

Segunda Lei da Termodinâmica para Sistemas

PME3398

Prof. Antonio Luiz Pacífico

1º Semestre de 2019

Conteúdo da Aula

- 1 Introdução
- 2 Máquinas Térmicas
- 3 Enunciados da 2ª Lei
- 4 Processo Reversível
- 5 Ciclo de Carnot
- 6 Exercícios

Persepções da 2ª Lei da Termodinâmica

A 1ª Lei da Termodinâmica estabelece que, para qualquer sistema percorrendo um ciclo, a integral cíclica do calor é igual à integral cíclica do trabalho. Entretanto ela não coloca nenhuma restrição à direção em que ocorrem as transferências de calor ou trabalho.

"A experiência diária mostra que há um sentido definido para os processos *espontâneos*."(Moran e Shapiro, 2009)

Espontaneamente corpos quentes perdem calor para corpos mais frios quanto em contato; um sistema pressurizado quando rompido vaza sua massa para o ambiente a uma pressão mais baixa; massas caem no campo gravitacional, etc...

Persepções da 2ª Lei da Termodinâmica

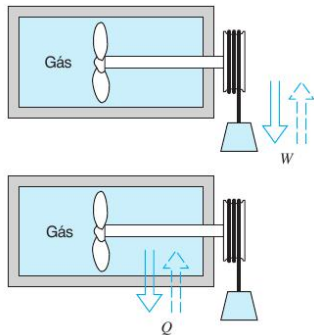
Em casos elementares como os citados basta nossa experiência diária. Porém, para casos mais complexos, onde nos falta experiência ou nossa persepção é imprecisa, precisamos de alguma formulação que nos oriente. Quem nos dá essa orientação é a **2ª Lei da Termodinâmica**.

A 1ª e 2ª Leis da Termodinâmica são determinações experimentais - estão baseadas na prática e senso comum. São apresentadas como negações:

1ª Lei: Energia **não pode** ser criada ou destruída.

2ª Lei: Certos processos **não podem** ocorrer

Ciclo



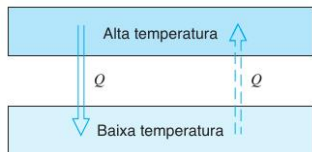
Ciclo:

1. Realiza-se trabalho sobre o sistema, mediante o abaixamento do peso e por meio das pás do agitador;

2. Transfere-se calor para o ambiente.

Da experiência: *não podemos inverter esse ciclo*, transferindo calor ao gás de tal modo que a pá girará e levantará o peso. Esse sistema só poderá operar num ciclo para o qual calor e trabalho são negativos, não podendo operar segundo um ciclo no qual calor e trabalho são positivos (apesar de esse ciclo não violar a primeira lei).

Processo



Da experiência sabemos que calor é transferido do sistema a alta temperatura para o de baixa temperatura.

Também da experiência sabemos que o inverso não pode ocorrer e que é impossível completar o ciclo apenas pela transferência de calor

Motores Térmicos, Bombas de Calor e Refrigeradores

O **motor térmico** pode ser um sistema que opera segundo um ciclo, realizando um trabalho líquido positivo e trocando calor líquido positivo.

A **bomba de calor** ou o **refrigerador** pode ser um sistema que opera segundo um ciclo, que recebe calor de um corpo a baixa temperatura e cede calor para um corpo a alta temperatura; sendo necessário, entretanto, trabalho para sua operação.

OBS: designa-se como **máquina cíclica** ou **máquina térmica**, para indicar indistintamente um dos dois dispositivos acima.

Motores Térmicos

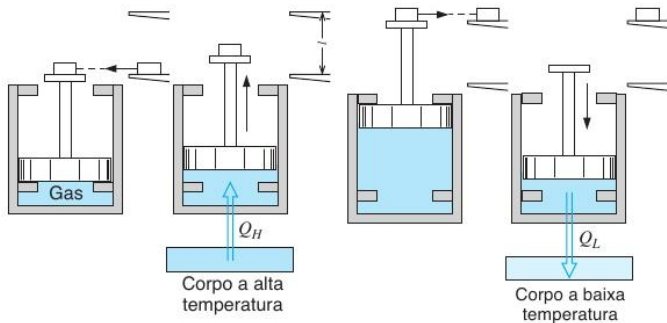


Figura: Motor térmico elementar. O gás realizou trabalho durante o ciclo: um peso foi elevado. Da 1ª Lei: calor líquido transferido é positivo e igual ao trabalho realizado durante o ciclo.

Motores Térmicos

”Um **motor térmico** pode ser definido como um dispositivo que, operando segundo um ciclo termodinâmico, realiza um trabalho líquido positivo à custa da transferência de calor de um corpo a temperatura elevada e para um corpo a temperatura baixa.”(Borgnakke e Sonntag, 2009)

”Frequentemente, a denominação **motor térmico** é utilizada num sentido mais amplo para designar todos os dispositivos que produzem trabalho, por meio da transferência de calor ou combustão, mesmo que o dispositivo não opere segundo um ciclo termodinâmico... Neste capítulo, entretanto, nos limitaremos a analisar os motores térmicos que operam segundo um ciclo termodinâmico.”(Borgnakke e Sonntag, 2009)

Motores Térmicos

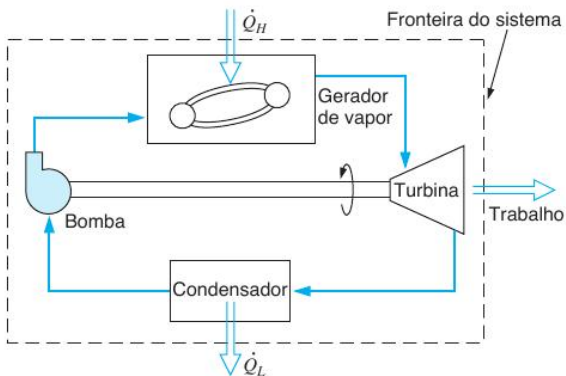


Figura: Motor térmico constituído por processos em regime permanente.

Eficiência Térmica

Eficiência térmica, η_t , é a razão entre o que é produzido (energia pretendida), W_{liq} , e o que é usado (energia gasta), Q_H , onde a energia pretendida num motor térmico é o trabalho e a energia gasta é o calor transferido da fonte a alta temperatura. Matematicamente,

$$\eta_t = \frac{W_{liq}}{Q_H}$$

Como $W_{liq} = Q_H - Q_L$, segue-se que¹,

$$\eta_t = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

★ W_{liq} , Q_H e Q_L dados em módulo!

¹ $\oint \delta Q = Q_H - Q_L$ e $\oint \delta W = W_{liq}$

Refrigeradores e Bombas de Calor

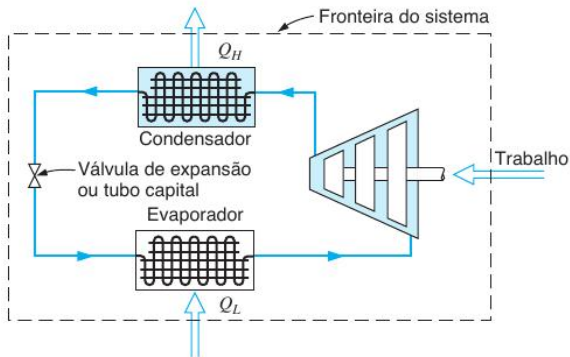


Figura: Ciclo de refrigeração elementar, em regime permanente.

Refrigeradores e Bombas de Calor

A *eficiência* de um refrigerador é expressa em termos do **coeficiente de desempenho** ou **coeficiente de eficácia**, β . No caso de um refrigerador, o objetivo pretendido é a refrigeração de um sistema, Q_L (calor transferido do espaço a ser refrigerado), e a energia gasta é o trabalho, W_{liq} . Assim,

$$\beta = \frac{Q_L}{W_{liq}} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L}$$

Para a bomba de calor, o objetivo é o aquecimento de um sistema, Q_H (calor transferido para o espaço a ser aquecido). Então,

$$\beta' = \frac{Q_H}{W_{liq}} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L}$$

★ W_{liq} , Q_H e Q_L dados em módulo!

Enunciados da 2ª Lei da Termodinâmica

Enunciado de Clausius: "É impossível construir um dispositivo que opere segundo um ciclo e que não produza outros efeitos, além da transferência de calor de um corpo frio para um corpo quente."(Borgnakke e Sonntag, 2009)

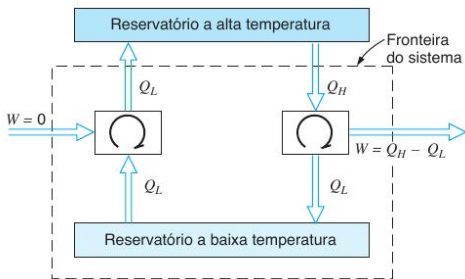
Enunciado de Clausius: "É impossível para qualquer sistema operar de tal maneira que o único resultado seja a transferência de energia sob a forma de calor de um corpo mais frio para um corpo mais quente."(Moran e Shapiro, 2009)

Enunciados da 2ª Lei da Termodinâmica

Enunciado de Kelvin–Planck: "É impossível construir um dispositivo que opere num ciclo termodinâmico e que não produza outros efeitos além do levantamento de um peso e troca de calor com um único reservatório térmico."(Borgnakke e Sonntag, 2009)

Enunciado de Kelvin–Planck: "É impossível para qualquer sistema operar em um ciclo termodinâmico e fornecer uma quantidade líquida de trabalho para a sua vizinhança enquanto recebe energia por transferência de calor de um único reservatório térmico."(Moran e Shapiro, 2009)

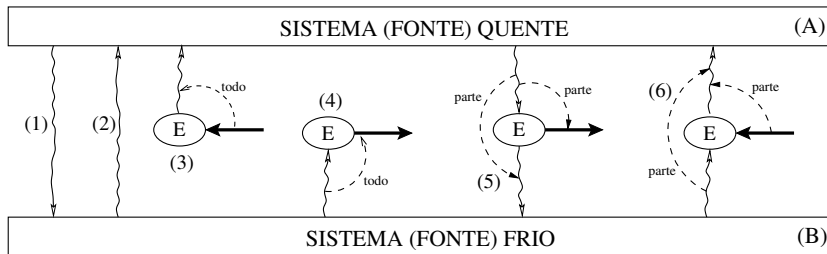
Enunciados da 2ª Lei da Termodinâmica



O dispositivo da esquerda é um refrigerador que não necessita de trabalho e, portanto, nega o enunciado de Clausius. Seja $Q_H > Q_L$, com Q_H sendo transferido a uma máquina térmica (direita), que rejeita o mesmo Q_L e realiza trabalho $W = Q_H - Q_L$. Como não há transferência líquida de calor para o reservatório a baixa temperatura,

a máquina térmica (direita) e refrigerador (esquerda), juntos, operam num ciclo realizando trabalho trocando calor com um único reservatório \Rightarrow negação do enunciado de Kelvin-Planck. Logo, a negativa do enunciado de Clausius resulta na negativa do enunciado de Kelvin-Planck.

Enunciados da 2ª Lei da Termodinâmica



- (1) **Possível.** (2) **Impossível.** (3) **Possível.** (4) **Impossível.**
 (5) **Possível.** (6) **Possível.**

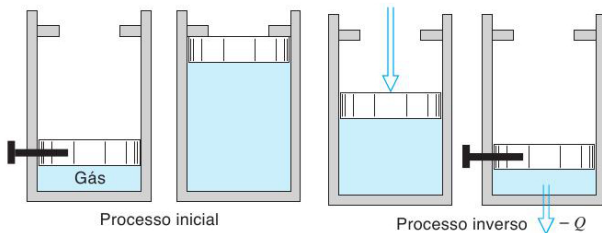
Observe que $(3) + (4) = (2)$ que é impossível.

Processo Reversível

”Um **processo reversível**, para um sistema, é definido como aquele que, tendo ocorrido, pode ser invertido e depois de realizada esta inversão, não se notará nenhum vestígio no sistema e na vizinhança.”(Borgnakke e Sonntag, 2009)

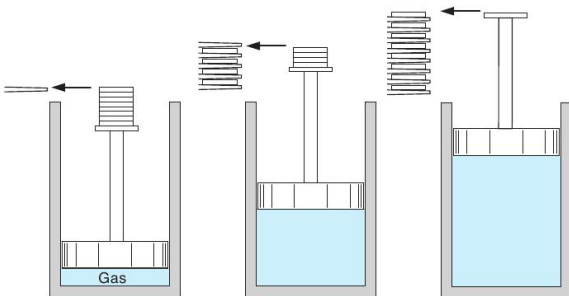
Para ilustrar, consideremos os exemplos a seguir, de processos irreversível e reversível.

Processo Irreversível



Processo de volta ocorre à uma pressão maior que na ida
 $\Rightarrow W_{ida} < |W_{volta}|$. Assim, calor deve ser rejeitado pelo sistema na volta, o que acarreta irreversibilidades.

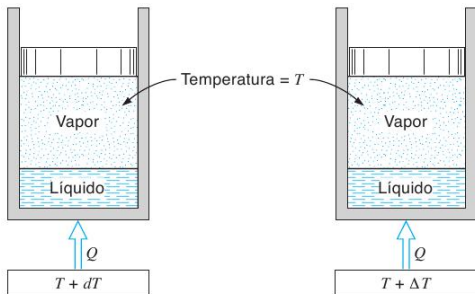
Processo Reversível



A retirada, discreta, de pesos na expansão e a colocação, também discreta, de pesos na volta faz com que o processo de ida possa ser invertido, deixando o mínimo de vestígios no sistema e vizinhança. Quanto mais discreto for o processo de retirada de pesos (ida) e colocação de pesos (volta), menores serão as irreversibilidades promovidas.

Processo Reversível

Diferença entre processos internamente e externamente reversíveis.



No primeiro caso, dado o incremento infinitesimal de temperatura da fonte externa para o sistema, o processo é reversível. No segundo a diferença de temperaturas entre sistema e vizinhança é grande e o processo é irreversível.

Processo Reversível

Mas o sistema passa pelos mesmos estados em ambos os casos. Assim, diz-se que o processo é **internamente reversível** no segundo caso. Porém ele é **externamente irreversível** porque a irreversibilidade ocorre fora do sistema.

Um processo no qual não ocorram irreversibilidades chama-se internamente reversível. Se, além disso, irreversibilidades não ocorrem na fronteira, o processo será também externamente reversível.

Ciclo externamente reversível = \sum processos externamente reversíveis.

Principais Causas de Irreversibilidades

As principais causas de irreversibilidades (ou fatores que tornam os processos irreversíveis) são:

- atrito;
- expansão não resistida;
- transferência de calor com ΔT finita;
- mistura de substâncias diferentes;
- combustão;
- histerese;
- efeito joule ($R \cdot I^2$);
- etc...

Ciclo de Carnot

Se o rendimento térmico de todo motor térmico é inferior a 100%, qual é o ciclo de maior rendimento?

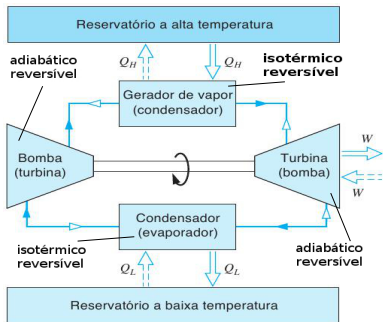
O motor de maior rendimento será aquele que opere segundo um ciclo reversível. Do exposto anteriormente, se o ciclo é reversível, então todos os processos que o compõem deverão ser, também, reversíveis.

Este ciclo é conhecido como **Ciclo de Carnot** em homenagem a Nicolas L. S. Carnot (1796-1832) que foi quem estabeleceu as bases da 2ª Lei da Termodinâmica em 1824.

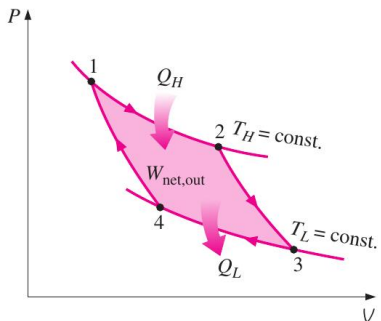
Ciclo de Carnot

Um ciclo de Carnot tem sempre os mesmos quatro processos básicos:

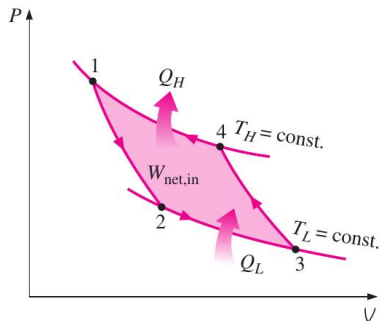
- 1 processo isotérmico reversível, no qual calor é transferido para ou do reservatório a alta temperatura;
- 2 processo adiabático reversível, no qual a temperatura do fluido de trabalho diminui desde a do reservatório a alta temperatura até a do outro reservatório;
- 3 processo isotérmico reversível, no qual calor é transferido para o (ou do) reservatório a baixa temperatura;
- 4 processo adiabático reversível, no qual a temperatura do fluido de trabalho aumenta desde a do reservatório de baixa temperatura até a do outro reservatório.



Ciclo de Carnot

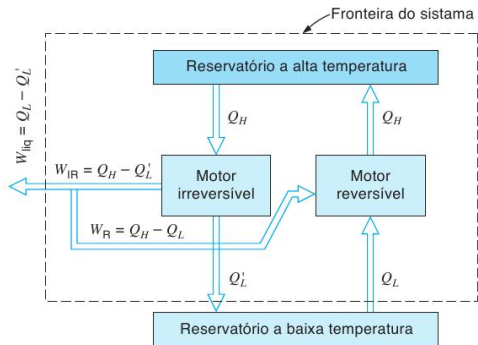


Ciclo Motor de Carnot



Ciclo Reverso de Carnot
(refrigerador ou bomba de calor).

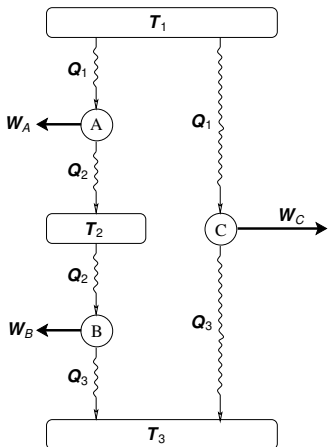
Ciclo de Carnot: Teoremas



Teorema 1: É impossível construir um motor que opere entre dois reservatórios térmicos dados e que seja mais eficiente que um motor reversível operando entre os mesmos dois reservatórios.

Teorema 2: Todos os motores que operam segundo o ciclo de Carnot e entre dois reservatórios térmicos apresentam o mesmo rendimento térmico.

Escala Termodinâmica de Temperatura



O η_{Carnot} independe da substância de trabalho.

$$\eta = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = \phi(T_L, T_H)$$

onde ϕ é relação funcional.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \phi(T_1, T_2); \quad \frac{Q_2}{Q_3} = \phi(T_2, T_3)$$

$$\frac{Q_1}{Q_3} = \phi(T_1, T_3)$$

Escala Termodinâmica de Temperatura

$$\frac{Q_1}{Q_3} = \frac{Q_1}{Q_2} \cdot \frac{Q_2}{Q_3} = \phi(T_1, T_3) = \phi(T_1, T_2) \cdot \phi(T_2, T_3)$$

Porém, o produto $\phi(T_1, T_2) \cdot \phi(T_2, T_3)$ é função somente de T_1, T_3 , como mostrado acima. Assim,

$$\phi(T_1, T_2) = \frac{f(T_1)}{f(T_2)}, \text{ analogamente, } \phi(T_2, T_3) = \frac{f(T_2)}{f(T_3)}$$

$$\frac{Q_1}{Q_3} = \phi(T_1, T_3) = \frac{f(T_1)}{f(T_3)} \rightarrow \frac{Q_H}{Q_L} = \frac{f(T_H)}{f(T_L)}$$

Relação proposta por Kelvin:

$$\frac{Q_H}{Q_L} = \frac{T_H}{T_L}$$

Máquinas Térmicas Reais e Ideais

Ciclos Ideais

(Reversíveis \equiv Carnot):

$$\eta_t = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

$$\beta = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} = \frac{T_L}{T_H - T_L}$$

$$\beta' = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} = \frac{T_H}{T_H - T_L}$$

Ciclos Reais

(Irreversíveis):

$$\eta_t = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} < 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

$$\beta = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} < \frac{T_L}{T_H - T_L}$$

$$\beta' = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} < \frac{T_H}{T_H - T_L}$$

Exercício de Aula 1

Enunciado: A taxa de transferência de calor na caldeira de uma central de potência é 1 MW e o calor é transferido para a água numa temperatura constante e igual a 700 °C. A temperatura no condensador é 40 °C, a taxa de transferência de calor no condensador é 0,58 MW e a potência consumida na bomba é 0,02 MW. Calcule, nestas condições, a eficiência térmica do ciclo. Admitindo a mesma potência consumida na bomba e a mesma transferência de calor na caldeira, qual seria a potência desenvolvida na turbina se a central operasse segundo um ciclo de Carnot?

Exercício de Aula 2

Enunciado: Uma jarra com 4 litros de leite a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ é colocada num refrigerador de Carnot e é então resfriada a $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. A temperatura do reservatório de alta temperatura do refrigerador é igual a $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ e as propriedades do leite podem ser consideradas iguais às da água líquida. Determine o calor transferido do leite e também o trabalho necessário para acionar o refrigerador neste processo. Qual o coeficiente de desempenho deste refrigerador?