Física 3

Cap 19 - Máquinas Térmicas

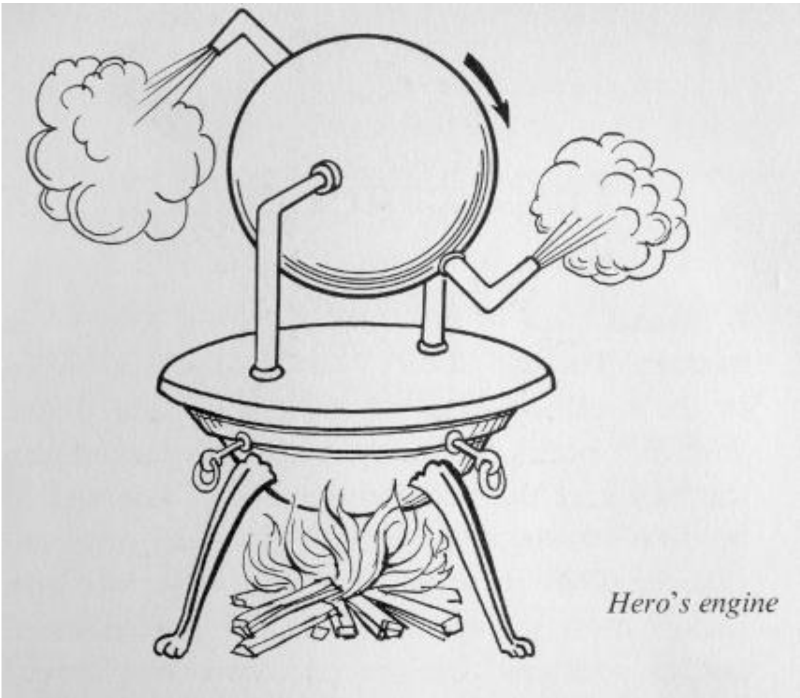
Baseado em parte em slides pelo Prof. Carlos Eduardo Souza

Máquinas Térmicas

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

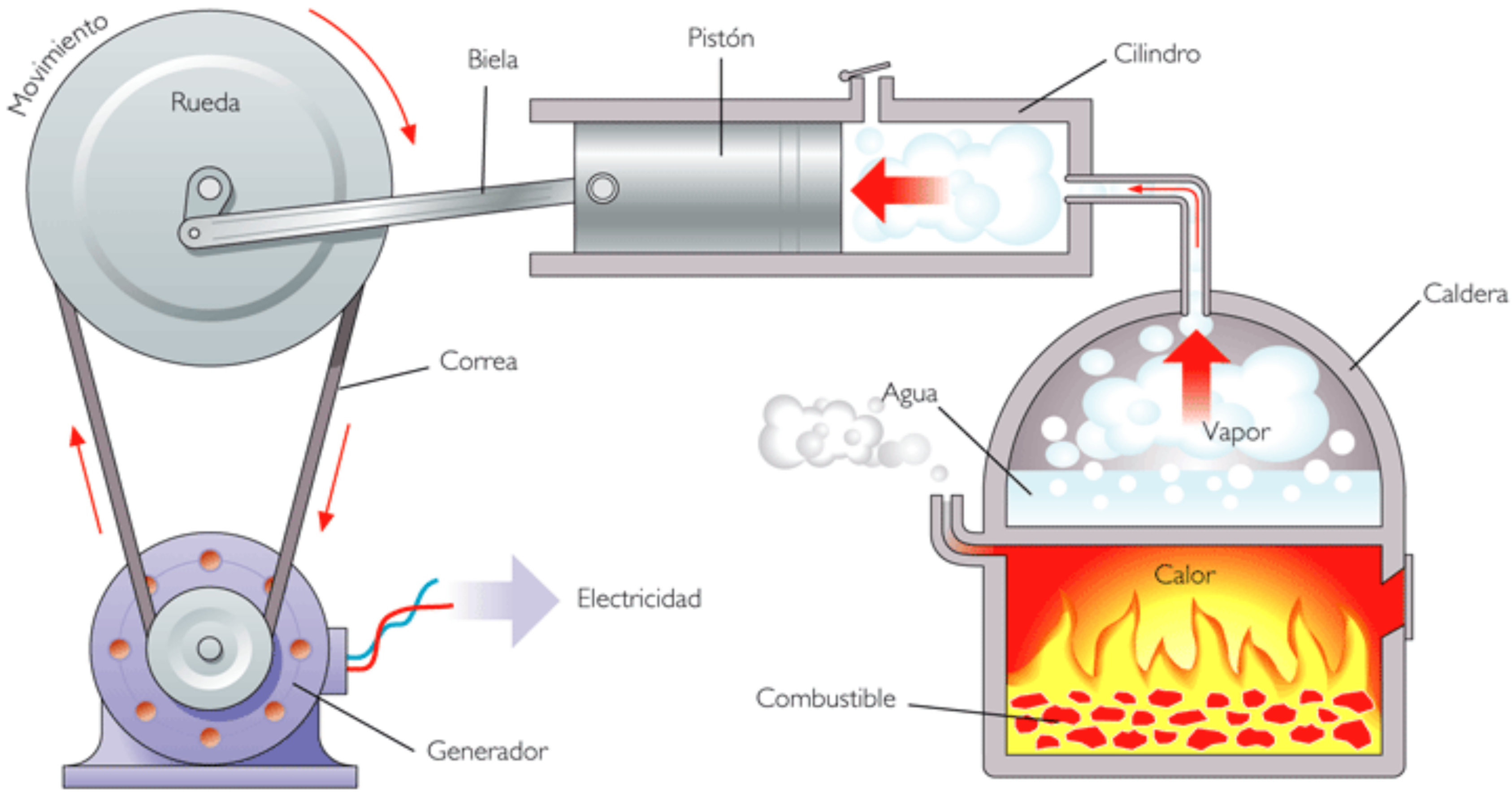
1ª máquina térmica conhecida:
Criada por Herão de Alexandria
(séc 1 d.c.)

Vídeo com versão caseira:
https://youtu.be/u2CbJNz_fFM?t=34s



Máquinas Térmicas

Exemplo: Usina a vapor



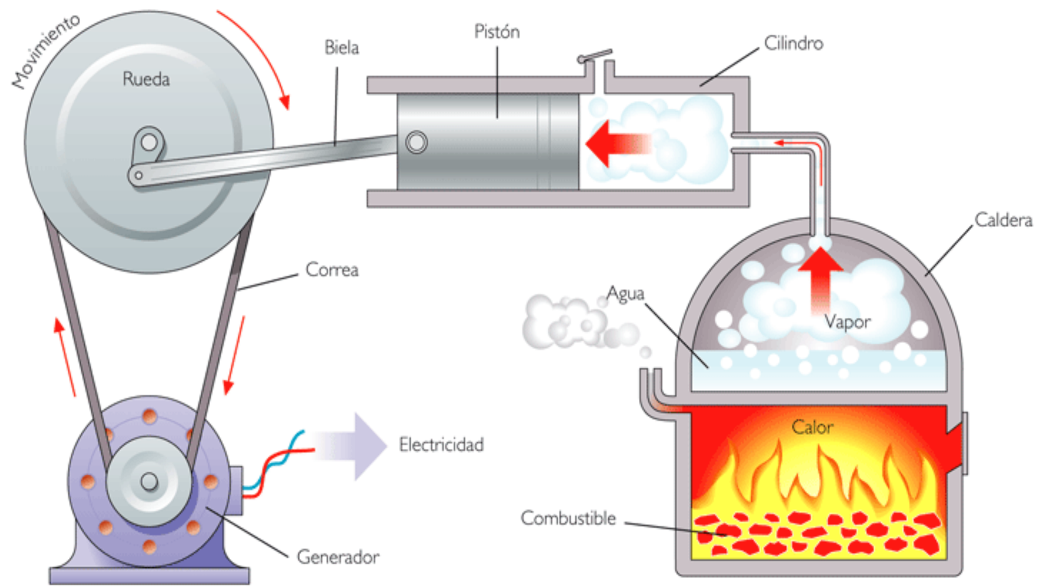
Máquinas Térmicas

Exemplo: Usina a vapor

Elementos

Um **fluido de trabalho** (vapor)

Dois **reservatórios térmicos** (regiões ou objetos grandes o suficiente para que calor seja retirado ou adicionado delas sem que sua temperatura mude muito)

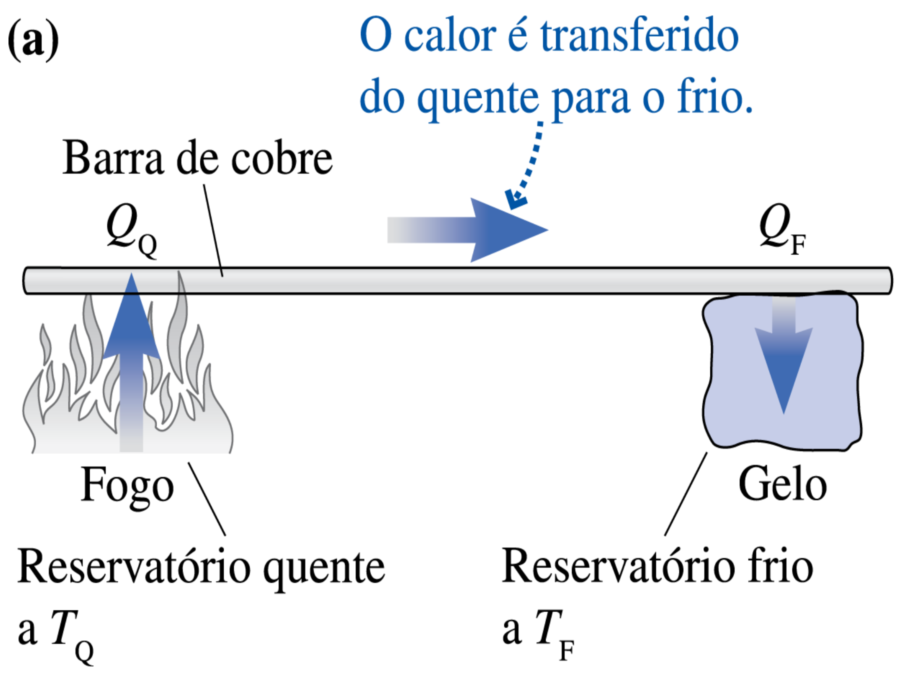


- um reservatório **quente**, que fornece o calor que alimenta a máquina (fornalha)

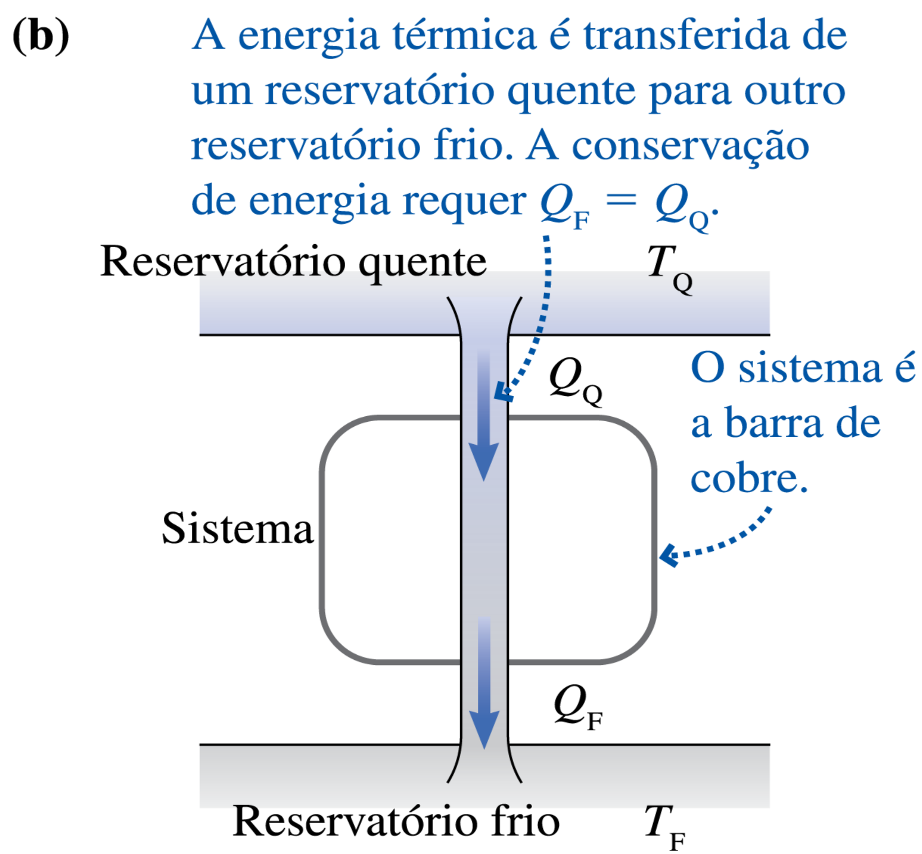
- um reservatório **frio** onde é depositado calor não aproveitado (sistema de refrigeração – não mostrado nessa figura)

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

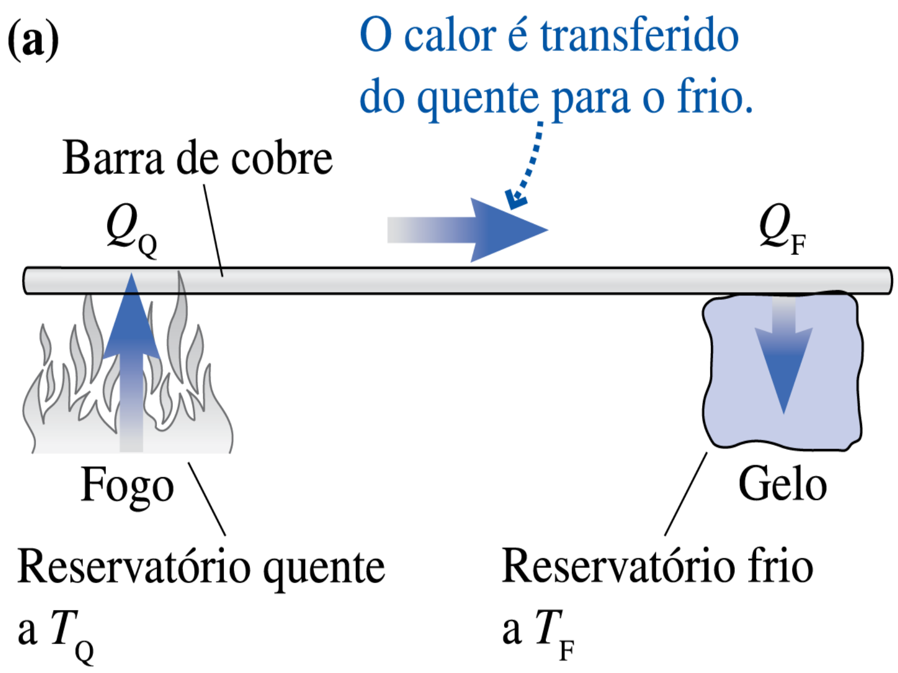


nesse exemplo:
$Q_F = Q_Q$

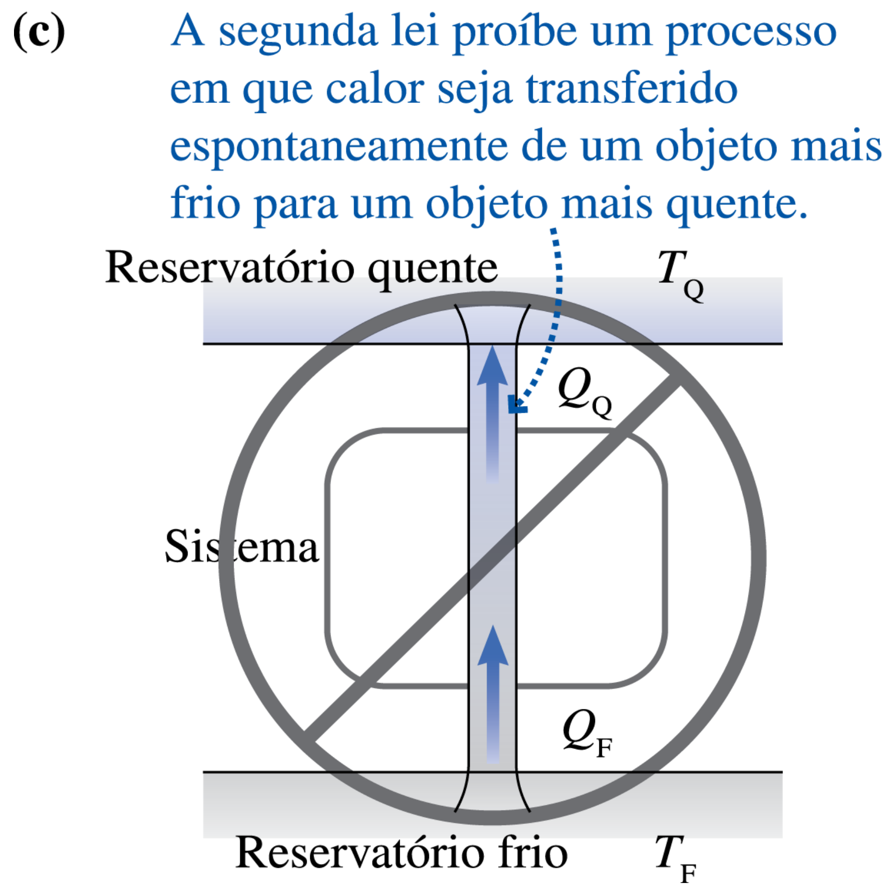


Diagramas de transferência de energia

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



$$Q_F = Q_Q$$



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

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

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

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

Ex.: Expansão Isotérmica:

$$\Delta E^{térm} = 0 \rightarrow Q = W^{pelo} > 0$$

(sistema recebe calor e devolve a energia realizando trabalho)

Máquinas Térmicas

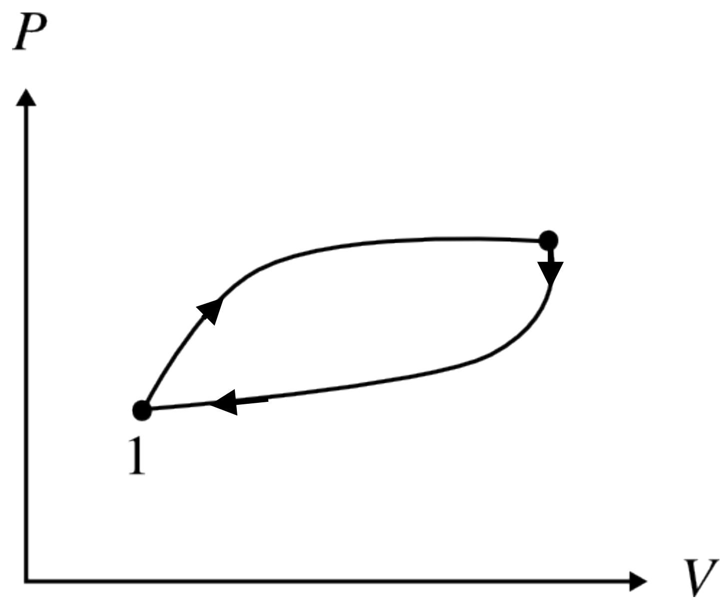
Com essa nova convenção para o sinal do trabalho, a 1ª Lei da Termodinâmica fica

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

Ex. 2: Em um **ciclo,** tb vale:

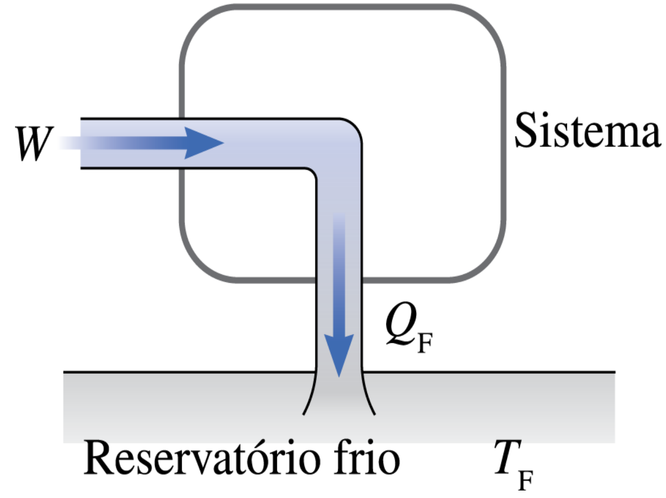
$$\Delta E^{térm} = 0$$

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



Teste conceitual

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

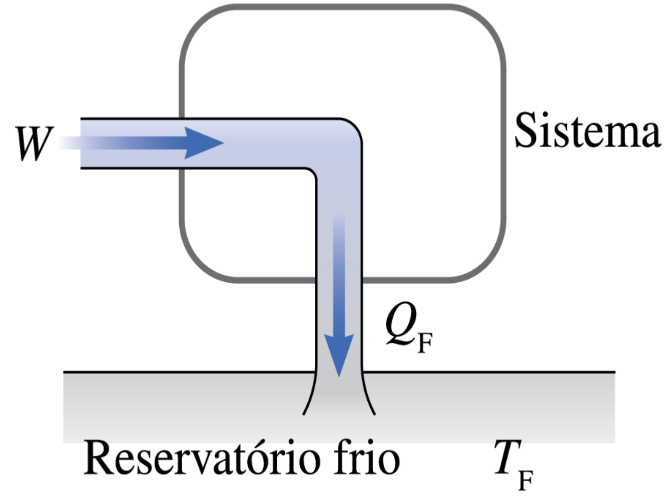


- S recebe uma qtde W de trabalho
- S expele a mesma quantidade de calor Q_F = W para um reservatório térmico a uma temperatura T_F
- Ao fim desse processo, S retornou para sua condição inicial (realizou um ciclo) ?

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

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



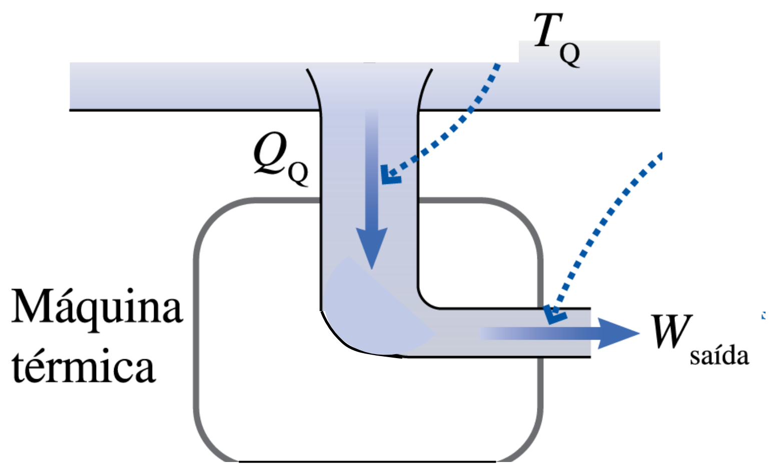
- S recebe uma qtde W de trabalho
- S expele a mesma quantidade de calor Q_F = W para um reservatório térmico a uma temperatura T_F
- Ao fim desse processo, S retornou para sua condição inicial (realizou um ciclo) ?

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: experiencia de Joule

Teste conceitual

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



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

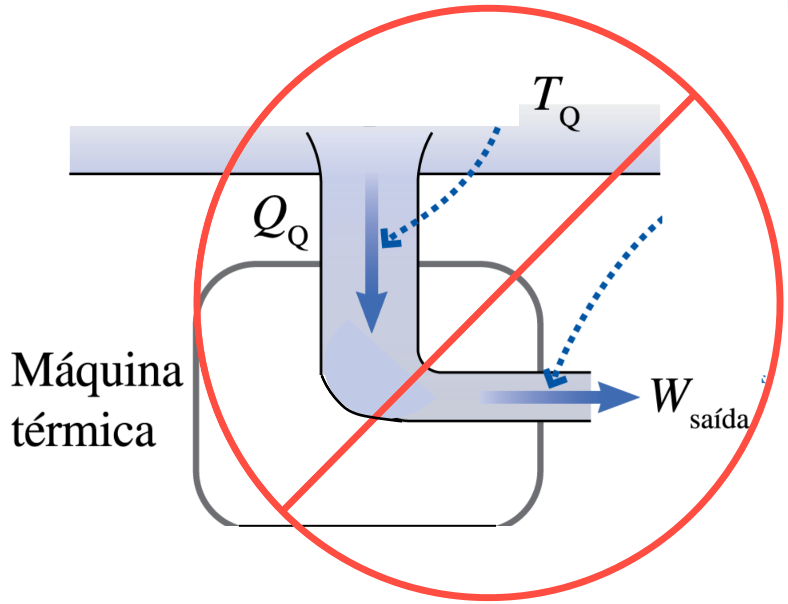
$$W = Q_Q$$

- 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

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



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

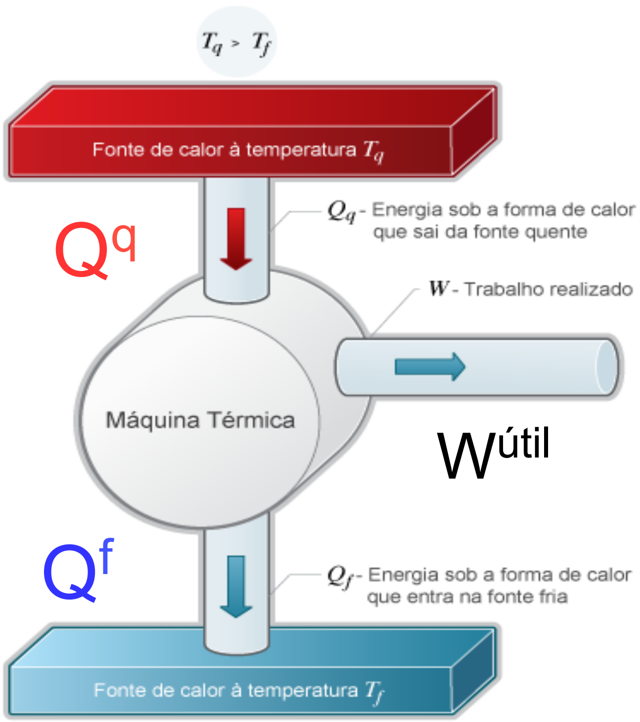
$$W = Q_Q$$

- 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 por que!)

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): $W^{útil} = Q^q - Q^f$

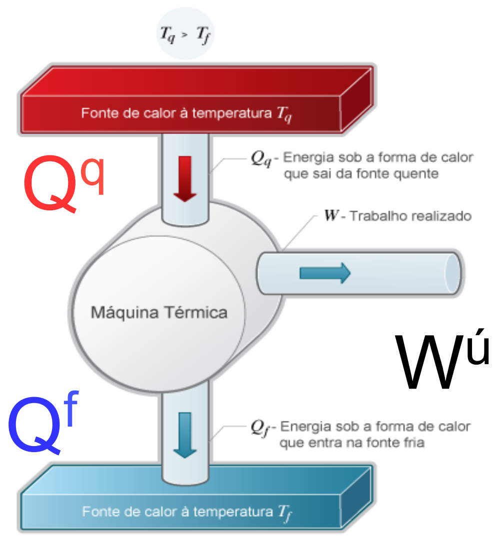
Máquinas Térmicas

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

Def:
Rendimento térmico

$$\eta = W^{útil}/Q^{q}$$

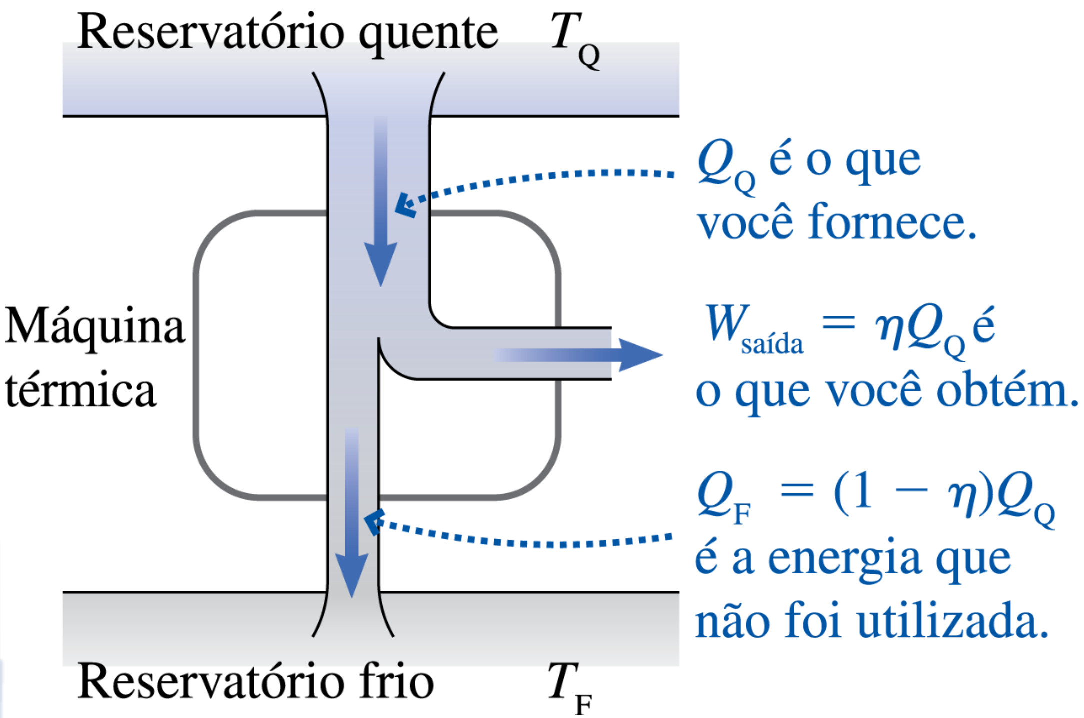
$$= 1 - Q^{f}/Q^{q}$$



$$W^{útil} = Q^{q} - Q^{f}$$

Máquinas Térmicas

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



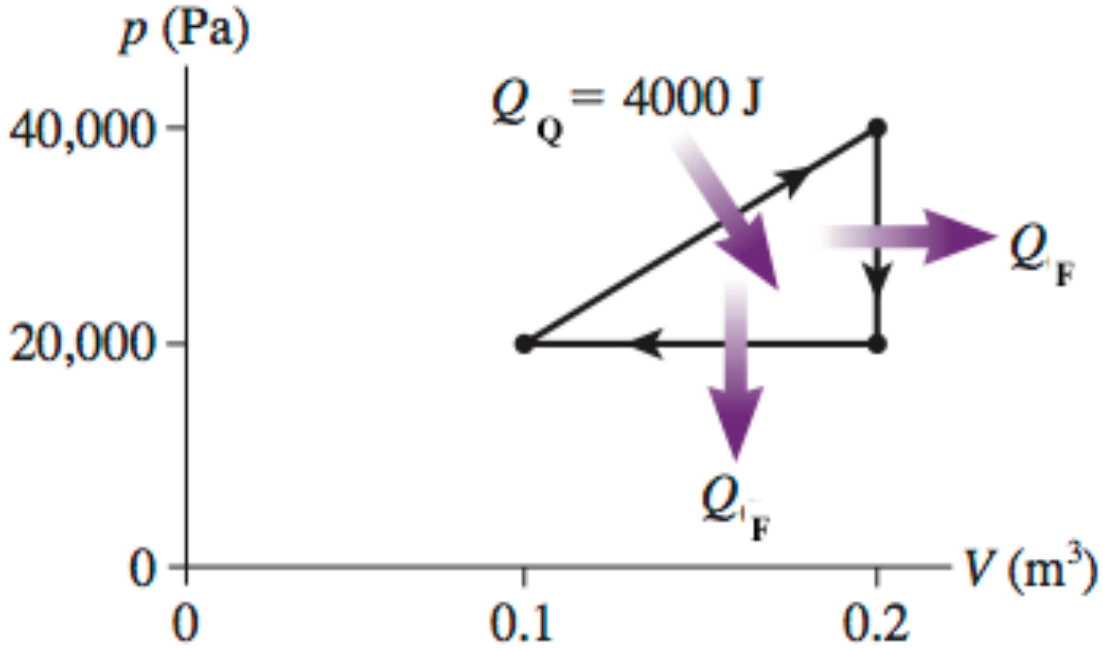
2ª Lei da TD implica: Não existem máquinas térmicas perfeitas!!

Necessariamente

$$\eta < 1 \,!$$

(Obs: ainda temos de provar isso!)

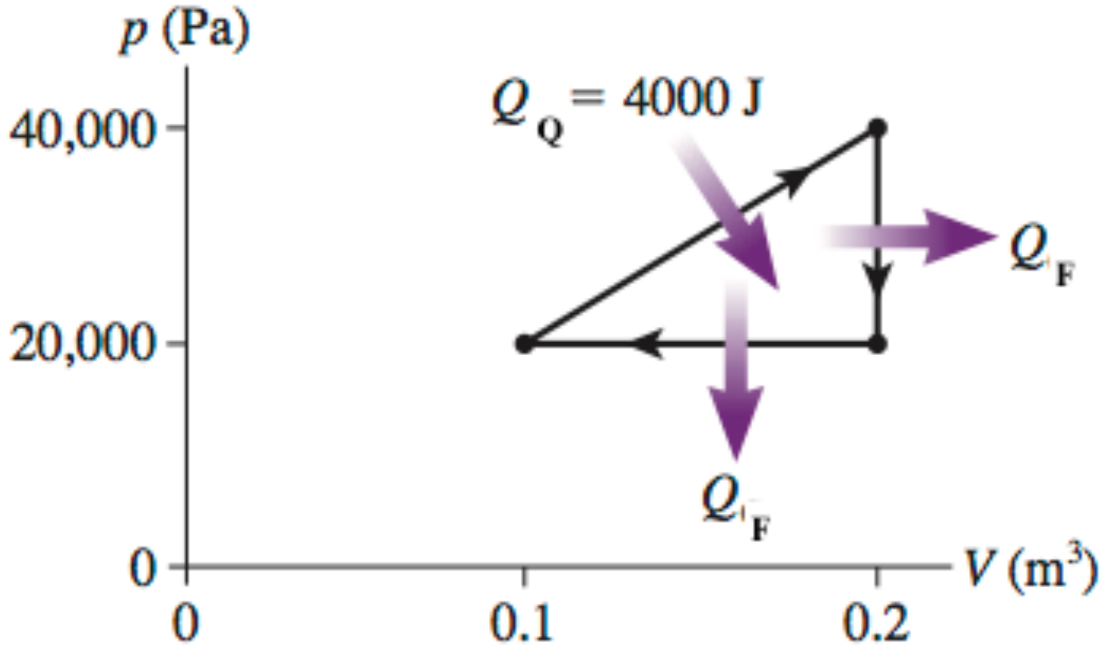
Teste Conceitual



A eficiencia 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



A eficiencia 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

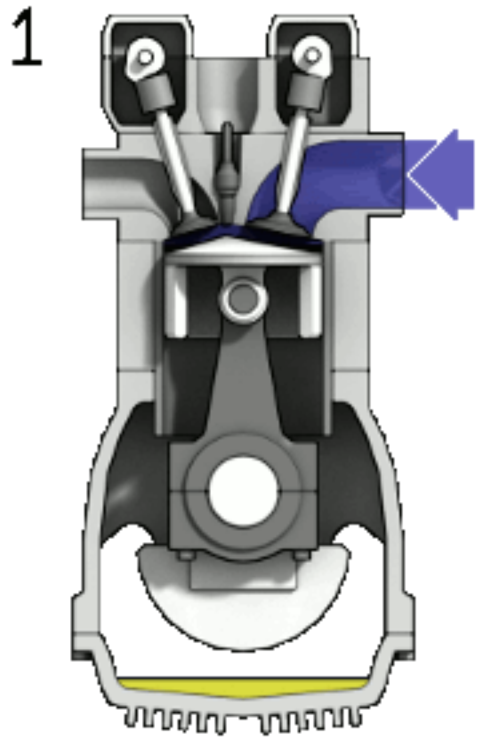
TABELA 19.1 Resumo de processos com gás ideal

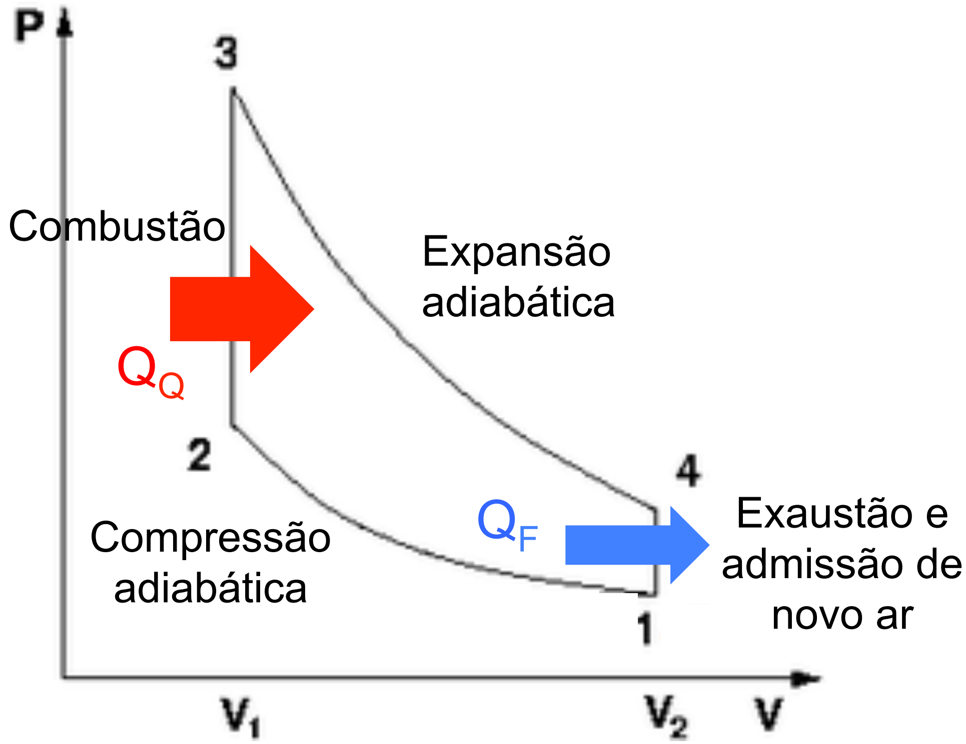
Processo	Lei do gás	Trabalho W_s	Calor Q	Energia térmica
Isocórico	$p_i/T_i = p_f/T_f$	0	$nC_V\Delta T$	$\Delta E_{term} = Q$
Isobárico	$V_i/T_i = V_f/T_f$	$p\,\Delta V$	$nC_P\Delta T$	$\Delta E_{term} = Q - W_s$
Isotérmico	$p_iV_i = p_fV_f$	$nRT\ln(V_f/V_i)$ $pV\ln(V_f/V_i)$	$Q = W_s$	$\Delta E_{term}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

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

Máquinas Térmicas

Exemplo: Motor a gasolina em 4 tempos (ciclo de Otto)





Teste conceitual

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

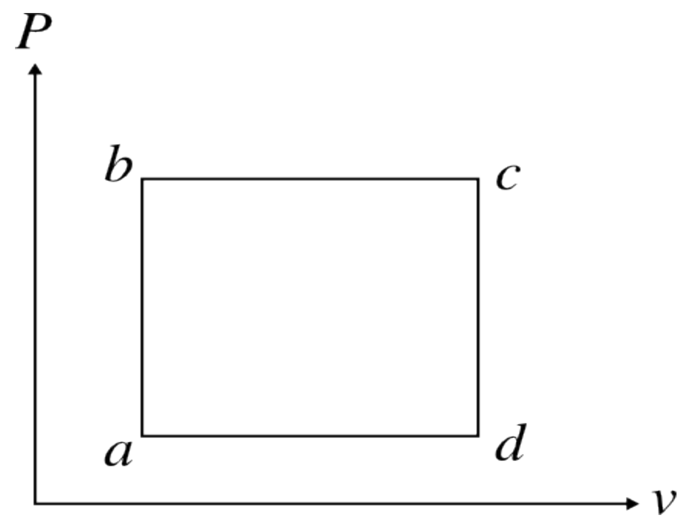
Em quais dos trechos do ciclo temos respectivamente calor entrando de um reservatório quente, ou calor saindo para um reservatório frio?

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

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

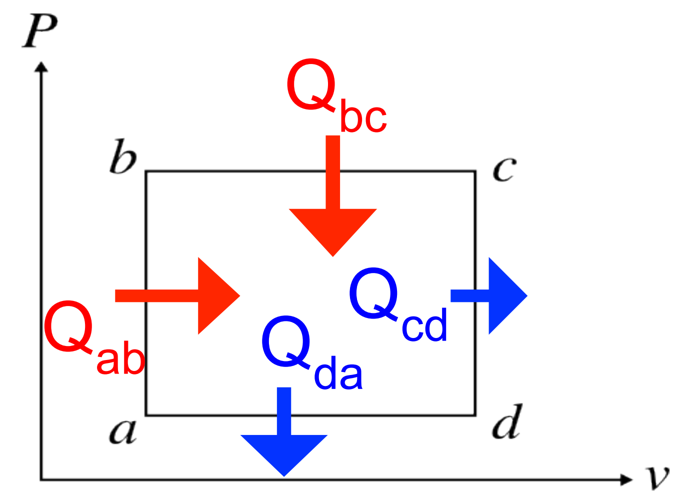
Em quais dos trechos do ciclo temos respectivamente calor entrando de um reservatório quente, ou calor saindo para um reservatório frio?

A) Entrando: ab e cd; saindo: bc e da

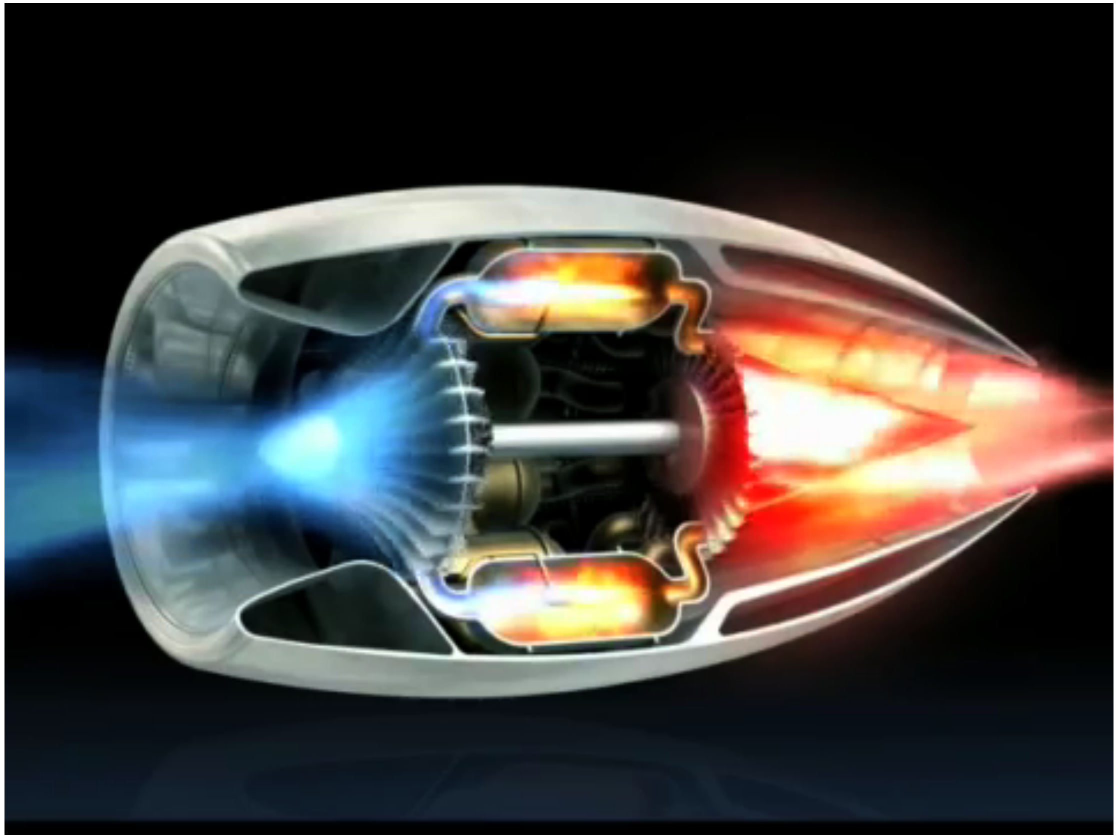
B) Entrando: só ab; saindo: só cd

C) Entrando: ab e bc; saindo: cd e da

D) Entrando: ab e da; saindo: bc e cd



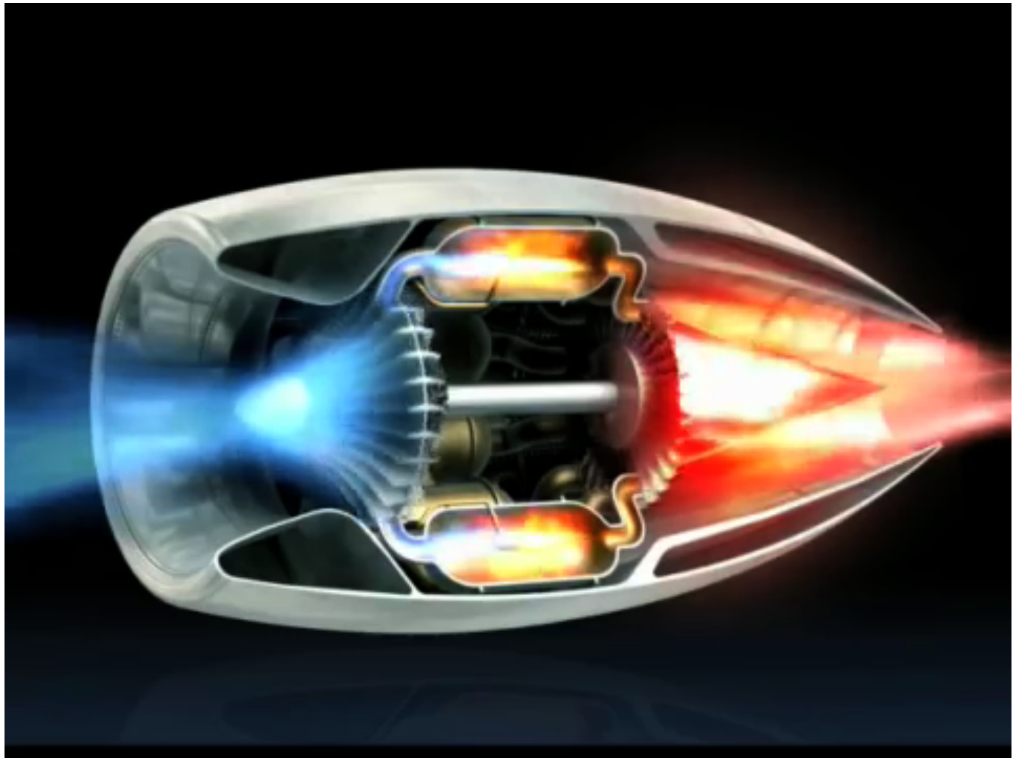
Turbina de avião a jato – ciclo Brayton (aberto)



Vídeo: https://www.youtube.com/watch?v=MUxP3PCDRTE

Origem: Documentário “Whittle the Jet Pioneer” pelo estúdio Rendermedia CGI (UK)

Turbina de avião a jato – ciclo Brayton (aberto)



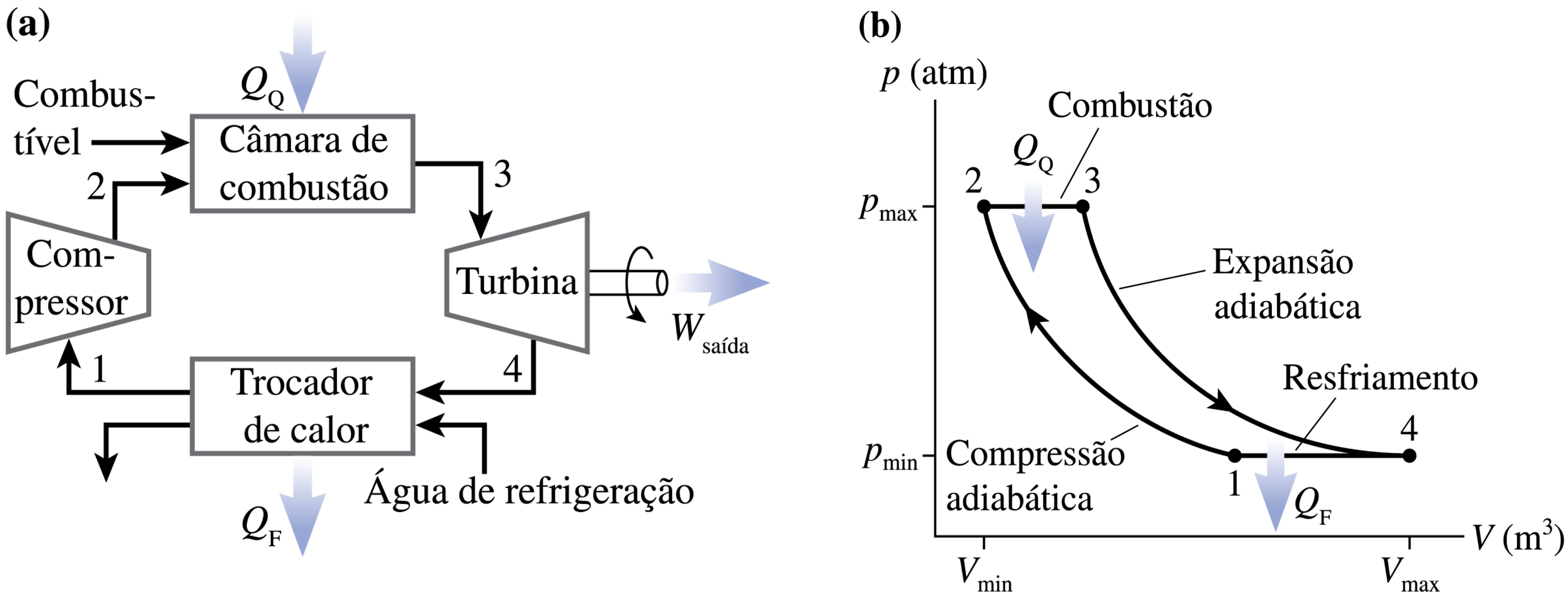
1 – ar frio é rapidamente comprimido ao se chocar com a parte frontal da turbina

2 – o ar é enviado a pressão constante através da câmara de combustão, onde é queirmado com o combustível e aumenta de temperatura

3 – o ar quente expande rapidamente ao sair da câmara de combustão. Ao expandir ele força a turbina a girar

4 – ar (ainda quente) é expelido pela parte traseira da turbina, enquanto novo ar frio é admitido pela parte dianteira

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



No caso da turbina de avião, ao invés de se usar um trocador de calor no trecho 4 -> 1, o gás quente 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)

Rendimento (v. quadro)

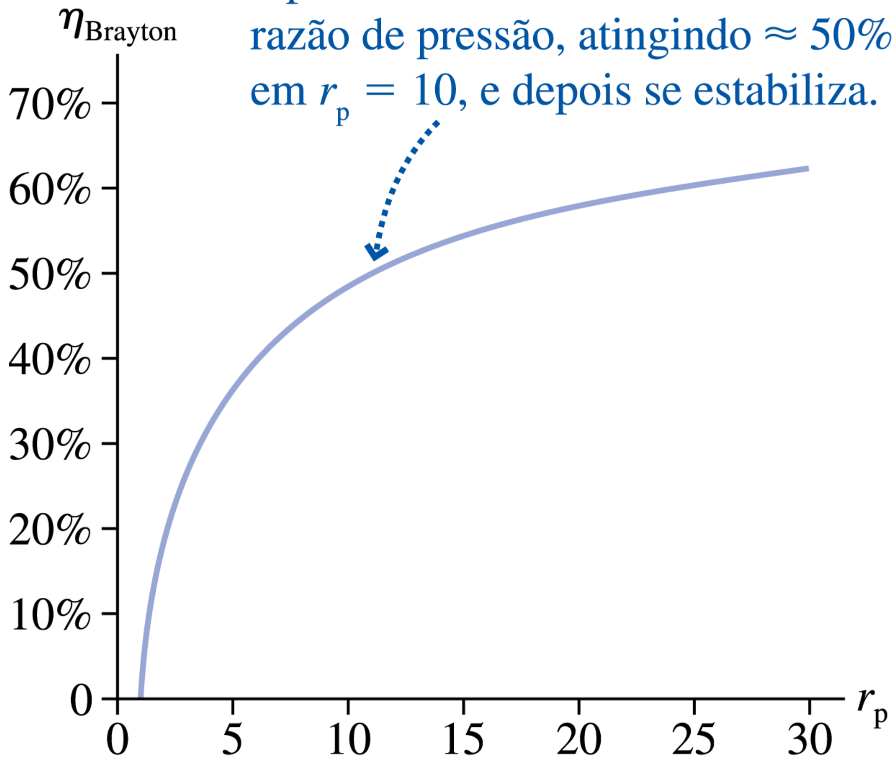
$$\eta_{Brayton} = 1 - \frac{1}{r_p^{(\gamma-1)/\gamma}}$$

$$\simeq 1 - \frac{1}{r_p^{0{,}29}}$$

(p/ gás diatômico)

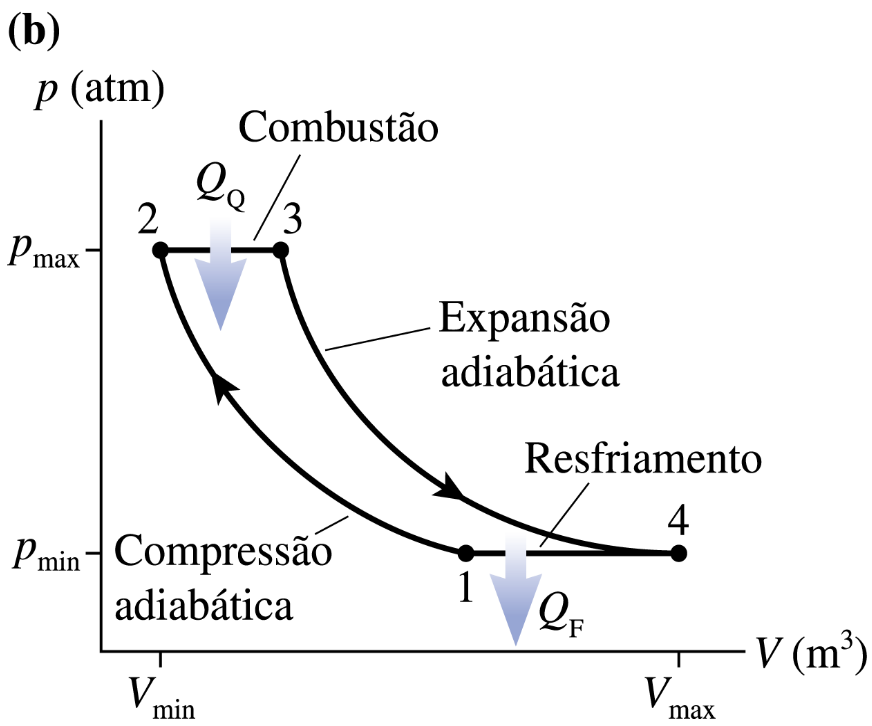
onde $r_p = p_{max} / p_{min}$

Inicialmente o rendimento cresce rapidamente com o aumento da razão de pressão, atingindo ≈ 50% em r_p = 10, e depois se estabiliza.



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

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



Dados (exemplo 19.3 - hélio):

1: P_1 = 150kPa , V_1 = 80cc, T_1 = -73℃

2: P_2 = 750kPa

3: P_4 = 150kPa, V = 100cc, T_4 = -23℃

Resultado:

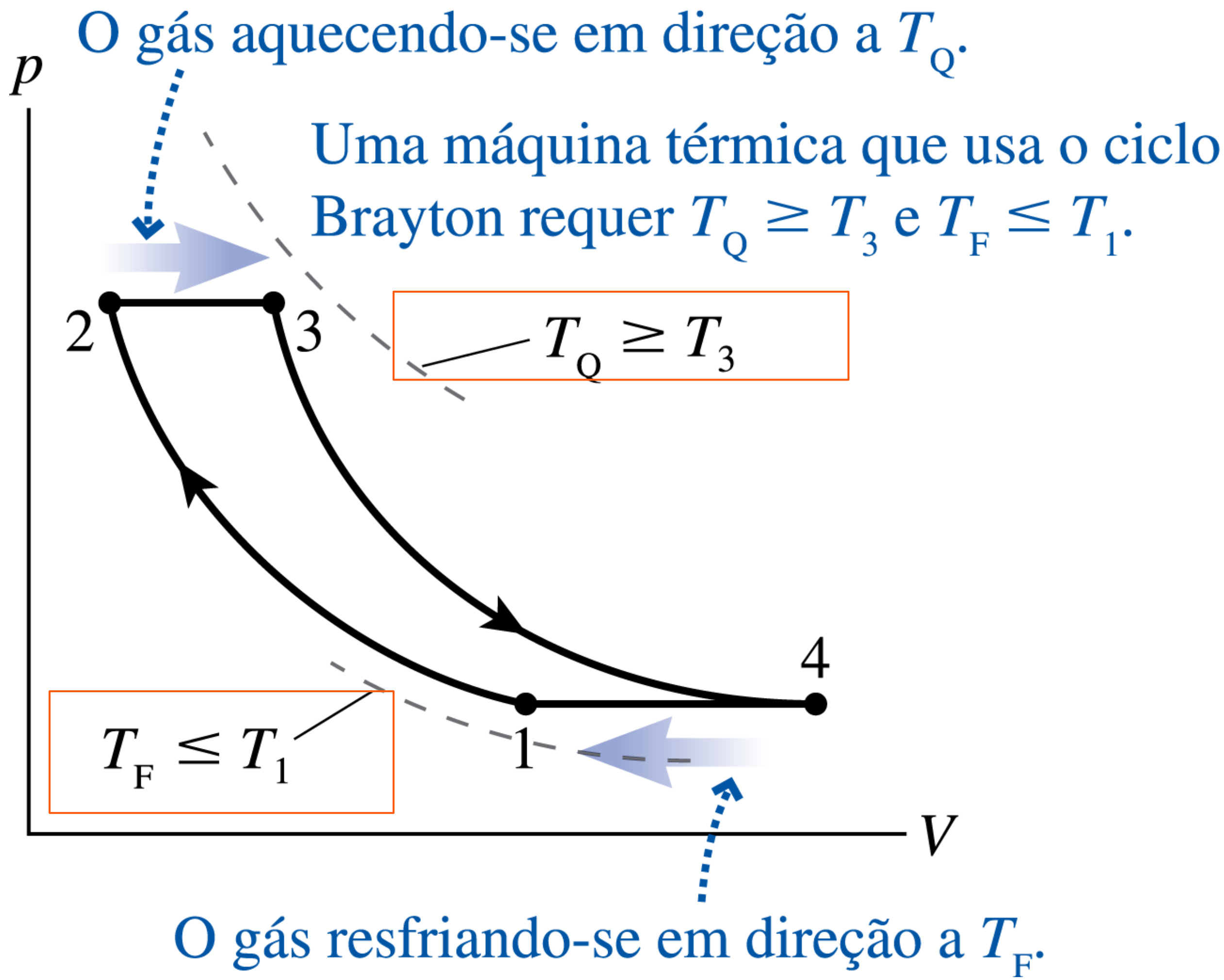
T_3 = 203℃ = 476K

Q_Q = 14,3 J; Q_F = 7,5 J

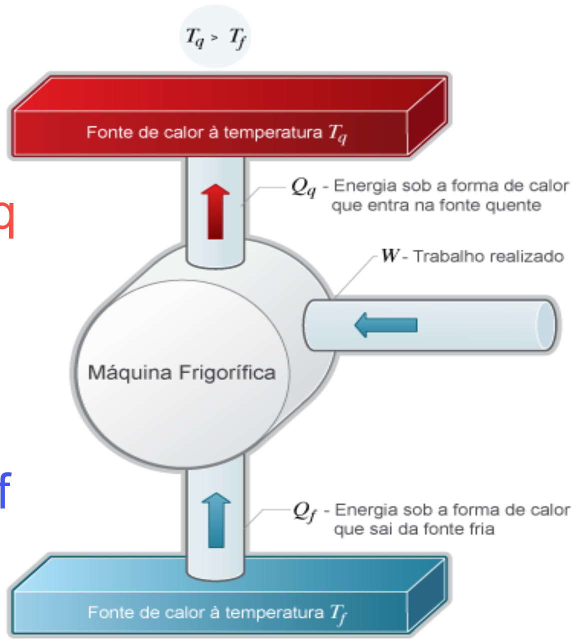
$\eta = 1 - 7,5 / 14,3 = 0,47$

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

Obs: Não esqueça dos reservatórios térmicos!



Refrigeradores: *Transformando Trabalho em Calor*



Q^q

Q^f

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

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

Refrigeradores: *Transformando Trabalho em Calor*

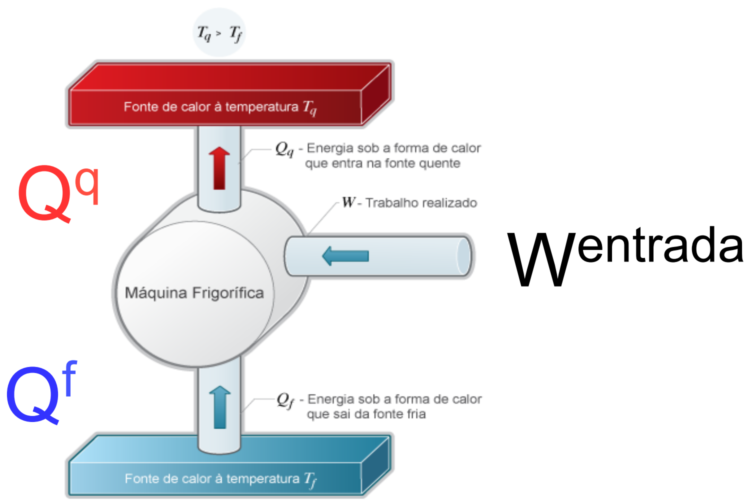
Na prática, gostaríamos de que o refrigerador retirasse o máximo de calor do reservatório frio com o mínimo de trabalho...

Def: Coeficiente de desempenho

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

Por definição: $0 \leq K \leq \infty$

obs: faixa de valores diferente da de η !



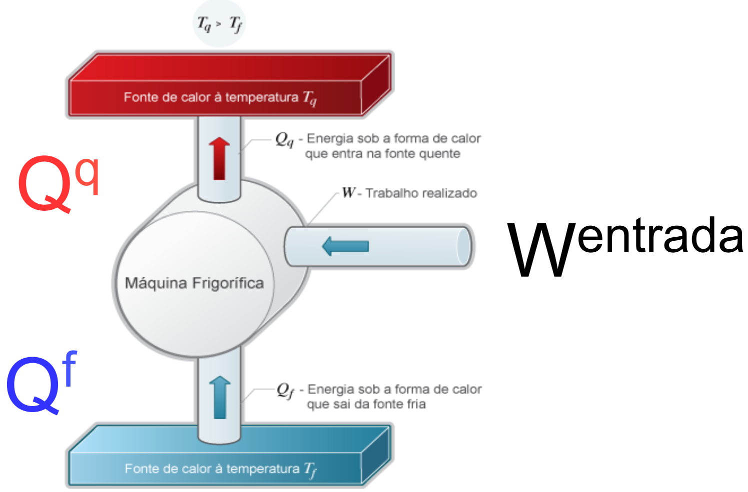
Refrigeradores: *Transformando Trabalho em Calor*

2A Lei da TD: Calor não pode fluir *espontaneamente* do reservatorio frio para o quente

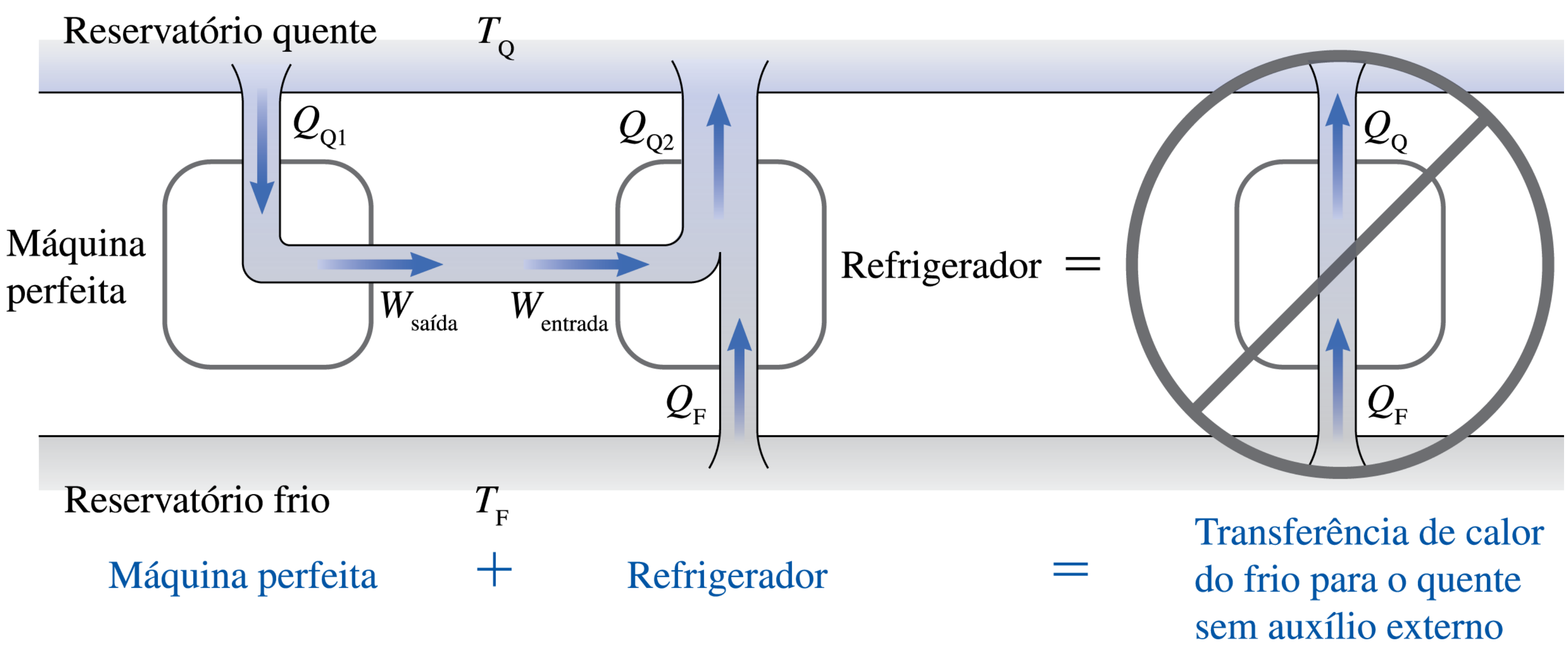
Isto implica que necessariamente $W^{entrada} \neq 0$, i.e.

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

i.e.: refrigeradores perfeitos não existem!



Implicação: Máquinas Térmicas perfeitas não existem (prova simples!)



(se uma MT perfeita existisse, poderíamos combiná-la com um refrigerador comum e transformá-lo num refrigerador perfeito… – só que este último é proibido pela 2a Lei da TD!)

Teste conceitual

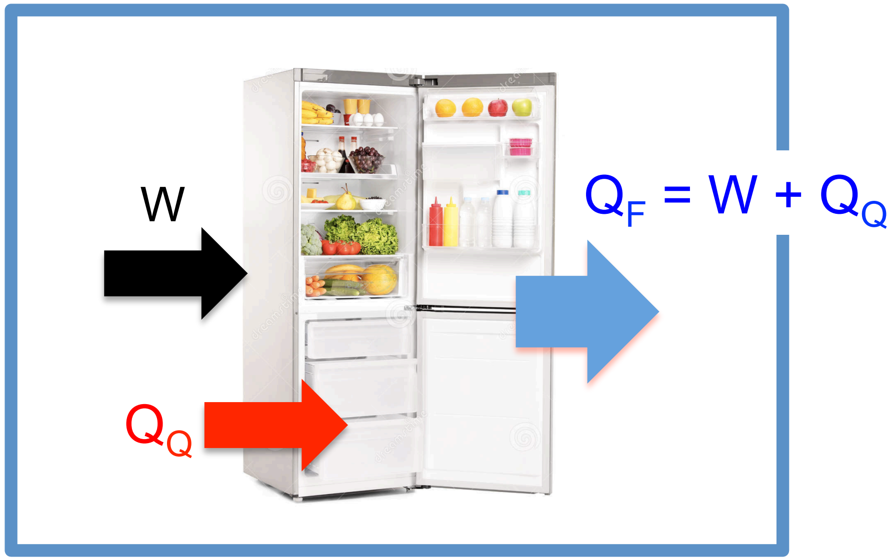
Numa cozinha termicamente isolada, uma geladeira comum é deixada funcionando de porta aberta. Podemos concluir que, após um tempo longo, a temperatura na cozinha

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

Numa cozinha termicamente isolada, uma geladeira comum é deixada funcionando de porta aberta. Podemos concluir que, após um tempo longo, 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



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

A) Sim

B) Não

C) Depende

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

A) Sim

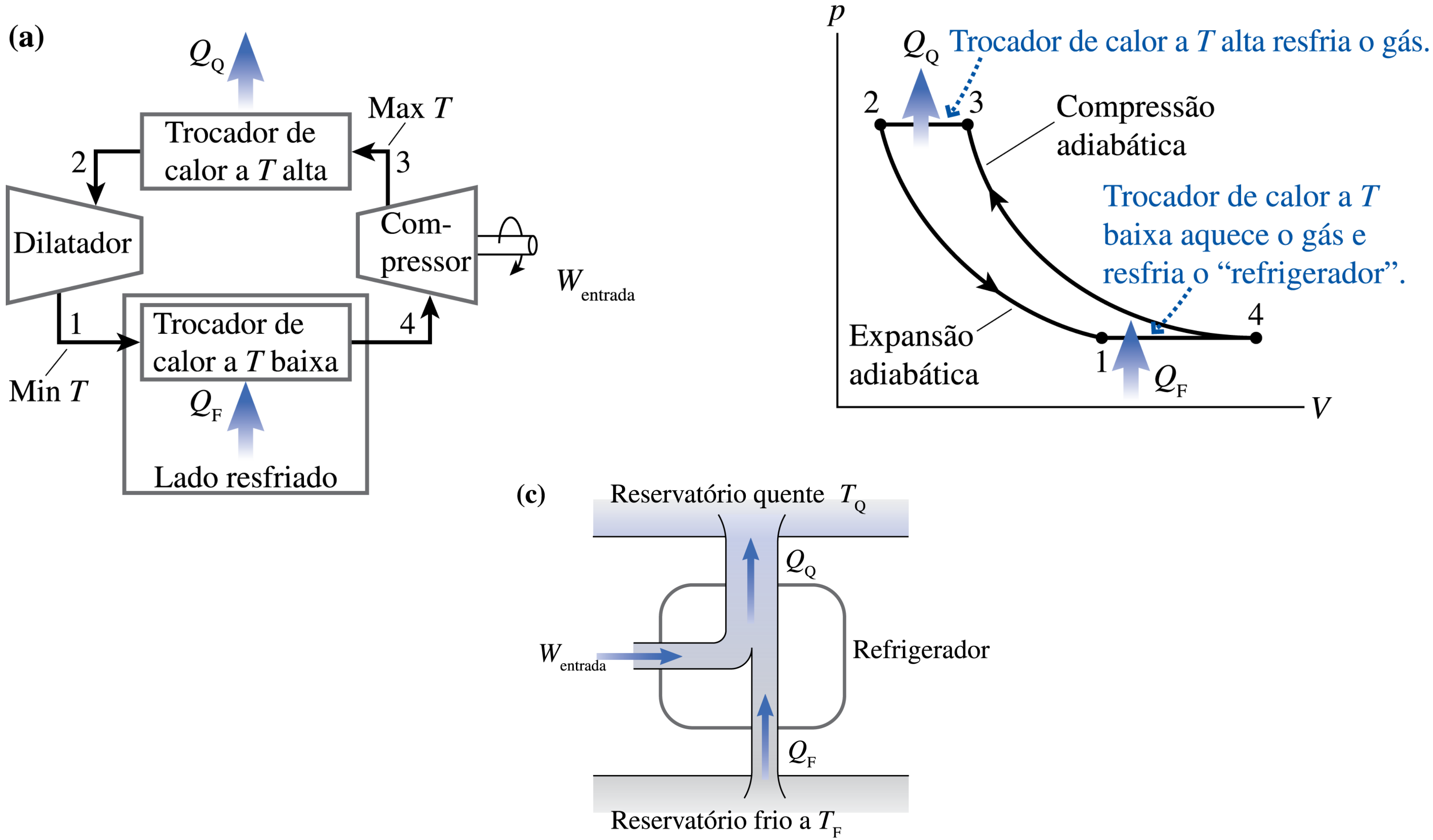
B) Não

C) Depende

1 - os reservatorios 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 rodamos o ciclo de uma máquina térmica ao contrário, obtemos um refrigerador?

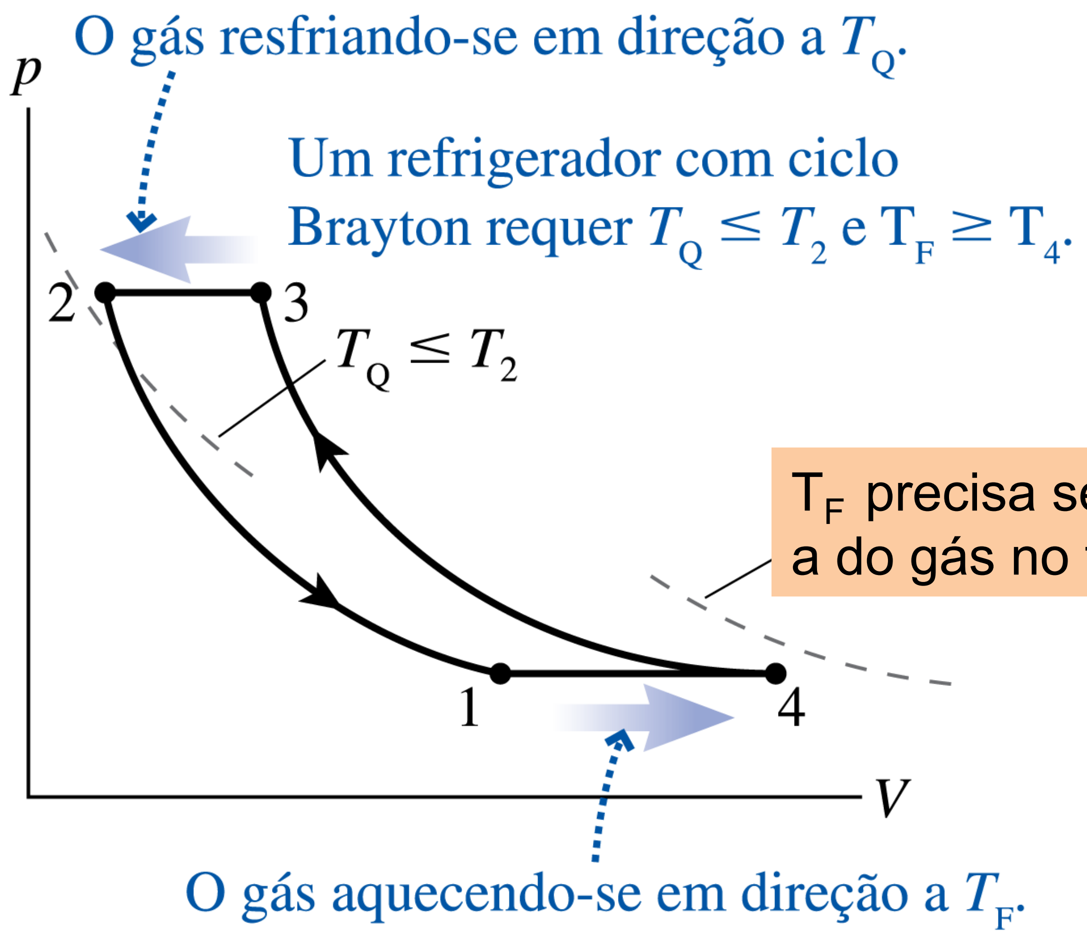
Ex.: 19.3 Refrigerador com Ciclo de Brayton



Se rodamos 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



T_F precisa ser **maior** que a do gás no trecho 1- 4

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

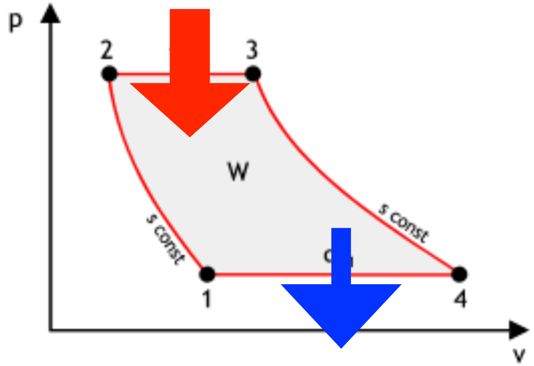
Se rodamos o ciclo de uma máquina térmica ao contrário, obtemos um refrigerador?

Ex.: 19.3. Ciclo de Brayton – Máquina Térmica

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

$T_Q \geq T_3 = 476K$

$T_F \leq T_1 = 200K$



Sentido horário

Máquina T.

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

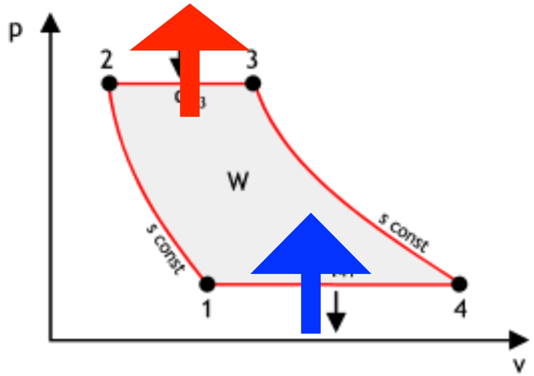
$$W^{ciclo} = W^{pelo} = +6,8J$$

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

Ex.: 19.3 Ciclo de Brayton - Refrigerador

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

Sentido antihorário



Refrigerador

$T_Q \leq T_2 = 381K$

$T_F \geq T_4 = 250K$

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

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

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

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

A) Sim

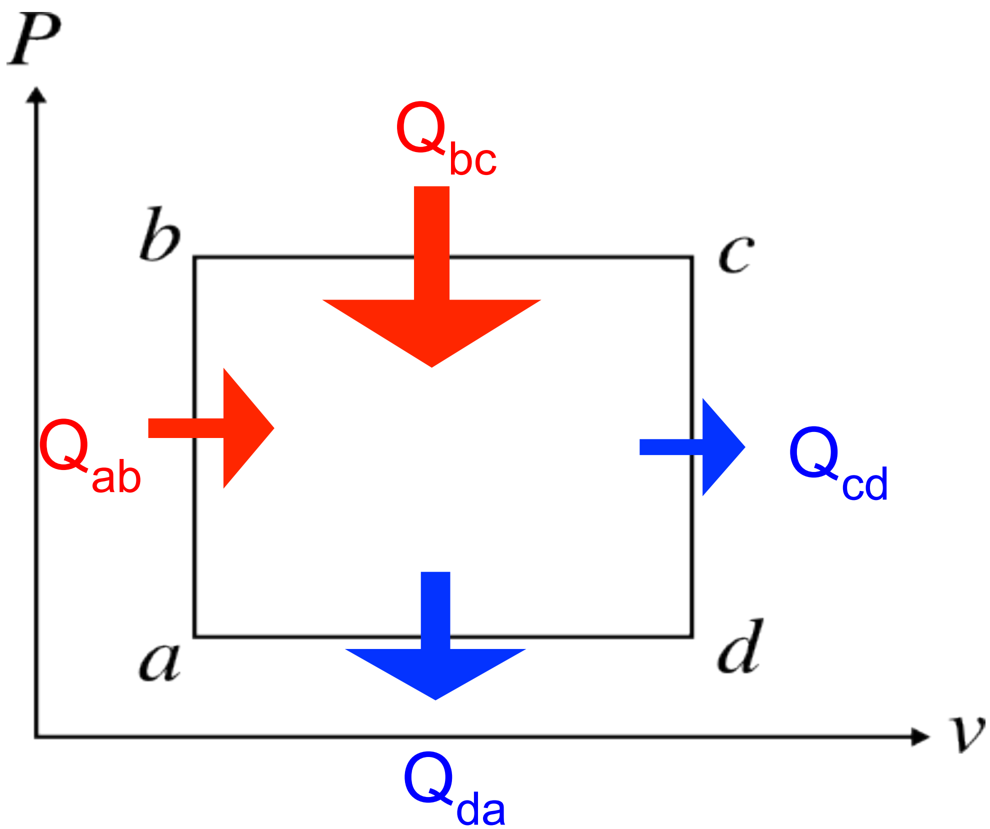
B) Não

C) Depende

1 - os reservatorios 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)



$T_a = 300$ K

$T_b = T_d = 900$K

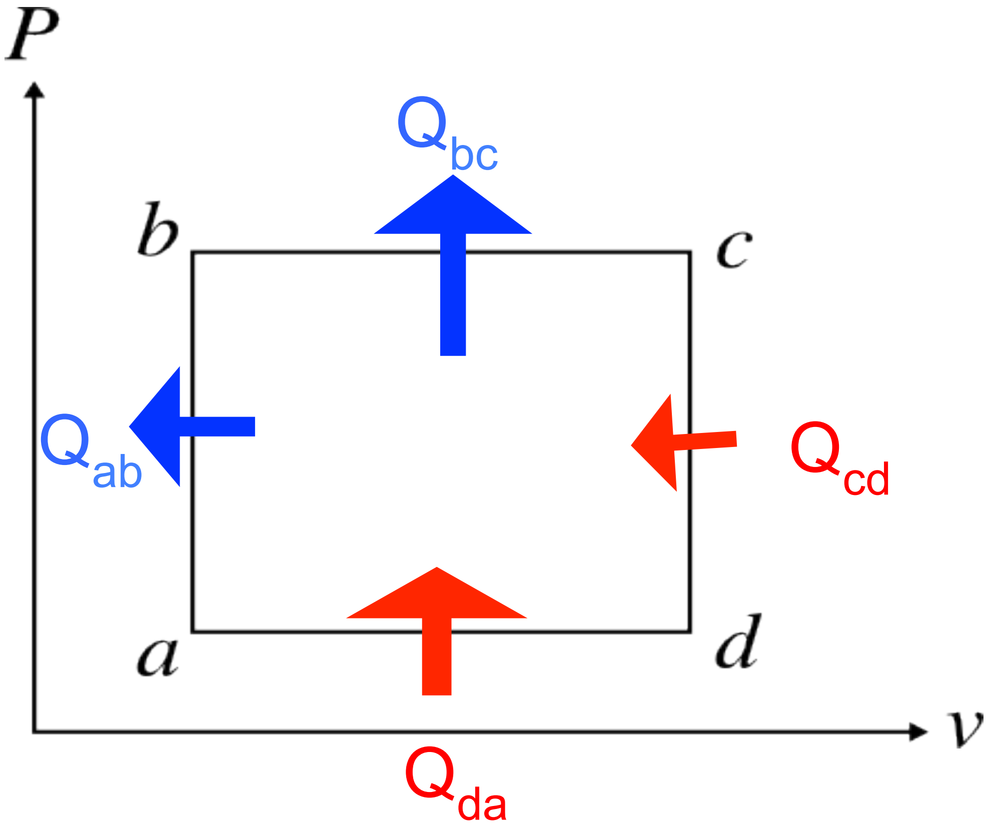
$T_c = 2700$K

Q_{ab}=5kJ Q_{bc}=21kJ Q_q=+26kJ

Q_{cd}=-15kJ Q_{da}=-7kJ Q_f= -22kJ

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

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



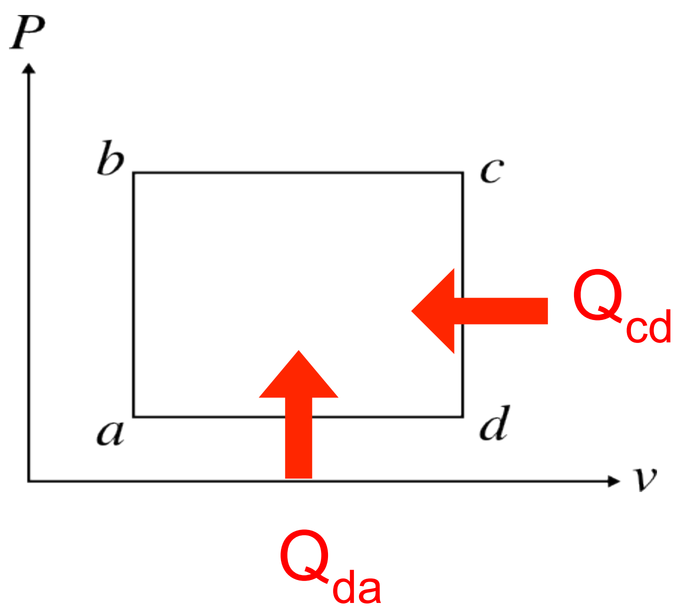
$T_a = 300$ K

$T_b = T_d = 900$K

$T_c = 2700$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



$T_a = 300$ K

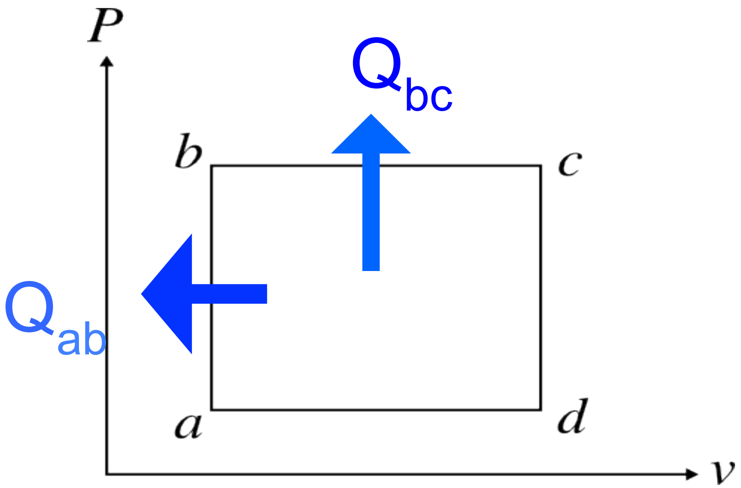
$T_b = T_d = 900$K

$T_c = 2700$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



$T_a = 300\ K$

$T_b = T_d = 900K$

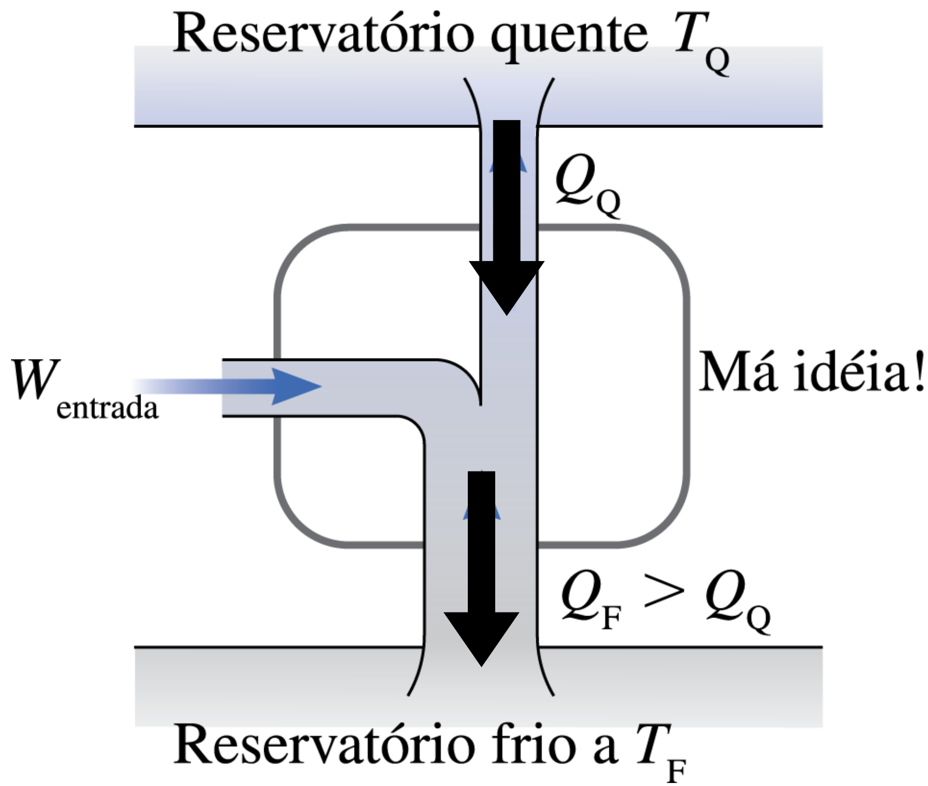
$T_c = 2700K$

$T_Q \leq T_a = 300K$

$T_Q < T_F$????!!

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

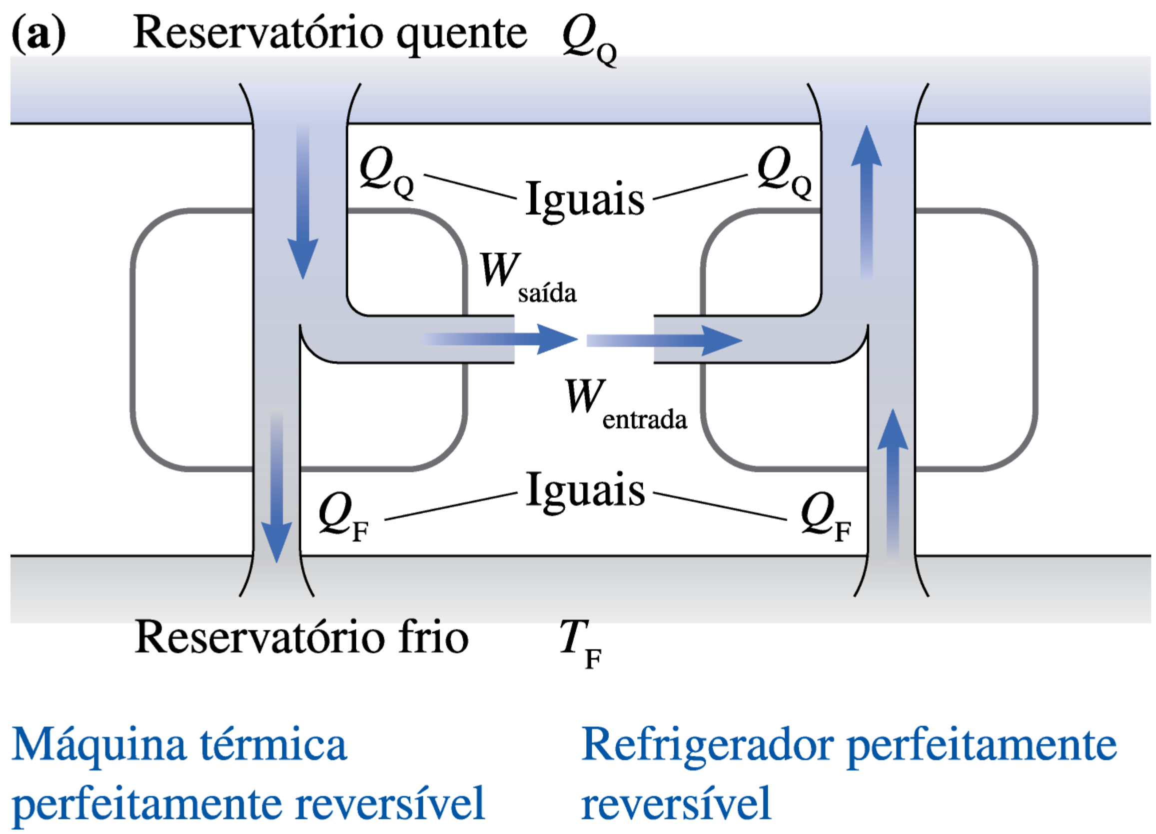
Nesse exemplo não obtemos um refrigerador, mas um dispositivo “inutil”, que gasta trabalho para fazer o que já ocorreria naturalmente !!



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

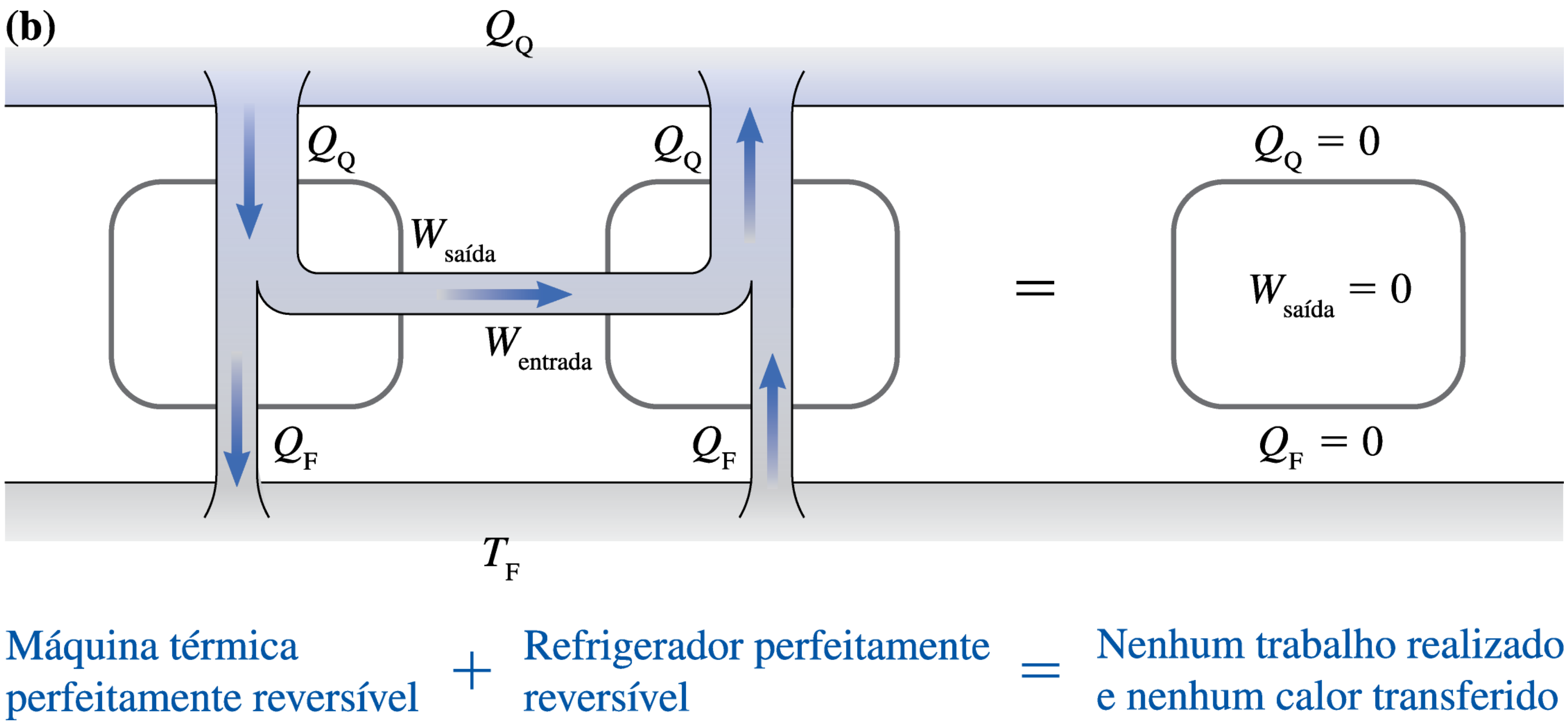
A 2ª Lei da Termodinâmica e os limites de eficiência de máquinas térmicas.

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



Não é óbvio que uma máquina assim possa existir! Veremos adiante que de fato pode sim

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 Termodinamica diz que são processos *irreversíveis*
a) a conversão espontânea de trabalho em energia térmica (ie por atrito)
b) o fluxo de calor de um corpo mais quente o para outro mais frio

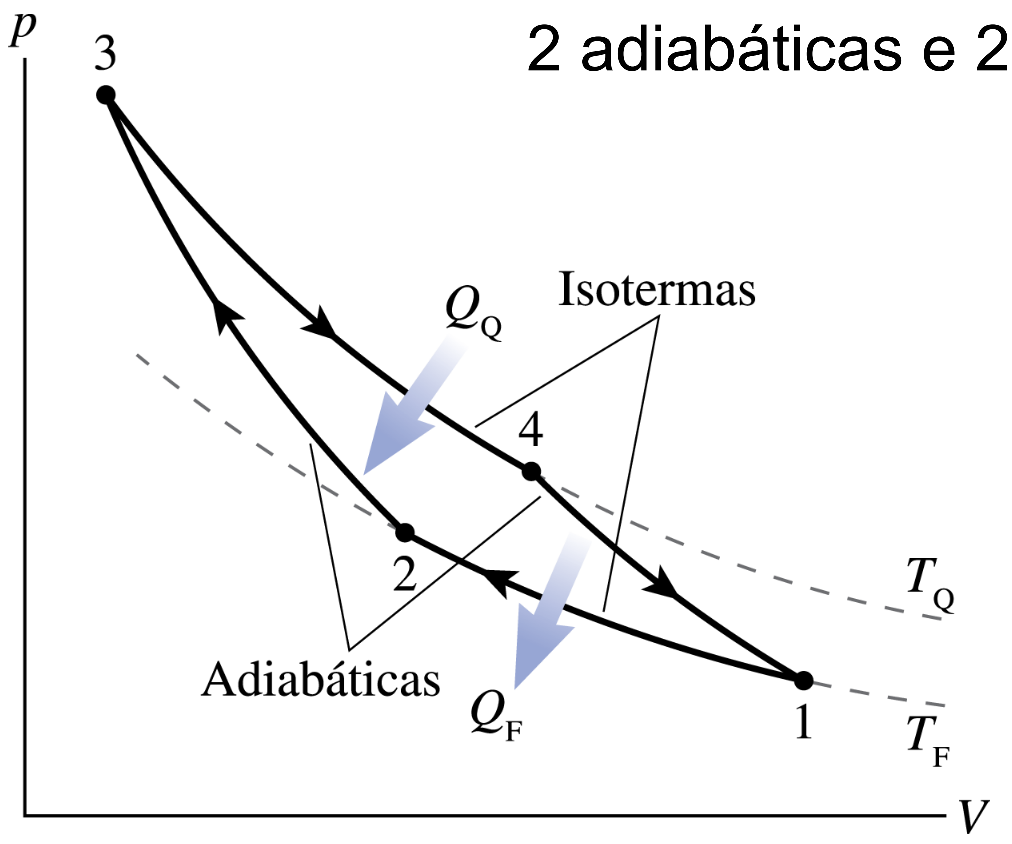
Assim, uma Máq. Térm. Perfeitamente Reversível deve ser constituída APENAS de:

- Interações Mecânicas com Q=0 (adiabáticas) e sem atrito
  e/ou
- Trocas de calor Isotérmicas ($\Delta E^{\text{térm}} = 0$)

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

MT Perfeitamente Reversível mais simples - Ciclo de Carnot

2 adiabáticas e 2 isotermas



Eficiência dessa máquina (v. quadro/livro):

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

Maior eficiencia possivel para uma máquina operando entre T_F e T_Q !

Teste Conceitual

P: as máquinas térmicas A e B são ambas reversíveis e atuam entre os mesmos reservatórios térmicos. A máq. A percorre um ciclo de Carnot usando um gás ideal, mas a máquina B percorre um ciclo mais complicado envolvendo 6 trechos adiabáticos e 6 isotérmicos (v. quadro). É correto dizer que:

A) $\eta_A = \eta_B$ necessariamente

B) η_A deve ser $< \eta_B$, pois uma máquina baseada em um ciclo de Carnot é a mais simples possível

C) η_A deve ser $> \eta_B$, pois uma máquina baseada em um ciclo de Carnot é a mais simples possível

D) Podemos ter $\eta_A = \eta_B$, $< \eta_B$, ou $> \eta_B$, dependendo dos detalhes das duas máquinas.

Teste Conceitual

P: as máquinas térmicas A e B são ambas reversíveis e atuam entre os mesmos reservatórios térmicos. A máq. A percorre um ciclo de Carnot usando um gás ideal, mas a máquina B percorre um ciclo mais complicado envolvendo 6 trechos adiabáticos e 6 isotérmicos (v. quadro). É correto dizer que:

A) $\eta_A = \eta_B$ necessariamente

B) η_A deve ser $< \eta_{B,}$ pois uma máquina baseada em um ciclo de Carnot é a mais simples possível

C) η_A deve ser $> \eta_{B,}$ pois uma máquina baseada em um ciclo de Carnot é a mais simples possível

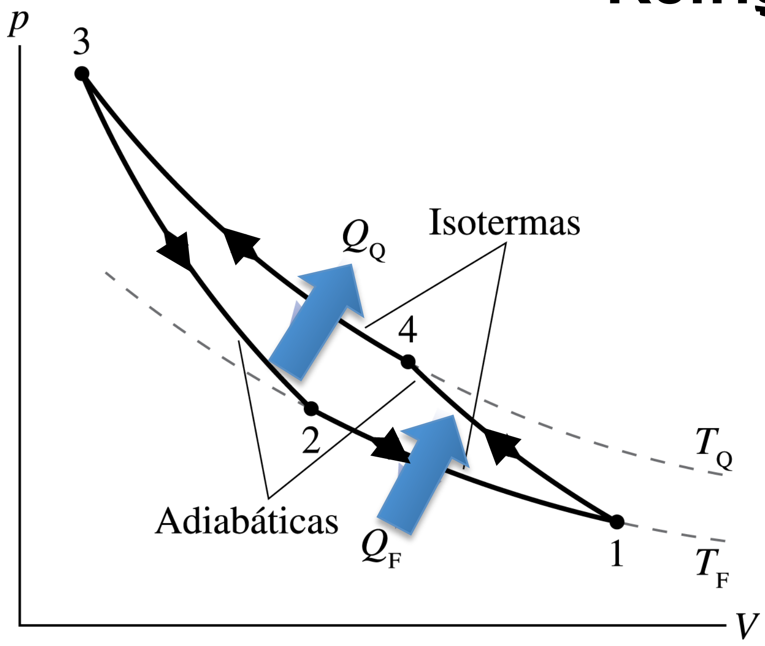
D) Podemos ter $\eta_A = \eta_B$, $< \eta_{B,}$ ou $> \eta_B$, dependendo dos detalhes das duas máquinas.

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 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):

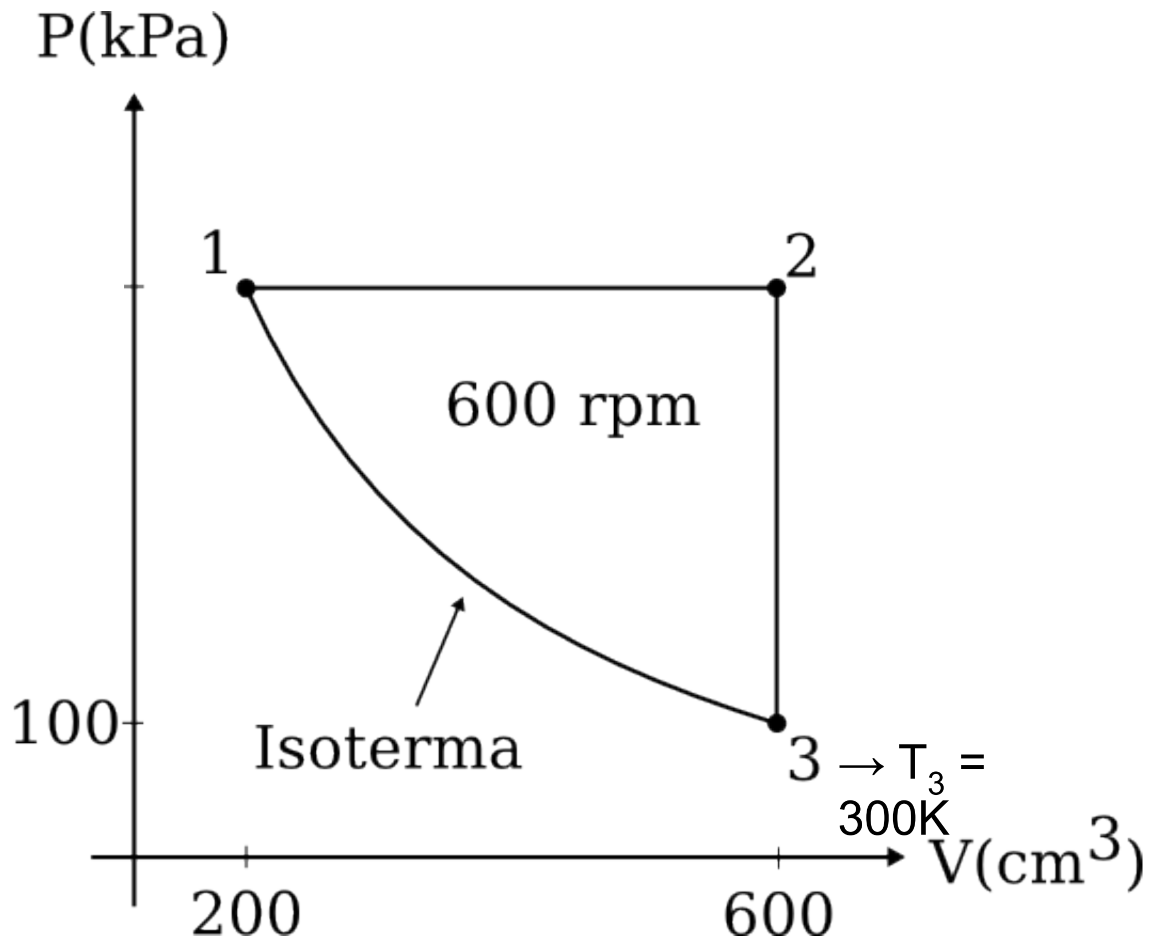
$$K_{Carnot} = T_F / (T_Q - T_F)$$

Obs: note que $K_{Carnot} \rightarrow 0$ 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 !

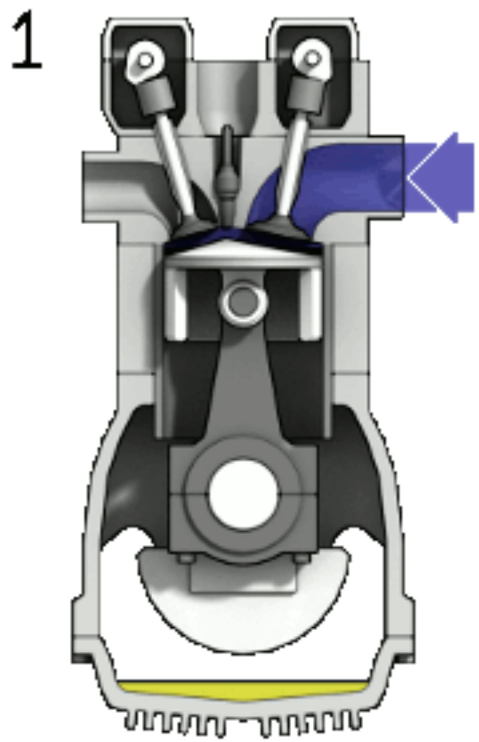
Isto implica que seria necessário energia infinita para resfriar um corpo até T = 0 !

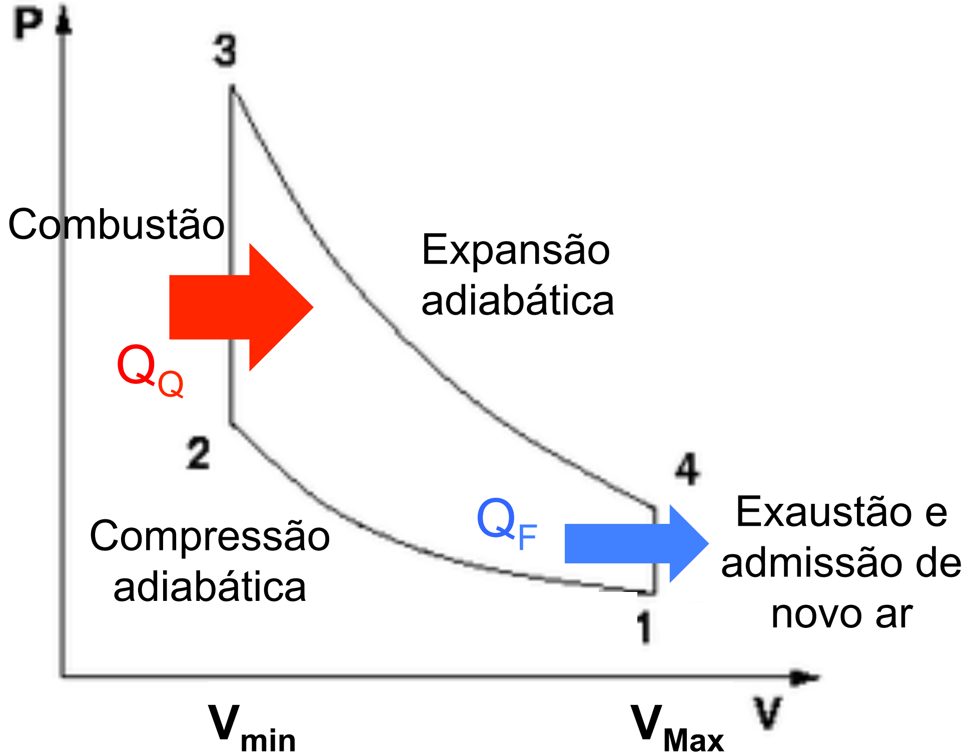
Problema: Uma máquina térmica funciona fazendo uma amostra de gás ideal monoatômico descrever o ciclo abaixo. Determine: n, W^{ciclo}, $Q^{resultante}$, h, h_{carnot} e a potência.



Máquinas Térmicas

Exemplo: Motor a gasolina em 4 tempos (ciclo de Otto)

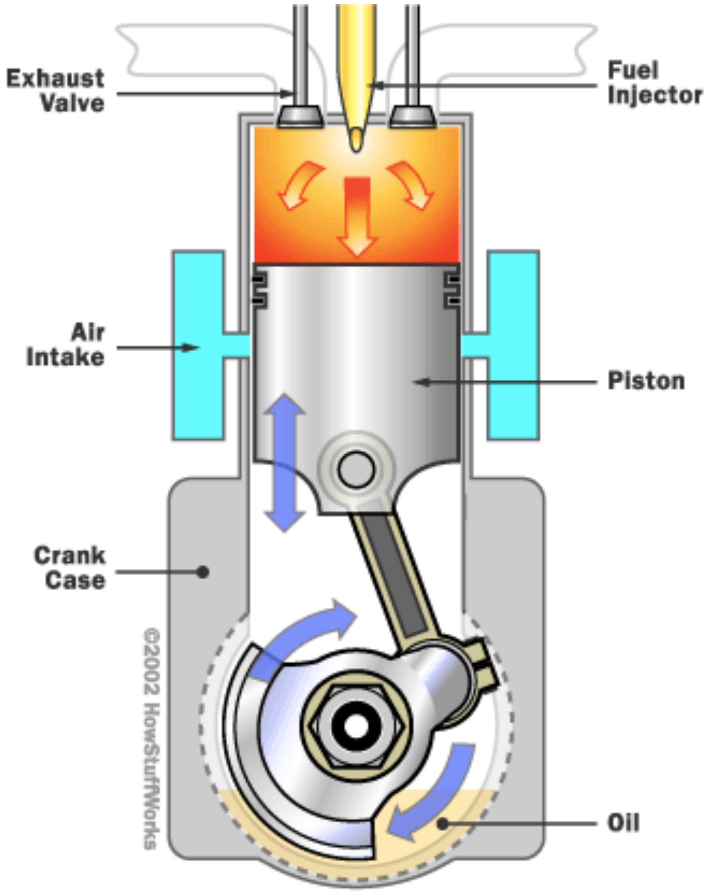


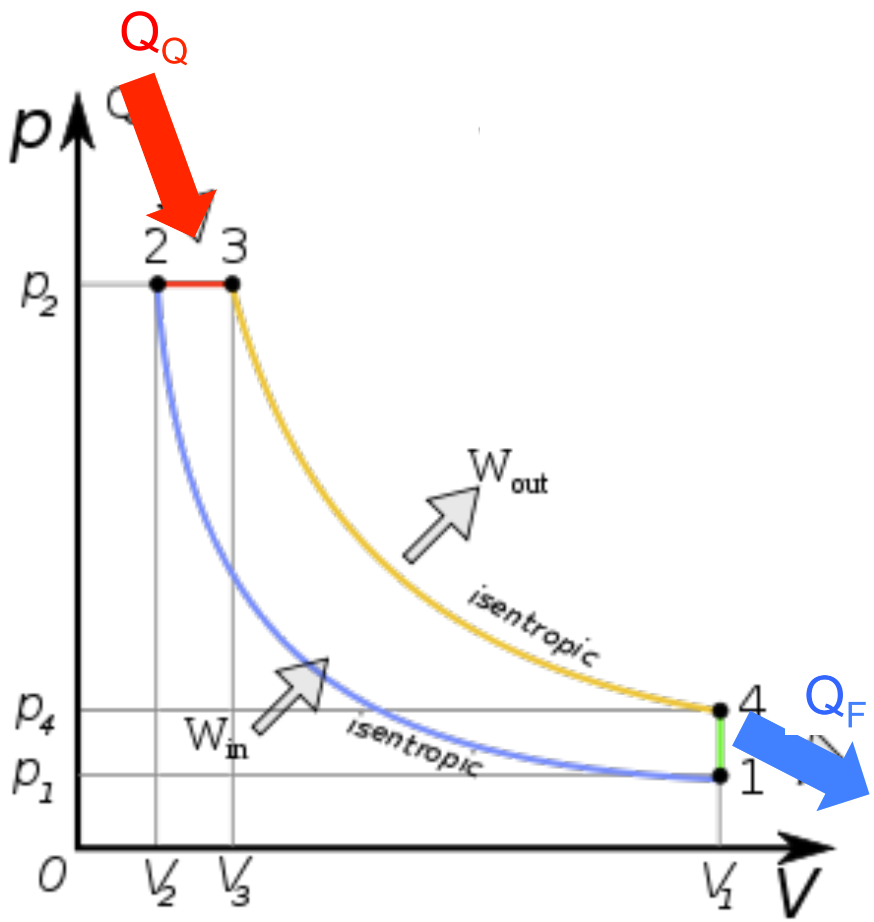


$\eta_{otto} = 1 - 1 / r_V^{\,\gamma - 1}$, onde $r_V = V_{Max} / V_{min}$

Máquinas Térmicas

Exemplo: Motor a Diesel em 4 tempos (ciclo de Diesel)





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

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?