Fundamentos da Termodinâmica 2º Semestre/2020

Professor: Valter Salles do Nascimento Jr
email: nascimento.valter@usp.br

10º e 11º Semanas

- Processos Reversíveis e Irreversíveis / Corolários: 2º Lei para Ciclos Termodinâmicos / Escalas de temperatura Kelvin e internacional / Desempenho máx. para ciclos entre 2 reservat.

agosto

d	s	t	q	q	s	s
26	27	28	29	30	31	1
2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	29
30	31	1	2	3	4	5

setembro

d	s	t	q	q	s	s
30	31	1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30	1	2	3
4	5	6	7	8	9	10

outubro

d	s	t	q	q	s	s
27	28	29	30	1	2	3
4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	31
1	2	3	4	5	6	7

novembro

d	s	t	q	q	s	s
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12

24 - Aniversário de São Carlos

dezembro

d	s	t	q	q	s	s
29	30	1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30	31	1	2
3	4	5	6	7	8	9

2° Lei da Termodinâmica

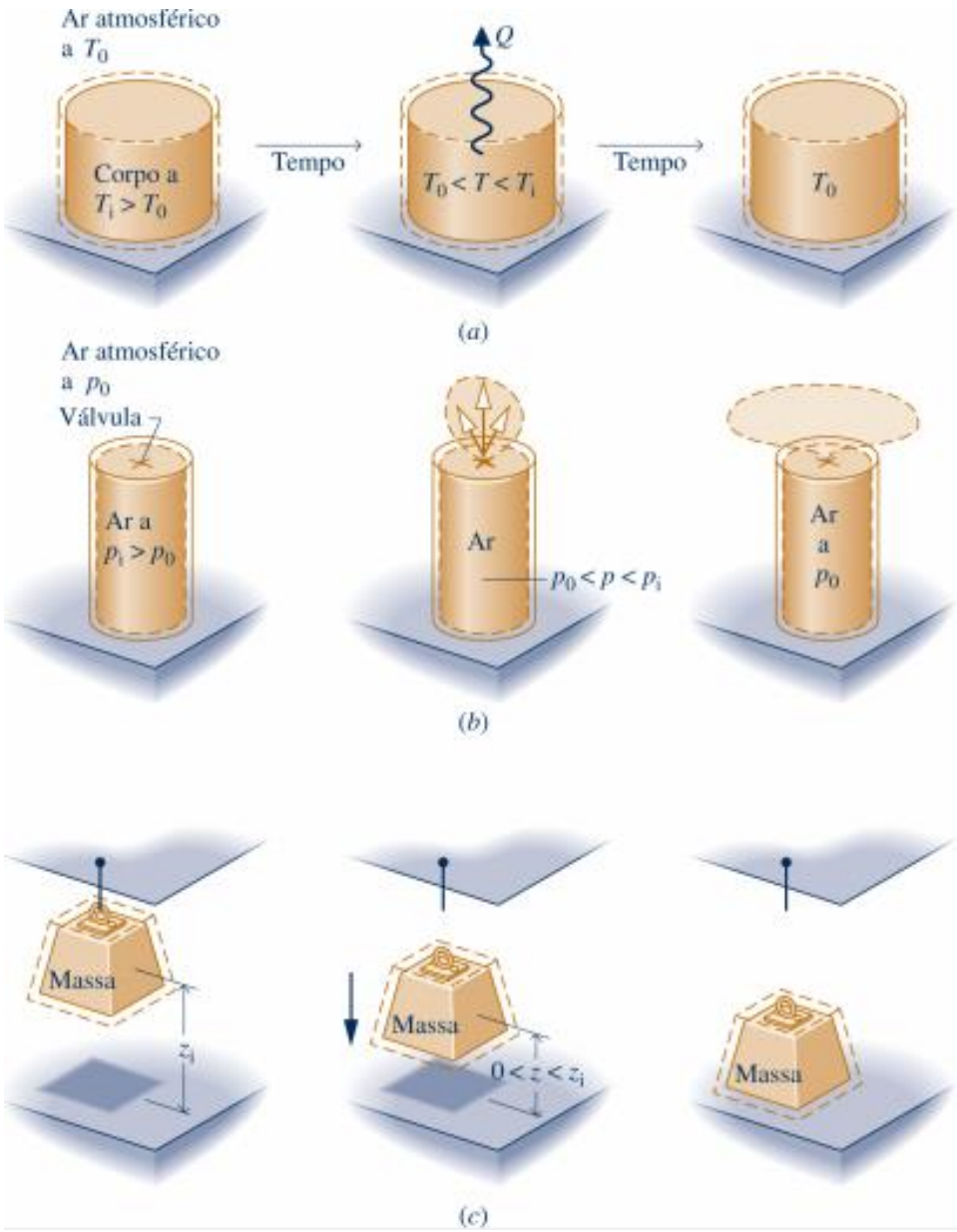
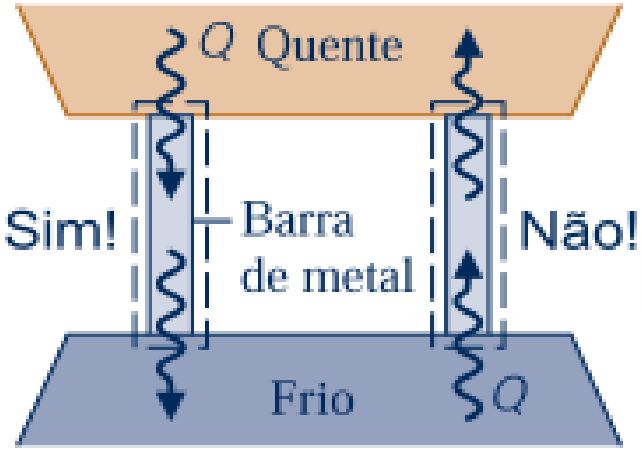


Fig. 5.1 Ilustrações de processos espontâneos e do alcance eventual do equilíbrio com as vizinhanças. (*a*) Transferência de calor espontânea. (*b*) Expansão espontânea. (*c*) Massa em queda.

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Enunciado de Clausius da Segunda Lei

Nenhum processo é possível cujo único resultado seja a transferência de calor de um corpo frio para um corpo quente



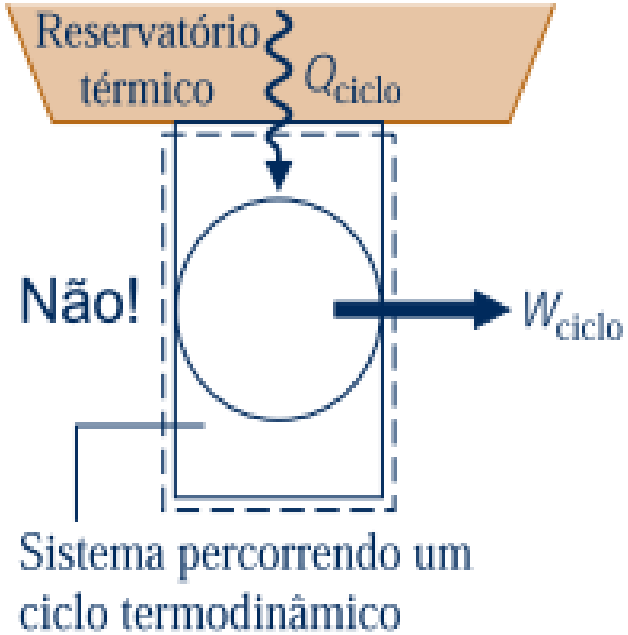
* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Reservatório Térmico

- Um **reservatório térmico** é um sistema que permanece sempre a uma temperatura constante, mesmo que energia seja adicionada ou removida por transferência de calor.
- Tal sistema é pode ser aproximado pela atmosfera terrestre, lagos e oceanos, ou ainda, um grande bloco sólido, como exemplo cobre.

Enunciado de Kelvin-Planck da Segunda Lei

Nenhum processo é possível cujo único resultado seja a completa conversão de calor em trabalho

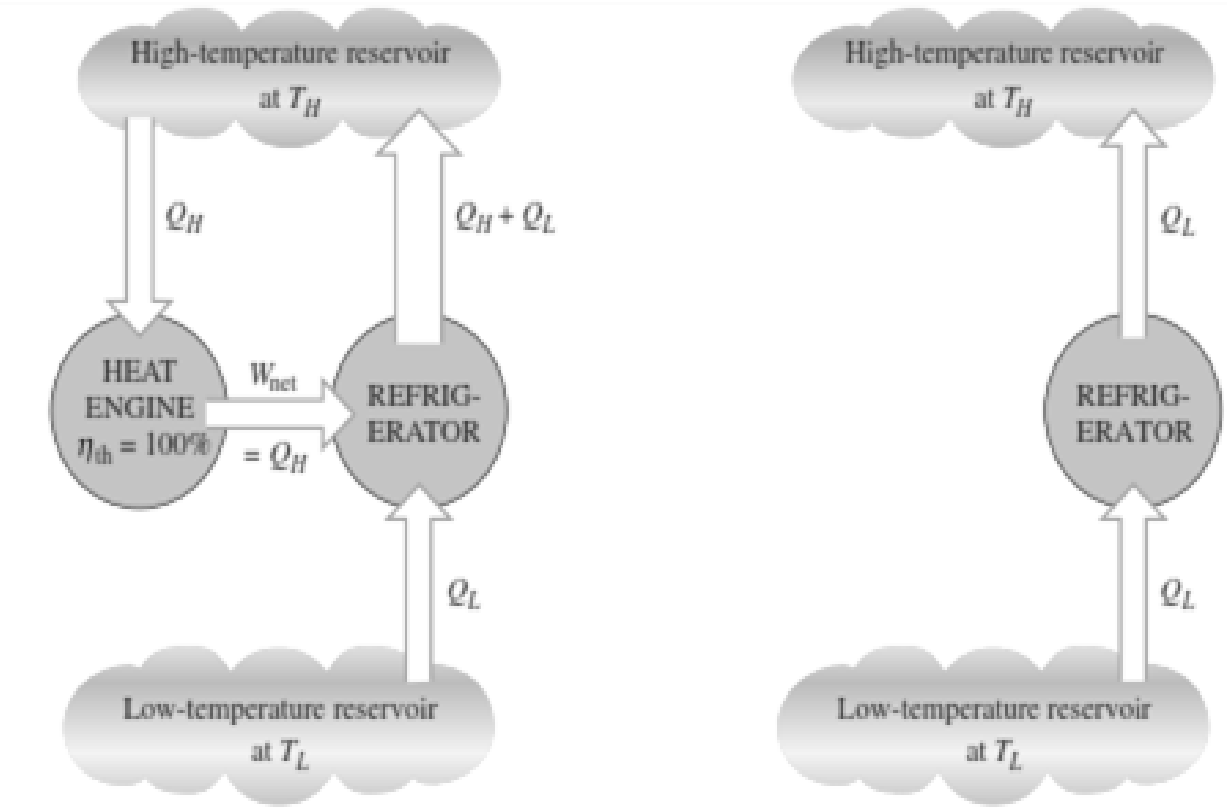


$$\boldsymbol{W_{ciclo} \leq 0\ (reservatório\ único)}$$

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Equivalência dos Enunciados

- Viola Kelvin-Planck $\Rightarrow$ viola Clausius



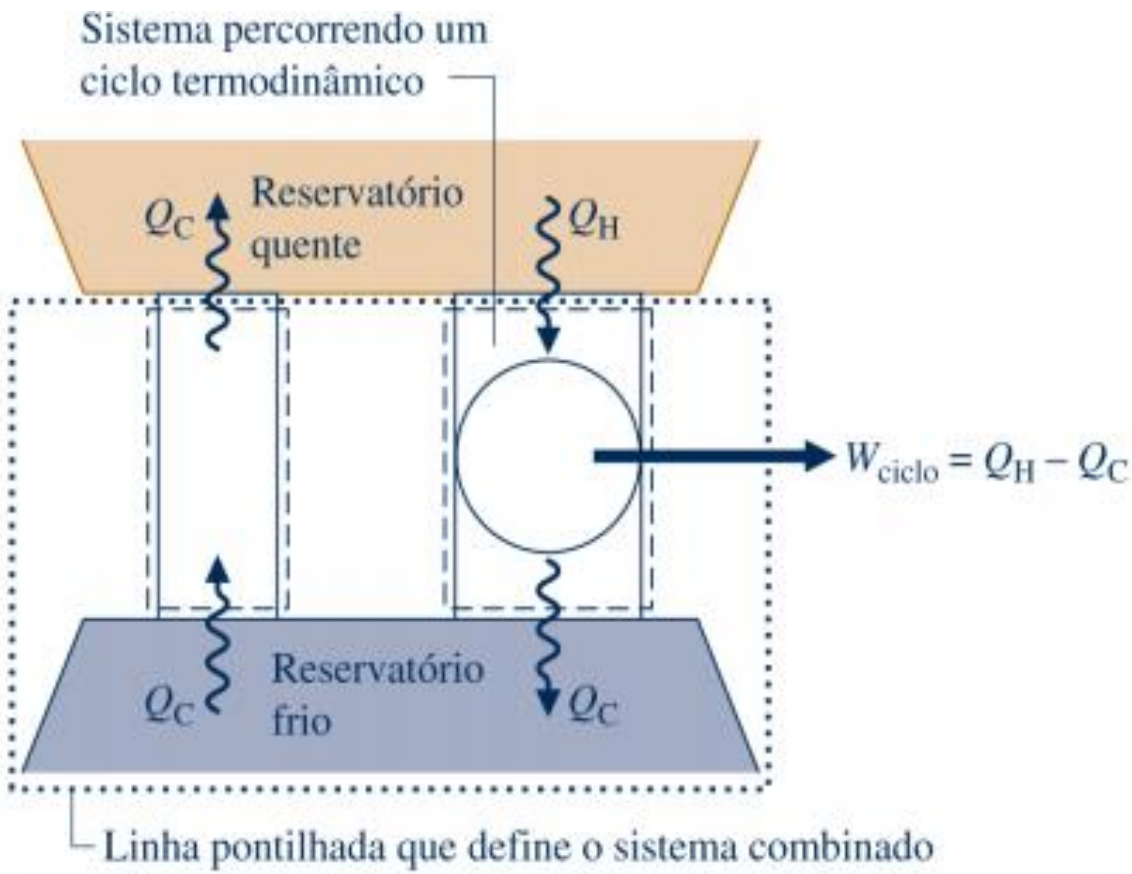
(*a*) A refrigerator that is powered by a 100 percent efficient heat engine

(*b*) The equivalent refrigerator

$Q_H+Q_L=Q_H+Q_L$ (Viola Kelvin $Q_H \neq 100\%$) $\Rightarrow$ $Q_L=Q_L$ (Viola Clausius $Q_L \neq Q_L$)

Equivalência dos Enunciados

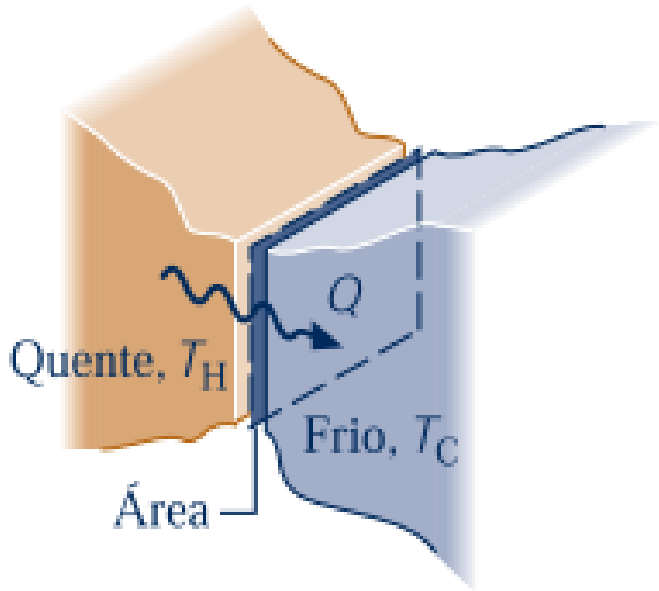
- Viola Clausius $\Rightarrow$ viola Kelvin-Planck



$Q_L = QL\ (Viola\ Clausius\ QL \neq QL)$ $\quad QH + QL = QH + QL\ (Viola\ Kelvin\ QH \neq 100\%\ ou\ QH - QL)$

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Processos Irreversíveis



$$q = \frac{E}{t} = hA(\Delta T)$$

$\Delta T \rightarrow Fonte\ de\ irreversibilidade$

$\downarrow\ \Delta T$

$\left.\begin{array}{l} \uparrow tempo \\ \uparrow Área \end{array}\right\}$ *Aumento de custos*

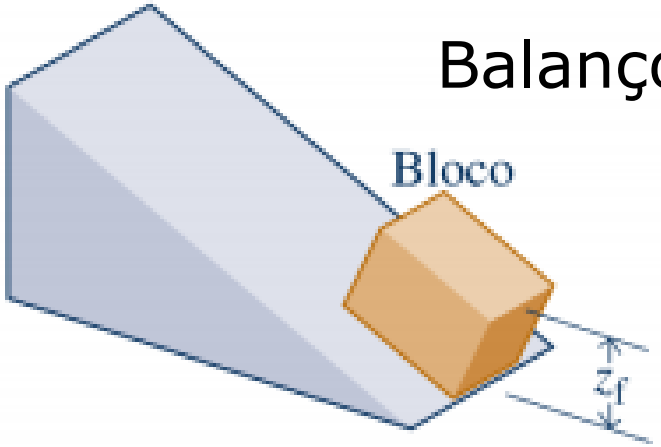
* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Demonstrando a Irreversibilidade

Demonstração de irreversibilidade de um processo envolvendo atrito.

Considere um sistema composto por um bloco de massa *m* e um plano inclinado. Inicialmente o bloco está em repouso no topo da ladeira, o bloco então desliza pelo plano, atingindo o repouso em uma altura mais baixa.

Considerando como desprezível a transferência de trabalho ou calor entre o sistema bloco-plano e sua vizinhança durante o processo.



(*a*) Estado inicial do ciclo.

Balanço de energia para sistema fechado

$$(U_f - U_i) + mg(z_f - z_i) + \cancelto{0}{(EC_f - EC_i)} = \cancelto{0}{Q} - \cancelto{0}{W}$$

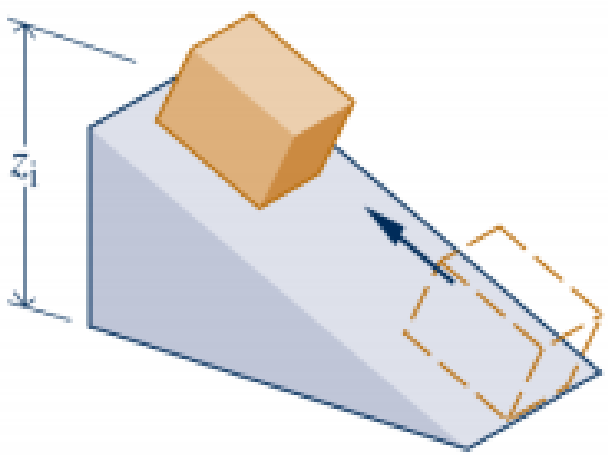
$$\boxed{U_f - U_i = mg(z_i - z_f)} \quad \text{(a)}$$

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Demonstrando a Irreversibilidade

Como não há transferência de trabalho ou calor entre o sistema bloco-plano e sua vizinhança, a condição de vizinhança permanece imutável durante o processo. Isso permite que observemos *apenas o sistema*.

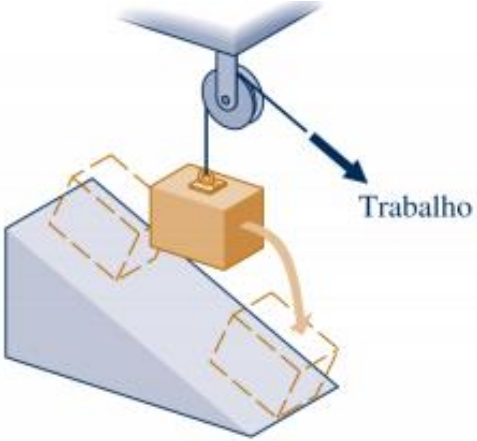
Processo 1: Admita que o processo inverso ocorra sem nenhuma mudança na vizinhança, ou seja que o bloco retorne espontâneamente ao topo. (***impossível, e o que estamos a provar***)



(*b*) Processo 1.

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Demonstrando a Irreversibilidade



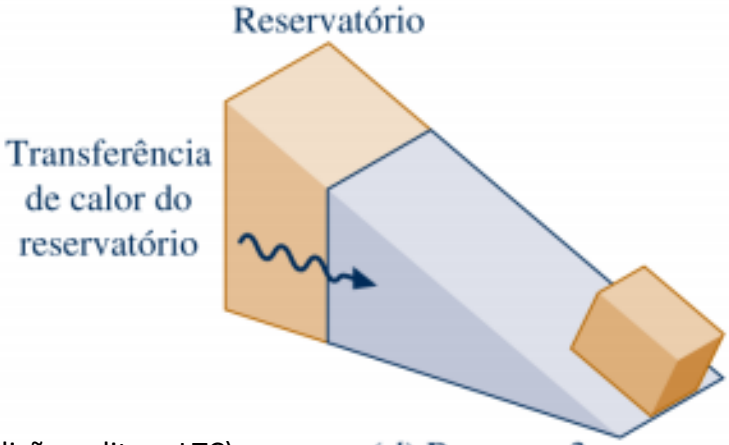
(c) Processo 2.

Processo 2: Usamos um arranjo cabo-polia para baixar o bloco de z_i até z_f, permitindo realização de trabalho

$$W_{ciclo} = mg(z_i - z_f)$$

Processo 3: A energia interna do sistema pode ser aumentada de U_i até U_f colocando o sistema em contato com um reservatório $Q_{ciclo} = (U_f - U_i)$ da equação (a)

$$Q_{ciclo} = mg(z_i - z_f)$$



(d) Processo 3.

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Demonstrando a Irreversibilidade

O resultado líquido desse ciclo é o de extrair energia de um único reservatório por transferência de calor, Q_{ciclo}, e produzir uma quantidade equivalente de trabalho, W_{ciclo}, sem outros efeitos.

Porém, esse ciclo é negado pelo enunciado de Kelvin–Planck. Como tanto o aquecimento do sistema pelo reservatório (Processo 3) quanto o abaixamento da massa pelo arranjo cabo-polia enquanto trabalho é realizado (Processo 2) são possíveis, pode-se concluir que o Processo 1 é que é impossível.

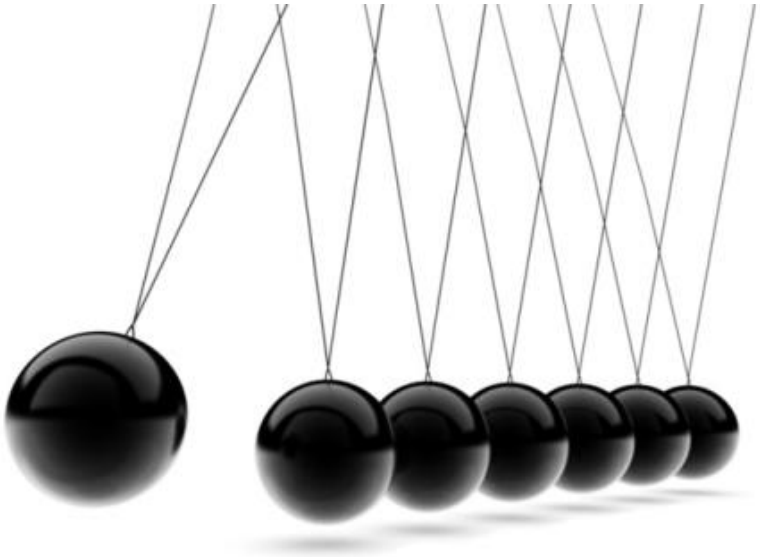
Já que o Processo 1 é o inverso do processo original no qual o bloco desliza pelo plano, segue que o processo original é irreversível.

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Processos Reversíveis

Um processo de um sistema é *reversível* se o sistema e todas as partes que compõem a sua vizinhança podem ser exatamente restituídos aos seus respectivos estados iniciais após o processo ter ocorrido. Deve ficar claro que processos reversíveis são puramente hipotéticos. Obviamente, nenhum processo que envolva transferência de calor espontânea através de uma diferença finita de temperatura, uma expansão não resistida de um gás ou liquido, atrito ou qualquer das irreversibilidades listadas anteriormente pode ser reversível.

Em suma um processo reversível é aquele que é executado de *forma perfeita*, e todos os *processos reais são irreversíveis*.

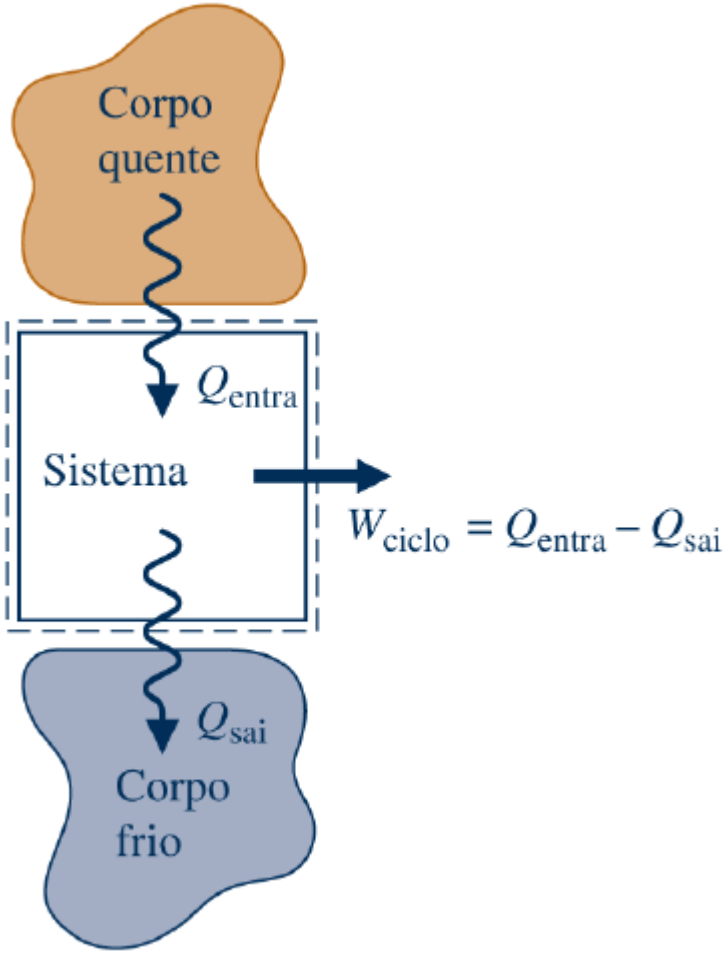


* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Processos Internamente Reversíveis

Um processo reversível é aquele no qual não existem irreversibilidades dentro do sistema ou de suas vizinhanças. Um processo internamente reversível é aquele no qual não há irreversibilidades dentro do sistema. Contudo, as irreversibilidades podem estar localizadas na vizinhança.

Revisão Ciclo de Potência



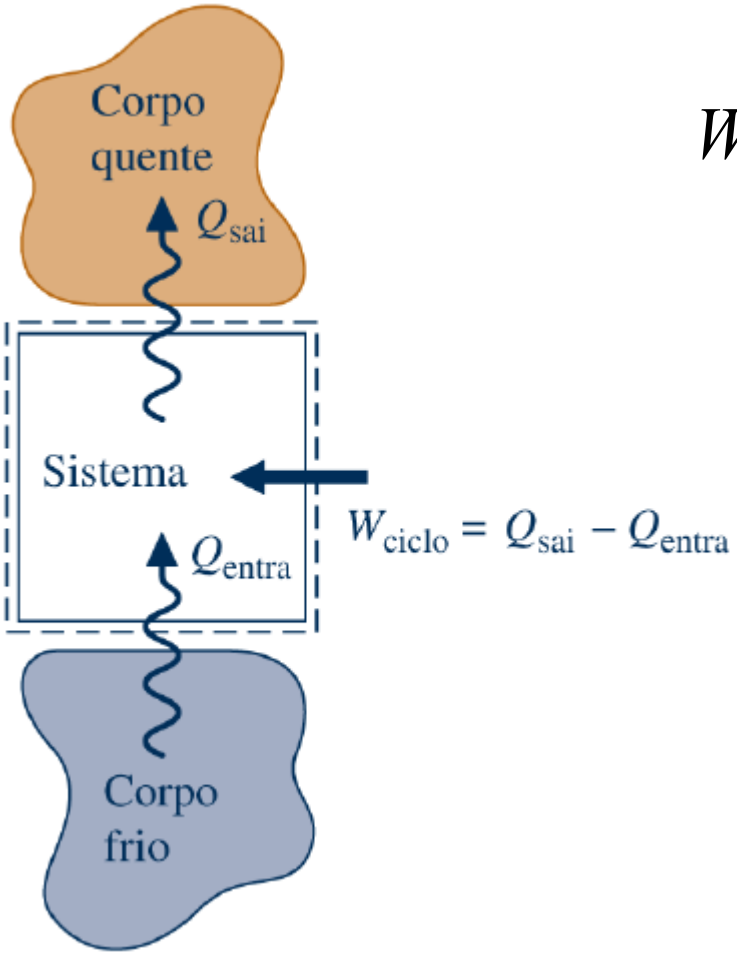
$$W_{ciclo} = Q_{entra} - Q_{sai}$$

$$\eta = \frac{W_{ciclo}}{Q_{entra}}$$

$$\frac{Q_{entra} - Q_{sai}}{Q_{entra}} = 1 - \frac{Q_{sai}}{Q_{entra}}$$

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Revisão Ciclo de Refrigeração



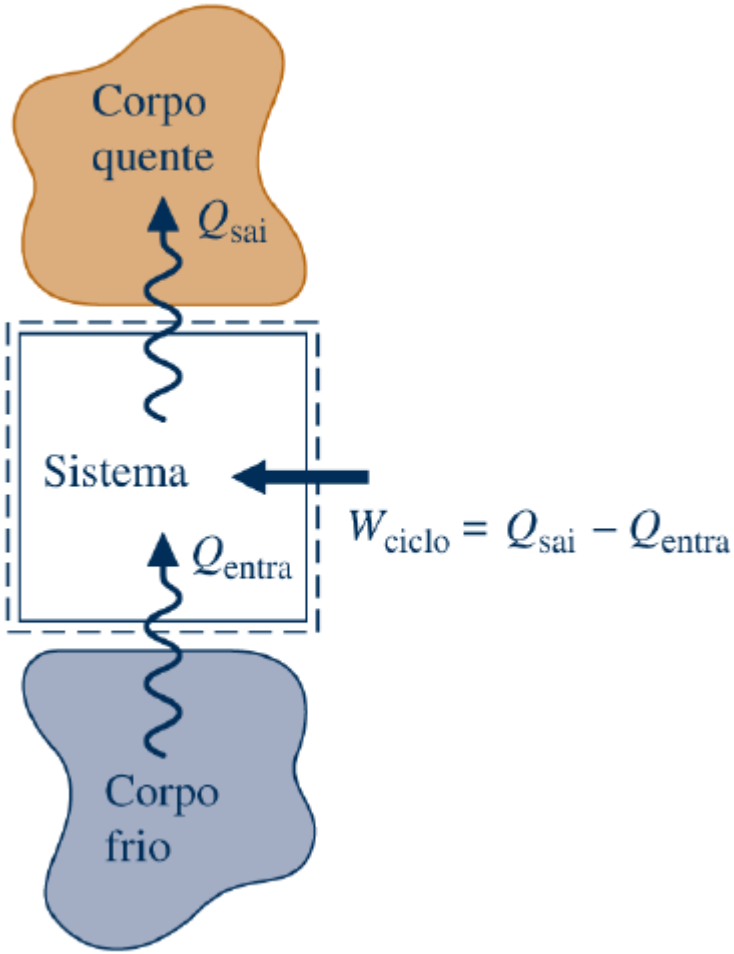
$$W_{ciclo} = Q_{sai} - Q_{entra}$$

$$\beta = \frac{Q_{entra}}{W_{ciclo}}$$

$$\beta = \frac{Q_{entra}}{Q_{sai} - Q_{entra}}$$

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Revisão Ciclo de Bomba de Calor



$$W_{ciclo} = Q_{sai} - Q_{entra}$$

$$\gamma = \frac{Q_{sai}}{W_{ciclo}}$$

$$\gamma = \frac{Q_{sai}}{Q_{sai} - Q_{entra}}$$

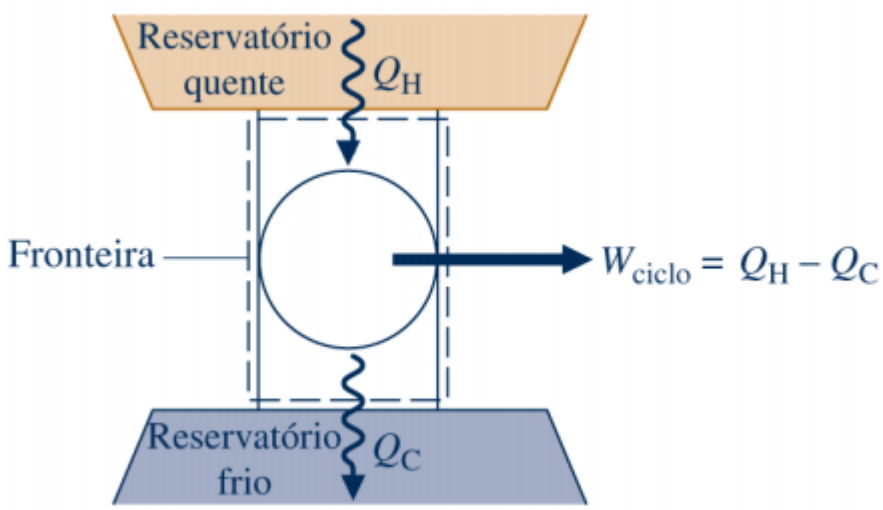
* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Corolários para Ciclo de Potência

Aplicações do Ciclo de Potência interagindo com dois reservatórios térmicos

Para um sistema de ciclo de potência operando entre dois reservatórios térmicos, um Quente e um Frio

A eficiência do ciclo pode ser expressa por:



$$\eta = \frac{W_{ciclo}}{Q_H} = 1 - \frac{Q_C}{Q_H}$$

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Corolários para Ciclo de Potência

Ao aplicar o enunciado de **Kelvin-Planck** da segunda lei, três conclusões podem ser tiradas:

1. O valor da **eficiência térmica deve ser inferior a 100%**. Apenas uma porção da transferência de calor $\boldsymbol{Q_H}$ pode ser convertida na forma de trabalho, o restante $\boldsymbol{Q_C}$ é descarregada por transferência de calor para o reservatório frio.

Duas outras conclusões, chamadas corolários de Carnot, são:

Corolários para Ciclo de Potência

Corolários de Carnot

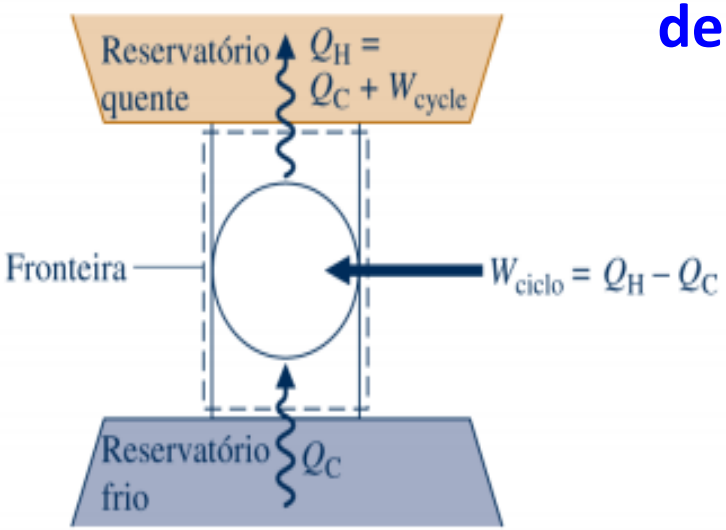
1. A eficiência térmica de um ciclo de potência irreversível é **sempre menor** do que a eficiência térmica de um ciclo de potência reversível quando cada opera entre os mesmos dois reservatórios térmicos.
2. Todos os ciclos de potência reversíveis que operam entre os mesmos dois reservatórios térmicos têm a **mesma eficiência térmica**.

Um ciclo é considerado reversível quando não há irreversibilidades dentro do sistema à medida que ele percorre o ciclo, e as transferências de calor entre o sistema e reservatórios ocorrem reversivelmente.

Corolários para Ciclo de Refr. e B. de Calor

Aplicações do Ciclo de Refrigeração e Bomba de Calor interagindo com dois reservatórios térmicos

Para um sistema percorrendo um ciclo de ciclo de refrigeração ou bomba de calor em contato com **dois** reservatórios térmicos, um reservatório quente e um reservatório frio,



O coeficiente de desempenho para o ciclo de refrigeração é

$$\beta = \frac{Q_C}{W_{ciclo}} = \frac{Q_C}{Q_H - Q_C}$$

e para bomba de calor é

$$\gamma = \frac{Q_H}{W_{ciclo}} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_C}$$

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Corolários para Ciclo de Refr. e B. de Calor

Aplicando o enunciado de **Kelvin-Planck para segunda Lei**, podemos chegar a três conclusões:

1. Para ocorrer o efeito de refrigeração, uma entrada líquida de trabalho é requerida W_{ciclo}. Sendo assim, um coeficiente de desempenho deve ter um **valor finito**.

Duas outras conclusões podem ser tiradas:

Corolários para Ciclo de Refr. e B. de Calor

1. A eficiência térmica de um ciclo de refrigeração irreversível é **sempre menor** do que a eficiência térmica de um ciclo de refrigeração reversível quando cada opera entre os mesmos dois reservatórios térmicos.
2. Todos os ciclos de refrigeração reversíveis que operam entre os mesmos dois reservatórios térmicos têm a **mesma eficiência térmica**.

Todas os três conclusões também se aplicam a um sistema passando por um ciclo de bomba de calor entre os reservatórios quentes e frios.

Escala Kelvin

Medindo a Temperatura com o Termômetro de Gás — A Escala de Gás

É instrutivo considerar como valores numéricos estão associados aos níveis de temperatura no termômetro de gás apresentado na Fig. 5.10. Seja p a pressão em um termômetro de gás a volume constante em equilíbrio térmico com um banho. Um valor pode ser designado para a temperatura do banho de uma maneira muito simples pela relação linear

$$T = \alpha p \qquad \text{(a)}$$

em que α é uma constante arbitrária.

O valor de α é determinado inserindo-se o termômetro em um outro banho mantido no ponto triplo da água e medindo-se a pressão, designada por p_{pt}, do gás confinado na temperatura do ponto triplo, 273,16 K. Substituindo-se os valores na Eq. (a) e resolvendo para α

$$\alpha = \frac{273{,}16}{p_{pt}}$$

Inserindo essa relação na Eq. (a), a temperatura do banho original, na qual a pressão do gás confinado é p, é então

$$T = 273{,}16\left(\frac{p}{p_{pt}}\right)$$

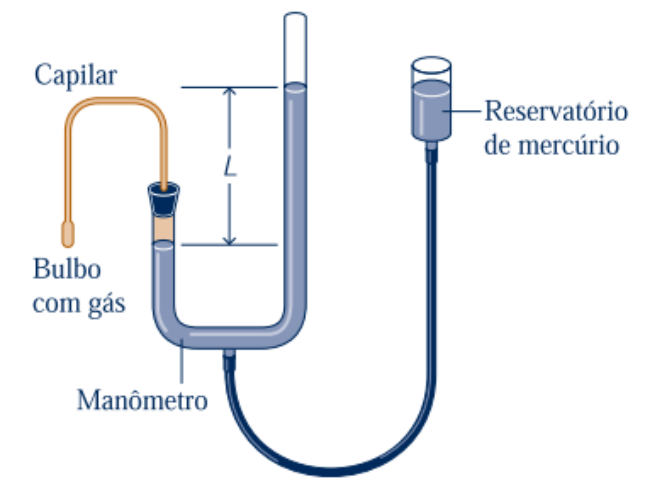
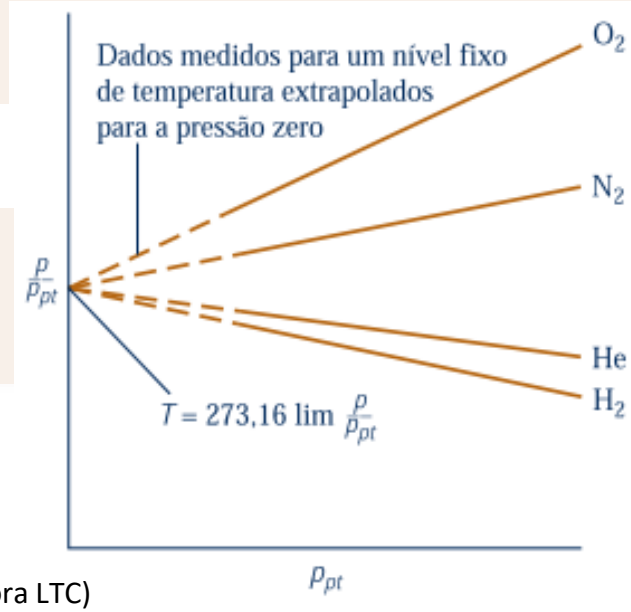


Fig. 5.10 Termômetro de gás a volume constante.

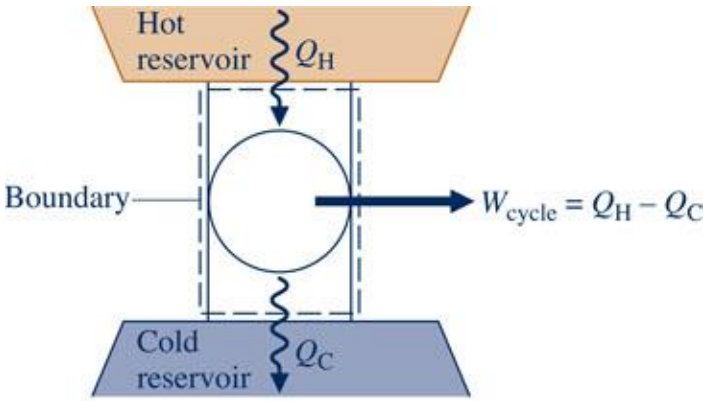
$$T = 273{,}16 \lim \frac{p}{p_{pt}}$$

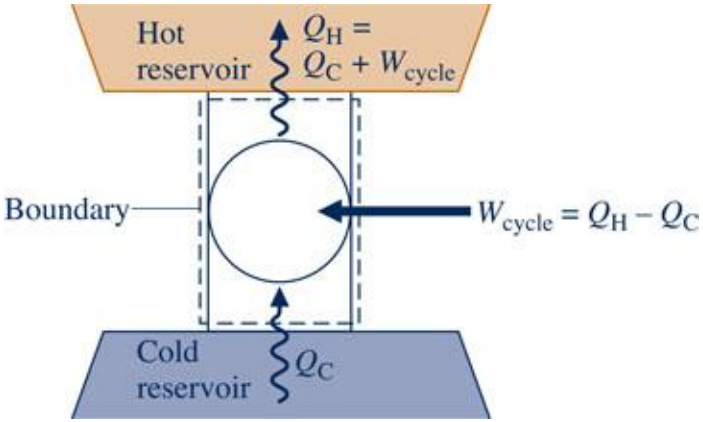


* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Escala Kelvin

Considere sistemas submetidos a um ciclo de potência e um ciclo de refrigeração ou bomba de calor, enquanto cada um troca de energia por transferência de calor com reservatórios quentes e frios:





A temperatura em Kelvin é definida como

$$\left(\frac{Q_C}{Q_H}\right)_{\substack{\text{ciclo}\\ \text{revers}}} = \frac{T_C}{T_H}$$

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Escala Kelvin

Em resumo: Quando os ciclos são reversíveis, e só então, a razão entre as transferências de calor é igual a uma proporção de temperaturas na escala Kelvin, onde T_H é a temperatura do reservatório quente e T_C é a temperatura do reservatório frio.

Enquanto as temperaturas na escala Rankine diferem das temperaturas Kelvin pelo fator de 1.8: T(ºR)=1.8T(K), as temperatura na Eq. anterior podem estar em qualquer escala de temperatura. A Equação que relaciona quantidade de calor e temperatura não é válida para as temperaturas em °C ou ºF, por estas não diferem de temperaturas Kelvin apenas por um fator:

$$T(^{o}C) = T(K) - 273.15 \qquad T(^{o}F) = T(R) - 459.67$$

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Medidas de desempenho máximo para ciclos funcionando entre dois reservatórios térmicos

Os enunciado de 2° Lei de Kelvin-Planck incluem:

1. A eficiência térmica de um ciclo de potência irreversível é sempre menor do que a eficiência térmica de um ciclo de potência reversível quando cada um opera entre os mesmos dois reservatórios térmicos.
2. O coeficiente de desempenho de um ciclo de refrigeração irreversível é sempre menor do que o coeficiente do desempenho de um ciclo de refrigeração reversível quando cada opera entre os mesmos dois reservatórios térmicos.
3. O coeficiente de desempenho de um ciclo de bomba de calor irreversível é sempre menor do que o coeficiente do desempenho de um ciclo da bomba de calor reversível quando cada um opera entre os mesmos dois reservatórios térmicos.

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Medidas de desempenho máximo para ciclos funcionando entre dois reservatórios térmicos

Segue-se que a eficiência térmica máxima teórica e coeficientes de desempenho nestes casos, são válidas somente para ciclos reversíveis:

Ciclo de potência:

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{T_{\mathrm{C}}}{T_{\mathrm{H}}}$$

Ciclo de Refrigeração:

$$\beta_{\max} = \frac{T_{\mathrm{C}}}{T_{\mathrm{H}} - T_{\mathrm{C}}}$$

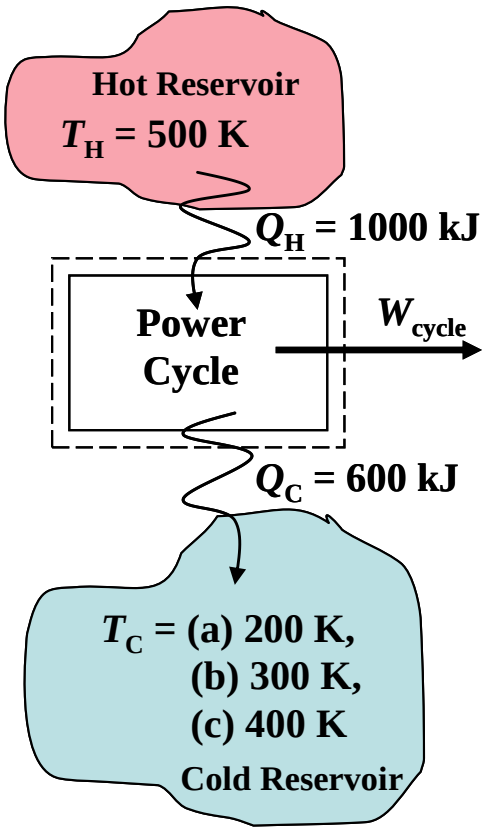
Ciclo de bomba de calor:

$$\gamma_{\max} = \frac{T_{\mathrm{H}}}{T_{\mathrm{H}} - T_{\mathrm{C}}}$$

onde T_{H} e T_{C} podem ser nas escalas **Kelvin** ou **Rankine**

Exemplo Ciclo de Potência

Um sistema é submetido a um ciclo de potência e recebe 1000 kJ por transferência de calor a partir de um reservatório térmico a uma temperatura de 500 K e descarrega 600 kJ por transferência de calor para um reservatório térmico em (a) 200 K, (b) 300 K, (c) 400 K. Para cada caso, determinar se o ciclo opera de forma irreversível, opera de forma reversível, ou é impossível.



Ciclo de potência:

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{T_C}{T_H}$$

Ciclo de Refrigeração:

$$\beta_{\max} = \frac{T_C}{T_H - T_C}$$

Ciclo de bomba de calor:

$$\gamma_{\max} = \frac{T_H}{T_H - T_C}$$

Exemplo Ciclo de Potência

Performance proposta: Calcular η usando transferência de calor:

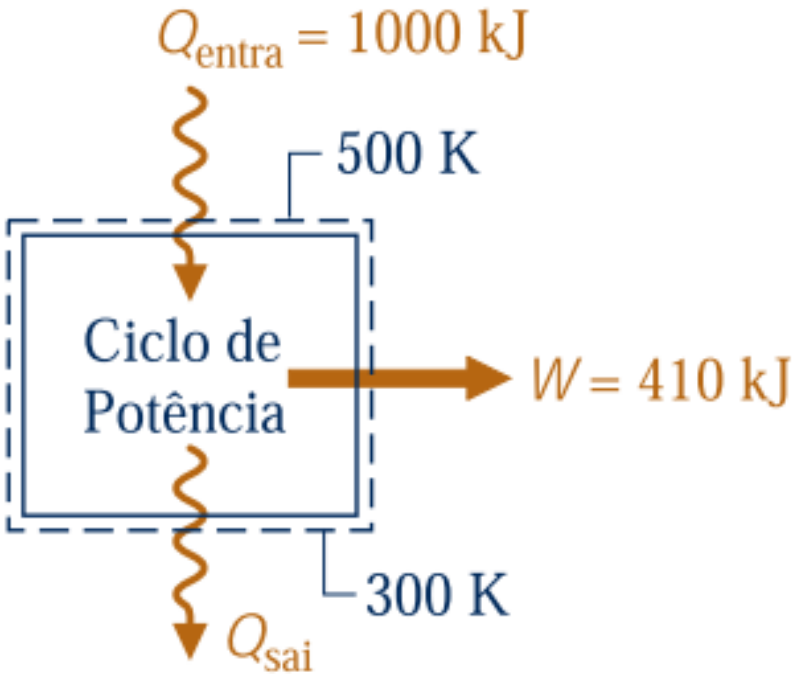
$$\eta = 1 - \frac{Q_C}{Q_H} = 1 - \frac{600\ \text{kJ}}{1000\ \text{kJ}} = 0.4$$

Performance Teórica Máxima: Calcular η_{max} da Eq. 5.9 e comparar com η:

		η η_{max}	
(a)	$\eta_{max} = 1 - \frac{T_C}{T_H} = 1 - \frac{200\ \text{K}}{500\ \text{K}} = 0.6$	**0.4 < 0.6**	→ **Irreversível**
(b)	$\eta_{max} = 1 - \frac{T_C}{T_H} = 1 - \frac{300\ \text{K}}{500\ \text{K}} = 0.4$	**0.4 = 0.4**	→ **Reversível**
(c)	$\eta_{max} = 1 - \frac{T_C}{T_H} = 1 - \frac{400\ \text{K}}{500\ \text{K}} = 0.2$	**0.4 > 0.2**	→ **Impossível**

Exemplo 5.1 (Ciclo de potência)

Um inventor alega ter desenvolvido um ciclo de potência capaz de fornecer uma saída líquida de trabalho de 410 kJ por meio de uma entrada de energia por transferência de calor de 1000 kJ. O sistema percorrendo o ciclo recebe a transferência de calor de gases quentes à temperatura de 500 K e descarrega energia por transferência de calor para a atmosfera a 300 K. Avalie essa afirmação.

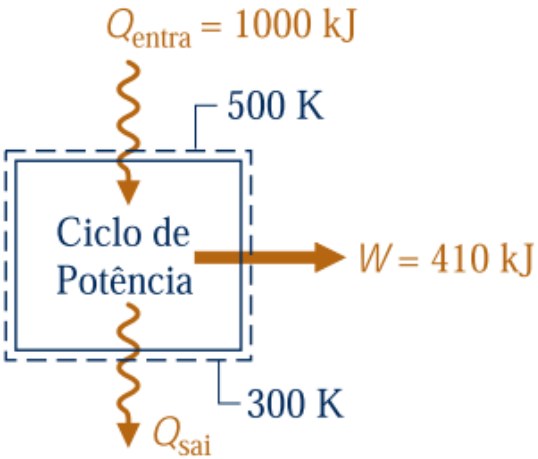


* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Exemplo 5.1 (Ciclo de potência)

Usando os valores fornecidos pelo inventor, a eficiência térmica do ciclo é:

$$\eta = \frac{410\ kJ}{1000\ kJ} = 0{,}41\ (41\%)$$



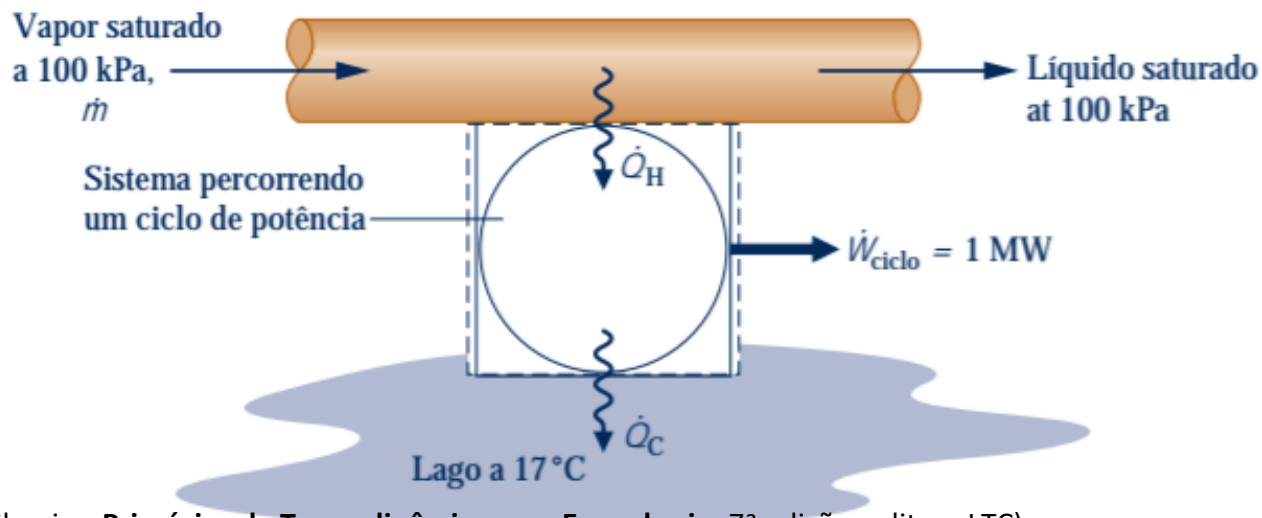
A eficiência térmica máxima do ciclo é obtida através das temperaturas entre os reservatórios térmicos:

$$\eta_{máxima} = 1 - \frac{T_C}{T_H} = 1 - \frac{300\ K}{500\ K} = 0{,}40\ (40\%)$$

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Exemplo (Ciclo de potência)

Conforme ilustrado na figura, um sistema que percorre um ciclo de potência desenvolve a potência líquida de saída de 1MW enquanto recebe energia por transferência de calor de vapor d'água condensando de vapor saturado para líquido saturado à pressão de 100kPa. A energia é descarregada do ciclo por transferência de calor para um lago próximo a 17°C. Essas são as únicas trocas de calor significantes. Os efeitos de energia cinética e de energia potêncial podem ser ignorados. Para operação em regime permanente, determine a vazão mássica teórica mínima de vapor, em kg/s, requerida por qualquer ciclo como esse



* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Exemplo (Ciclo de potência)

$$\eta_{máxima} \geq \eta_{ciclo}$$

$$1 - \frac{T_C}{T_H} \geq \frac{\dot{W}_{Ciclo}}{\dot{Q}_H}$$

$T_H \rightarrow$ é *obtido da temperatura de saturação na pressão* $100\ kPa$

$$T_H = 373\ K$$

$$T_C = 290\ K$$

$$\dot{Q}_H \geq \frac{\dot{W}_{Ciclo}}{1 - \frac{T_C}{T_H}} \qquad \dot{Q}_H \geq \frac{1\ MW}{1 - \frac{290}{373}} \qquad \dot{Q}_H \geq 4{,}494\ MW$$

$$\dot{m}\left(h_g - h_f\right) \geq 4{,}494\ MW \qquad \dot{m}(2258\ kJ/kg) \geq 4{,}494\ MW$$

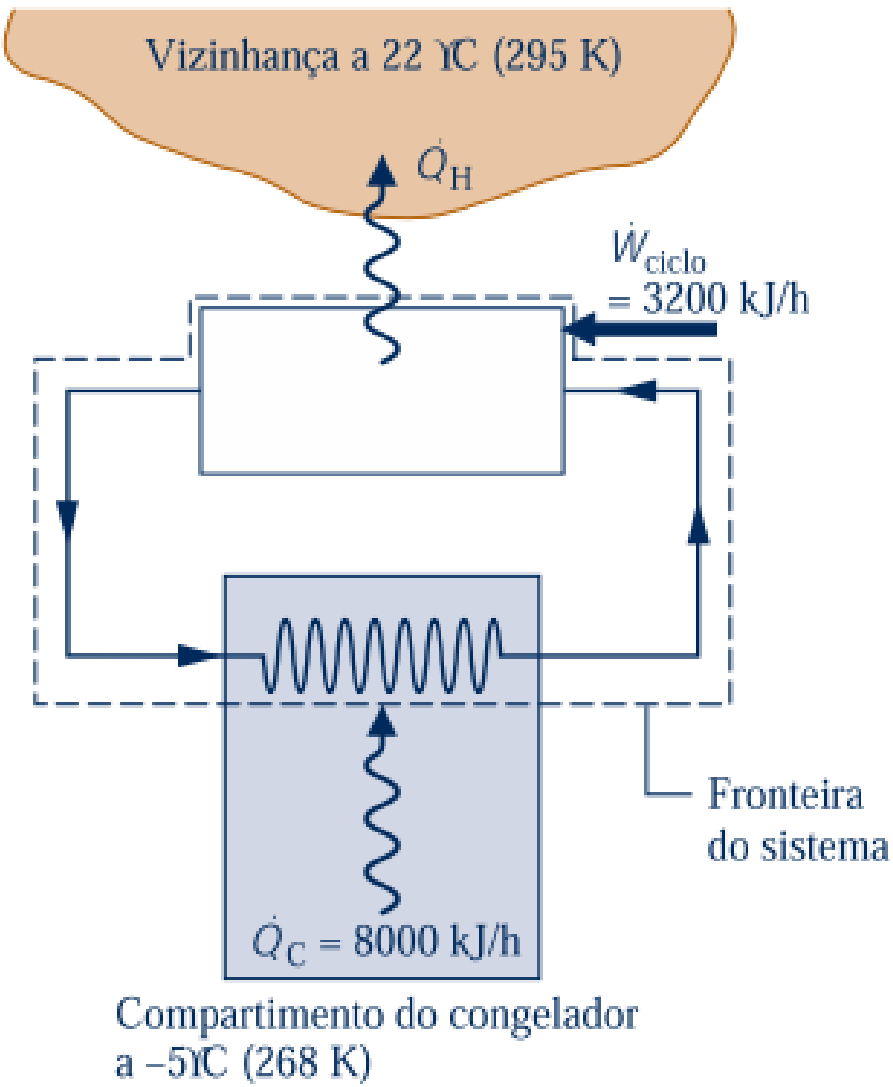
$$\dot{m} \geq 1{,}99\ kg/s$$

Desempenho de um Refrigerador

Pela circulação em regime permanente de um refrigerante a baixa temperatura através de passagens nas paredes do compartimento do congelador um refrigerador mantém o compartimento do congelador a −5°C quando a temperatura do ar circundando o refrigerador está a 22°C. A taxa de transferência de calor entre o compartimento do congelador e o refrigerante é de 8000 kJ/h, e a potência de entrada necessária para operar o refrigerador é de 3200 kJ/h. Determine o coeficiente de desempenho do refrigerador e compare com o coeficiente de desempenho de um ciclo de refrigeração reversível operando entre reservatórios às mesmas temperaturas.

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Desempenho de um Refrigerador



* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Desempenho de um Refrigerador

O coeficiente de desempenho do refrigerador é:

$$\beta = \frac{\dot{Q}_C}{\dot{W}_{ciclo}} = \frac{8000\ kJ/h}{3200\ kJ/h} = 2{,}5$$

Enquanto o coeficiente de desempenho máximo do refrigerador é:

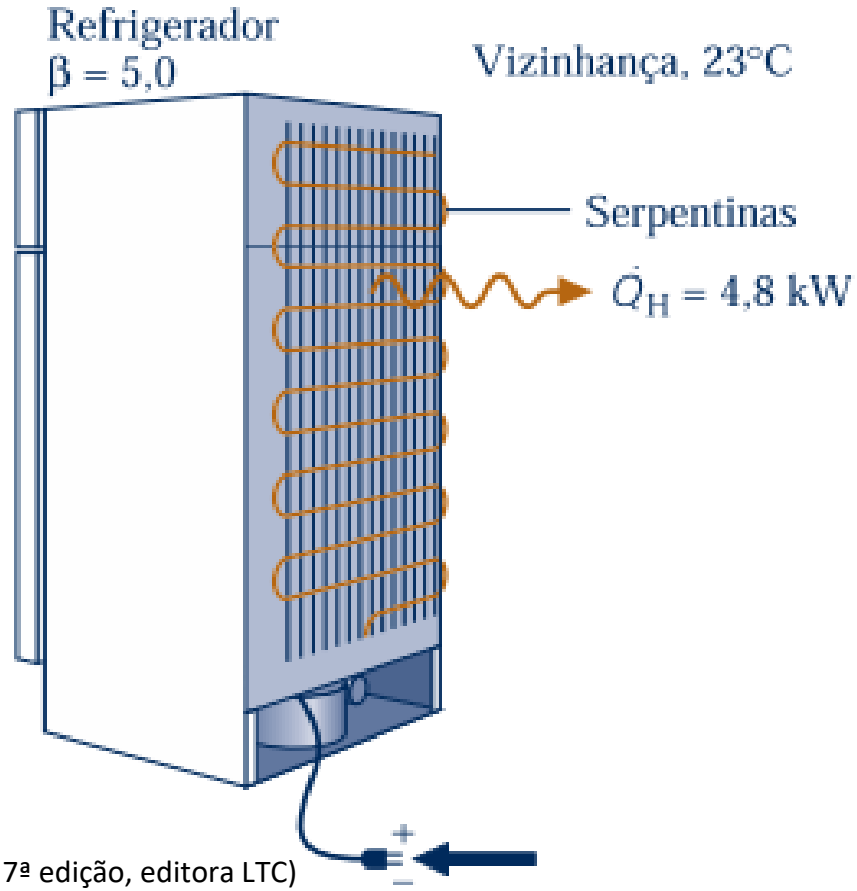
$$\beta_{máximo} = \frac{T_C}{T_H - T_C} = \frac{268\ K}{295\ K\ - 268\ K} = 9{,}9$$

Desempenho de um Refrigerador

O refrigerador mostrado na Figura opera em regime permanente com um coeficiente de desempenho de 5,0 em uma cozinha a 23°C. O refrigerador rejeita 4,8 kW por transferência de calor para a vizinhança a partir de serpentinas metálicas localizadas em seu exterior. Determine:

(a) A potência de entrada, em kW.

(b) a temperatura teórica mínima no interior do refrigerador, em K.



* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Desempenho de um Refrigerador

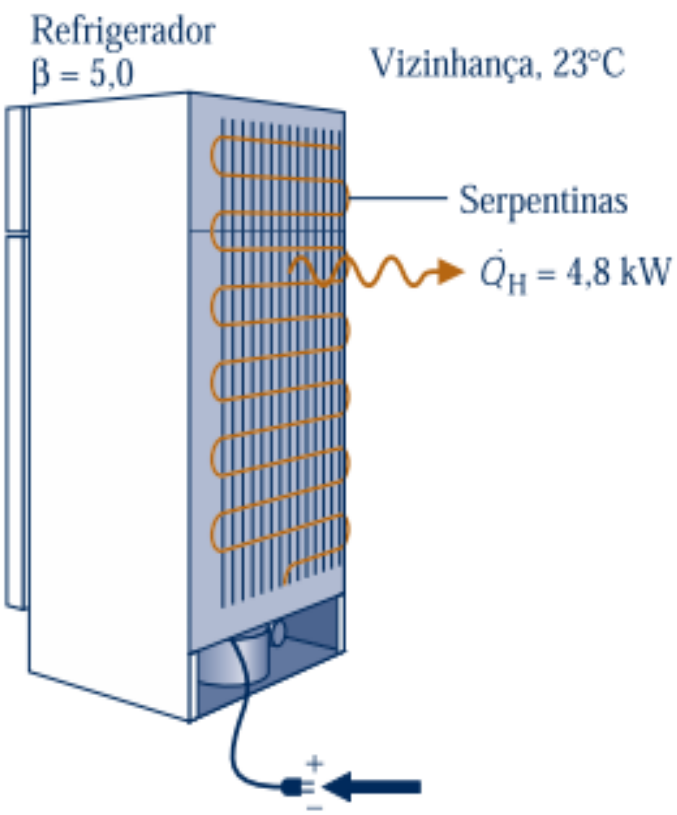
a)

$$\beta = \frac{\dot{Q}_C}{\dot{Q}_H - \dot{Q}_C}$$

$$5 = \frac{\dot{Q}_C}{4{,}8\ kW - \dot{Q}_C}$$

$$\dot{Q}_C = 4\ kW$$

$$\dot{W}_{ciclo} = \dot{Q}_H - \dot{Q}_C = 0{,}8\ kW$$



b)

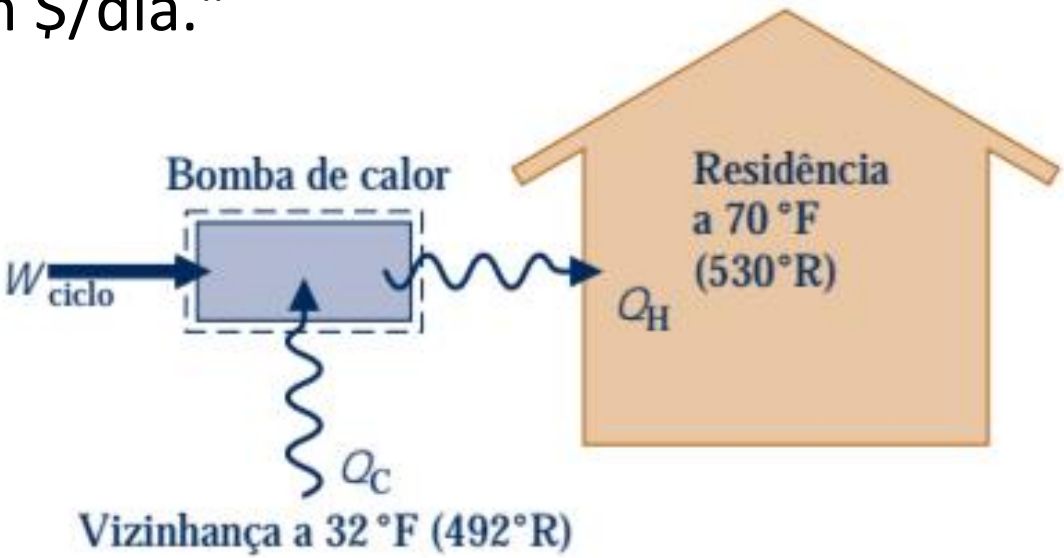
$$\beta_{máximo} \geq \beta = 5$$

$$\frac{T_C}{T_H - T_C} \geq 5$$

$$T_C \geq \frac{5}{6} T_H \qquad T_C \geq \frac{5}{6} 296\ K \qquad T_C \geq 246{,}7\ K$$

Desempenho de uma Bomba de Calor

Uma residência requer 6×10^5 Btu por dia ($6{,}3 \times 10^5$ kJ por dia) para manter sua temperatura em 70°F (21,1°C) quando a temperatura externa é 32°F (0°C). (a) Se uma bomba de calor elétrica é usada para suprir essa energia, determine o fornecimento de trabalho teórico mínimo para um dia de operação, em Btu/dia. (b) Estimando a eletricidade em 8 centavos por kW · h, determine o custo teórico mínimo para operar a bomba de calor, em $/dia."



* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Desempenho de uma Bomba de Calor

a)

$$W_{ciclo} \geq \frac{Q_H}{\gamma_{máx}}$$

$$W_{ciclo} \geq \left(1 - \frac{T_C}{T_H}\right) Q_H$$

$$W_{ciclo} \geq \left(1 - \frac{492°R}{530°R}\right)\left(6 \times 10^5 \frac{Btu}{dia}\right) = 4{,}3 \times 10^4 \frac{Btu}{dia}$$

b) O coeficiente de desempenho do refrigerador é:

$$\begin{bmatrix} custo \\ mínimo \\ teórico\ por\ dia \end{bmatrix} = \left(4{,}3 \times 10^4 \frac{Btu}{dia}\left|\frac{1\ kW.h}{3413\ Btu}\right|\right)\left(0{,}08 \frac{\$}{kW.h}\right) = 1{,}01 \frac{\$}{dia}$$

Desempenho de uma Bomba de Calor

Em regime permanente, um ciclo de bomba de calor reversível descarrega energia a uma taxa para um reservatório quente a temperatura T_H, enquanto recebe energia a uma taxa de um reservatório frio à temperatura T_C.

(a) Se T_H = 21°C e T_C = 7°C, determine o coeficiente de desempenho.

(b) Se $\dot{Q}_H$ = 10,5 kW, $\dot{Q}_C$ = 8,75 kW e T_C = 0°C, determine T_H, em °C.

(c) Se o coeficiente de desempenho for 10 e T_H = 27°C, determine T_C, em °C.

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)