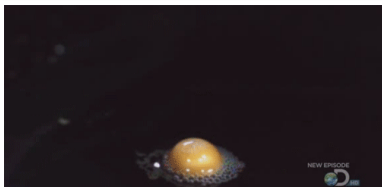


http://media-cache-a0.pinimg.com/original/24/83/21/248321b948523c34743090f1e46850100064ec.jpg

Entropia e a Segunda Lei da Termodinâmica



Processos irreversíveis e entropia

Em um sistema fechado, o que determina o

sentido do processo

não são as variações de energia ΔE

são as variações de entropia ΔS

Postulado da Entropia S

Todos os processos irreversíveis em um sistema fechado são acompanhados por aumento da entropia.

Processos irreversíveis e entropia

sistema fechado

Sistema fechado

Sistema termodinâmico que pode trocar calor Q ou trabalho W com a vizinhança, mas não troca massa.

Processos irreversíveis e entropia

sistema fechado

energia

entropia

lei de conservação

~~lei de conservação~~

A energia de um sistema fechado é conservada; permanece constante.

Nos processos irreversíveis, a entropia de um sistema fechado aumenta.

A variação de entropia é às vezes chamada de "seta do tempo".

Processos irreversíveis e entropia



A variação de entropia é às vezes chamada de "seta do tempo".

Variação de entropia ΔS de um sistema

Há duas formas equivalentes de definir a variação da entropia ΔS de um sistema:

- (1) em termos da temperatura do sistema T e da energia que o sistema ganha ou perde na forma de calor Q e
- (2) contando as diferentes formas de distribuir os átomos ou moléculas que compõem o sistema.

Variação de entropia ΔS de um sistema

Há duas formas equivalentes de definir a variação da entropia ΔS de um sistema:

(1) em termos da temperatura do sistema T e da energia que o sistema ganha ou perde na forma de calor Q e

- A expansão livre de um gás ideal
- A expansão isotérmica de um gás ideal



Profa. Ignez Caracelli

096059-A-FISICA PARA BIOTECNOLOGIA

7

Variação de entropia ΔS de um sistema

Há duas formas equivalentes de definir a variação da entropia ΔS de um sistema:

(1) em termos da temperatura do sistema T e da energia que o sistema ganha ou perde na forma de calor Q e

- A expansão livre de um gás ideal



Profa. Ignez Caracelli

096059-A-FISICA PARA BIOTECNOLOGIA

8

A expansão livre de um gás ideal

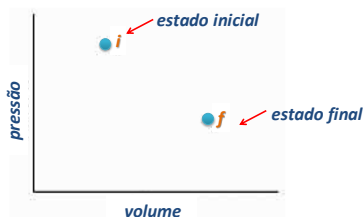


Diagrama p-V

A pressão e o volume são propriedades de estado, ou seja, propriedades que dependem apenas do estado do gás e não da forma como chegou a esse estado.



Profa. Ignez Caracelli

096059-A-FISICA PARA BIOTECNOLOGIA

9

A expansão livre de um gás ideal

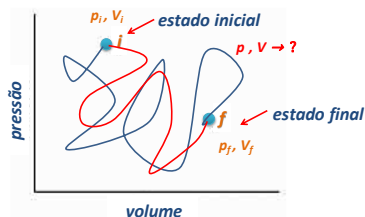


Diagrama p-V

Os estados intermediários do gás não podem ser mostrados porque não são estados de equilíbrio.



Profa. Ignez Caracelli

096059-A-FISICA PARA BIOTECNOLOGIA

10

A expansão livre de um gás ideal

Expansão Livre de um Gás (cap.19)

$$T_i = T_f$$

expansão isotérmica
reversível

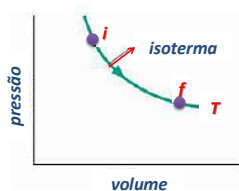


Diagrama p-V

A expansão isotérmica de um gás ideal

A expansão isotérmica de um gás ideal

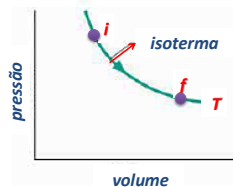


Diagrama p-V

Os estados intermediários, que são agora estados de equilíbrio, estão indicados por uma curva.



Profa. Ignez Caracelli

096059-A-FISICA PARA BIOTECNOLOGIA

11

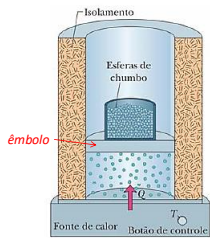


Profa. Ignez Caracelli

096059-A-FISICA PARA BIOTECNOLOGIA

12

A expansão isotérmica de um gás ideal

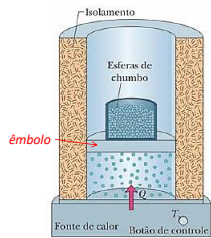


estado inicial
processo isotérmico

1. O gás está em um cilindro isolado
2. A fonte de calor é mantida à temperatura T.
3. Sobre o êmbolo há uma quantidade de esferas de chumbo suficiente para que a pressão e o volume do gás correspondam ao estado inicial *i* da figura.

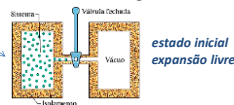
o chumbo é removido lentamente, os estados intermediários do gás são estados de equilíbrio e podem ser representados em um diagrama p-V

A expansão isotérmica de um gás ideal



estado inicial
processo isotérmico

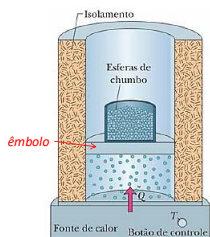
1. O gás está em um cilindro isolado
2. A fonte de calor é mantida à temperatura T.
3. Sobre o êmbolo há uma quantidade de esferas de chumbo suficiente para que a pressão e o volume do gás correspondam ao estado inicial *i* da figura.



estado inicial
expansão livre



A expansão isotérmica de um gás ideal



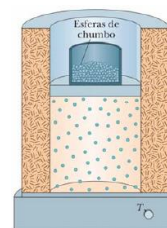
estado inicial
processo isotérmico

1. O gás está em um cilindro isolado
2. A fonte de calor é mantida à temperatura T.
3. Sobre o êmbolo há uma quantidade de esferas de chumbo suficiente para que a pressão e o volume do gás correspondam ao estado inicial *i* da figura.
4. A temperatura do gás não varia porque o gás permanece em contato com a fonte de calor durante todo o processo.

A expansão isotérmica de um gás ideal



estado inicial



estado final

Expansão isotérmica de um gás ideal, realizada de forma reversível. O gás possui o mesmo estado inicial *i* e o mesmo estado final *f* que no processo irreversível



A expansão isotérmica de um gás ideal

expansão isotérmica reversível \neq expansão livre irreversível
entre os estados *i* e *f* $=$ entre os estados *i* e *f*
 $\Delta S_{rev} = S_f - S_i$ $=$ $\Delta S_{irrev} = S_f - S_i$
 chumbo é removido lentamente \rightarrow os estados intermediários do gás são estados de equilíbrio \rightarrow diagrama p-V.

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

A expansão isotérmica de um gás ideal

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

$$\Delta S = S_f - S_i$$

$$\Delta S = \frac{Q}{T} \quad \text{variação de entropia, processo isotérmico}$$

Para manter constante a temperatura T do gás durante a expansão isotérmica, uma quantidade de calor Q deve ser transferida da fonte de calor para o gás. Assim, Q é positivo e a entropia do gás aumenta durante o processo isotérmico e durante a expansão livre.



A Entropia como uma Função de Estado

- se a entropia propriedade do estado de um sistema → não depende do modo como esse estado é atingido
- O fato de que a entropia é realmente uma função de estado (como são chamadas as propriedades de estado) pode ser demonstrado apenas por experimentos.
- é possível provar que S é uma função de estado para o caso especial, muito importante, no qual um gás ideal passa por um processo reversível.

A Entropia como uma Função de Estado

Para que o processo seja reversível → uma série de pequenos passos com o gás em um estado de equilíbrio ao final de cada passo.

- Para cada pequeno passo,:
- a energia absorvida ou cedida pelo gás na forma de calor é dQ
- o trabalho realizado pelo gás é dW
- a variação da energia interna é dU .

$$dU = dQ - dW$$

primeira lei da termodinâmica na forma diferencial

A Entropia como uma Função de Estado

$$\Delta S = S_f - S_i = nR \ln \frac{V_f}{V_i} + n C_v \ln \frac{T_f}{T_i}$$

- não foi preciso especificar um processo reversível em particular
- ↓
- deve ser válido para qualquer processo reversível que leve o gás do estado i para o estado f .
- ΔS entre os estados i e f de um gás ideal depende apenas das propriedades do estado inicial (V_i e T_i) e do estado final (V_f e T_f)
- ΔS não depende do modo como o gás passa do estado inicial i para o estado final f .

Lembrando: A expansão livre de um gás ideal

Expansão Livre de um Gás (cap.19)

$$T_i = T_f$$

expansão isotérmica reversível

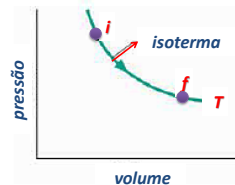


Diagrama p-V

A expansão isotérmica de um gás ideal

Ideias baseadas em Escher



<https://www.youtube.com/watch?v=d6AQiaMeCk>

Entropia e a Segunda Lei da Termodinâmica



Maurits Cornelis Escher
Waterfall, 1961



Leonardo da Vinci
"il moto perpetuo"



A Segunda Lei da Termodinâmica

$\Delta S_{rev} > 0$

processo reversível

estado inicial (1) → estado final (2)

processo reversível

1 → 2

2 → 1

A Segunda Lei da Termodinâmica

$\Delta S_{rev} > 0$

processo reversível

estado inicial (1) → estado final (2)

processo reversível

1 → 2

Processo vs Volume: Isoterma

- O gás está em um cilindro isolado
- A fonte de calor é mantida à temperatura T.
- Sobre o êmbolo há uma quantidade de esferas de chumbo suficiente para que a pressão e o volume do gás correspondam ao estado inicial i da figura. O chumbo é removido lentamente, os estados intermediários do gás são estados de equilíbrio e podem ser representados em um diagrama p-V
- A temperatura do gás não varia porque o gás permanece em contato com a fonte de calor durante todo o processo.

$T_i = T_f$

A Segunda Lei da Termodinâmica

$\Delta S_{rev} > 0$

processo reversível

estado inicial (1) → estado final (2)

processo reversível

1 → 2

2 → 1

- cilindro isolado
- A fonte de calor mantida em T.
- O chumbo é removido lentamente, os estados intermediários do gás são estados de equilíbrio
- $T_i = T_f$

- acrescentar lentamente esferas de chumbo ao êmbolo até que o volume original do gás seja restabelecido.
- a energia do gás, na forma de calor, deve ser extraída, para evitar que a temperatura aumente.
- $Q < 0 \rightarrow \Delta S = \frac{Q}{T} \rightarrow$ entropia do gás deve diminuir ($S_f < S_i$)

A Segunda Lei da Termodinâmica

$\Delta S_{rev} > 0$

processo reversível

estado inicial (1) → estado final (2)

processo reversível

1 → 2

2 → 1

$\Delta S = \frac{Q}{T} < 0$

a diminuição da entropia do gás não viola o postulado da entropia da segundo o qual a entropia sempre aumenta?

A Segunda Lei da Termodinâmica

2 → 1

$\Delta S = \frac{Q}{T} < 0$

A Segunda Lei da Termodinâmica

Não, porque o postulado é válido somente para processos irreversíveis que ocorrem em sistemas fechados.

2 → 1

$\Delta S = \frac{Q}{T} < 0$

a diminuição da entropia do gás não viola o postulado da entropia da segundo o qual a entropia sempre aumenta?

A Segunda Lei da Termodinâmica

O processo não satisfaz esses requisitos.:

Não, porque o postulado é válido somente para processos irreversíveis que ocorrem em sistemas fechados.

$$\Delta S = \frac{Q}{T} < 0$$

a diminuição da entropia do gás não viola o postulado da entropia da segundo o qual a entropia sempre aumenta?

A Segunda Lei da Termodinâmica

O processo não satisfaz esses requisitos.:

O processo não é irreversível

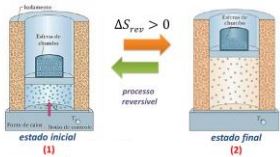
o sistema (que é apenas o gás) não é fechado
energia é transferida do gás para a fonte na forma de calor

Não, porque o postulado é válido somente para processos irreversíveis que ocorrem em sistemas fechados.

$$\Delta S = \frac{Q}{T} < 0$$

a diminuição da entropia do gás não viola o postulado da entropia da segundo o qual a entropia sempre aumenta?

Considerações sobre o sistema

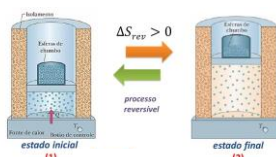


o sistema (que é apenas o gás) não é fechado



Se a fonte de calor é parte do sistema → sistema fechado.

A Segunda Lei da Termodinâmica



energia transferida na forma de calor Q

sistema fechado

- processo reversível: (1) Q: fonte → gás
- (2) Q: gás → fonte

variações de entropia ΔS do gás :

$$(1) \Delta S_{gás} = -\frac{|Q|}{T} \quad \Delta S_{rev} = +\frac{|Q|}{T} \quad (2)$$

A Segunda Lei da Termodinâmica

$$\Delta S_{gás} = -\frac{|Q|}{T} \quad \Delta S_{rev} = +\frac{|Q|}{T}$$

ΔS_{sistema fechado} → a soma dos dois valores

$$\Delta S_{sistema\ fechado} = -\frac{|Q|}{T} + \frac{|Q|}{T}$$

$$\Delta S_{sistema\ fechado} = 0$$

para o processo reversível

A Segunda Lei da Termodinâmica

sistema fechado



Sistema fechado
Sistema termodinâmico que pode trocar calor Q ou trabalho W com a vizinhança, mas não troca massa.

processos irreversíveis

processos reversíveis

$$\Delta S_{sistema\ fechado} > 0$$

$$\Delta S_{sistema\ fechado} = 0$$

A Segunda Lei da Termodinâmica

sistema fechado

Sistema fechado
Sistema termodinâmico que pode trocar calor Q ou trabalho W com a vizinhança, mas não troca massa.

qualquer processo: $\Delta S_{\text{sistema fechado}} \geq 0$

Se um processo ocorre em um sistema fechado, a entropia do sistema aumenta se o processo for irreversível e permanece constante se o processo for reversível.

A Segunda Lei da Termodinâmica

Se um processo ocorre em um sistema fechado, a entropia do sistema aumenta se o processo for irreversível e permanece constante se o processo for reversível.

Embora a entropia possa diminuir em uma parte de um sistema fechado, sempre existe um aumento igual ou maior em outra parte do sistema, de modo que a entropia do sistema como um todo jamais diminui.

$\Delta S \geq 0$ segunda lei da termodinâmica

A Segunda Lei da Termodinâmica

$\Delta S \geq 0$ segunda lei da termodinâmica

No mundo real, todos os processos são irreversíveis em maior ou menor grau por causa do atrito, da turbulência e de outros fatores, de modo que a entropia de sistemas reais fechados submetidos a processos reais sempre aumenta.

Processos nos quais a entropia do sistema permanece constante são sempre aproximações.

Entropia no Mundo Real: Máquinas Térmicas



<https://www.youtube.com/watch?v=3FyhNpHeHMM>

Entropia no Mundo Real: Máquinas Térmicas

substância de trabalho: água

trabalho

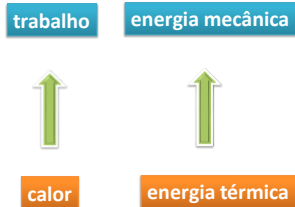
calor

Geômetra e engenheiro grego, **Heron** esteve ativo em torno do ano 62

Eolípila: um simples motor a vapor.

Entropia no Mundo Real: Máquinas Térmicas

Uma máquina térmica é um dispositivo que extrai energia do ambiente na forma de calor e realiza um trabalho útil.



Entropia no Mundo Real: Máquinas Térmicas

Toda máquina térmica utiliza uma substância de trabalho.

máquina térmica	substância de trabalho
máquinas a vapor	água (ℓ); água (vapor)
motores de automóvel	mistura de gasolina (álcool) e ar
turbinas	gás



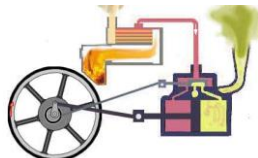
<https://www.youtube.com/watch?v=DVOJ-SAOqIQ>

Entropia no Mundo Real: Máquinas Térmicas



Entropia no Mundo Real: Máquinas Térmicas

Toda máquina térmica utiliza uma substância de trabalho.



Para que uma máquina térmica realize trabalho de forma contínua, a substância de trabalho deve operar em um ciclo, ou seja, deve passar por uma série fechada de **processos termodinâmicos**, chamados de tempos, voltando repetidamente a cada estado do ciclo.

A Máquinas de Carnot

máquina de Carnot = máquina térmica ideal

- todos os processos são reversíveis
- as transferências de energia são realizadas sem as perdas causadas por efeitos como o atrito e a turbulência

A Máquinas de Carnot (1824)



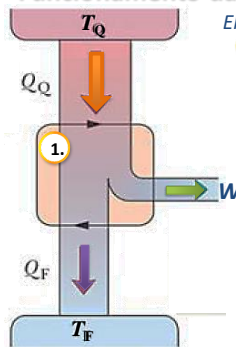
Nicolas Léonard Sadi Carnot
(Paris, 1796-1832)

De todas as máquinas térmicas, a máquina de Carnot é a que utiliza o Q com maior eficiência para realizar W útil. (a máquina de Carnot é teórica)

Baseados nos trabalhos de Joule e um outro cientista, denominado Mayer, Rudolf Clausius e Lorde Kelvin, em 1850, desenvolveram a Primeira e a Segunda Lei da Termodinâmica

Conservação de Energia S, entropia

Funcionamento da máquinas de Carnot

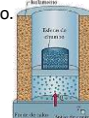


Elementos de máquina de Carnot

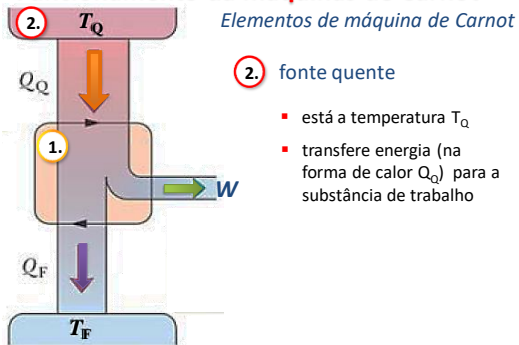
1. substância de trabalho

- submetida a um ciclo
- as setas pretas indicam o sentido do ciclo (horário)
- é um gás, confinado em um cilindro feito de material isolante e com um êmbolo submetido a um peso.

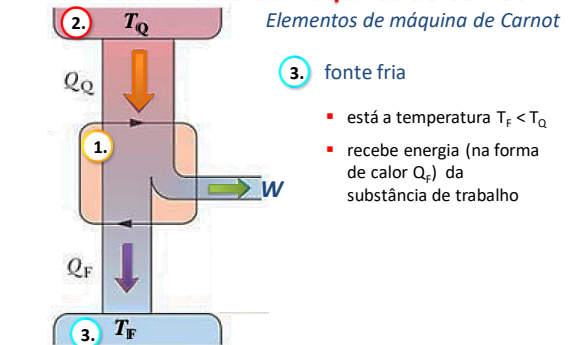
O cilindro pode ser colocado entre duas fontes de calor, ou sobre uma placa isolante.



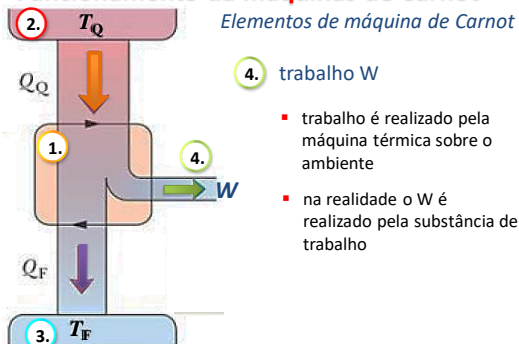
Funcionamento da máquinas de Carnot



Funcionamento da máquinas de Carnot



Funcionamento da máquinas de Carnot



O Ciclo de Carnot

- Carnot mostrou que uma máquina térmica operando em um *ciclo ideal, reversível* chamado de *ciclo de Carnot* entre dois reservatórios de energia é o motor mais eficiente possível.

O Ciclo de Carnot

Tal mecanismo ideal estabelece um limite superior de eficiência maior que a de todos os outros motores.

- Isto é, o trabalho realizado por uma substância de trabalho em um ciclo de Carnot é a maior quantidade de trabalho possível.

Teorema de Carnot

Nenhum motor real operando entre dois reservatórios de energia pode ser mais eficiente que o motor de Carnot operando entre os mesmos dois reservatórios.

O Ciclo de Carnot

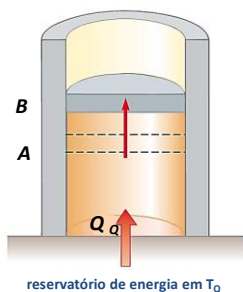
1. a substância de trabalho é um gás ideal
2. o gás está contido em um cilindro que tem um pistão móvel.
3. As paredes do cilindro e o pistão são isolantes térmicos.
4. O Ciclo de Carnot consiste de 2 processos adiabáticos e dois isotérmicos.

O Ciclo de Carnot



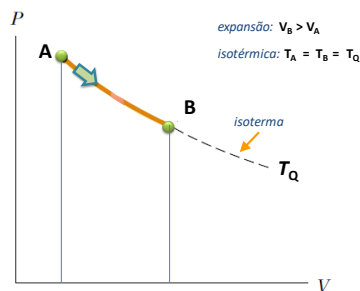
O Ciclo de Carnot: expansão isotérmica

Processo A → B

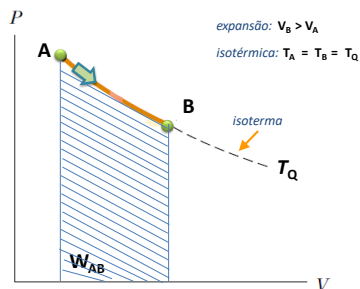


- temperatura inicial em A: T_Q
- temperatura final em B: T_Q
- o gás é colocado em contato térmico com um reservatório de energia à temperatura T_Q .
- durante a expansão, o gás absorve Q_Q do reservatório (está em contato com a base do cilindro)
- realiza W_{AB} ao deslocar o êmbolo

O Ciclo de Carnot : expansão isotérmica

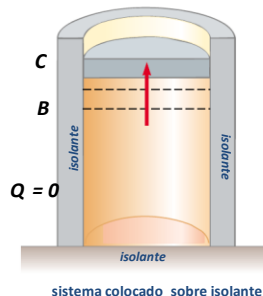


O Ciclo de Carnot : expansão isotérmica



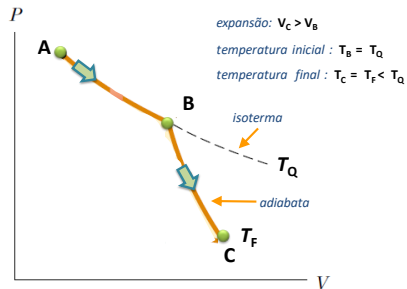
O Ciclo de Carnot: expansão adiabática

Processo B → C

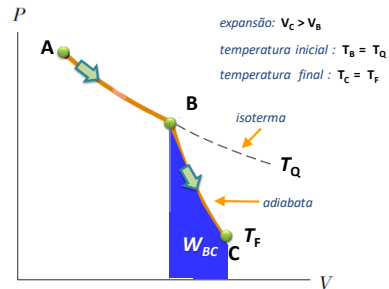


- temperatura inicial em B: T_Q
- temperatura final em C: T_F
- o cilindro está termicamente isolado → $Q = 0$ (não há troca de calor)
- durante a expansão, o gás realiza W_{BC} ao deslocar o êmbolo

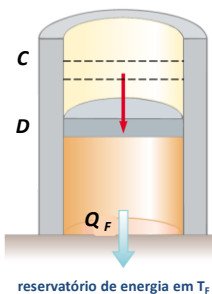
O Ciclo de Carnot : expansão adiabática



O Ciclo de Carnot : expansão adiabática



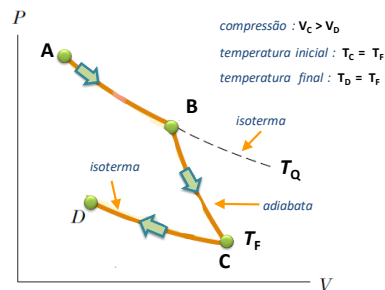
O Ciclo de Carnot: compressão isotérmica



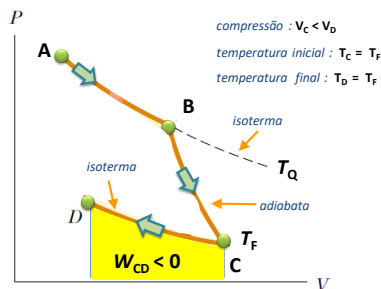
- Processo C → D**
- temperatura inicial em C: T_F
 - temperatura final em D: T_F
 - o gás é colocado em contato térmico com um reservatório de energia à temperatura T_F .
 - durante a compressão, o gás cede Q_F ao reservatório (está em contato com a base do cilindro)
 - realiza W_{CD} ao deslocar o êmbolo

reservatório de energia em T_F

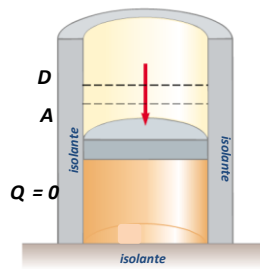
O Ciclo de Carnot : compressão isotérmica



O Ciclo de Carnot : compressão isotérmica



O Ciclo de Carnot: compressão adiabática

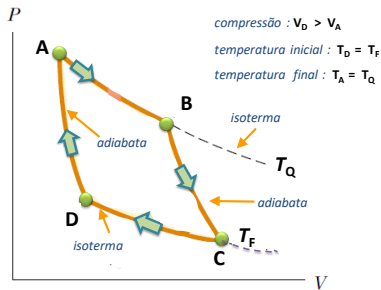


sistema colocado sobre isolante

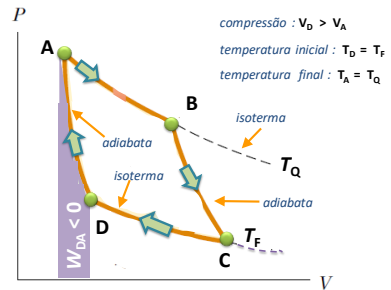
Processo D → A

- temperatura inicial em D: T_F
- temperatura final em A: T_Q
- o cilindro está termicamente isolado → $Q = 0$ (não há troca de calor)
- durante a compressão, o gás realiza W_{DA} ao deslocar o êmbolo

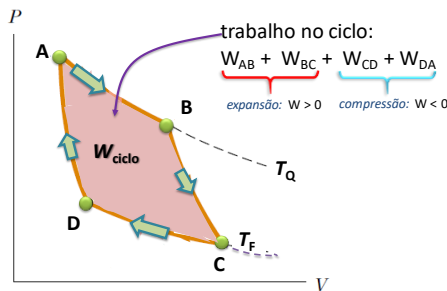
O Ciclo de Carnot : compressão adiabática



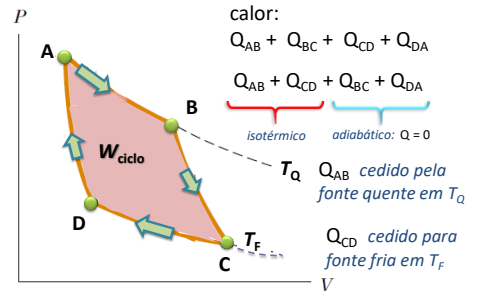
O Ciclo de Carnot : compressão adiabática



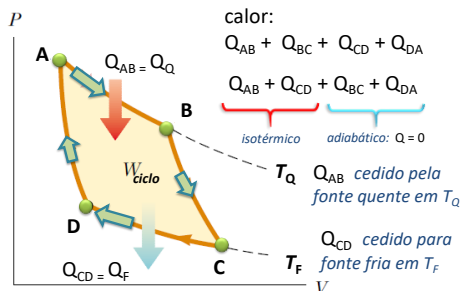
O Ciclo de Carnot : balanço



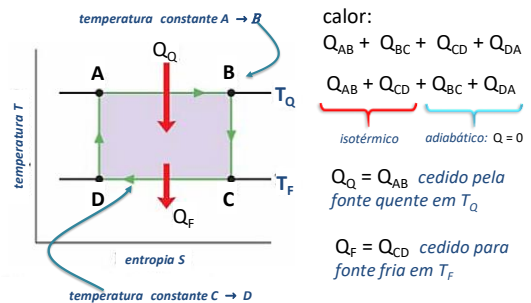
O Ciclo de Carnot : balanço



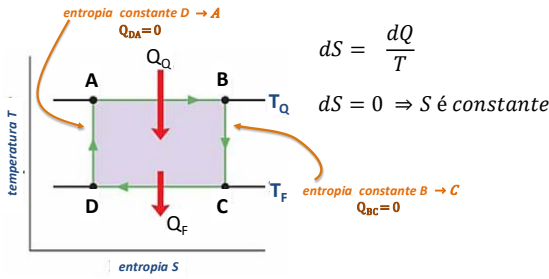
O Ciclo de Carnot : balanço



O Ciclo de Carnot : calor



O Ciclo de Carnot : entropia



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

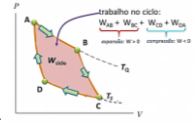
$$dS = 0 \Rightarrow S \text{ é constante}$$

O Ciclo de Carnot : trabalho

trabalho no ciclo:

$$W_{AB} + W_{BC} + W_{CD} + W_{DA}$$

expansão: $W > 0$ compressão: $W < 0$



Primeira lei da Termodinâmica:
 $\Delta U = \Delta Q - W$

A → B
 $\Delta U_{AB} = \Delta Q_{AB} - W_{AB}$

B → C
 $\Delta U_{BC} = \Delta Q_{BC} - W_{BC}$

C → D
 $\Delta U_{CD} = \Delta Q_{CD} - W_{CD}$

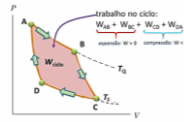
D → A
 $\Delta U_{DA} = \Delta Q_{DA} - W_{DA}$

O Ciclo de Carnot : trabalho

trabalho no ciclo:

$$W_{AB} + W_{BC} + W_{CD} + W_{DA}$$

expansão: $W > 0$ compressão: $W < 0$



Primeira lei da Termodinâmica:
 $\Delta U = \Delta Q - W$

A → B
 $\Delta U_{AB} = \Delta Q_{AB} - W_{AB}$

B → C
 $\Delta U_{BC} = \Delta Q_{BC} - W_{BC}$

C → D
 $\Delta U_{CD} = \Delta Q_{CD} - W_{CD}$

D → A
 $\Delta U_{DA} = \Delta Q_{DA} - W_{DA}$

expansão isotérmica
 $\Delta U_{AB} = Q_Q - W_{AB}$

expansão adiabática
 $\Delta U_{BC} = -W_{BC}$

compressão isotérmica
 $\Delta U_{CD} = Q_F - W_{CD}$

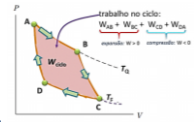
compressão adiabática
 $\Delta U_{DA} = -W_{DA}$

O Ciclo de Carnot : trabalho

trabalho no ciclo:

$$W_{AB} + W_{BC} + W_{CD} + W_{DA}$$

expansão: $W > 0$ compressão: $W < 0$



Primeira lei da Termodinâmica:
 $\Delta U = \Delta Q - W$

A → B
 $\Delta U_{AB} = \Delta Q_{AB} - W_{AB}$

B → C
 $\Delta U_{BC} = \Delta Q_{BC} - W_{BC}$

C → D
 $\Delta U_{CD} = \Delta Q_{CD} - W_{CD}$

D → A
 $\Delta U_{DA} = \Delta Q_{DA} - W_{DA}$

expansão isotérmica
 $\Delta U_{AB} = Q_Q - W_{AB}$

expansão adiabática
 $\Delta U_{BC} = -W_{BC}$

compressão isotérmica
 $\Delta U_{CD} = -Q_F - W_{CD}$

compressão adiabática
 $\Delta U_{DA} = -W_{DA}$

$\Delta U_{ciclo} = \Delta U_{AB} + \Delta U_{BC} + \Delta U_{CD} + \Delta U_{DA}$

ΔU_{ciclo} é função de estado

- não depende do caminho
- depende somente dos estados inicial e final
- estado inicial U_A
- estado final U_A

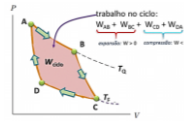
$\Delta U_{ciclo} = U_A - U_A = 0$

O Ciclo de Carnot : trabalho

trabalho no ciclo: $W_{ciclo} =$

$$W_{AB} + W_{BC} + W_{CD} + W_{DA}$$

expansão: $W > 0$ compressão: $W < 0$



$\Delta U_{ciclo} = 0$

$\Delta U_{ciclo} = 0 = \Delta U_{AB} + \Delta U_{BC} + \Delta U_{CD} + \Delta U_{DA}$

$0 = Q_Q - W_{AB} + -W_{BC} + Q_F - W_{CD} + -W_{DA}$

$W_{AB} + W_{BC} + W_{CD} + W_{DA} = Q_Q - Q_F$

$\Delta U_{AB} = Q_Q - W_{AB}$

$\Delta U_{BC} = -W_{BC}$

$\Delta U_{CD} = -Q_F - W_{CD}$

$\Delta U_{DA} = -W_{DA}$

trabalho no ciclo: $W_{ciclo} = W$ $W = |Q_Q| - |Q_F|$

O Ciclo de Carnot : variação de entropia

- há 2 transferências de energia reversíveis na forma de calor Q
- há 2 variações da entropia S da substância de trabalho:
 - uma à temperatura T_Q
 - outra à temperatura T_F

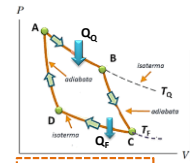
A variação líquida de entropia por ciclo é dada por:

$$\Delta S = \Delta S_Q + \Delta S_F$$

$$\Delta S = \frac{|Q_Q|}{T_Q} - \frac{|Q_F|}{T_F}$$

$\Delta S_Q > 0$ $\Delta S_F < 0$

calor Q_Q é adicionado à substância de trabalho calor Q_F é removido da substância de trabalho



S é função de estado

- não depende do caminho
- depende somente dos estados inicial e final
- estado inicial S_A
- estado final S_A

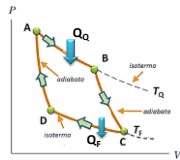
$\Delta S_{ciclo} = 0$

O Ciclo de Carnot : *variação de entropia*

$$\Delta S = \Delta S_Q + \Delta S_F$$

$$\Delta S = \frac{|Q_Q|}{T_Q} - \frac{|Q_F|}{T_F}$$

$\Delta S_Q > 0$ calor Q_Q é adicionado à substância de trabalho
 $\Delta S_F < 0$ calor Q_F é removido da substância de trabalho
 $\Delta S_{\text{ciclo}} = 0$



$$\frac{|Q_Q|}{T_Q} = \frac{|Q_F|}{T_F} \Rightarrow \frac{T_F}{T_Q} = \frac{|Q_F|}{|Q_Q|}$$

Eficiência da Máquina de Carnot

eficiência térmica = $\frac{\text{trabalho que a máquina realiza por ciclo}}{\text{energia que recebe em forma de calor por ciclo}}$

$$\epsilon = \frac{|W|}{|Q_Q|}$$

$$\epsilon = \frac{|W|}{|Q_Q|} = \frac{|Q_Q| - |Q_F|}{Q_Q} = 1 - \frac{|Q_F|}{Q_Q}$$

$|Q_F|$ energia perdida na forma de calor em cada ciclo

$$\epsilon \leq 1$$

Eficiência da Máquina de Carnot

eficiência térmica = $\frac{\text{trabalho que a máquina realiza por ciclo}}{\text{energia que recebe em forma de calor por ciclo}}$

$$\epsilon = \frac{|W|}{|Q_Q|}$$

$$\epsilon = \frac{|W|}{|Q_Q|} = \frac{|Q_Q| - |Q_F|}{Q_Q} = 1 - \frac{|Q_F|}{Q_Q}$$

$$\epsilon = 1 - \frac{|Q_F|}{Q_Q} = 1 - \frac{T_F}{T_Q} \quad \frac{T_F}{T_Q} = \frac{|Q_F|}{|Q_Q|}$$

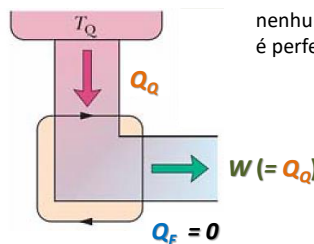
Máquina perfeita

$$\epsilon = 1$$

$|Q_F| = 0$
 $|Q_Q|$ é convertido totalmente em trabalho W
 100% de eficiência

nenhuma máquina térmica é perfeita:

Não existe uma série de processos cujo único resultado seja a conversão total em trabalho da energia contida em uma fonte de calor.



Exemplo 1: Máquina de Carnot

Uma máquina de Carnot opera entre as temperaturas $T_Q = 850 \text{ K}$ e $T_F = 300 \text{ K}$. A máquina realiza 1200 J de trabalho em cada ciclo, que leva 0,25 s.

(a) Qual é a eficiência da máquina?

$$\epsilon = 1 - \frac{|Q_F|}{Q_Q} = 1 - \frac{T_F}{T_Q}$$

$$\epsilon = 1 - \frac{300 \text{ K}}{850 \text{ K}}$$

$$\epsilon = 0,647$$

$$\epsilon \sim 65\%$$

Exemplo 1: Máquina de Carnot

Uma máquina de Carnot opera entre as temperaturas $T_Q = 850 \text{ K}$ e $T_F = 300 \text{ K}$. A máquina realiza 1200 J de trabalho em cada ciclo, que leva 0,25 s.

(b) Qual é a potência média da máquina?

$$P = \frac{\text{trabalho}}{\text{tempo}} = \frac{W}{t}$$

$$P = \frac{W}{t} = \frac{1200 \text{ J}}{0,25 \text{ s}} = 4800 \text{ W} = 4,8 \text{ kW}$$

Exemplo 1: Máquina de Carnot

Uma máquina de Carnot opera entre as temperaturas $T_Q = 850 \text{ K}$ e $T_F = 300 \text{ K}$. A máquina realiza 1200 J de trabalho em cada ciclo, que leva $0,25 \text{ s}$.

(c) Qual é a energia $|Q_Q|$ extraída em forma de calor da fonte quente a cada ciclo?

$$\epsilon = \frac{|W|}{|Q_Q|} \quad \epsilon = 0,647$$

$$|Q_Q| = \frac{|W|}{\epsilon}$$

$$|Q_Q| = \frac{1200 \text{ J}}{0,647} \Rightarrow |Q_Q| = 1855 \text{ J}$$

UPF FÍSICA Prof.ª. Ignez Caracelli 096059-A-FISICA PARA BIOTECNOLOGIA 85

Exemplo 1: Máquina de Carnot

Uma máquina de Carnot opera entre as temperaturas $T_Q = 850 \text{ K}$ e $T_F = 300 \text{ K}$. A máquina realiza 1200 J de trabalho em cada ciclo, que leva $0,25 \text{ s}$.

(d) Qual é a energia $|Q_F|$ liberada em forma de calor para fonte fria a cada ciclo?

$$W = |Q_Q| - |Q_F|$$

$$|Q_F| = |Q_Q| - W$$

$$|Q_F| = 1855 \text{ J} - 1200 \text{ J}$$

$$|Q_F| = 655 \text{ J}$$

UPF FÍSICA Prof.ª. Ignez Caracelli 096059-A-FISICA PARA BIOTECNOLOGIA 86

Exemplo 1: Máquina de Carnot

Uma máquina de Carnot opera entre as temperaturas $T_Q = 850 \text{ K}$ e $T_F = 300 \text{ K}$. A máquina realiza 1200 J de trabalho em cada ciclo, que leva $0,25 \text{ s}$.

(e) De quanto varia a entropia da substância de trabalho devido à energia recebida da fonte quente? De quanto varia a entropia da substância de trabalho devido à energia cedida à fonte fria?

$$\Delta S_Q = \frac{|Q_Q|}{T_Q} \Rightarrow \Delta S_Q = \frac{1855 \text{ J}}{850 \text{ K}} \Rightarrow \Delta S_Q = 2,18 \text{ J/K}$$

$$\Delta S_F = \frac{|Q_F|}{T_F} \Rightarrow \Delta S_F = \frac{655 \text{ J}}{300 \text{ K}} \Rightarrow \Delta S_F = -2,18 \text{ J/K}$$

$$\Delta S_{\text{ciclo}} = \Delta S_Q + \Delta S_F = 0$$

UPF FÍSICA Prof.ª. Ignez Caracelli 096059-A-FISICA PARA BIOTECNOLOGIA 87

Exemplo 2

Um inventor afirma que construiu um motor que apresenta uma eficiência de 75% quando opera entre as temperaturas de ebulição e de congelamento da água. Isso é possível?

Não existe nenhuma máquina térmica real cuja eficiência seja maior ou igual à de uma máquina de Carnot operando entre as mesmas temperaturas.

Cálculo da eficiência da máquina de Carnot operando entre as mesmas temperaturas.

$$\epsilon = 1 - \frac{T_F}{T_Q} \Rightarrow \epsilon = 1 - \frac{0+273 \text{ K}}{100+273 \text{ K}} = 0,268$$

$\epsilon \sim 27\%$ não é possível $\epsilon \sim 75\%$

UPF FÍSICA Prof.ª. Ignez Caracelli 096059-A-FISICA PARA BIOTECNOLOGIA 88

Máquinas de Stirling

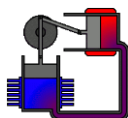
O motor de Stirling foi inventado em 1816 pelo pastor escocês Robert Stirling.

Objetivo: substituir a máquina a vapor (motor a vapor).

Máquinas a vapor: explodiam.
Os acidentes deixavam operários mortos

Eficiência: $\epsilon_{\text{Stirling}} \sim 40\% - 45\%$

Eficiência: $\epsilon_{\text{vapor}} \sim 20\% - 30\%$



UPF FÍSICA Prof.ª. Ignez Caracelli 096059-A-FISICA PARA BIOTECNOLOGIA 89

Máquina de Stirling ideal

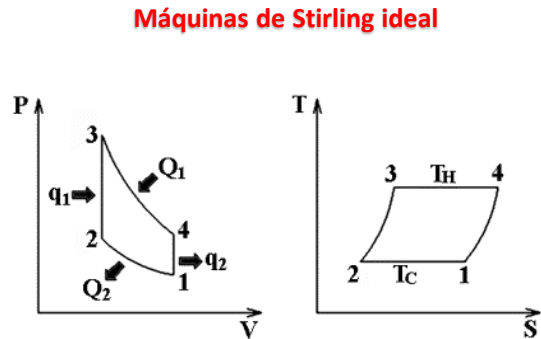
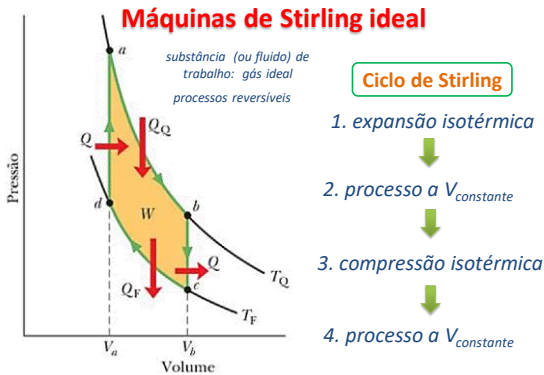
Ciclo de Carnot

1. expansão isotérmica
2. expansão adiabática
3. compressão isotérmica
4. compressão adiabática

Ciclo de Stirling

1. expansão isotérmica
2. processo a $V_{\text{constante}}$
3. compressão isotérmica
4. processo a $V_{\text{constante}}$

UPF FÍSICA Prof.ª. Ignez Caracelli 096059-A-FISICA PARA BIOTECNOLOGIA 90



Máquinas de Stirling

Vantagens

- ➔ é um gerador
- ➔ é pouco poluente pois a combustão é contínua permitindo uma queima mais completa e eficiente do combustível.
- ➔ é muito silencioso e apresenta baixa vibração (não há "explosão")

Máquinas de Stirling

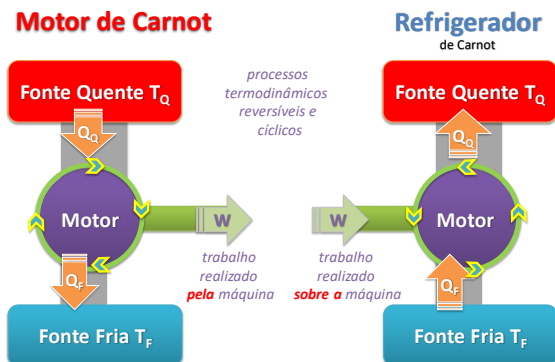
Vantagens

- ➔ É verdadeiramente multi-combustível, pode utilizar praticamente qualquer fonte energética: gasolina, etanol, metanol, gás natural, óleo diesel, biogás, GLP, energia solar, calor geotérmico e outros.

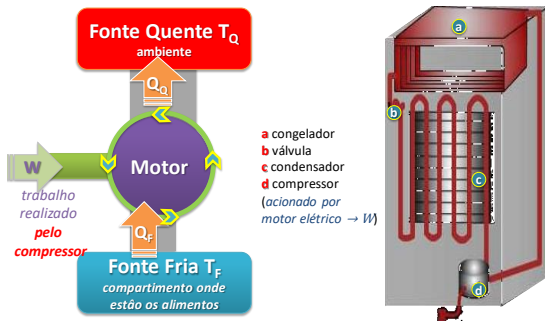
Máquinas de Stirling

Vantagens

- ➔ Basta gerar uma diferença de temperatura significativa entre a câmara quente e a câmara fria para produzir trabalho
- (quanto maior a diferença de temperatura, maior é a eficiência do processo e mais compacto o motor).



Refrigeradores (bomba de calor)



Refrigeradores

energia transferida $\rightarrow Q_F$

energia recebida: trabalho $\rightarrow W$

a ideia de eficiência é transferir a maior quantidade de energia com menor quantidade de trabalho

eficiência do refrigerador = $\frac{\text{energia transferida}}{\text{trabalho}}$

$K = \frac{|Q_F|}{|W|}$ coeficiente de desempenho

Refrigeradores

$K = \frac{|Q_F|}{|W|}$ coeficiente de desempenho

para em Refrigerador de Carnot: $K_{Carnot} = \frac{|Q_F|}{|W|}$

1a. Lei da Termodinâmica: $W = |Q_Q| - |Q_F|$

$K_{Carnot} = \frac{|Q_F|}{|Q_Q| - |Q_F|}$ $\frac{T_F}{T_Q - T_F}$

Refrigeradores

➔ aparelhos domésticos de ar-condicionado, $K \approx 2,5$

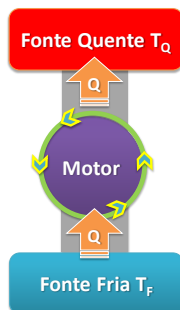
➔ geladeiras domésticas, $K \approx 5$

$\Delta T = |T_Q - T_F|$

$K_{Carnot} = \frac{T_F}{T_Q - T_F}$

Refrigerador perfeito

refrigerador perfeito : transfere energia na forma de calor Q de uma fonte fria para uma fonte quente sem necessidade de trabalho.

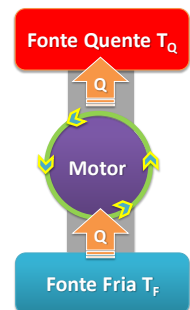


Refrigerador perfeito

equipamento opera em ciclos

entropia é função de estado

em um ciclo: $\Delta S = 0$



Refrigerador perfeito

equipamento opera em ciclos
 ↓
 entropia é função de estado
 ↓
 em um ciclo: $\Delta S = 0$

$S_{\text{fonte quente}} = \frac{Q}{T_Q}$
 $S_{\text{fonte fria}} = -\frac{Q}{T_F}$

$\Delta S = -\frac{|Q|}{T_F} + \frac{|Q|}{T_Q}$

Refrigerador perfeito

$S_{\text{fonte quente}} = \frac{Q}{T_Q}$
 $S_{\text{fonte fria}} = -\frac{Q}{T_F}$

$\Delta S = -\frac{|Q|}{T_F} + \frac{|Q|}{T_Q}$

$\Delta S < 0$ → não existe refrigerador perfeito
 viola a 2a. Lei da termodinâmica

Refrigerador perfeito

$S_{\text{fonte quente}} = \frac{Q}{T_Q}$
 $S_{\text{fonte fria}} = -\frac{Q}{T_F}$

$\Delta S = -\frac{|Q|}{T_F} + \frac{|Q|}{T_Q}$

$\Delta S < 0$ → não existe refrigerador perfeito
 viola a 2a. Lei da termodinâmica

necessário

Outra formulação para 2a. Lei da Termodinâmica

Não existe uma série de processos cujo único resultado seja transferir energia na forma de calor de uma fonte fria para uma fonte quente.

A Eficiência de Máquinas Térmicas Reais

máquina de Carnot opera entre T_Q e T_F

máquina real opera entre T_Q e T_F

ϵ_{Carnot}

$\epsilon_{\text{máquina real}} = \epsilon$

$\epsilon_{\text{Carnot}} > \epsilon$

se $\epsilon_{\text{Carnot}} < \epsilon$ viola a 2a. Lei da termodinâmica

Visão Estatística da Entropia

Capítulo 19

propriedades macroscópicas de um gás (V, T, p) ↔ comportamento das moléculas do gás

pressão p exercida por um gás sobre as paredes de um recipiente ↔ transferência de momento das moléculas do gás para as paredes do recipiente por meio de colisões

campo de estudo conhecido como mecânica estatística.