-padrão
 - O ar é considerado como gás ideal
 - Não temos admissão nem exaustão de gases
 - Todos os processos são internamente reversíveis
- Estas simplificações não são muito realistas e por isso, esta análise apenas serve para efeitos qualitativos

TurboCompressor (Turbo)

- Sistema constituído por um compressor acionado por uma turbina:
 - A turbina é acionada pelos gases quentes de escape
 - O Compressor aumenta a pressão dos gases de admissão, fazendo com que a densidade do gás que entra seja maior (maior volume)



Pode provocar ondas de pressão na exaustão e reduzir eficiência para baixas rotações

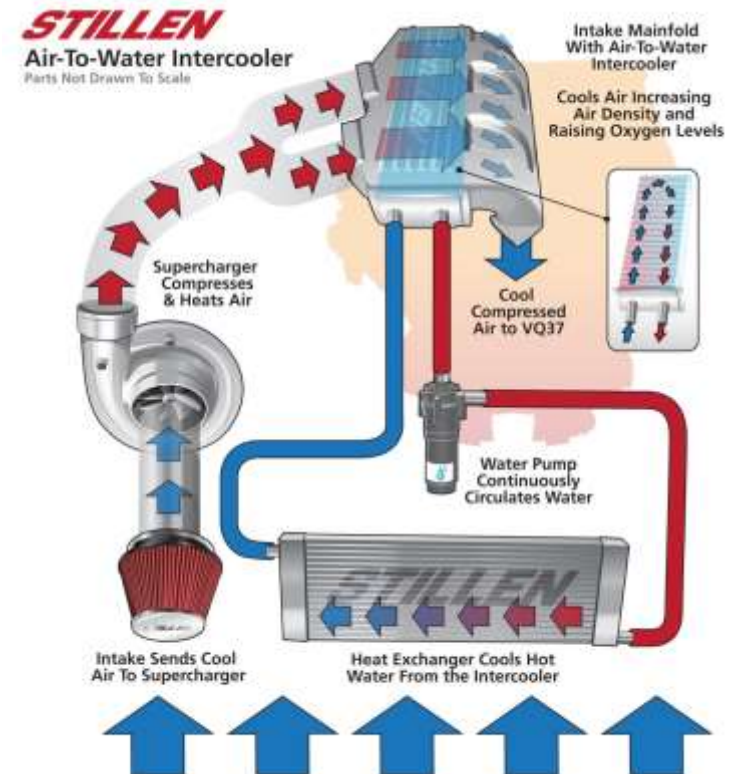
Compressor

- O Compressor é alimentado diretamente no veio do motor através de uma correia (tal como a bomba de água, alternador etc.)
 - É mais fácil de instalar

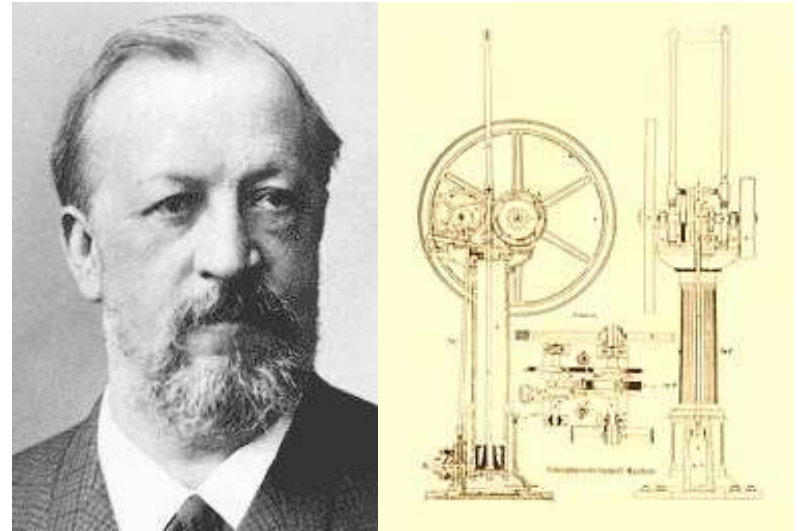


Intercooler

- Permutador de calor utilizado para baixar temperatura dos gases durante a compressão e aumentar o volume de ar admitido nos cilindros



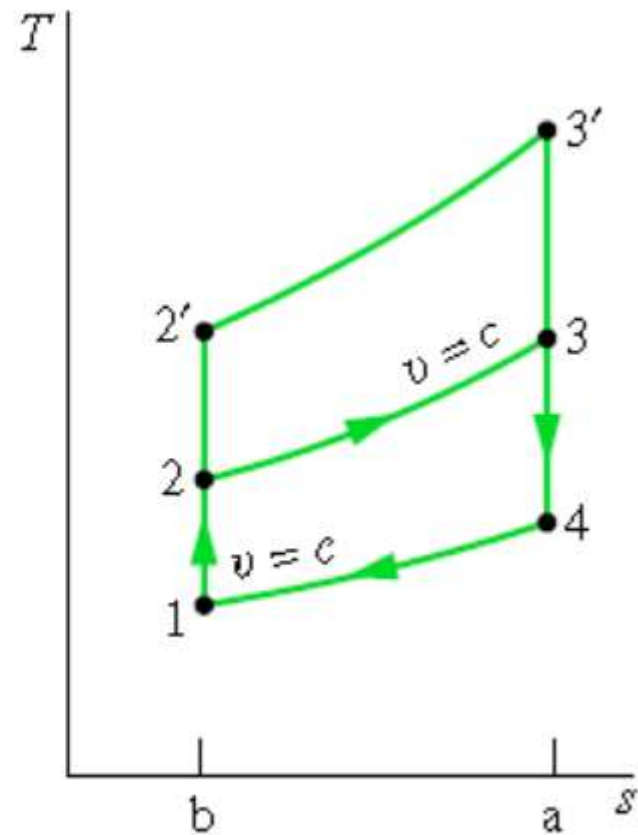
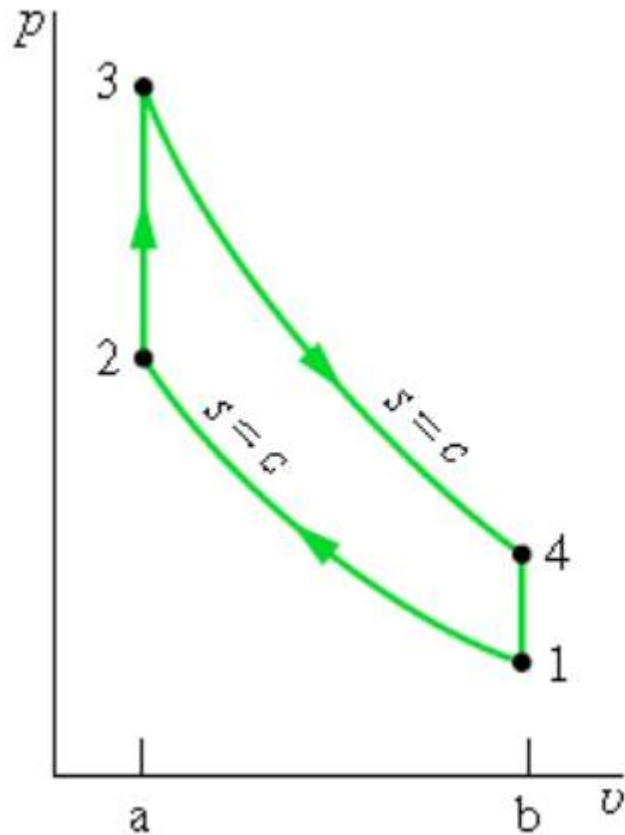
CICLO DE OTTO



Ciclo de Otto

- No ciclo de Otto, admite-se que a absorção de calor é feita quando o cilindro está fechado de forma instantânea
 - 1→2: compressão isentrópica (consumo de trabalho)
 - 2→3: admissão de calor isocórica (ignição por faísca)
 - 3→4: expansão isentrópica (realização de trabalho)
 - 4→1: rejeição de calor isocórica

Representação do ciclo de Otto ideal



Análise do ciclo

- Como assumimos um sistema fechado, temos

$$\frac{W_{12}}{m} = u_2 - u_1$$

$$\frac{W_{34}}{m} = u_3 - u_4$$

$$\frac{Q_{23}}{m} = u_3 - u_2$$

$$\frac{Q_{41}}{m} = u_4 - u_1$$

- O trabalho do ciclo

$$\frac{W_{ciclo}}{m} = \frac{W_{34}}{m} - \frac{W_{12}}{m} = (u_3 - u_4) - (u_2 - u_1)$$

$$\frac{W_{ciclo}}{m} = \frac{Q_{23}}{m} - \frac{Q_{41}}{m} = (u_3 - u_2) - (u_4 - u_1)$$

Análise ar-padrão no ciclo de Otto

- Assumindo que o ar é um gás perfeito, sabemos que para processos isentrópicos

$$\frac{v_{r2}}{v_{r1}} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right) \xleftrightarrow{r = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)} v_{r2} = \frac{v_{r1}}{r} \qquad \frac{v_{r4}}{v_{r3}} = \left(\frac{V_4}{V_3}\right) \xleftrightarrow{r = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)} v_{r4} = v_{r1} r$$

- Se o ciclo for analisado assumindo o ar-padrão frio (calores específicos constantes à temperatura ambiente)

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} = r^{k-1} \qquad \frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^{k-1} = \frac{1}{r^{k-1}}$$

Rendimento

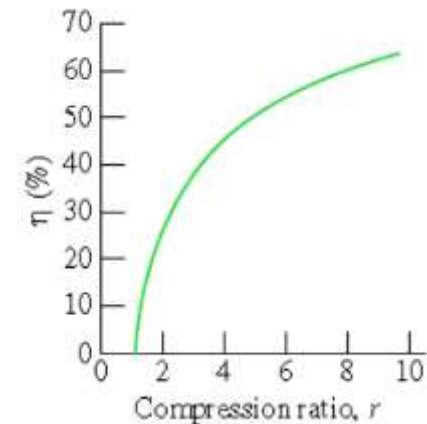
- O rendimento do ciclo é dado por

$$\eta = \frac{W_{ciclo}}{Q_{in}} = \frac{(u_3 - u_2) - (u_4 - u_1)}{u_3 - u_2} = 1 - \frac{u_4 - u_1}{u_3 - u_2}$$

$$\eta = 1 - \frac{c_v(T_4 - T_1)}{c_v(T_3 - T_2)}$$

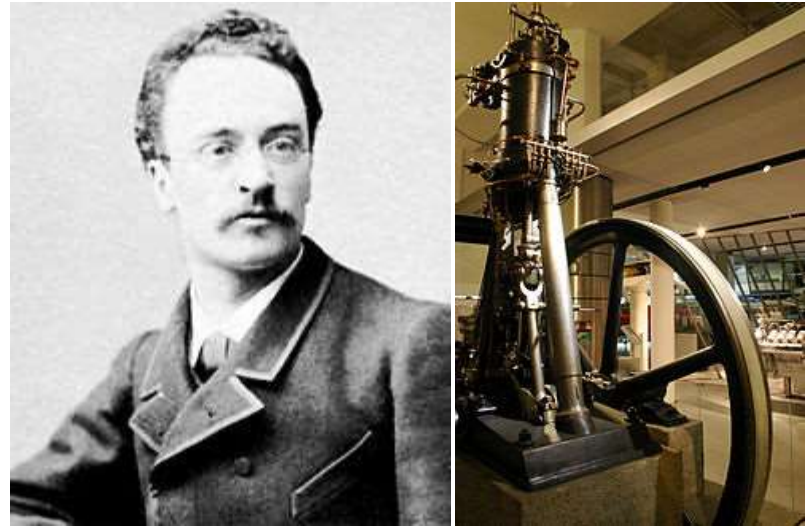
$$\eta = 1 - \frac{T_1 \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{T_2 \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)} \xleftrightarrow{\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2}} \eta = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

$$\eta = 1 - \frac{1}{r^{k-1}}$$



*O rendimento depende da taxa de compressão
Nos ciclos Otto, os valores típicos são entre 7 e 10
Se for maior, pode haver auto-ignição*

Para evitar, aumenta-se as octanas do fuel ou chumbo

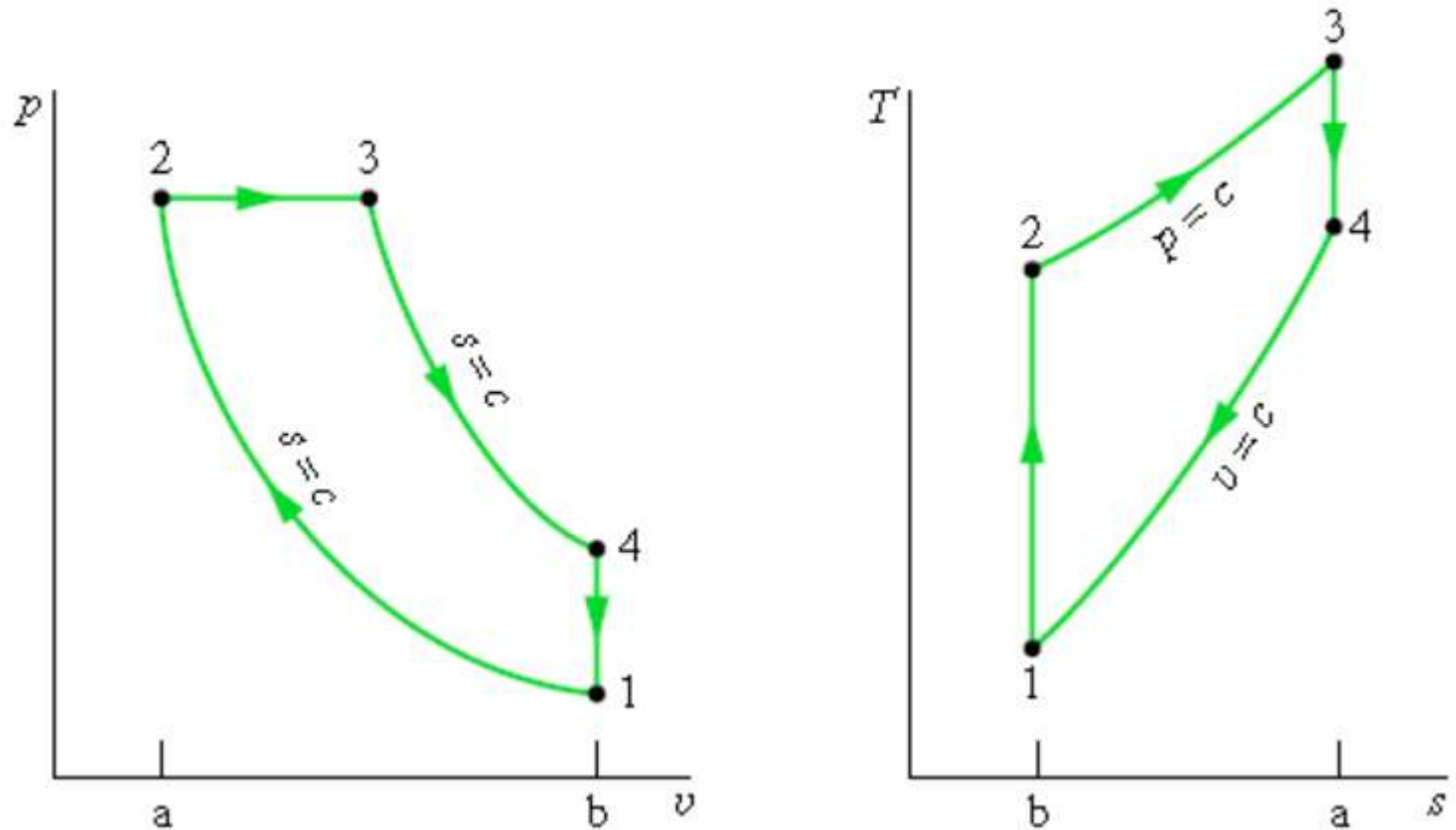


CICLO DIESEL

Ciclo de Diesel

- No ciclo de Diesel, admite-se que a absorção de calor é feita quando o cilindro está fechado e durante a expansão, por injeção de fuel
 - 1→2: compressão isentrópica (consumo de trabalho)
 - 2→3: *admissão de calor isobárica (auto-ignição) com realização de trabalho*
 - 3→4: expansão isentrópica (realização de trabalho)
 - 4→1: rejeição de calor isocórica

Representação do ciclo de Diesel ideal



Análise do ciclo

- Como assumimos um sistema fechado, temos

$$\frac{W_{12}}{m} = u_2 - u_1 \quad \frac{W_{23}}{m} = p_2(v_3 - v_2) \quad \frac{W_{34}}{m} = u_3 - u_4$$
$$\frac{Q_{23} - W_{23}}{m} = u_3 - u_2 \quad \frac{Q_{23}}{m} = h_3 - h_2 \quad \frac{Q_{41}}{m} = u_4 - u_1$$

- O trabalho do ciclo

$$\frac{W_{ciclo}}{m} = \frac{W_{23}}{m} + \frac{W_{34}}{m} - \frac{W_{12}}{m} = p_2(v_3 - v_2) + (u_3 - u_4) - (u_2 - u_1)$$

$$\frac{W_{ciclo}}{m} = \frac{Q_{23}}{m} - \frac{Q_{41}}{m} = (h_3 - h_2) - (u_4 - u_1)$$

Análise ar-padrão no ciclo de Diesel

- Assumindo que o ar é um gás perfeito, sabemos que para processos isentrópicos

$$v_{r2} = \frac{v_{r1}}{r}$$

- Sabendo que $p_2 = p_3$, então

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{V_3}{V_2} = r_c T_2$$

r_c é o taxa de corte

$$v_{r4} = v_3 \frac{r}{r_c}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} = r^{k-1} \quad \frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{k-1} = \left(\frac{r_c}{r}\right)^{k-1}$$

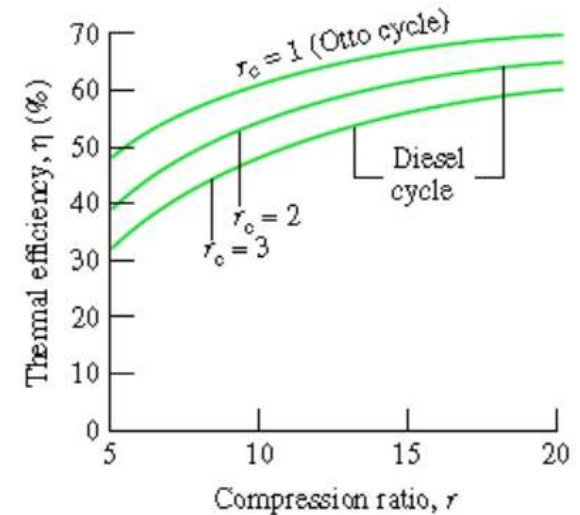
Rendimento

- O rendimento do ciclo é dado por

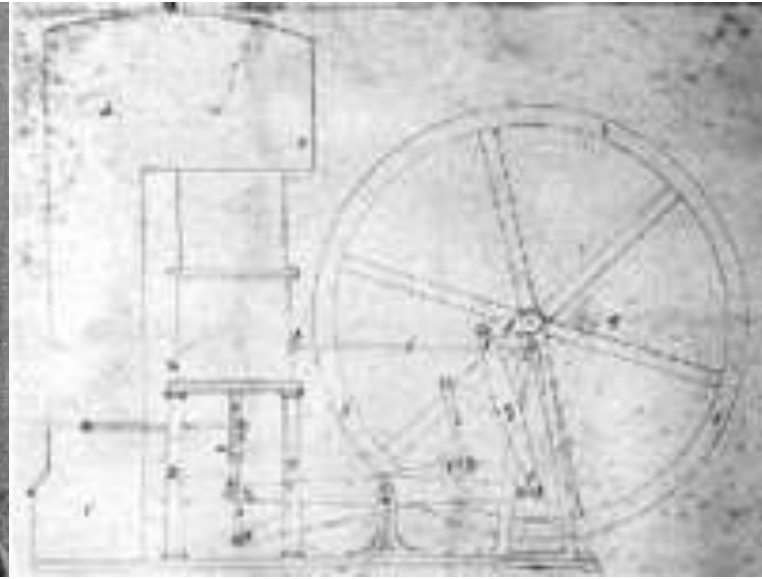
$$\eta = \frac{W_{ciclo}}{Q_{in}} = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}} = 1 - \frac{u_4 - u_1}{h_3 - h_2}$$

$$\eta = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \left[\frac{r_c^k - 1}{k(r_c - 1)} \right]$$

$$\left[\frac{r_c^k - 1}{k(r_c - 1)} \right] > 1 \Rightarrow \eta_{Otto} > \eta_{Diesel}$$



*O rendimento depende da taxa de compressão
Nos ciclos Diesel, os valores típicos são entre 12 e 16*



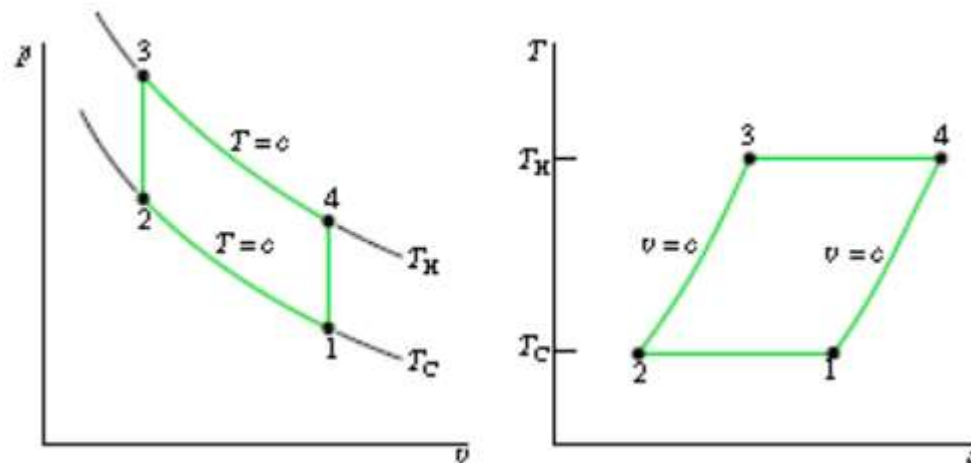
CICLOS STIRLING (E ERIKSON)

Irreversibilidades nos ciclos de Otto e Diesel

- Na prática, a absorção e rejeição de calor nos ciclos de Otto e Diesel não são internamente reversíveis
 - Envolvem trocas de calor através de processos que têm diferenças de temperatura finitas
 - Rendimento térmico destes ciclos é inferior ao rendimento de Carnot
- Para um motor térmico ter processos de absorção e rejeição de calor internamente reversíveis era necessário
 - A diferença de temperatura entre o fluido de trabalho e a fonte térmica nunca deveria exceder uma diferença infinitesimal dT
 - Os processos de absorção e rejeição deveriam ser isotérmicos
- Existem dois ciclos que funcionam assim
 - *Stirling*
 - Erikson

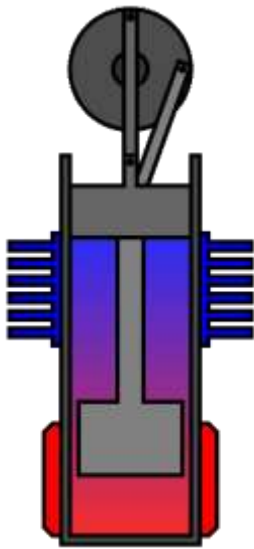
Ciclo de Stirling

- O ciclo é semelhante ao ciclo de Carnot
 - Difere no facto dos processos isentrópicos serem substituídos por dois processos isocóricos
- Utiliza regeneração
 - Parte do calor gerado é reaproveitado no ciclo

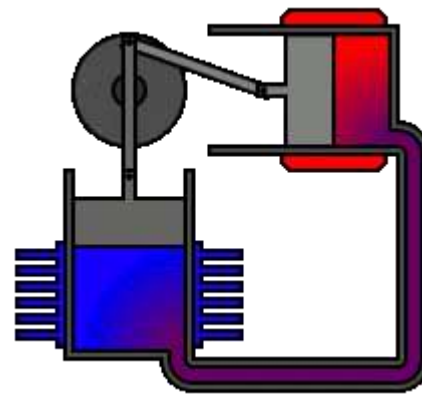


Motor Stirling

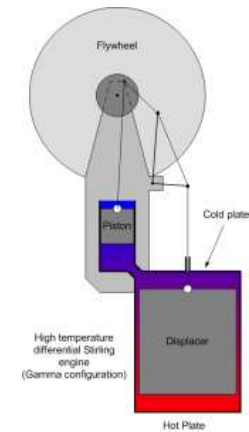
- Motor de combustão externa
 - Fonte externa calor (menos poluente)
 - Dois pistões
 - Regenerador
 - Volante de inércia



Alfa

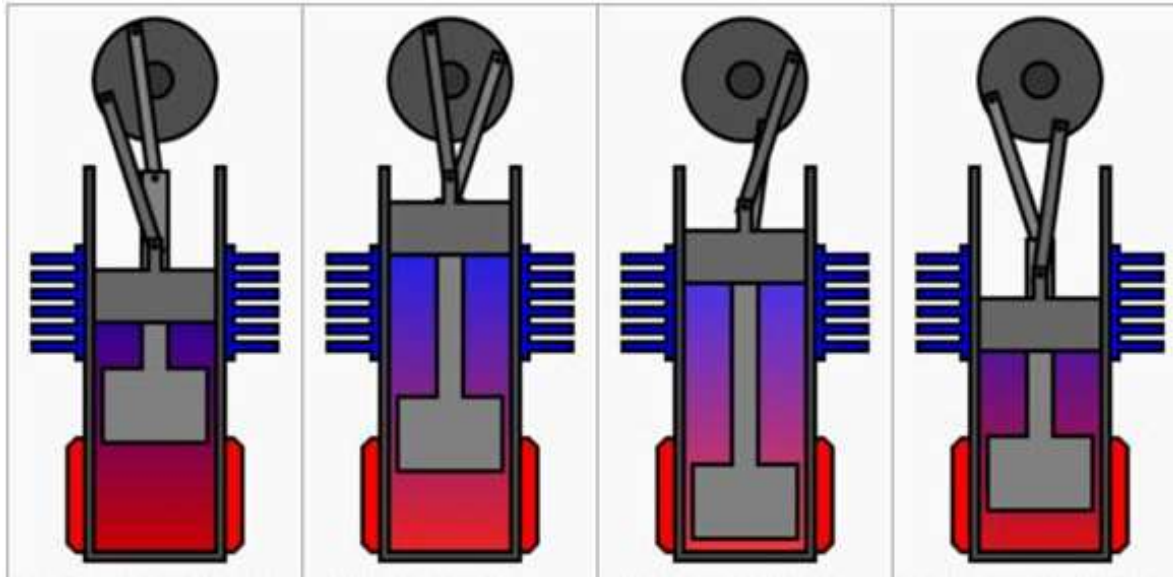


Beta



Gama

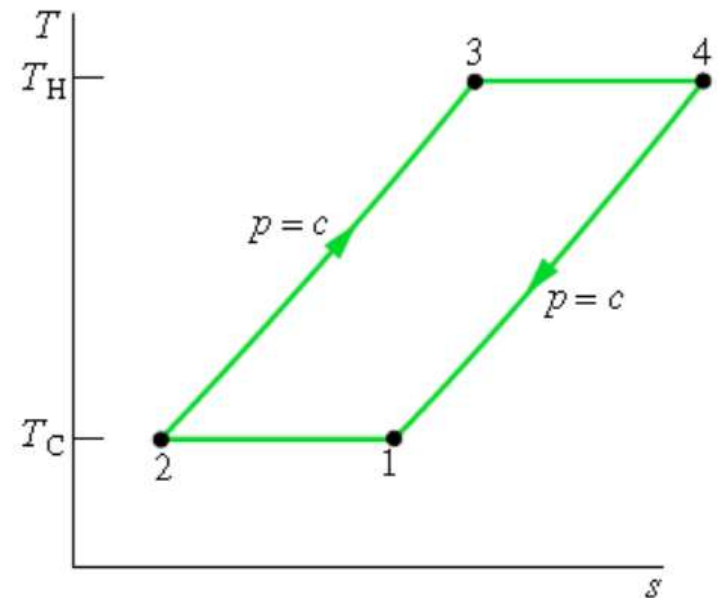
Funcionamento



1. O pistão de trabalho comprimiu o gás e o pistão de deslocamento permite que a maior quantidade de ar possível seja aquecido
2. Com o aquecimento do gás, o pistão de trabalho realiza trabalho
3. O pistão de deslocamento desloca-se para baixo de forma a que a maior quantidade possível de ar seja arrefecida
4. O ar arrefecido faz os pistões retomarem às posições iniciais

Ciclo Erikson

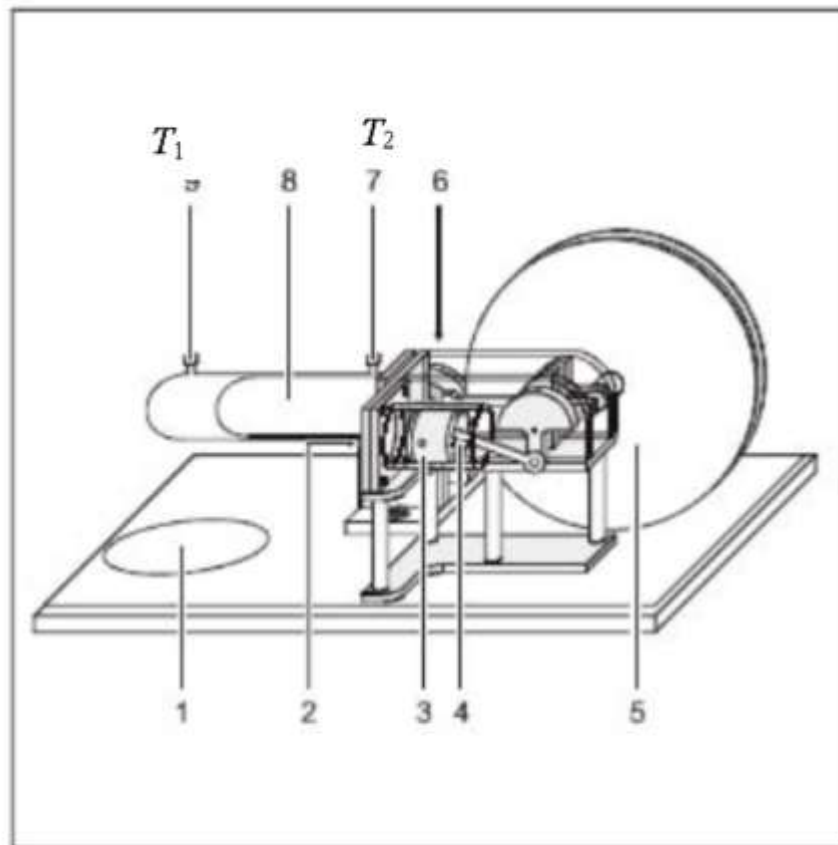
- O ciclo é semelhante ao ciclo de Carnot
 - Difere no facto dos processos isentrópicos serem substituídos por dois processos isobáricos



28 a 2 de Maio

LABORATÓRIO #2

Montagem experimental

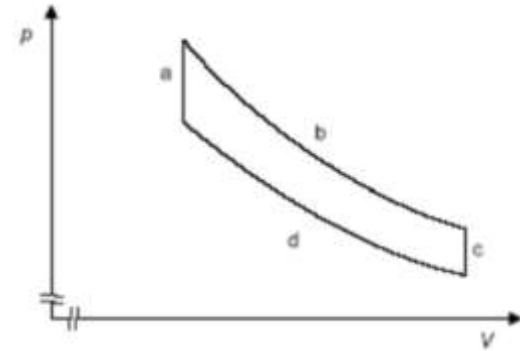
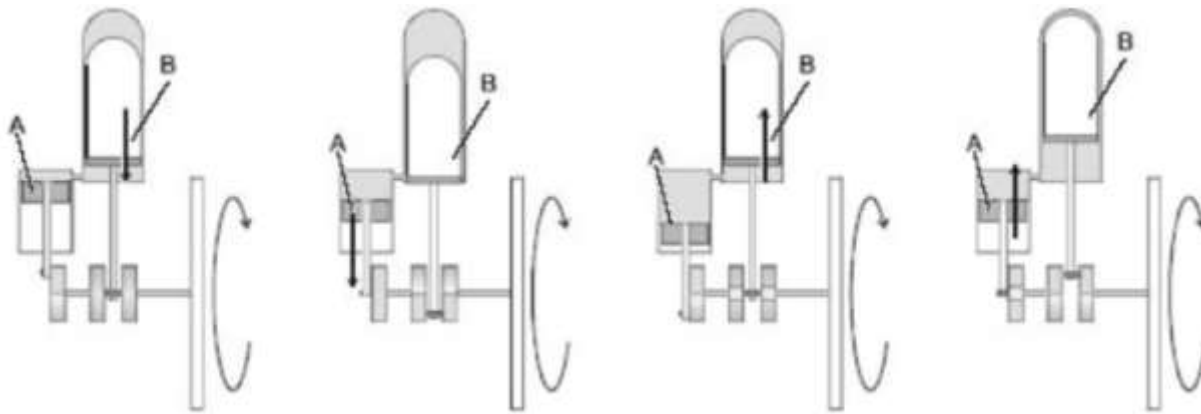


Legenda:

- 1- Suporte para lamparina
- 2- Ligação para sensor de pressão
- 3- Pistão que realiza o trabalho mecânico
- 4- Parafuso para ligação ao sensor de deslocamento
- 5- Volante
- 6- Motor ou gerador eléctrico
- 7- Termopar 2 (reservatório, à temperatura T_2)
- 8- Pistão de deslocamento
- 9- Termopar 1 (fonte de calor, à temperatura T_1)

Fig. 1. Máquina de Stirling.

Funcionamento



- o pistão de deslocamento (B) move-se da extremidade quente para a extremidade fria, empurrando o ar frio da extremidade fria para a extremidade quente
- expansão (isotérmica) do ar quente no pistão mecânico (A)
- o ar no cilindro junto do pistão mecânico (A) é arrefecido a volume e constante, levando a um decréscimo de pressão e o pistão de deslocamento (B) está a empurrar o ar da extremidade quente para a extremidade fria
- na compressão isotérmica do ar no cilindro mecânico (A)