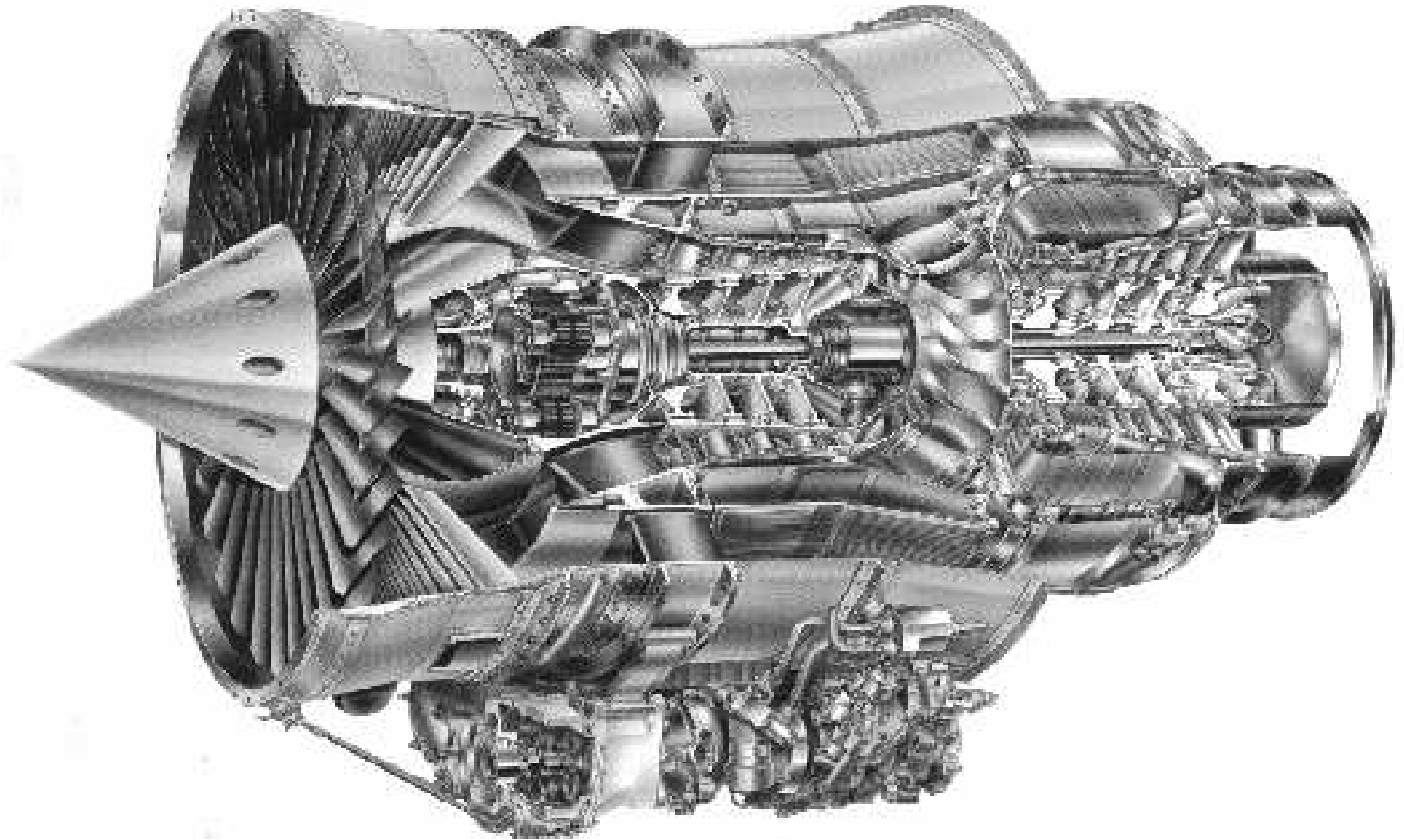
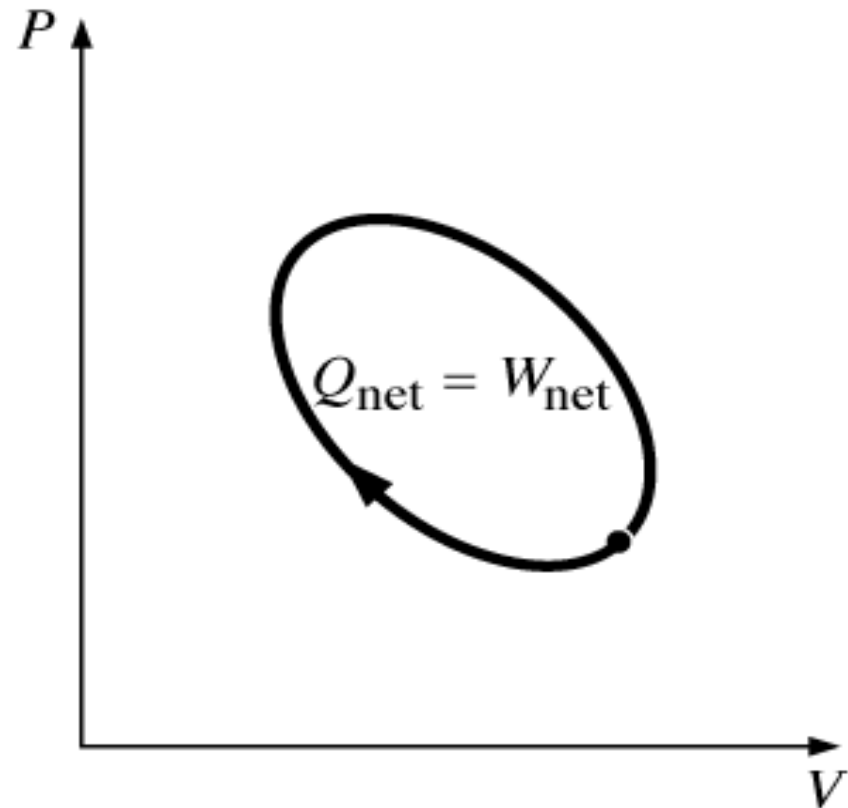


A primeira lei da termodinâmica e os processos em ciclos



Ciclo termodinâmico

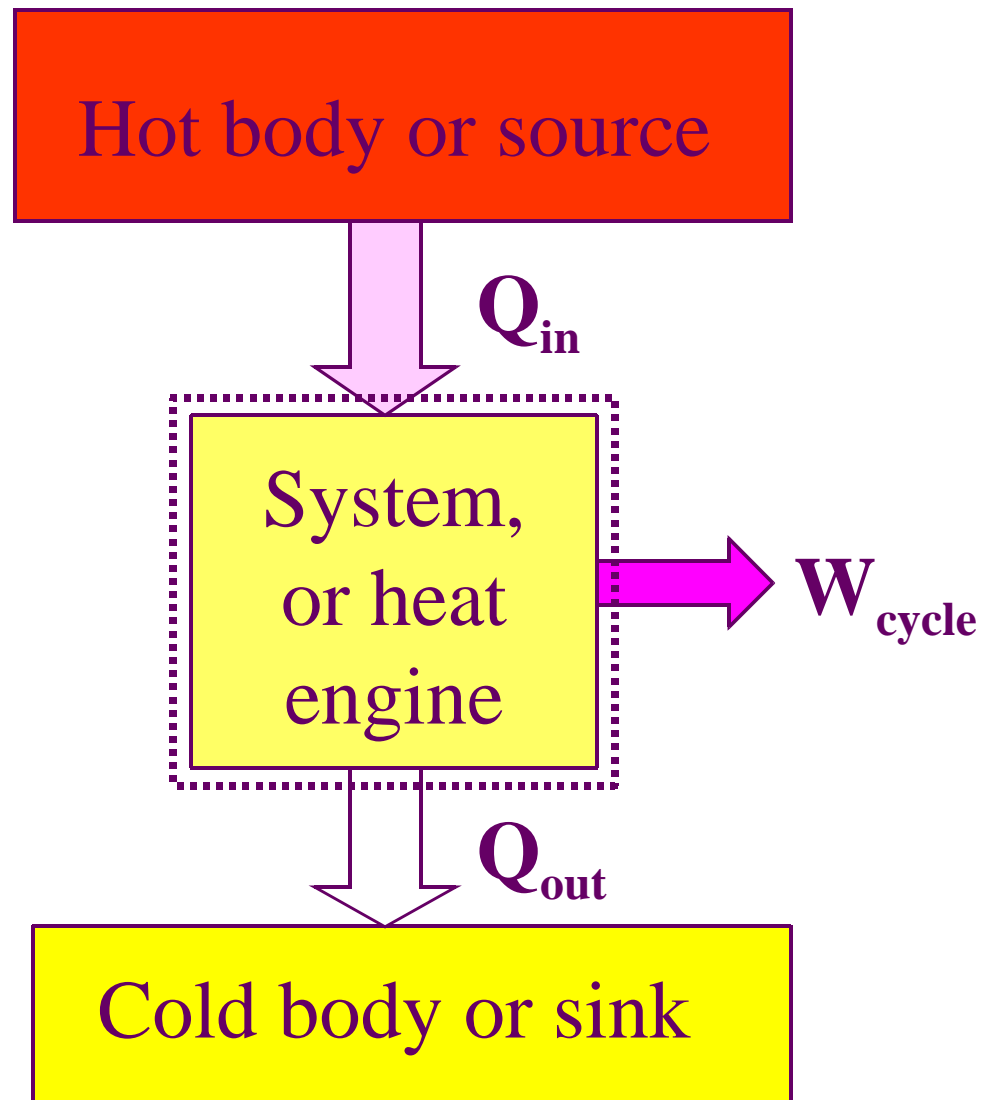
- Série de processos que formam um caminho fechado
- Os estados inicial e final coincidem



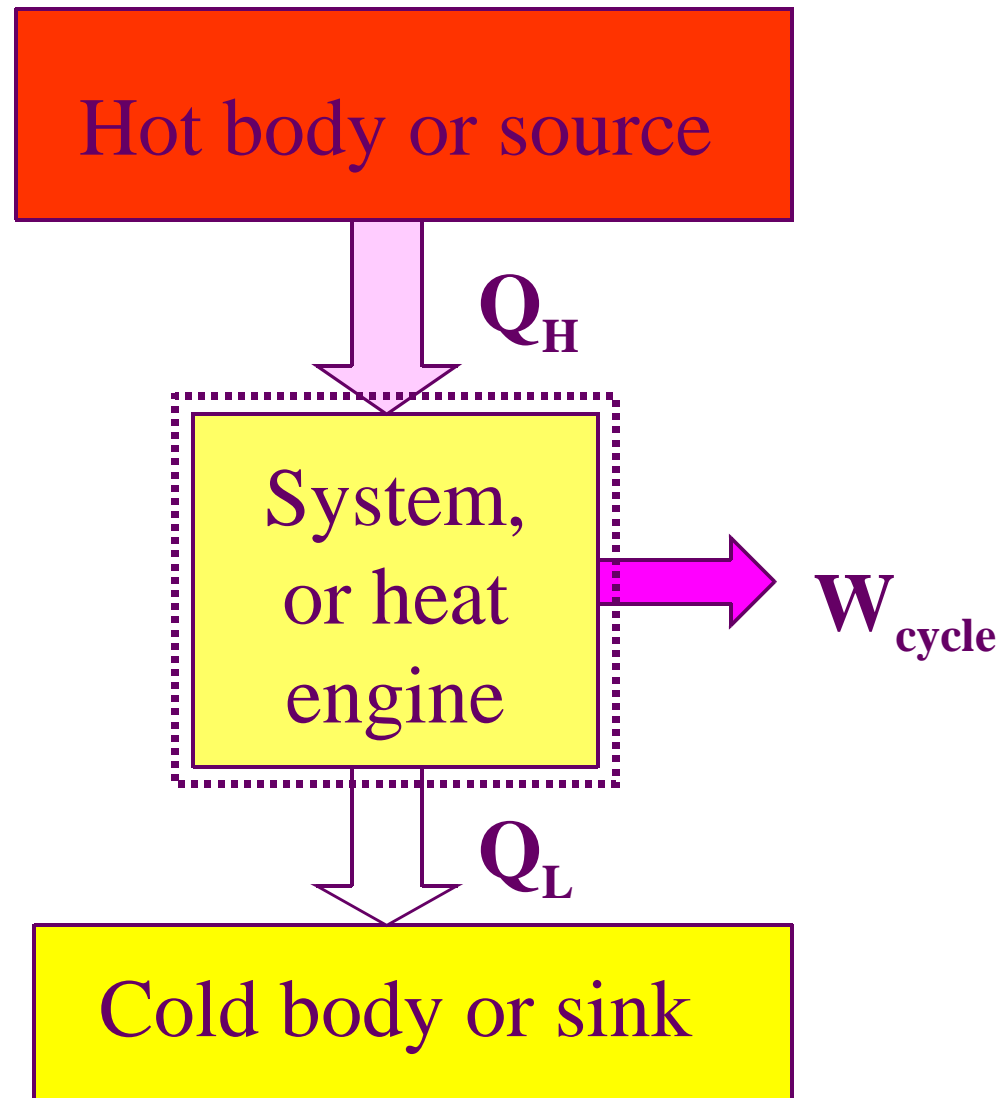
Para que servem os ciclos termodinâmicos?

- Os motores térmicos trabalham em processos cíclicos
- Os motores térmicos absorvem calor de uma fonte quente e rejeitam calor para uma fonte fria, produzindo trabalho

Ciclos de potência de máquinas térmicas

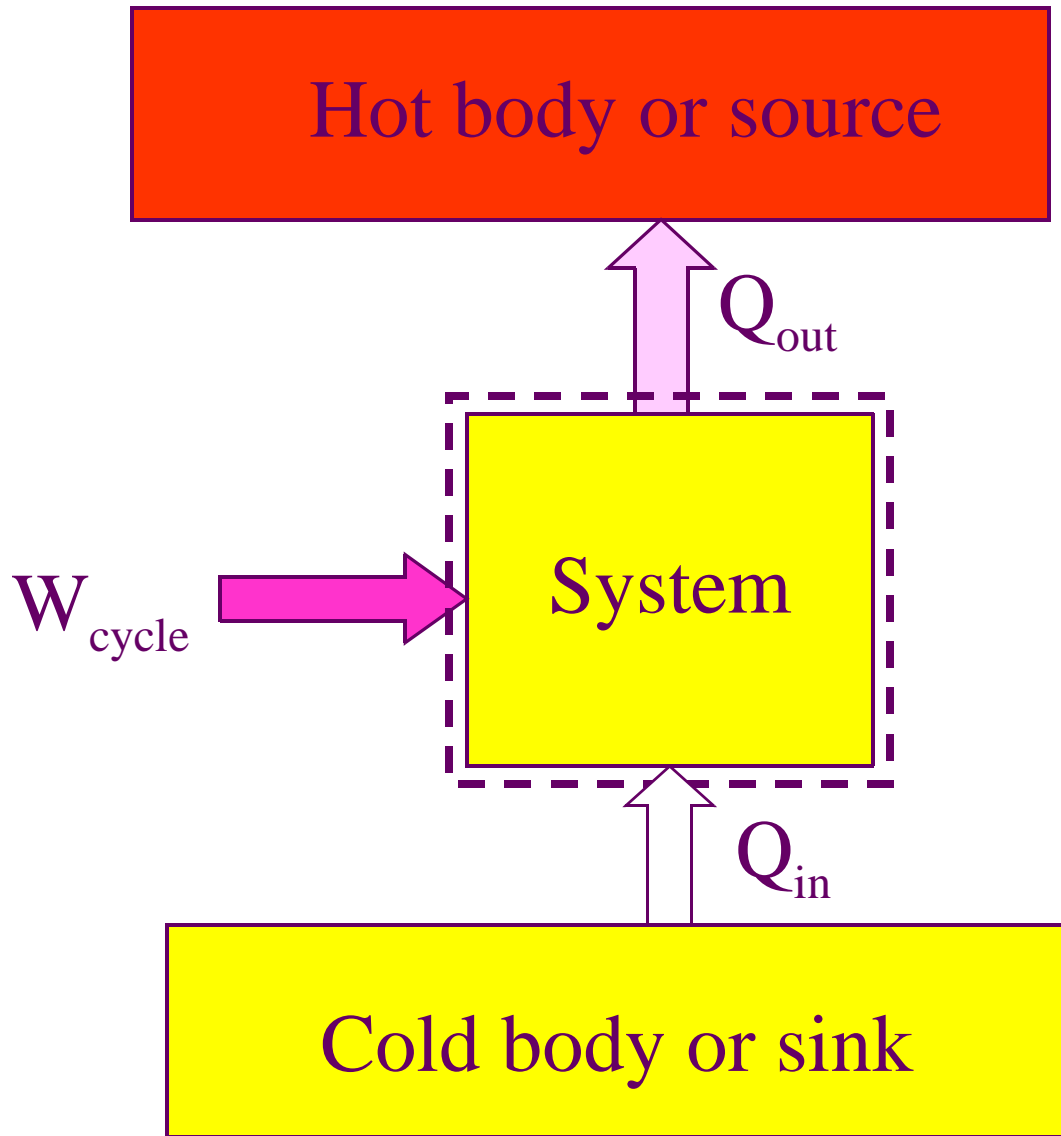


Eficiência de motores térmicos



$$\begin{aligned}\eta &= \frac{W_{LIQ}}{Q_H} = \\ &= \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} \\ &= 1 - \frac{Q_L}{Q_H}\end{aligned}$$

Refrigeradores e bombas de calor



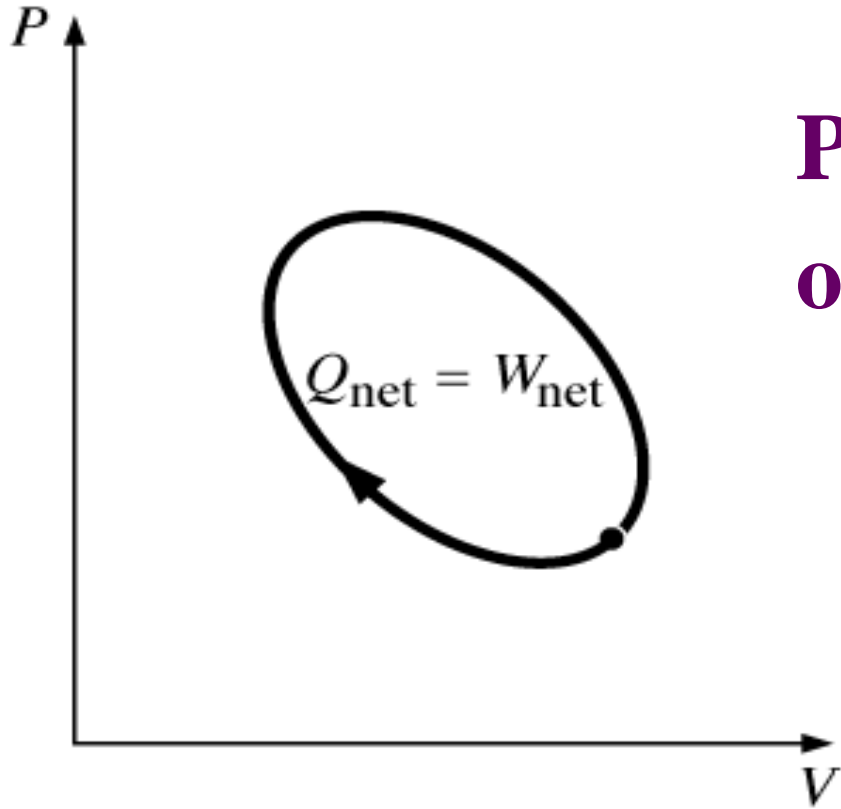
$$\eta = \frac{Q_L}{W_{IN}} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L}$$

$$\eta = \frac{Q_H}{W_{IN}} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L}$$

REFRIGERATOR

HEAT PUMP

Análise de energia dos ciclos



Para um ciclo, $E_1 - E_1 = 0$,
ou

$$\Delta E_{\text{ciclo}} = 0$$

$$\Delta E_{\text{ciclo}} = Q_{\text{ciclo}} - W_{\text{ciclo}} = 0$$

Para um ciclo, podemos escrever

$$Q_{\text{ciclo}} = W_{\text{ciclo}}$$

Q_{ciclo} e W_{ciclo} representam quantidades líquidas, que também podem ser representadas por:

$$\sum_{\text{ciclo}} Q = \sum_{\text{ciclo}} W$$

Questão

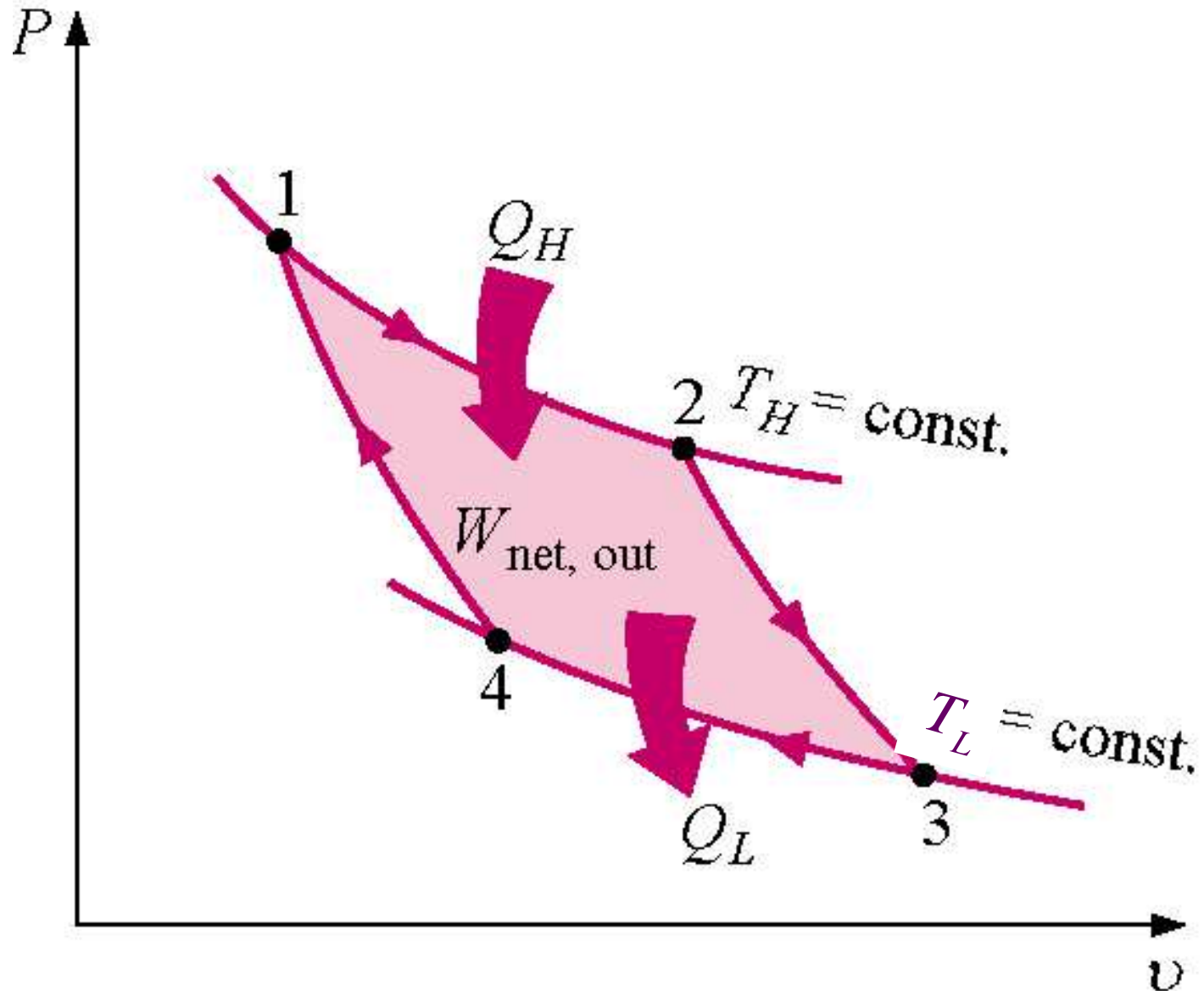
- Um sistema fechado está sujeito a um ciclo consistindo de 2 processos. Durante o primeiro processo, 40 Btu de calor são transferidos para o sistema, enquanto o sistema realiza 60 Btu de trabalho. Durante o segundo processo, 45 Btu de trabalho são realizados sobre o sistema.
 - (a) Determine a transferência de calor durante o segundo processo
 - (b) Calcule o trabalho e a transferência de calor líquidos do ciclo

Ciclo de Carnot

- **O ciclo de Carnot é um ciclo reversível composto de 4 processos internamente reversíveis**
 - **2 processos isotérmicos**
 - **2 processos adiabáticos**

Ciclo de Carnot para um gás

A área representa o trabalho líquido



O ciclo de Carnot pode ser visualizado como abaixo

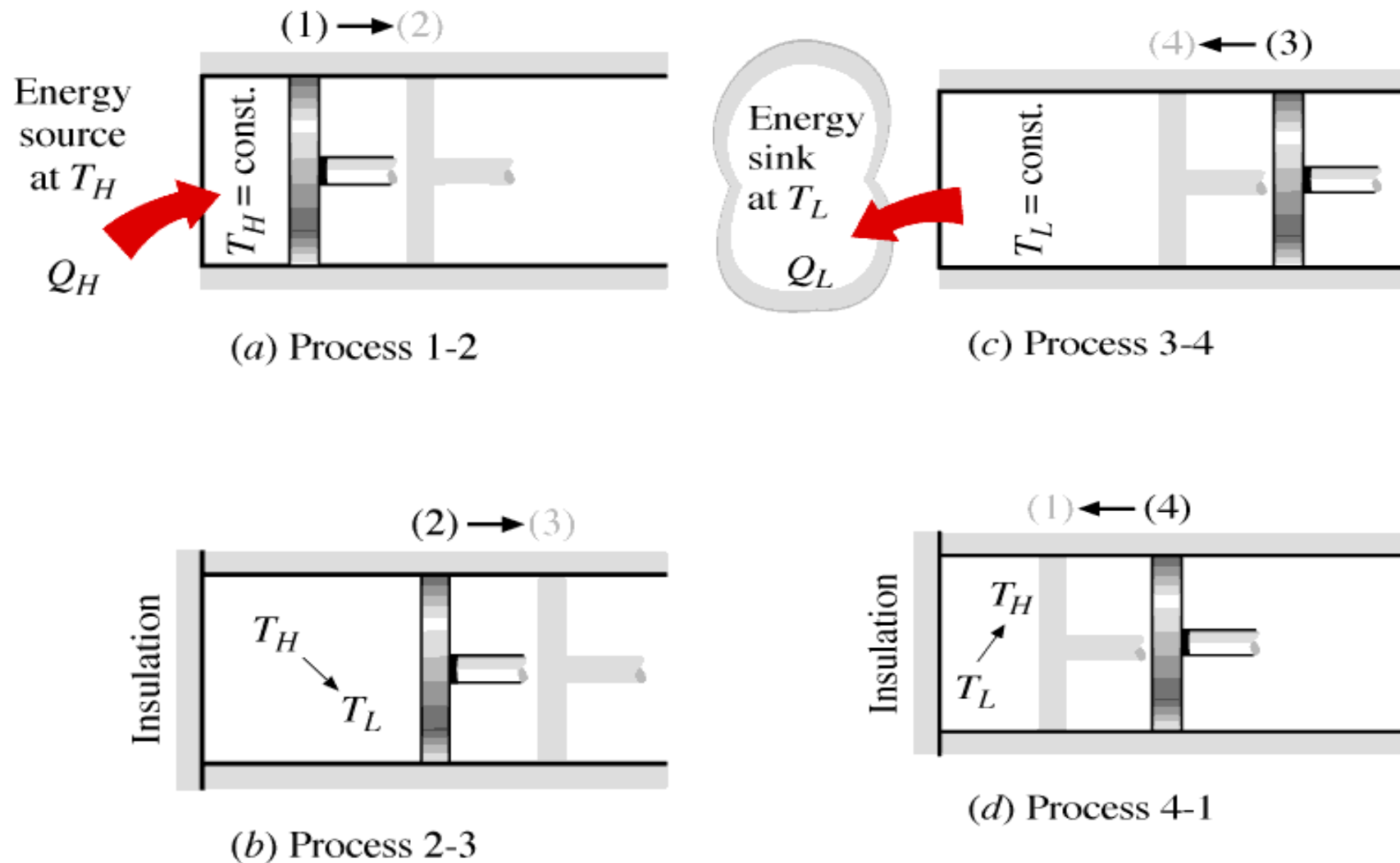
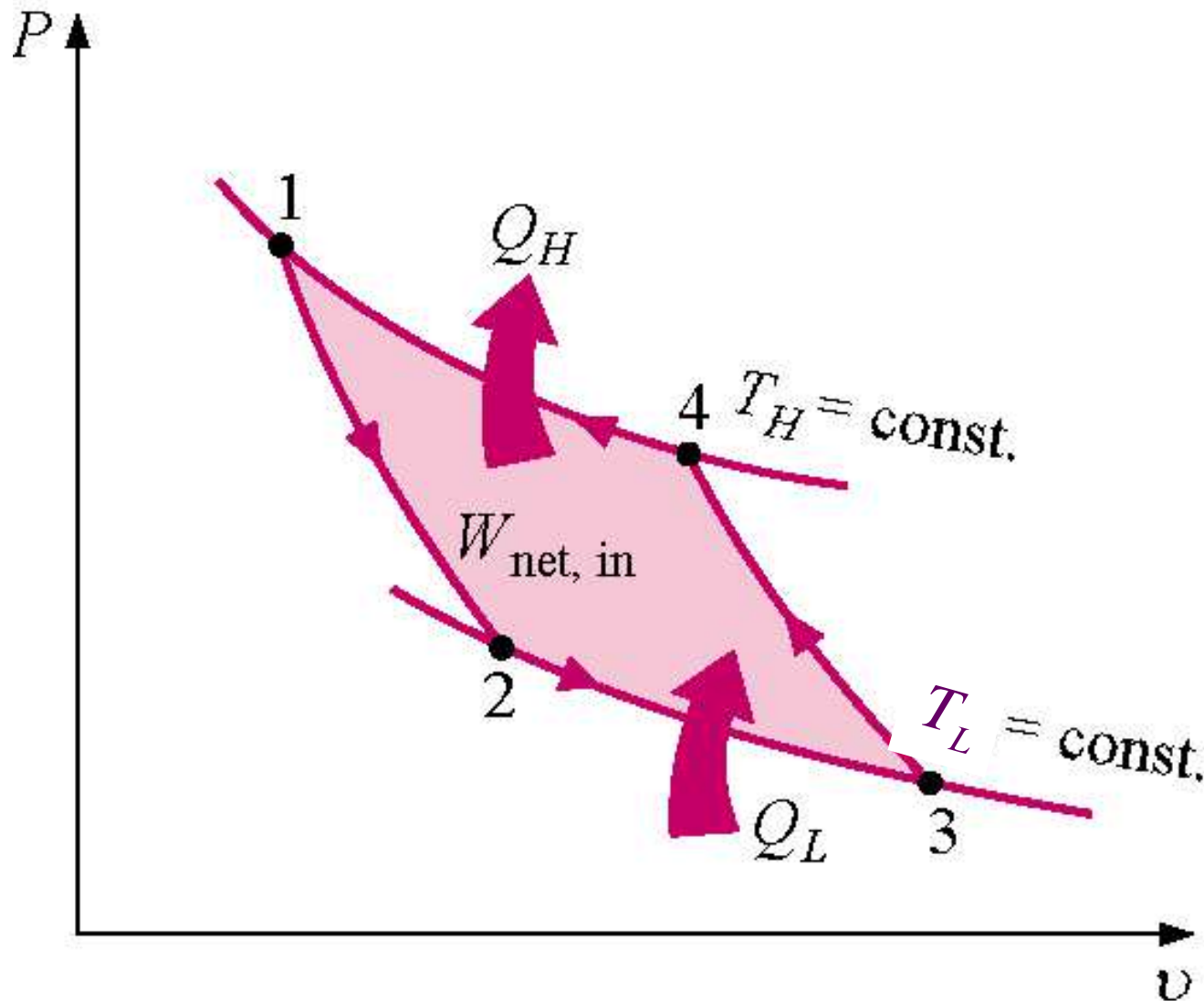
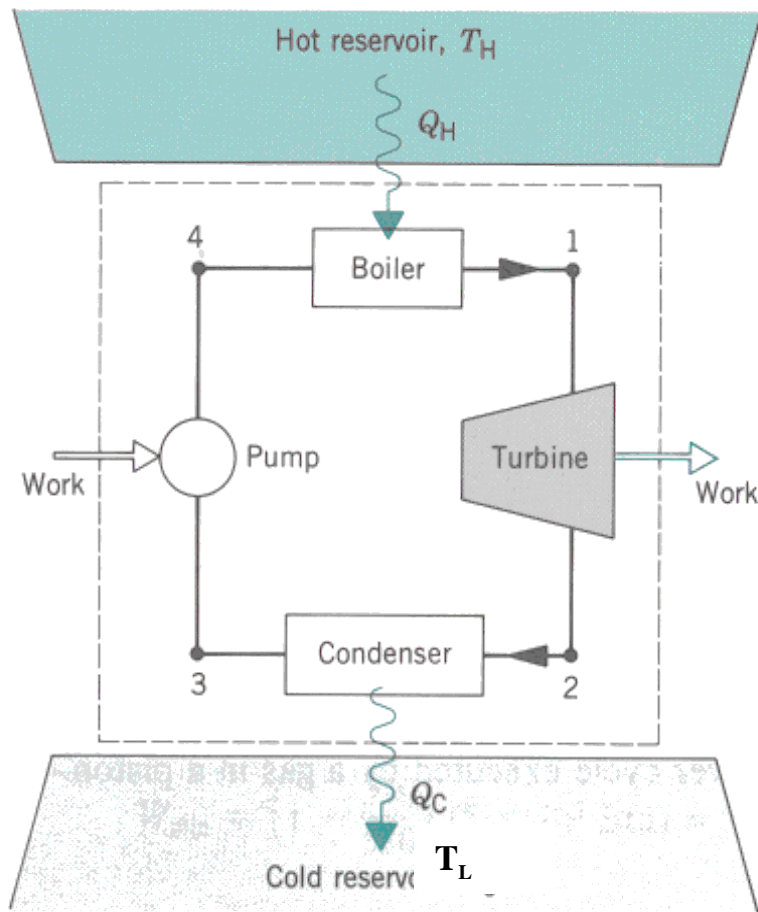


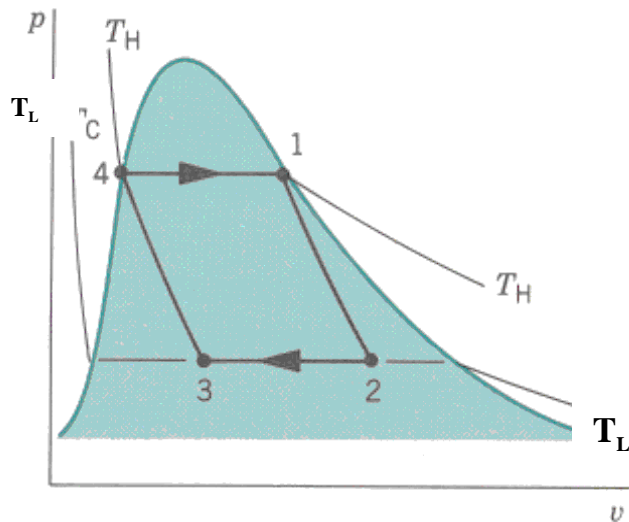
Diagrama P - v de um ciclo de Carnot invertido





- Este é o ciclo de Carnot envolvendo 2 fases: ele é composto de 2 processos adiabáticos e de 2 processos isotérmicos.

- Ele sempre é reversível: o ciclo de Carnot é, por definição, reversível



Eficiência de Carnot

A eficiência de Carnot depende das temperaturas dos reservatórios térmicos (2ª Lei)

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \qquad \eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

Limite superior para a eficiência de máquinas térmicas (para não violar a segunda lei)

Não depende de detalhes da máquina, apenas das temperaturas dos reservatórios térmicos

Questão

Qual o custo de operação de uma usina a vapor fornecendo 24 horas por dia 1000 MW (saída) com 35% de eficiência se o combustível custa \$2.00 por 10^6 Btu (1055 MJ)?

Questão

Qual o custo de operação de uma usina a vapor fornecendo 24 horas por dia 1000 MW (saída) com 35% de eficiência se o combustível custa \$2.00 por 10^6 Btu?

\$467 975/dia

\$170 811 104/ano

Questão

Se você pudesse aumentar a eficiência da usina da questão anterior de 35% para 36%, qual seria um preço adequado para os seus serviços?

Questão

Se você pudesse aumentar a eficiência da usina da questão anterior de 35% para 36%, qual seria um preço adequado para os seus serviços?

Economia realizada:

5% da economia pelos serviços prestados:

\$12 998/dia
\$389 980/mês

\$19 500/mês

Usinas com ciclo de vapor

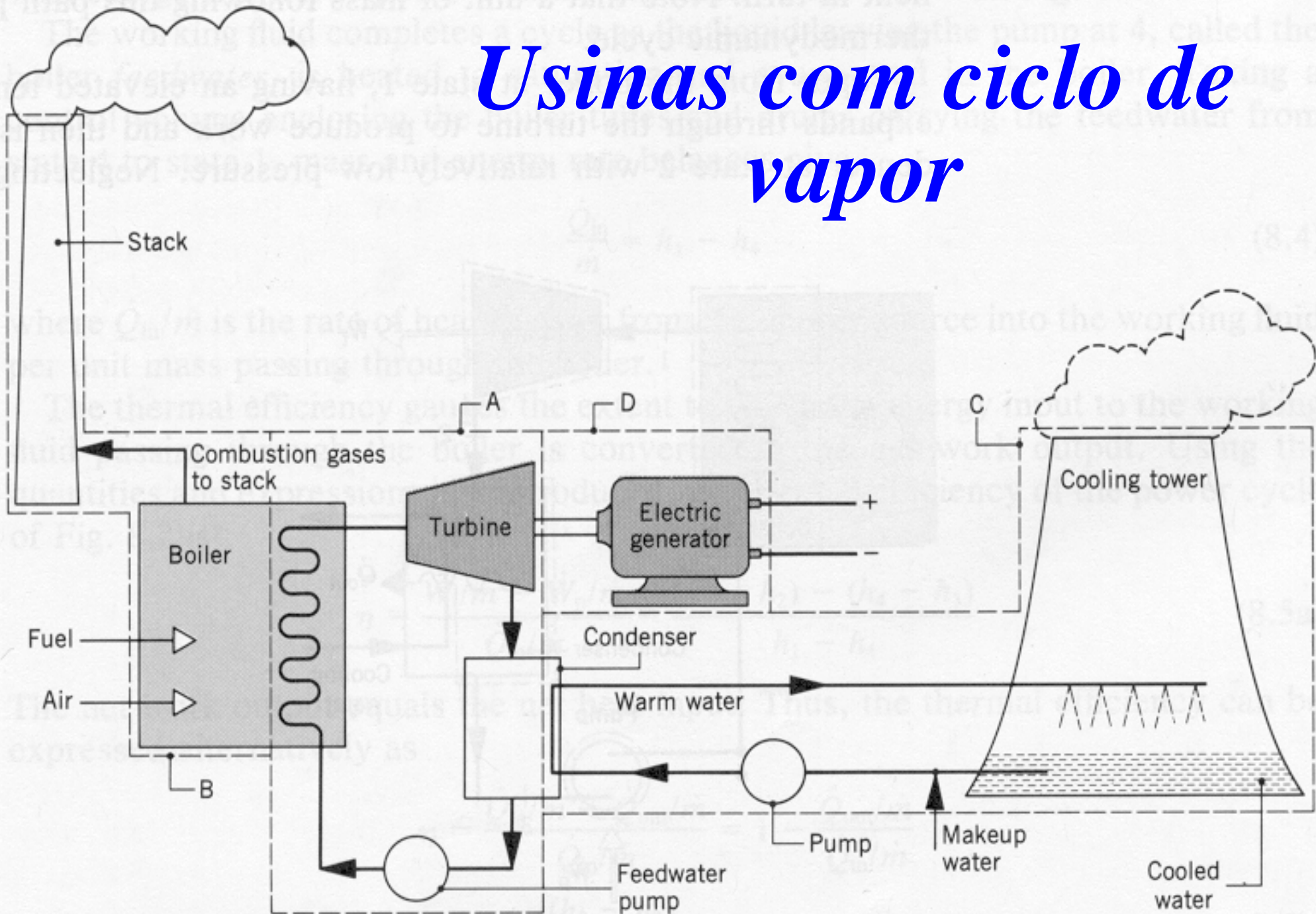
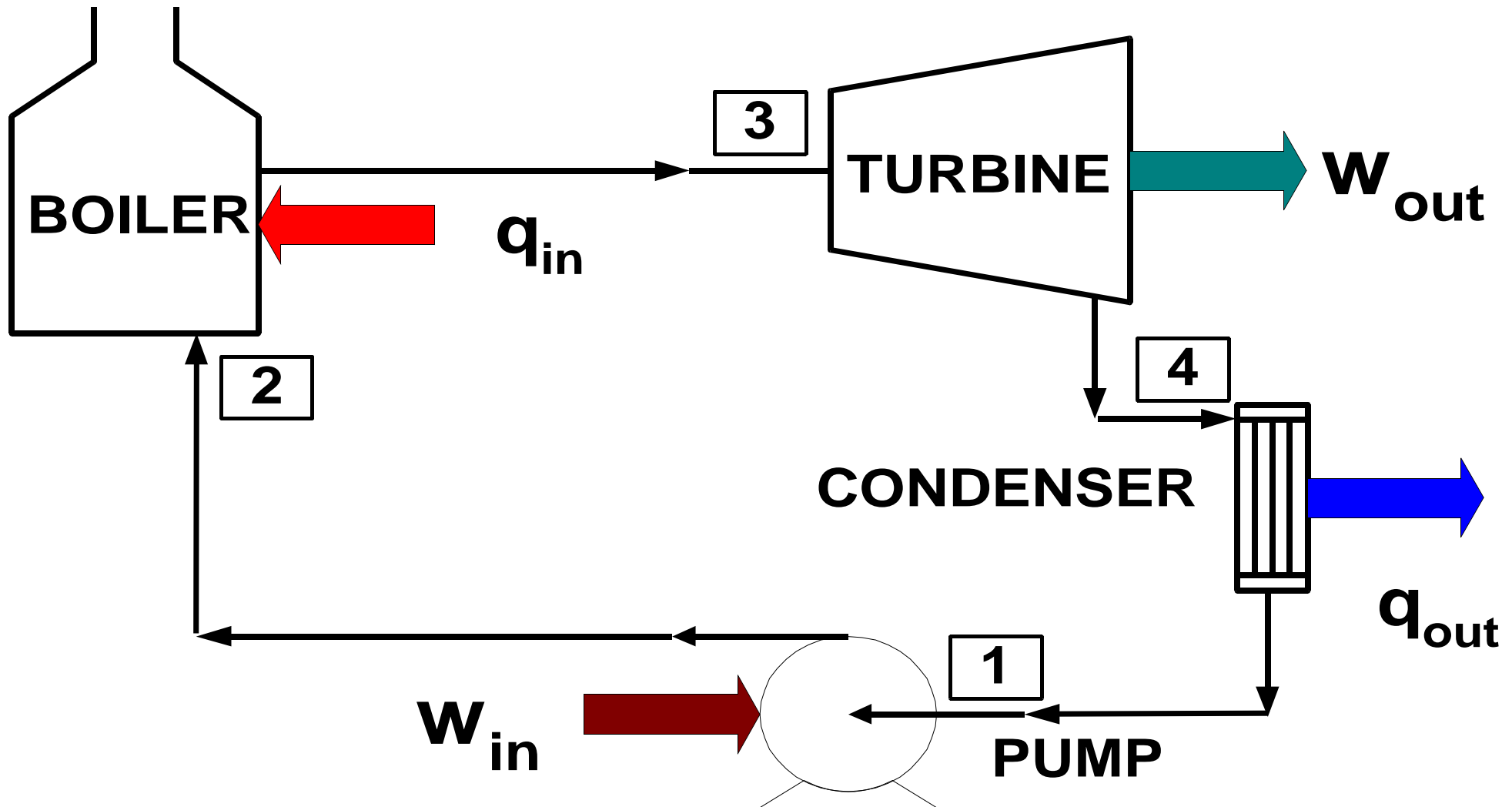


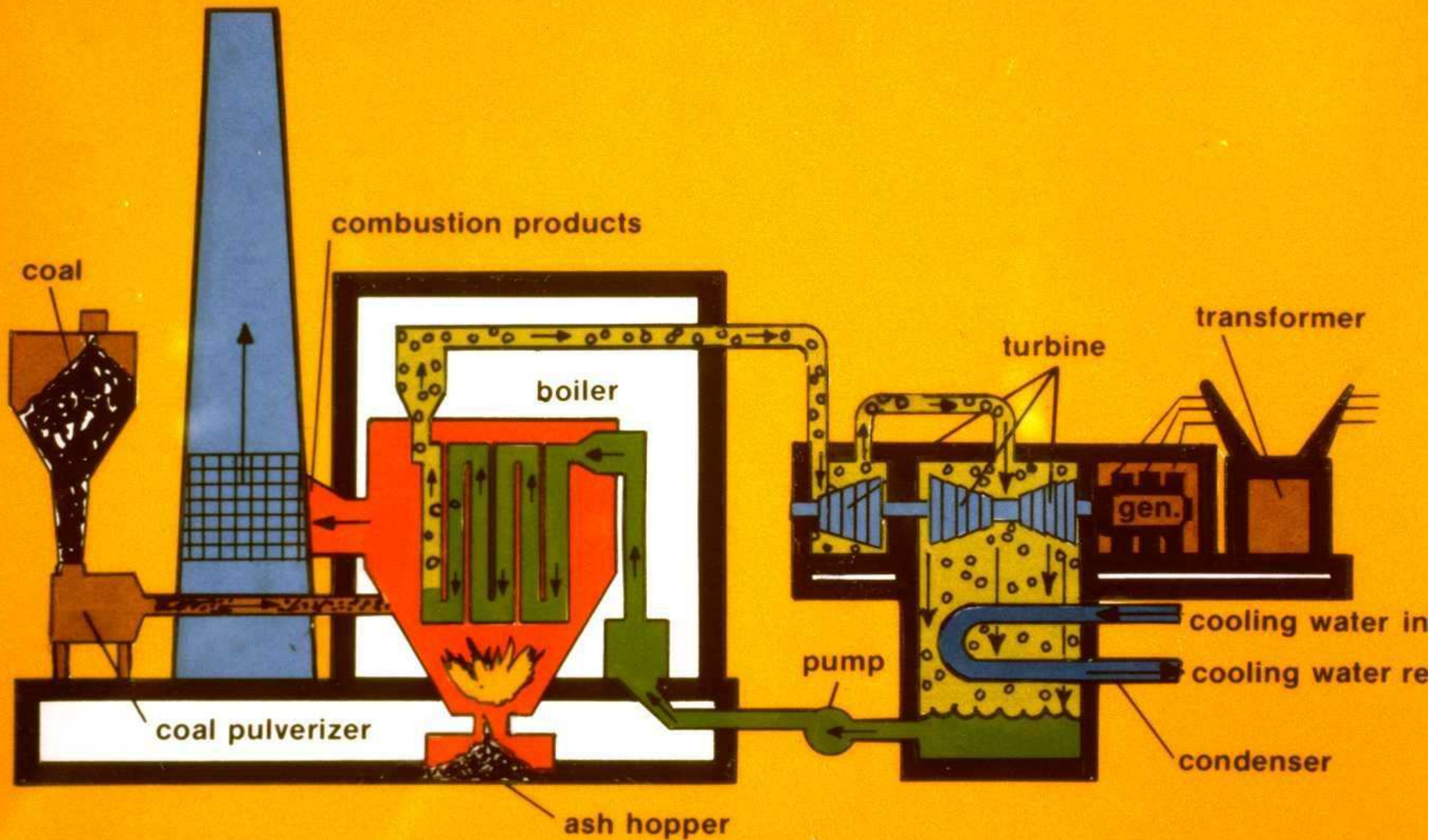
Figure 8.1 Components of a simple vapor power plant.

Simplificando a usina...



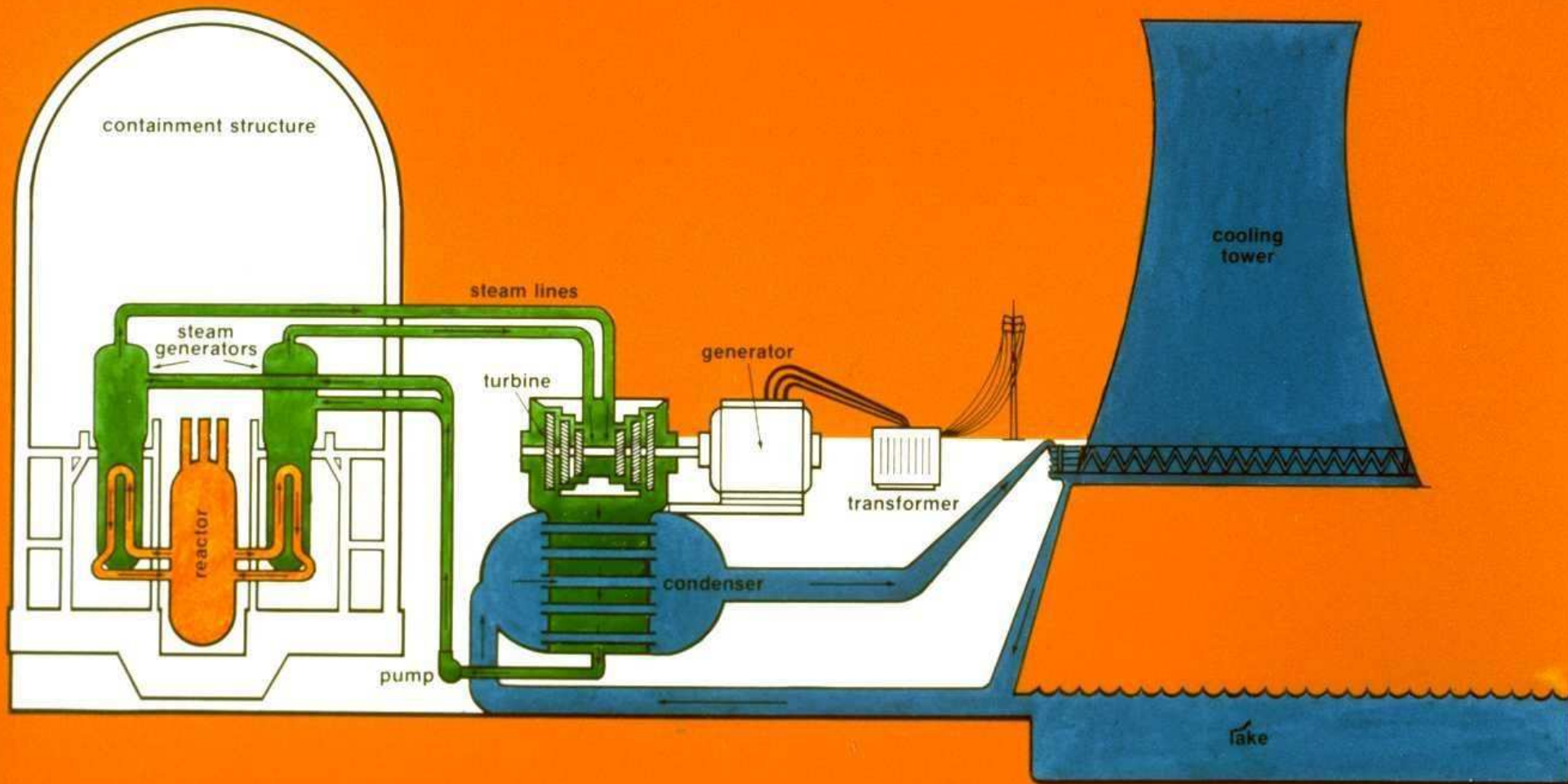


Overview of a coal fired steam power station.
(Courtesy of Carolina Power and Light Company)



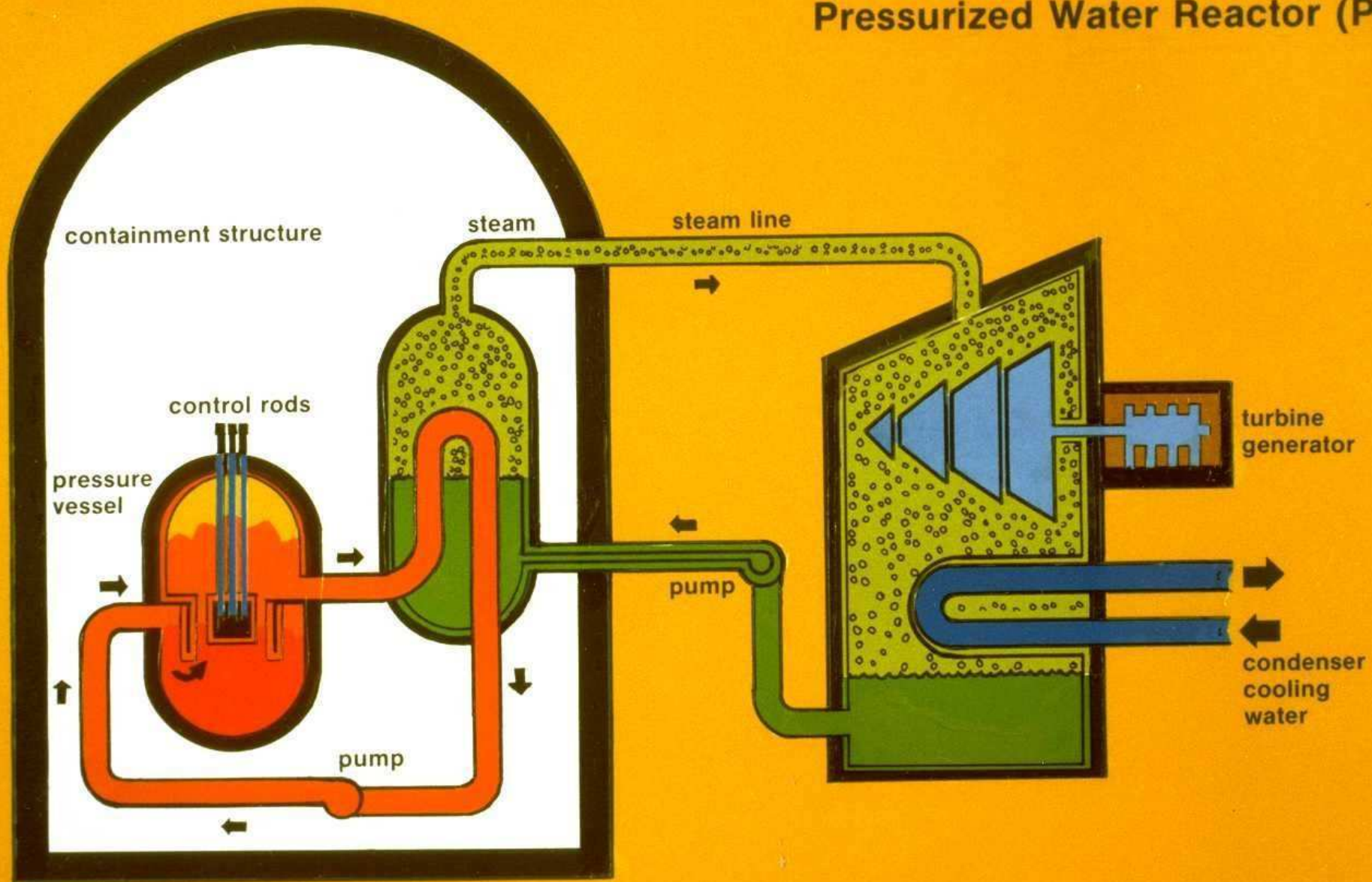
Overview of a coal fired generating plant.
(Courtesy of Carolina Power and Light Company)

PRESSURIZED WATER REACTOR (PWR)



Pressurized water reactor power plant.
(Courtesy of Carolina Power and Light Company)

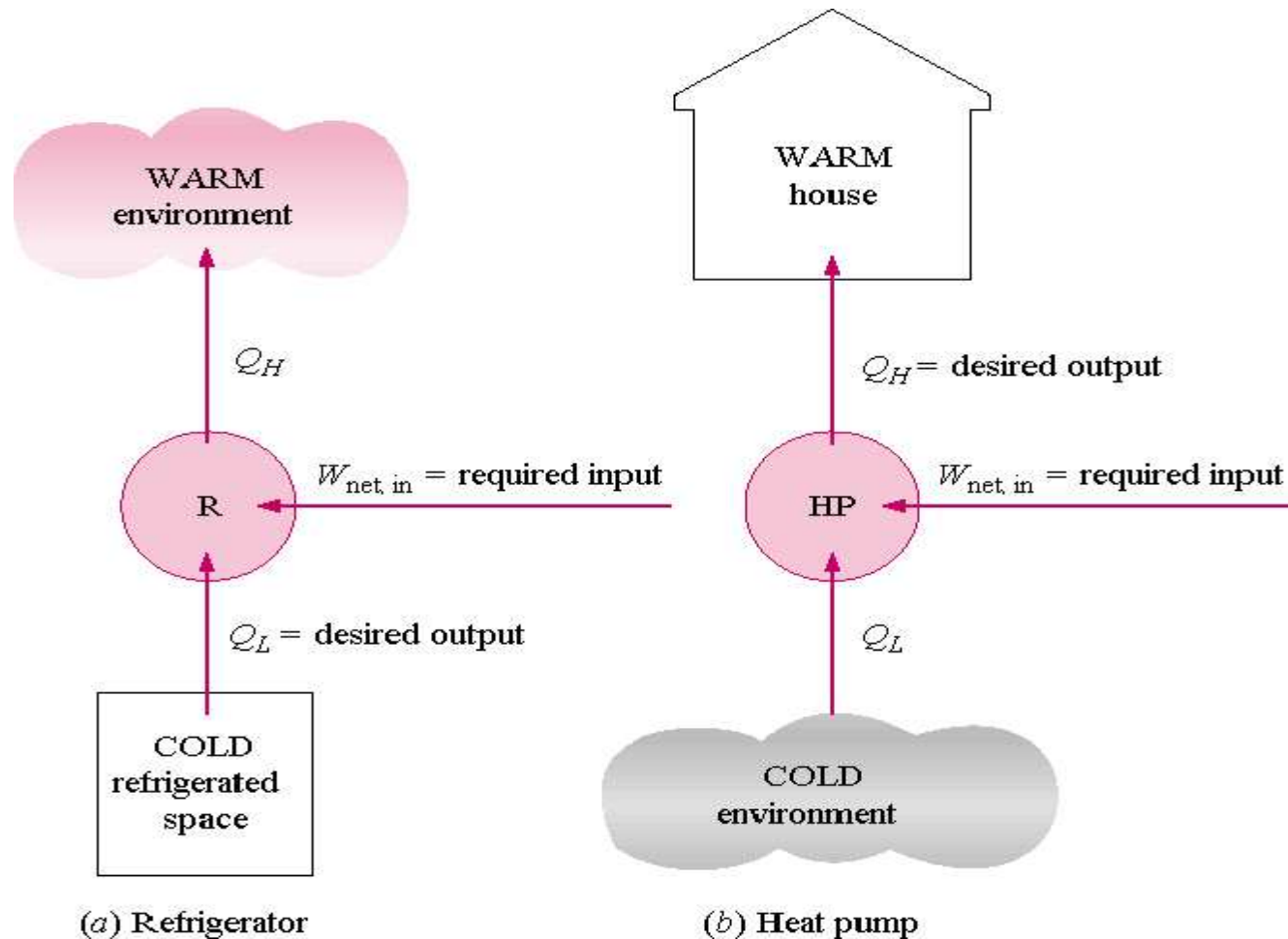
Pressurized Water Reactor (PWR)



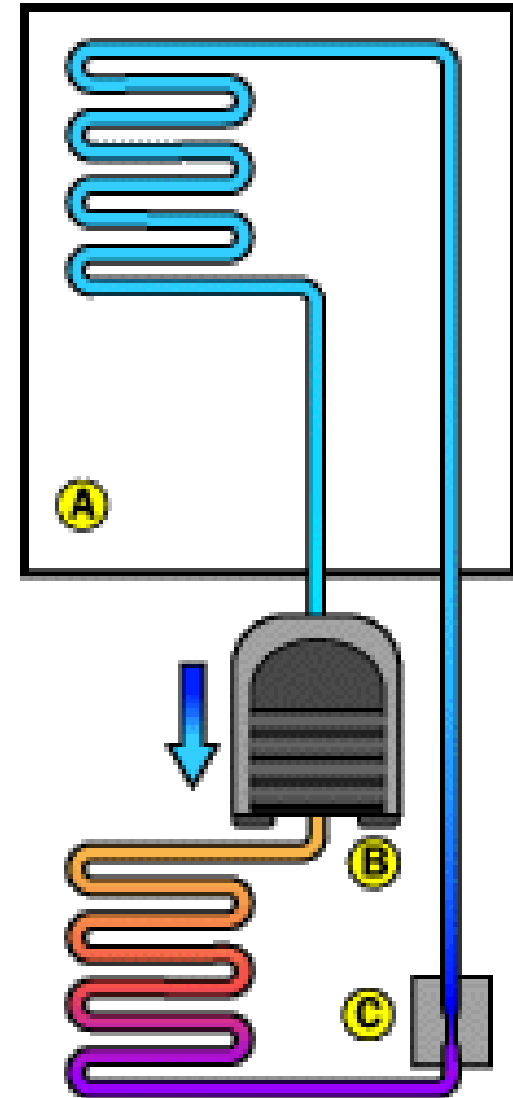
Pressurized water reactor steam generator.
(Courtesy of Carolina Power and Light Company)

Refrigerador e bomba de calor

- Refrigerador: remoção de calor de um ambiente frio
- Bomba de calor: fornecer calor para um ambiente quente



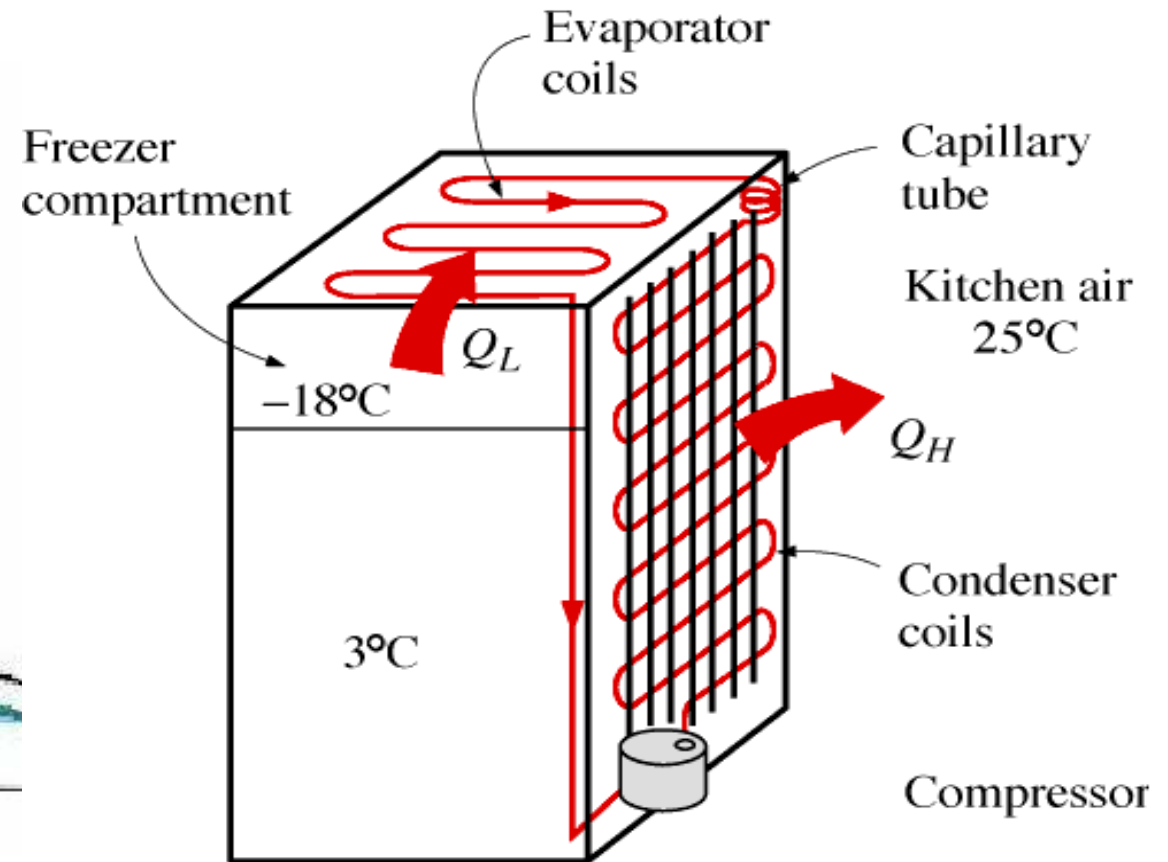
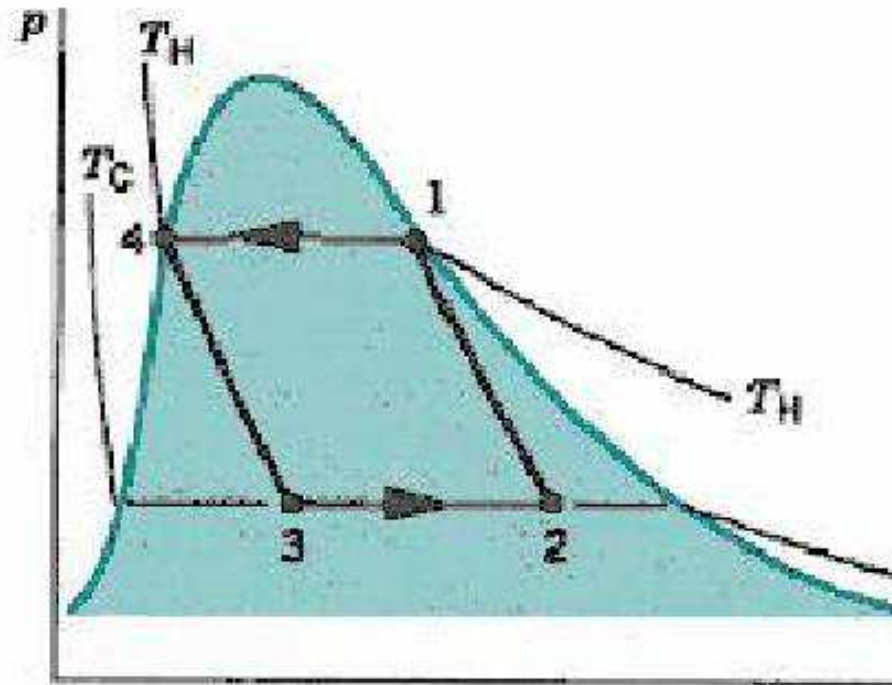
Refrigerador doméstico



©2000 How Stuff Works

- A** Inside the refrigerator
- B** Compressor
- C** Expansion valve

Refrigerador doméstico



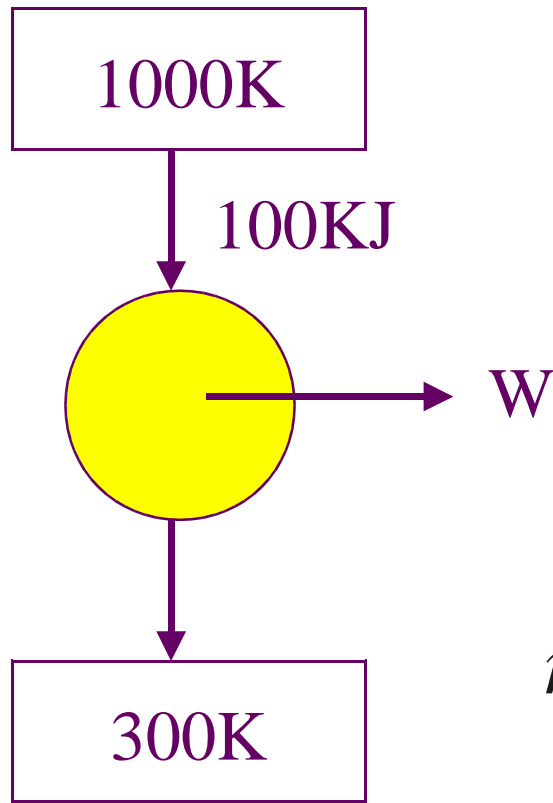
Questão

- Ex. 4.8: Um sistema que contém 3 kg de ar opera um ciclo que consiste nos 3 seguintes processos:
 - 1 \rightarrow 2 : adição de calor a volume constante: $P_1 = 0,1$ Mpa, $T_1 = 20^\circ\text{C}$ e $P_2 = 0,2$ Mpa
 - 2 \rightarrow 3 : adição de calor a temperatura constante
 - 3 \rightarrow 1 : rejeição de calor a pressão constante
- Esboce o ciclo em um diagrama P-v
- Calcule o trabalho sobre cada um dos 3 processos
- Qual é o trabalho líquido, a eficiência térmica e a transferência de calor líquida do ciclo?

Questão

- Ex. 4.13: Um quantidade de 100 kJ de calor é adicionada a um ciclo de Carnot a 1000K. O ciclo rejeita calor a 300K. Quanto trabalho o ciclo produz e quanto calor o ciclo rejeita?

Ex4.13)



Ciclo de Carnot

$$W=?$$

$$Q_c=?$$

$$\eta_c = \frac{W}{Q_h} = 1 - \frac{T_c}{T_h} = 1 - 0,3$$

$$\eta_c = 0,7 \rightarrow W = 0,7 \times 100$$

$$W = 70\text{KJ}$$

$$\oint Q = \oint W \rightarrow (100 - Q_c) = 70$$

$$Q_c = 30\text{KJ}$$

Questão

- Ex. 4.14: Uma grande central de potência produz 1000 MW de potência elétrica operando com uma eficiência térmica do ciclo de 40 %. Qual a taxa em que o calor é rejeitado para o ambiente por essa central?

Ex4.14)

$$\eta_T = 0,4 = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_h}$$

$$\dot{Q}_h = \frac{1000\text{MW}}{0,4} = 2500\text{MW}$$

$$\oint \dot{Q} = \oint \dot{W}$$

$$(\dot{Q}_h - \dot{Q}_c) = \dot{W}_{\text{liq}}$$

$$\dot{Q}_c = 1500\text{MW}$$

4-15 Uma central de potência térmica opera segundo o seguinte ciclo (veja Fig. P4.15). A água é bombeada para uma caldeira onde ela é convertida em vapor a alta pressão e temperatura através da adição do calor fornecido pela combustão de carvão. O vapor é expandido em uma turbina de vapor que aciona um gerador elétrico. Após passar pela turbina, o vapor é condensado em um condensador, rejeitando calor antes de ser bombeado de volta à caldeira.

(a) Identifique os sinais das interações de transferências de calor e de trabalho que ocorrem durante o ciclo, adotando a água/vapor como sistema.

(b) Se 5.000 MW de potência térmica é adicionada à água na caldeira, 3.500 MW é rejeitado no condensador, e as perdas de calor adicionais do ciclo são 500 MW, qual é a potência líquida do ciclo? Qual é a eficiência térmica da central de potência?

(c) Se a potência da bomba é de 1.000 kW, qual é a saída da turbina de potência?

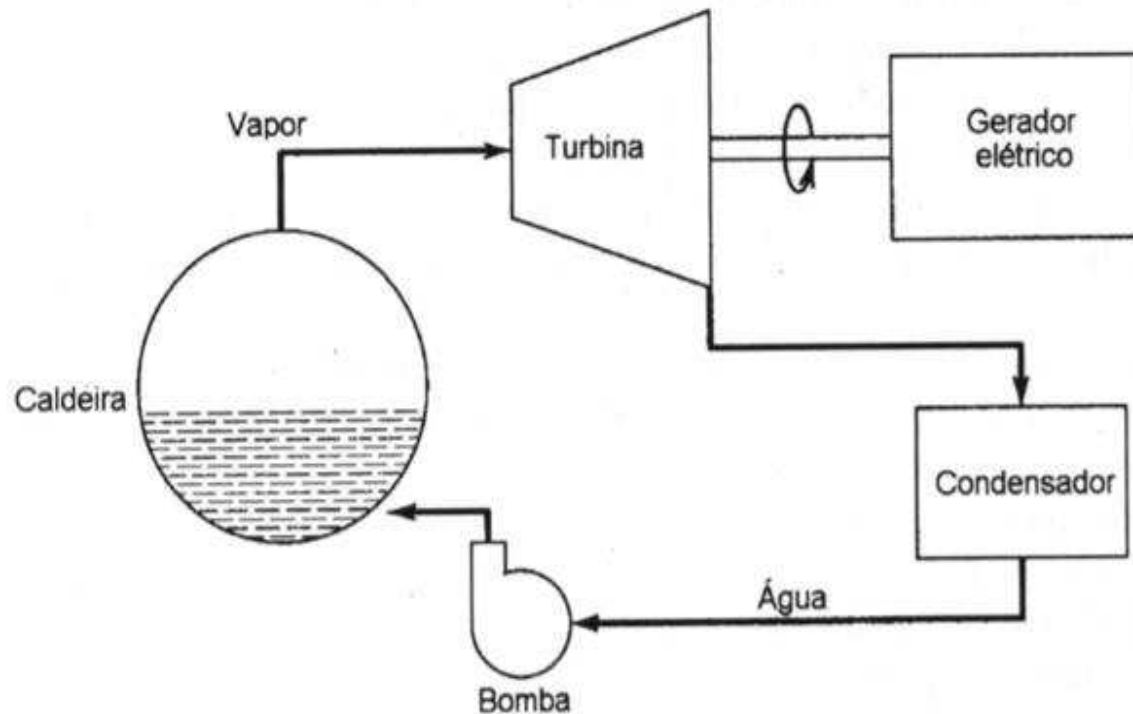
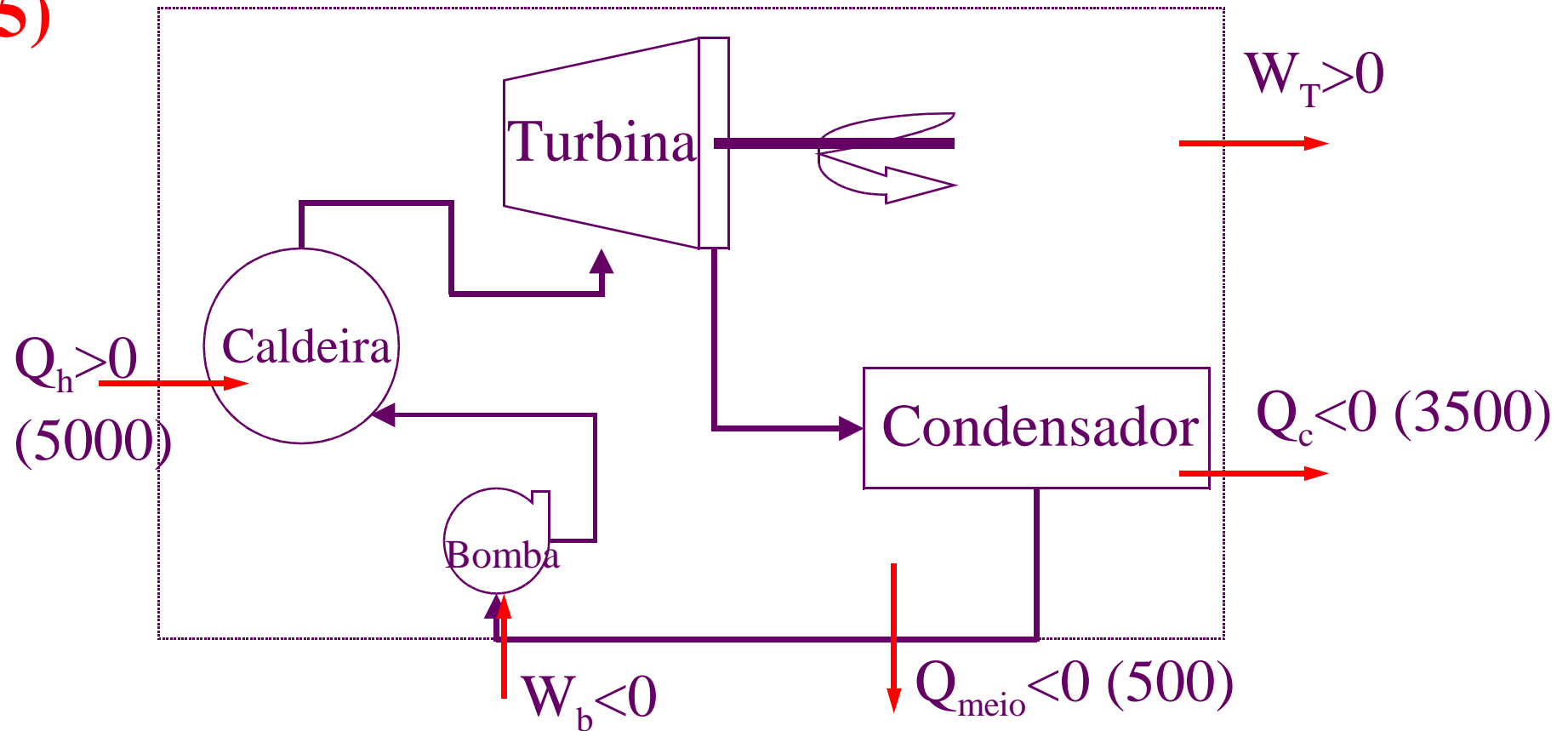


Figura P4-15 Ciclo de central de potência a vapor.

Ex4.15)



$$\oint \dot{Q} = \oint \dot{W} \rightarrow 5000 - 4000 = 1000 \text{ MW}$$

$$\eta_T = \frac{W_{\text{liq}}}{Q_h} = \frac{1000}{5000} = 20\%$$

$$W_{\text{liq}} = W_T - W_b \rightarrow 1000 = W_T - 1 \rightarrow W_T = 1001 \text{ MW}$$

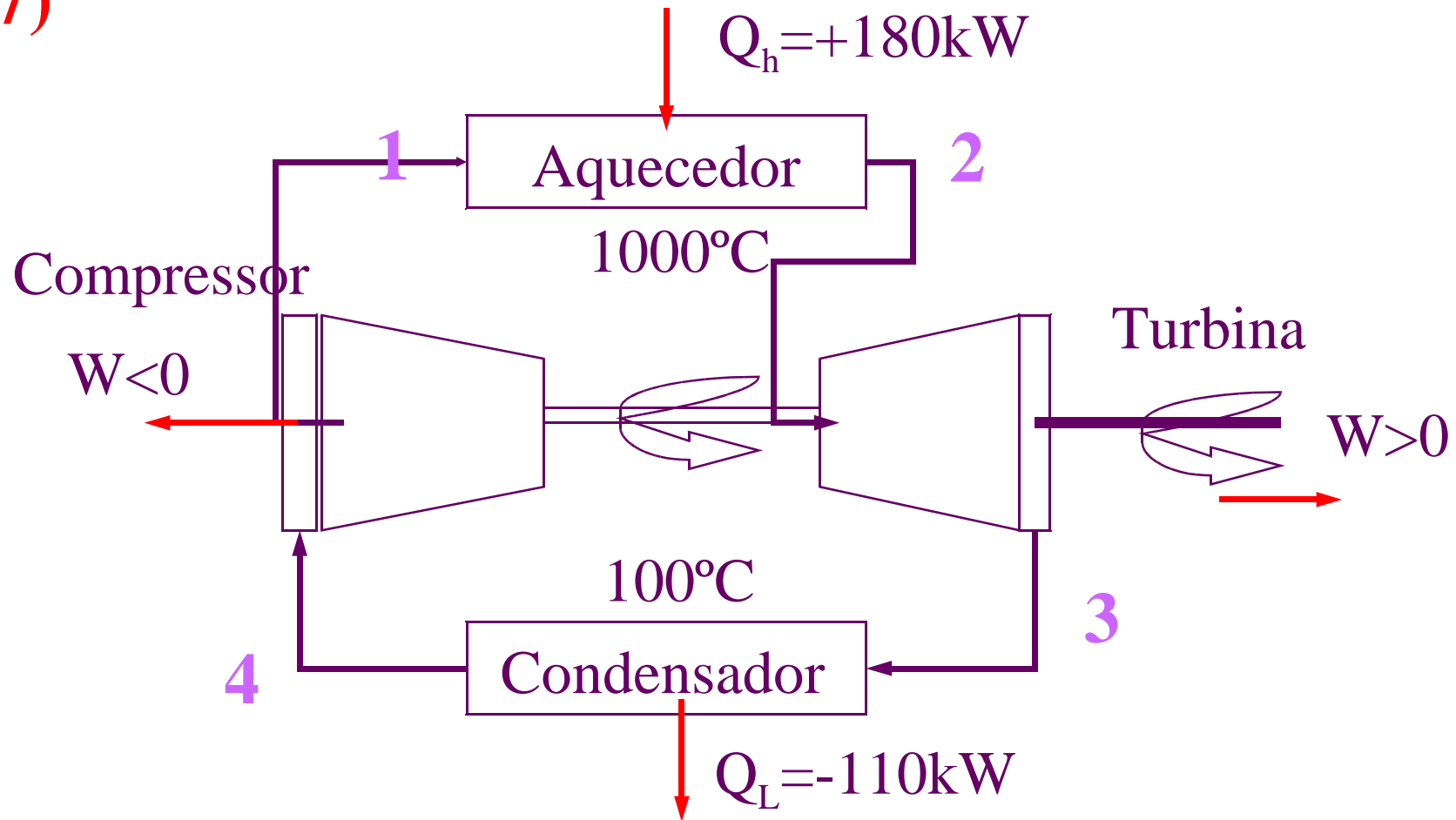
Questão

- Ex. 4.16: Se a central do problema anterior operasse em um ciclo de Carnot, com a temperatura da caldeira a 550°C e a temperatura do condensador a 30°C , qual seria a eficiência térmica do ciclo?

Ex4.16)

$$\eta_T = 1 - \frac{303}{823} = 0,63$$

Ex4.17)



$$1^{\circ}\text{Lei: } \oint Q = \oint W$$

$$W_{\text{liq}} = 180 - 110 = 70 \text{ kW}$$

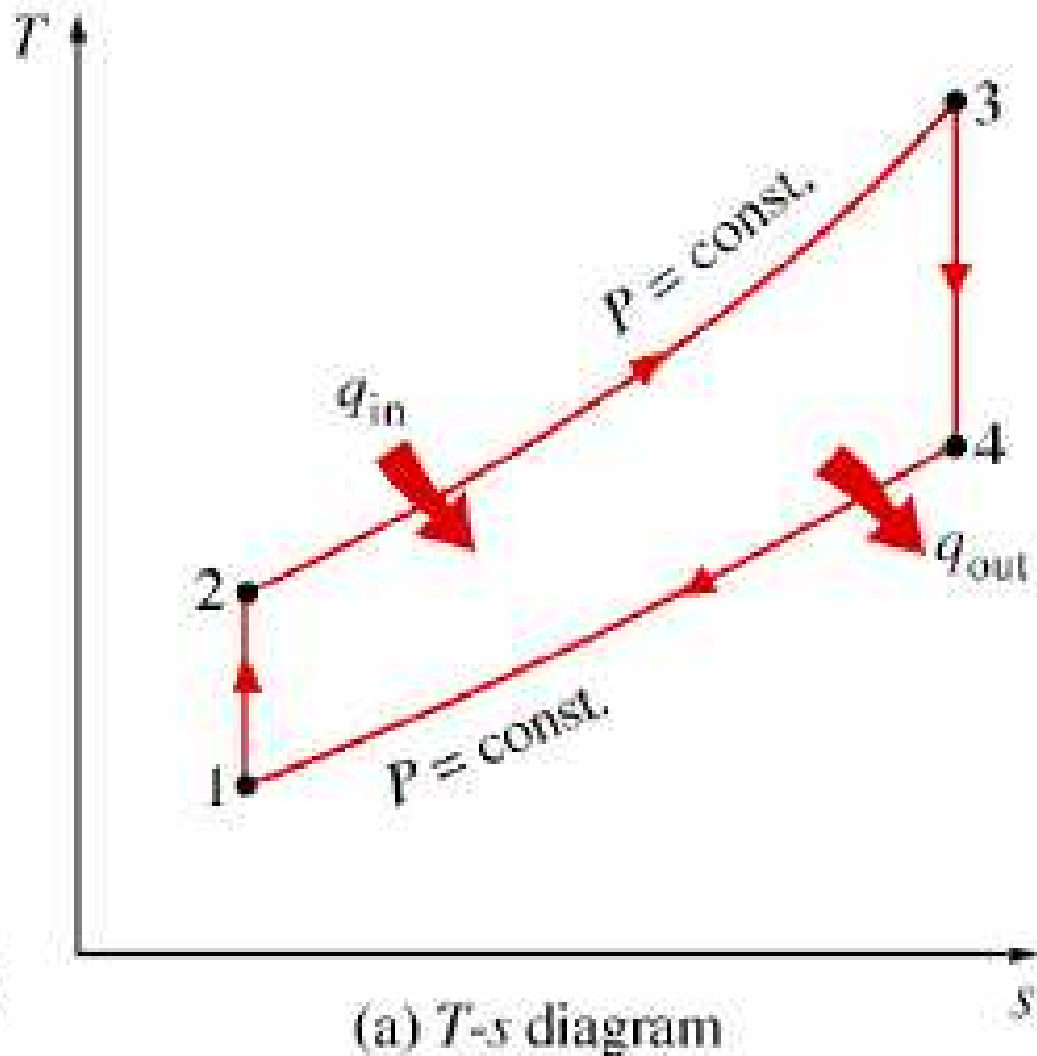
$$\eta_T = \frac{W_{\text{liq}}}{Q_h} = \frac{70}{180} = 0,39\%$$

Questão

- Ex. 4.3: Uma massa de 10 kg de ar é aquecida de 30°C para 130°C em um dispositivo pistão cilindro de tal forma que a pressão do ar é de 1 atm durante o processo. Se o processo for completado em 1000s, qual é a taxa em que calor é adicionado? Qual é a taxa em que trabalho é realizado pelo ar?

Rendimento Máximo -> Rendimento de Carnot

$$\eta_{\text{máx}} = \eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{373}{1273} = 0,71$$



Ciclo Brayton

$$\eta = 1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}}$$

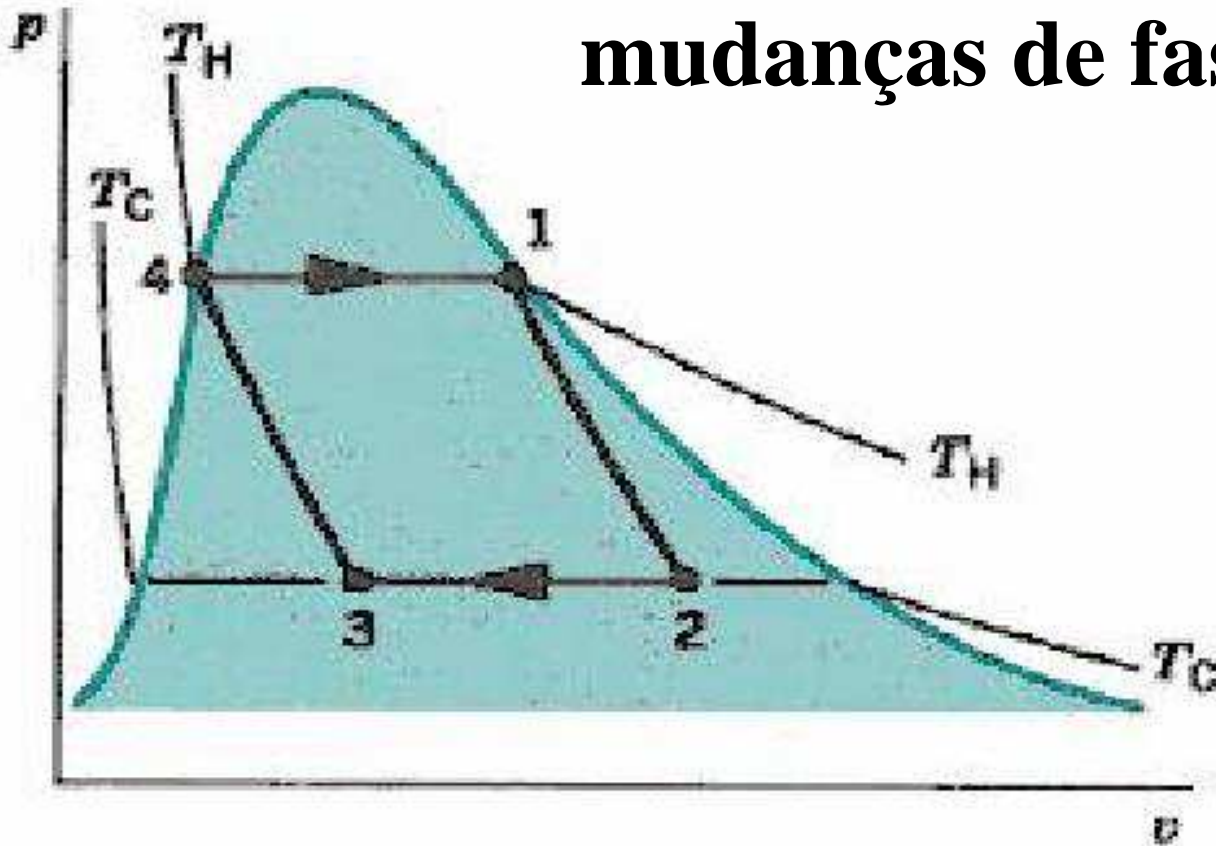
Conhecer Pressões

Ciclo de Carnot

- ***O ciclo de Carnot não é um modelo adequado para ciclos de potência a vapor porque ele não pode ser obtido na prática.***

Ciclo de Carnot (vapor)

Baixa eficiência térmica
Compressores e turbina sujeitos a
mudanças de fase



Ciclos de vapor

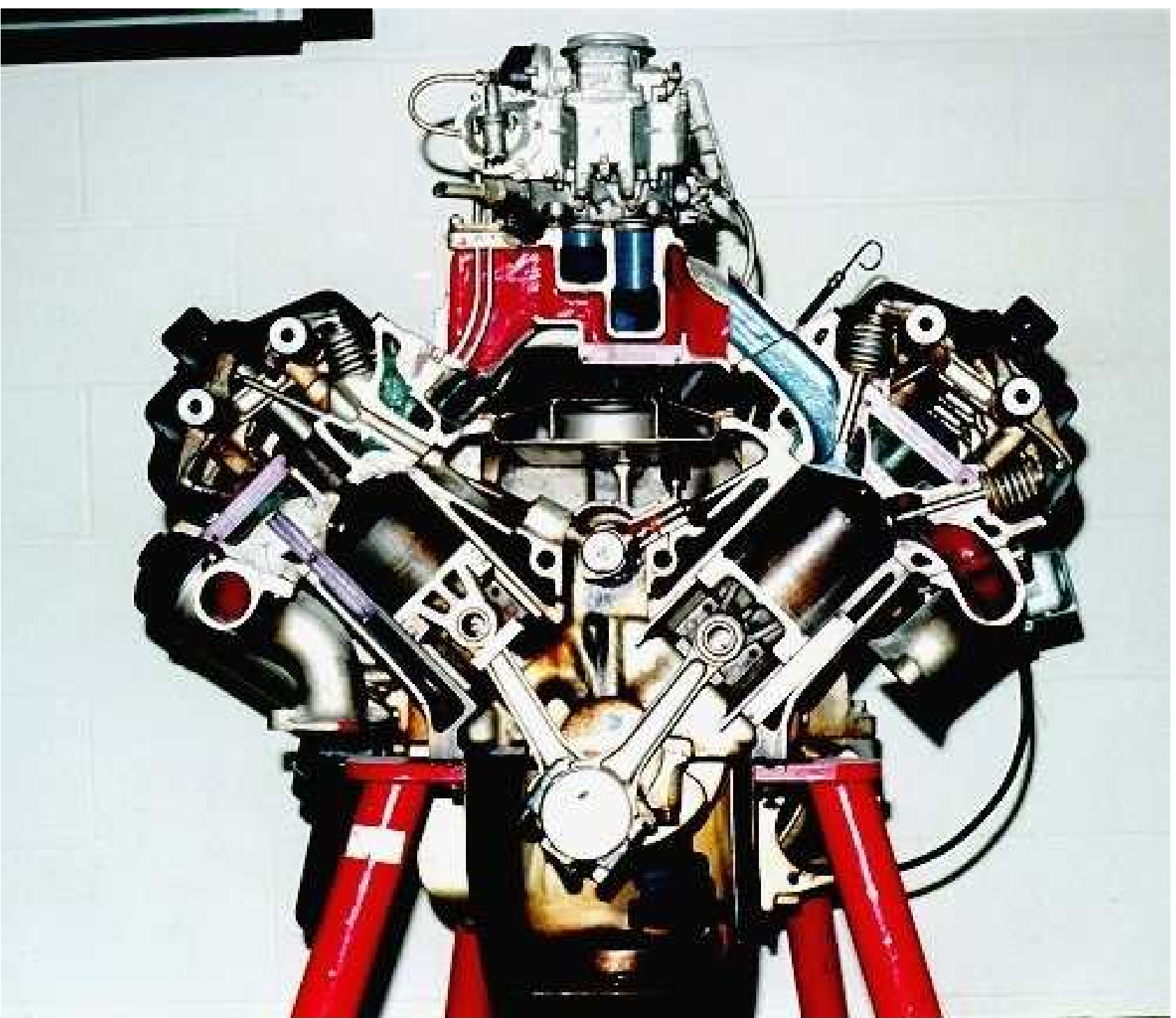
- **Ciclo Rankine** : ciclo de vapor
- É o principal ciclo termodinâmico utilizado para a produção de eletricidade (mundialmente)
- Este ciclo pode utilizar uma grande variedade de fluidos

Ciclo Rankine

- **Modelo para ciclo de potência a vapor**
- **É composto de 4 processos internamente reversíveis:**
 - **Adição de calor a pressão constante (em um aquecedor)**
 - **Expansão isentrópica em uma turbina**
 - **Perda de calor a pressão constante (em um condensador) condenser**
 - **Compressão isentrópica (em uma bomba)**
- **O vapor sai do condensador como líquido saturado**

Ciclo de potência a gás

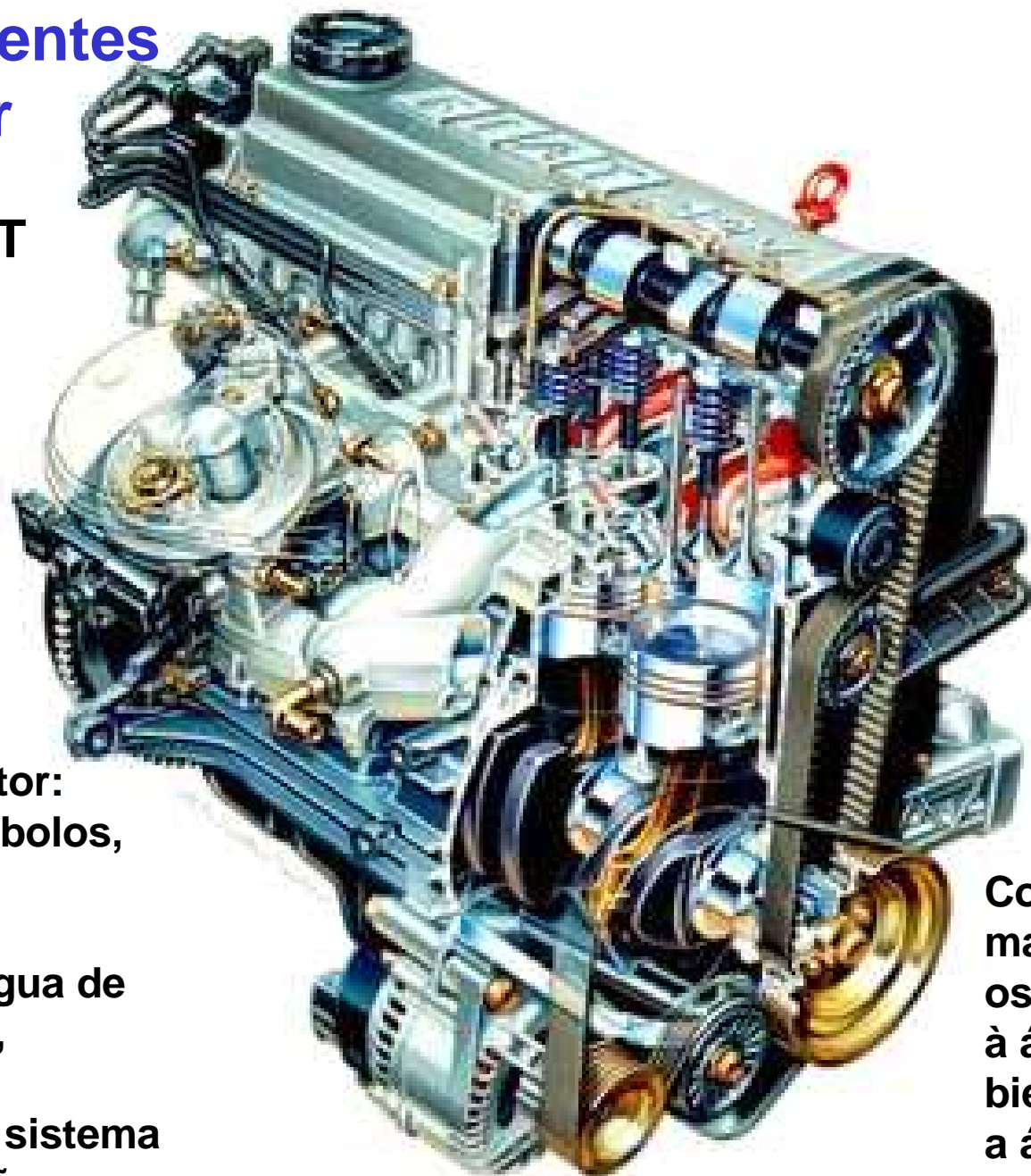
- **Ciclo de potência:** ciclo durante o qual uma quantidade líquida de trabalho é produzida
- **Ciclo a gás:** ciclo no qual o fluido de trabalho permanece no estado gasoso



Inside view of a V-8 gasoline engine.

Componentes do motor

Motor FIAT



Cabeçote do motor :
válvulas,
velas,
Balancim (controla
a abertura das válvulas),
dutos de admissão
e escapamento
câmaras de explosão

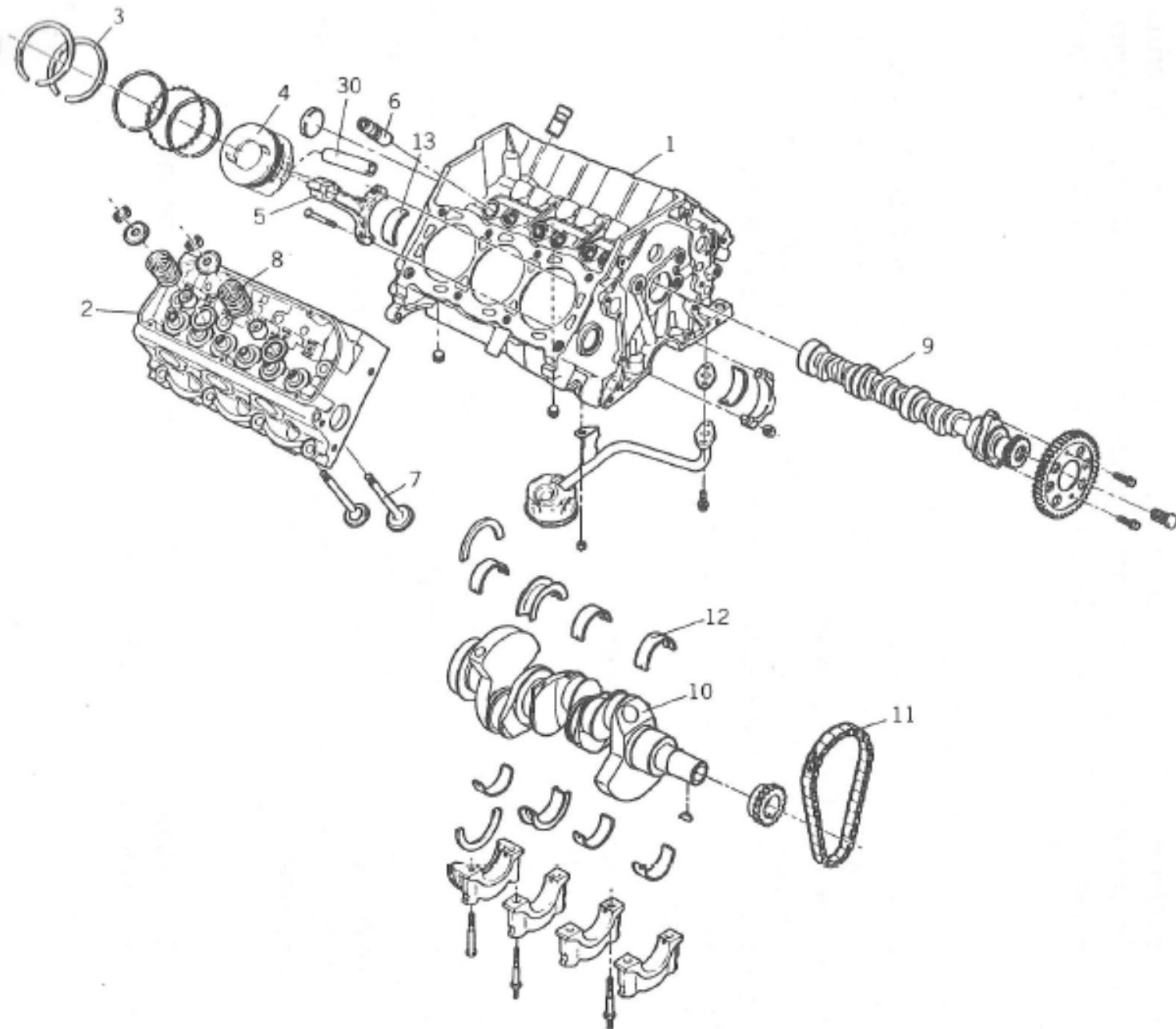
Correia de
transmissão

Bloco do motor:
cilindros, êmbolos,
bielas

dutos para água de
resfriamento,

dutos para o sistema
de lubrificação

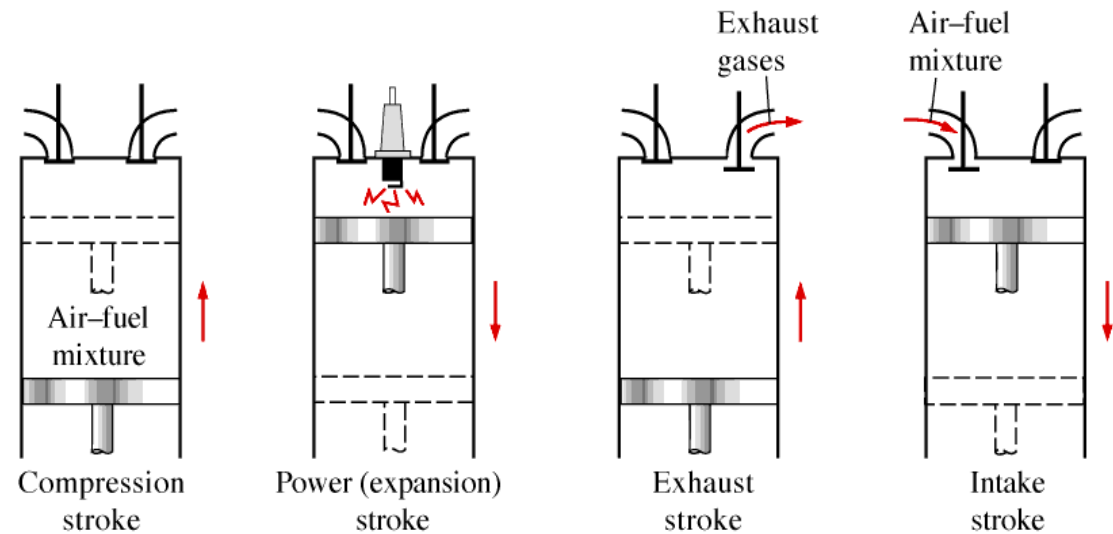
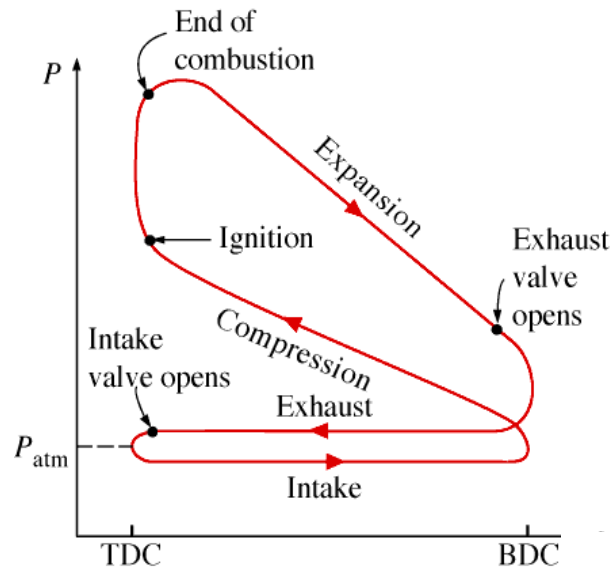
Conjunto de árvores de
manivelas,
os pistões estão ligados
à árvore por meio das
bielas,
a árvore está apoiada na
base do bloco do motor



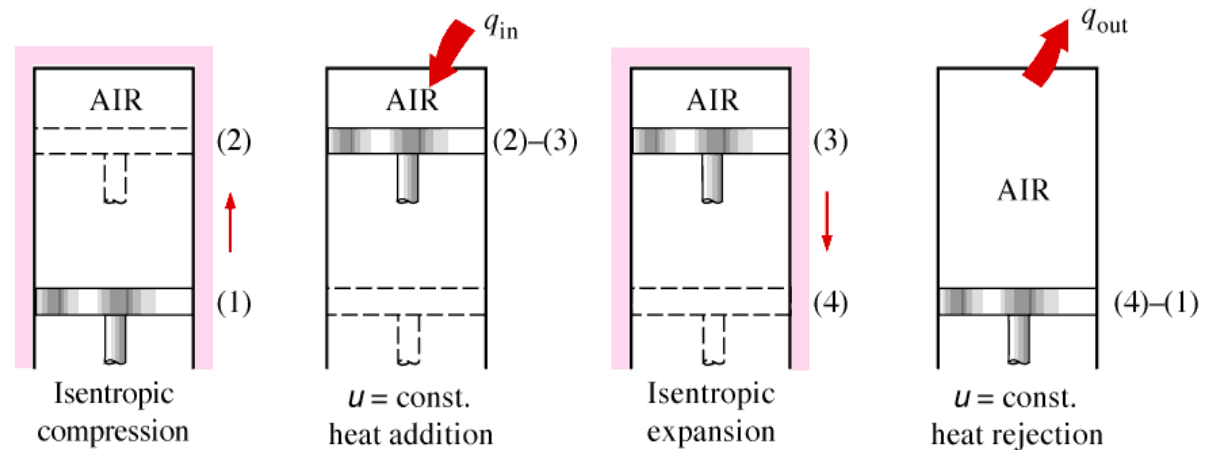
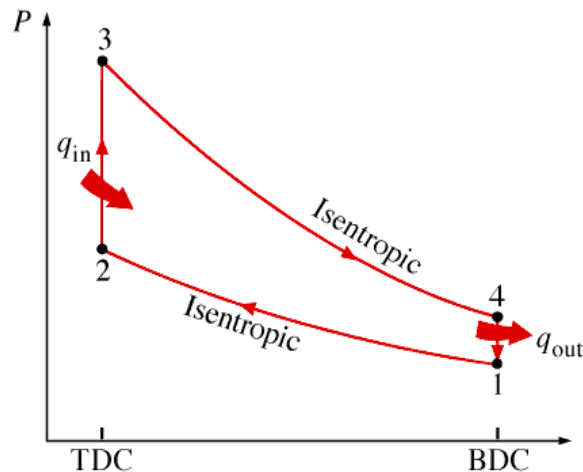
Key to Figs. 1-1 and 1-2

- 1 Cylinder block
- 2 Cylinder head
- 3 Piston ring
- 4 Piston
- 5 Connecting rod
- 6 Lifter
- 7 Valve
- 8 Valve spring
- 9 Camshaft
- 10 Crankshaft
- 11 Timing chain
- 12 Main bearing
- 13 Rod bearing
- 14 Carburetor
- 15 Throttle
- 16 Intake manifold
- 17 Thermostat
- 18 Flywheel
- 19 Distributor
- 20 Head gasket
- 21 Oil pan
- 22 Fuel pump
- 23 Water pump
- 24 Oil filter
- 25 Exhaust manifold
- 26 Rocker arm
- 27 Pushrod
- 28 Oil pump inside front cover
- 29 Spark plug

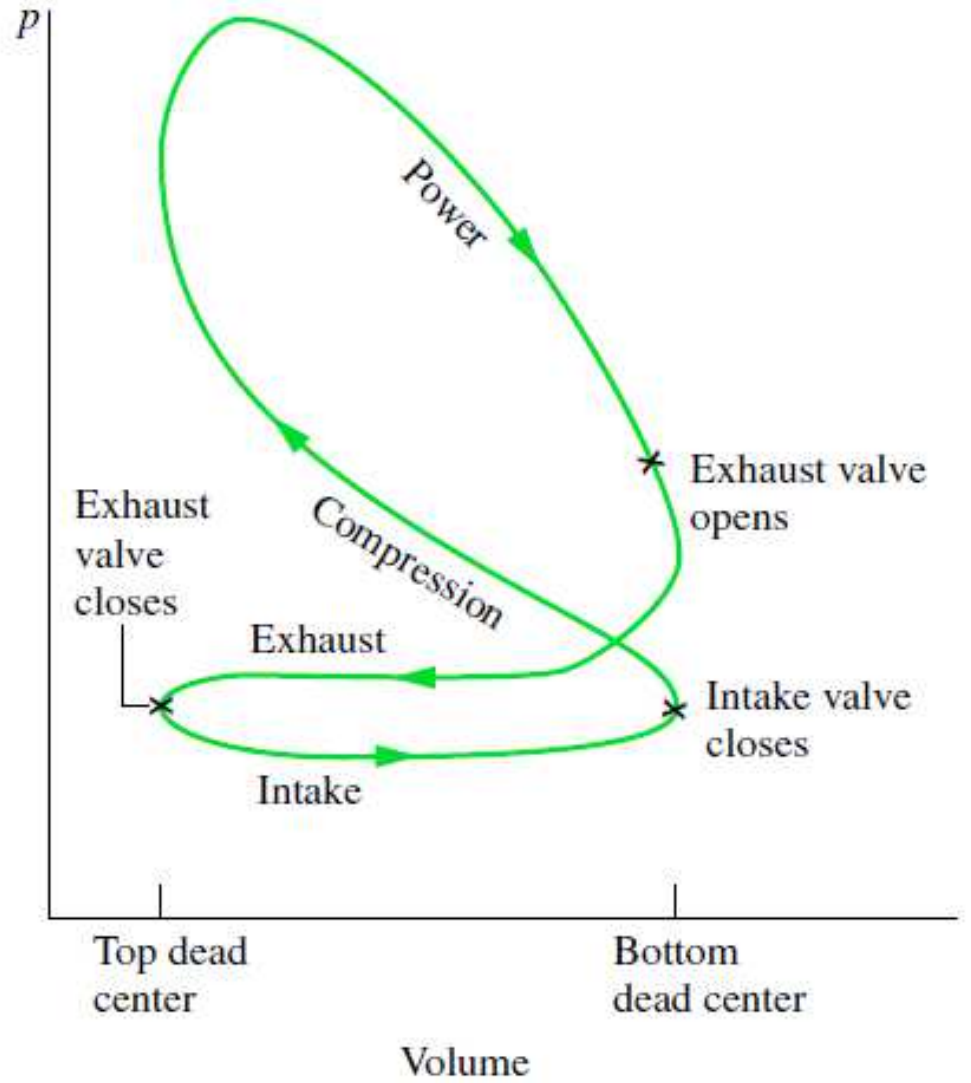
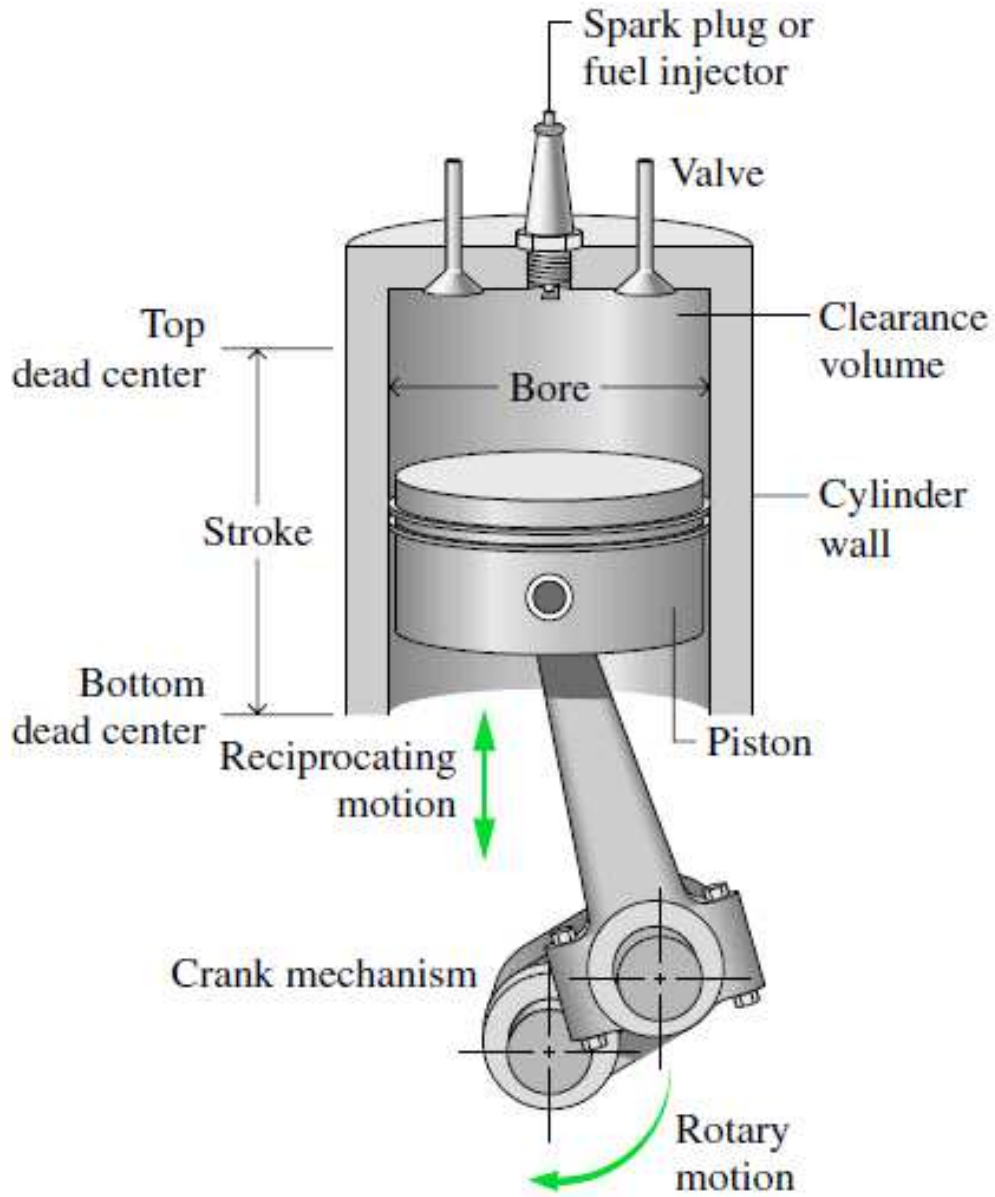
Ciclos real e ideal em motores à explosão por centelha

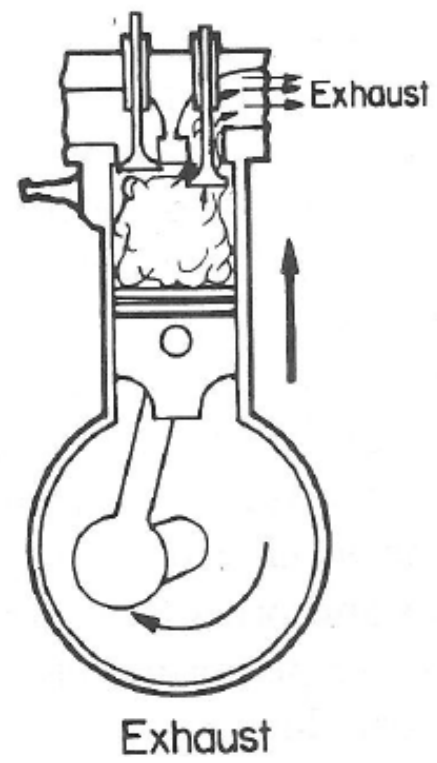
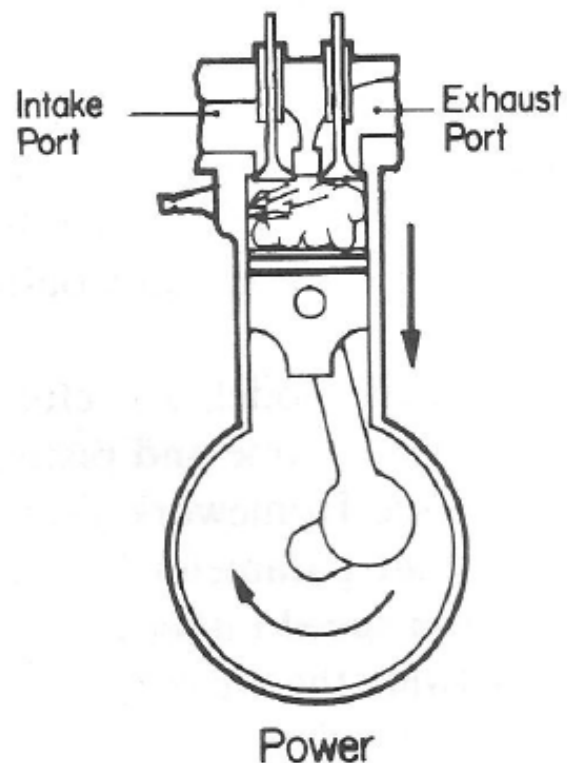
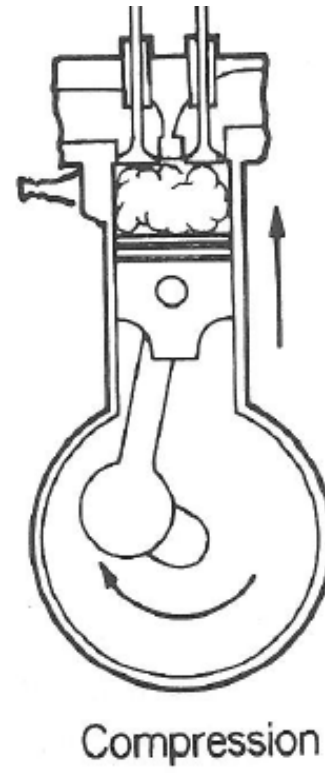
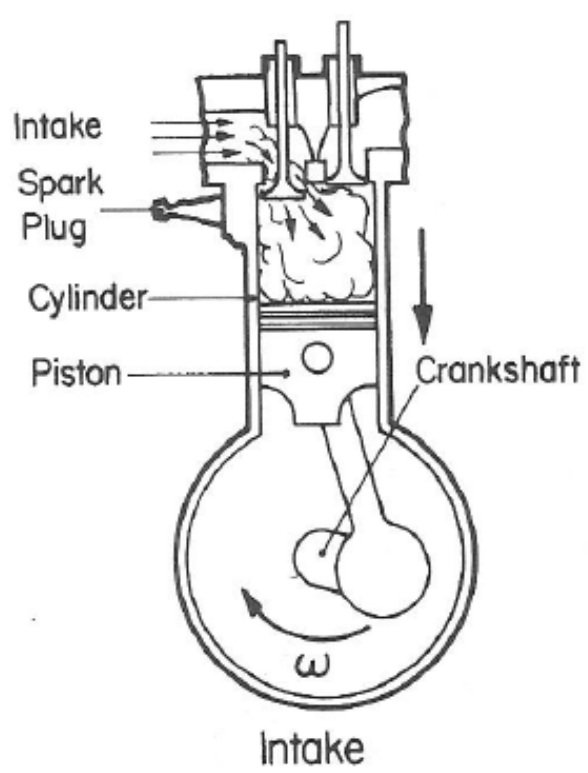


(a) Actual four-stroke spark-ignition engine

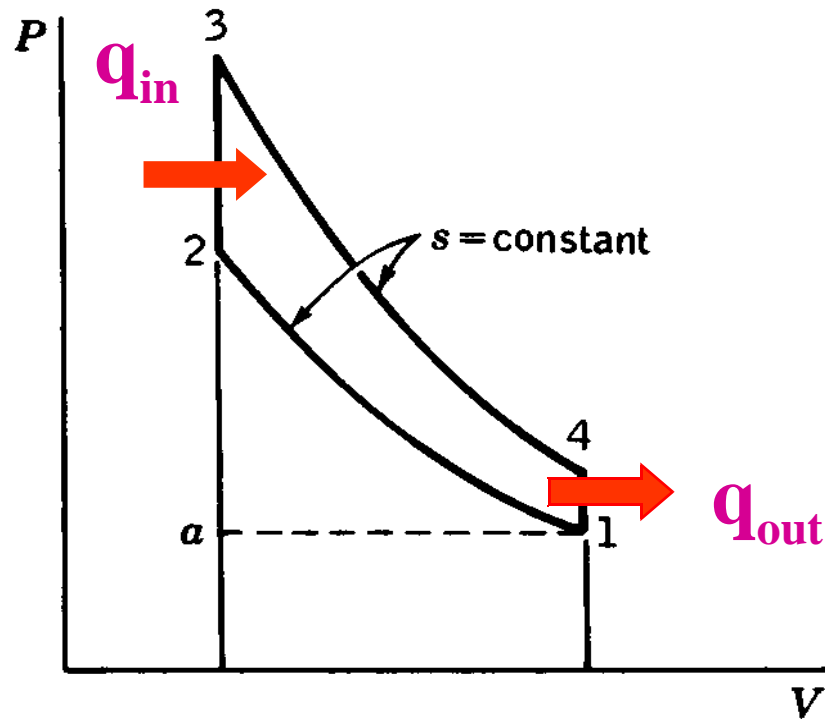


(b) Ideal Otto cycle

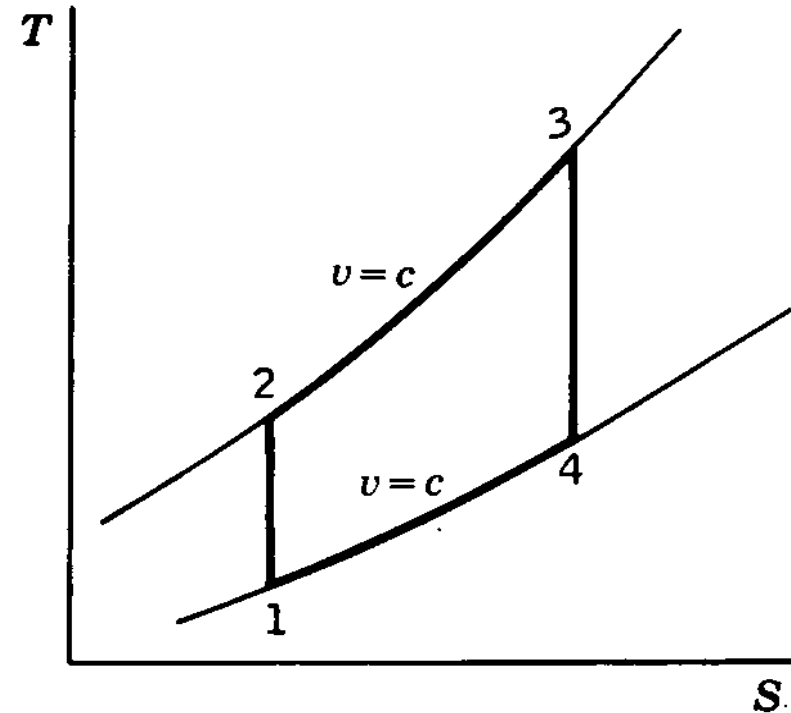




Ciclo Otto



**Diagrama P-V
(trabalho)**



**Diagrama T-S
(transf. de calor)**

Performance do ciclo

Eficiência térmica:

$$\eta = \frac{w_{\text{net}}}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

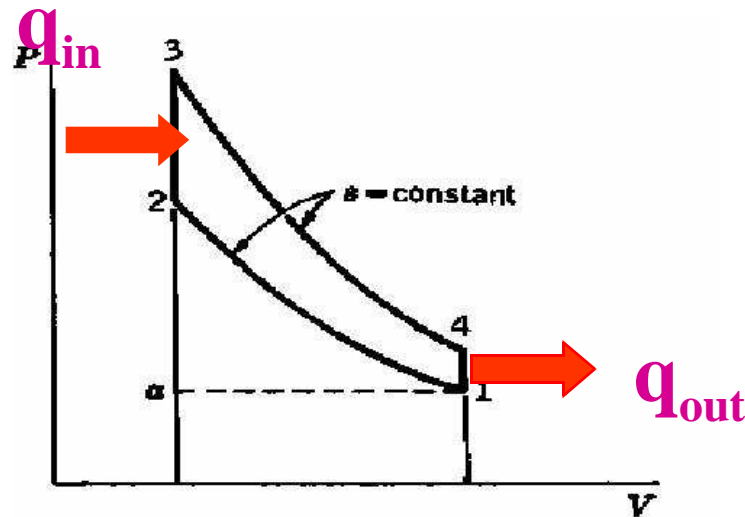
Ciclo Otto

- Adição de calor 2-3 $Q_H = mC_V(T_3 - T_2)$
- Remoção de calor 4-1 $Q_L = mC_V(T_4 - T_1)$

$$\eta = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{mC_V(T_4 - T_1)}{mC_V(T_3 - T_2)}$$

- Ou, em termos de temperaturas

$$\eta = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{T_2(T_3/T_2 - 1)}$$



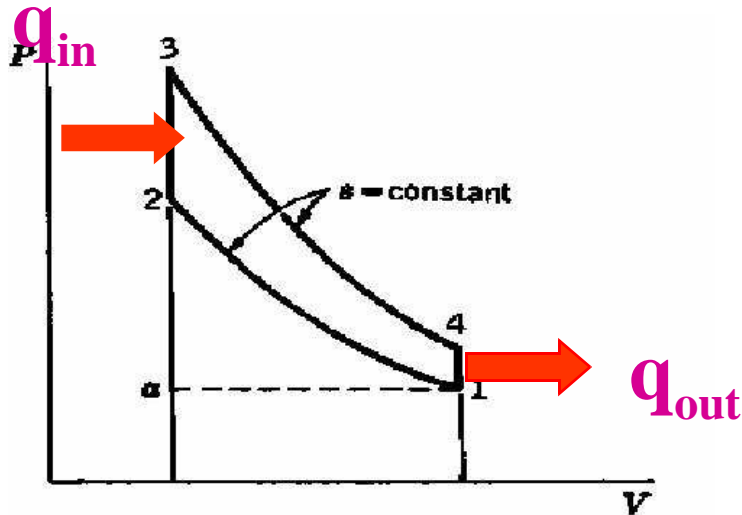
Ciclo Otto

- 1-2 e 3-4 são processos adiabáticos:
relações entre T e V

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

SAME VOLUME RATIO

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{(r)^{\gamma-1}}; \quad r = \frac{V_1}{V_2}$$



Performance do ciclo com hipótese de ar frio

$$\eta_{th, Otto} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}}$$

Parece a eficiência de Carnot mas não é! T_1 e T_2 não são constantes.

Quais são as limitações desta expressão?

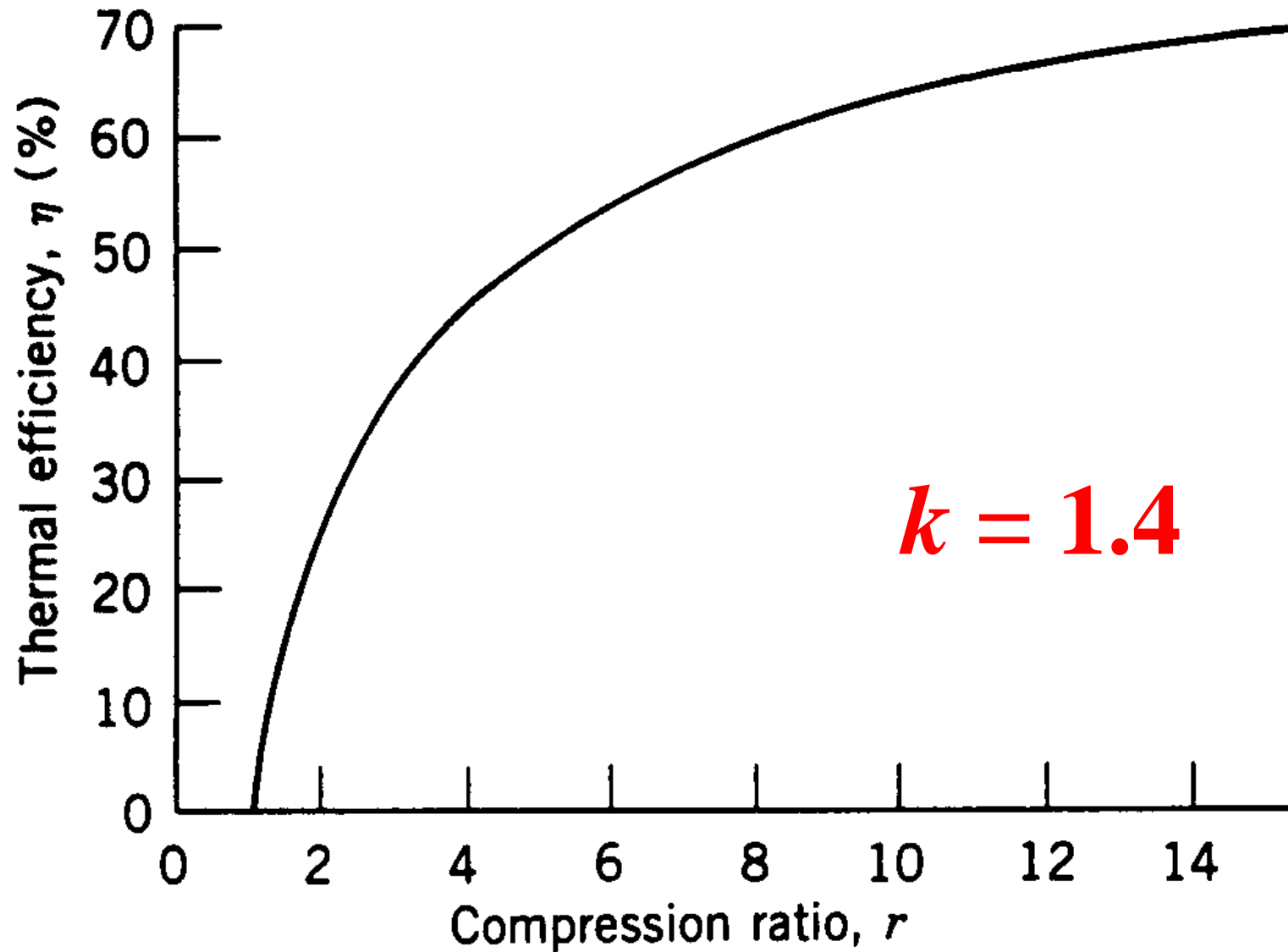
Eficiência térmica de um ciclo Otto ideal

- Com a **hipótese de ar frio**, a eficiência térmica do ciclo é

$$\eta_{th, Otto} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}}$$

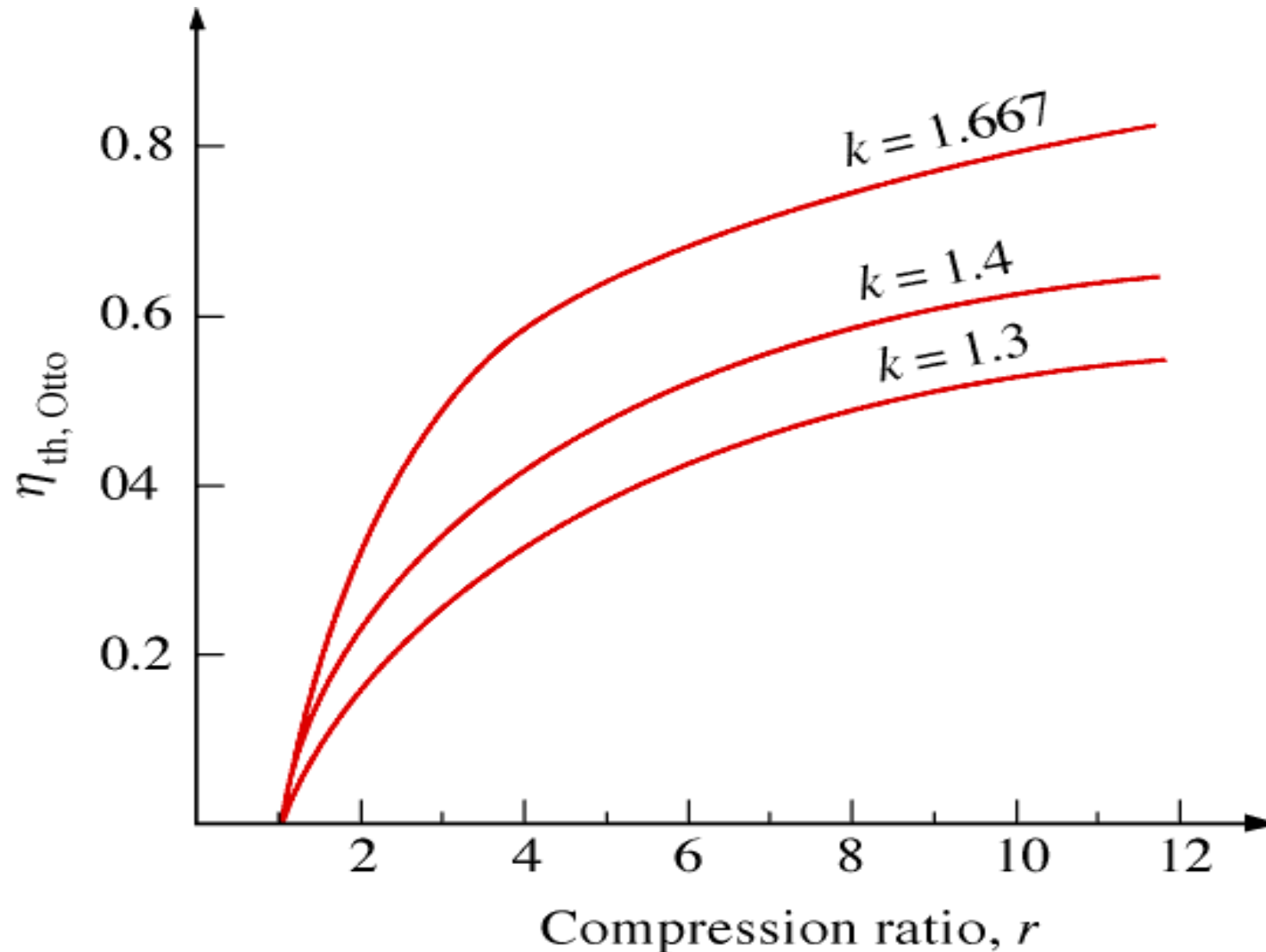
onde r é a taxa de compressão e k é a razão de calores específicos C_p / C_v .

Efeito da taxa de compressão na eficiência do ciclo Otto



Ciclo Otto

A eficiência térmica do ciclo Otto aumenta com a razão de calores específicos k do fluido de trabalho



Ciclo Brayton

- Outro ciclo de ar frio
- Utilizado em modelos de turbojatos.



MIG-35 (<http://defesasaereas.blogspot.com.br>)

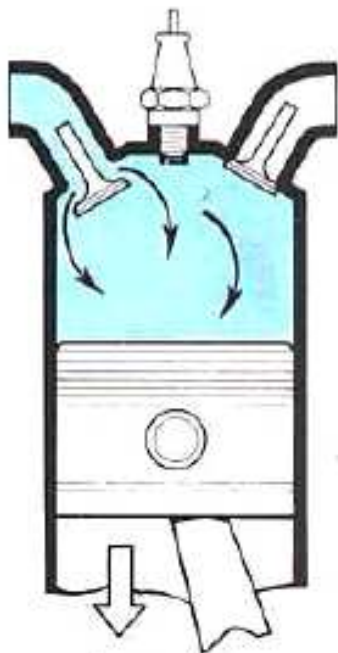
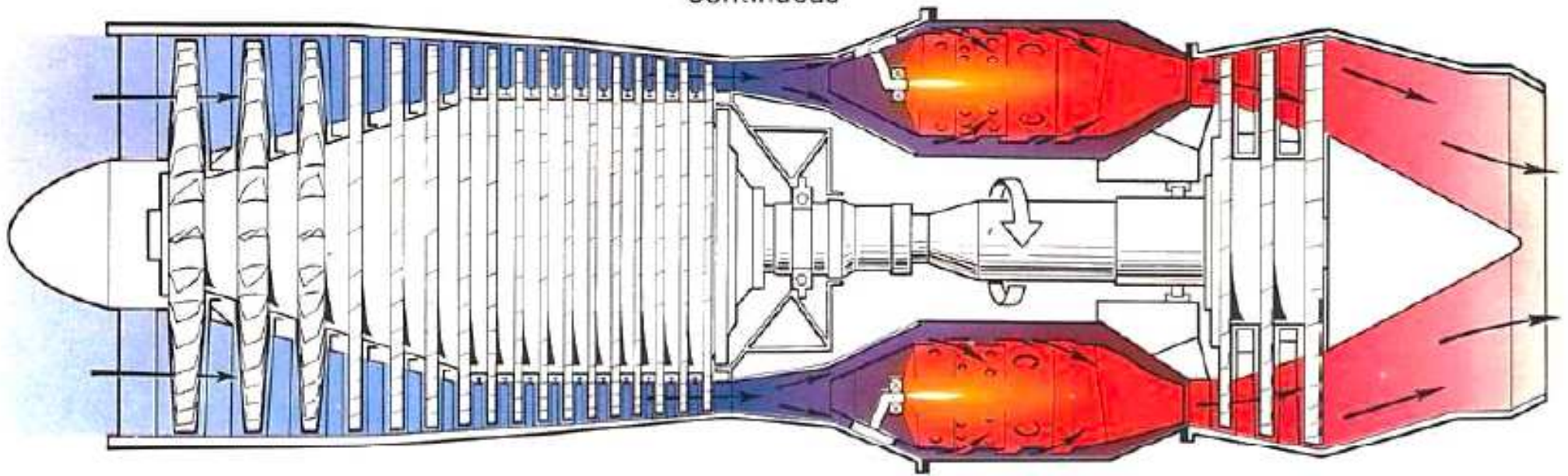
AIR INTAKE

COMPRESSION

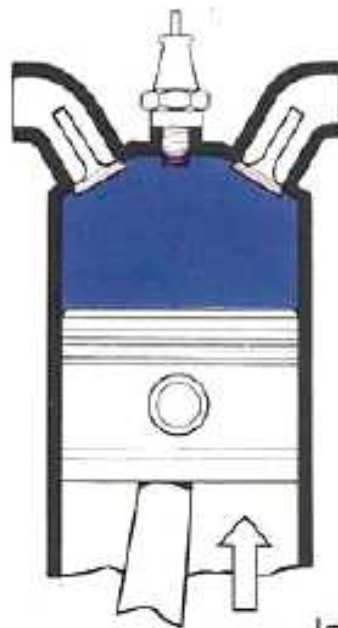
Continuous

COMBUSTION

EXHAUST



AIR/FUEL INTAKE

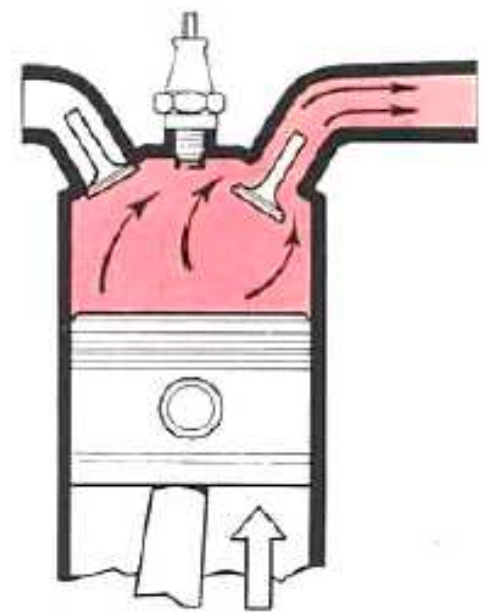


COMPRESSION

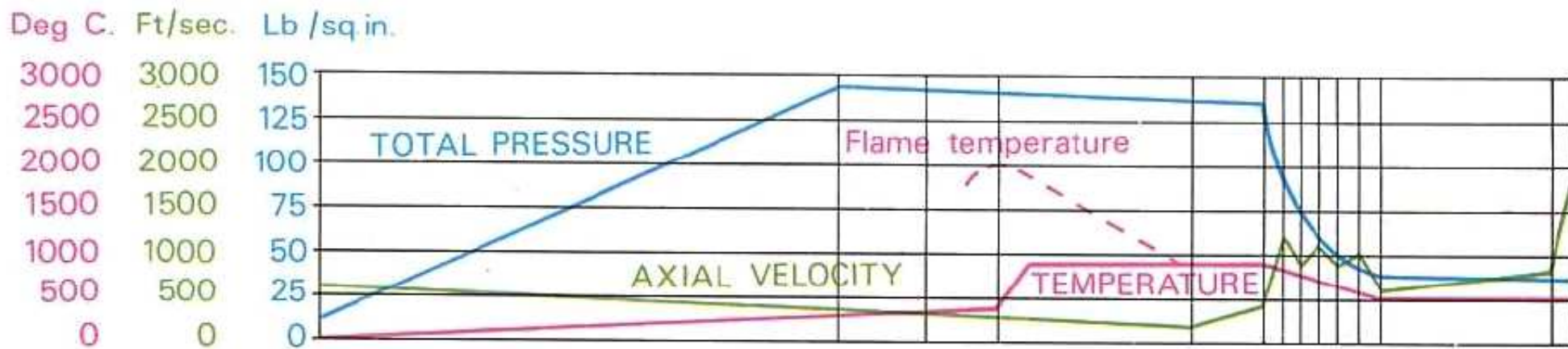
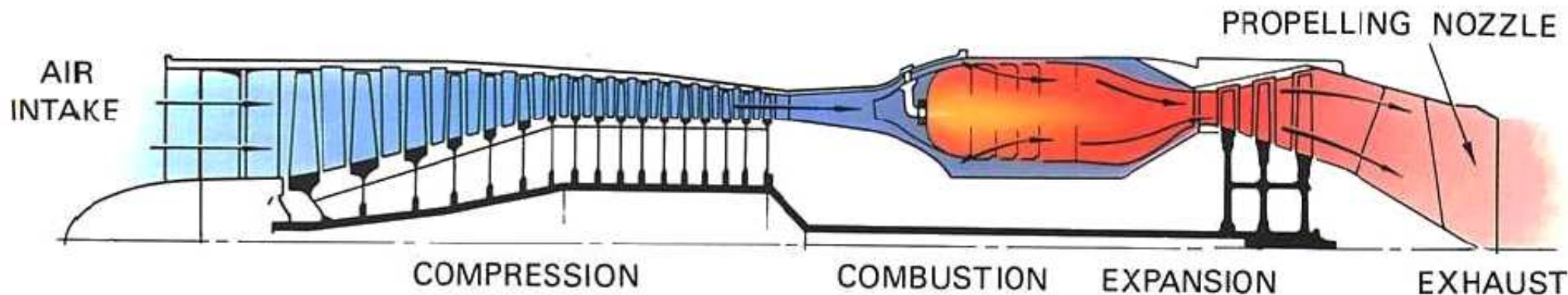


Intermittent

COMBUSTION

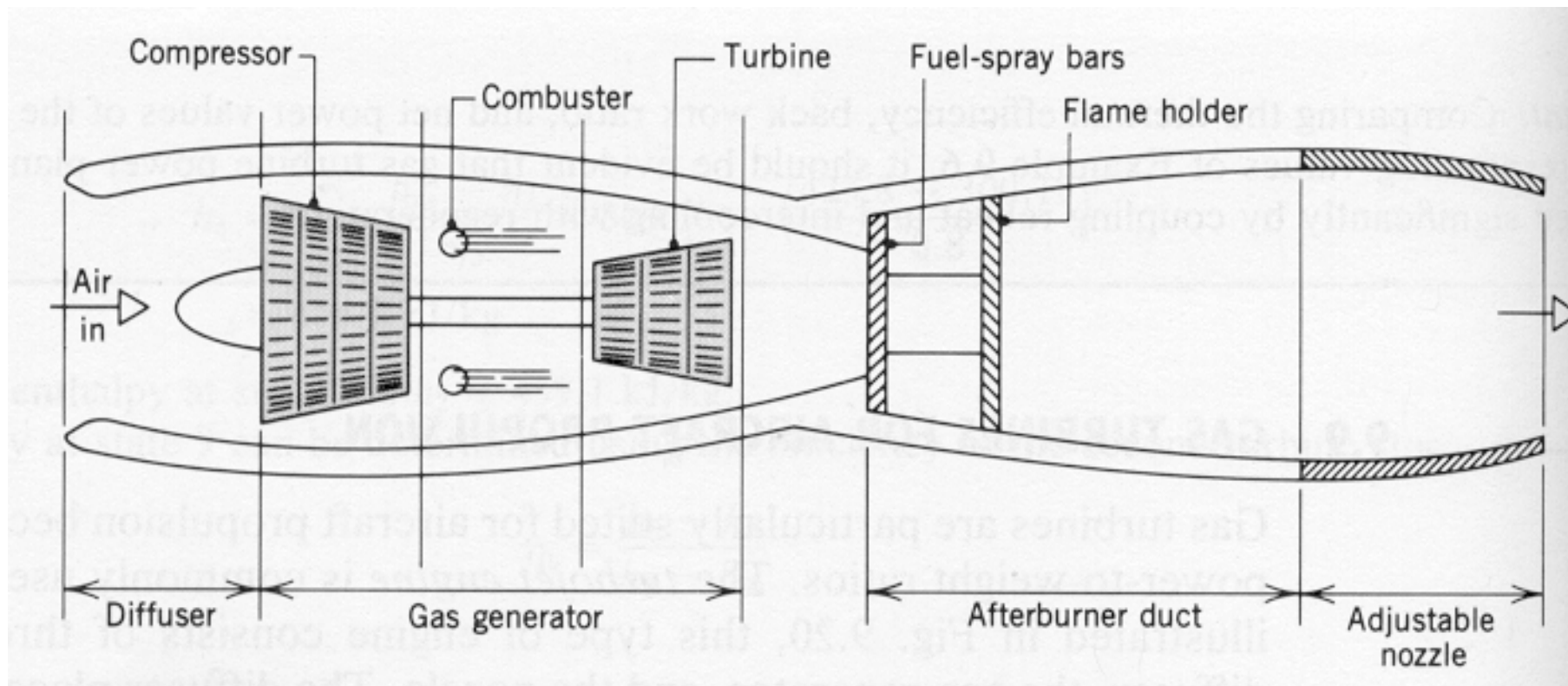


EXHAUST



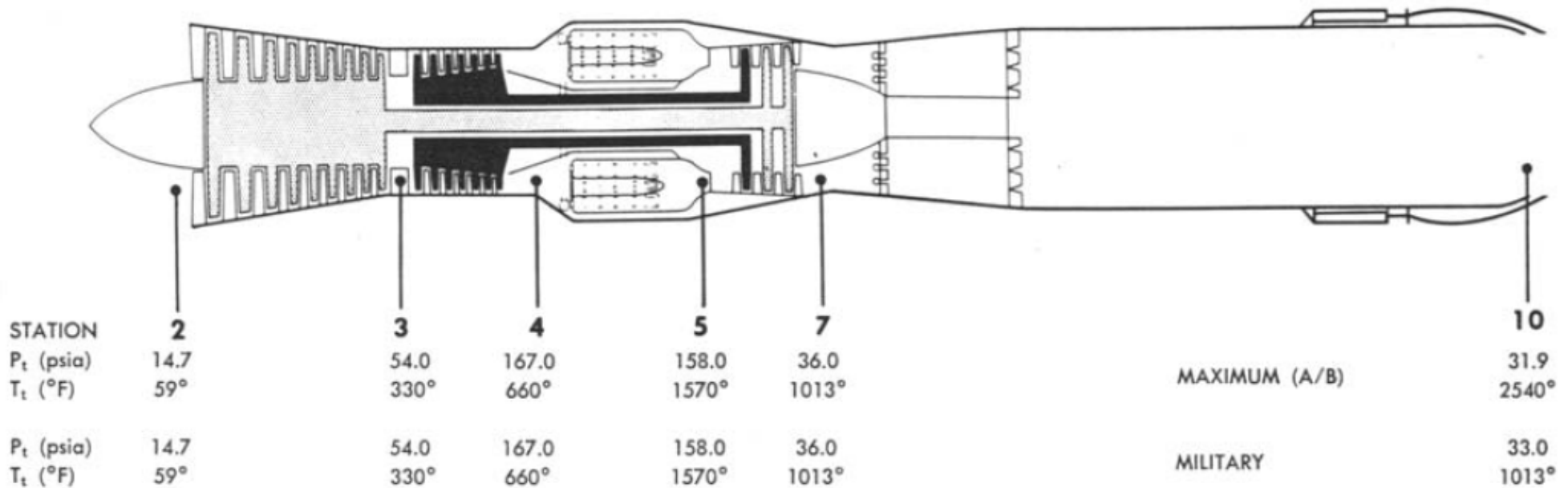
TYPICAL SINGLE-SPOOL AXIAL FLOW TURBO-JET ENGINE

Turbojato com afterburner (aplicações militares)

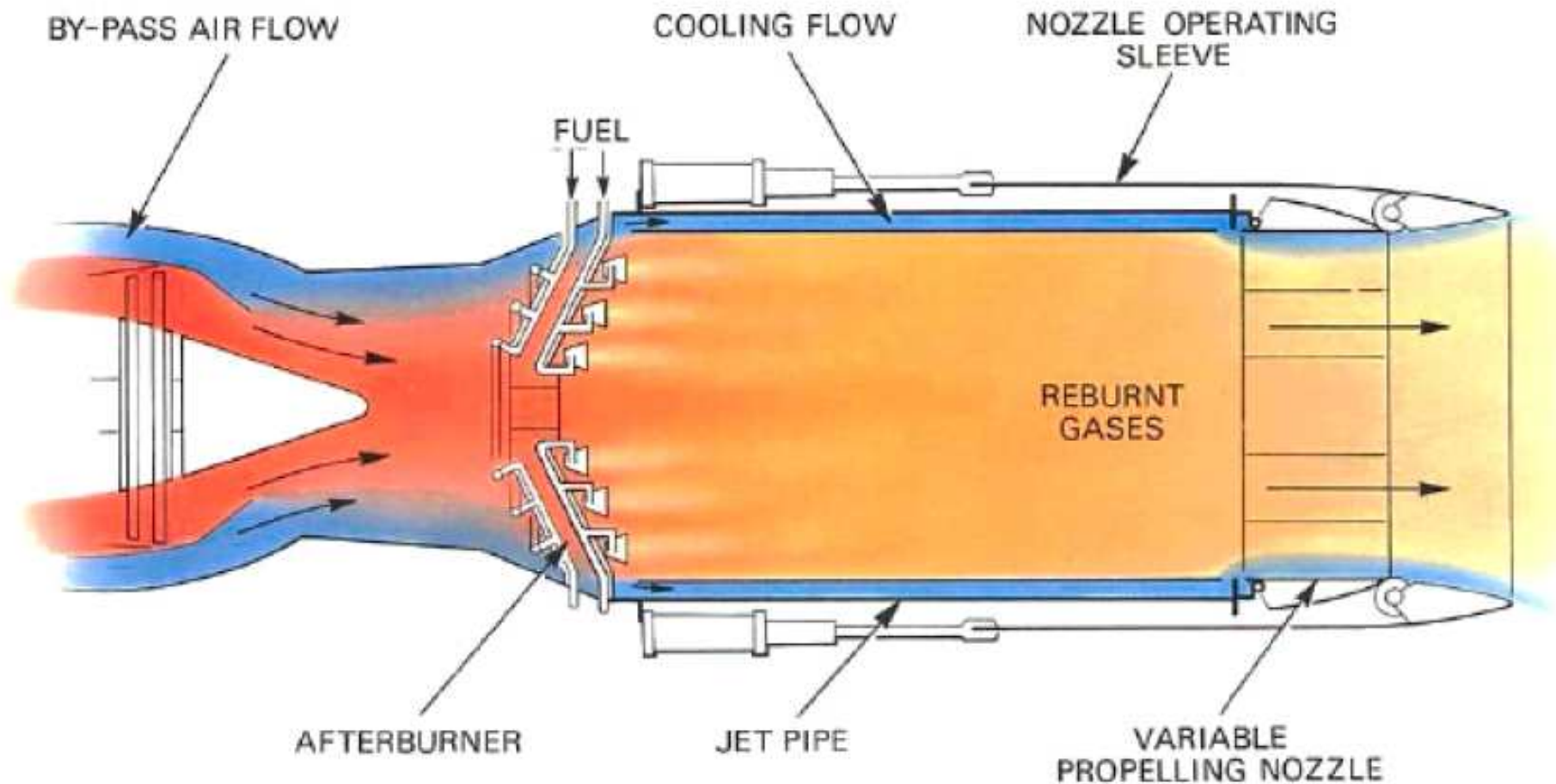


Turbojato com afterburner (aplicações militares)

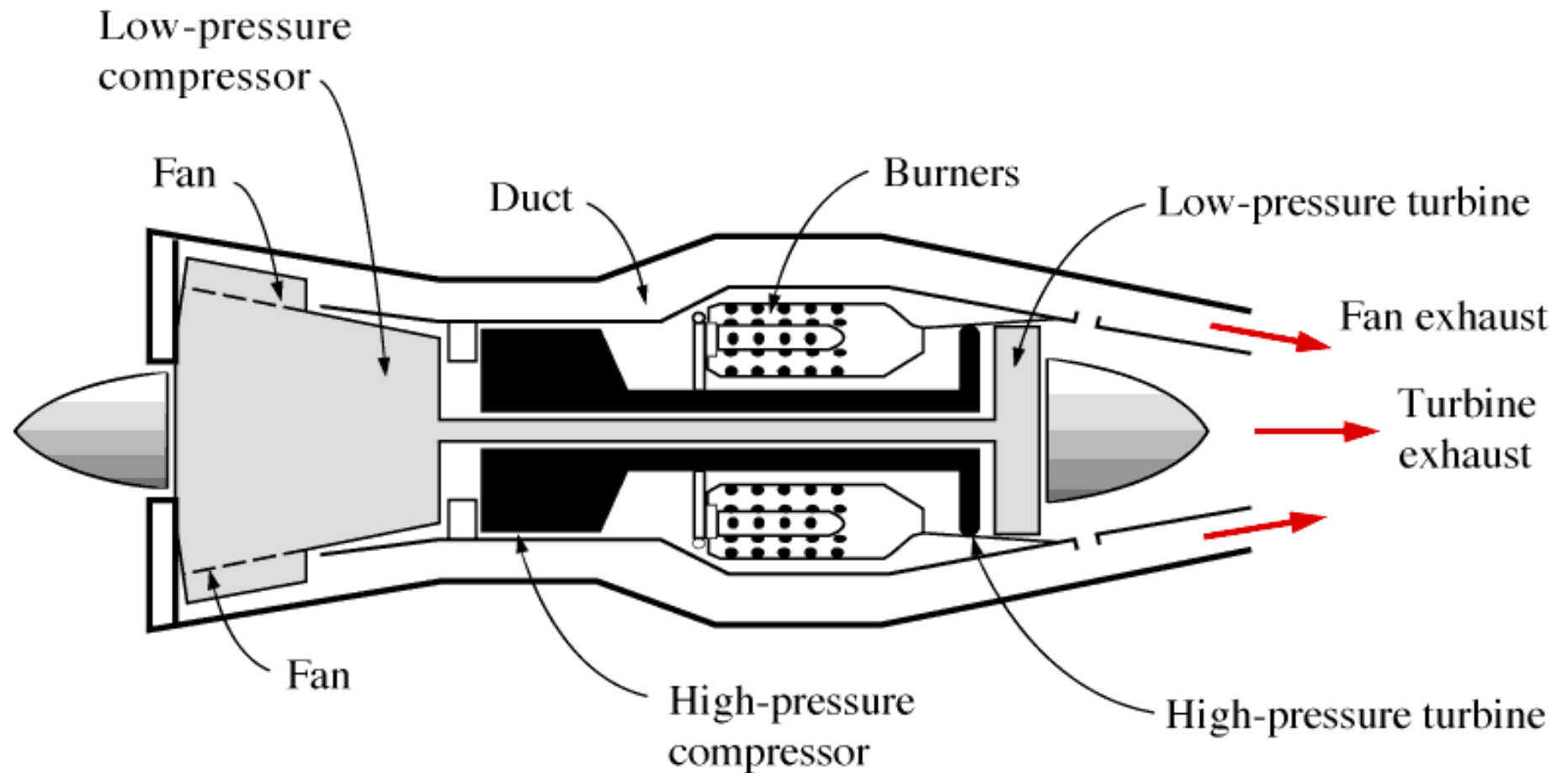
J57 "B" SERIES AFTERBURNING MILITARY TURBOJET
SEA LEVEL STATIC INTERNAL PRESSURES AND TEMPERATURES
(TYPICAL)



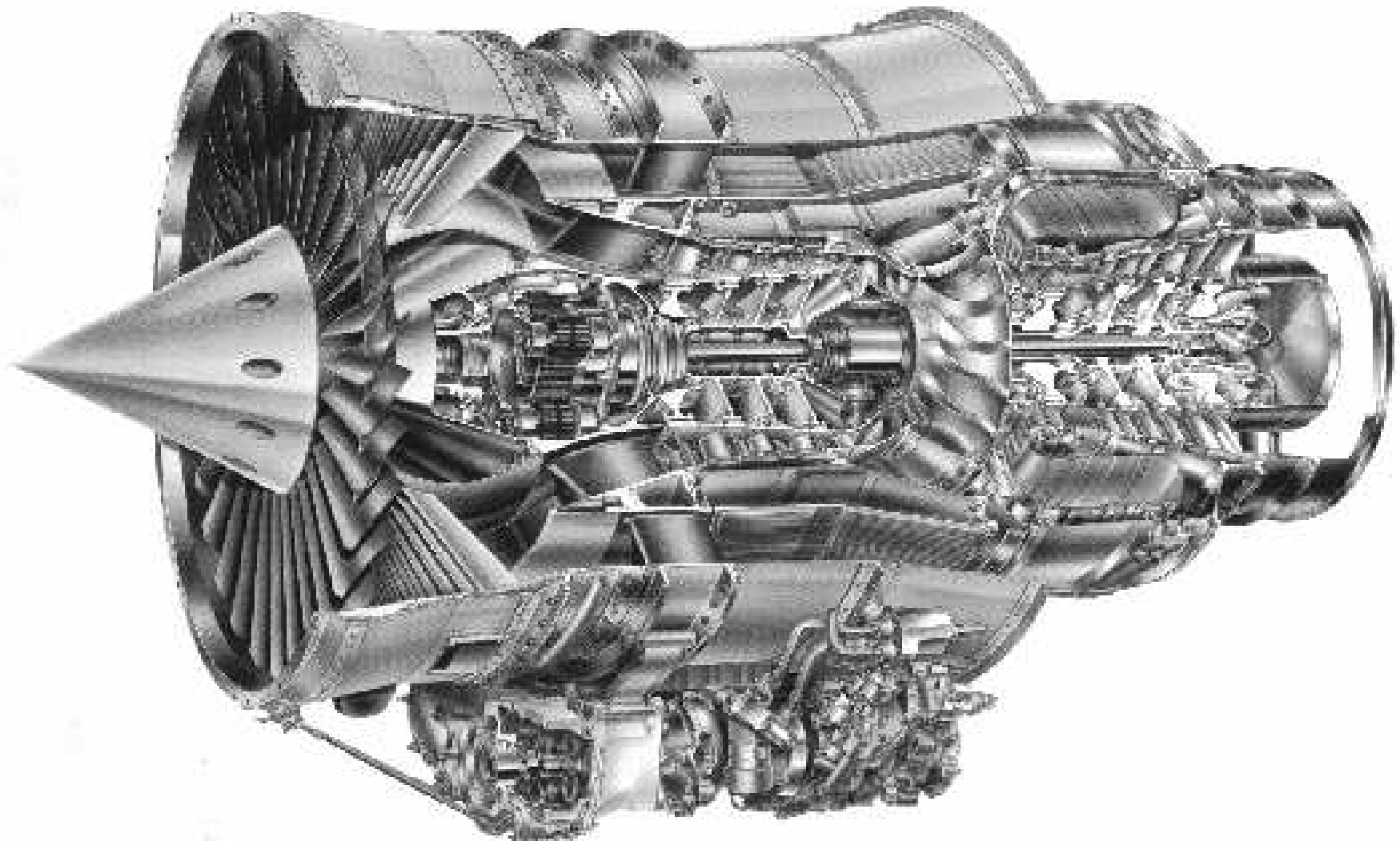
Turbojato com afterburner (aplicações militares)



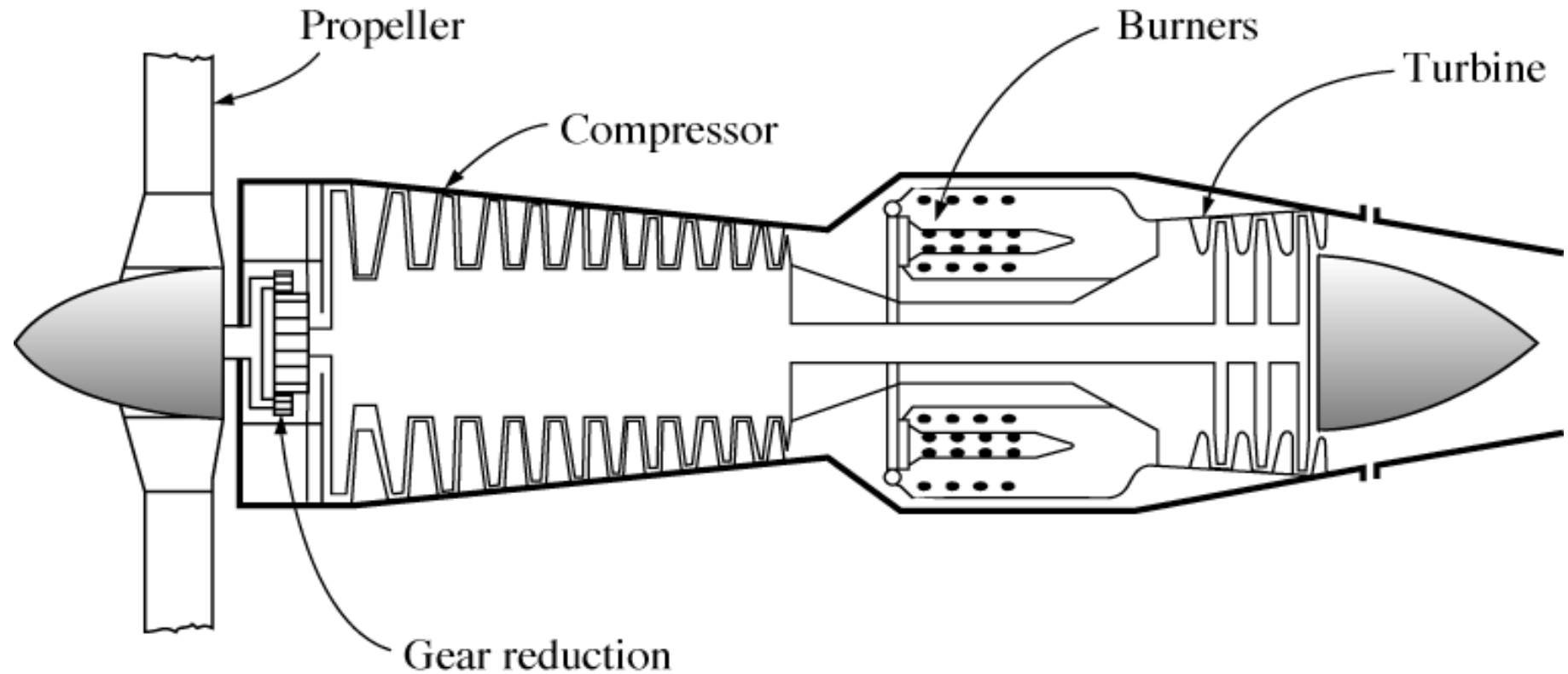
Turbofan



Turbofan



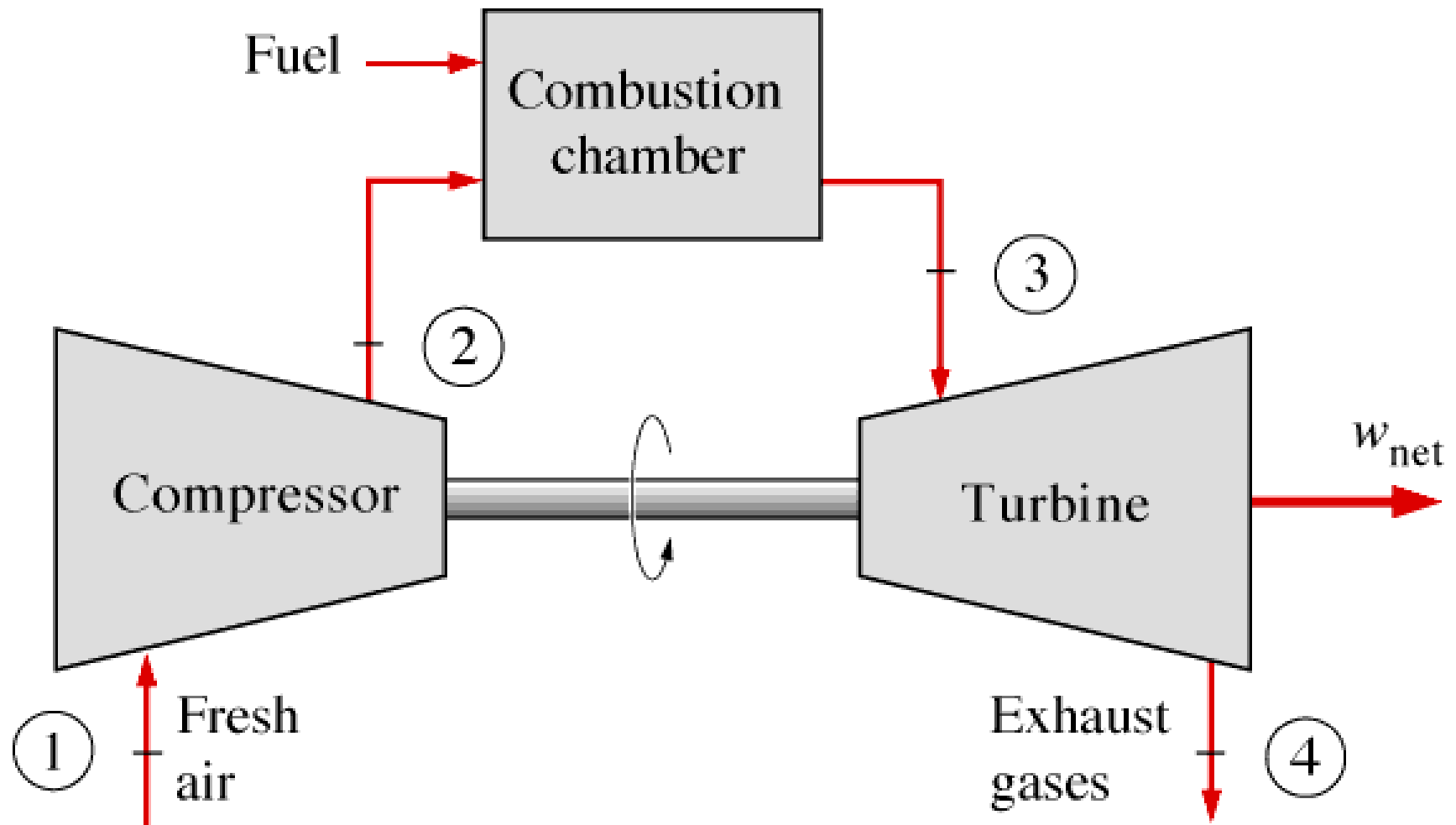
Turbopropulsor



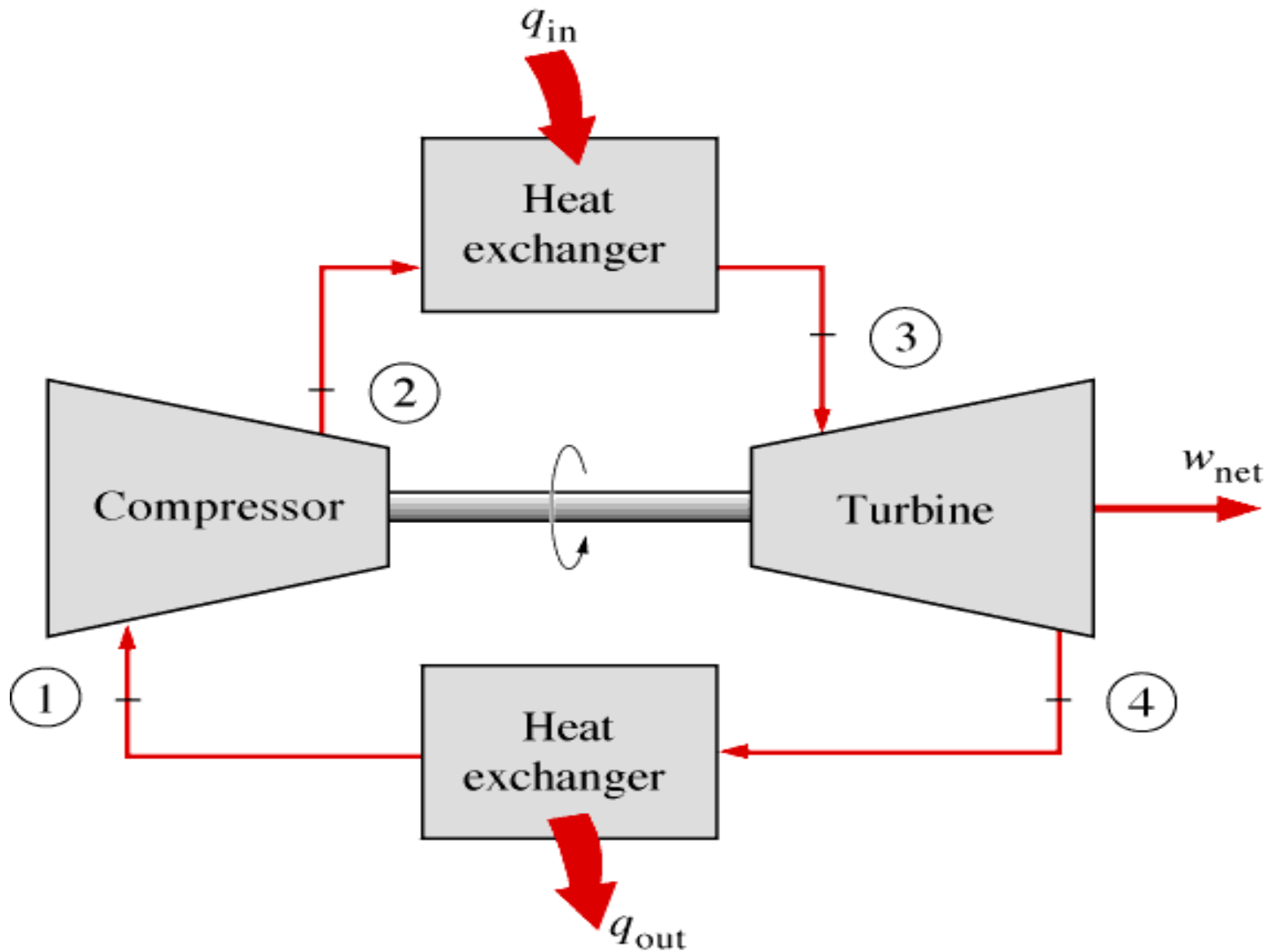
Outras aplicações do ciclo Brayton

- **Geração de potência elétrica: o uso de turbinas a gás é muito eficiente**
- **Engenharia naval (grandes embarcações)**

Um ciclo aberto com turbina a gás



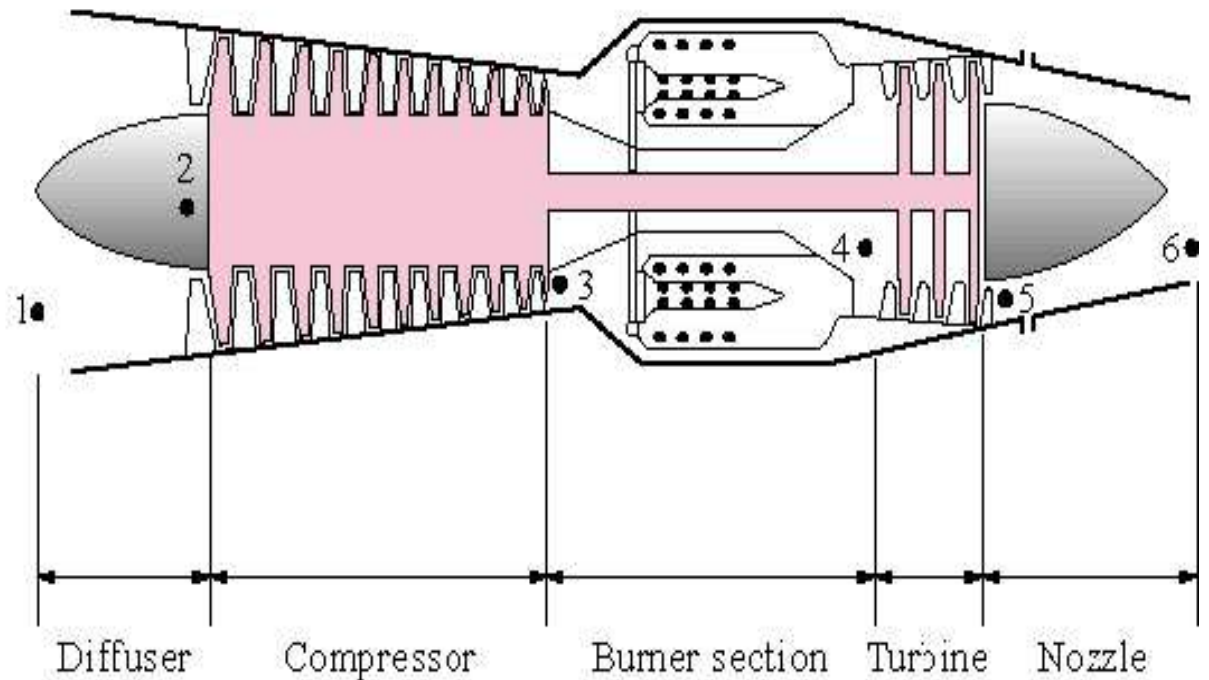
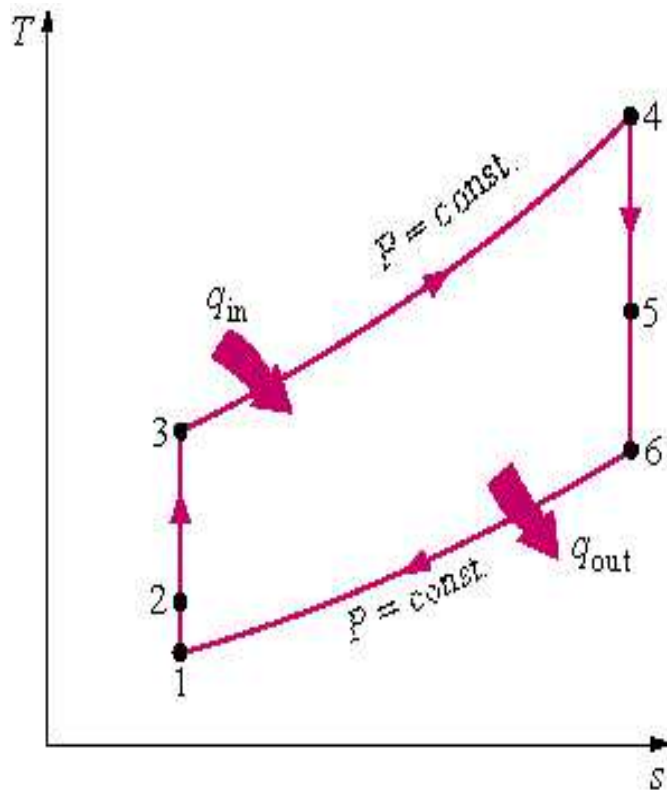
Um ciclo fechado com turbina a gás



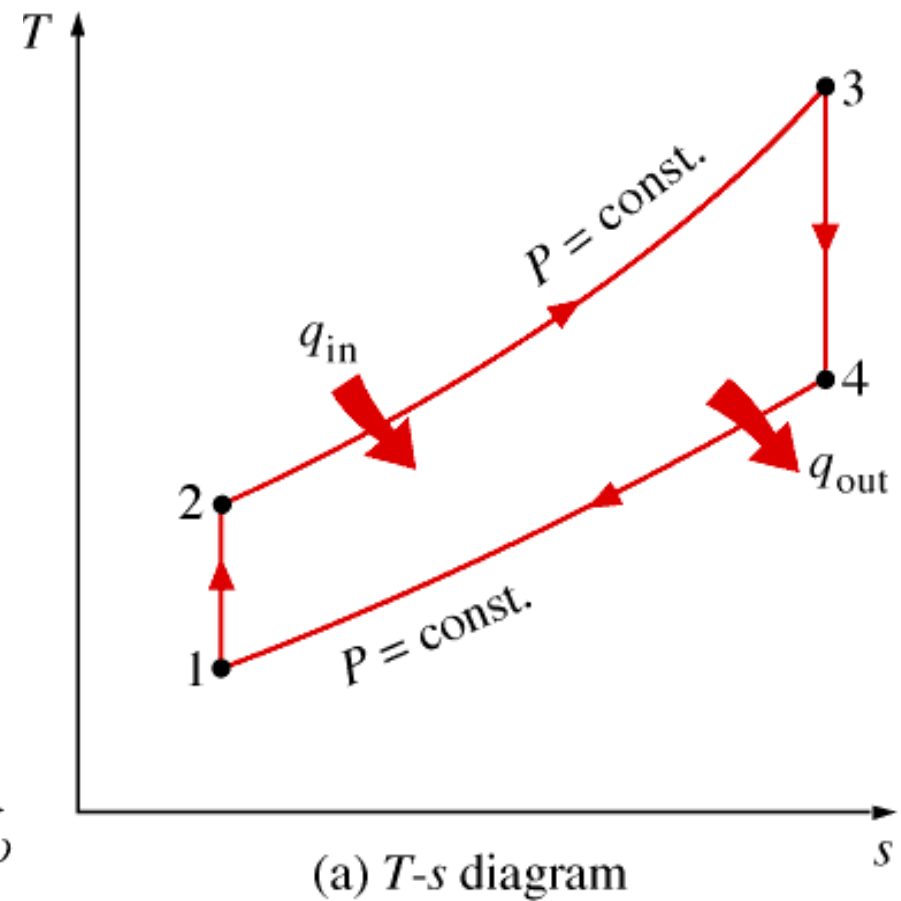
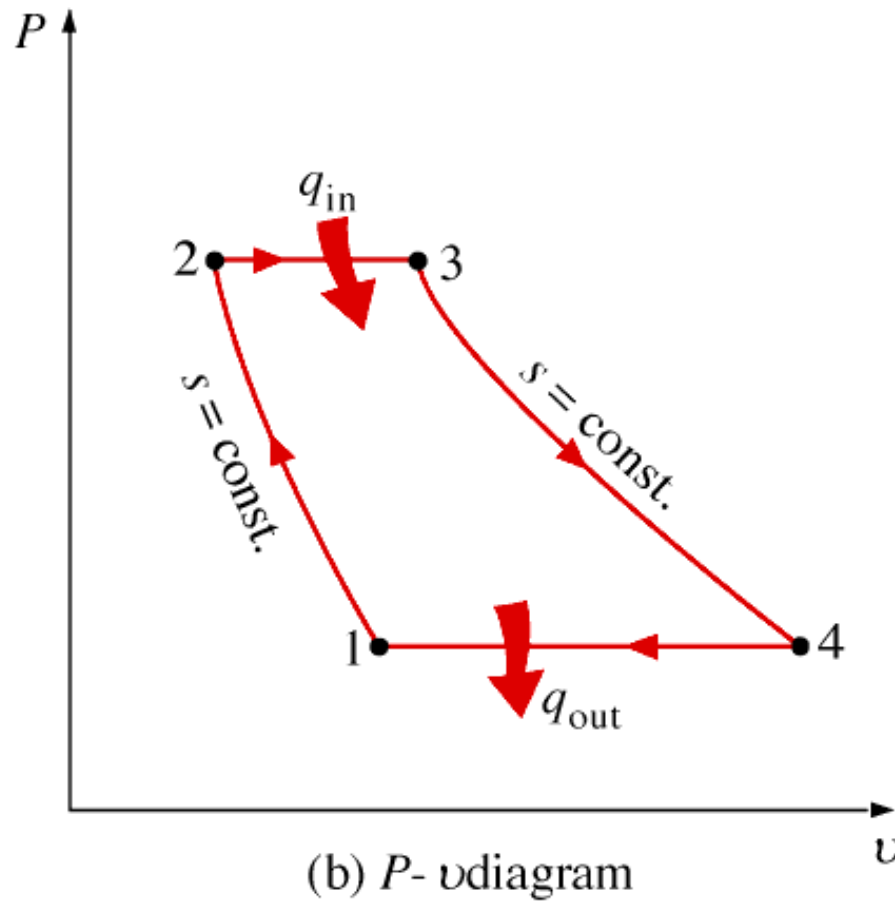
Ciclo Brayton

- **Modelo para aplicações de turbinas a gás**
- **4 processos internamente reversíveis:**
 - **Compressão isentrópica**
 - **Adição de calor a pressão constante**
 - **Expansão isentrópica**
 - **Rejeição de calor a pressão constante**

Diagrama T-s para o ciclo ideal de um turbojato



Diagramas P-v e T-s para um ciclo Brayton ideal



Ciclo Brayton

- **1 a 2** compressão isentrópica em um compressor
- **2 a 3** adição de calor a pressão constante
- **3 a 4** expansão isentrópica em uma turbina
- **4 a 1** rejeição de calor a pressão constante

Ciclo Brayton

- O ciclo Brayton opera entre 2 linhas de pressão constante (isobáricas), logo a razão das pressões é importante
- A razão das pressões não é a taxa de compressão

Análise do ciclo Brayton

Hipótese de ar frio:

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

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

Análise do ciclo Brayton

Utilizando as relações isentrópicas:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} ; \quad \frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

E definindo:

$$r_p = \textit{pressure ratio} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_4}$$

Ciclo Brayton

- O importante aqui é a razão entre as pressões
- A razão entre as pressões é apenas... uma razão entre as pressões
- A taxa de compressão é uma taxa de volumes (ciclo Otto).

Ciclo Brayton

- Razão entre as pressões

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)_s = \frac{P_{r_2}}{P_{r_1}}$$

- e

$$\frac{P_3}{P_4} = \left(\frac{P_3}{P_4} \right)_s = \frac{P_{r_3}}{P_{r_4}} = \frac{P_2}{P_1}$$

Análise do ciclo Brayton

Podemos relacionar a razão de temperaturas à razão de pressões:

$$\frac{T_2}{T_1} = r_p^{(k-1)/k} = \frac{T_3}{T_4}$$

E a eficiência torna-se:

$$\eta_{th, Brayton} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}}$$

Ciclo Brayton ideal

O que esta expressão assume?

$$\eta_{th, Brayton} = 1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}}$$

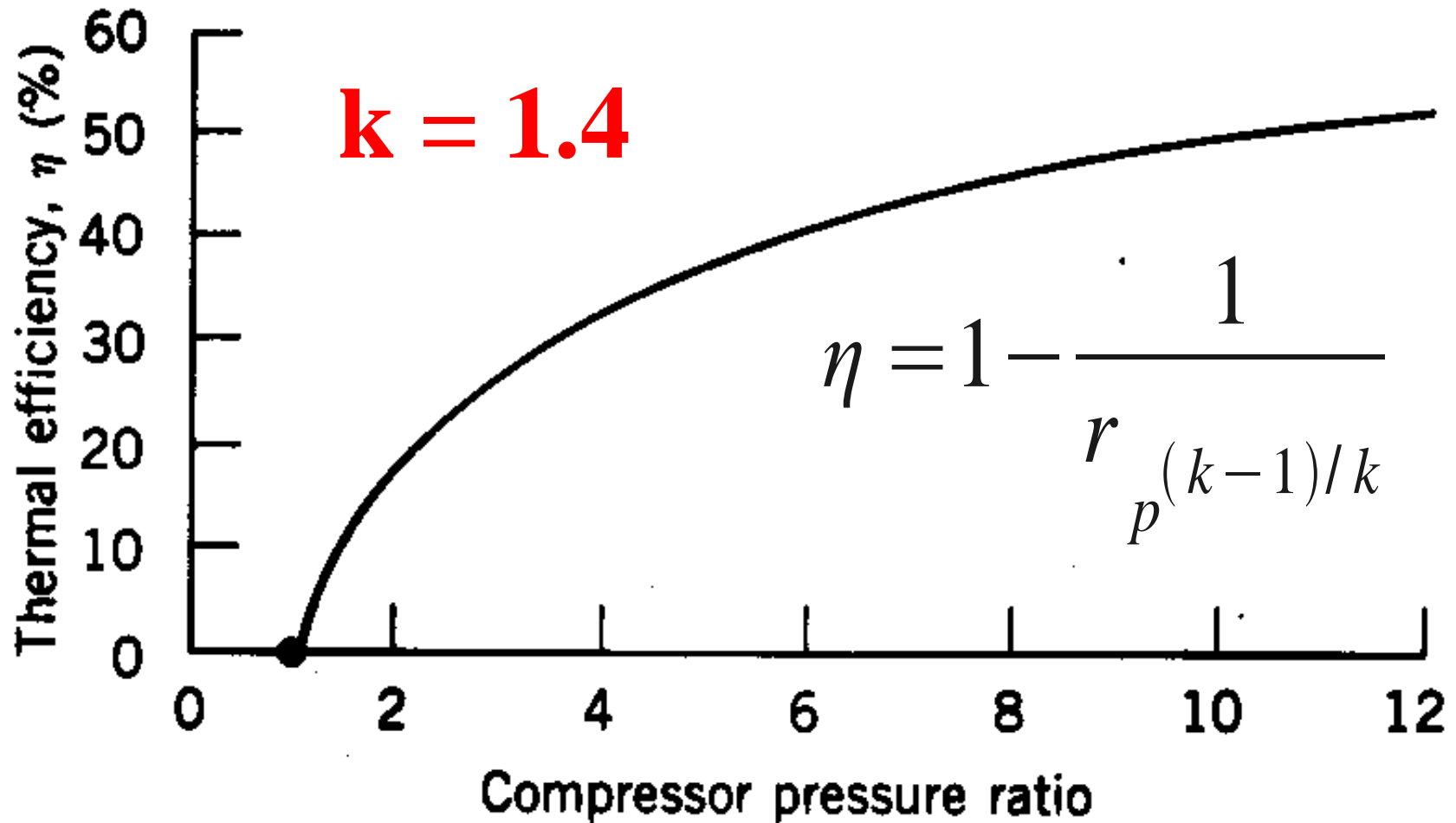
Eficiência térmica do ciclo Brayton

- Com a **hipótese de ar frio**:

$$\eta_{th, Brayton} = 1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}}$$

onde $r_p = P_{max}/P_{min}$ é a razão de pressões e k é a razão de calores específicos. A eficiência térmica de um ciclo Brayton simples aumenta com a razão da pressões

Ciclo Brayton



Eficiência térmica de um ciclo Brayton ideal

