

# Física 3

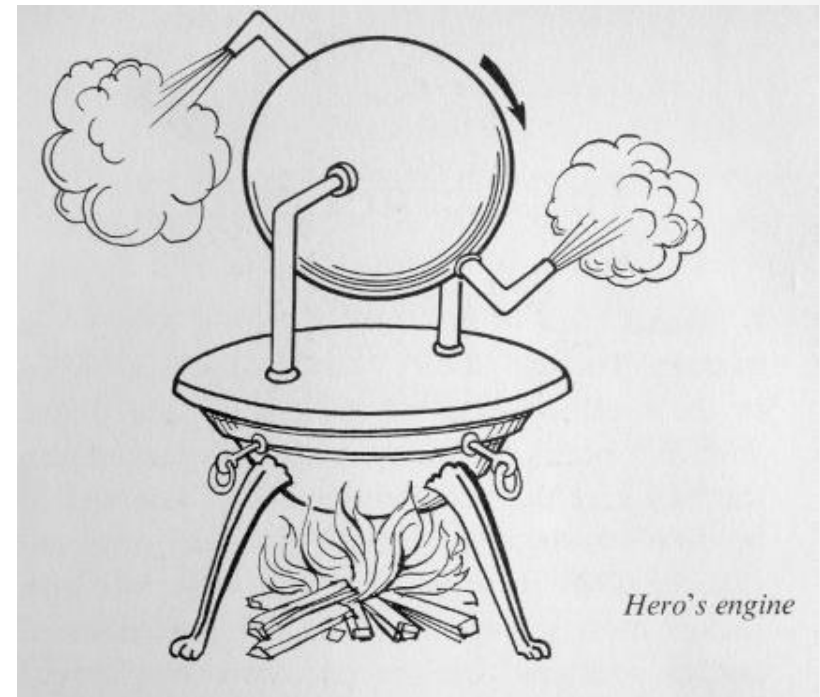
## Cap 19: Máquinas Térmicas

# Máquinas Térmicas

Máquina Térmica: um dispositivo que **opera em ciclos** convertendo **calor em trabalho** útil.

1ª máquina térmica conhecida:  
Criada por Herão de Alexandria (séc 1 d.c.)

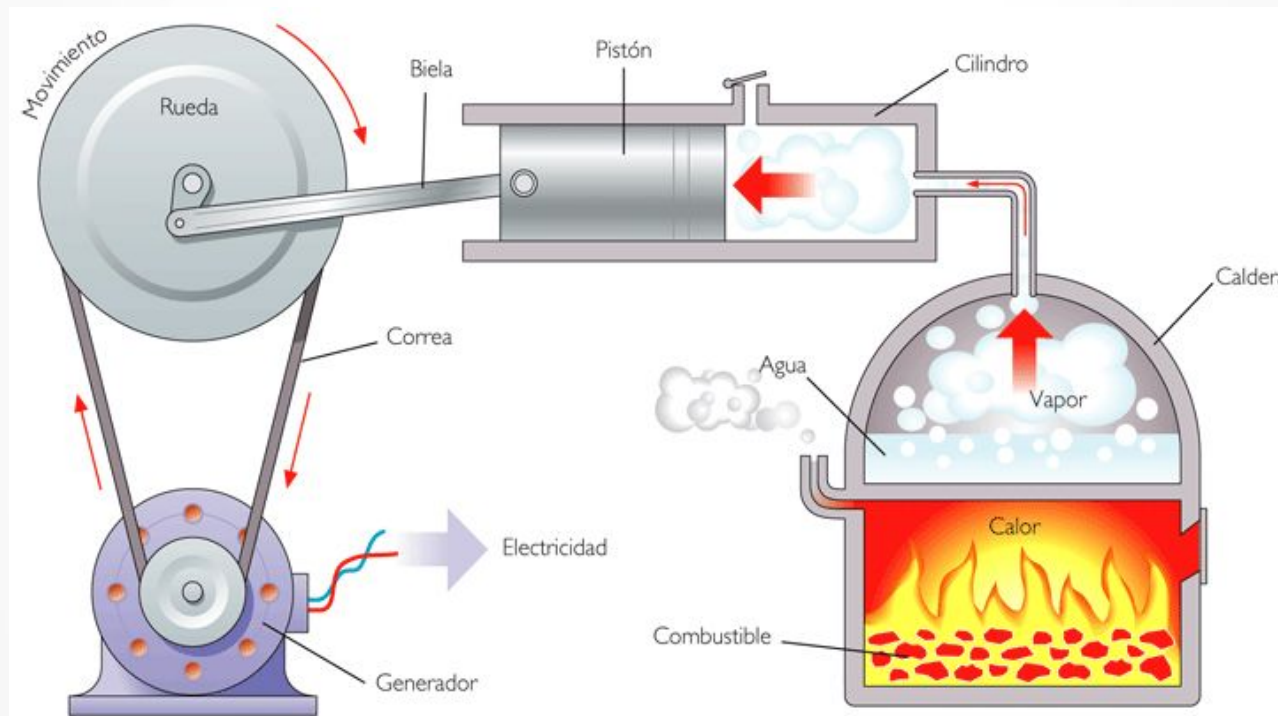
Vídeo com versão caseira:  
[https://youtu.be/u2CbJNz\\_fFM?t=34s](https://youtu.be/u2CbJNz_fFM?t=34s)



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

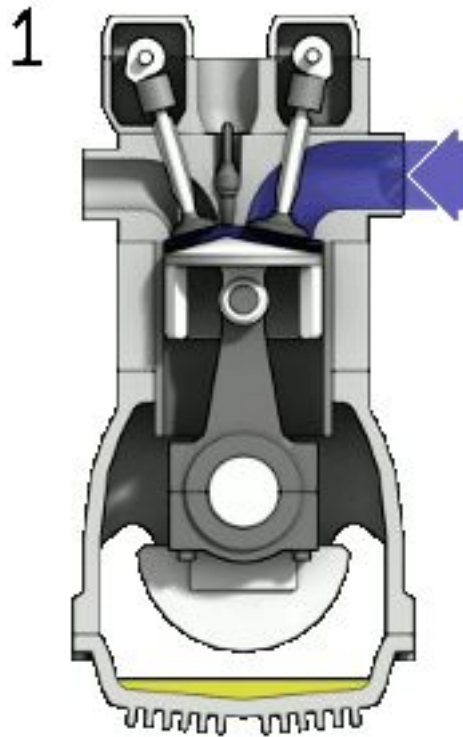
# Máquinas Térmicas

Exemplo: Usina a vapor



# Máquinas Térmicas

Exemplo: Motor 4 tempos



# Máquinas Térmicas

## ATENÇÃO: NOTAÇÃO

Numa máquina térmica, estamos interessados em usar o 'sistema termodinâmico' como uma ferramenta para **extrair trabalho útil**

Por isso, é mais útil usarmos a ideia de **trabalho realizado pelo sistema**, ao invés do **trabalho realizado sobre o sistema**, como vínhamos fazendo até agora.

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

# Máquinas Térmicas

## ATENÇÃO: NOTAÇÃO

Numa máquina térmica, estamos interessados em usar o 'sistema termodinâmico' como uma ferramenta para **extrair trabalho útil**

Por isso, é mais útil usarmos a ideia de **trabalho realizado pelo sistema**, ao invés do **trabalho realizado sobre o sistema**, como vínhamos fazendo até agora.

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

→ compressão:  $W^{sobre} > 0$  e  $W^{pelo} < 0$  (energia entra no sistema)

→ expansão:  $W^{sobre} < 0$  e  $W^{pelo} > 0$  (energia sai do sistema)

# Máquinas Térmicas

Com essa nova convenção para o sinal do trabalho, a 1ª Lei da Termodinâmica fica

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

# Máquinas Térmicas

Com essa nova convenção para o sinal do trabalho, a 1ª Lei da Termodinâmica fica

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

Obs: **não** mudamos a convenção para o sinal de Q!  
(Continua  $>0$  quando entra e  $<0$  quando sai do sistema)

**Interpretação:** o calor que entra em um sistema pode ir parar em dois lugares: ou sai na forma de trabalho, ou aumenta a sua energia térmica



# Máquinas Térmicas

Com essa nova convenção para o sinal do trabalho, a 1ª Lei da Termodinâmica fica

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

Ex.: Expansão Isotérmica:

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

(sistema recebe calor e devolve a energia realizando trabalho)

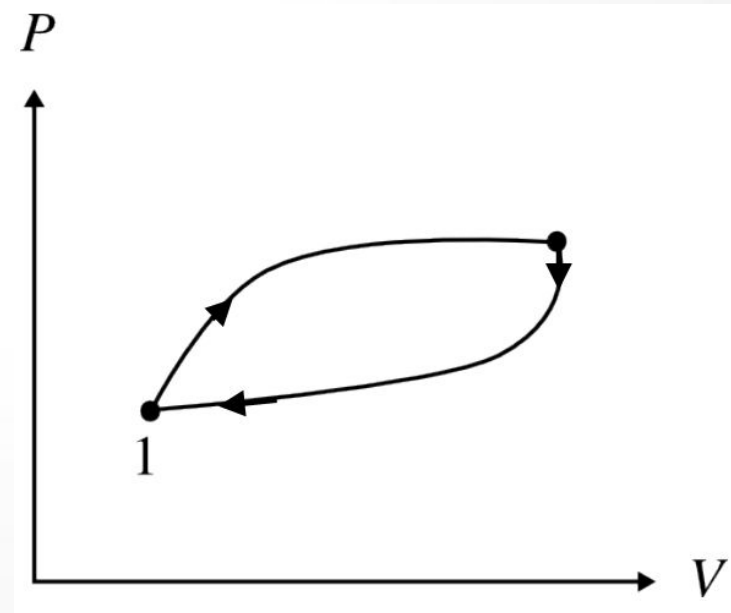
# Máquinas Térmicas

Com essa nova convenção para o sinal do trabalho, a 1ª Lei da Termodinâmica fica

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

Ex: Em um ciclo:  $\Delta E^{\text{térm}} = 0$

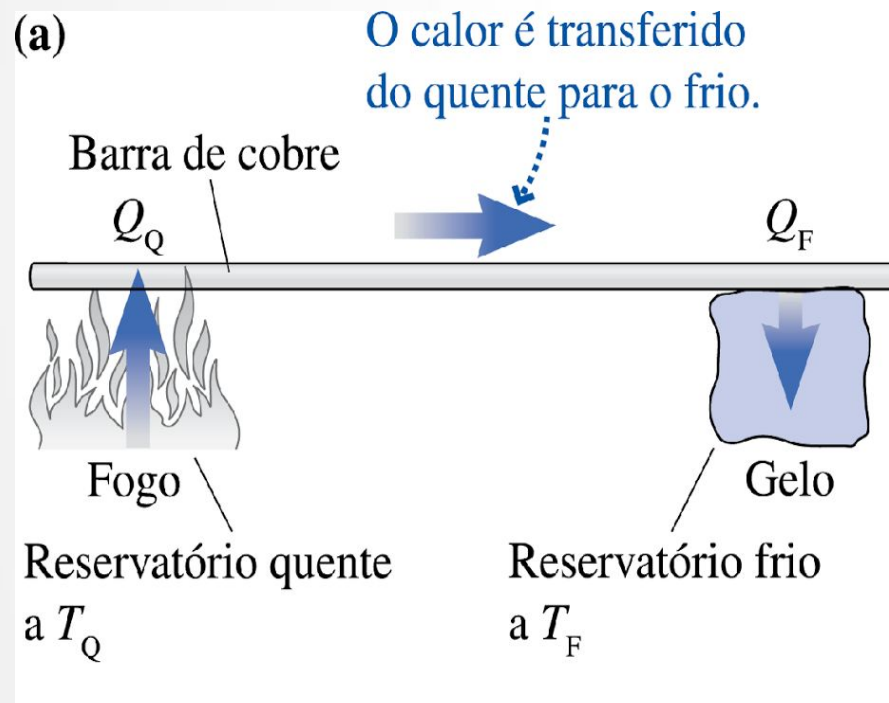
$$\rightarrow Q^{\text{ciclo}} = W^{\text{pelo}} = W^{\text{útil}}$$



# Diagramas de transferência de energia

$Q_F$  : **módulo do calor transferido de/para um reservatório frio**

$Q_Q$  : **módulo do calor transferido de/para um reservatório quente**

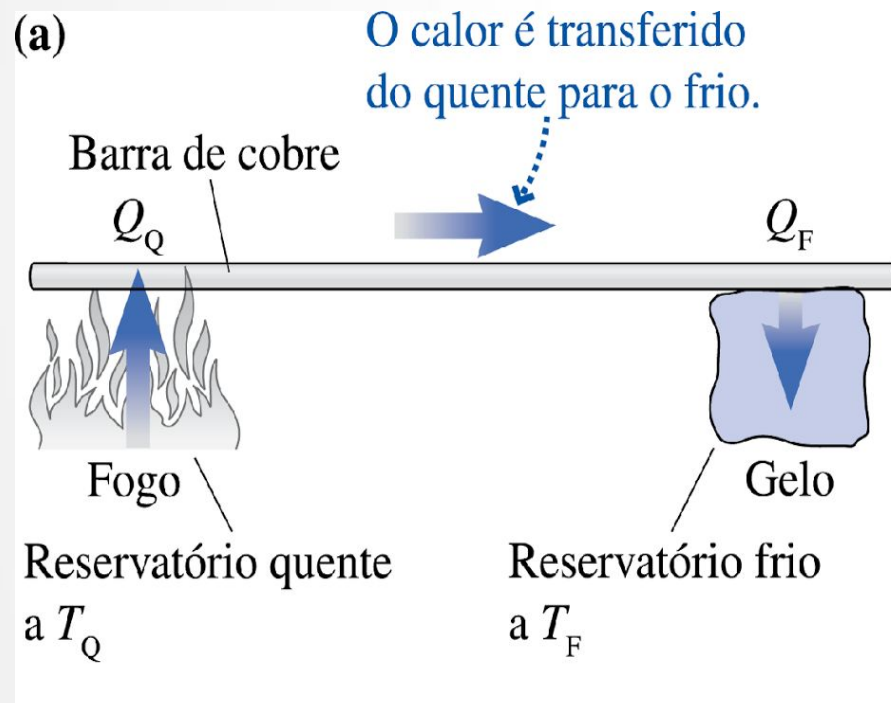


$$Q_F = Q_Q$$

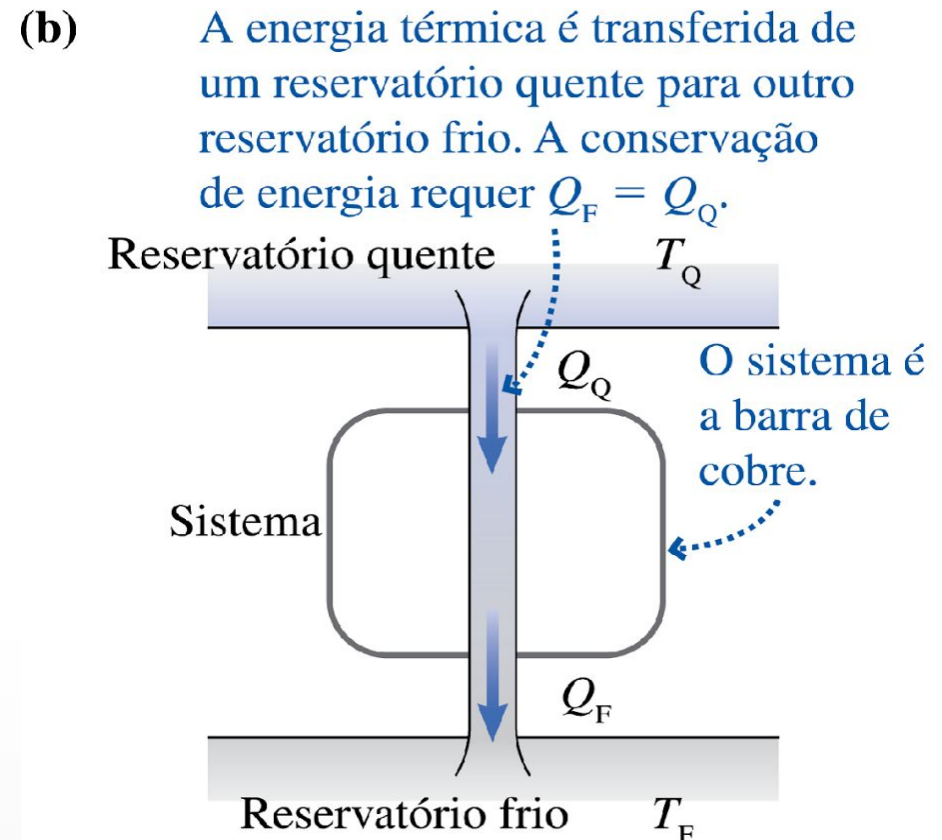
# Diagramas de transferência de energia

$Q_F$ : **módulo do calor transferido de/para um reservatório frio**

$Q_Q$ : **módulo do calor transferido de/para um reservatório quente**



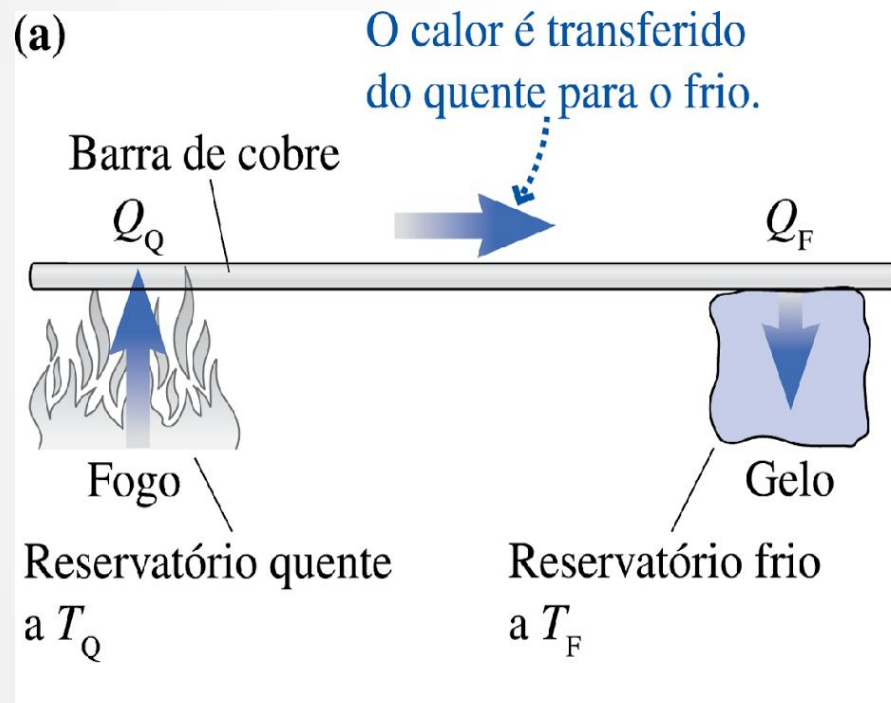
$$Q_F = Q_Q$$



# Diagramas de transferência de energia

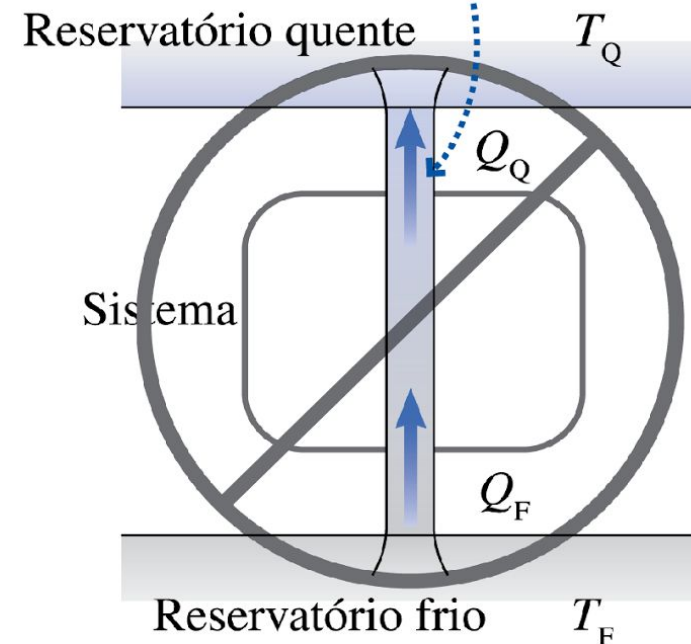
$Q_F$  : **módulo do calor transferido de/para um reservatório frio**

$Q_Q$  : **módulo do calor transferido de/para um reservatório quente**



$$Q_F = Q_Q$$

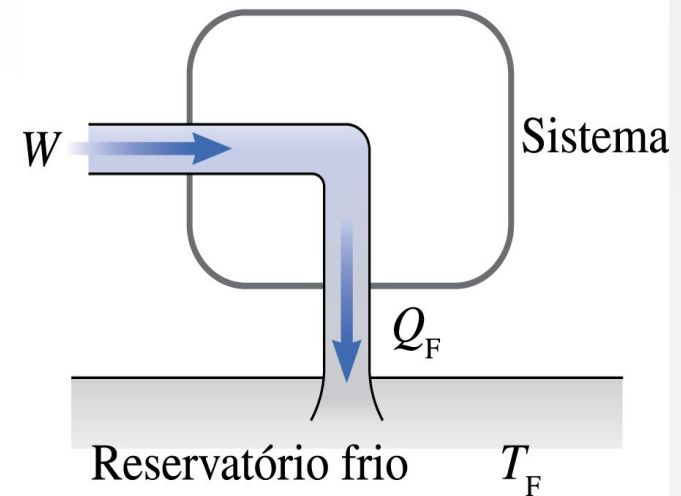
(c) A segunda lei proíbe um processo em que calor seja transferido espontaneamente de um objeto mais frio para um objeto mais quente.



## Teste conceitual 19.1

Você possui um sistema termodinâmico  $S$  inicialmente à temperatura  $T_i$ . É possível ocorrer um processo físico no qual:

- $S$  recebe uma qtd de  $W$  de trabalho
- $S$  expele a mesma quantidade de calor  $Q_F = W$  para um reservatório térmico a uma temperatura  $T_F$
- Ao fim desse processo,  $S$  retornou para sua condição inicial (realizou um ciclo) ?

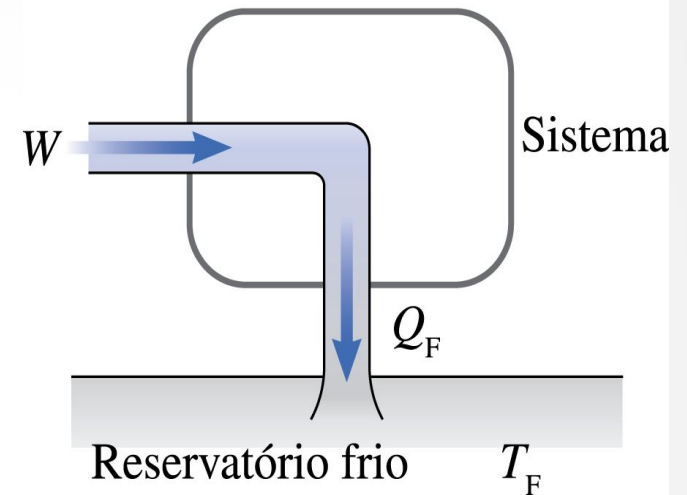


- A) Sim, desde que  $T_F \leq T_i$
- B) Sim, desde que  $T_F \geq T_i$
- C) Sim, independente do valor de  $T_F$
- D) Não

## Teste conceitual 19.1

Você possui um sistema termodinâmico  $S$  inicialmente à temperatura  $T_i$ . É possível ocorrer um processo físico no qual:

- $S$  recebe uma qtd de  $W$  de trabalho
- $S$  expele a mesma quantidade de calor  $Q_F = W$  para um reservatório térmico a uma temperatura  $T_F$
- Ao fim desse processo,  $S$  retornou para sua condição inicial (realizou um ciclo) ?



- A) Sim, desde que  $T_F \leq T_i$
- B) Sim, desde que  $T_F \geq T_i$
- C) Sim, independente do valor de  $T_F$
- D) Não

Ex: experiência de Joule

## Teste conceitual 19.2

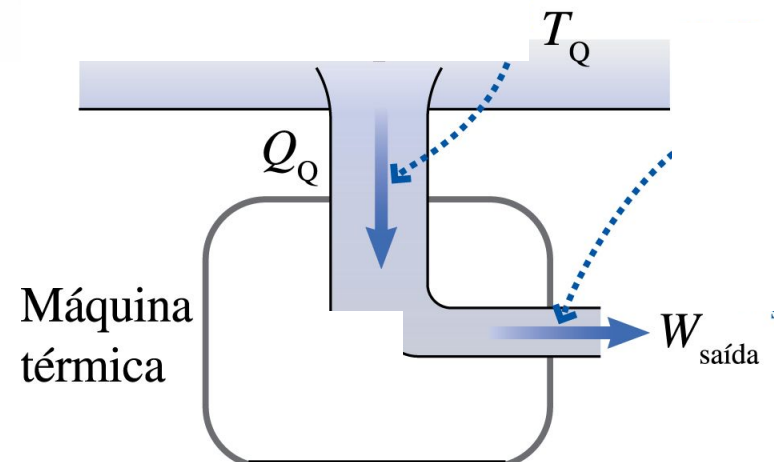
Você possui um sistema termodinâmico  $S$  inicialmente à temperatura  $T_i$ . É possível ocorrer um processo físico no qual:

- $S$  recebe uma qtd de  $Q_Q$  de calor de um reservatório térmico a uma temperatura  $T_Q$
- $S$  realiza a mesma quantidade de trabalho

$$W = Q_Q$$

- Ao fim desse processo,  $S$  retornou para sua condição inicial (realizou um ciclo) ?

- A) Sim, desde que  $T_Q \leq T_i$
- B) Sim, desde que  $T_Q \geq T_i$
- C) Sim, independente do valor de  $T_Q$
- D) Não





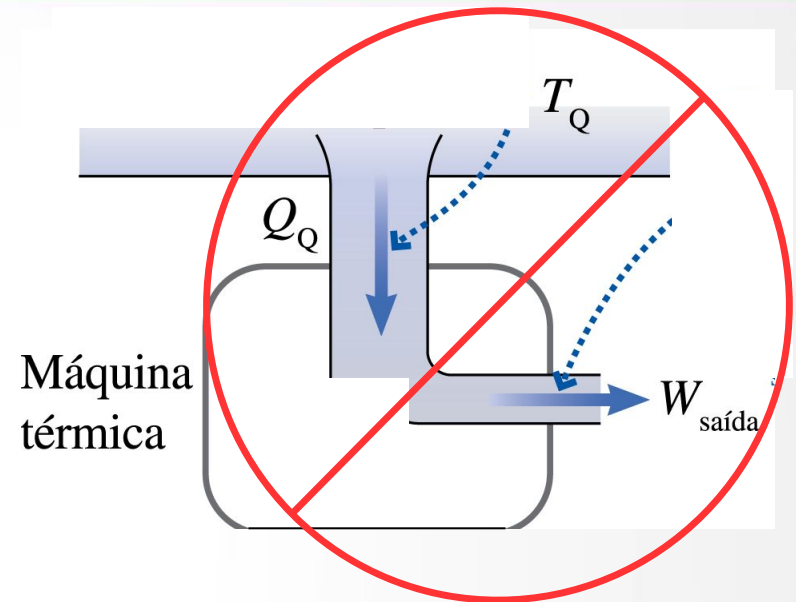
## Teste conceitual 19.2

Você possui um sistema termodinâmico  $S$  inicialmente à temperatura  $T_i$ . É possível ocorrer um processo físico no qual:

- $S$  recebe uma qtd  $Q_Q$  de calor de um reservatório térmico a uma temperatura  $T_Q$
- $S$  realiza a mesma quantidade de trabalho

$$W = Q_Q$$

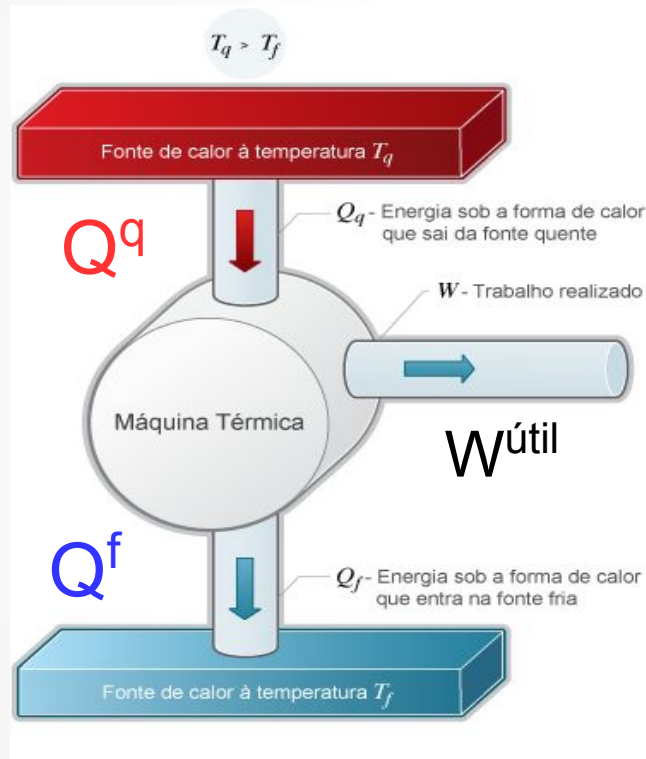
- Ao fim desse processo,  $S$  retornou para sua condição inicial (realizou um ciclo) ?



- A) Sim, desde que  $T_Q \leq T_i$
- B) Sim, desde que  $T_Q \geq T_i$
- C) Sim, independente do valor de  $T_Q$
- D) Não – 2ª Lei da TD (veremos adiante porque!)

# Máquinas Térmicas

## Diagramas de transferência de energia



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

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

Cons. de Energia (1ª Lei):  $W^{útil} = Q^q - Q^f$

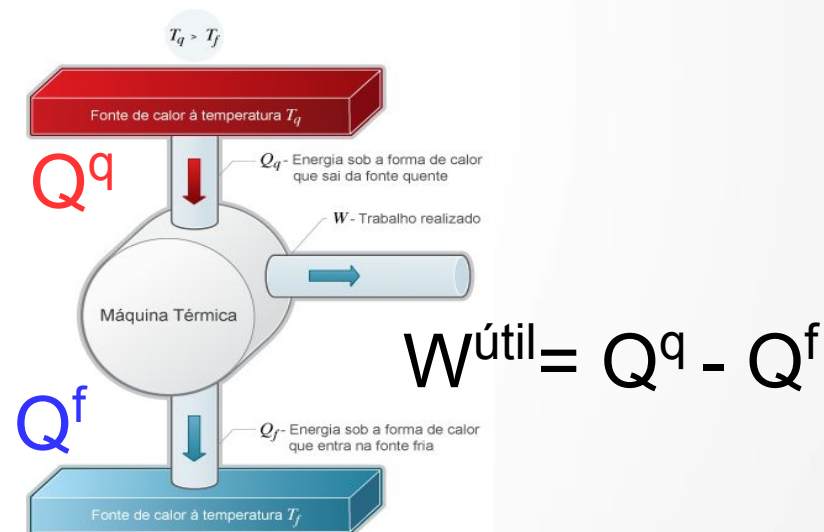
# Máquinas Térmicas

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

Def:

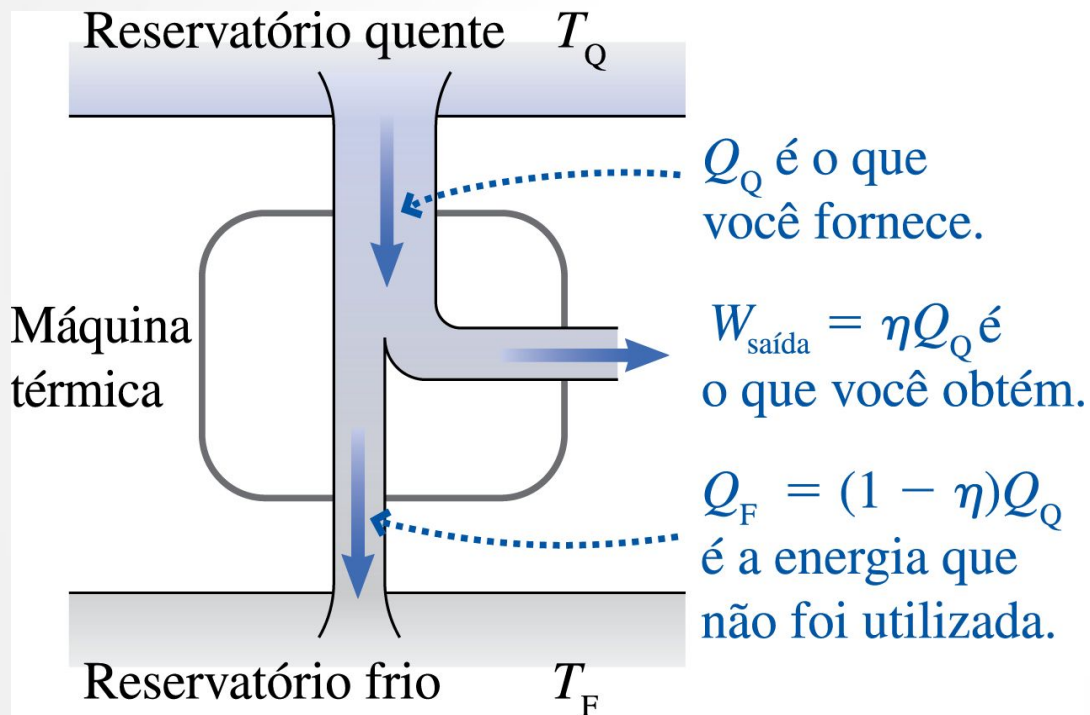
Rendimento térmico

$$\eta = W^{\text{útil}}/Q^{\text{q}}$$
$$= 1 - Q^{\text{f}}/Q^{\text{q}}$$



# Máquinas Térmicas

$$\eta = W^{\text{útil}}/Q^q = 1 - Q^f/Q^q$$



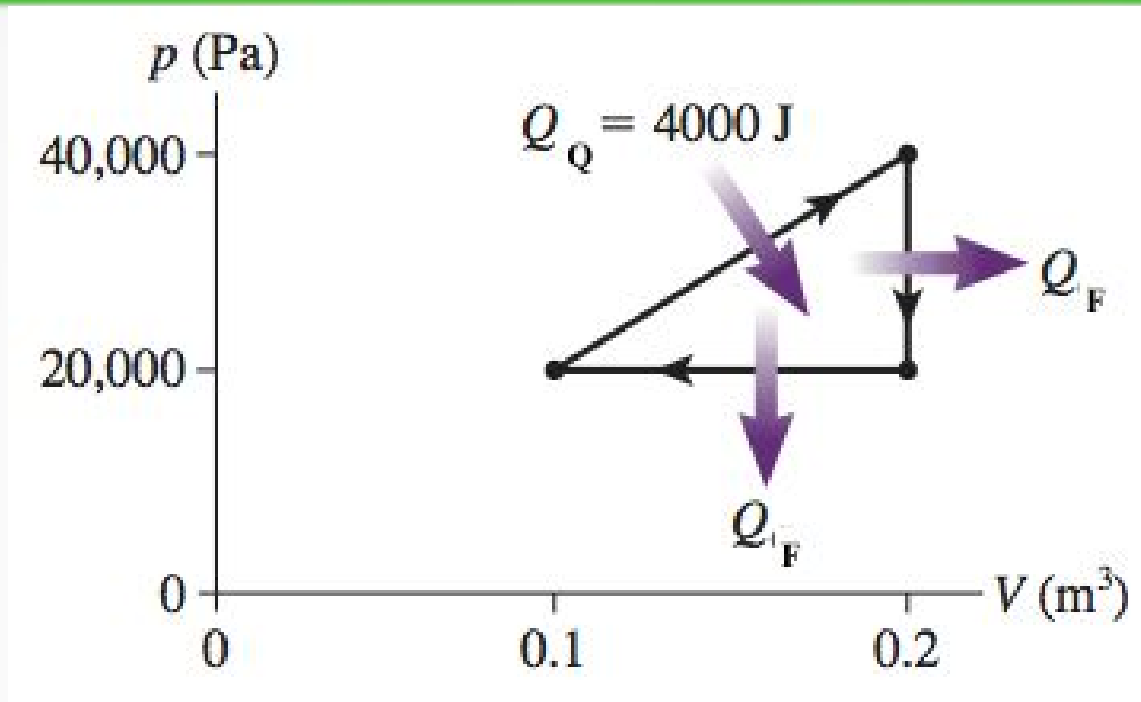
2ª Lei da TD implica:  
Não existem máquinas  
térmicas perfeitas!!

Necessariamente

$$\eta < 1 !$$

(Obs: ainda temos de provar isso!)

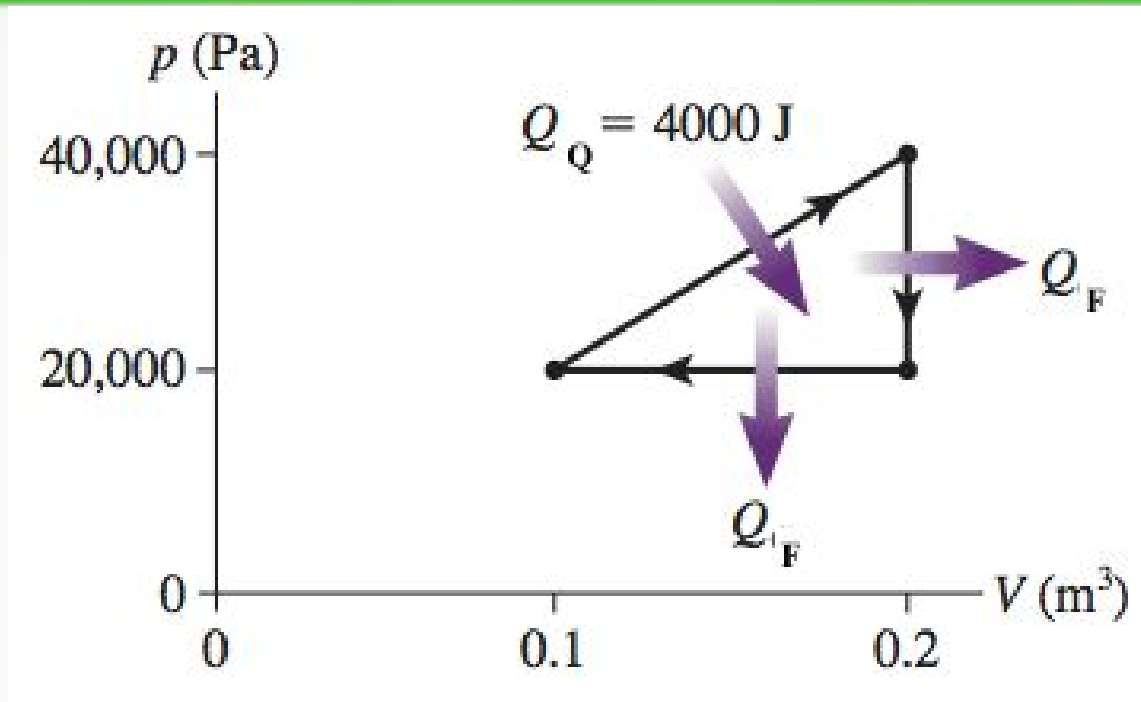
## Teste Conceitual 19.3



A eficiência da máquina térmica descrita na figura é

- A) 0,25
- B) 0,75
- C) 4
- D) Não dá para saber sem calcular  $Q_F$

## Teste Conceitual 19.3



A eficiência da máquina térmica descrita na figura é

- A) 0,25
- B) 0,75
- C) 4
- D) Não dá para saber sem calcular  $Q_F$

# Relembrando – propriedades de gases ideais

**TABELA 19.1** Resumo de processos com gás ideal

Processo	Lei do gás	Trabalho $W_s$	Calor $Q$	Energia térmica
Isocórico	$p_i/T_i = p_f/T_f$	0	$nC_V\Delta T$	$\Delta E_{\text{term}} = Q$
Isobárico	$V_i/T_i = V_f/T_f$	$p\Delta V$	$nC_P\Delta T$	$\Delta E_{\text{term}} = Q - W_s$
Isotérmico	$p_iV_i = p_fV_f$	$nRT \ln(V_f/V_i)$ $pV \ln(V_f/V_i)$	$Q = W_s$	$\Delta E_{\text{term}} = 0$
Adiabático	$p_iV_i^\gamma = p_fV_f^\gamma$ $T_iV_i^{\gamma-1} = T_fV_f^{\gamma-1}$	$(p_fV_f - p_iV_i)/(1 - \gamma)$ $-nC_V\Delta T$	0	$\Delta E_{\text{term}} = -W_s$
Qualquer	$p_iV_i/T_i = p_fV_f/T_f$	área sob a curva		$\Delta E_{\text{term}} = nC_V\Delta T$

	Monoatômico	Diatômico
$E_{\text{term}}$	$\frac{3}{2}nRT$	$\frac{5}{2}nRT$
$C_V$	$\frac{3}{2}R$	$\frac{5}{2}R$
$C_P$	$\frac{5}{2}R$	$\frac{7}{2}R$
$\gamma$	$\frac{5}{3} = 1,67$	$\frac{7}{5} = 1,40$

# Relembrando – propriedades de gases ideais

**TABELA 19.1** Resumo de processos com gás ideal

Processo	Lei do gás	Trabalho $W_s$	Calor $Q$	Energia térmica
Isocórico	$p_i/T_i = p_f/T_f$	0	$nC_V\Delta T$	$\Delta E_{\text{term}} = Q$
Isobárico	$V_i/T_i = V_f/T_f$	$p\Delta V$	$nC_P\Delta T$	$\Delta E_{\text{term}} = Q - W_s$
Isotérmico	$p_iV_i = p_fV_f$	$nRT \ln(V_f/V_i)$ $pV \ln(V_f/V_i)$	$Q = W_s$	$\Delta E_{\text{term}} = 0$
Adiabático	$p_iV_i^\gamma = p_fV_f^\gamma$ $T_iV_i^{\gamma-1} = T_fV_f^{\gamma-1}$	$(p_fV_f - p_iV_i)/(1 - \gamma)$ $-nC_V\Delta T$	0	$\Delta E_{\text{term}} = -W_s$
Qualquer	$p_iV_i/T_i = p_fV_f/T_f$	área sob a curva		$\Delta E_{\text{term}} = nC_V\Delta T$

	Monoatômico	Diatômico
$E_{\text{term}}$	$\frac{3}{2}nRT$	$\frac{5}{2}nRT$
$C_V$	$\frac{3}{2}R$	$\frac{5}{2}R$
$C_P$	$\frac{5}{2}R$	$\frac{7}{2}R$
$\gamma$	$\frac{5}{3} = 1,67$	$\frac{7}{5} = 1,40$

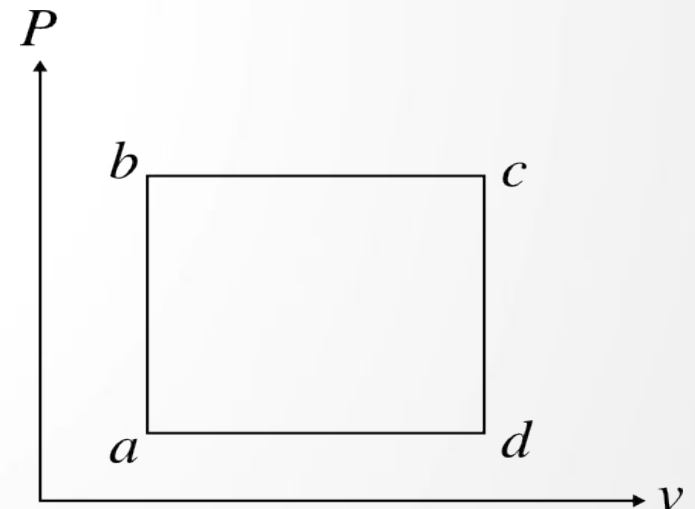


## Teste conceitual 19.4

Consideremos um dispositivo cuja a substância de trabalho é um gás ideal que descreve o ciclo abaixo no sentido horário

Em quais dos trechos do ciclo temos respectivamente calor entrando de um reservatório quente, ou calor saindo para um reservatório frio?

- A) Entrando: ab e cd; saindo: bc e da
- B) Entrando: só ab; saindo: só cd
- C) Entrando: ab e bc; saindo: cd e da
- D) Entrando: ab e da; saindo: bc e cd

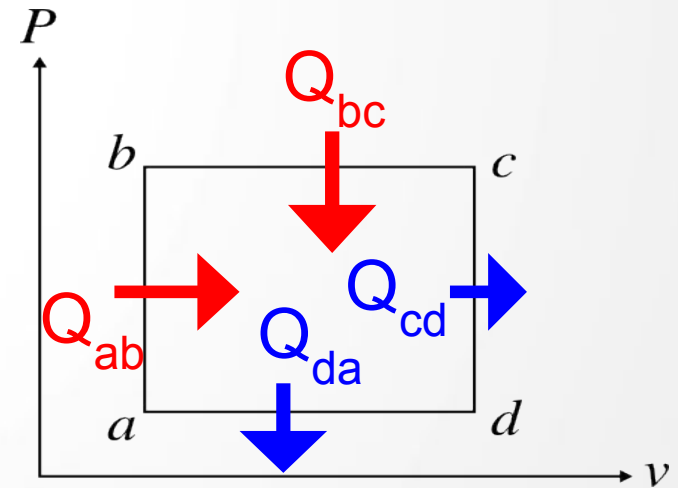


## Teste conceitual 19.4

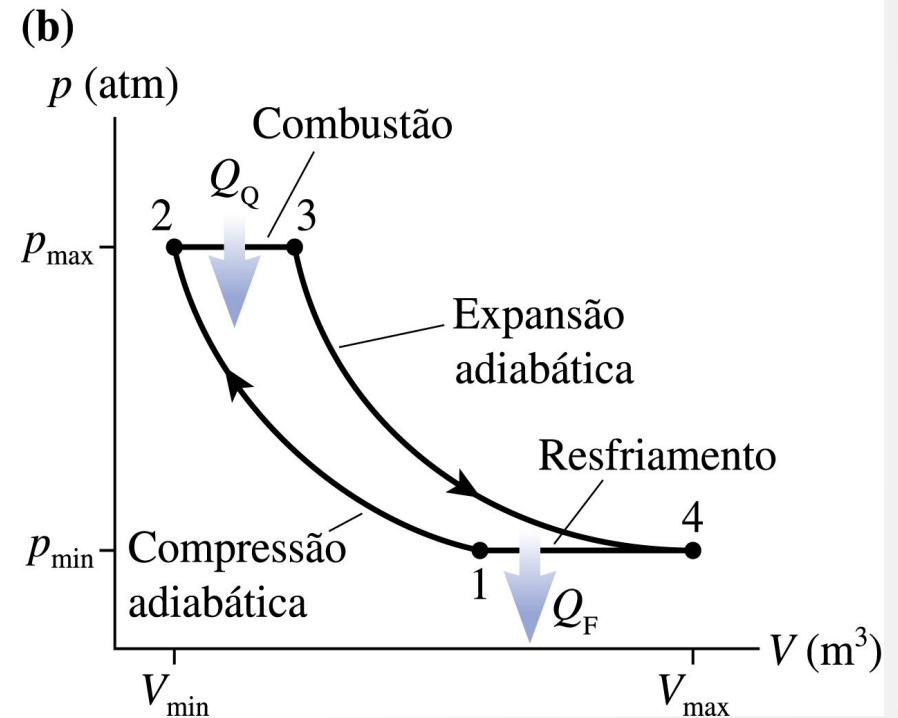
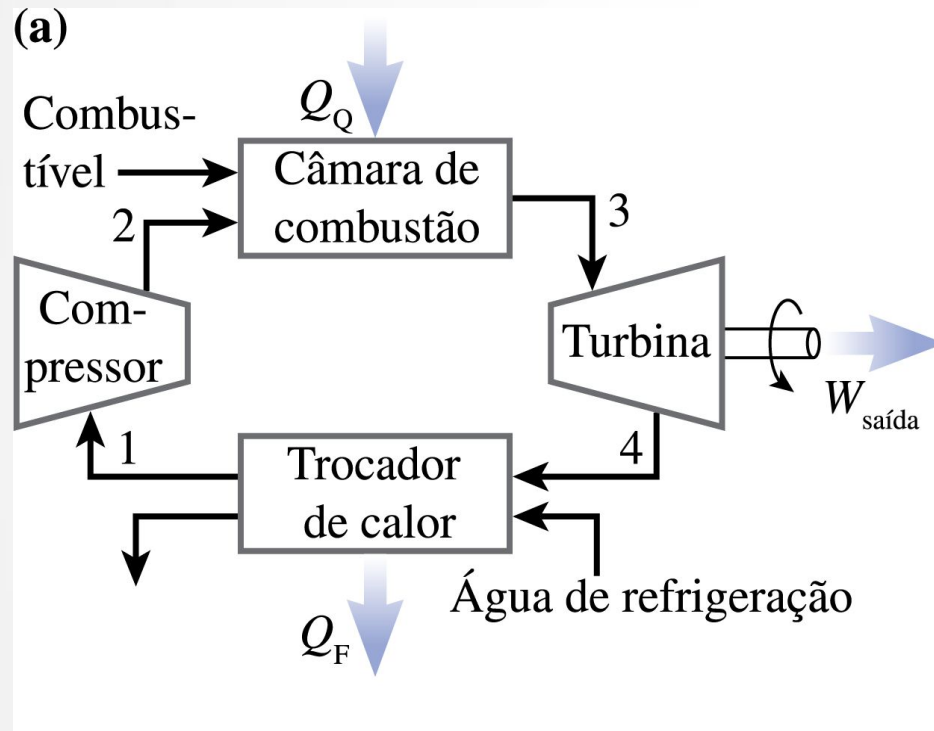
Consideremos um dispositivo cuja a substância de trabalho é um gás ideal que descreve o ciclo abaixo no sentido horário

Em quais dos trechos do ciclo temos respectivamente calor entrando de um reservatório quente, ou calor saindo para um reservatório frio?

- A) Entrando: ab e cd; saindo: bc e da
- B) Entrando: só ab; saindo: só cd
- C) Entrando: ab e bc; saindo: cd e da**
- D) Entrando: ab e da; saindo: bc e cd



# Exemplo realista: Máquina Térmica com ciclo Brayton (turbinas a gás, motores a jato)



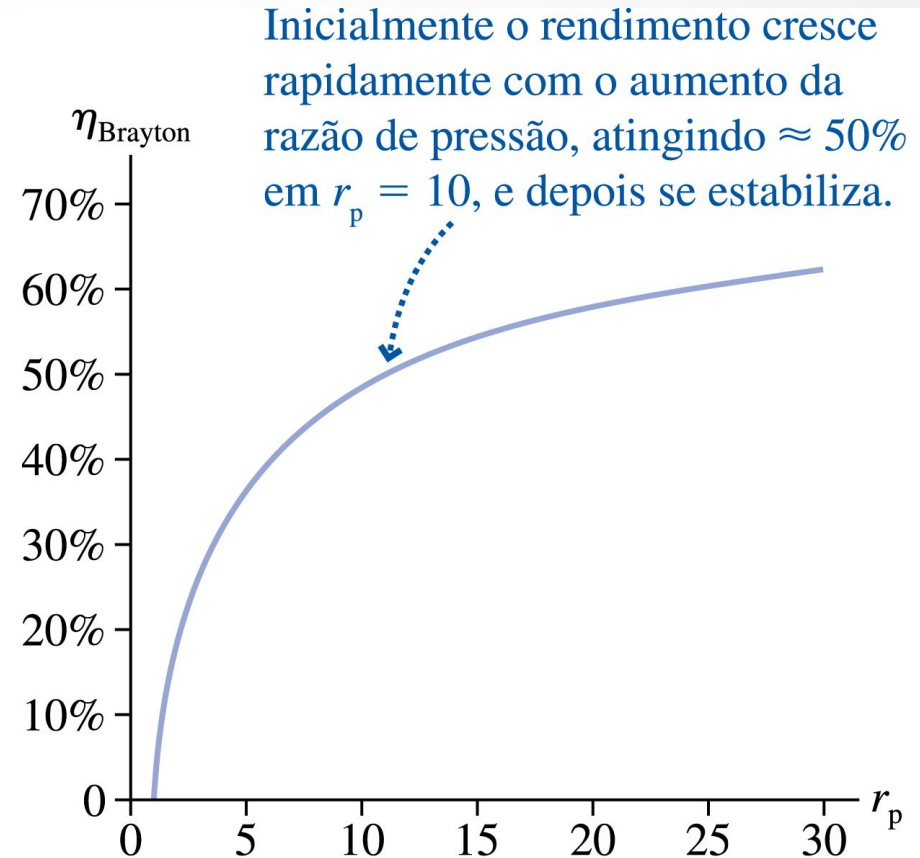
# Exemplo realista: Máquina Térmica com ciclo Brayton (turbinas a gás, motores a jato)

Rendimento (v. quadro)

$$\eta_{Brayton} = 1 - \frac{1}{r_p^{(\gamma-1)/\gamma}}$$
$$\approx 1 - \frac{1}{r_p^{0,29}}$$

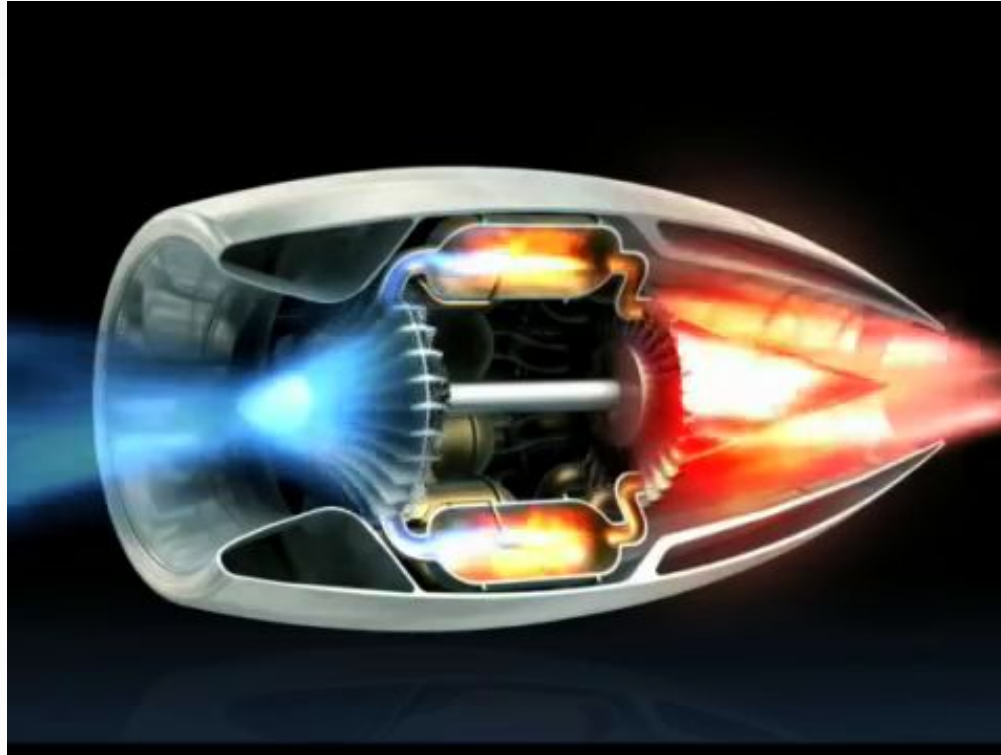
(p/ gás diatômico)

onde  $r_p = p_{max} / p_{min}$



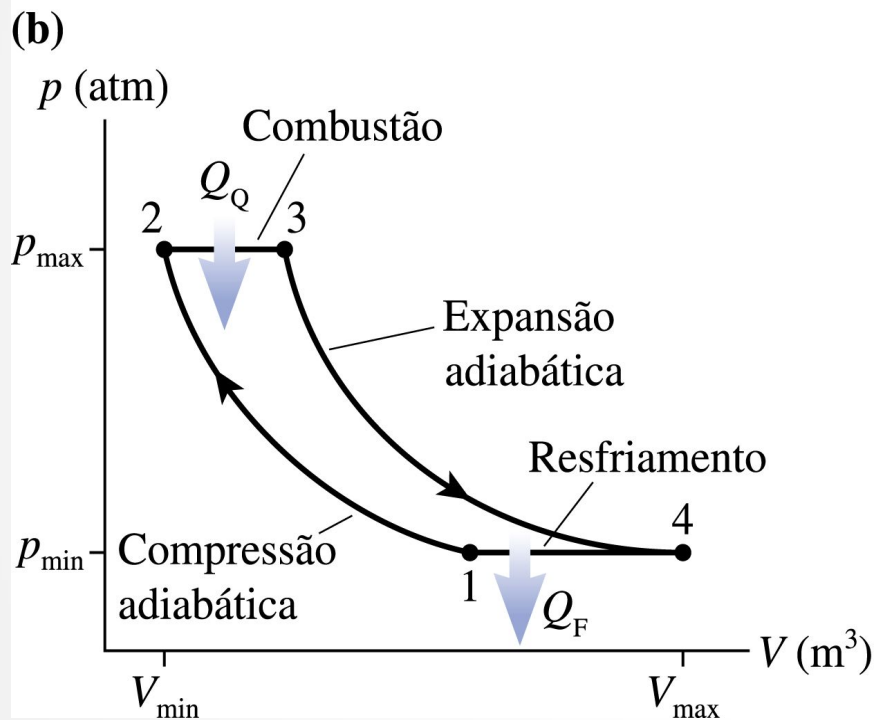
Qualquer aumento do rendimento além de  $\approx 50\%$  deve ser avaliado em relação aos custos mais altos para conseguir um compressor melhor, capaz de atingir uma razão de pressão muito maior.

## Turbina de avião a jato – ciclo Brayton (aberto)



Nesse caso, ao invés de se usar um trocador de calor, o gás quente (ponto 4 do ciclo) é continuamente expelido para a atmosfera, e novo gás frio é admitido à mesma pressão

# Exemplo realista: Máquina Térmica com ciclo Brayton (turbinas a gás, motores a jato)



Dados (exemplo 19.3 - hélio):

1)  $P_1 = 150\text{kPa}$  ,  $V_1 = 80\text{cc}$ ,  $T_1 = -73^\circ\text{C}$

2)  $P_2 = 750\text{kPa}$

3)  $P_4 = 150\text{kPa}$ ,  $V_4 = 100\text{cc}$ ,  $T_4 = -23^\circ\text{C}$

Resultado:

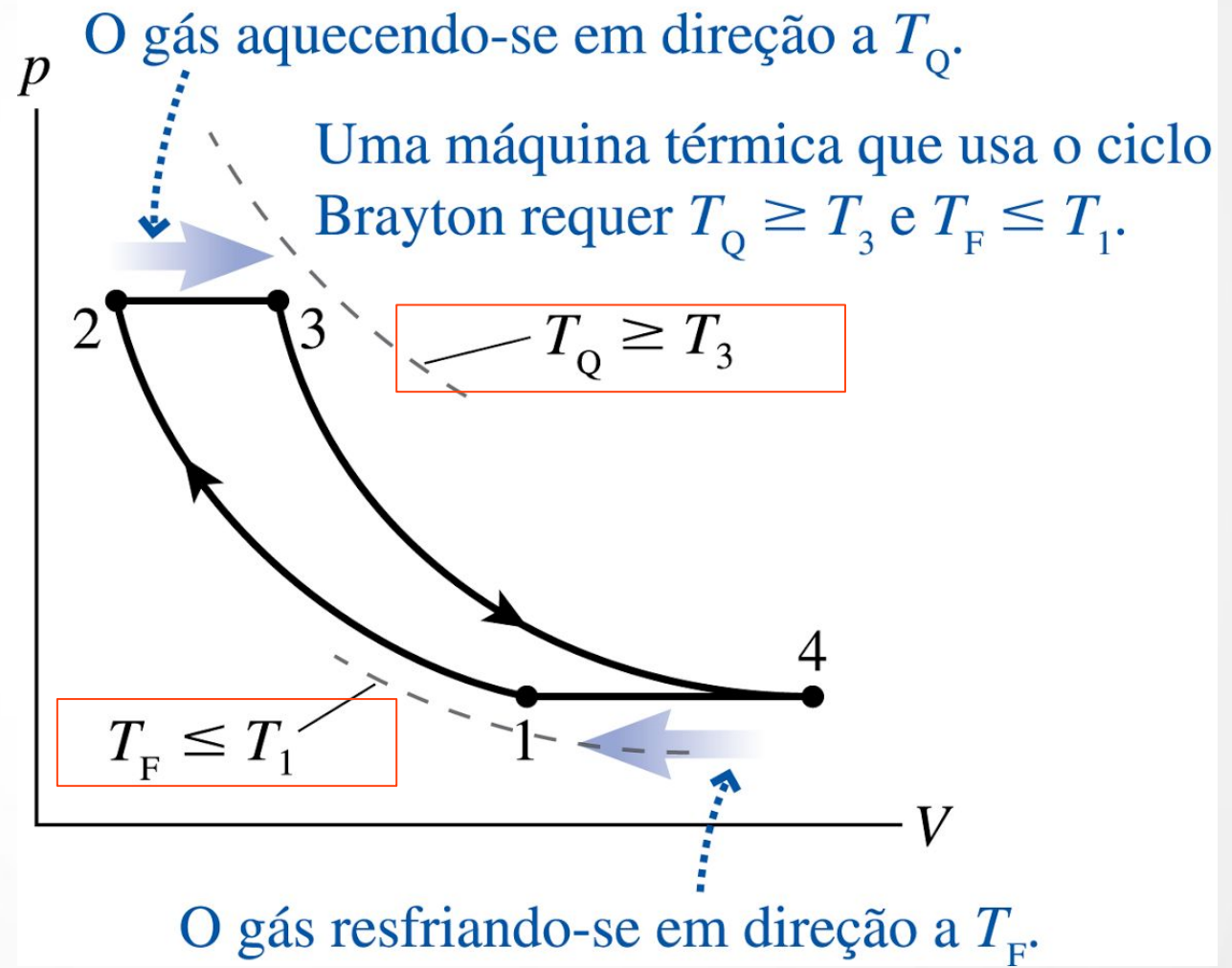
$T_3 = 203^\circ\text{C} = 476\text{K}$

$Q_Q = 14,3\text{ J}$ ;  $Q_F = 7,5\text{ J}$

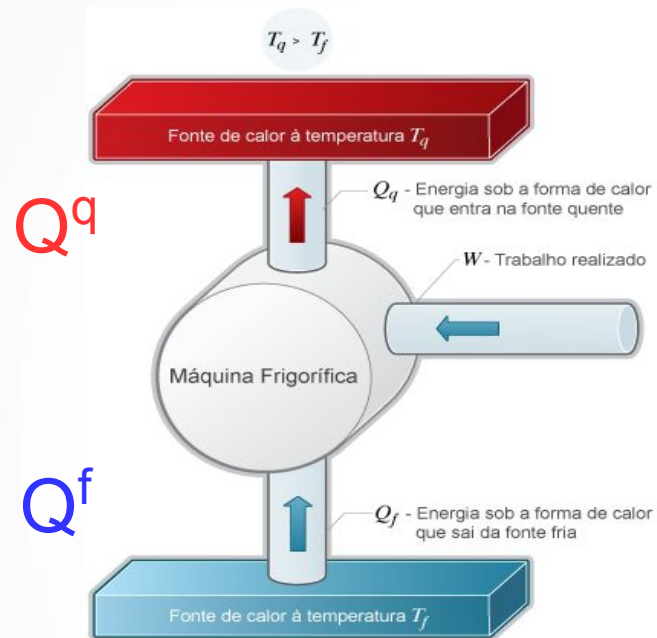
$\eta = 1 - 7,5 / 14,3 = 0,47$

# Exemplo realista: Máquina Térmica com ciclo Brayton (turbinas a gás, motores a jato)

Obs: Não esqueça  
dos reservatórios  
térmicos!



# Refrigeradores: *Transformando Trabalho em Calor*



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

Obs: lembrando que já tomamos  $Q^q$ ,  $Q^f$  em módulo

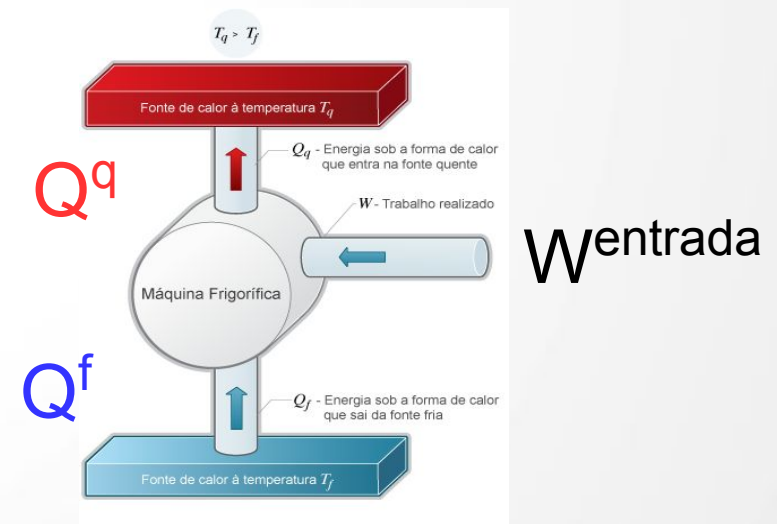


# Refrigeradores: *Transformando Trabalho em Calor*

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

**Def: Coeficiente de desempenho**

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



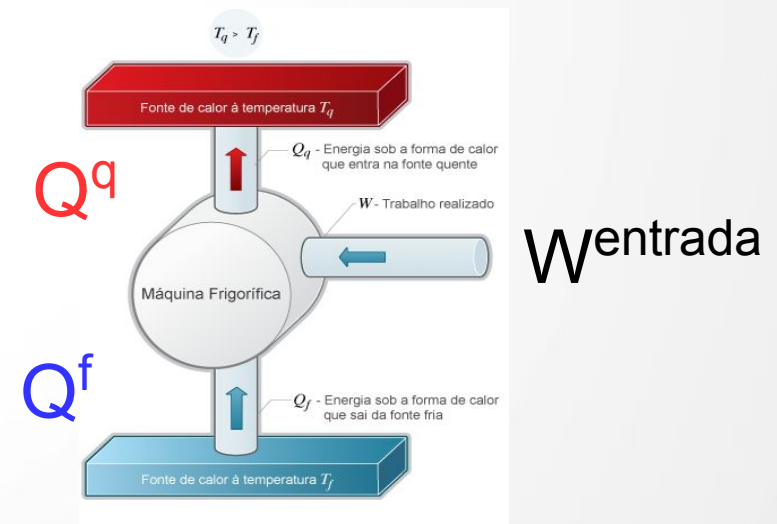
# Refrigeradores: Transformando Trabalho em Calor

2º Lei da TD implica: Não existem refrigeradores perfeitos!!

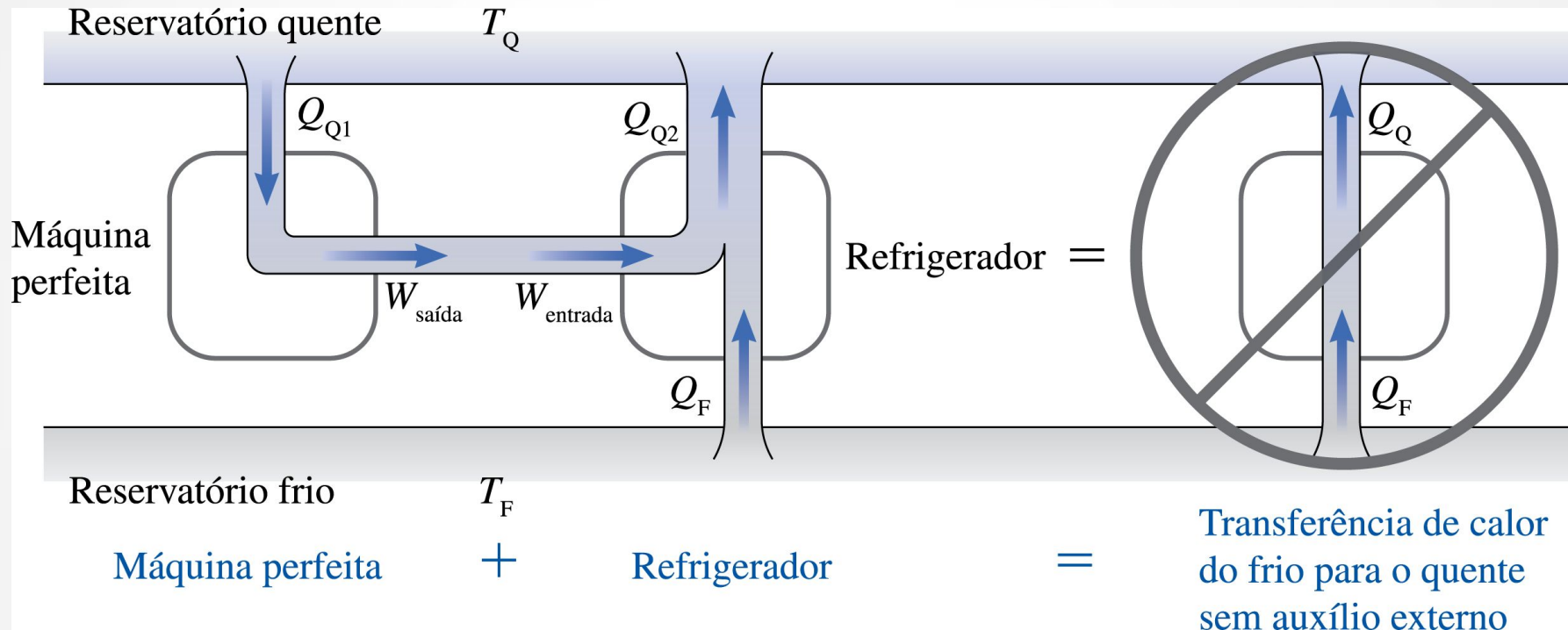
Necessariamente

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

(Caso contrário, calor flui espontaneamente do reserv. frio para o quente)



# Máquinas Térmicas perfeitas não existem (prova simples!)



## *Teste conceitual 19.5*

Numa cozinha termicamente isolada, uma geladeira comum é deixada funcionando de porta aberta. Podemos concluir que a temperatura na cozinha

- A) permanecerá constante, devido à 1ª Lei da Termodinâmica
- B) permanecerá constante, devido à 2ª Lei da Termodinâmica
- C) diminuirá, devido à 2ª Lei da Termodinâmica
- D) aumentará, devido à 2ª Lei da Termodinâmica

## *Teste conceitual 19.5*

Numa cozinha termicamente isolada, uma geladeira comum é deixada funcionando de porta aberta. Podemos concluir que a temperatura na cozinha

- A) permanecerá constante, devido à 1ª Lei da Termodinâmica
- B) permanecerá constante, devido à 2ª Lei da Termodinâmica
- C) diminuirá, devido à 2ª Lei da Termodinâmica
- D) aumentará, devido à 2ª Lei da Termodinâmica**

## *Teste conceitual 19.6*

Se rodarmos o ciclo de uma máquina térmica ao contrário, obtemos um refrigerador?

- A) Sim
- B) Não
- C) Depende

## Teste conceitual 19.6

Se rodarmos o ciclo de uma máquina térmica ao contrário, obtemos um refrigerador?

A) Sim

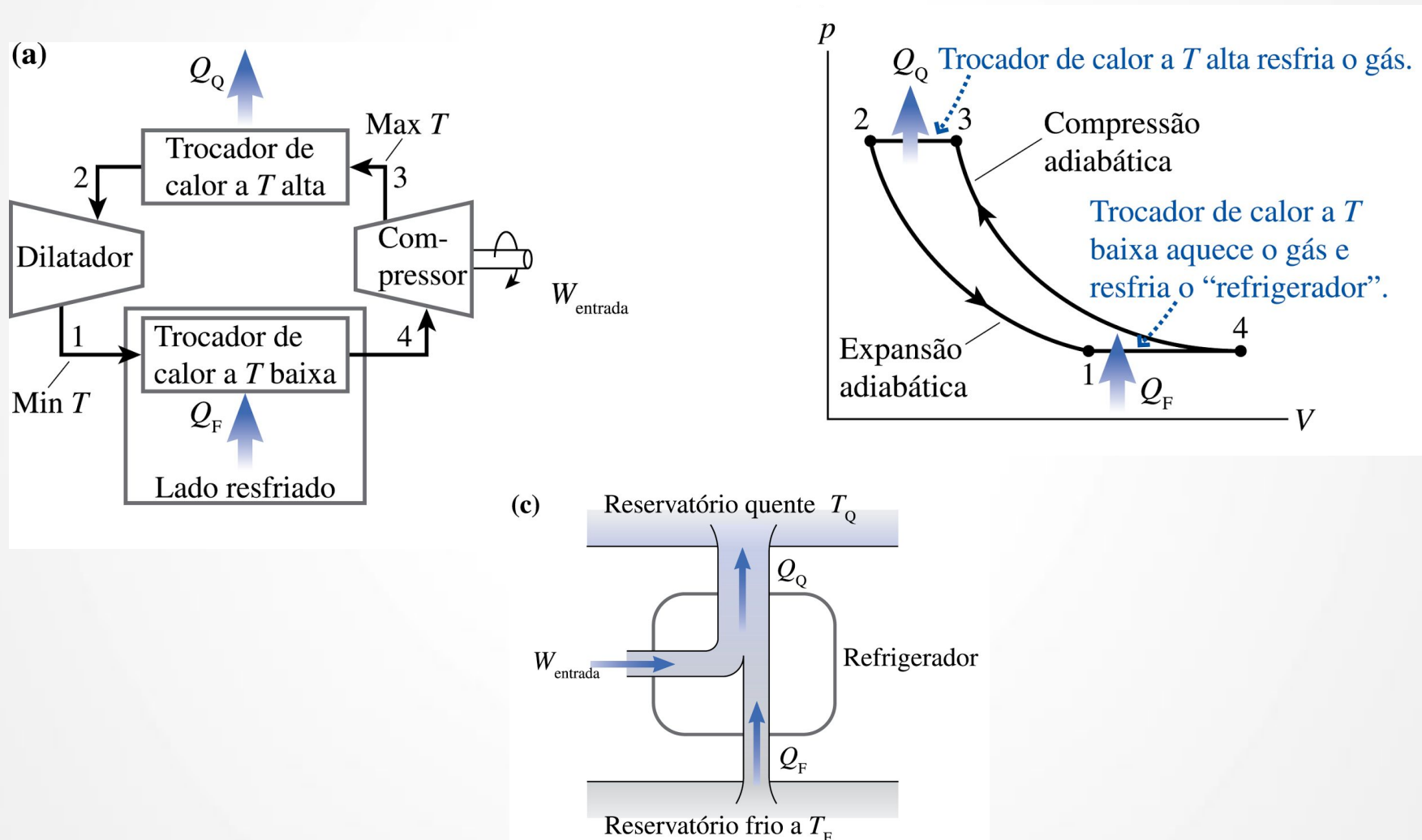
B) Não

C) Depende

1 - os reservatórios térmicos necessários para percorrer um ciclo no sentido anti-horário têm em geral temperaturas  $T_F$  e  $T_Q$  **diferentes** das usadas no sentido horário

Se rodarmos o ciclo de uma máquina térmica ao contrário, obtemos um refrigerador?

## Ex.: 19.3 Refrigerador com Ciclo de Brayton

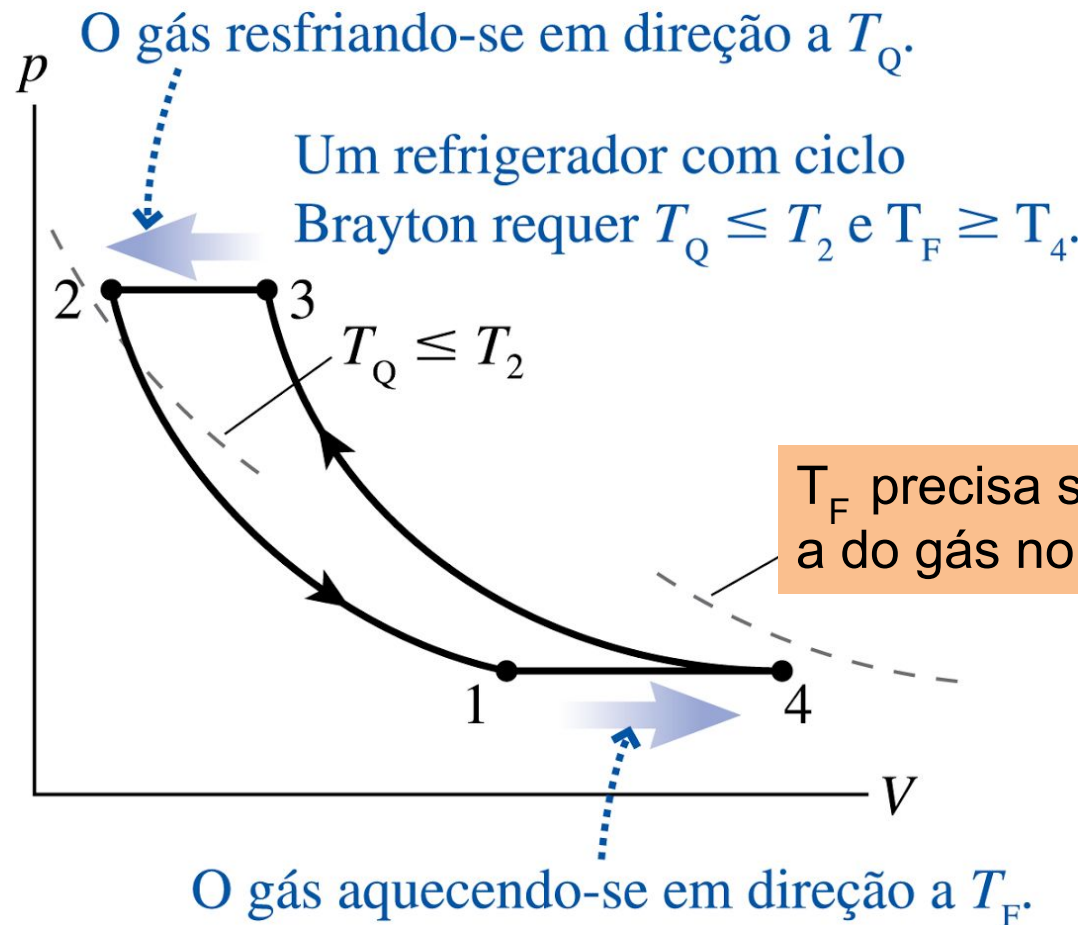




Se rodarmos o ciclo de uma máquina térmica ao contrário, obtemos um refrigerador?

### Ex.: 19.3 Refrigerador com Ciclo de Brayton

$T_Q$  precisa ser **menor** que a do gás no trecho 2 - 3



Note: condições **diferentes** das necessárias para a Máq. térmica

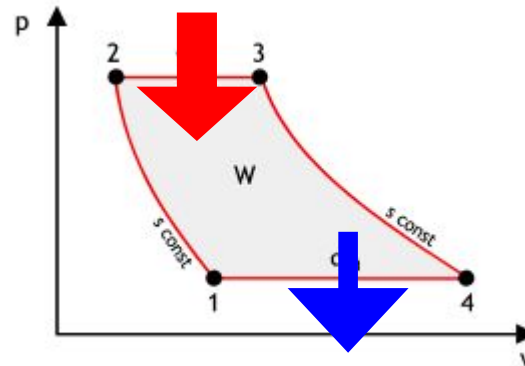
Se rodarmos o ciclo de uma máquina térmica ao contrário, obtemos um refrigerador?

### Ex.: 19.3. Ciclo de Brayton – Máquina Térmica

$$T_Q \geq T_3 = 476\text{K}$$

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

$$Q_{32} = Q_Q = +14,3\text{J}$$



Sentido horário

Máquina T.

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

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

Se rodarmos o ciclo de uma máquina térmica ao contrário, obtemos um refrigerador?

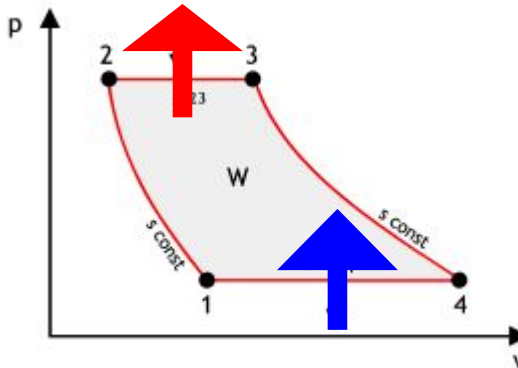
## Ex.: 19.3 Ciclo de Brayton - Refrigerador

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

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

Condições necessárias p/ esse refrigerador. São satisfeitas, por exemplo, no congelador da sua cozinha!

$$Q_{32} = Q_Q = -14,3\text{J}$$



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

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

Sentido  
anti-horário

Refrigerador

## Teste conceitual 19.6

Se rodarmos o ciclo de uma máquina térmica ao contrário, obtemos um refrigerador?

A) Sim

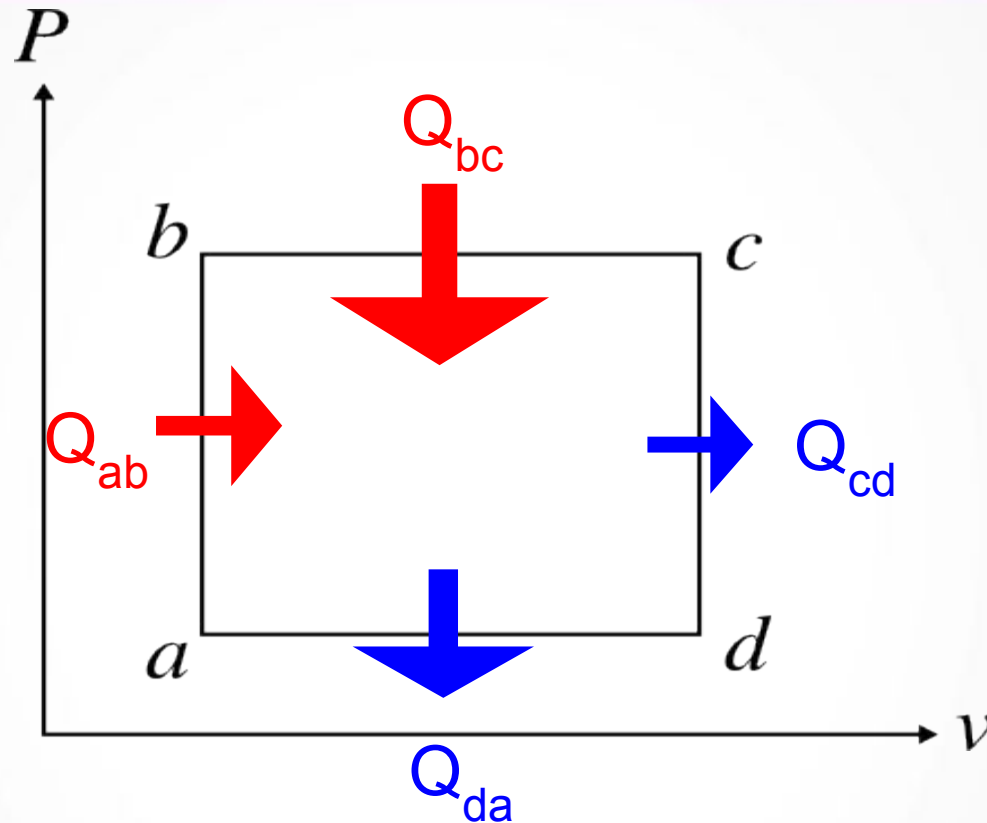
B) Não

C) **Depende**

1 - os reservatórios térmicos necessários para percorrer um ciclo no sentido anti-horário têm em geral temperaturas  $T_F$  e  $T_Q$  **diferentes** das usadas no sentido horário

2 – em alguns casos, pode ocorrer de  $T_F > T_Q$  !! Nesse caso o ‘refrigerador’ estará esquentando o lado que já está mais frio!

## Ex.: 19.2 : sentido horário (máq. térmica)



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

$$T_b = T_d = 900 \text{ K}$$

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

$$Q_{ab} = 0,5 \text{ MJ}$$

$$Q_{bc} = 2,1 \text{ MJ}$$

$$Q_q = +2,6 \text{ MJ}$$

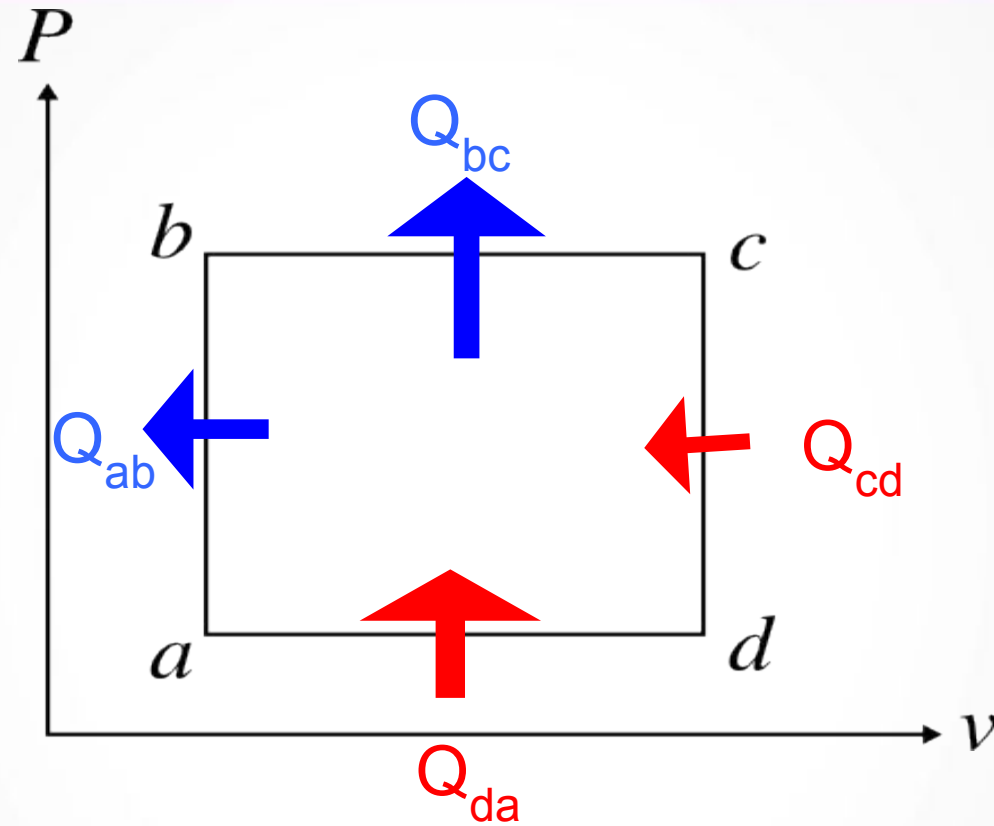
$$Q_{cd} = -1,5 \text{ MJ}$$

$$Q_{da} = -0,7 \text{ MJ}$$

$$Q_f = -2,2 \text{ MJ}$$

$$W^{\text{ciclo}} = W^{\text{pelo}} = +0,4 \text{ MJ}$$

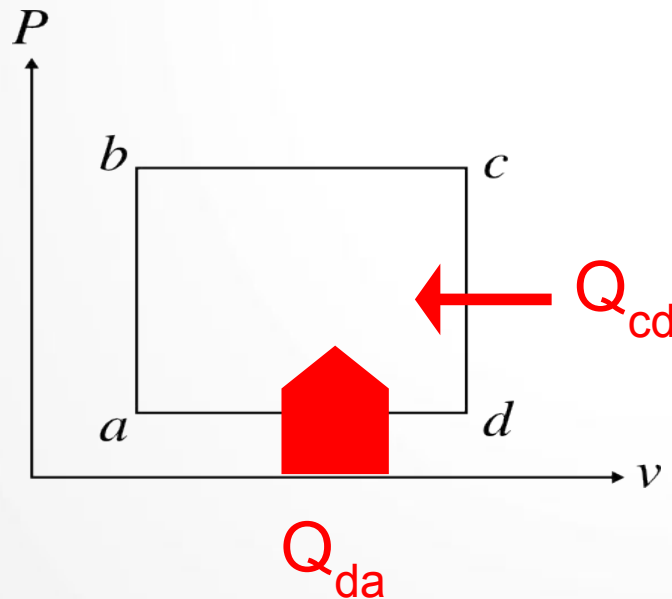
Ex.: 19.2 : sentido anti-horário (será isto um refrigerador?)



$$T_a = 300 \text{ K}$$
$$T_b = T_d = 900 \text{ K}$$
$$T_c = 2700 \text{ K}$$

Em um refrigerador, o calor que entra no sistema vem do reservatório frio. Pela 2ª Lei, a temperatura do reservatório frio deve então ser **maior que a maior temperatura do sistema** enquanto ambos estiverem em contato.

**Ex.: 19.2**



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

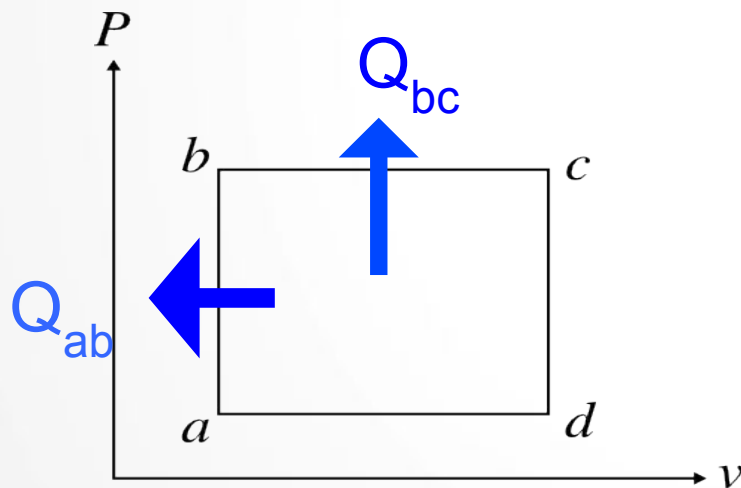
$$T_b = T_d = 900 \text{ K}$$

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

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

Em um refrigerador, o calor que sai do sistema vai pro reservatório quente. Pela 2ª Lei, a temperatura do reservatório quente deve então ser menor que a menor temperatura do sistema enquanto ambos estiverem em contato.

**Ex.: 19.2**



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

$$T_b = T_d = 900 \text{ K}$$

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

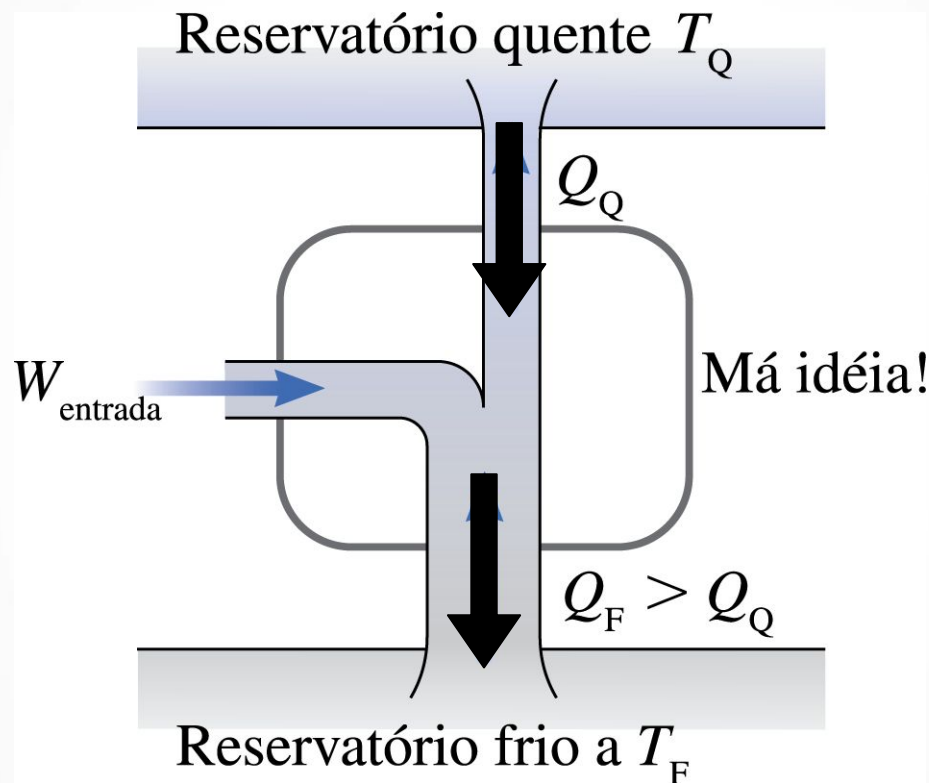
$$T_Q \leq T_a = 300 \text{ K}$$

$$T_Q < T_F \text{ ?????!!}$$



P: Se rodamos o ciclo de uma máquina térmica ao contrário, obtemos um refrigerador?

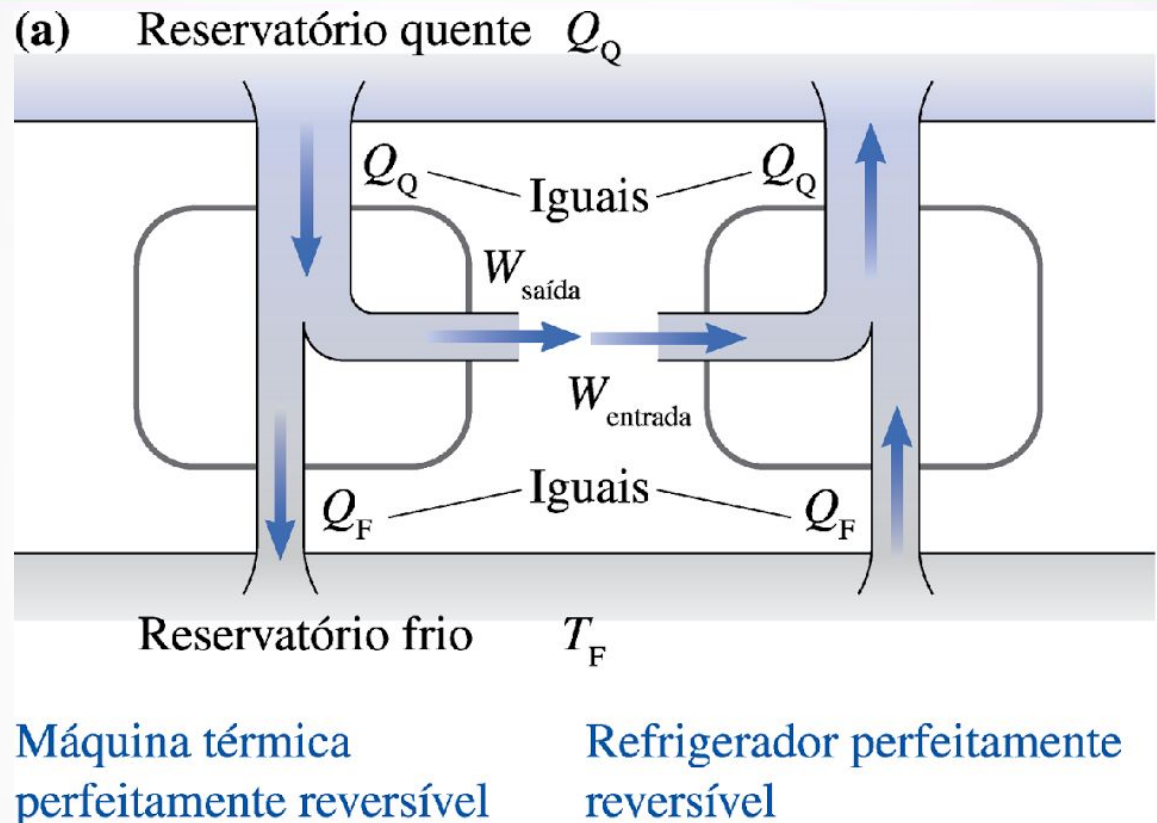
Nesse caso obtemos um dispositivo “inútil”, que gasta trabalho para fazer o que já ocorreria naturalmente !!



**ATENÇÃO:** Fig 19.19: setas impressas no livro c/ sentidos ERRADOS

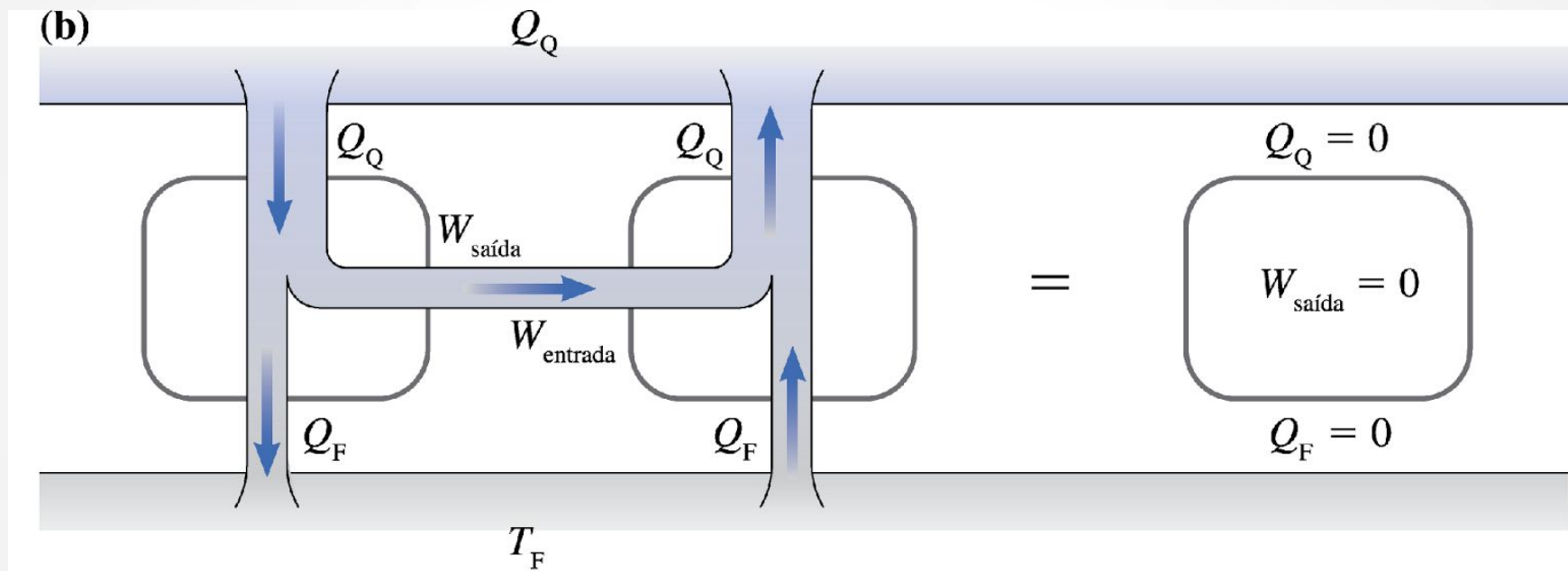
A 2ª Lei da Termodinâmica e os limites de eficiência de máquinas térmicas.

# 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

+

Refrigerador perfeitamente  
reversível

=

Nenhum trabalho realizado  
e nenhum calor transferido

# Máquina Térmica Perfeitamente Reversível

Já sabemos que a 2a Lei da Termodinâmica proíbe a construção de máquinas térmicas perfeitas.

Na verdade, a proibição é ainda mais forte: dados dois reservatórios térmicos, **não é possível construir qualquer máquina mais eficiente que uma máquina reversível !**

Argumento (v. quadro p/ detalhes):

- i) **suponha que existisse uma “super” Máq. Térm. com rendimento maior que uma MT reversível .**
- ii) considere o refrigerador R obtido rodando a MT reversível ao contrário.
- iii) Nesse caso, usando o W produzido pela ‘super’ como entrada para R, seria possível enviar espontaneamente calor do reservatório frio para o quente -> viola 2a Lei!
- iv) **Portanto (i) é falso.**

P: mas seria mesmo possível *construir* uma MT reversível?

Que características uma máquina dessas precisa ter?

# Máquina Térmica Perfeitamente Reversível

A 2ª Lei da Termodinâmica diz que são processos *irreversíveis*

- a) a conversão espontânea de trabalho em energia térmica (ie por atrito)
- b) o fluxo de calor entre corpos a temps. diferentes

Assim, uma Máq. Térm. Perfeitamente Reversível deve ser constituída APENAS de:

→ Interações Mecânicas com  $Q=0$  e sem atrito

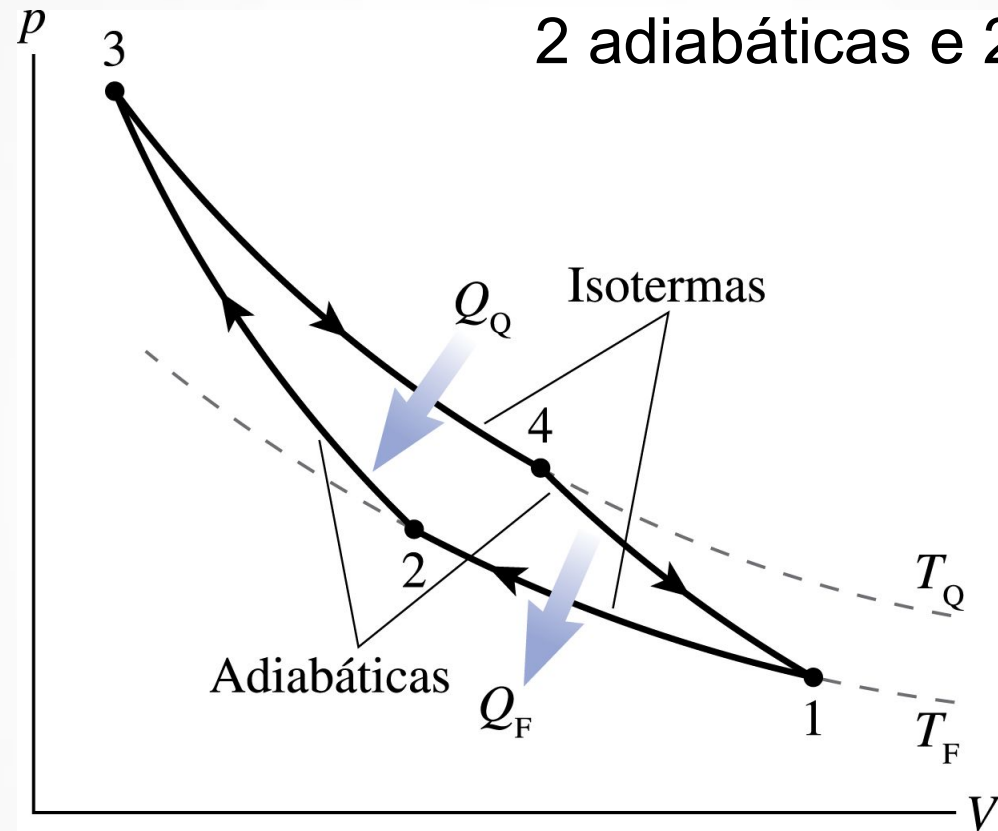
→ Trocas de calor Isotérmicas ( $\Delta E^{\text{term}} = 0$ )

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



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

## Teste Conceitual 19.7

As máquinas térmicas A e B são ambas reversíveis e atuam entre os mesmos reservatórios térmicos. A máq. A é uma máquina de Carnot usando um gás ideal, mas a máquina B funciona de uma maneira bem diferente. É correto dizer que:

- A)  $\eta_A = \eta_B$  necessariamente
- B)  $\eta_A$  deve ser  $< \eta_B$ , pois uma máquina baseada em gases ideais é a mais simples possível
- C)  $\eta_A$  deve ser  $> \eta_B$ , pois uma máquina baseada em gases ideais é a mais simples possível
- D) Podemos ter  $\eta_A = \eta_B$ ,  $< \eta_B$ , ou  $> \eta_B$ , dependendo dos detalhes das duas máquinas reversíveis.

## Teste Conceitual 19.7

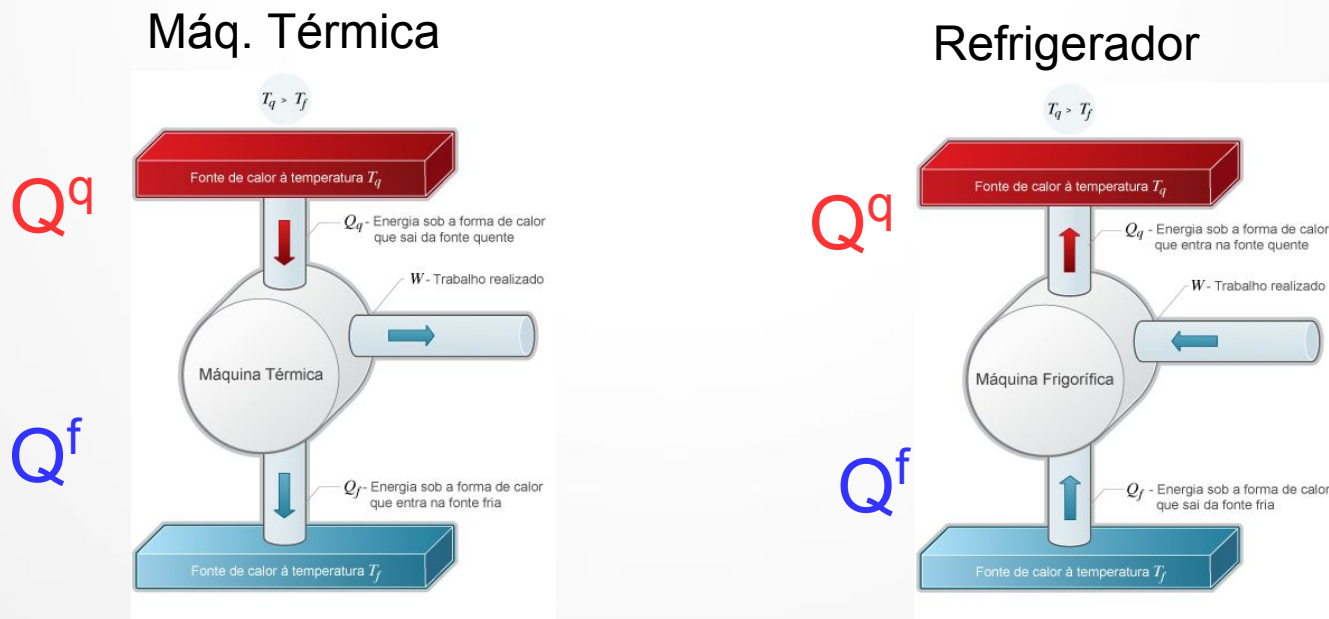
As máquinas térmicas A e B são ambas reversíveis e atuam entre os mesmos reservatórios térmicos. A máq. A é uma máquina de Carnot usando um gás ideal, mas a máquina B funciona de uma maneira bem diferente. É correto dizer que:

- A)  $\eta_A = \eta_B$  necessariamente
- B)  $\eta_A$  deve ser  $< \eta_B$ , pois uma máquina baseada em gases ideais é a mais simples possível
- C)  $\eta_A$  deve ser  $> \eta_B$ , pois uma máquina baseada em gases ideais é a mais simples possível
- D) Podemos ter  $\eta_A = \eta_B$ ,  $< \eta_B$ , ou  $> \eta_B$ , dependendo dos detalhes das duas máquinas reversíveis.

# Teste Conceitual 19.8

Em se tratando de máquinas térmicas (MT's) e refrigeradores (R's)

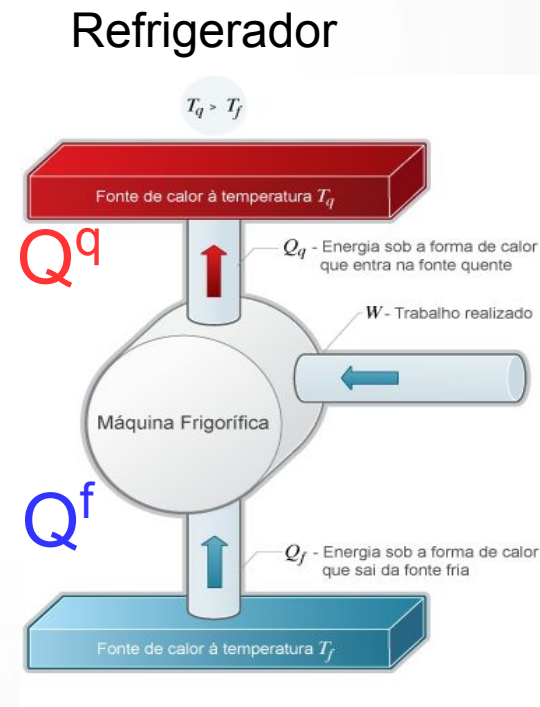
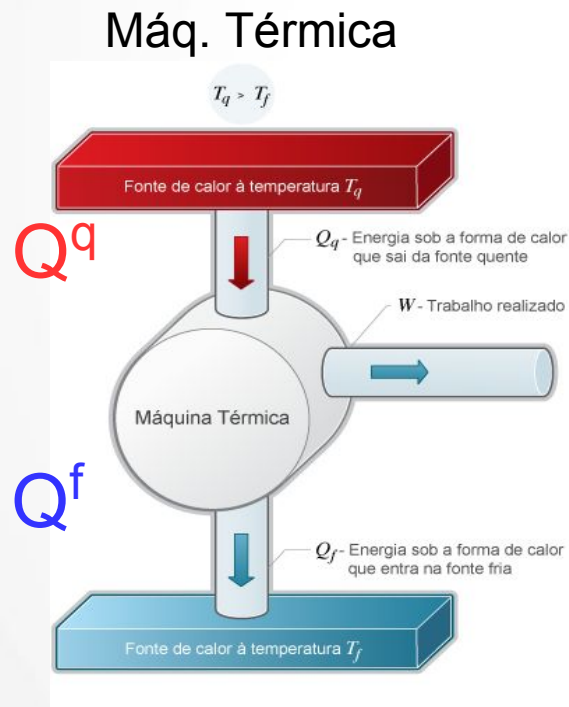
- A) Para MT's, sempre  $Q_Q > Q_F$ , mas para R's sempre  $Q_Q < Q_F$
- B) Tanto para MT's como R's, sempre  $Q_Q < Q_F$
- C) Tanto para MT's como R's, sempre  $Q_Q > Q_F$
- D) Tanto para MT's como R's, podemos ter  $Q_Q > Q_F$  ou  $Q_Q < Q_F$ , dependendo do caso.



# Máquinas Térmicas e Refrigeradores

Obs: Em ambos os casos (máquinas e refrigeradores),

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



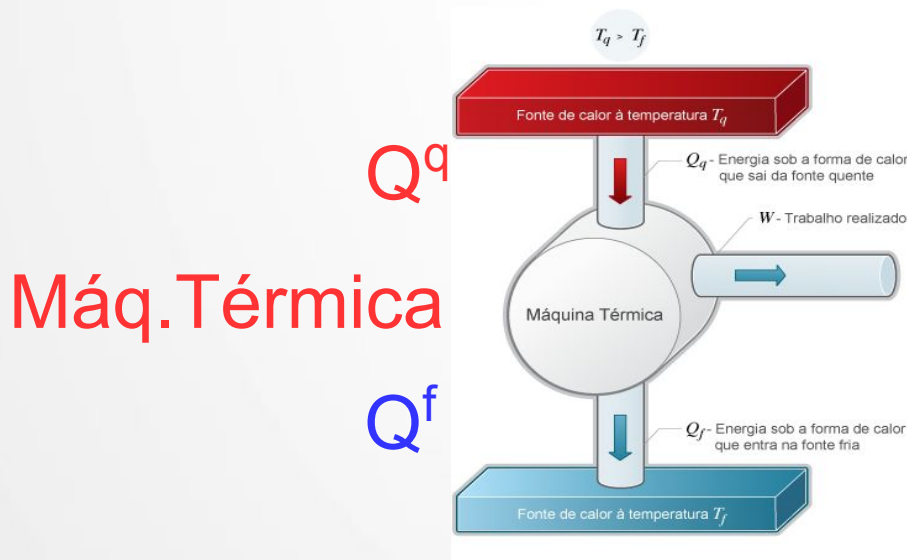
# Máquinas Térmicas

$Q^q$  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.

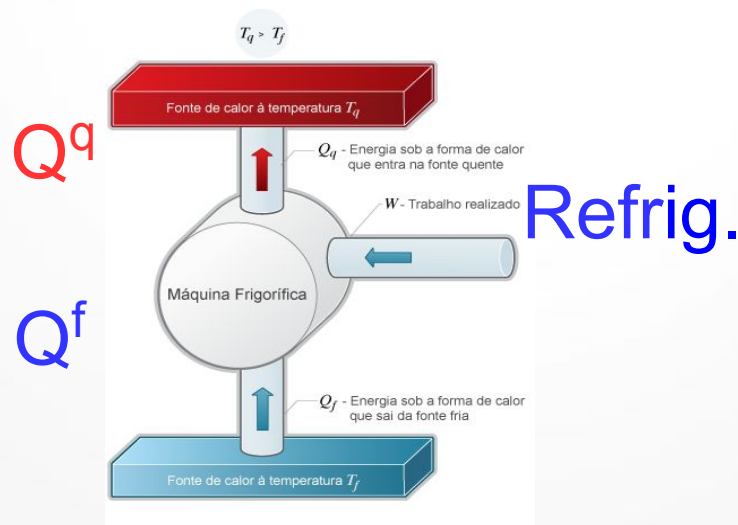


# Refrigeradores Térmicos

$Q^q$  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.

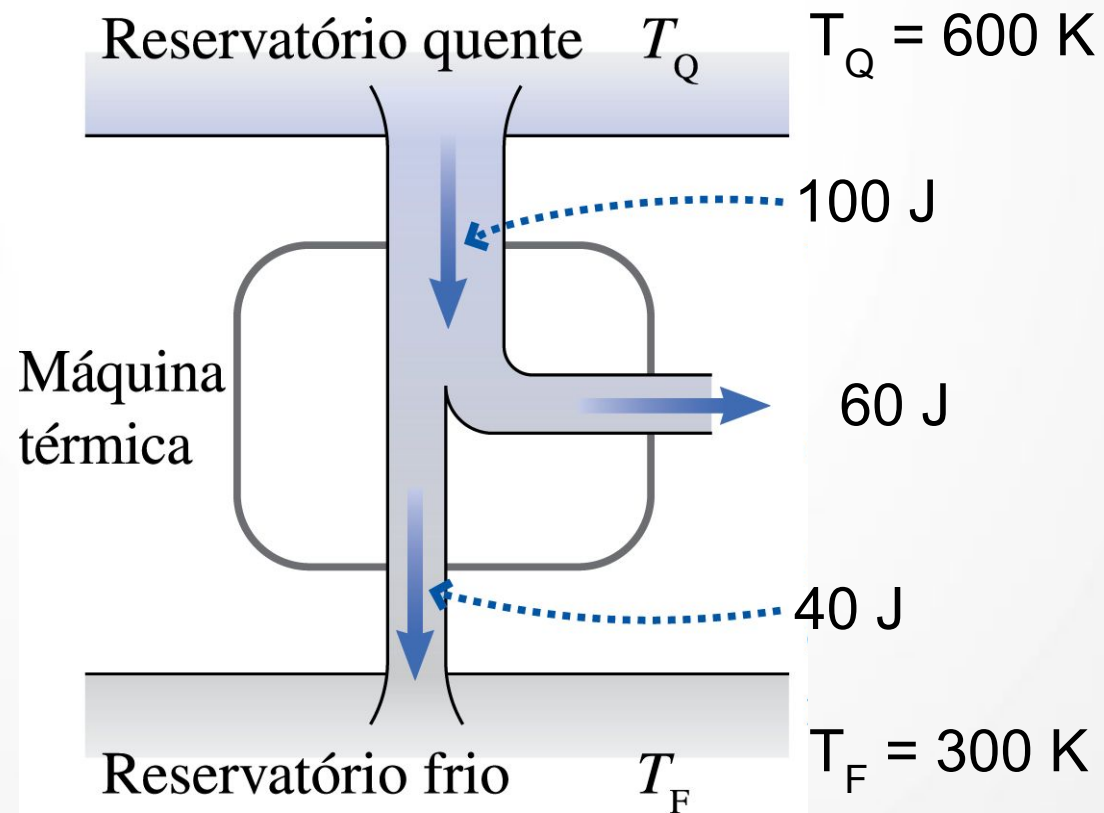
$$Q^q = Q^f + W^{\text{entrada}}$$



## Teste Conceitual 19.9

Esta máquina térmica poderia ser construída?

- a) Sim
- b) Não
- c) É impossível dizer sem saber que tipo de ciclo ela usa.



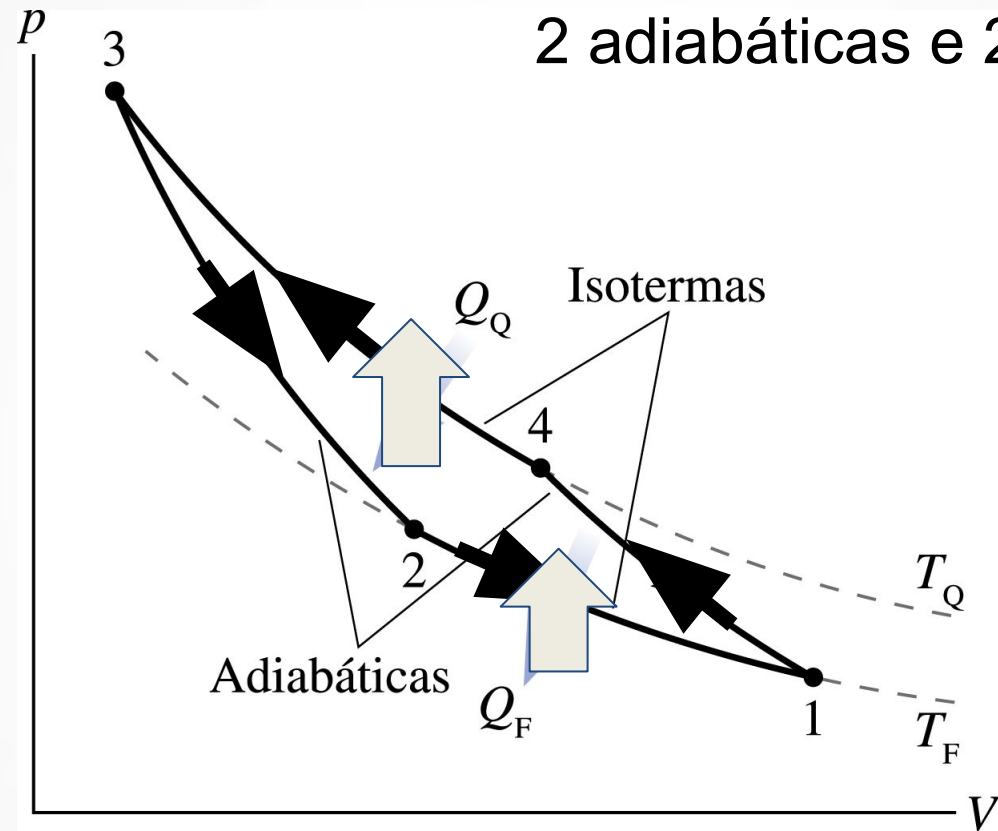


## Ponto crucial

**Qualquer** máquina térmica, por mais complicada que seja, mesmo que não se baseie na manipulação de gases ideais, não pode ser mais eficiente que uma MT baseada em um ciclo de Carnot de um gás ideal entre os mesmos reservatórios térmicos.

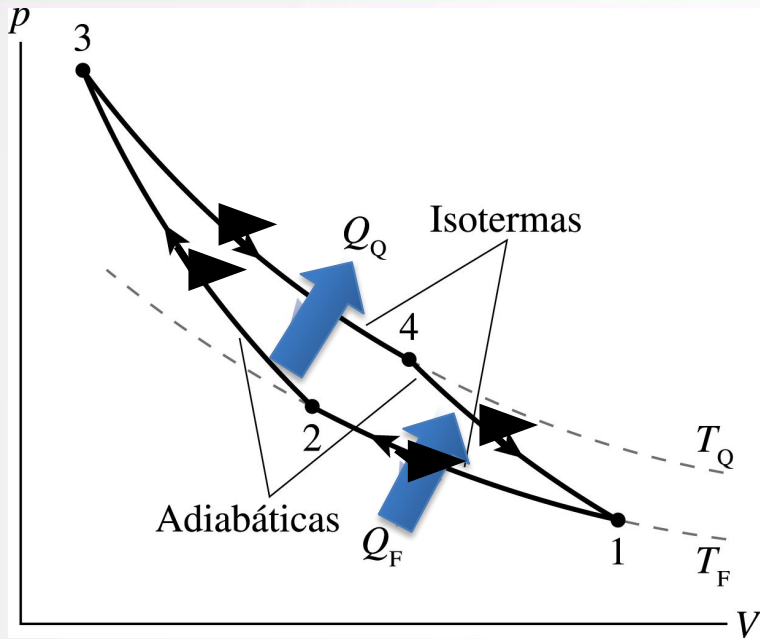
Na melhor das hipóteses, se for uma máquina reversível, ela será tão eficiente quanto o ciclo de Carnot.

# Refrigerador Perfeitamente Reversível - Ciclo de Carnot



$$K_{\text{Carnot}} = T_F / (T_Q - T_F)$$

# Refrigerador de Carnot



Um ciclo de Carnot rodando no sentido anti-horário é um *refrigerador de Carnot*

Um argumento análogo ao que fizemos acima mostra que este é o refrigerador com maior rendimento possível entre todos os que operam entre reservatórios com temperaturas  $T_F$  e  $T_Q$

Rendimento desse refrigerador  
(v. quadro/livro):

$$K_{\text{Carnot}} = T_F / (T_Q - T_F)$$

Obs: note que  $K_{\text{Carnot}} \rightarrow 0$  quando  $T_F \rightarrow 0$ .

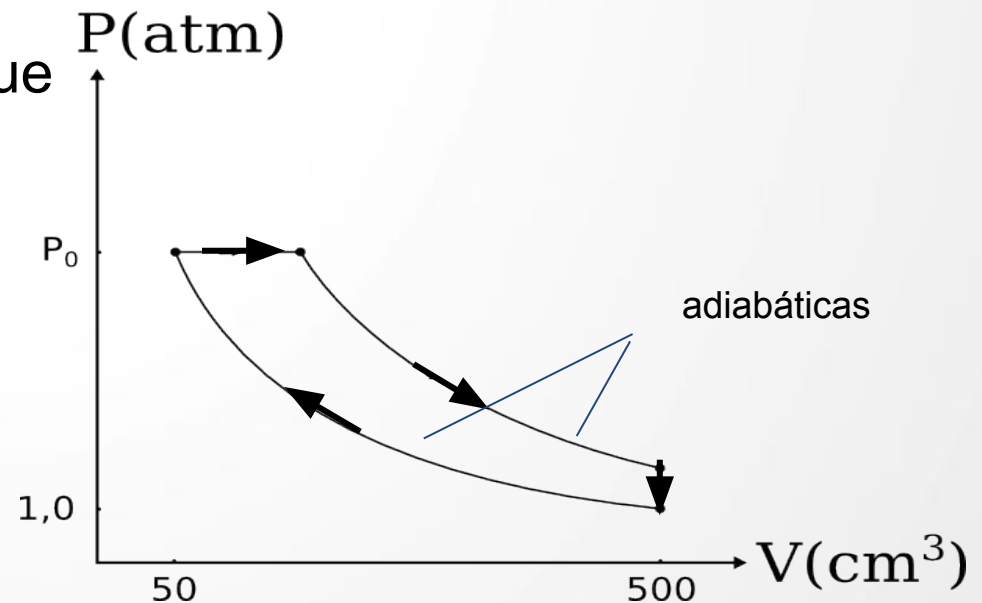
Lembrando que  $K = Q_F / W$ , isto significa que, mesmo com o melhor refrigerador possível (este aqui), o trabalho  $W$  que precisa ser dado para retirar cada J de calor  $Q_F$  do reservatório frio vai a infinito quando  $T_F$  fica pequeno !

Isto implica que seria necessário energia infinita para resfriar um corpo até  $T = 0$  !

## Problema1:

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  $30^\circ\text{C} = 303\text{K}$  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?



## Problema2:

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.

