

# **Física 3**

(1/2016)

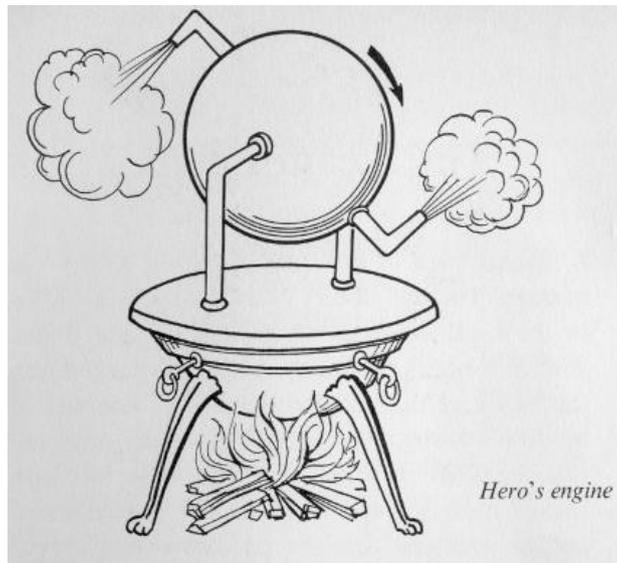
## *Máquinas Térmicas*

Instrutor: Carlos Eduardo Souza (Cadu)  
carlooseduardosouza@id.uff.br

Site: [cursos.if.uff.br/fisica3-0116/](http://cursos.if.uff.br/fisica3-0116/)

# Máquinas Térmicas

Uma máquina Térmica é um dispositivo que **opera em ciclos** convertendo calor em trabalho útil.

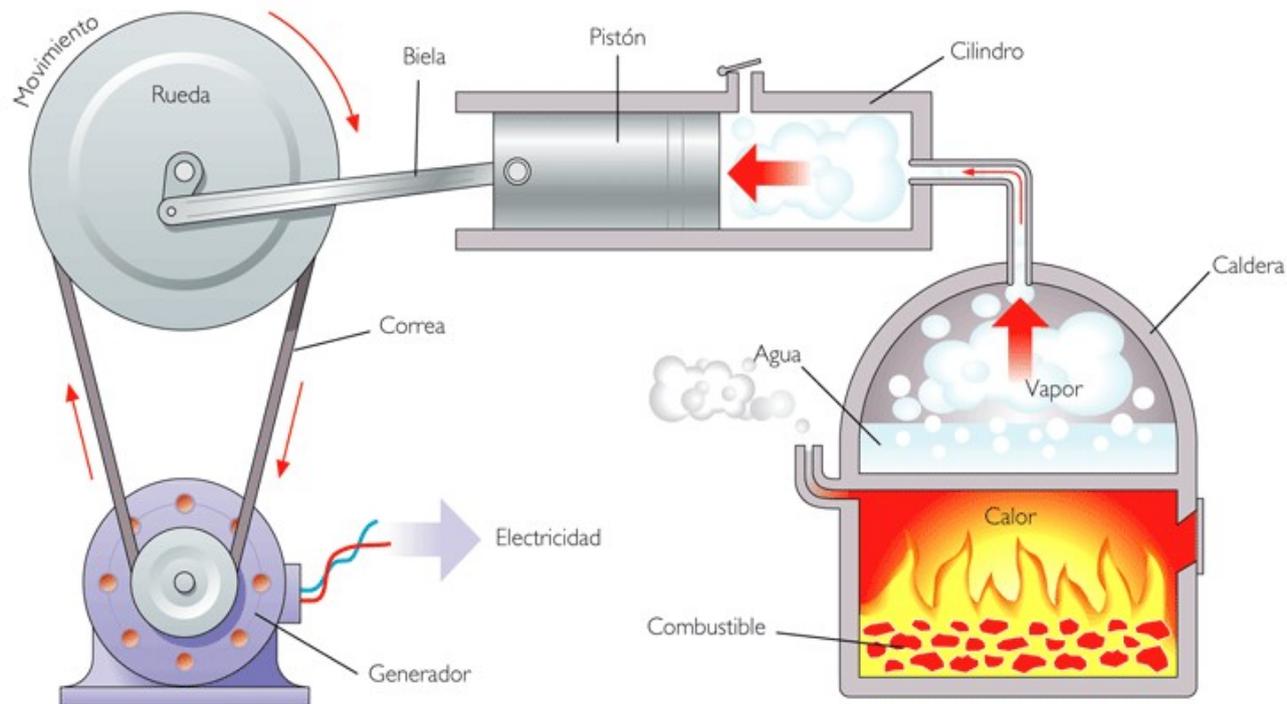


→ Necessita de dois reservatórios térmicos e de um fluido de trabalho

Ver vídeo → [https://www.youtube.com/watch?v=u2CbJNz\\_fFM](https://www.youtube.com/watch?v=u2CbJNz_fFM)

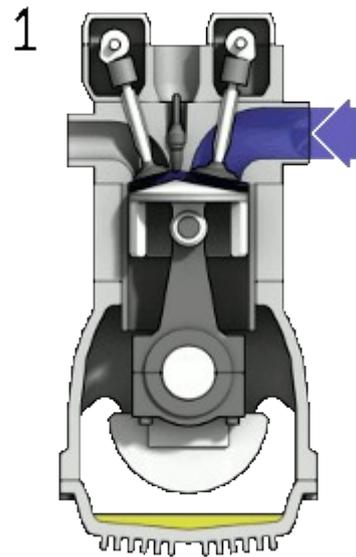
# Máquinas Térmicas

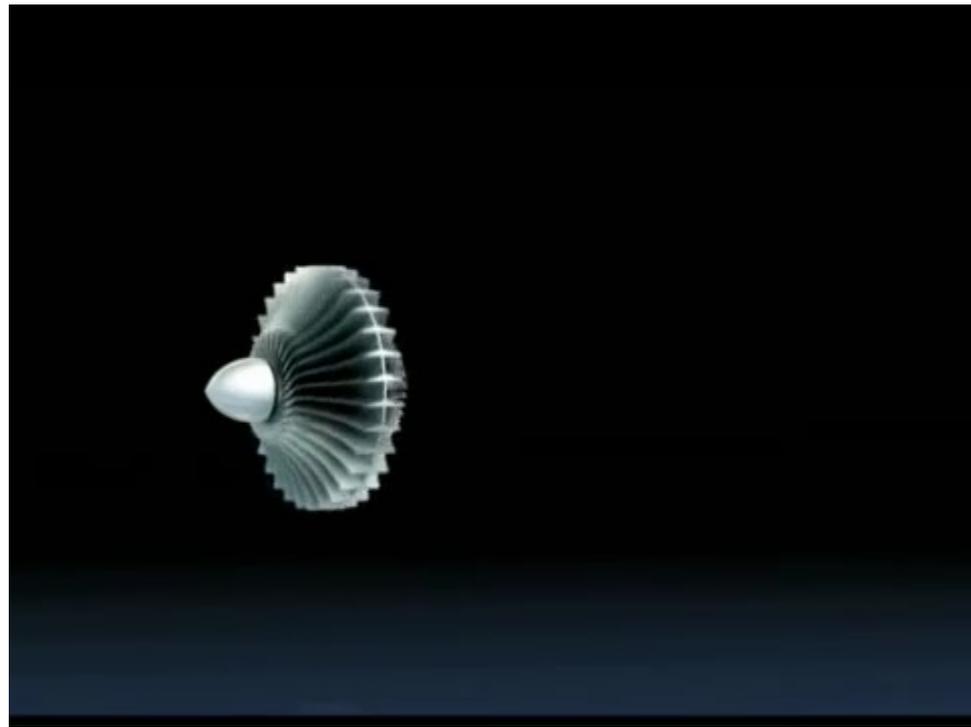
Exemplo: Usina a vapor



# Máquinas Térmicas

Exemplo: Motor 4 tempos





# Máquinas Térmicas

## *Transformando Calor em Trabalho*

OBS: No estudo de termodinâmica, em especial das Máquinas térmicas, é muito útil trabalharmos com a ideia de **trabalho realizado pelo sistema**, ao invés do **trabalho realizado sobre o sistema**.

$$W^{pelo} \equiv -W^{sobre} = + \int P dv$$

- compressão:  $W^{sobre} > 0$  e  $W^{pelo} < 0$  (a energia entra no sistema)
- expansão:  $W^{sobre} < 0$  e  $W^{pelo} > 0$  (a energia sai do sistema)

# Máquinas Térmicas

## *Transformando Calor em Trabalho*

Com a nova definição de trabalho, a 1ª Lei da Termodinâmica fica

$$Q = W^{\text{pelo}} + \Delta E^{\text{tér}}m$$

# Máquinas Térmicas

## *Transformando Calor em Trabalho*

Com a nova definição de trabalho, a 1ª Lei da Termodinâmica fica

$$Q = W^{\text{pelo}} + \Delta E^{\text{tér}}m$$

Ex.: Compressão Isotérmica:

$$\Delta E^{\text{tér}}m = 0 \rightarrow Q = W^{\text{pelo}} < 0$$

O calor sai do sistema na compressão isotérmica.

# Máquinas Térmicas

## *Transformando Calor em Trabalho*

Com a nova definição de trabalho, a 1ª Lei da Termodinâmica fica

$$Q = W^{\text{pelo}} + \Delta E^{\text{tér}}m$$

Em um ciclo:  $\Delta E^{\text{tér}}m = 0$

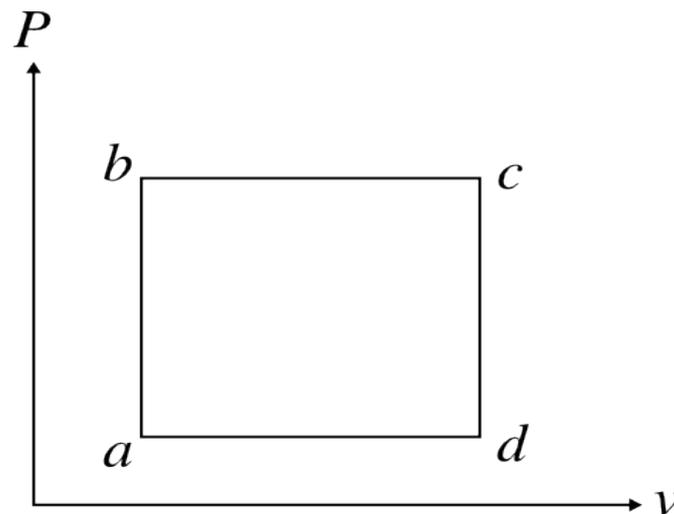
$$\rightarrow Q^{\text{ciclo}} = W^{\text{pelo}} = W^{\text{útil}}$$

$$\rightarrow Q^{\text{ciclo}} = Q^{\text{entra}} - Q^{\text{sai}}$$

# Máquinas Térmicas

## *Transformando Calor em Trabalho*

Consideremos um dispositivo cuja a substância de trabalho é um gás ideal que descreve o ciclo abaixo

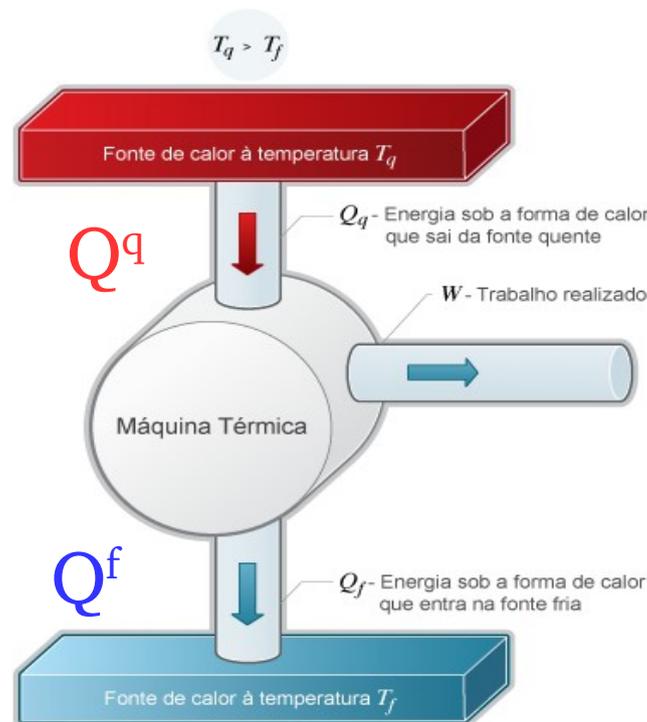


Determine o sinal dos calores em cada um dos trechos do ciclo.

# Máquinas Térmicas

*Transformando Calor em Trabalho*

Diagramas de transferência de energia



$Q^q$  : calor trocado c/  
reservatório quente

$Q^f$  : calor trocado c/  
reservatório frio

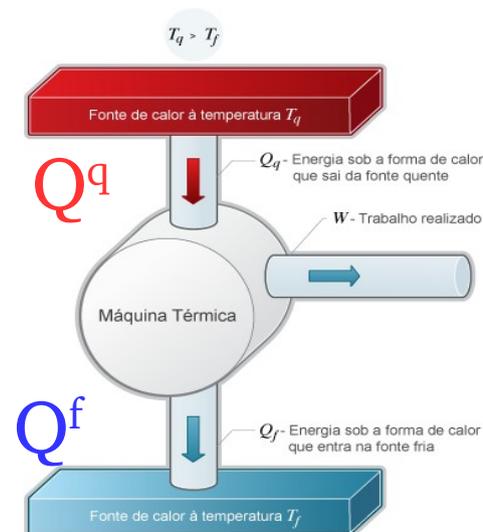
# Máquinas Térmicas

## *Transformando Calor em Trabalho*

Na prática, gostaríamos de que a máquina térmica realizasse a máxima quantidade de trabalho com a mínima quantidade de calor...

Rendimento térmico

$$\eta = W^{\text{útil}} / Q^{\text{q}}$$

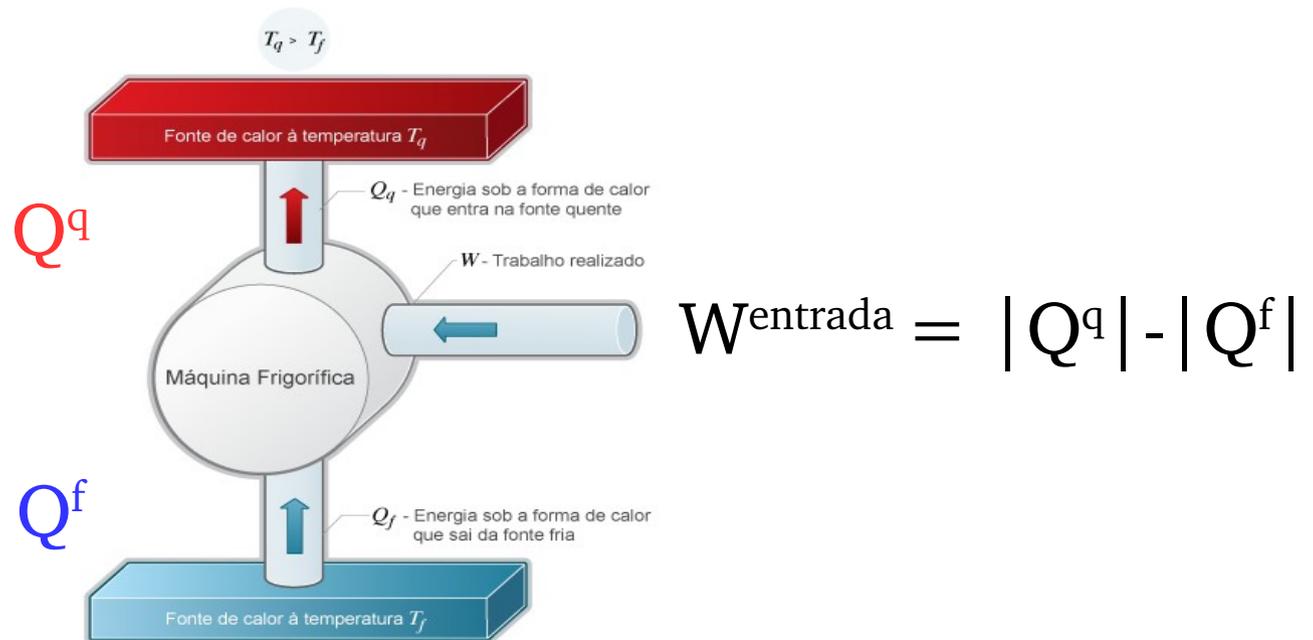


$$W^{\text{útil}} = Q^{\text{q}} - Q^{\text{f}}$$

# Máquinas Térmicas

*Transformando Trabalho em Calor*

*Refrigerador*



# Máquinas Térmicas

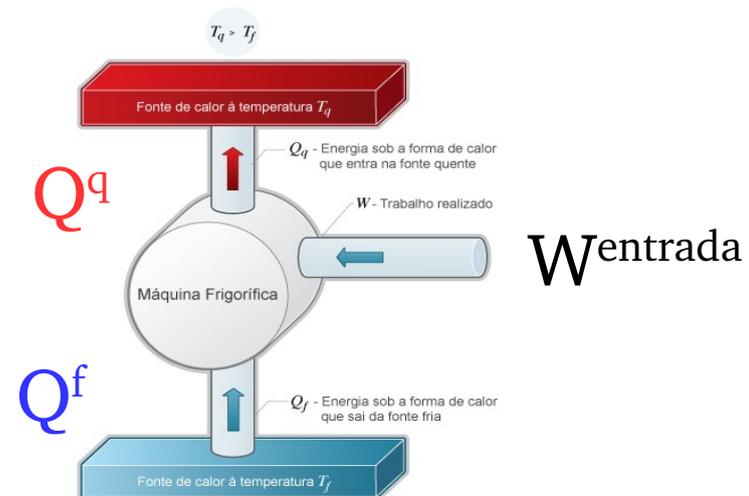
## *Transformando Calor em Trabalho*

### Refrigerador

Na prática, gostaríamos de que o refrigerador retirasse o máximo de calor do reservatório frio com o mínimo de trabalho...

**Coeficiente de desempenho:**

$$K = Q^f / W^{\text{entrada}}$$

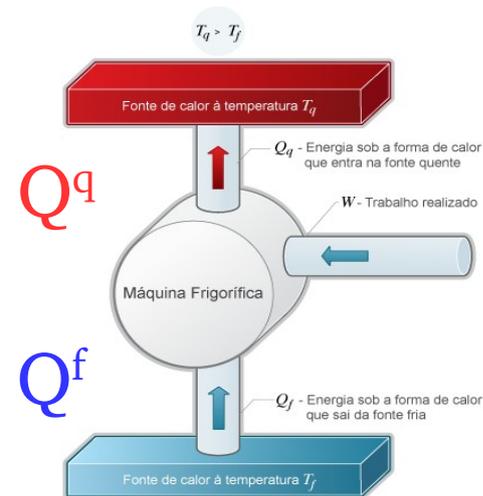
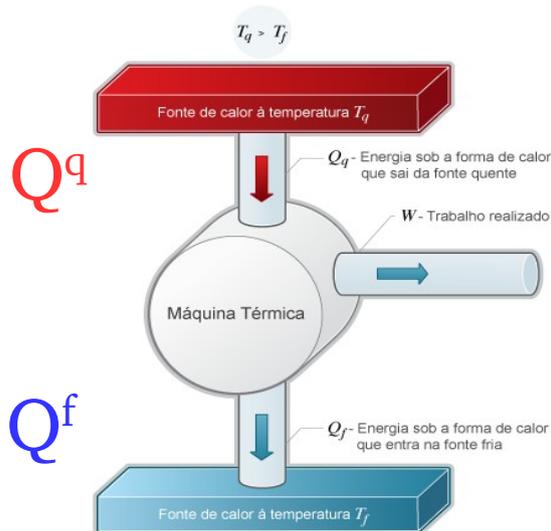


# Máquinas Térmicas

## *Transformando Calor em Trabalho*

Obs: Para máquinas e refrigeradores,

$|Q^q|$  é sempre maior que  $|Q^f|$   
(em módulo!!)



# Máquinas Térmicas

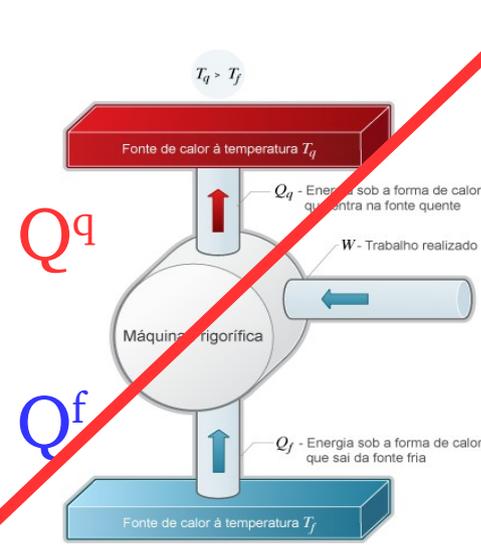
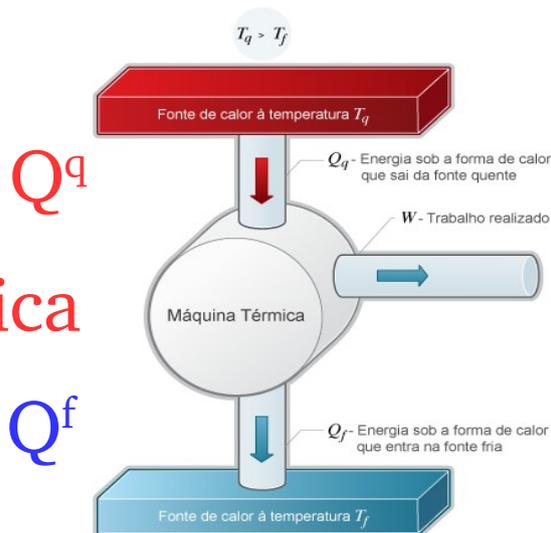
$|Q^q|$  é sempre maior que  $|Q^f|$

Se, em um ciclo,  $W^{\text{ciclo}} = W^{\text{pelo}} > 0$ ,

$$Q^q > Q^f > 0.$$

O sistema **recebe** calor do reservatório quente.

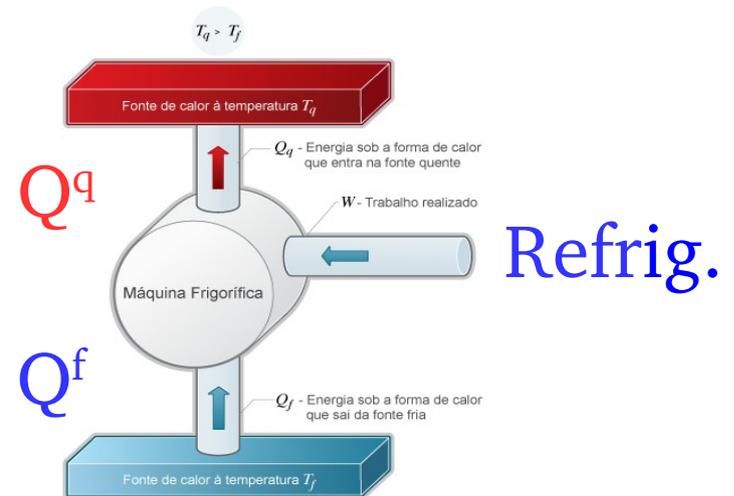
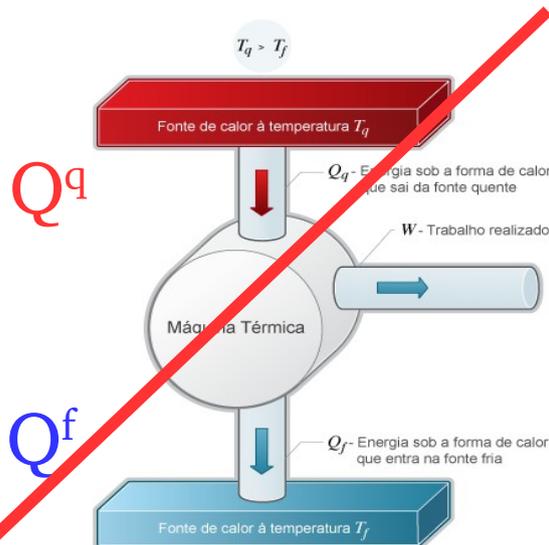
Máq. Térmica



# Máquinas Térmicas

$|Q^q|$  é sempre maior que  $|Q^f|$

Se, em um ciclo,  $W^{\text{ciclo}} = W^{\text{pelo}} < 0$ , o sistema **cede** calor ao reservatório quente, podemos ter um refrigerador.



# Física 3

## Teste Conceitual -2

1- É possível transferir calor de um reservatório quente para um reservatório frio?

- A) Não, isto é proibido pela segunda lei da termodinâmica
- B) Sim, isto ocorre naturalmente
- C) Sim, mas trabalho deve ser realizado
- D) Teoricamente sim, mas isso ainda não pode ser realizado

# Física 3

## Teste Conceitual

### 2- Uma máquina térmica

- A) converte calor de entrada em uma quantidade equivalente de trabalho
- B) converte trabalho em uma quantidade equivalente de calor
- C) recebe calor, realiza trabalho, e perde calor
- D) faz trabalho positivo em um sistema para transferir calor de um reservatório a alta temperatura para outro reservatório a baixa temperatura.

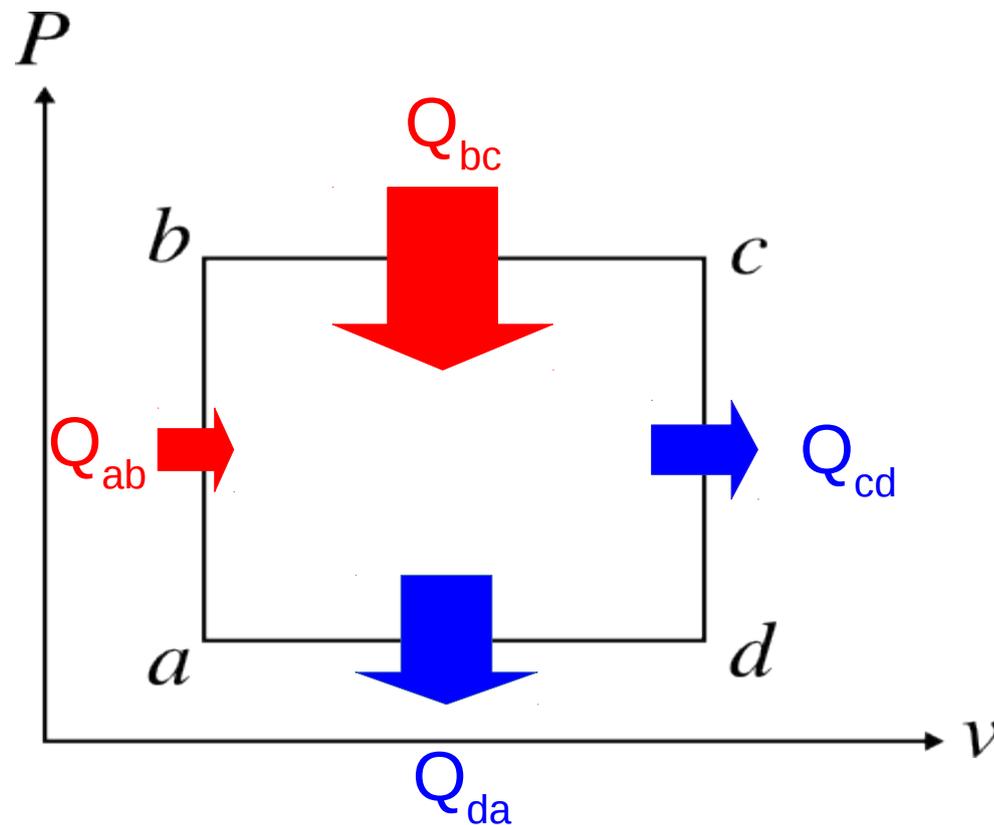
O sentido de execução do ciclo define se temos máquina térmica ou refrigerador?

O sentido de execução do ciclo define se temos máquina térmica ou refrigerador?

Olhemos o Exemplo 19.2!

O sentido de execução do ciclo define se temos máquina térmica ou refrigerador?

Ex.: 19.2!



$$Q_{ab} = 5 \text{ kJ}$$

$$Q_{bc} = 21 \text{ kJ}$$

$$Q_q = +26 \text{ kJ}$$

$$Q_{cd} = -15 \text{ kJ}$$

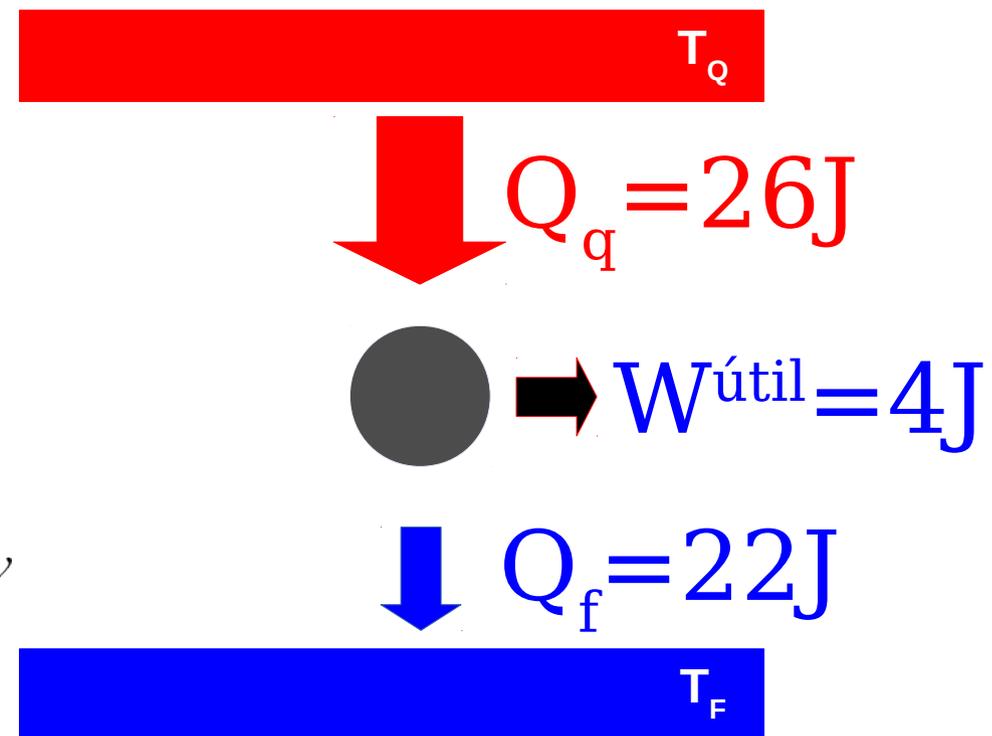
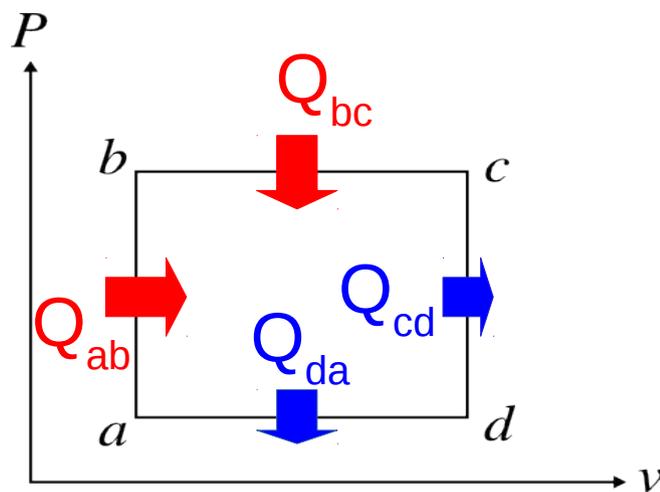
$$Q_{da} = -7 \text{ kJ}$$

$$Q_f = -22 \text{ kJ}$$

$$W^{\text{ciclo}} = W^{\text{pelo}} = +4 \text{ kJ}$$

O sentido de execução do ciclo define se temos máquina térmica ou refrigerador?

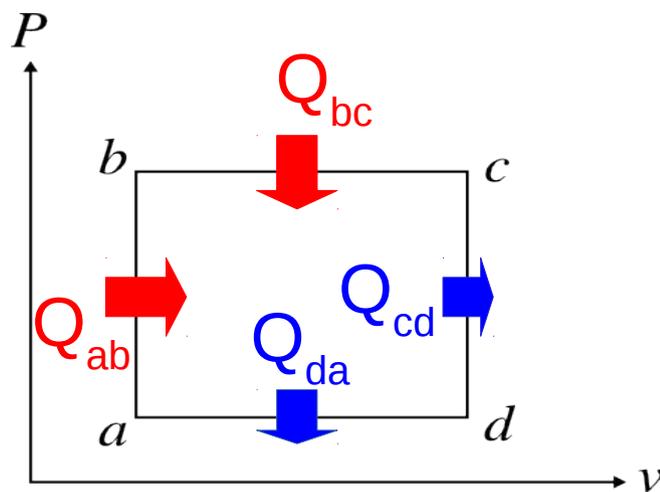
**Ex.: 19.2!**



Sentido Horário  $\Rightarrow$  Máq. Térmica

O sentido de execução do ciclo define se temos máquina térmica ou refrigerador?

**Ex.: 19.2!**



$T_Q = T_C$

$Q_q = 26\text{J}$

$W^{\text{útil}} = 4\text{J}$

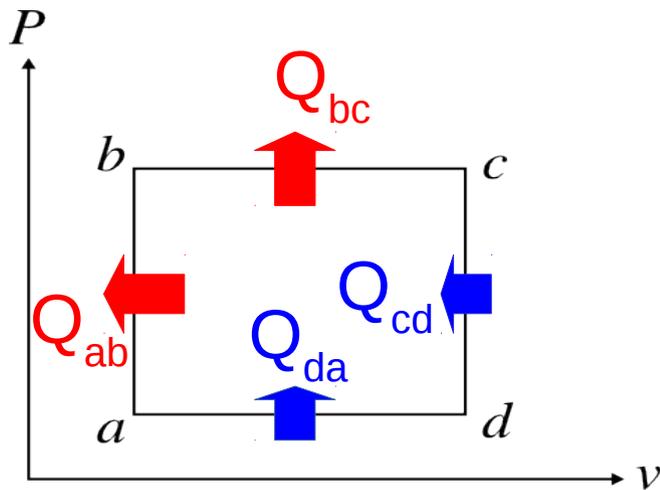
$Q_f = 22\text{J}$

$T_F = T_A$

Sentido Horário  $\Rightarrow$  Máq. Térmica

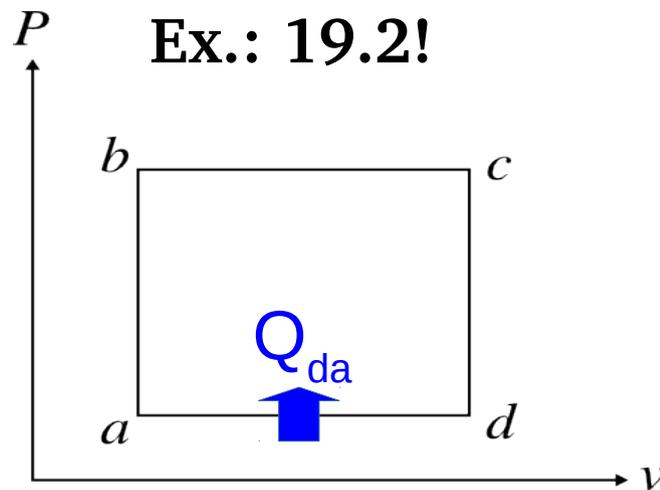
O sentido de execução do ciclo define se temos máquina térmica ou refrigerador?

Ex.: 19.2!



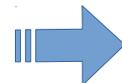
Sentido anti-Horário  $\Rightarrow$  ???

Em um refrigerador, o calor que entra no sistema vem do reservatório frio. O sistema deve sempre ter  $T$  menor que o reservatório.



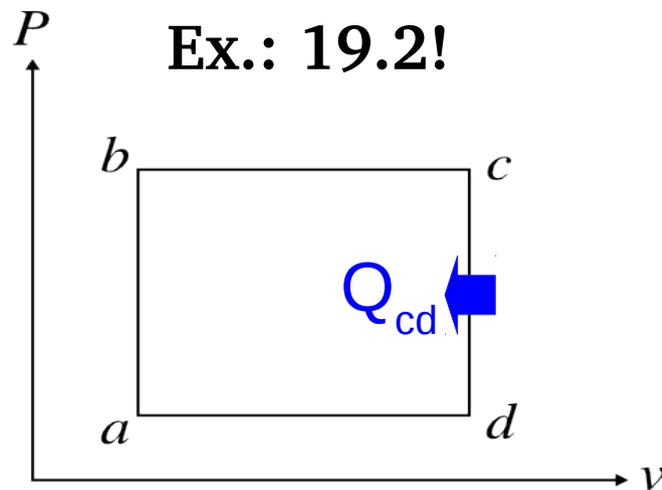
$$T_f \geq T_d = 900\text{K}$$

Sentido anti-Horário



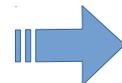
???

Em um refrigerador, o calor que entra no sistema vem do reservatório frio. O sistema deve sempre ter  $T$  menor que o reservatório.



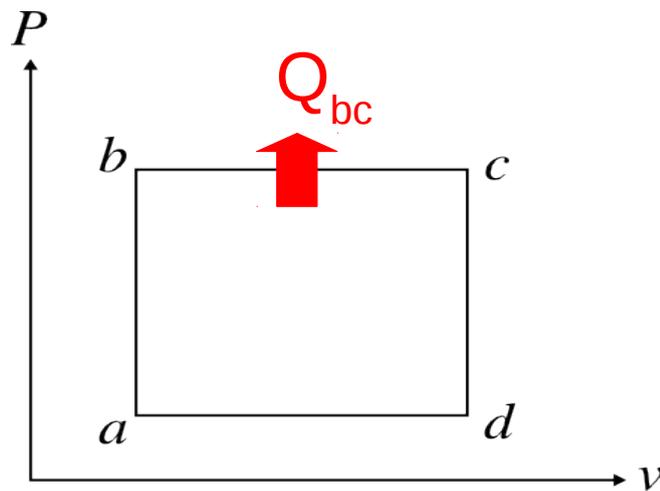
$$T_f \geq T_c = 2700\text{K}$$

Sentido anti-Horário



???

Em um refrigerador, o calor que sai do sistema vai pro reservatório quente. O sistema deve sempre ter T maior a T do reservatório quente.

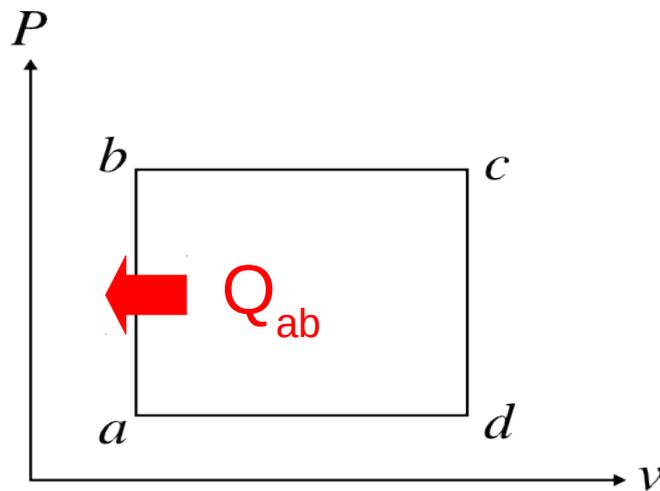


$$T_q \leq T_b = 900K$$

Ex.: 19.2!

Sentido anti-Horário ➡ ???

Em um refrigerador, o calor que sai do sistema vai pro reservatório quente. O sistema deve sempre ter T maior a T do reservatório quente.



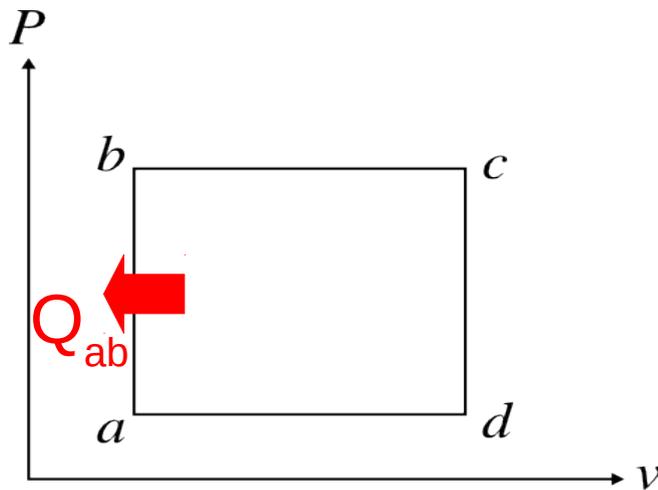
$$T_q \leq T_a = 300K$$

**Ex.: 19.2!**

Sentido anti-Horário  $\Rightarrow$  ???

O sentido de execução do ciclo define se temos máquina térmica ou refrigerador?

**Ex.: 19.2!**



Em resumo,

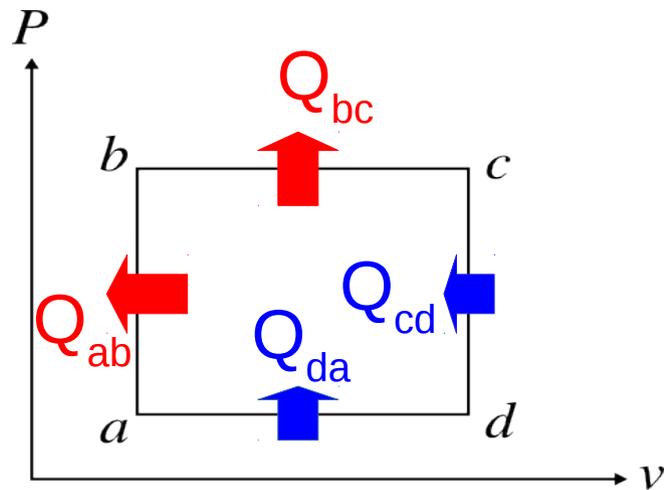
$$T_Q \leq T_a = 300\text{K}$$

$$T_F \leq T_c = 2700\text{K}$$

???

O sentido de execução do ciclo define se temos máquina térmica ou refrigerador?

Ex.: 19.2!



$$T_Q = 300\text{K}$$

$$\uparrow Q_q = 26\text{J}$$

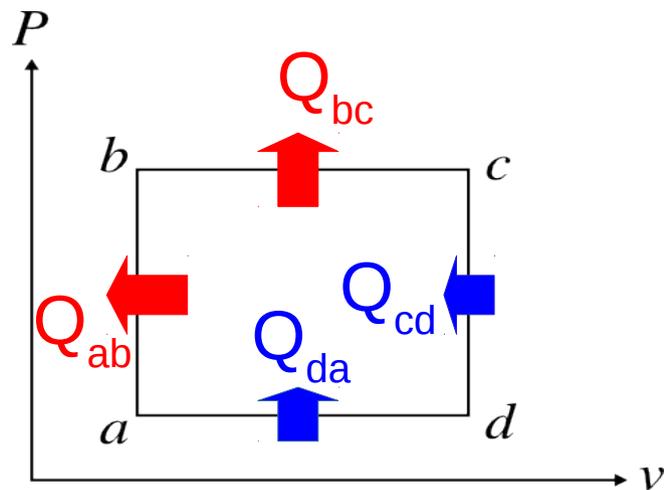
$$W_{\text{entrada}} = 4\text{J} \rightarrow \bullet$$

$$\uparrow Q_f = 22\text{J}$$

$$T_F = 2700\text{K}$$

O sentido de execução do ciclo define se temos máquina térmica ou refrigerador?

Ex.: 19.2!



$$T_Q = 300\text{K}$$

$$\uparrow Q_q = 26\text{J}$$

$$W_{\text{entrada}} = 4\text{J} \rightarrow \bullet$$

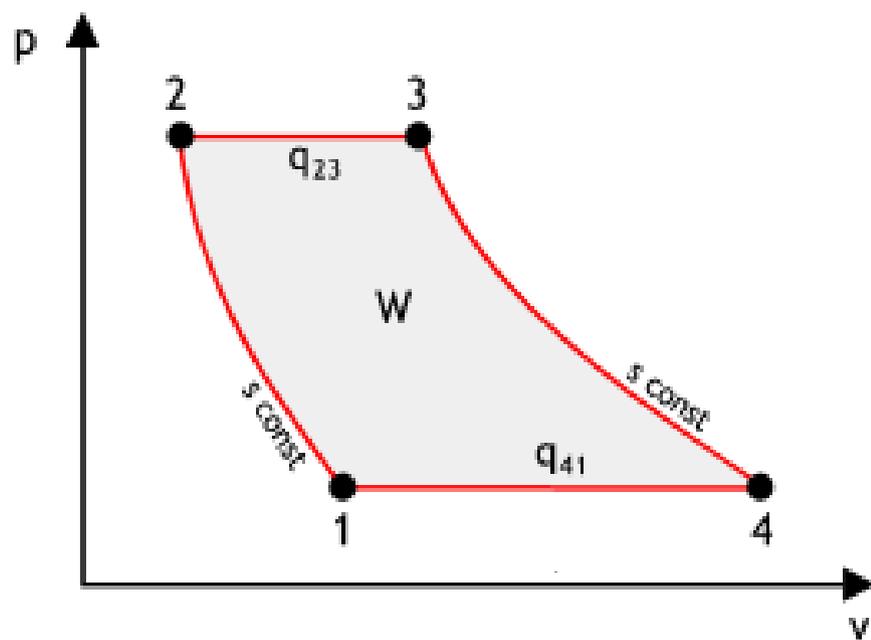
$$\uparrow Q_f = 22\text{J}$$

$$T_F = 2700\text{K}$$

Um dispositivo que joga calor pro reservatório frio!!!  
Não tem serventia!

O sentido de execução do ciclo define se temos máquina térmica ou refrigerador?

**Ex.: 19.3! Ciclo de Brayton**



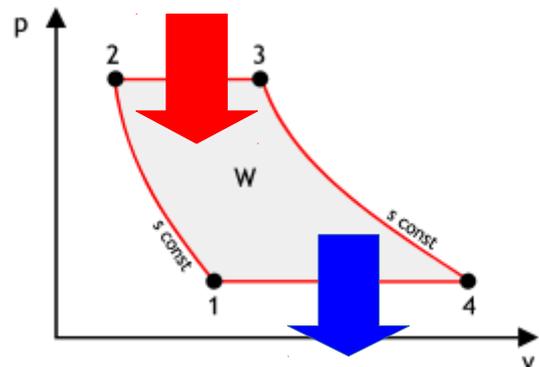
O sentido de execução do ciclo define se temos máquina térmica ou refrigerador?

**Ex.: 19.3! Ciclo de Brayton**

$$T_Q \geq T_3 = 203\text{K}$$

$$T_F \leq T_1 = 200\text{K}$$

$$Q_{12} = Q_Q = +14,3\text{J}$$



$$Q_{41} = Q_F = -7,5\text{J}$$

Sentido horário



Máquina

$$W^{\text{ciclo}} = W^{\text{pelo}} = +6,8\text{J}$$

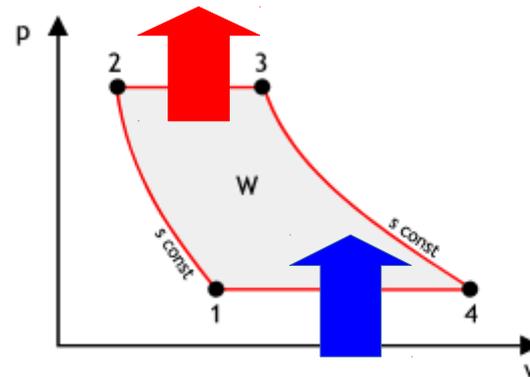
O sentido de execução do ciclo define se temos máquina térmica ou refrigerador?

**Ex.: 19.3! Ciclo de Brayton**

$$T_Q \leq T_2 = 381\text{K}$$

$$T_F \geq T_4 = 250\text{K}$$

$$Q_{12} = Q_Q = -14,3\text{J}$$



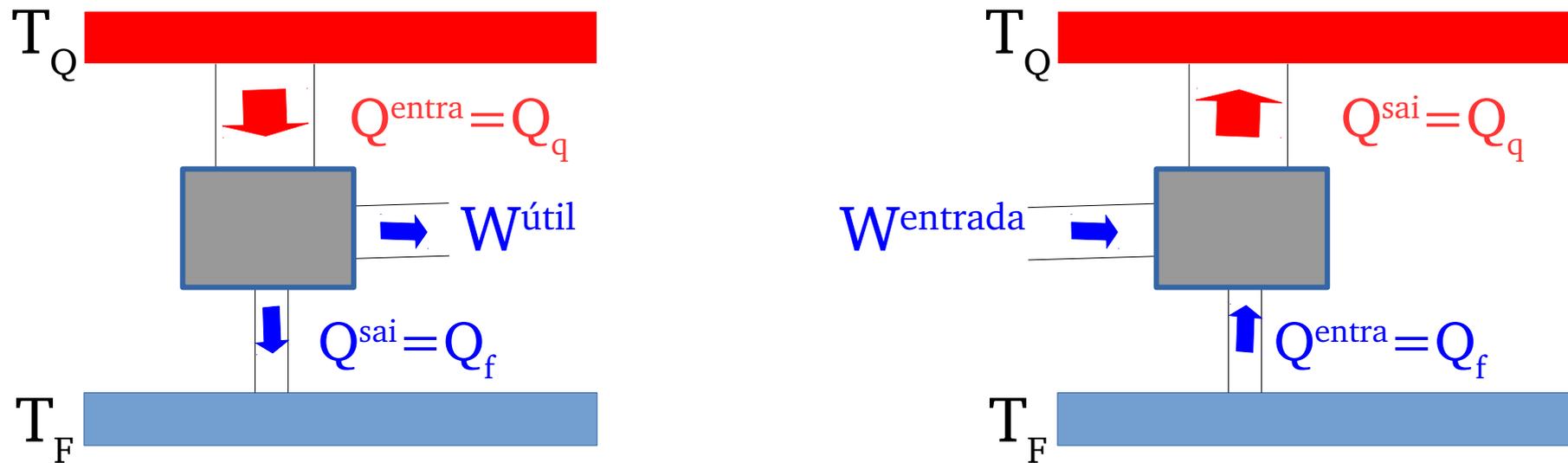
$$Q_{41} = Q_F = +7,5\text{J}$$

$$W^{\text{ciclo}} = W^{\text{pelo}} = -6,8\text{J}$$

A 2ª Lei da Termodinâmica proíbe a construção de máquinas térmicas perfeitas.

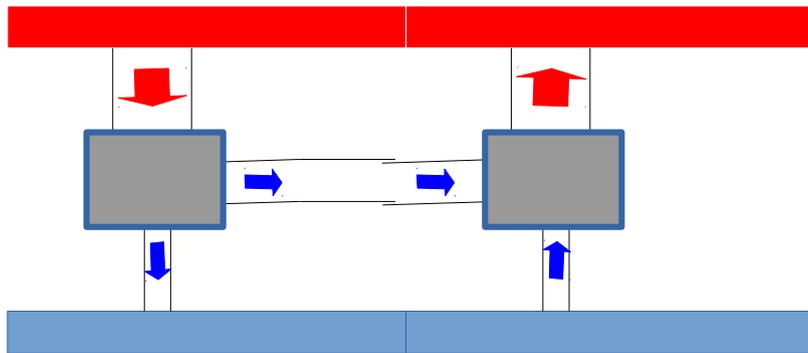
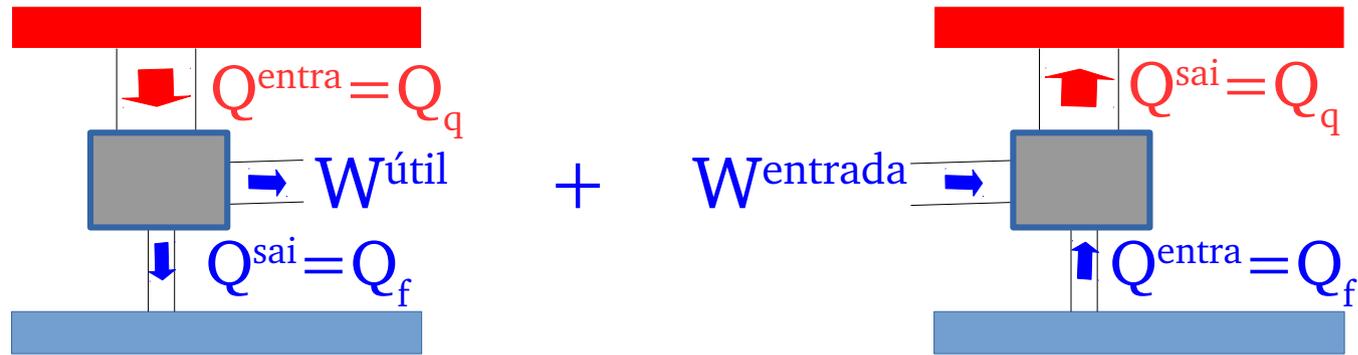
- 
- 
-

## Máquina Térmica Perfeitamente Reversível

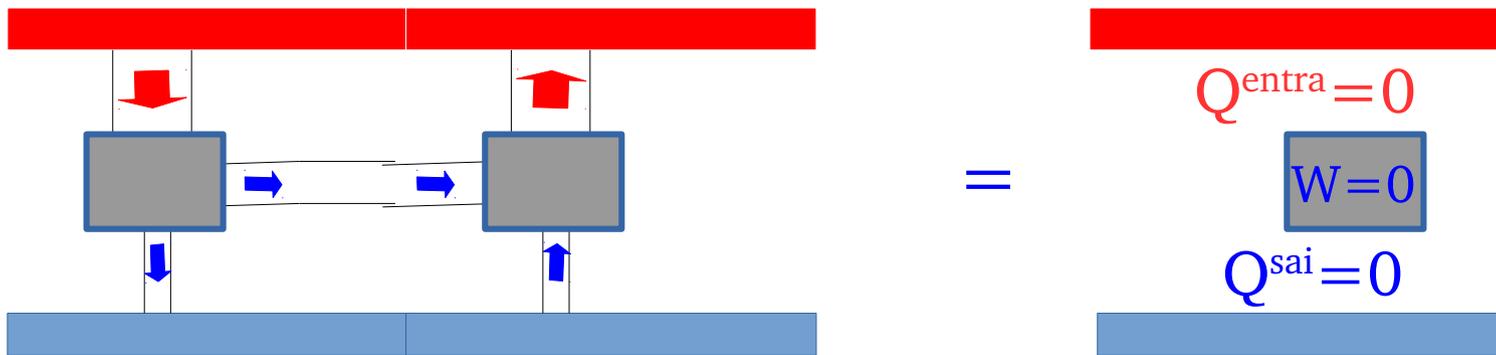
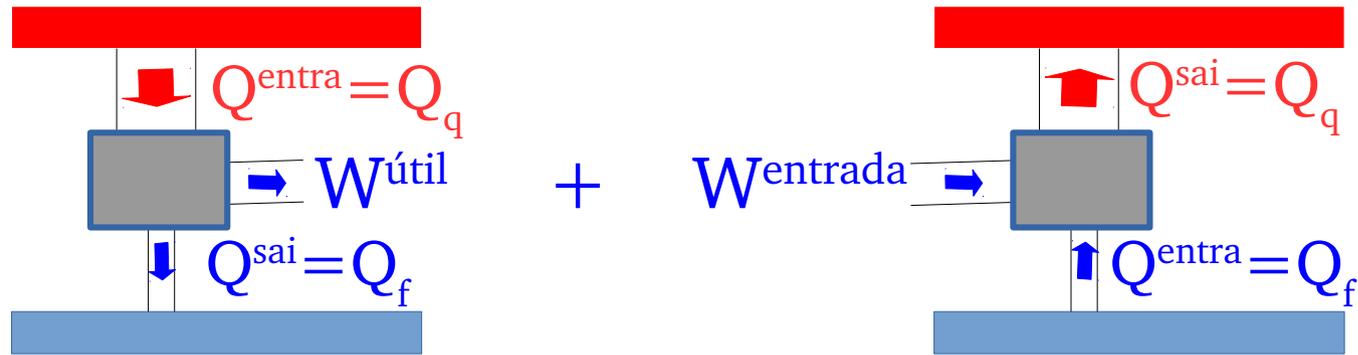


Um dispositivo que possa ser operado como uma máquina térmica ou como um refrigerador entre os mesmos reservatórios, efetuando as mesmas transferências de energia, apenas em sentido inverso.

# Máquina Térmica Perfeitamente Reversível



# Máquina Térmica Perfeitamente Reversível



·  
·  
·

A 2ª Lei da Termodinâmica proíbe a construção de máquinas térmicas perfeitas.

## Máquina Térmica Perfeitamente Reversível

→ Nenhuma Máquina Térmica pode ser mais eficiente que uma Máquina Térmica Perfeitamente Reversível.

## **Máquina Térmica Perfeitamente Reversível**

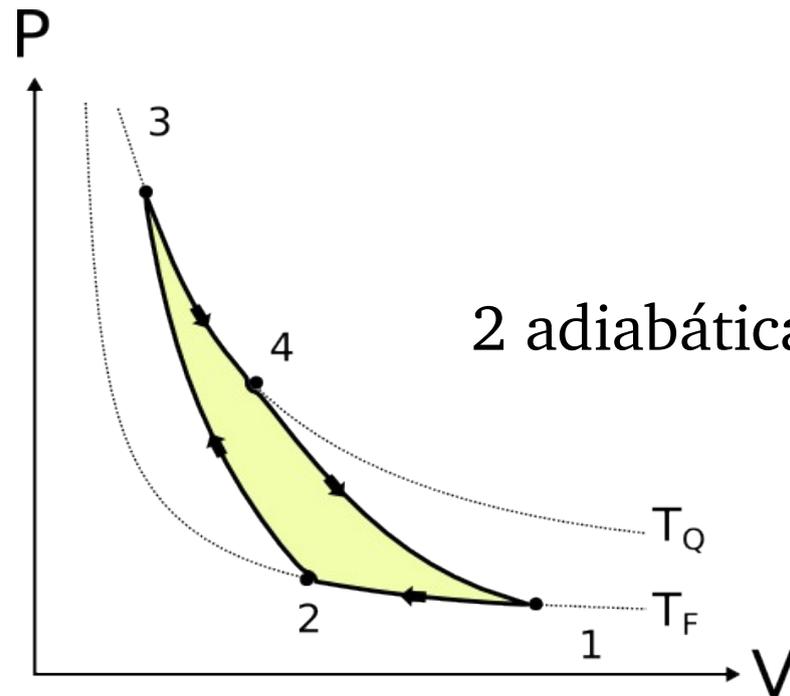
Em teoria, uma Máq. Térm. Perfeitamente Reversível deve satisfazer:

- Interações Mecânicas com  $Q=0$  e sem atrito
- Transições Isotérmicas ( $\Delta E^{\text{térm}}=0$ )

A Máq. Térm. Perfeitamente Reversível é conhecida como  
**Máquina de Carnot**

**OBS: O conceito de Máquina Térmica Perfeitamente Reversível ou Ciclo de Carnot independe da substância de trabalho.**

# Máquina Térmica Perfeitamente Reversível - Ciclo de Carnot

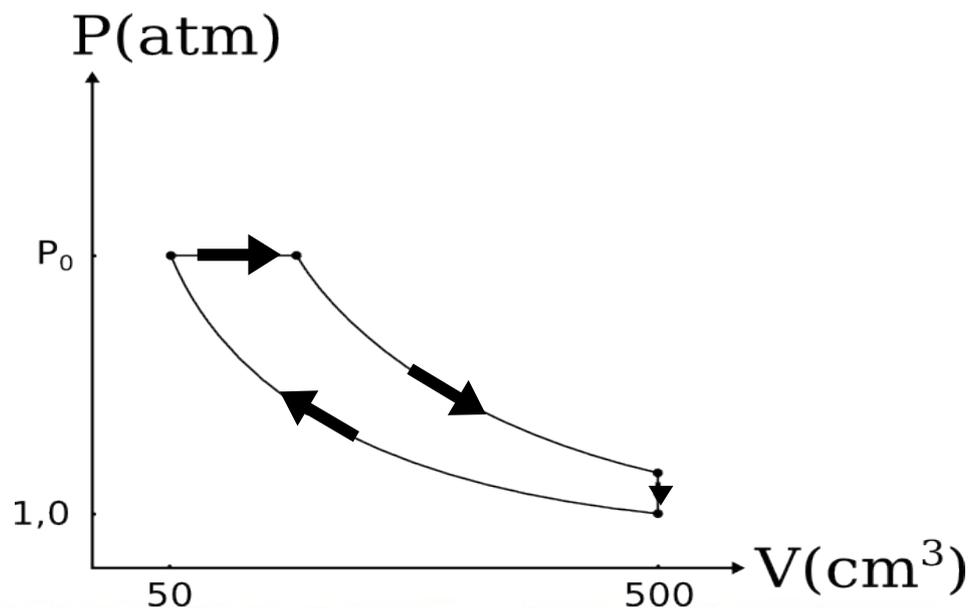


2 adiabáticas e 2 isothermas

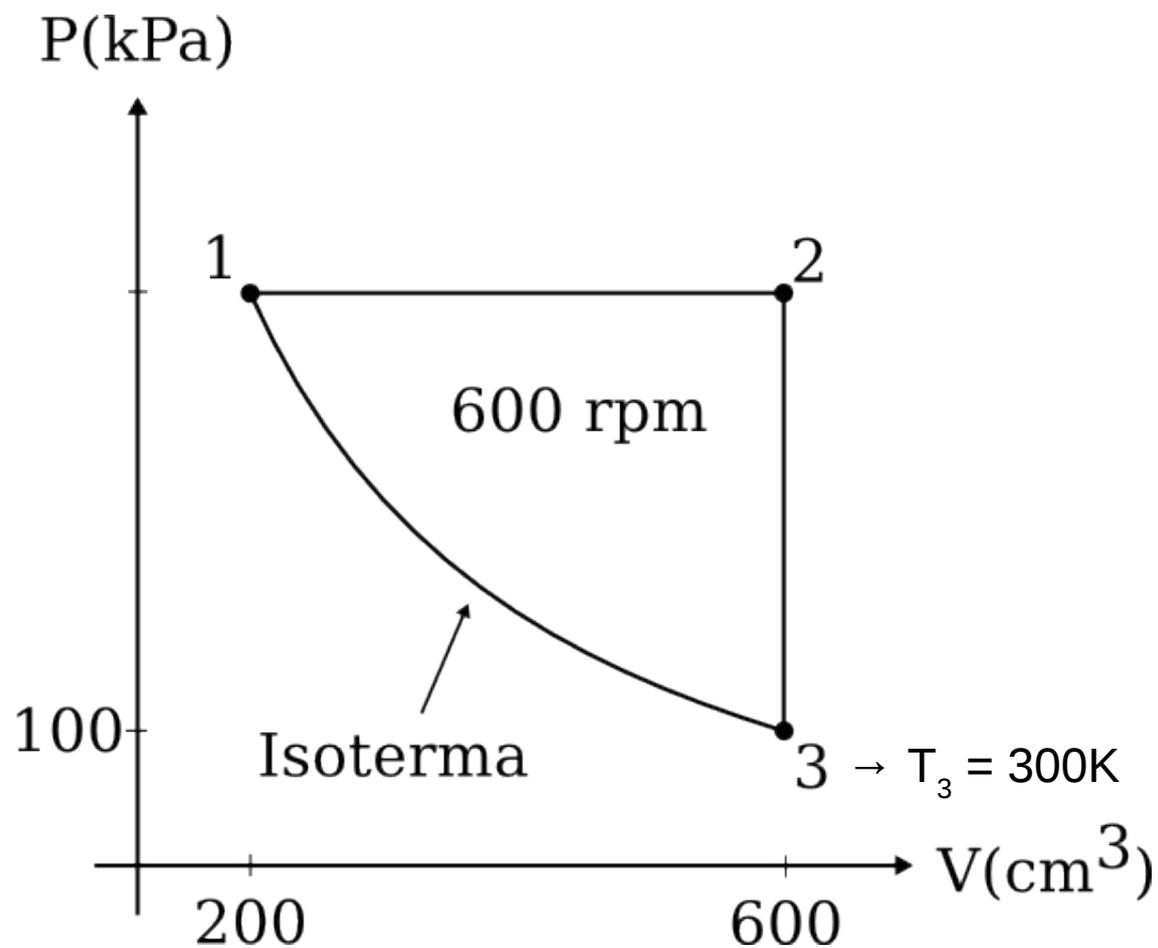
$$\eta_{\text{Carnot}} = 1 - T_F / T_Q$$

**Problema:** O ciclo mostrado representa o ciclo do motor a Diesel que possui uma razão de compressão  $r = V_{\text{máx}} / V_{\text{mín}} = 10$ . O motor opera com ar diatômico ( $\gamma = 1,40$ ) a  $20^\circ\text{C} = 293\text{K}$  e pressão de  $1,0\text{atm}$ . A quantidade de combustível injetada em um ciclo têm calor de combustão de  $357\text{J}$ .

- A) Determine  $P$ ,  $V$  e  $T$  nos quatro vértices.
- B) Qual o trabalho resultante em um ciclo?
- C) Qual o rendimento térmico?
- D) Quais as temperaturas dos reservatórios  $Q$  e  $F$ ?
- E) Qual a maior eficiência que poderia ser atingida por um motor de Carnot que opera entre os mesmos reservatórios?



**Problema:** Uma máquina térmica funciona fazendo uma amostra de gás ideal monoatômico descrever o ciclo abaixo. Determine:  $n$ ,  $W^{\text{ciclo}}$ ,  $Q^{\text{resultante}}$ ,  $\eta$ ,  $\eta_{\text{carnot}}$  e a potência.



# Física 3

## Teste Conceitual - 6

5- De acordo com a segunda lei da termodinâmica

- A) a energia térmica não pode ser completamente convertida em trabalho.
- B) o trabalho não pode ser convertido em energia térmica.
- C) a razão pela qual as máquinas não têm 100% de eficiência é o atrito, o qual é inevitável.
- D) todas as alternativas acima são verdadeiras

# Física 3

## Teste Conceitual - 7

7- A eficiência teórica máxima de uma máquina de Carnot que opera entre reservatórios no ponto de vapor e a temperatura ambiente vale aproximadamente

- A) 10%
- B) 20%
- C) 50%
- D) 80%

# Física 3

## Teste Conceitual - 8

8- Em uma cozinha isolada termicamente um refrigerador é ligado e mantido com a porta aberta. A temperatura da cozinha

- A) Permanece inalterada de acordo com a primeira lei da termodinâmica.
- B) aumenta de acordo com a primeira lei da termodinâmica.
- C) aumenta de acordo com a segunda lei da termodinâmica.
- D) diminui de acordo com a primeira lei da termodinâmica.

## Teste Conceitual -3

3- Uma máquina térmica que em cada ciclo realiza trabalho positivo e perde energia como calor, sem nenhuma energia de entrada, violaria

- A) a lei zero da termodinâmica
- B) a primeira lei da Termodinâmica
- C) a segunda lei da termodinâmica
- D) a terceira lei da termodinâmica

# Física 3

## Teste Conceitual - 6

6- Um inventor sugere que uma casa pode ser aquecida por meio de um refrigerador que extrai calor do ambiente exterior e rejeita calor para dentro de casa. Ele afirma que a energia fornecida para a casa em forma de calor pode exceder o trabalho necessário para fazer o refrigerador funcionar. Isto

- A) é impossível pela primeira lei da termodinâmica.
- B) é impossível pela segunda lei da termodinâmica.
- C) isto seria possível somente se a temperatura exterior fosse igual a temperatura interior.
- D) é possível