24.5 – A máquina de Carnot

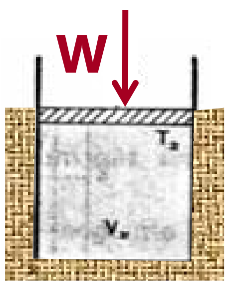
Máquina de Carnot: a máquina ideal (eficiência máxima operando entre duas temperaturas T_H e T_C)

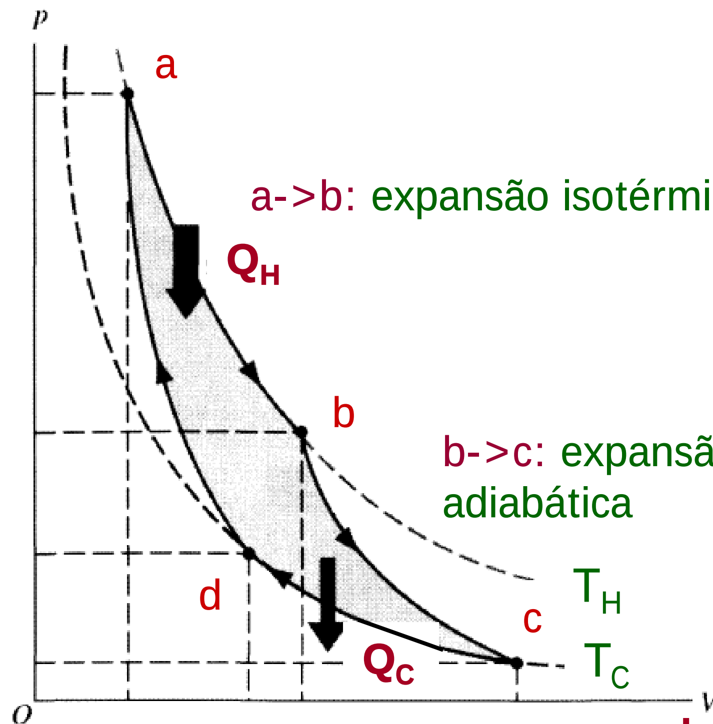
- Sem atrito, turbulência ou perdas de calor
- Todos os processos reversíveis
- Usa gás ideal

Nicolas Léonard Sadi Carnot
(1796-1832)

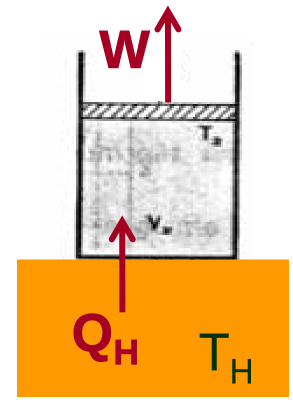
O ciclo de Carnot

d->a: compressão adiabática

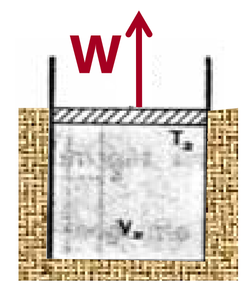




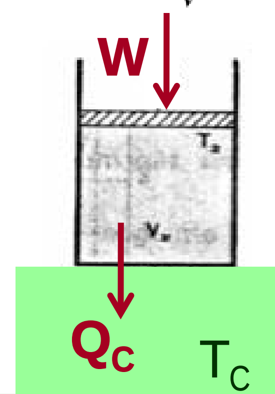
a->b: expansão isotérmica



b->c: expansão adiabática

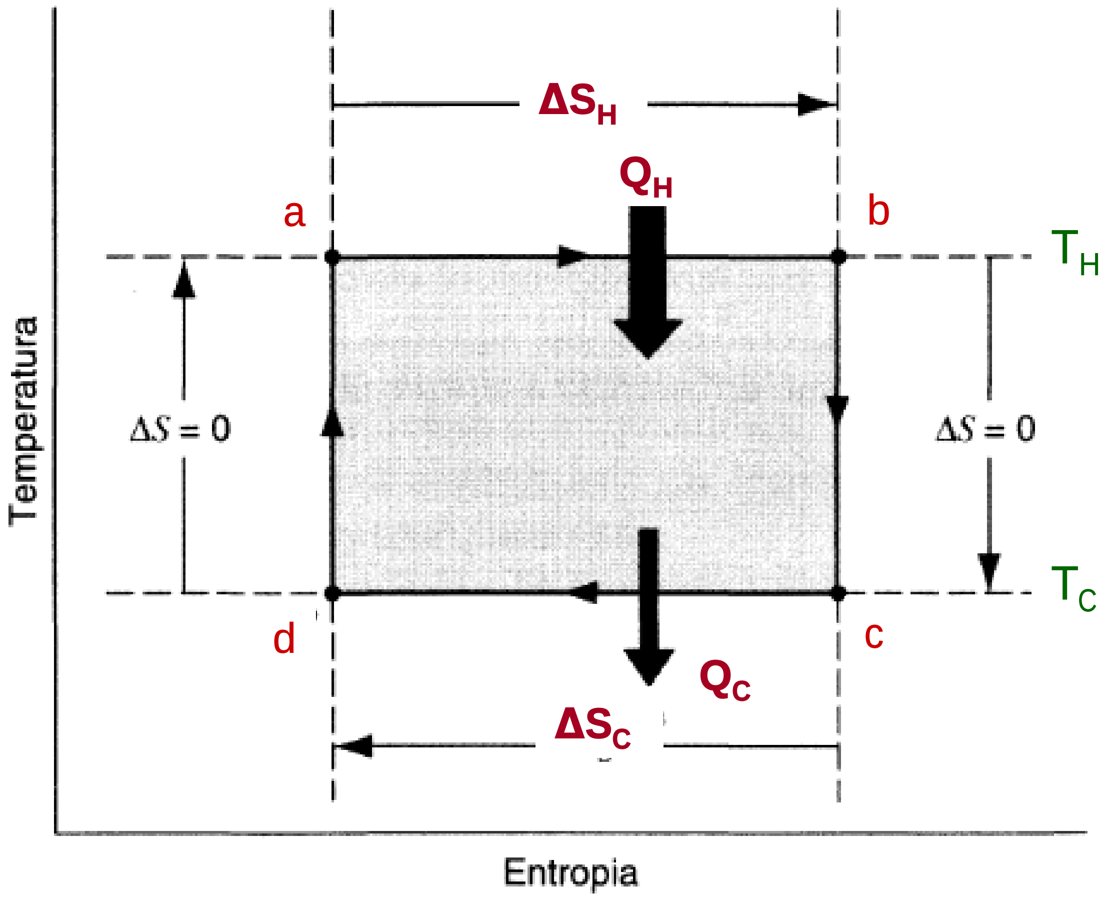


c->d: compressão isotérmica



http://www.youtube.com/watch?v=s3N_QJVucF8&feature=related

Entropia no ciclo de Carnot



Obviamente, temos: $|\Delta S_H| = |\Delta S_C|$

Como as trocas de calor são isotérmicas, então: $\dfrac{|Q_H|}{T_H} = \dfrac{|Q_C|}{T_C}$

Eficiência da máquina de Carnot: $e = \frac{|W|}{|Q_H|} = \frac{|Q_H| - |Q_C|}{|Q_H|} = 1 - \frac{|Q_C|}{|Q_H|}$

Usando o resultado do slide anterior: $\frac{|Q_H|}{T_H} = \frac{|Q_C|}{T_C}$

$$\boxed{e_{Carnot} = 1 - \frac{T_C}{T_H}}$$

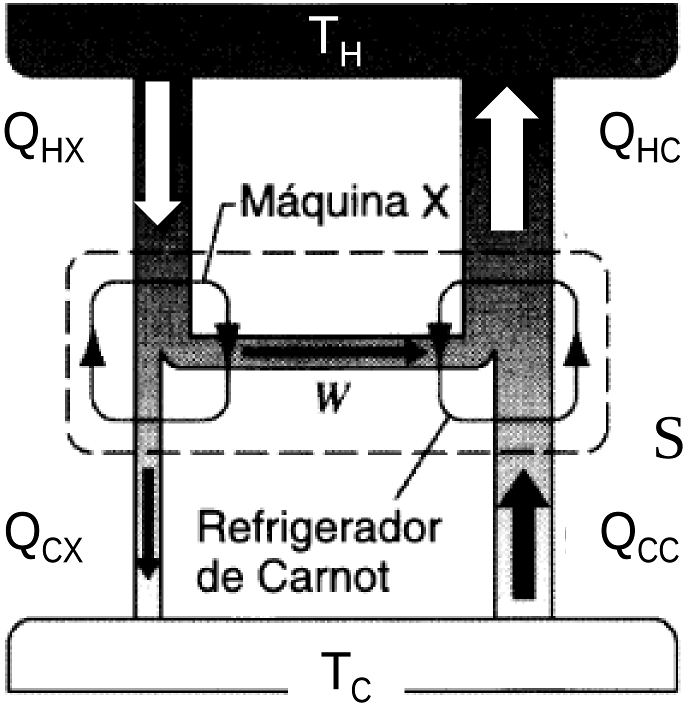
Eficiência da máquina de Carnot depende apenas das temperaturas dos reservatórios

Refrigerador de Carnot: máquina de Carnot operando no sentido inverso

Coeficiente de desempenho: $K = \frac{|Q_C|}{|W|} = \frac{|Q_C|}{|Q_H| - |Q_C|} = \frac{T_C}{T_H - T_C}$

Teorema: “Nenhuma máquina real, operando entre duas temperaturas, pode ter uma eficiência maior que uma máquina de Carnot operando entre as mesmas temperaturas”

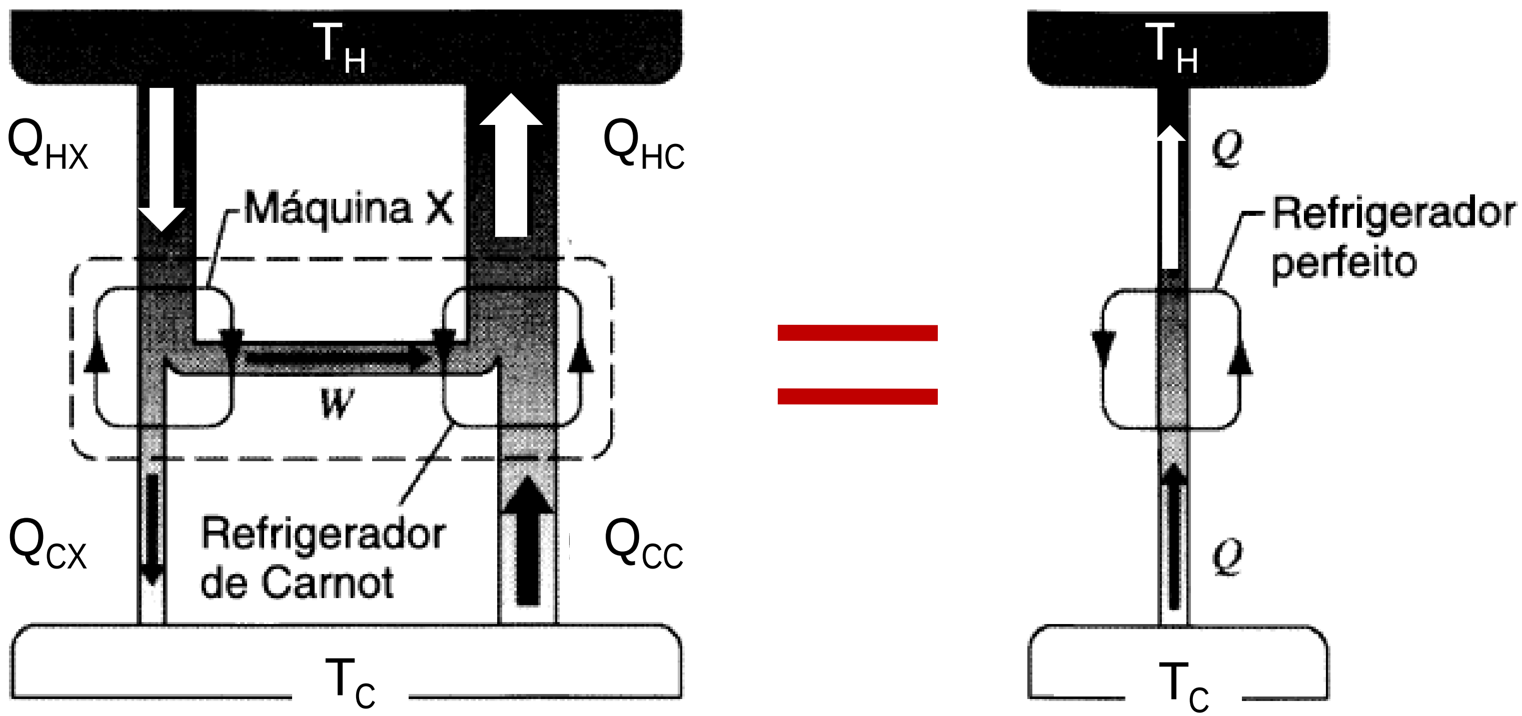
Demonstração: Suponhamos que exista uma máquina X com eficiência maior que a de Carnot: $e_X > e_{Carnot}$. Vamos usar esta máquina para alimentar um refrigerador de Carnot:



$$\text{Se } e_X > e_{Carnot} \quad \Rightarrow \frac{|W|}{|Q_{HX}|} > \frac{|W|}{|Q_{HC}|}$$

$$\Rightarrow |Q_{HC}| > |Q_{HX}|$$

$$\text{Seja } Q = |Q_{HC}| - |Q_{HX}| = |Q_{CC}| - |Q_{CX}| > 0$$



Viola a 2a. Lei!

Portanto, $e_X > e_{Carnot}$ é impossível.

Mas espere... Onde precisamos utilizar o fato de que a máquina da direita é uma máquina de Carnot? Poderia ser uma máquina Y qualquer, desde que seja reversível (possa funcionar como um refrigerador)...

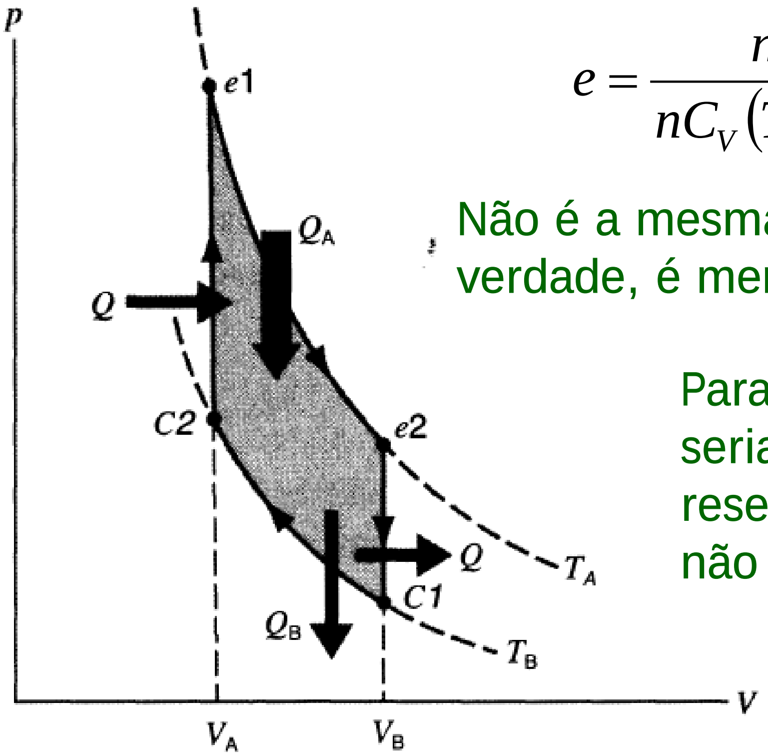
Então: $e_X \leq e_Y$

Mas também poderíamos ter obtido: $e_Y \leq e_X$

Ou seja: $e_Y = e_X$

Todas as máquinas reversíveis têm a mesma eficiência da máquina de Carnot**, desde que operem apenas entre dois reservatórios**

Na aula passada, calculamos a eficiência de uma máquina de Stirling:

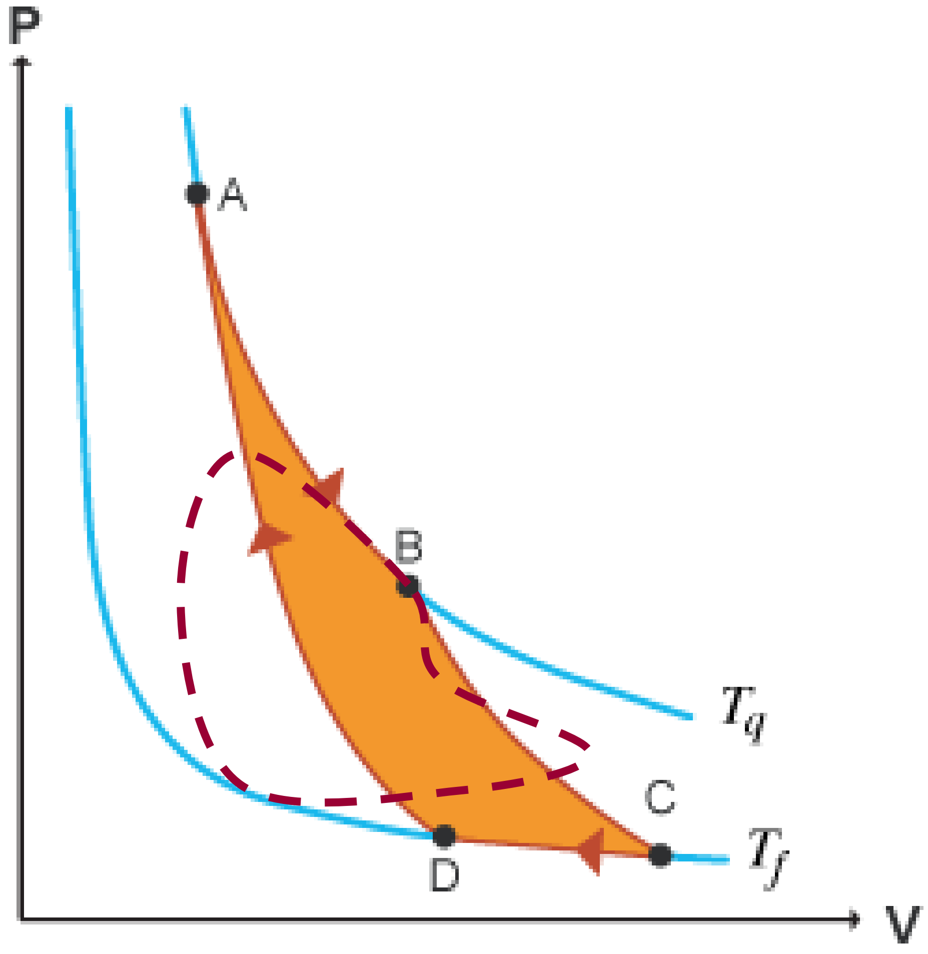


$$e = \frac{nR(T_A - T_B)\ln(V_B/V_A)}{nC_V(T_A - T_B) + nRT_A \ln(V_B/V_A)}$$

Não é a mesma eficiência de uma máquina de Carnot! (Na verdade, é menor). No entanto, o ciclo é reversível. Como?

Para realizar o ciclo de Stirling de forma reversível, seria necessário o uso de uma infinidade de reservatórios térmicos a temperaturas diferentes, e não apenas dois!

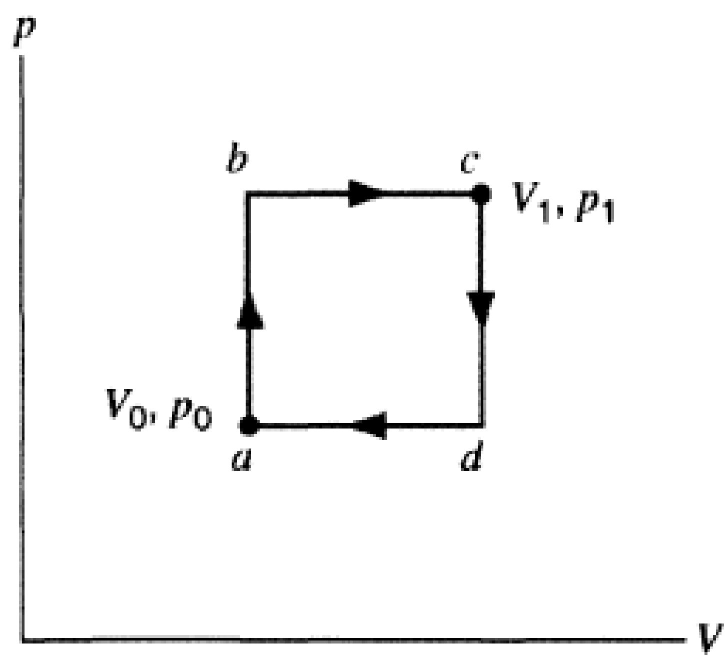
O ciclo de Carnot é o mais eficiente entre todos os ciclos reversíveis operando entre as mesmas temperaturas extremas



Problema Resolvido 24-8.

O inventor da máquina X afirma que ela fornece, na saída, um trabalho $W = 120$ J por ciclo e opera entre os pontos de ebulição e de congelamento da água com uma eficiência $\epsilon_X = 75\%$. (*a*) Como esta eficiência se compara com a eficiência de uma máquina de Carnot operando entre estas mesmas duas temperaturas? (*b*) Se a máquina X realmente existisse, quanta energia térmica Q_A seria extraída do reservatório de alta temperatura por ciclo? (*c*) Se a máquina X realmente existisse, quanta energia térmica Q_B seria extraída do reservatório de baixa temperatura por ciclo? (*c*) Mais uma vez, supondo que a máquina X realmente existe, qual seria a variação da entropia por ciclo para toda a máquina, incluindo a substância de trabalho e ambos reservatórios?

22. Um mol de um gás monoatômico ideal é utilizado como substância de trabalho de uma máquina que opera de acordo com o ciclo mostrado na Fig. 24-20. Calcule (*a*) o trabalho realizado pela máquina por ciclo, (*b*) o calor adicionado por ciclo durante a etapa de expansão *abc* e (*c*) a eficiência da máquina. (*d*) Qual é a eficiência de Carnot de uma máquina operando entre a maior e a menor temperatura presentes no ciclo? Como isto se compara à eficiência calculada em (*c*)? Suponha que $p_1 = 2p_0$, $V_1 = 2V_0$, $p_0 = 1{,}01 \times 10^5$ Pa e $V_0 = 0{,}0225\ \text{m}^3$.



20. (*a*) Em uma máquina de Carnot de dois estágios, uma quantidade de calor $|Q_1|$ é absorvida à temperatura T_1, trabalho $|W_1|$ é realizado e uma quantidade de calor $|Q_2|$ é expelida a uma temperatura mais baixa T_2, pelo primeiro estágio. O segundo estágio absorve o calor expelido pelo primeiro, realiza trabalho $|W_2|$ e expele uma quantidade de calor $|Q_3|$ a uma temperatura mais baixa T_3. Prove que a eficiência do conjunto é $(T_1 - T_3)/T_1$. (*b*) Uma turbina que opera com uma combinação mercúrio–vapor de água, recebe vapor de mercúrio saturado de uma caldeira a 469°C e o descarrega para aquecer uma caldeira a vapor d'água a 238°C. A turbina recebe o vapor d'água a esta temperatura e o descarrega em um condensador a 37,8°C. Calcule a eficiência máxima do conjunto.

10. Um motor de combustão interna a gasolina pode ser aproximado pelo ciclo mostrado na Fig. 24-25. Suponha um gás ideal monoatômico e use uma razão de compressão de 4:1 ($V_d = 4V_a$). Suponha que $p_b = 3p_a$. (*a*) Determine a pressão e a temperatura de cada um dos vértices do diagrama pV em termos de p_a e T_a. (*b*) Calcule a eficiência do ciclo.