Física do calor

F.S. Navarra

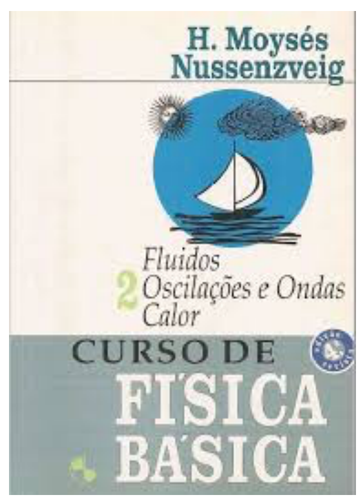
navarra@if.usp.br

edisciplinas.if.usp.br

Roy Lichtenstein

Capítulo 10

Segunda Lei da Termodinâmica



1ª Lei da Termodinâmica

Conservação da energia

$$Q = \Delta U + W_{i \to f}$$

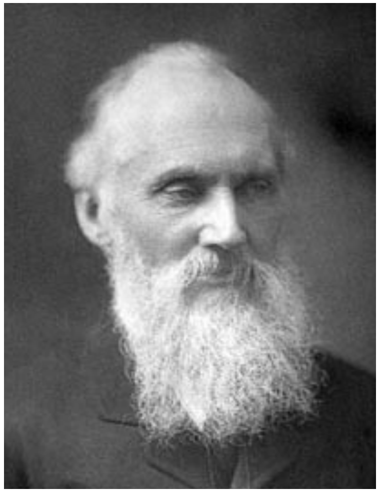
Todos os processos "lentos" seriam reversíveis !

Na vida real nunca vemos
"o filme passar de trás para diante"

Existe uma "flecha do tempo"

Essa história começa no século XIX...

R. Clausius



Lord Kelvin

N. Sadi Carnot

Teoria da máquina a vapor

2ª Lei: enunciado de Kelvin

(K): *É impossível realizar um processo cujo único efeito seja remover calor de um reservatório térmico e produzir uma quantidade equivalente de trabalho.*

(num ciclo)

2ª Lei: enunciado de Clausius

(C) *É impossível realizar um processo cujo único efeito seja transferir calor de um corpo mais frio para um corpo mais quente.*

$$Q_1 = W + Q_2$$

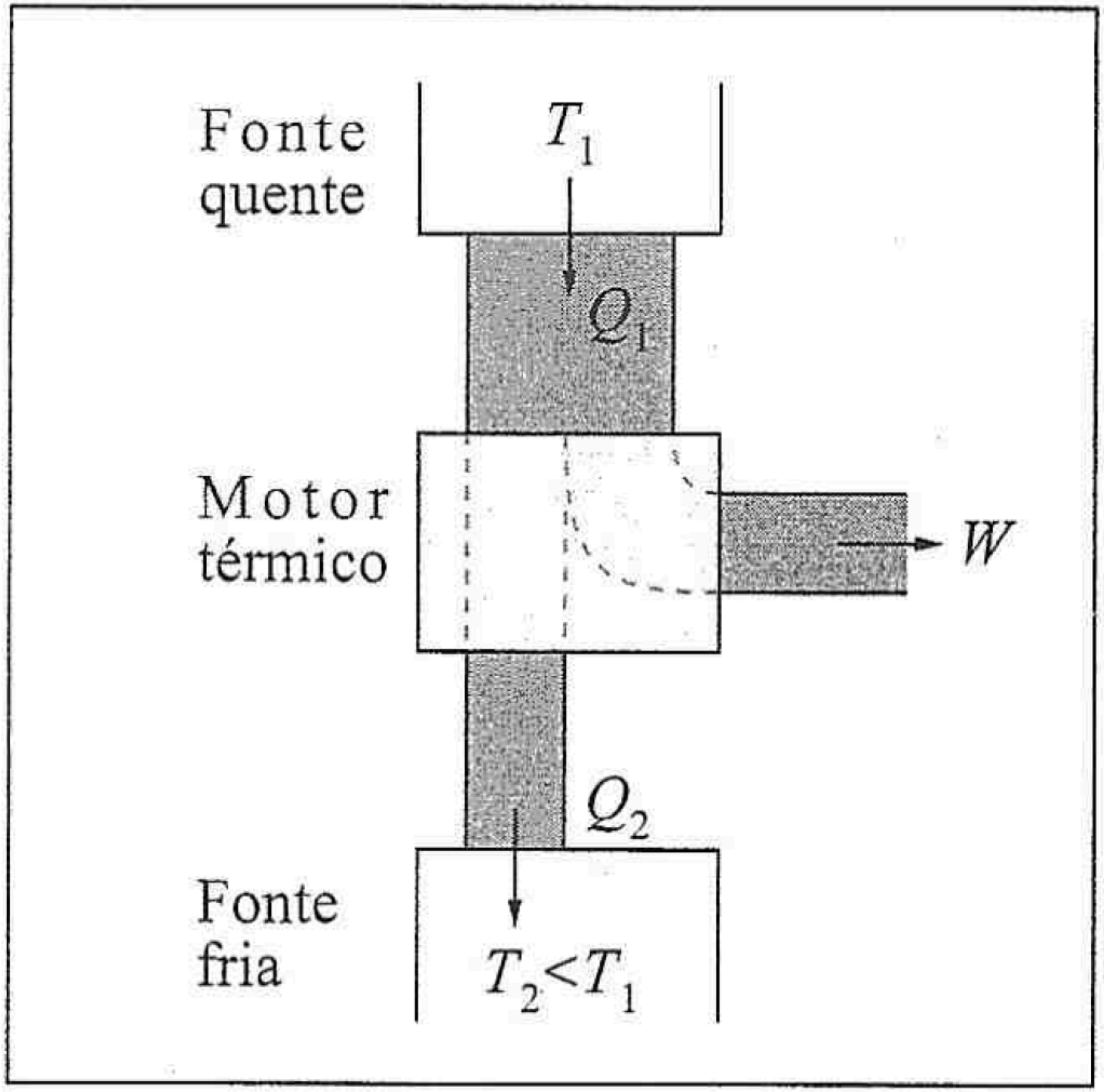


Figura 10.2 — Motor térmico

Q_1 e Q_2 são positivos

O "investimento" em energia térmica fornecida é representado por Q_1 (custo de carvão para aquecer a caldeira da máquina a vapor, por exemplo). O "trabalho útil" fornecido é W. O calor Q_2 é um "sub-produto" não aproveitado (na máquina a vapor, é dissipado na atmosfera ou na água de resfriamento do condensador). Logo, é natural definir o rendimento (ou eficiência) do motor térmico por

$$\boxed{\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{\text{Trabalho fornecido}}{\text{Calor consumido}}}$$

Qual é o rendimento máximo de um motor térmico ?

N. Sadi Carnot

Teorema de Carnot

"Nenhuma máquina térmica
que opere entre uma dada fonte quente
e uma dada fonte fria
pode ter um rendimento superior
ao de uma máquina de Carnot"

Todas as máquinas de Carnot
que operem entre essas duas
fontes terão o mesmo rendimento

N. Sadi Carnot

Notação

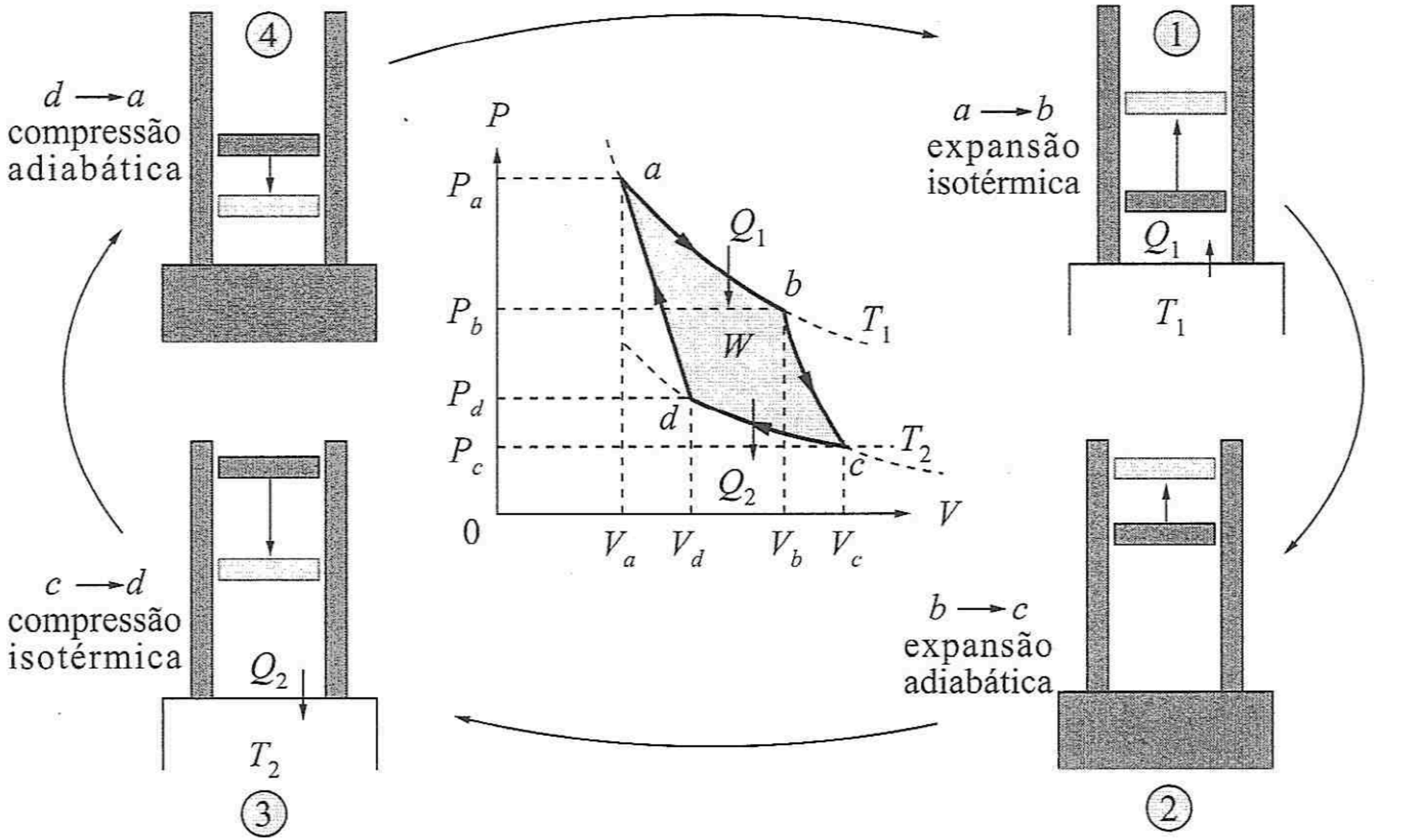
$$W = Q_1 - Q_2$$

Q_1 é recebido pelo sistema é positivo

Q_2 é liberado dos sistema é positivo
pois o sinal já foi levado em conta !

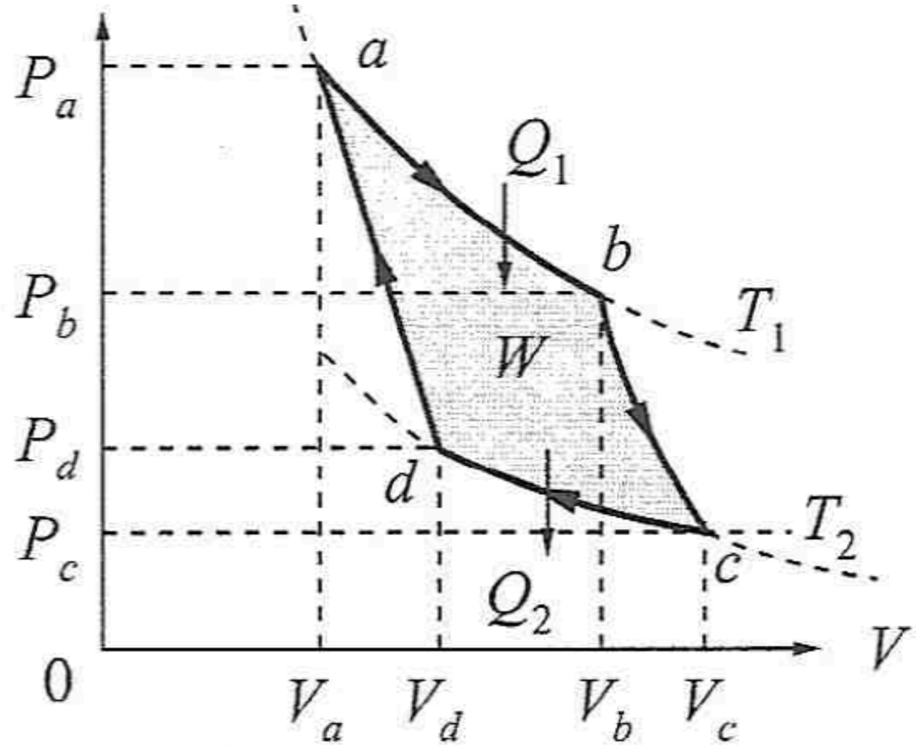
$$\eta = \frac{W}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

Ciclo de Carnot



Rendimento no Ciclo de Carnot

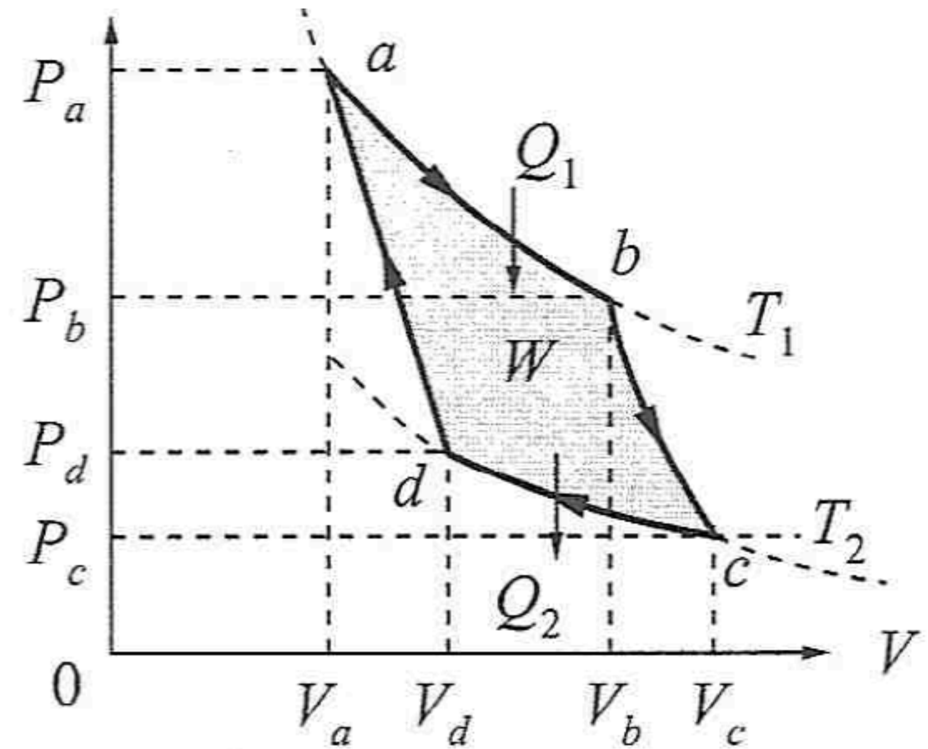
a -> b   (proc. isotérmico)



Rendimento no Ciclo de Carnot

a -> b (proc. isotérmico)

$$Q_1 = W_1 + \Delta U_1$$

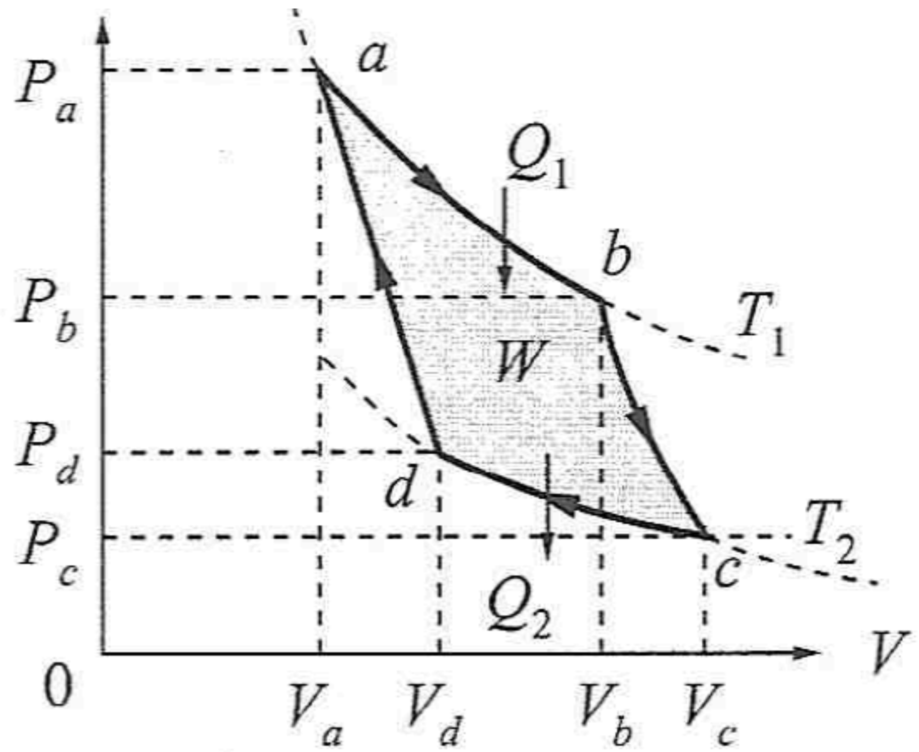


Rendimento no Ciclo de Carnot

a -> b (proc. isotérmico)

$$Q_1 = W_1 + \Delta U_1$$

$$T_1 = const \rightarrow \Delta U_1 = 0$$



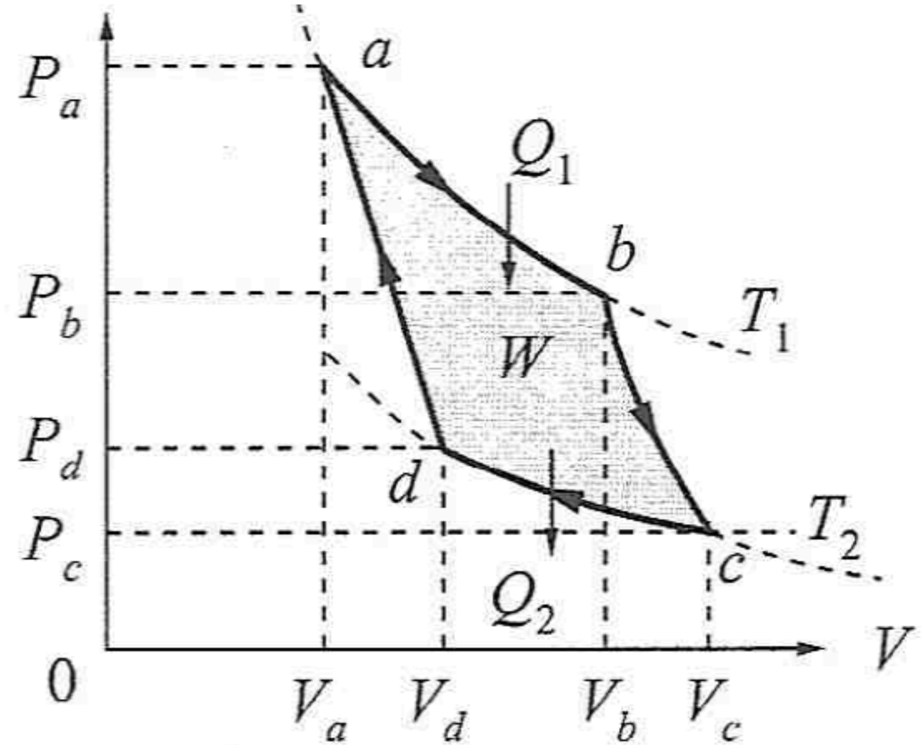
Rendimento no Ciclo de Carnot

a -> b (proc. isotérmico)

$$Q_1 = W_1 + \Delta U_1$$

$$T_1 = const \rightarrow \Delta U_1 = 0$$

$$Q_1 = W_1 = \int_{V_a}^{V_b} p\,dV$$



Rendimento no Ciclo de Carnot

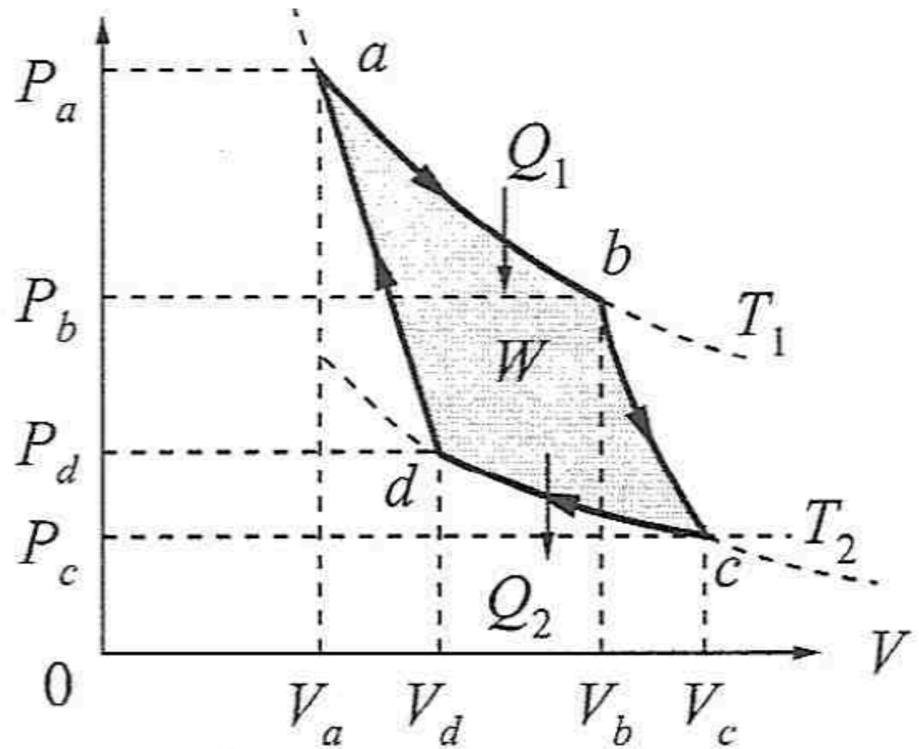
a -> b (proc. isotérmico)

$$Q_1 = W_1 + \Delta U_1$$

$$T_1 = const \rightarrow \Delta U_1 = 0$$

$$Q_1 = W_1 = \int_{V_a}^{V_b} p\, dV$$

$$= \int_{V_a}^{V_b} \frac{n\, R\, T_1}{V}\, dV$$



Rendimento no Ciclo de Carnot

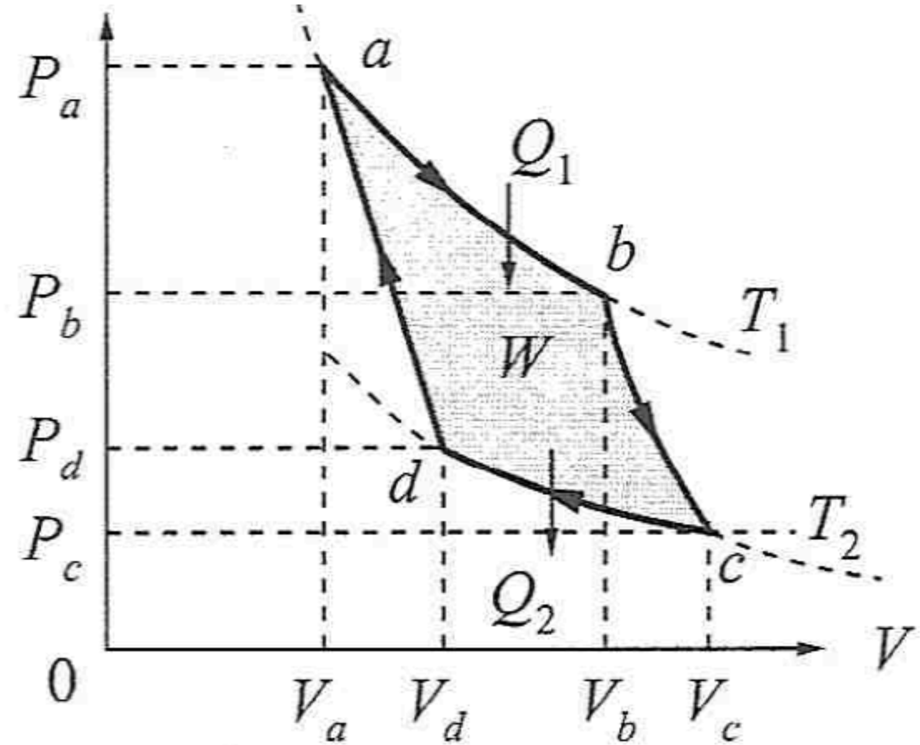
a -> b (proc. isotérmico)

$$Q_1 = W_1 + \Delta U_1$$

$$T_1 = const \rightarrow \Delta U_1 = 0$$

$$Q_1 = W_1 = \int_{V_a}^{V_b} p\, dV$$

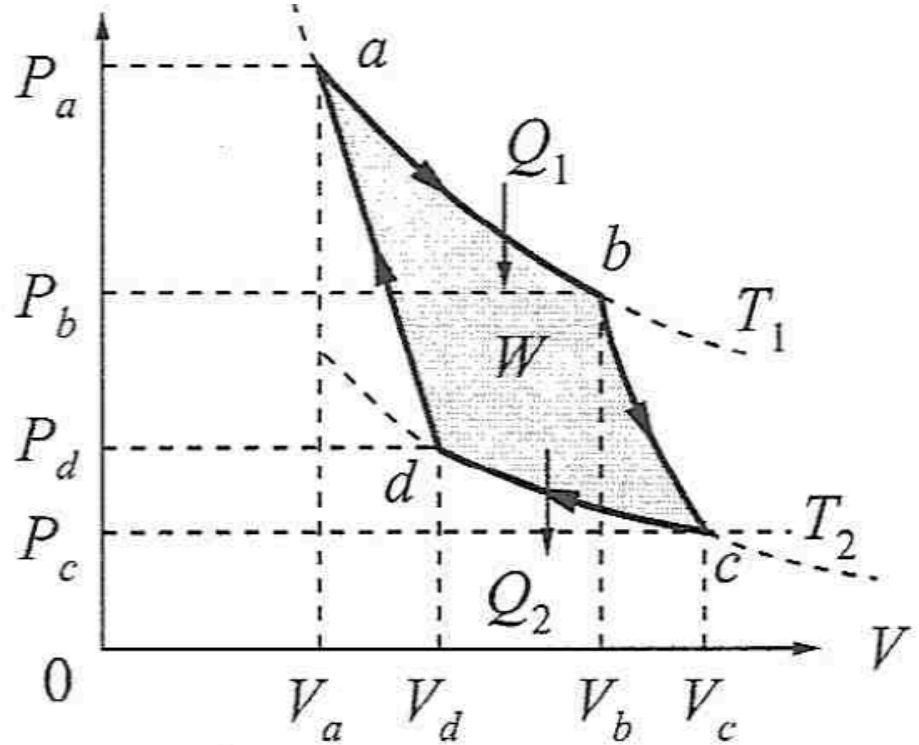
$$= \int_{V_a}^{V_b} \frac{n\, R\, T_1}{V}\, dV$$



$$\boxed{Q_1 = n\, R\, T_1\, ln \frac{V_b}{V_a}}$$

Rendimento no Ciclo de Carnot

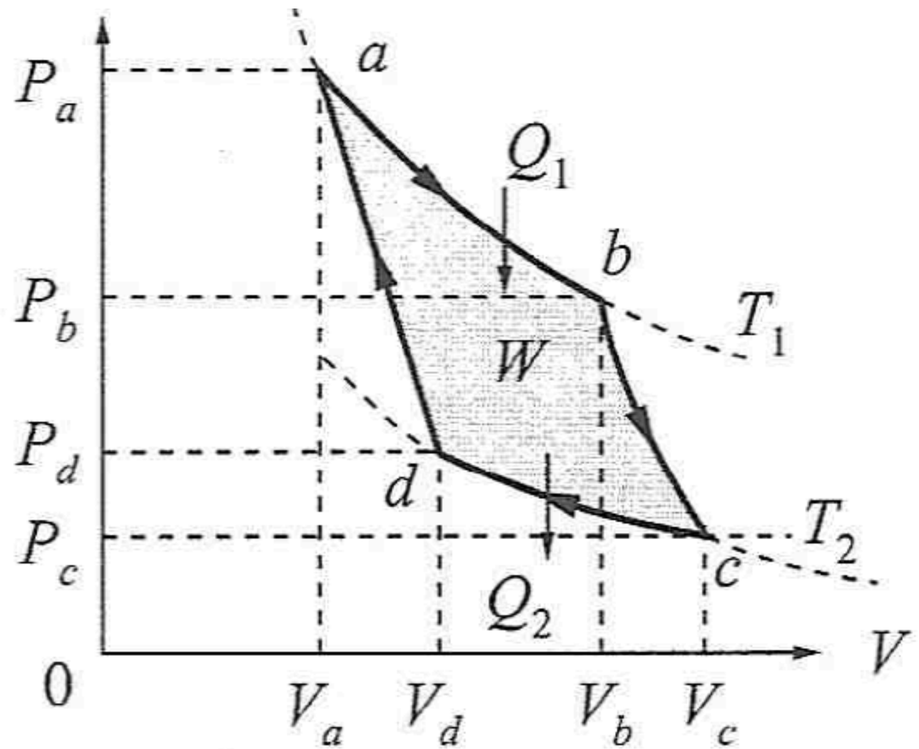
b -> c   (proc. adiabático)



Rendimento no Ciclo de Carnot

b -> c (proc. adiabático)

$$Q_{bc} = W_{bc} + \Delta U_{bc}$$

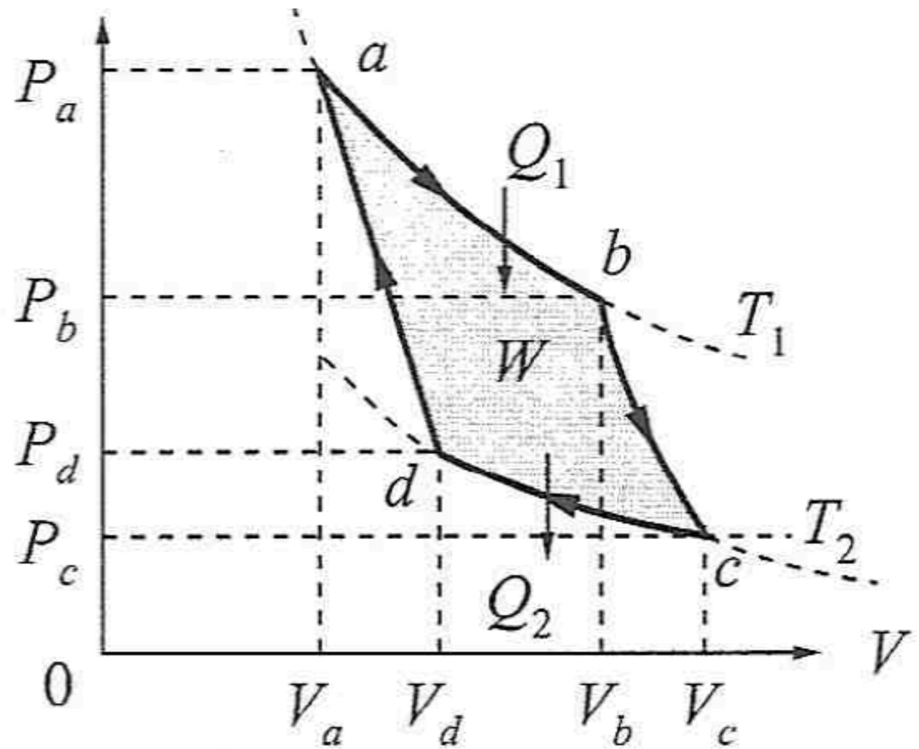


Rendimento no Ciclo de Carnot

b -> c (proc. adiabático)

$$Q_{bc} = W_{bc} + \Delta U_{bc}$$

$$Q_{bc} = 0 \rightarrow W_{bc} = -\Delta U_{bc}$$



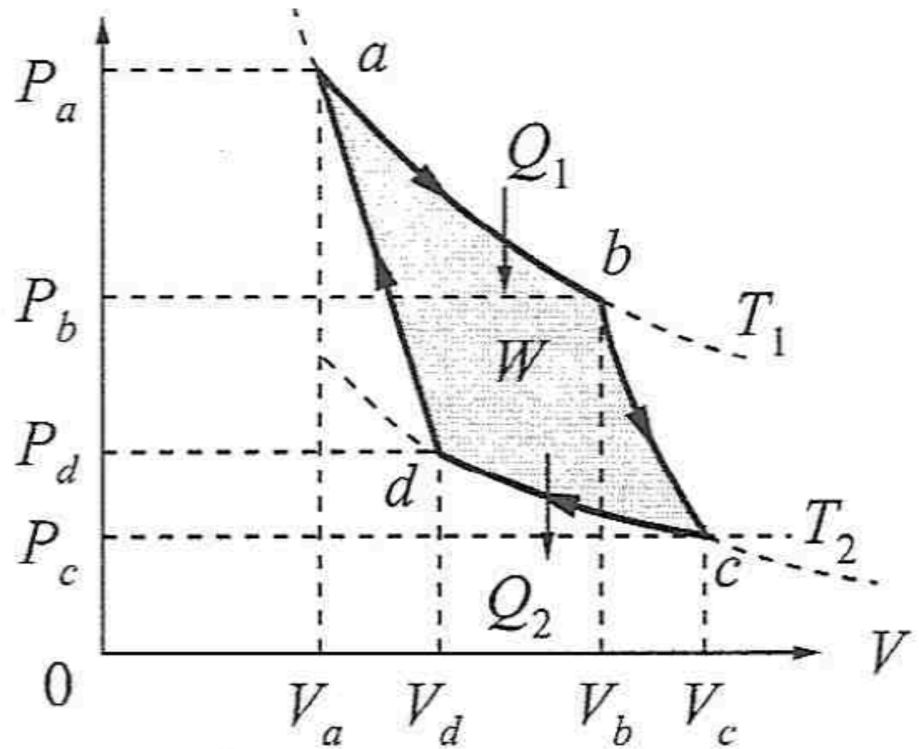
Rendimento no Ciclo de Carnot

b -> c (proc. adiabático)

$$Q_{bc} = W_{bc} + \Delta U_{bc}$$

$$Q_{bc} = 0 \rightarrow W_{bc} = -\Delta U_{bc}$$

$$W_{bc} = \int_{V_b}^{V_c} p\,dV$$



Rendimento no Ciclo de Carnot

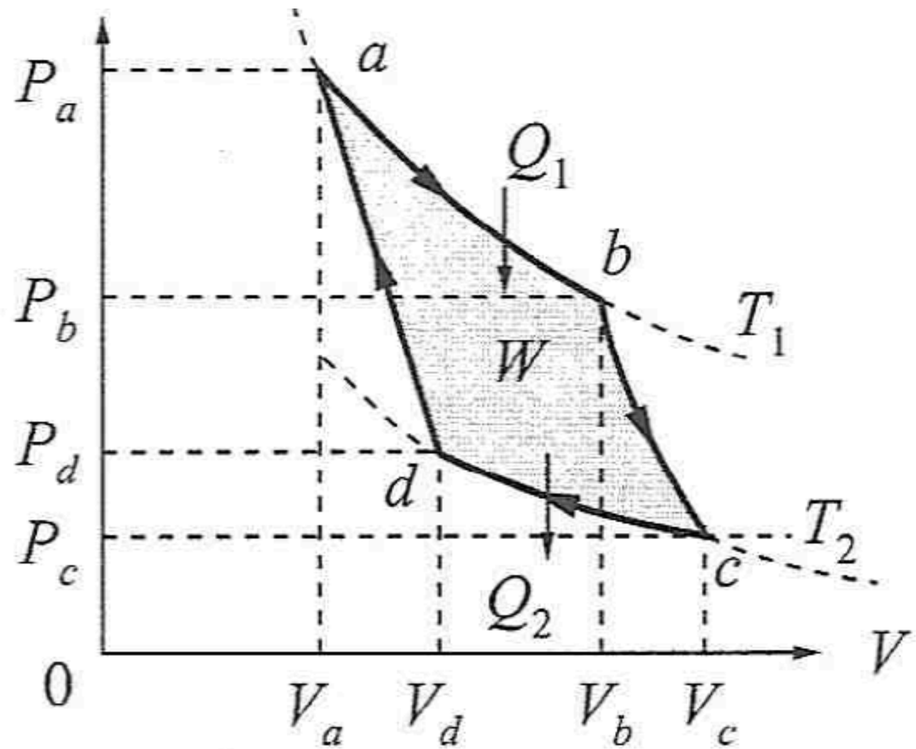
b -> c (proc. adiabático)

$$Q_{bc} = W_{bc} + \Delta U_{bc}$$

$$Q_{bc} = 0 \rightarrow W_{bc} = -\Delta U_{bc}$$

$$W_{bc} = \int_{V_b}^{V_c} p\, dV$$

$$p = \frac{p_0\, V_0^{\gamma}}{V^{\gamma}}$$

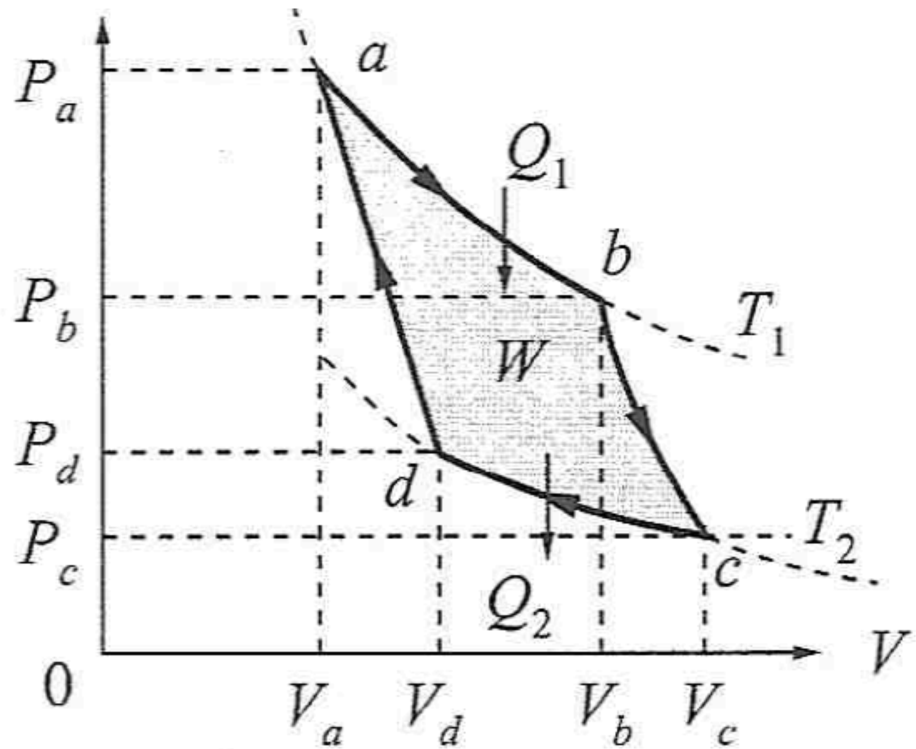


Rendimento no Ciclo de Carnot

b -> c (proc. adiabático)

$$Q_{bc} = W_{bc} + \Delta U_{bc}$$

$$Q_{bc} = 0 \rightarrow W_{bc} = -\Delta U_{bc}$$



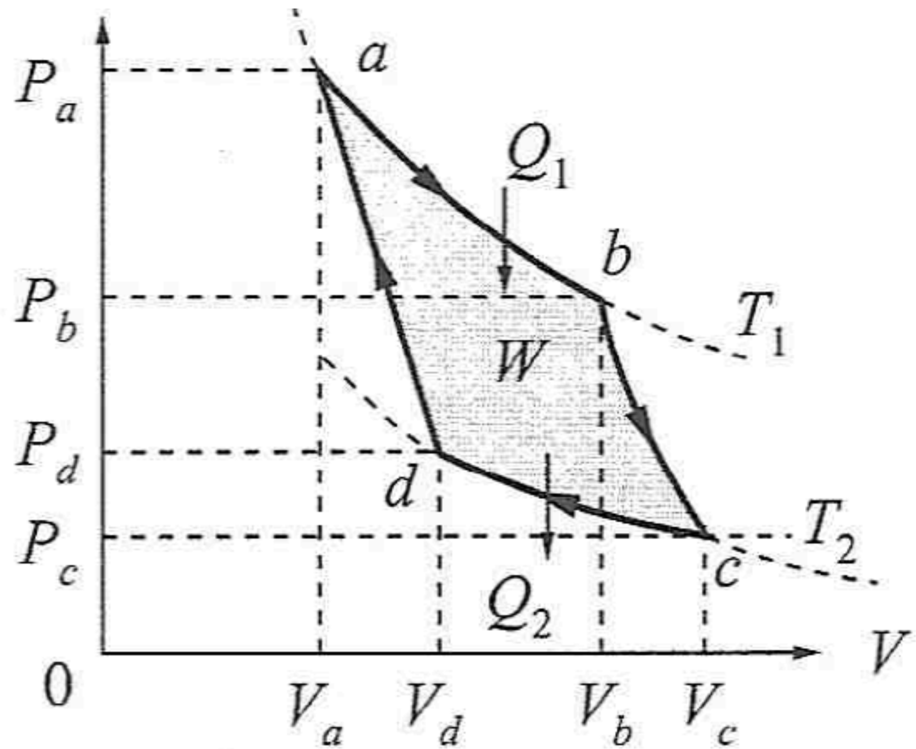
$$W_{bc} = \int_{V_b}^{V_c} p\, dV$$

$$p = \frac{p_0\, V_0^{\gamma}}{V^{\gamma}}$$

$$W_{bc} = \int_{V_b}^{V_c} \frac{p_b\, V_b^{\gamma}}{V^{\gamma}}\, dV$$

Rendimento no Ciclo de Carnot

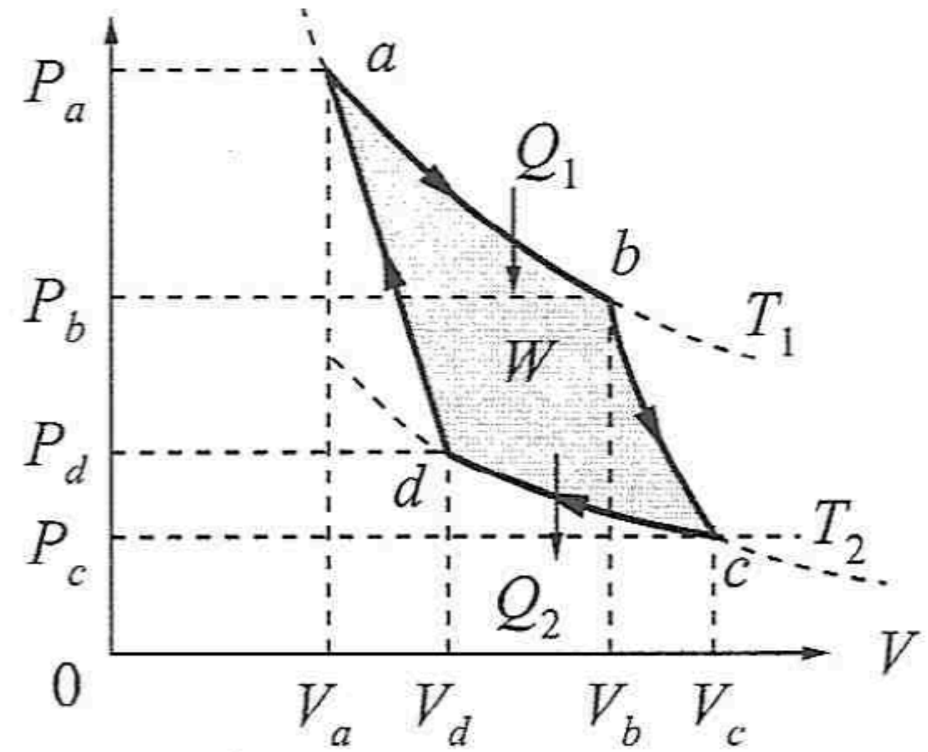
c -> d (proc. isotérmico)



Rendimento no Ciclo de Carnot

c -> d (proc. isotérmico)

$$Q_2 = W_2 + \Delta U_2$$

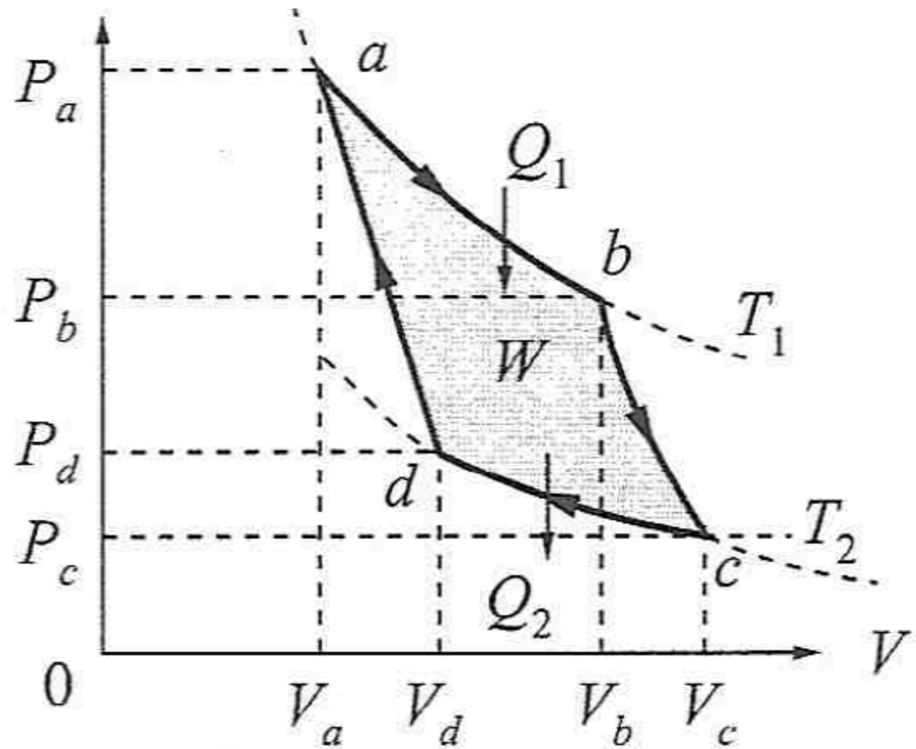


Rendimento no Ciclo de Carnot

c -> d (proc. isotérmico)

$$Q_2 = W_2 + \Delta U_2$$

$$T_2 = const \rightarrow \Delta U_2 = 0$$



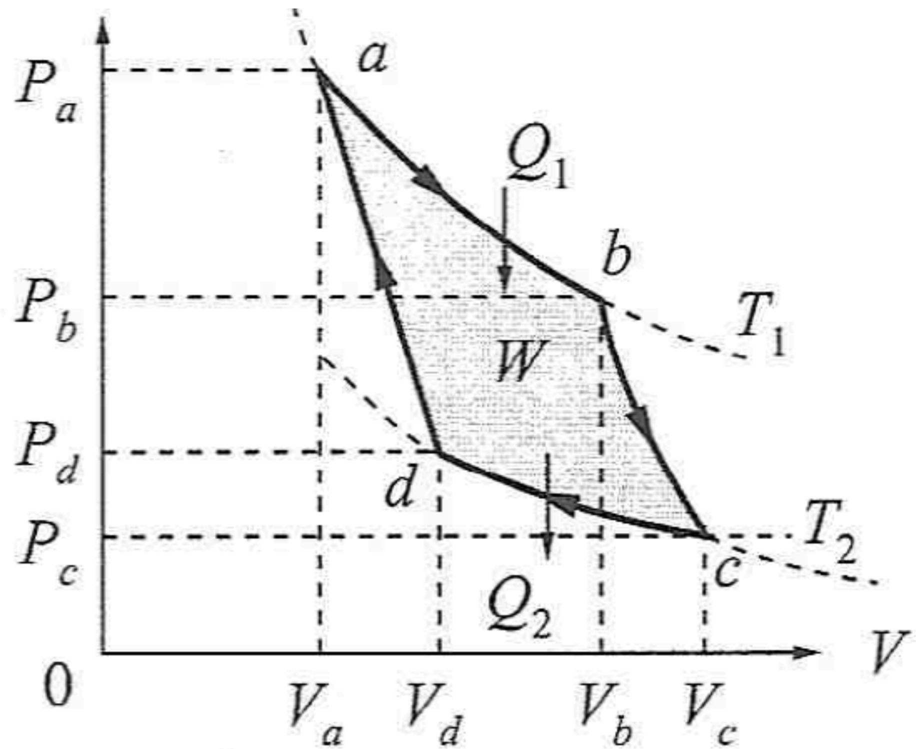
Rendimento no Ciclo de Carnot

c -> d (proc. isotérmico)

$$Q_2 = W_2 + \Delta U_2$$

$$T_2 = const \rightarrow \Delta U_2 = 0$$

$$Q_2 = W_2 = \int_{V_c}^{V_d} p\,dV$$



Rendimento no Ciclo de Carnot

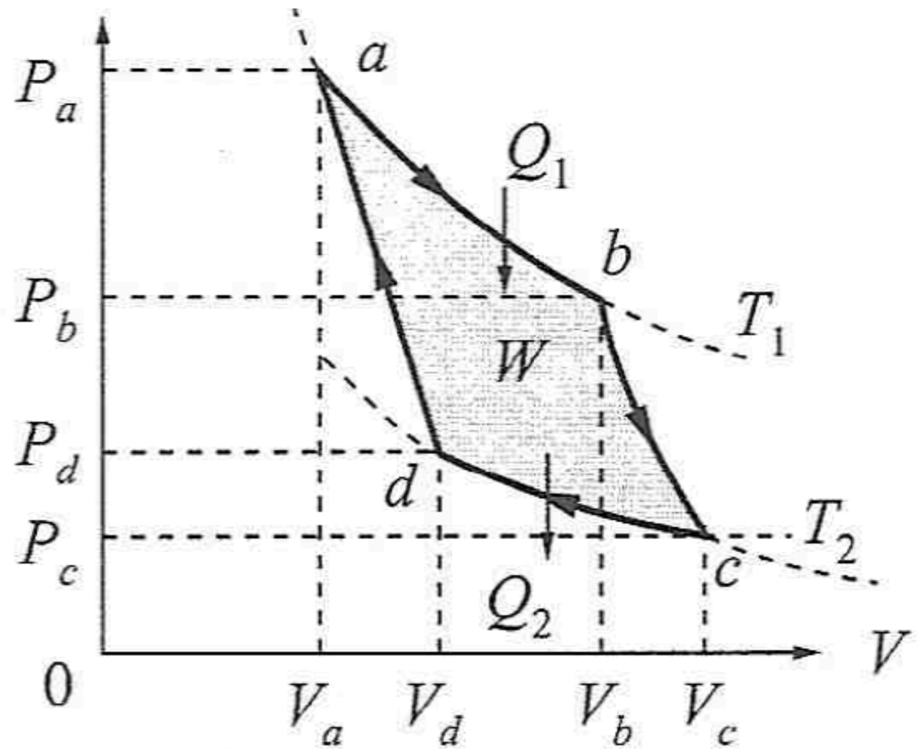
c -> d (proc. isotérmico)

$$Q_2 = W_2 + \Delta U_2$$

$$T_2 = const \rightarrow \Delta U_2 = 0$$

$$Q_2 = W_2 = \int_{V_c}^{V_d} p\, dV$$

$$= \int_{V_c}^{V_d} \frac{n\, R\, T_2}{V}\, dV$$



Rendimento no Ciclo de Carnot

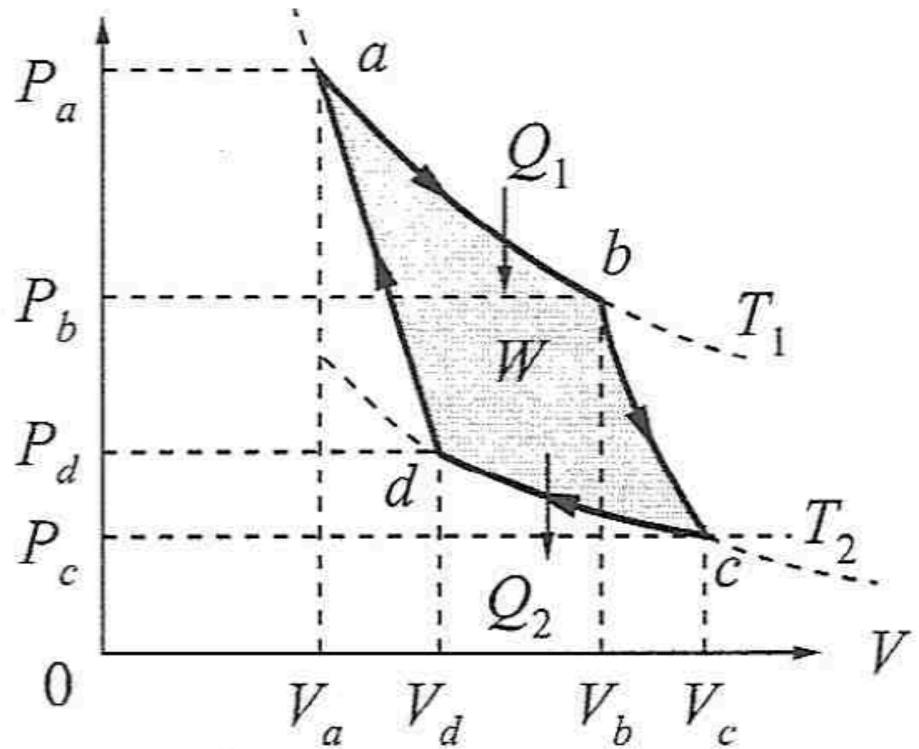
c -> d (proc. isotérmico)

$$Q_2 = W_2 + \Delta U_2$$

$$T_2 = const \rightarrow \Delta U_2 = 0$$

$$Q_2 = W_2 = \int_{V_c}^{V_d} p\, dV$$

$$= \int_{V_c}^{V_d} \frac{n R T_2}{V} dV$$



$$\boxed{Q_2 = n R T_2 \, ln \frac{V_d}{V_c}}$$

Em módulo:

$$Q_2 = n\,R\,T_2\,ln\frac{V_c}{V_d}$$

Gás ideal num processo adiabático

Gás ideal num processo adiabático

$$p\,V^{\gamma} = p_0\,V_0^{\gamma} = constante$$

Gás ideal num processo adiabático

$$pV^{\gamma} = p_0 V_0^{\gamma} = constante$$

$$pV = nRT$$

Gás ideal num processo adiabático

$$p\,V^{\gamma} = p_0\,V_0^{\gamma} = constante$$

$$p\,V = n\,R\,T \quad \longrightarrow \quad p = \frac{n\,R\,T}{V}$$

Gás ideal num processo adiabático

$$p\,V^{\gamma} = p_0\,V_0^{\gamma} = constante$$

$$p\,V = n\,R\,T \quad \longrightarrow \quad p = \frac{n\,R\,T}{V}$$

$$\frac{n\,R\,T}{V}\,V^{\gamma} = constante$$

Gás ideal num processo adiabático

$$p\,V^{\gamma} = p_0\,V_0^{\gamma} = constante$$

$$p\,V = n\,R\,T \longrightarrow p = \frac{n\,R\,T}{V}$$

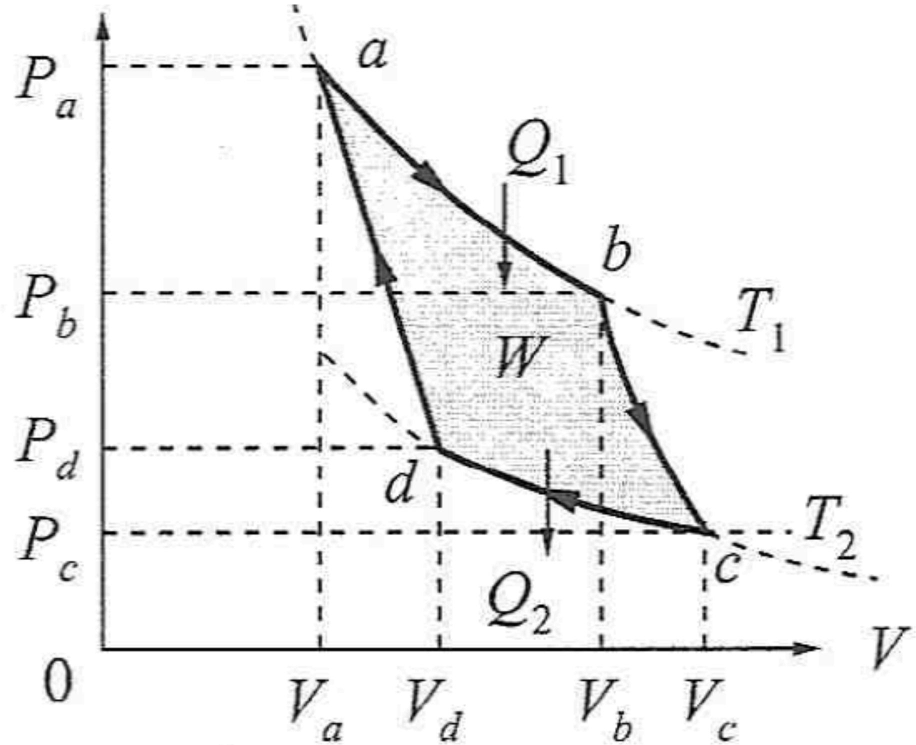
$$\frac{n\,R\,T}{V}\,V^{\gamma} = constante$$

$$\boxed{T\,V^{\gamma-1} = constante}$$

Rendimento no Ciclo de Carnot

b -> c (proc. adiabático)

d -> a (proc. adiabático)



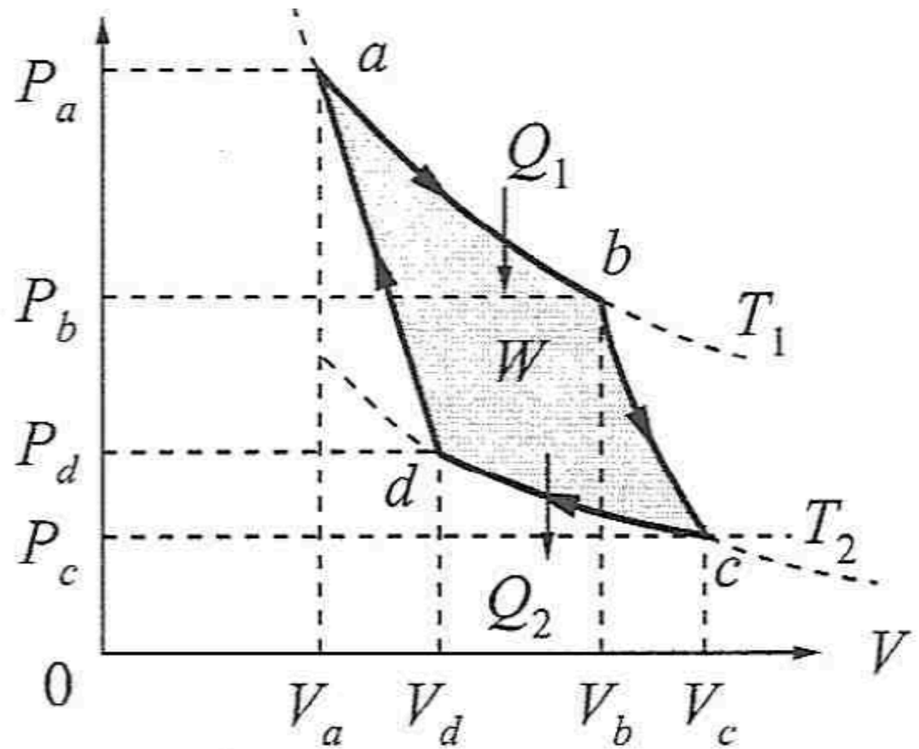
Rendimento no Ciclo de Carnot

b -> c (proc. adiabático)

d -> a (proc. adiabático)

$$V_b^{\gamma-1}T_1 = V_c^{\gamma-1}T_2$$

$$V_a^{\gamma-1}T_1 = V_d^{\gamma-1}T_2$$



Rendimento no Ciclo de Carnot

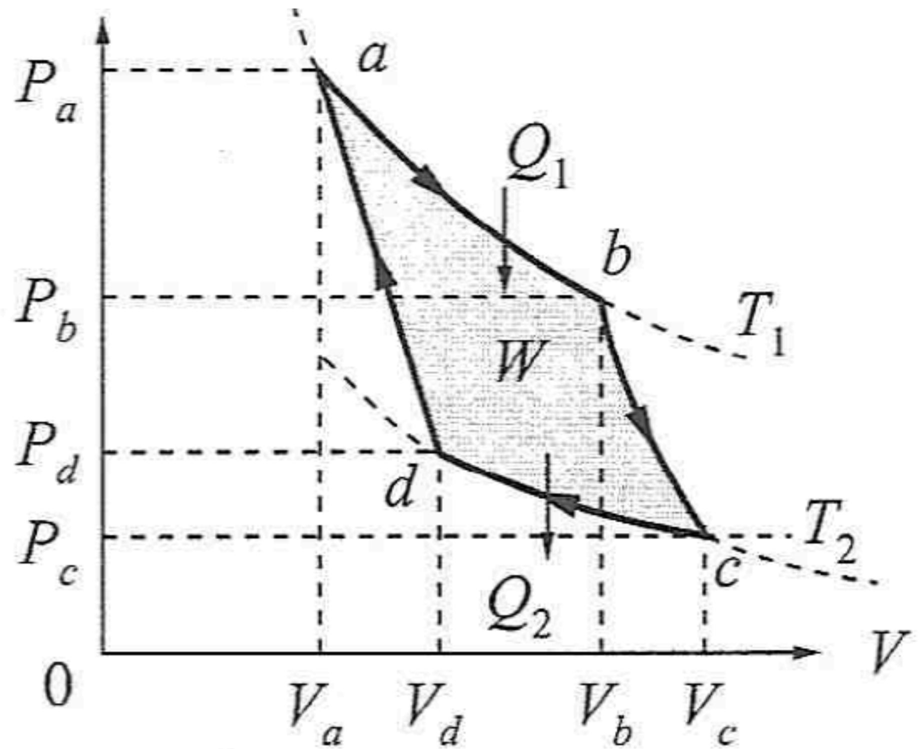
b -> c (proc. adiabático)

d -> a (proc. adiabático)

$$V_b^{\gamma-1}T_1 = V_c^{\gamma-1}T_2$$

$$V_a^{\gamma-1}T_1 = V_d^{\gamma-1}T_2$$

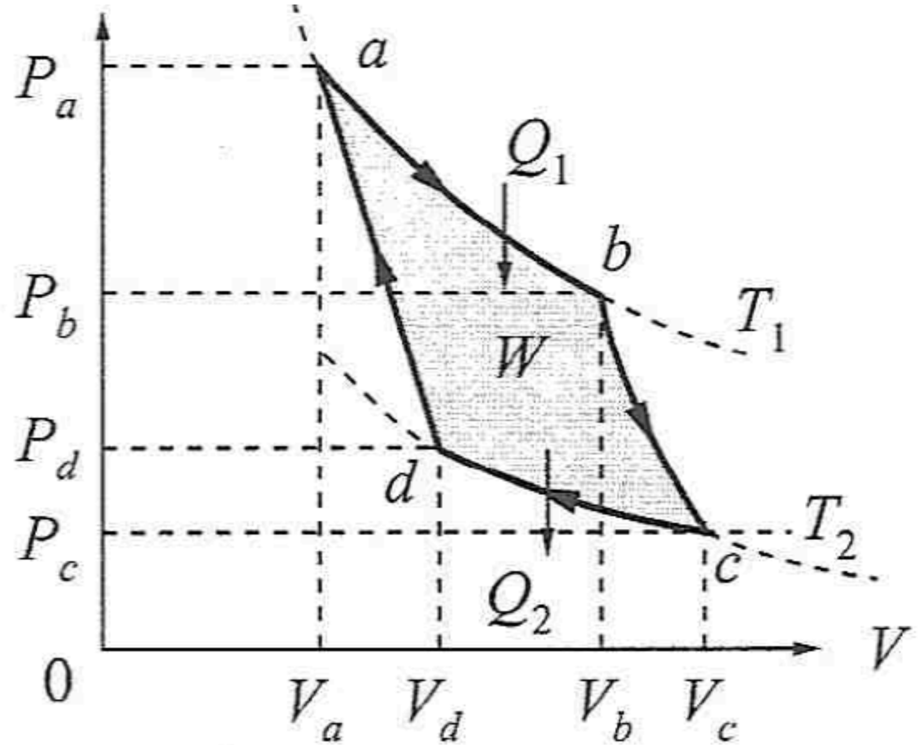
$$\left(\frac{V_b}{V_a}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{V_c}{V_d}\right)^{\gamma-1}$$



Rendimento no Ciclo de Carnot

b -> c (proc. adiabático)

d -> a (proc. adiabático)



$$V_b^{\gamma-1}T_1 = V_c^{\gamma-1}T_2$$

$$V_a^{\gamma-1}T_1 = V_d^{\gamma-1}T_2$$

$$\left(\frac{V_b}{V_a}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{V_c}{V_d}\right)^{\gamma-1} \rightarrow \frac{V_b}{V_a} = \frac{V_c}{V_d}$$

$$\frac{V_b}{V_a} = \frac{V_c}{V_d}$$

$$\frac{V_b}{V_a} = \frac{V_c}{V_d} \quad \longrightarrow \quad ln\frac{V_b}{V_a} = ln\frac{V_c}{V_d}$$

$$\frac{V_b}{V_a} = \frac{V_c}{V_d} \rightarrow ln\frac{V_b}{V_a} = ln\frac{V_c}{V_d}$$

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

$$\frac{V_b}{V_a} = \frac{V_c}{V_d} \rightarrow ln\frac{V_b}{V_a} = ln\frac{V_c}{V_d}$$

$$Q_2 = nRT_2\,ln\frac{V_c}{V_d}$$

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \rightarrow$$

$$Q_1 = nRT_1\,ln\frac{V_b}{V_a}$$

$$\frac{V_b}{V_a} = \frac{V_c}{V_d} \quad \longrightarrow \quad ln\frac{V_b}{V_a} = ln\frac{V_c}{V_d}$$

$$Q_2 = n\,R\,T_2\,ln\frac{V_c}{V_d}$$

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \quad \longrightarrow$$

$$Q_1 = n\,R\,T_1\,ln\frac{V_b}{V_a}$$

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

$$\frac{V_b}{V_a} = \frac{V_c}{V_d} \rightarrow ln\frac{V_b}{V_a} = ln\frac{V_c}{V_d}$$

$$Q_2 = n\,R\,T_2\,ln\frac{V_c}{V_d}$$

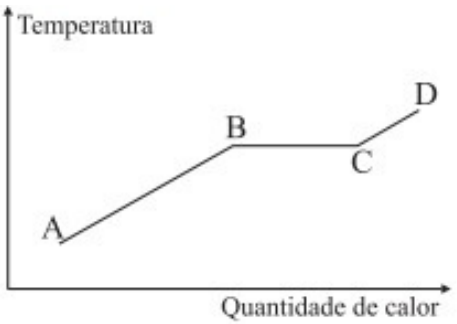
$$\eta = \frac{W}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \rightarrow$$

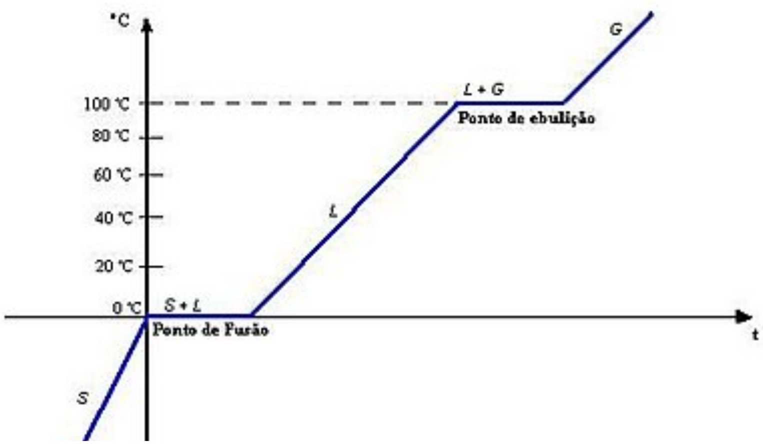
$$Q_1 = n\,R\,T_1\,ln\frac{V_b}{V_a}$$

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

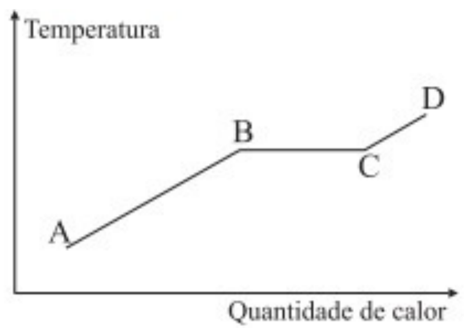
$$\boxed{\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}}$$

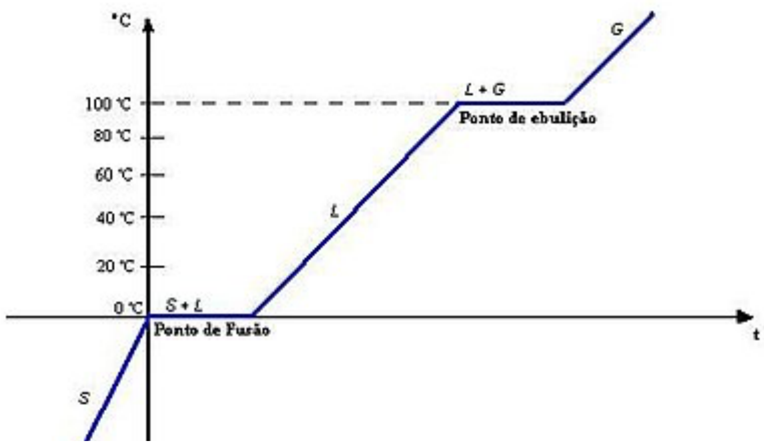
Ciclo de Carnot com mudança de fase

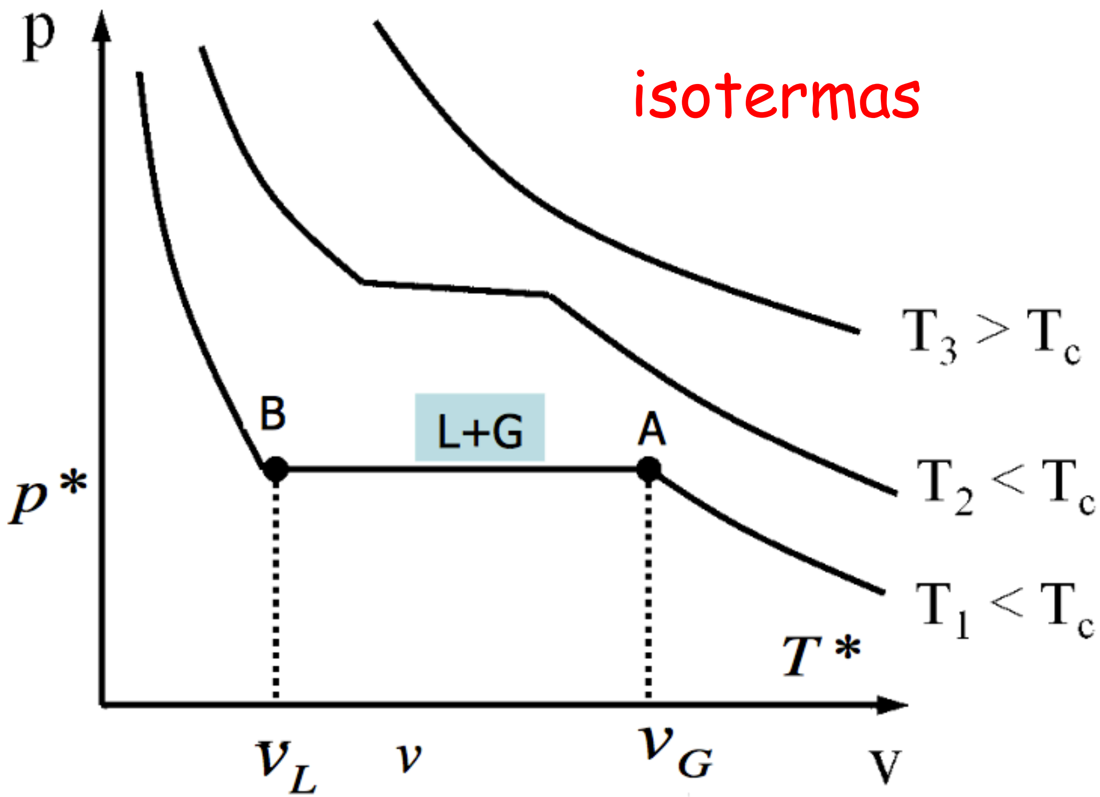




Ciclo de Carnot com mudança de fase



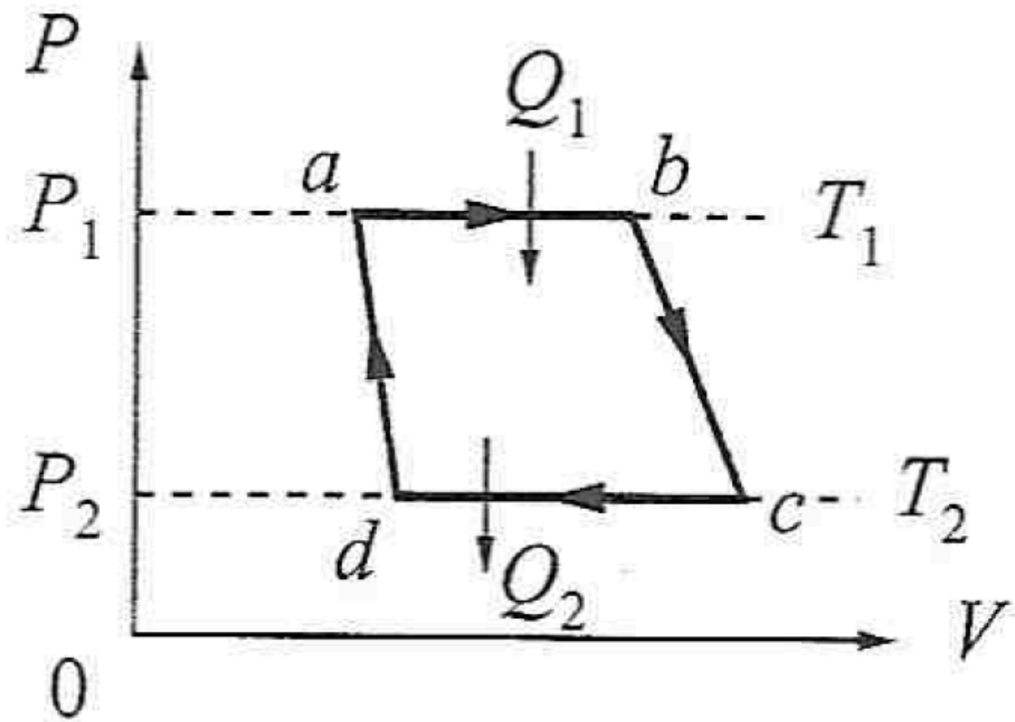




Ciclo de Carnot com mudança de fase

Líquido para gás (vaporização):
pressão e temperatura constantes

Gás para líquido (liquefação):
pressão e temperatura constantes



Teorema de Clausius

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1} \qquad \frac{Q_2}{T_2} = \frac{Q_1}{T_1}$$

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1} \qquad \frac{Q_2}{T_2} = \frac{Q_1}{T_1}$$

Voltamos para a convenção normal de sinais: $Q_2 \to -Q_2$

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1} \qquad\qquad \frac{Q_2}{T_2} = \frac{Q_1}{T_1}$$

Voltamos para a convenção normal de sinais: $Q_2 \rightarrow -Q_2$

$$-\frac{Q_2}{T_2} = \frac{Q_1}{T_1}$$

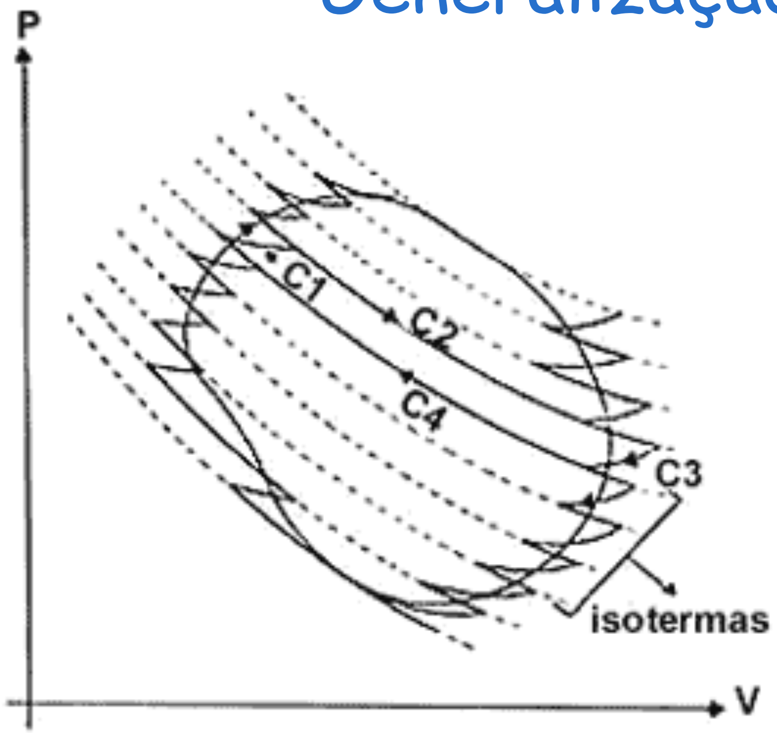
$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1} \qquad \frac{Q_2}{T_2} = \frac{Q_1}{T_1}$$

Voltamos para a convenção normal de sinais: $Q_2 \rightarrow -Q_2$

$$-\frac{Q_2}{T_2} = \frac{Q_1}{T_1}$$

$$\frac{Q_2}{T_2} + \frac{Q_1}{T_1} = 0$$

Generalização do. Ciclo de Carnot



$$\frac{Q_2}{T_2} + \frac{Q_1}{T_1} = 0$$

$$\sum_i \frac{Q_i}{T_i} = 0$$

Num ciclo de processos reversíveis vale:

$$\oint \frac{dQ}{T} = 0$$

Teorema
de Clausius

Primeira aparição da entropia

do grego: transformação

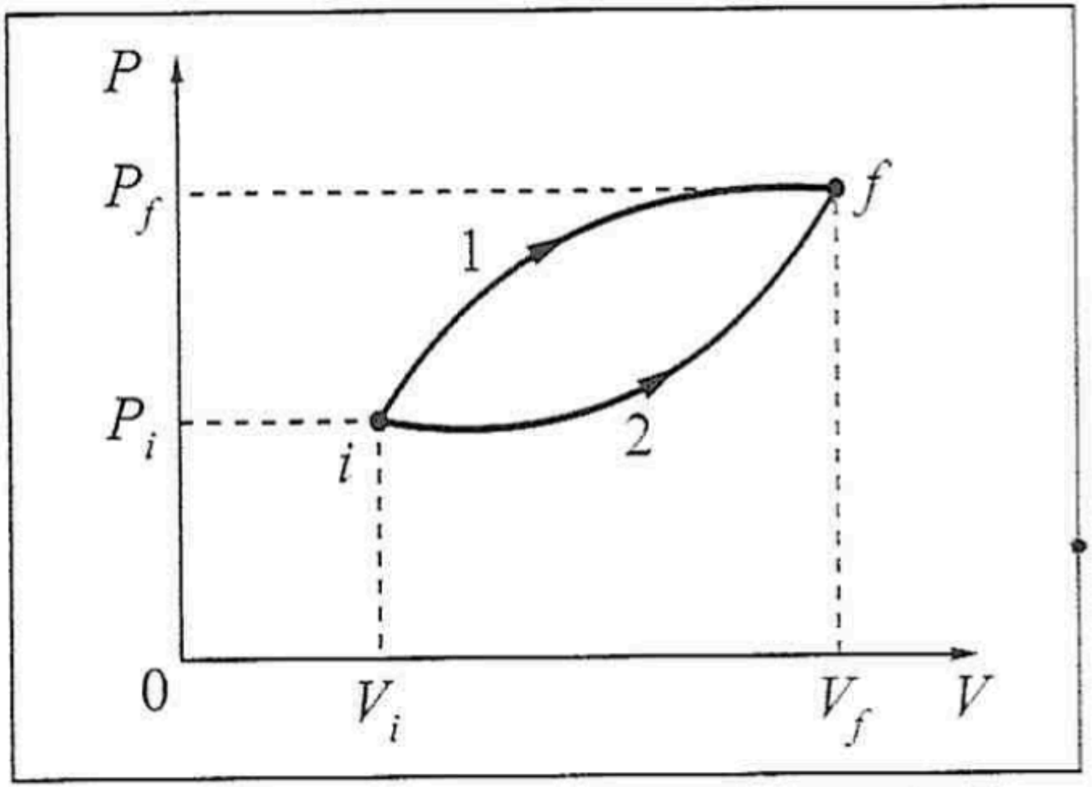


Figura 10.17 — *Caminhos reversíveis*

$$\oint \frac{dQ}{T} = 0$$

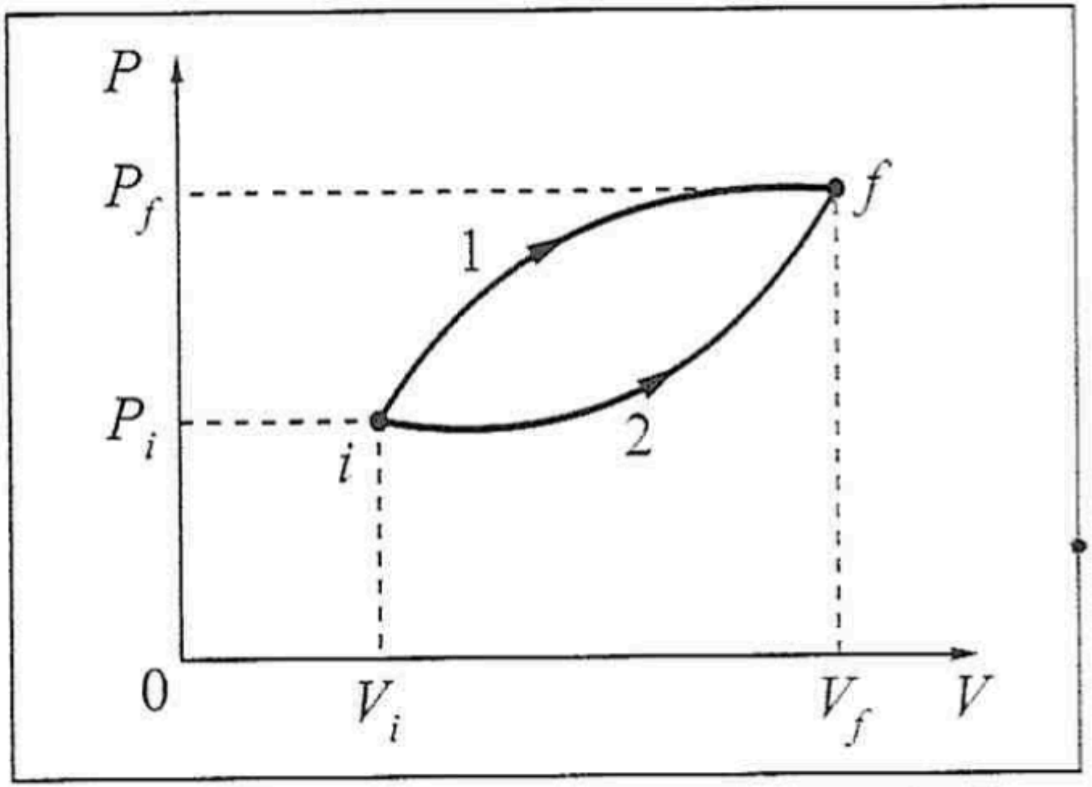


Figura 10.17 — Caminhos reversíveis

$$\oint \frac{dQ}{T} = 0$$

$$\underset{(1)}{\int_i^f} \frac{d'Q_R}{T} + \underset{(2)}{\int_f^i} \frac{d'Q_R}{T} = 0$$

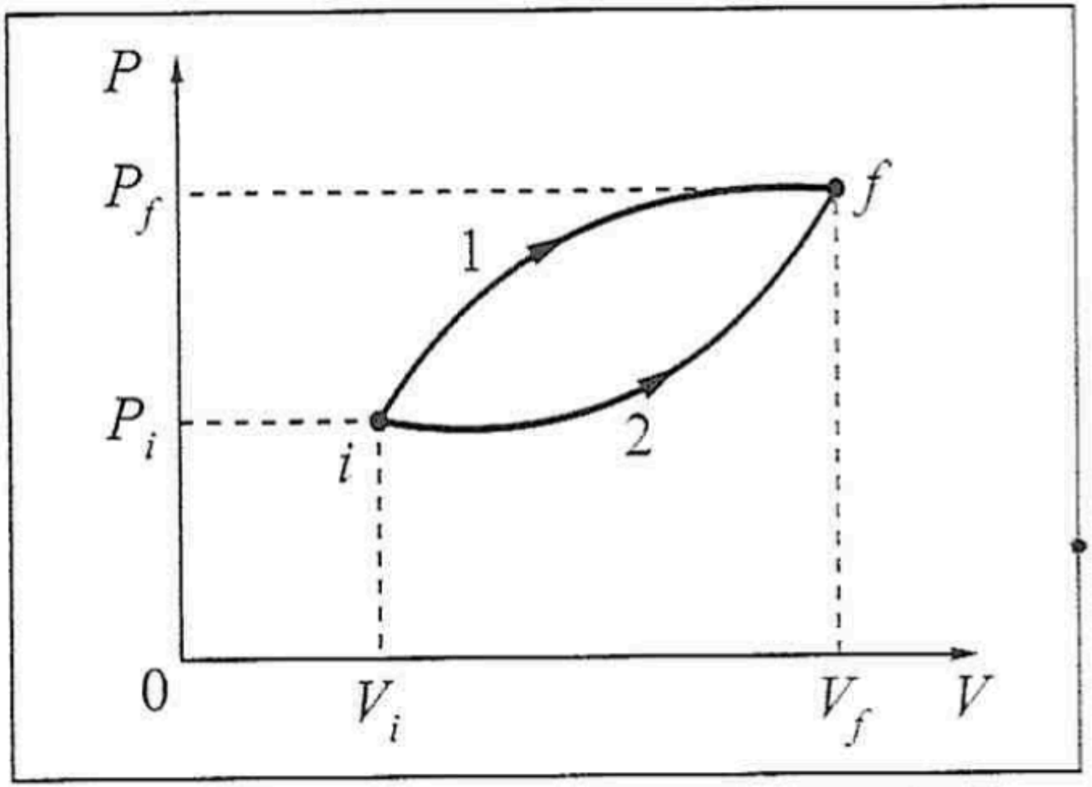


Figura 10.17 — *Caminhos reversíveis*

$$\oint \frac{dQ}{T} = 0$$

$$\underset{(1)}{\int_i^f} \frac{d'Q_R}{T} + \underset{(2)}{\int_f^i} \frac{d'Q_R}{T} = 0$$

$$\underset{(2)}{\int_f^i} \frac{d'Q_R}{T} = - \underset{(2)}{\int_i^f} \frac{d'Q_R}{T}$$

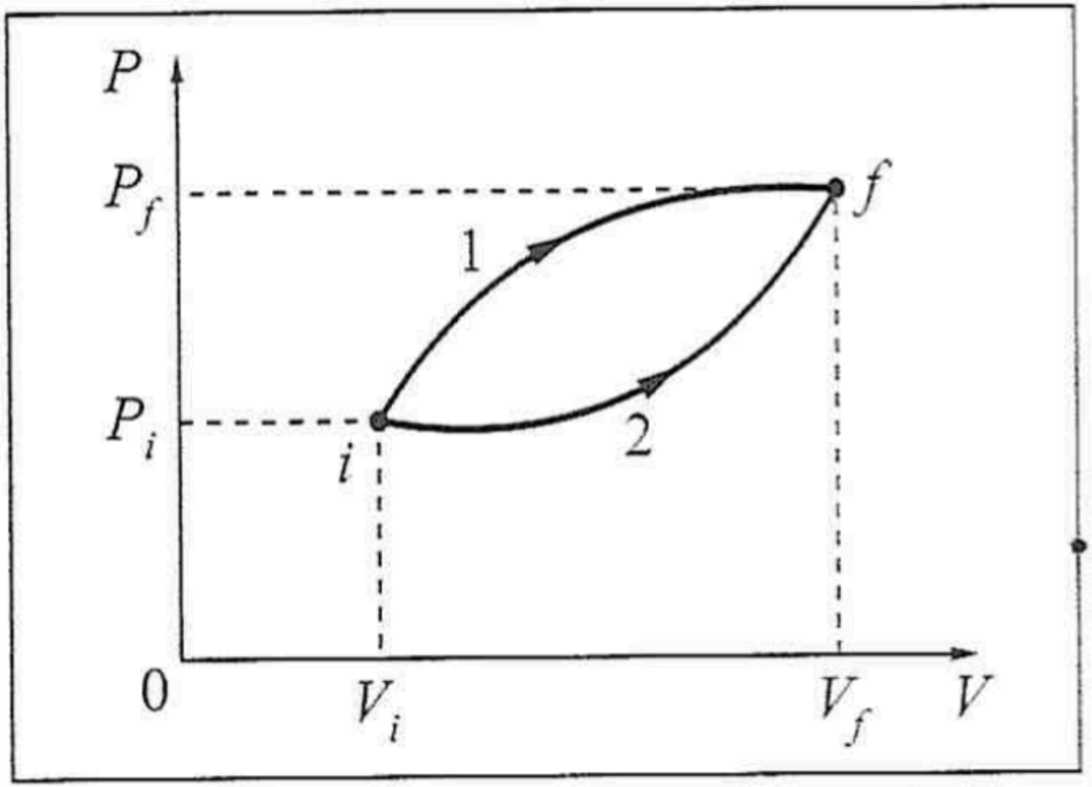


Figura 10.17 — Caminhos reversíveis

$$\oint \frac{dQ}{T} = 0$$

$$\int_{(1)\,i}^{f} \frac{d'Q_R}{T} + \int_{(2)\,f}^{i} \frac{d'Q_R}{T} = 0$$

$$\int_{(2)\,f}^{i} \frac{d'Q_R}{T} = -\int_{(2)\,i}^{f} \frac{d'Q_R}{T}$$

$$\boxed{\int_{(1)\,i}^{f} \frac{d'Q_R}{T} = \int_{(2)\,i}^{f} \frac{d'Q_R}{T}}$$

Não depende do caminho !

Nova variável de estado

$$\int_i^f \frac{dQ}{T} = S_f - S_i$$

S = entropia

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

Casos Particulares

Transformação adiabática reversível:

$$dQ = 0 \quad \rightarrow \quad dS = 0$$

Transformação isentrópica

Exercícios do Capítulo 9

2ª Lei: "não tem almoço grátis"

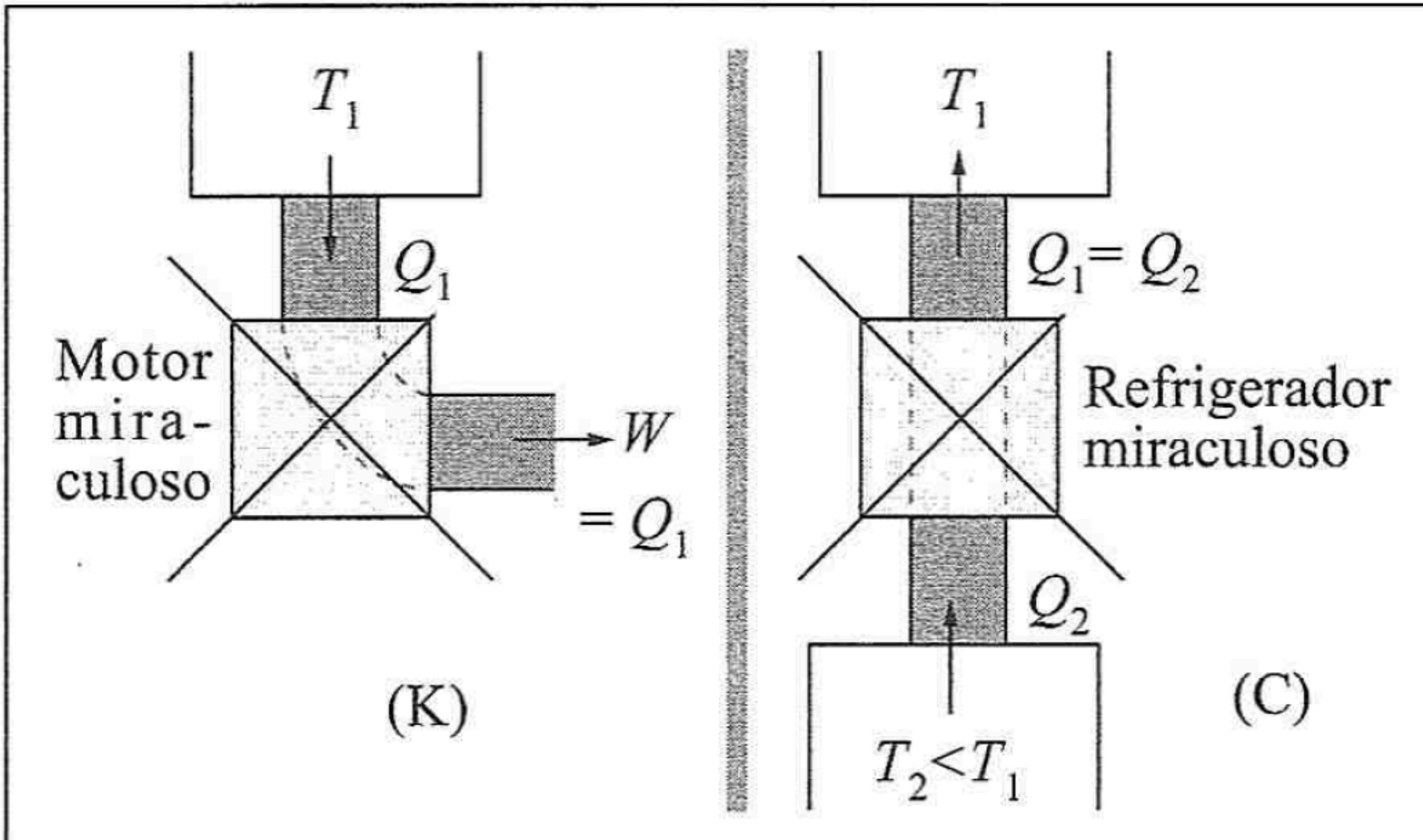


Figura 10.5 — *Motor e refrigerador miraculosos*

Fim


H. Moysés
Nussenzveig
Fluidos
2 Oscilações e Ondas
Calor
CURSO DE
FÍSICA
BÁSICA

Exemplo: Suponhamos que a caldeira de uma máquina a vapor esteja a 180°C ($T_1 \approx 453$ K) e que o vapor escape diretamente na atmosfera, conforme acontece numa locomotiva a vapor. Isto significa que a pressão de vapor P_2 na Fig. 10.13 é igual à pressão atmosférica, à qual a temperatura de ebulição da água é de 100°C, de modo que $T_2 \approx 373$ K. Pela (10.5.13), o rendimento máximo ideal seria

$$\frac{T_1 - T_2}{T_1} \approx \frac{80}{453} \approx 0,18$$

ou seja, de cada 100 calorias geradas na caldeira, somente 18 *no máximo* estariam produzindo trabalho útil. Na prática, o rendimento atingido seria pouco mais da metade deste valor.

A vantagem do condensador numa máquina a vapor é não somente evitar que o vapor se perca na atmosfera, permitindo reciclá-lo cm circuito fechado, mas também permitir que ele seja resfriado (por exemplo, por água corrente, numa serpentina) a uma temperatura T_2 próxima da temperatura ambiente, $T_2 \sim 300$ K . Isto aumenta o rendimento ideal, no exemplo acima, para

$$\frac{T_1 - T_2}{T_1} \approx \frac{153}{453} \approx 0,33$$

ou seja, permite quase duplicá-lo.


OH, JEFF... I LOVE YOU, TOO... BUT...

Motor térmico: máquina a vapor

$$W = Q_1 - Q_2$$