

# 5

## A Segunda Lei da Termodinâmica

### RESULTADOS DE APRENDIZAGEM

*Quando você completar o estudo deste capítulo estará apto a...*

- ▶ demonstrar conhecimento dos conceitos fundamentais relacionados com a segunda lei da termodinâmica, incluindo os enunciados alternativos da segunda lei, os processos internamente reversíveis e a escala de temperatura Kelvin.
- ▶ listar diversas irreversibilidades importantes.
- ▶ avaliar o desempenho dos ciclos de potência e dos ciclos de refrigeração e bomba de calor, usando, conforme apropriado, os corolários das Seções 5.6.2 e 5.7.2 e as Eqs. 5.9 a 5.11.
- ▶ descrever o ciclo de Carnot.
- ▶ interpretar a desigualdade de Clausius expressa pela Eq. 5.13.

### 5.1 Introduzindo a Segunda Lei

Os objetivos da presente seção são

1. estimular a percepção da necessidade e da utilidade da segunda lei.
2. introduzir os enunciados da segunda lei que servem como ponto de partida para sua aplicação.

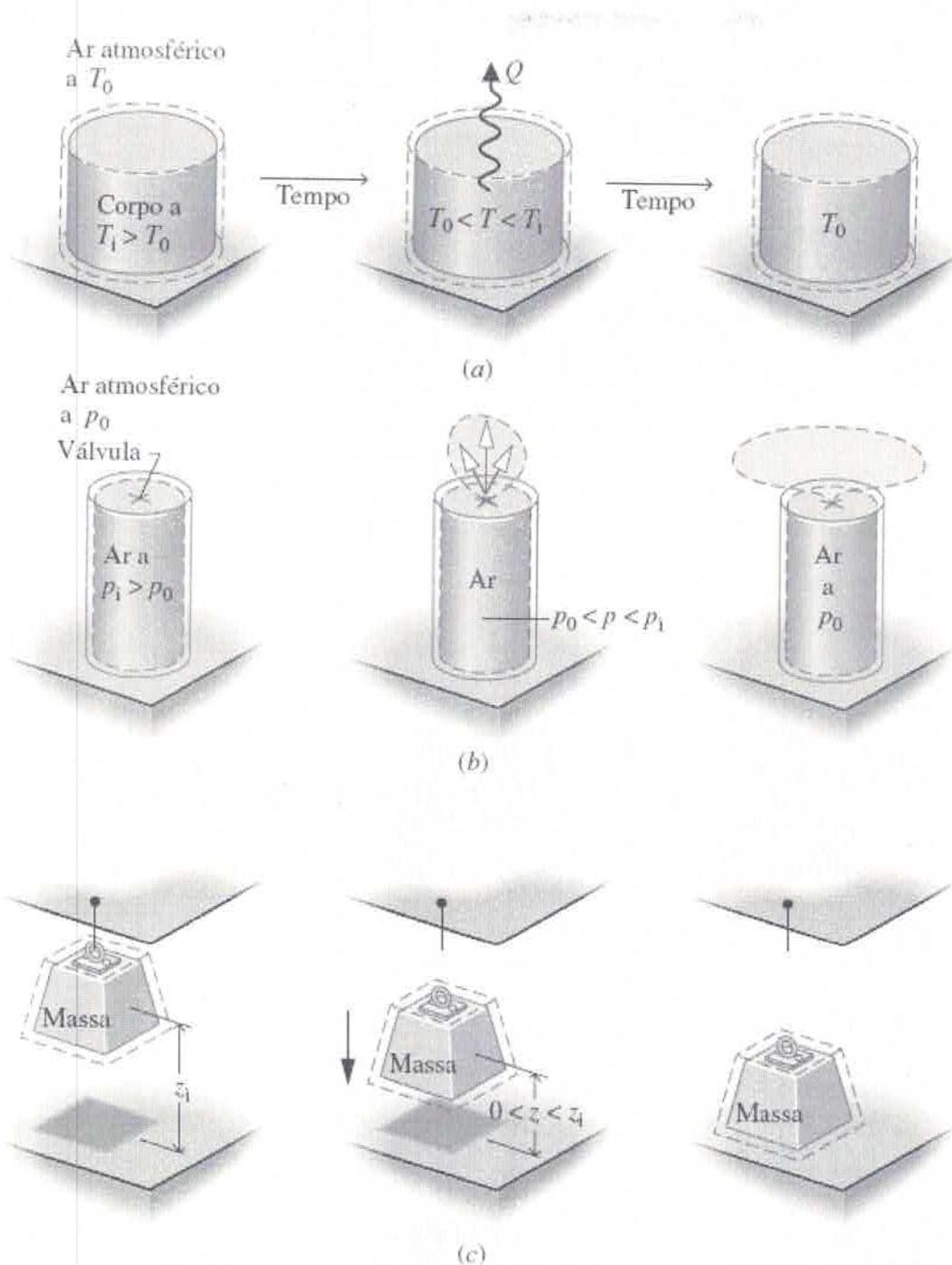
#### 5.1.1 Estimulando o Uso da Segunda Lei

A experiência diária mostra que há um sentido definido para os processos *espontâneos*. Isso pode ser ilustrado considerando-se os três sistemas mostrados na [Fig. 5.1](#).

- ▶ Sistema a. Um objeto a uma temperatura elevada  $T_1$  colocado em contato com o ar atmosférico à temperatura  $T_0$  eventualmente se resfria até atingir a temperatura da sua vizinhança de dimensão muito maior, conforme ilustrado na [Fig. 5.1a](#). De acordo com o princípio da conservação da energia, o decréscimo de energia interna do corpo se traduz por um aumento na energia interna da vizinhança. O processo *inverso* não ocorreria *espontaneamente*, mesmo que a energia pudesse ser conservada: a energia interna da vizinhança não diminuiria espontaneamente enquanto o corpo

se aquecesse de  $T_0$  até sua temperatura inicial.

- ▶ Sistema b. O ar mantido a uma alta pressão  $p_i$  em um tanque fechado escoava espontaneamente para a vizinhança a uma pressão mais baixa  $p_0$  quando a válvula é aberta, conforme ilustrado na [Fig. 5.1b](#). Por fim, a movimentação do fluido cessa e todo o ar está com a mesma pressão de sua vizinhança. Baseado na experiência, deve estar claro que o processo *inverso* não ocorreria *espontaneamente*, mesmo que a energia pudesse ser conservada: o ar não retornaria espontaneamente para o tanque a partir da sua vizinhança à pressão  $p_0$ , conduzindo a pressão ao seu valor inicial.
- ▶ Sistema c. A massa suspensa por um cabo a uma altura  $z_i$  cai quando liberada, conforme ilustrado na [Fig. 5.1c](#). Quando atinge o repouso, a energia potencial da massa na sua condição inicial se transforma em um aumento na energia interna da massa e da sua vizinhança, de acordo com o princípio da conservação da energia. Por fim, a massa também atinge a temperatura da sua vizinhança de dimensão muito maior. O processo *inverso* não ocorreria *espontaneamente*, mesmo que a energia pudesse ser conservada: a massa não retornaria espontaneamente a sua altura inicial enquanto a sua energia interna e/ou a de sua vizinhança diminuiria.



**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.

Em cada caso considerado a condição inicial do sistema pode ser restabelecida, mas não por meio de um processo espontâneo. Alguns dispositivos auxiliares seriam necessários. Por esses meios auxiliares o objeto poderia ser reaquecido até a sua temperatura inicial, o ar poderia retornar ao tanque e sua pressão inicial ser restabelecida e a massa poderia ser erguida até a sua altura inicial. Também em cada caso o fornecimento de um combustível ou eletricidade seria necessário para o funcionamento dos dispositivos auxiliares, resultando em uma mudança permanente na condição das vizinhanças.

#### Conclusões Adicionais

Essa discussão indica que nem todo processo consistente com o princípio da conservação da energia pode ocorrer.

Geralmente, um balanço de energia por si só não permite indicar o sentido preferencial nem distinguir os processos que podem ocorrer daqueles que não podem. Em casos elementares como os considerados na Fig. 5.1, a experiência pode ser usada para deduzir se determinados processos espontâneos ocorrem e quais seriam as suas direções. Para casos mais complexos, em que falta experiência ou esta é imprecisa, seria útil uma linha de ação. Isso é fornecido pela *segunda lei*.

Essa discussão também indica que, quando não perturbados, os sistemas tendem a sofrer mudanças espontâneas até atingir uma condição de equilíbrio, tanto internamente quanto com suas vizinhanças. Em alguns casos o equilíbrio é alcançado rapidamente, em outros é atingido lentamente. Por exemplo, algumas reações químicas atingem o equilíbrio em fração de segundos; um cubo de gelo precisa de poucos minutos para derreter; e pode levar anos para uma barra de ferro enferrujar completamente. Tanto o processo rápido quanto o lento devem, obviamente, satisfazer ao princípio da conservação da energia. Entretanto, esse princípio por si só seria insuficiente para determinar o estado final de equilíbrio. Outro princípio geral é necessário. Isso é fornecido pela *segunda lei*.



## BIOCONEXÕES

Você já desejou saber por que uma banana colocada em uma bolsa fechada ou em um congelador amadurece rapidamente? A resposta está no etileno,  $C_2H_4$ , produzido naturalmente pelas bananas, tomates e outras frutas e vegetais. O etileno é o hormônio da planta que afeta o crescimento e o desenvolvimento. Quando uma banana é colocada em um recipiente fechado, o etileno se acumula e estimula a produção de mais etileno. Essa realimentação positiva resulta em mais e mais etileno, em um amadurecimento e envelhecimento acelerados, até estragar. Em termos termodinâmicos, se a banana fosse deixada sozinha tenderia a sofrer mudanças espontâneas até que o equilíbrio fosse alcançado. Os plantadores aprenderam a tirar vantagem desse processo natural. Tomates colhidos ainda verdes e transportados a mercados distantes podem tornar-se vermelhos até que cheguem ao seu destino; caso contrário, eles podem ser induzidos a amadurecer por meio de um spray de etileno.

### 5.1.2 Oportunidades para Desenvolver Trabalho

Explorando os processos espontâneos mostrados na Fig. 5.1 é possível, em princípio, desenvolver trabalho à medida que o equilíbrio é atingido.

► POR EXEMPLO em vez de permitir que o corpo da Fig. 5.1a resfrie espontaneamente sem nenhum outro resultado, a energia através de transferência de calor poderia ser fornecida a um sistema percorrendo um ciclo de potência que desenvolveria uma quantidade líquida de trabalho (Seção 2.6). Uma vez que o objeto atingisse o equilíbrio com a vizinhança, o processo terminaria. Embora exista uma *oportunidade* para desenvolver trabalho nesse caso, a oportunidade seria desperdiçada se fosse permitido ao corpo se resfriar sem desenvolver trabalho algum. No caso da Fig. 5.1b, em vez de se permitir que o ar se expanda sem objetivo para a vizinhança com pressão mais baixa a corrente de ar poderia ser conduzida através de uma turbina, desenvolvendo trabalho. Consequentemente, nesse caso existe também a possibilidade de desenvolver trabalho que não seria explorada em um processo sem controle. No caso da Fig. 5.1c, em vez de se permitir que a massa caia de uma maneira descontrolada ela poderia ser baixada gradualmente de maneira a girar uma roda, levantar outra massa, e assim por diante. ◀◀◀◀◀◀

Essas considerações podem ser resumidas observando-se que, quando existe um desequilíbrio entre dois sistemas, há uma oportunidade para o desenvolvimento de trabalho que seria irrevogavelmente perdida se fosse permitido aos sistemas chegar ao equilíbrio de uma maneira descontrolada. Reconhecendo essa possibilidade para realizar trabalho, podemos formular duas perguntas:

1. Qual é o valor máximo teórico para o trabalho que poderia ser obtido?
2. Quais são os fatores que impediriam a realização do valor máximo?

A existência de um valor máximo encontra-se em total acordo com a experiência, e uma vez que fosse possível desenvolver trabalho ilimitado poucas preocupações seriam manifestadas acerca de nossas reservas de combustível fóssil cada vez menores. Também está de acordo com a experiência a ideia de que mesmo os melhores dispositivos estariam sujeitos a fatores como o atrito, que os impediriam de atingir o trabalho máximo teórico. A segunda lei da termodinâmica fornece os meios para determinar o máximo teórico e avaliar quantitativamente os fatores que impedem o seu alcance.

### 5.1.3 Aspectos da Segunda Lei

Concluindo a introdução apresentada a respeito da segunda lei, observa-se que essa e as deduções a partir dela levam a muitas aplicações importantes, incluindo meios para:

1. prever o sentido dos processos.
2. estabelecer condições para o equilíbrio.
3. determinar o melhor desempenho *teórico* de ciclos, motores e outros dispositivos.
4. avaliar quantitativamente os fatores que impedem o alcance do melhor nível de desempenho teórico.

Outras utilizações da segunda lei incluem:

5. definir uma escala de temperatura independente das propriedades de qualquer substância termométrica.
6. desenvolver meios para avaliar propriedades como  $u$  e  $h$  em termos de propriedades que são mais fáceis de obter experimentalmente.

Os cientistas e engenheiros encontraram muitas outras aplicações da segunda lei e das deduções a partir dela. Ela também tem sido utilizada em economia, filosofia e em outras disciplinas, além da termodinâmica aplicada à engenharia.

### TOME NOTA...

Não há um enunciado único da segunda lei que aborde cada um dos seus muitos aspectos.

Os seis pontos listados podem ser vistos como aspectos da segunda lei da termodinâmica, e não como ideias independentes e sem relação alguma. Contudo, dada a variedade dessas áreas de aplicação é fácil entender por que não existe um enunciado da segunda lei simples que contemple claramente cada uma delas. Existem várias formulações alternativas, ainda que equivalentes, da segunda lei.

Na próxima seção três enunciados equivalentes da segunda lei são apresentados como um *ponto de partida* para o nosso estudo da segunda lei e de suas consequências. Embora a relação exata entre essas formulações particulares e cada um dos aspectos da segunda lei aqui listados possa não ser imediatamente perceptível, todos os aspectos apresentados podem ser obtidos através de deduções a partir dessas formulações ou de seus corolários. É importante acrescentar que em cada exemplo em que uma consequência da segunda lei foi testada direta ou indiretamente, por meio de experimentos, ela foi infalivelmente confirmada. Consequentemente, a base da segunda lei da termodinâmica, como qualquer outra lei física, é a evidência experimental.

## 5.2 Enunciados da Segunda Lei

Três enunciados alternativos da segunda lei da termodinâmica são dados nesta seção. Eles são os enunciados (1) de Clausius, (2) de Kelvin-Planck e (3) da entropia. Os enunciados de Clausius e de Kelvin-Planck são formulações tradicionais da segunda lei. Provavelmente você já os estudou anteriormente em um curso introdutório de física.

Embora o enunciado de Clausius esteja mais de acordo com a experiência e, portanto, seja mais fácil de ser aceito, o enunciado de Kelvin-Planck fornece um meio mais eficaz para apresentar deduções oriundas da segunda lei, relacionadas a ciclos termodinâmicos, que são o foco do presente capítulo. O enunciado de Kelvin-Planck também enfatiza o enunciado da entropia. O enunciado da entropia é a forma mais eficaz da segunda lei para uma gama extremamente ampla de aplicações na engenharia. O enunciado da entropia é o foco do Cap. 6.

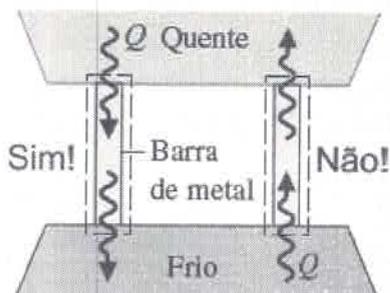
### 5.2.1 Enunciado de Clausius da Segunda Lei

#### enunciado de Clausius

O enunciado de Clausius da segunda lei afirma que:

***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.***

O enunciado de Clausius não exclui a possibilidade de transferência de energia sob a forma de calor de um corpo mais frio para um corpo mais quente, uma vez que é exatamente isso que os refrigeradores e bombas de calor realizam. Entretanto, conforme as palavras “único resultado” do enunciado sugerem, quando uma transferência de calor de um corpo mais frio para um corpo mais quente ocorre deve haver *outros efeitos* dentro do sistema realizando a transferência de calor, na sua vizinhança ou em ambos. Se o sistema opera em um ciclo termodinâmico, o seu estado inicial é restabelecido após cada ciclo, de modo que o único lugar que deve ser examinado à procura desses *outros* efeitos é a sua vizinhança.



► POR EXEMPLO a refrigeração de alimentos é geralmente obtida por refrigeradores movidos a motores elétricos que necessitam de energia de suas vizinhanças para operarem. O enunciado de Clausius indica que é impossível construir um ciclo de refrigeração que opere sem uma entrada de energia. ◀◀◀◀◀

### 5.2.2 Enunciado de Kelvin-Planck da Segunda Lei

#### reservatório térmico

Antes de fornecermos o enunciado de Kelvin-Planck da segunda lei, será apresentado o conceito de reservatório térmico. Um reservatório térmico, ou simplesmente um reservatório, é um tipo especial de sistema que sempre permanece à temperatura constante mesmo que seja adicionada ou removida energia através de transferência de calor. Um reservatório é obviamente uma idealização, mas esse sistema pode ser aproximado de várias maneiras — pela atmosfera terrestre, grandes corpos d’água (lagos, oceanos), um grande bloco de cobre e um sistema que consiste em duas fases a uma pressão especificada (enquanto a razão entre as massas das duas fases varia à medida que o sistema é aquecido ou resfriado à pressão constante, a temperatura permanece constante desde que ambas as fases coexistam). As propriedades extensivas de um reservatório térmico, tais como a energia interna, podem variar através de interações com outros sistemas, muito embora a temperatura do reservatório permaneça constante.

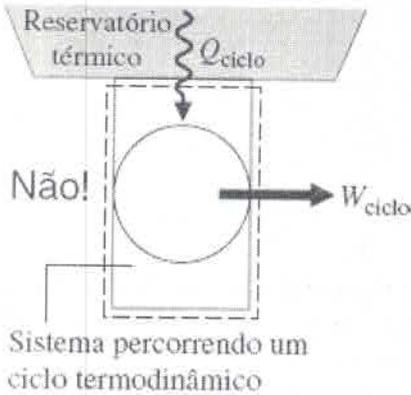
#### enunciado de Kelvin-Planck

Tendo apresentado o conceito de reservatório térmico, fornecemos o enunciado de Kelvin-Planck da segunda lei:

**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.**

O enunciado de Kelvin–Planck não exclui a possibilidade de um sistema desenvolver uma quantidade líquida de trabalho a partir de uma transferência de calor extraída de um único reservatório. Ele apenas nega essa possibilidade se o sistema percorrer um ciclo termodinâmico.

O enunciado de Kelvin–Planck pode ser expresso analiticamente. Para esse desenvolvimento, vamos estudar um sistema percorrendo um ciclo termodinâmico enquanto troca energia por transferência de calor com um único reservatório, conforme ilustrado pela figura. Tanto a primeira quanto a segunda lei impõem restrições:



► Uma restrição é imposta pela primeira lei sobre o trabalho líquido e a transferência de calor entre o sistema e sua vizinhança. De acordo com o balanço de energia do ciclo (veja a Eq. 2.40 na Seção 2.6),

$$W_{\text{ciclo}} = Q_{\text{ciclo}}$$

Resumindo, o trabalho líquido realizado pelo (ou sobre o) sistema percorrendo um ciclo é igual à transferência líquida de calor para (ou do) o sistema. Embora o balanço de energia do ciclo permita que o trabalho líquido  $W_{\text{ciclo}}$  seja positivo ou negativo, a segunda lei impõe uma restrição, como é considerado a seguir.

### forma analítica do enunciado de Kelvin–Planck

► De acordo com o enunciado de Kelvin–Planck, um sistema percorrendo um ciclo enquanto se comunica termicamente com um único reservatório *não pode* fornecer uma quantidade líquida de trabalho para a sua vizinhança. O trabalho líquido do ciclo *não pode* ser positivo. Porém, o enunciado de Kelvin–Planck não exclui a possibilidade de que exista uma transferência líquida de energia sob a forma de trabalho *para* o sistema durante o ciclo ou de que o trabalho líquido seja zero. Assim, a forma analítica do enunciado de Kelvin–Planck é

$$W_{\text{ciclo}} \leq 0 \quad (\text{reservatório único}) \quad (5.1)$$

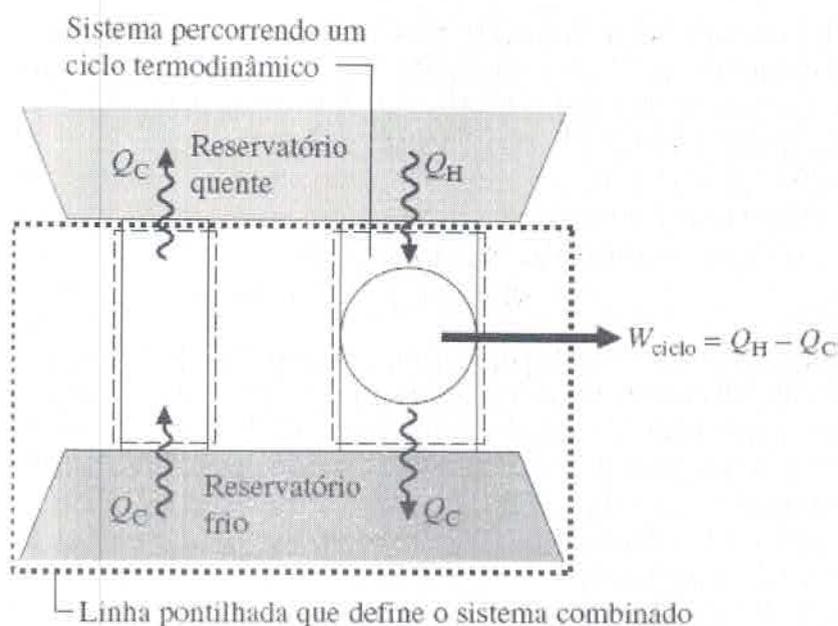
em que as palavras *reservatório único* são adicionadas para enfatizar que o sistema se comunica termicamente com um único reservatório conforme executa o ciclo. Na Seção 5.4 associamos os sinais “menor que” e “igual a” da Eq. 5.1 com a presença e a ausência de *irreversibilidades internas*, respectivamente. O conceito de irreversibilidade é considerado na Seção 5.3.

A equivalência entre os enunciados de Clausius e Kelvin–Planck pode ser demonstrada pela verificação de que a violação de cada enunciado implica na violação do outro. Para detalhes, veja o boxe.

### Demonstrando a Equivalência entre os Enunciados de Clausius e Kelvin–Planck

A equivalência entre os enunciados de Clausius e Kelvin–Planck é demonstrada pela verificação de que a violação de cada enunciado implica na violação do outro. O fato de que a violação do enunciado de Clausius implica na violação do enunciado de Kelvin–Planck é prontamente mostrado usando a Fig. 5.2, que apresenta um reservatório quente, um reservatório frio e dois sistemas. O sistema à esquerda transfere a energia  $Q_C$  do reservatório frio para o reservatório quente por transferência de calor sem a ocorrência de outros efeitos, violando assim o enunciado de Clausius. O sistema à direita opera em um ciclo recebendo  $Q_H$  (maior do que  $Q_C$ ) do reservatório quente, rejeitando  $Q_C$  para o reservatório frio e fornecendo trabalho  $W_{\text{ciclo}}$  para a vizinhança. Os fluxos de energia indicados na Fig. 5.2 ocorrem nos sentidos indicados pelas setas.

Considere o sistema *combinado* indicado pela linha pontilhada na Fig. 5.2, o qual consiste no reservatório frio e nos dois dispositivos. Podemos considerar que o sistema combinado executa um ciclo porque uma parte percorre um ciclo e as outras duas partes não sofrem variações líquidas em suas condições. Além disso, o sistema combinado recebe energia  $(Q_H - Q_C)$  por transferência de calor de um único reservatório, o reservatório quente, e produz uma quantidade equivalente de trabalho. Consequentemente, o sistema combinado viola o enunciado de Kelvin–Planck. Assim, uma violação do enunciado de Clausius implica a violação do enunciado de Kelvin–Planck. A equivalência entre os dois enunciados da segunda lei é demonstrada completamente quando também se mostra que uma violação do enunciado de Kelvin–Planck implica a violação do enunciado de Clausius. Isso é proposto como um exercício (veja o Problema 5.1, no final do capítulo).



**Fig. 5.2** Ilustração utilizada para demonstrar a equivalência entre os enunciados da segunda lei de Clausius e Kelvin–Planck.

### 5.2.3 Enunciado da Entropia da Segunda Lei

Massa e energia são exemplos familiares de propriedades extensivas de sistemas. A entropia é outra propriedade extensiva importante. Mostramos como a entropia é avaliada e aplicada nas análises de engenharia no Cap. 6, e aqui apresentamos diversos aspectos importantes.

Assim como a massa e a energia são *contabilizadas* nos balanços de massa e de energia, respectivamente, a entropia é contabilizada no *balanço de entropia*. Resumindo, o balanço de entropia estabelece:

$$\left[ \begin{array}{c} \text{variação da quantidade} \\ \text{de entropia contida} \\ \text{no sistema durante} \\ \text{um certo intervalo} \\ \text{de tempo} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} \text{quantidade líquida} \\ \text{de entropia transferida} \\ \text{para dentro através da} \\ \text{fronteira do sistema} \\ \text{durante o intervalo} \\ \text{de tempo} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{c} \text{quantidade de entropia} \\ \text{produzida no interior} \\ \text{do sistema durante o} \\ \text{intervalo de tempo} \end{array} \right] \quad (5.2)$$

Da mesma maneira que massa e energia, a entropia pode ser transferida através da fronteira do sistema. Para sistemas fechados há um único modo para a transferência de entropia — ou seja, a transferência de entropia acompanha a transferência de calor. Para volumes de controle a entropia também é transferida para dentro e para fora através de fluxos de matéria. Essas transferências de entropia são consideradas mais adiante, no Cap. 6.

### enunciado da entropia da segunda lei

Ao contrário da massa e da energia, que se conservam, a entropia é produzida (ou gerada) no interior de sistemas sempre que estão presentes condições *não ideais* (chamadas *irreversibilidades*), como o atrito. O enunciado da entropia da segunda lei estabelece:

***É impossível para qualquer sistema operar de uma maneira que a entropia seja destruída.***

Segue que o termo de produção de entropia da Eq. 5.2 pode ser positivo ou nulo, mas *nunca* negativo. Assim, a produção de entropia indica se um processo é possível ou impossível.

### 5.2.4 Resumo da Segunda Lei

No restante deste capítulo aplicamos o enunciado de Kelvin–Planck da segunda lei para tirar conclusões sobre sistemas que percorrem ciclos termodinâmicos. O capítulo termina com uma discussão relativa à *desigualdade de Clausius* (Seção 5.11), que fornece a base para o desenvolvimento do conceito de entropia do Cap. 6. Essa é uma abordagem tradicional da segunda lei na termodinâmica aplicada à engenharia. Entretanto, a ordem pode ser invertida — ou seja, o enunciado da entropia pode ser adotado como ponto de partida para o estudo dos aspectos da segunda lei para sistemas. O quadro a seguir fornece um caminho alternativo para a segunda lei, tanto para professores quanto para estudantes.

#### Rota Alternativa para a Segunda Lei

- ▶ Examine a Seção 5.3, omitindo a Seção 5.3.2.
- ▶ Leia atentamente a discussão na Seção 6.7 até a Seção 6.7.2 para o balanço de entropia de um sistema fechado, considerando a Eq. 6.24. Omita o boxê que segue após a Eq. 6.25.
- ▶ Reavalie a Seção 6.1, iniciando com a Eq. 6.2a. Observação: os dados de entropia necessários para aplicar o balanço de entropia são obtidos, em princípio, utilizando a Eq. 6.2a, que é um caso particular da Eq. 6.24.
- ▶ Leia as Seções 6.2 até 6.5.
- ▶ Leia a Seção 6.6, omitindo a Seção 6.6.2.
- ▶ Examine as Seções 6.7.3 e 6.7.4.
- ▶ Finalize com as Seções 6.9 a 6.12.

Utilizando o balanço de entropia como principal formulação para a Segunda Lei da Termodinâmica, a formulação de Kelvin–Planck é uma consequência natural, como expressada na Seção 5.4. Entre os materiais suplementares, há um

item relacionado à demonstração da equivalência das formulações de Kelvin-Planck e da entropia.

Após as considerações sobre o balanço de entropia, leia as Seções 5.5 até 5.10, Seção 6.6.2 e Seção 6.13. Esta estrutura é importante para o estudo dos ciclos termodinâmicos nos Capítulos 8 a 10.

## 5.3 Processos Reversíveis e Irreversíveis

Um dos usos mais importantes da segunda lei da termodinâmica em engenharia é a determinação do melhor desempenho teórico dos sistemas. Com a comparação do desempenho real com o melhor desempenho teórico o potencial para melhorias é frequentemente vislumbrado. Como se pode desconfiar, o melhor desempenho é avaliado em termos de processos idealizados. Nesta seção processos idealizados são apresentados e distinguidos dos processos reais que invariavelmente envolvem *irreversibilidades*.

### 5.3.1 Processos Irreversíveis

**processo irreversível**

**processo reversível**

Um processo é chamado de irreversível se o sistema e todas as partes que compõem sua vizinhança não puderem ser restabelecidos exatamente aos seus respectivos estados iniciais após o processo ter ocorrido. Um processo é reversível se tanto o sistema quanto sua vizinhança puderem retornar aos seus estados iniciais. Os processos irreversíveis são o assunto da presente discussão. Os processos reversíveis serão considerados novamente mais tarde, na Seção 5.3.3.

Um sistema que passou por um processo irreversível não está necessariamente impedido de voltar ao seu estado inicial. Entretanto, tendo o sistema retornado ao seu estado original não seria possível fazer com que a vizinhança retornasse também ao estado em que se encontrava originalmente. Conforme ilustrado na Seção 5.3.2, a segunda lei pode ser usada para determinar se tanto o sistema quanto a vizinhança podem retornar aos seus estados iniciais após um processo ter ocorrido. A segunda lei pode ser usada para determinar se um dado processo é reversível ou irreversível.

Da discussão do enunciado de Clausius da segunda lei deve estar claro que qualquer processo envolvendo uma transferência de calor espontânea de um corpo mais quente para um corpo mais frio é irreversível. Caso contrário seria possível retornar essa energia do corpo mais frio para o corpo mais quente sem nenhum outro efeito dentro dos dois corpos ou em sua vizinhança. Entretanto, essa possibilidade é negada pelo enunciado de Clausius.

Os processos que envolvem outros tipos de eventos espontâneos, como a expansão não resistida de um gás ou líquido, são também irreversíveis. Atrito, resistência elétrica, histerese e deformação inelástica são exemplos de efeitos adicionais cuja presença durante um processo torna-o irreversível.

### **irreversibilidades**

Em resumo, processos irreversíveis normalmente incluem uma ou mais das seguintes irreversibilidades:

1. Transferência de calor através de uma diferença finita de temperatura
2. Expansão não resistida de um gás ou líquido até uma pressão mais baixa
3. Reação química espontânea
4. Mistura espontânea de matéria em estados ou composições diferentes

5. Atrito — atrito de rolamento, bem como atrito no escoamento de fluidos
6. Fluxo de corrente elétrica através de uma resistência
7. Magnetização ou polarização com histerese
8. Deformação inelástica

Embora essa lista não esteja completa, ela sugere que *todos os processos reais são irreversíveis*. Isto é, todos os processos envolvem efeitos como aqueles listados, seja um processo de ocorrência natural ou um envolvendo um dispositivo inventado, do mais simples mecanismo ao maior complexo industrial. O termo *irreversibilidade* é usado para identificar qualquer desses efeitos. A lista previamente fornecida engloba algumas das irreversibilidades que são comumente encontradas.

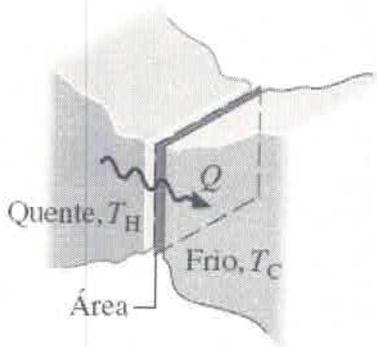
### **irreversibilidades internas e externas**

Conforme um sistema passa por um processo, podem ser encontradas irreversibilidades dentro do sistema, bem como em sua vizinhança, embora elas possam ser localizadas predominantemente em um local ou em outro. Para muitas análises é conveniente dividir as irreversibilidades presentes em duas classes. As irreversibilidades internas são aquelas que ocorrem dentro do sistema. As irreversibilidades externas são aquelas que ocorrem na vizinhança, frequentemente na vizinhança imediata. Como essa diferença depende apenas da localização da fronteira, existem algumas arbitrariedades na classificação, uma vez que estendendo-se a fronteira de modo a levar em conta parte da vizinhança todas as irreversibilidades tornam-se “internas”. Contudo, como mostrado nos desenvolvimentos posteriores, essa diferença entre irreversibilidades é frequentemente útil.

Os engenheiros deveriam estar aptos a reconhecer as irreversibilidades, avaliar sua influência e desenvolver meios práticos para reduzi-las. Contudo, certos sistemas, como freios, baseiam-se no efeito do atrito ou de outras irreversibilidades para a sua operação. A necessidade de alcançar taxas rentáveis de produção, altas taxas de transferência de calor, acelerações rápidas etc., invariavelmente dita a presença de irreversibilidades significativas.

Além disso, as irreversibilidades são toleradas em algum grau em todo tipo de sistema porque as modificações no projeto e a operação necessária para reduzi-las seriam demasiadamente caras. Consequentemente, embora a melhora do desempenho termodinâmico possa vir acompanhada da redução de irreversibilidades, os passos tomados nesse sentido são restringidos por vários fatores práticos frequentemente relacionados a custos.

► POR EXEMPLO considere dois corpos com temperaturas diferentes capazes de se comunicar termicamente. Havendo uma diferença *finita* de temperatura entre eles, ocorreria uma transferência de calor espontânea e, conforme discutido anteriormente, isso seria uma fonte de irreversibilidade. Poder-se-ia esperar que a importância dessa irreversibilidade diminuísse conforme a diferença de temperatura entre os corpos diminuísse, e enquanto esse *for o caso*, há consequências práticas. Do estudo da transferência de calor (Seção 2.4), sabemos que a transferência de uma quantidade finita de energia por transferência de calor entre corpos cujas temperaturas difiram entre si apenas levemente necessita de uma quantidade considerável de tempo, uma grande área superficial de transferência de calor (maior custo), ou ambos. No limite, conforme a diferença de temperatura entre os corpos desaparece, a quantidade de tempo e/ou área superficial necessária tende ao infinito. Essas opções são claramente inviáveis; mas ainda assim devem ser imaginadas quando se pensa em um processo de transferência de calor que se aproxima da reversibilidade.



### 5.3.2 Demonstrando a Irreversibilidade

Sempre que uma irreversibilidade está presente durante um processo, esse processo deve necessariamente ser irreversível. Porém, a irreversibilidade do processo pode ser rigorosamente *demonstrada* usando-se o enunciado de Kelvin–Planck da segunda lei e o seguinte procedimento: (1) Admita que há uma maneira de retornar o sistema e a vizinhança aos seus respectivos estados iniciais. (2) Mostre que, como consequência dessa hipótese, é possível imaginar um ciclo que viola o enunciado de Kelvin–Planck – ou seja, um ciclo que produz trabalho enquanto interage termicamente com um único reservatório. Uma vez que a existência desse ciclo é negada pelo enunciado de Kelvin–Planck, a hipótese deve estar errada, e segue-se que o processo é irreversível.

Essa abordagem pode ser usada para demonstrar que processos que envolvem atrito, transferência de calor através de uma diferença finita de temperatura, expansão não resistida de um gás ou líquido até uma pressão mais baixa e outros efeitos presentes na lista apresentada anteriormente são irreversíveis. Um caso envolvendo atrito é discutido no box adiante.

Embora o uso do enunciado de Kelvin–Planck para demonstrar irreversibilidade seja parte de uma apresentação tradicional da termodinâmica, essas demonstrações podem ser complicadas. Normalmente é mais fácil utilizar o conceito de *geração de entropia* (Seção 6.7).

#### Demonstrando a Irreversibilidade: Atrito

Vamos utilizar o enunciado de Kelvin–Planck para demonstrar a 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 por fim o repouso em uma altura mais baixa. Não há transferência de trabalho ou calor significativa entre o sistema bloco-plano e sua vizinhança durante o processo.

Aplicando o balanço de energia para sistemas fechados ao sistema, obtemos

$$(U_f - U_i) + mg(z_f - z_i) + (E_{C_f} - E_{C_i})^0 = Q^0 - W^0$$

ou

$$U_f - U_i = mg(z_i - z_f) \tag{a}$$

em que  $U$  indica a energia interna do sistema bloco-plano e  $z$  é a elevação do bloco. Assim, o atrito entre o bloco e o plano durante o processo atua convertendo o decréscimo na energia potencial do bloco em energia interna do sistema global.

Como não há trabalho ou interações de calor entre o sistema bloco-plano e a sua vizinhança, a condição da vizinhança permanece imutável durante o processo. Isso permite que observemos apenas o sistema para a demonstração de que o processo é irreversível, como se segue:

Quando o bloco está em repouso após deslizar pelo plano, a sua elevação é  $z_f$  e a energia interna do sistema bloco-plano é  $U_f$ . De maneira a demonstrar que o processo é irreversível usando o enunciado de Kelvin–Planck, vamos tomar essa condição do sistema mostrado na Fig. 5.3a como o estado inicial de um ciclo composto por três processos. Imaginemos que o arranjo cabo-polia e um reservatório térmico estejam disponíveis para auxiliar na demonstração.

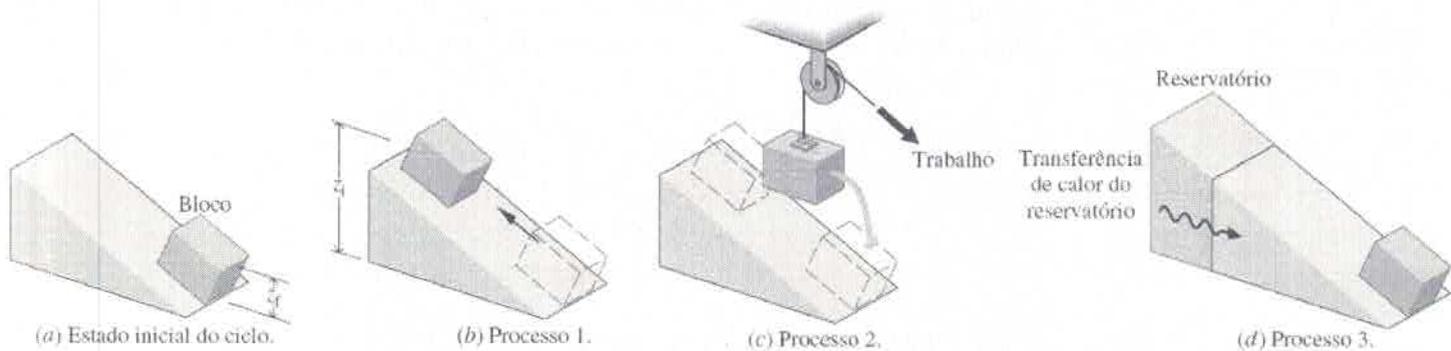
**Processo 1:** Admita que o processo inverso ocorra sem nenhuma mudança na vizinhança. Conforme ilustrado na Fig. 5.3b, o bloco retorna *espontaneamente* ao topo do plano enquanto a energia interna do sistema decresce até o seu valor inicial,  $U_i$ . (Esse é o processo que queremos demonstrar ser impossível.)

**Processo 2:** Como ilustrado na Fig. 5.3c, nós usamos o arranjo cabo-polia fornecido para baixar o bloco de  $z_i$  até  $z_f$ , permitindo que o sistema bloco-plano realizasse trabalho pela elevação de outra massa localizada na vizinhança. O trabalho realizado é igual ao decréscimo de energia potencial do bloco. Esse é o único trabalho para o ciclo. Assim,  $W_{\text{ciclo}} = mg(z_i - z_f)$ .

**Processo 3:** A energia interna do sistema pode ser aumentada de  $U_i$  até  $U_f$  colocando-o em contato com o reservatório, como ilustrado na Fig. 5.3d. A transferência de calor é igual a  $(U_f - U_i)$ . Essa é a única transferência de calor para o ciclo. Assim,  $Q_{\text{ciclo}} = (U_f - U_i)$ , que com a Eq. (a) torna-se  $Q_{\text{ciclo}} = mg(z_i - z_f)$ . Ao final desse processo o bloco está novamente na altura  $z_f$  e a energia interna do sistema bloco-plano é restabelecida para  $U_f$ .

O resultado líquido desse ciclo é o de extrair energia de um único reservatório por transferência de calor,  $Q_{\text{ciclo}}$ , e produzir uma quantidade equivalente de trabalho,  $W_{\text{ciclo}}$ . Não existem 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.

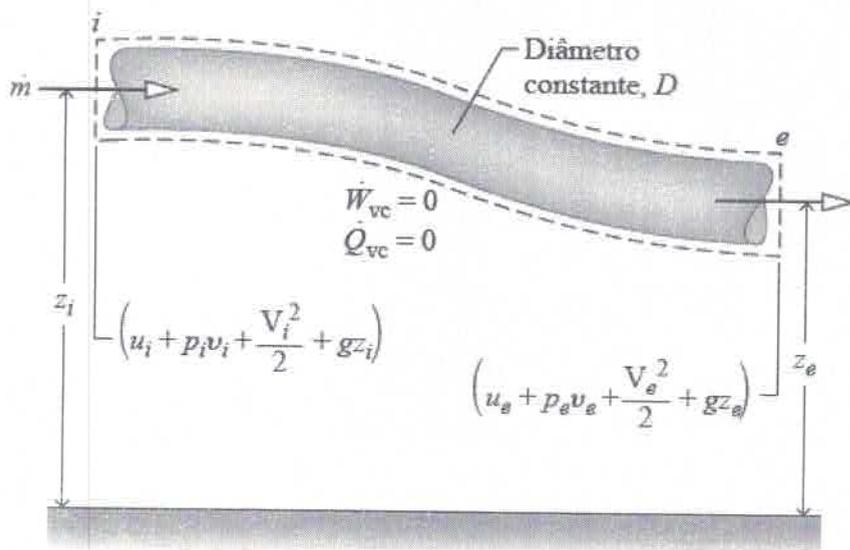
Resumindo, o efeito de atrito neste caso é uma conversão *irreversível* de energia potencial (uma forma de *energia mecânica*) para energia interna (Seção 2.1).



**Fig. 5.3** Figura usada para demonstrar a irreversibilidade de um processo envolvendo atrito.

#### Atrito em Tubulações

O atrito entre superfícies sólidas é algo comum, que pode ser verificado diariamente em situações cotidianas diversas. O atrito no escoamento de fluidos tem efeitos físicos semelhantes. Esse atrito tem um papel importante na expansão de gases em turbinas, em líquidos fluindo através de bombas e sistemas de tubulações e em uma ampla variedade de aplicações.



Como introdução, podemos observar a discussão sobre atrito no boxe anterior considerando um volume de controle em regime permanente em torno de uma tubulação de diâmetro constante por onde escoar um líquido. Dentro do volume de controle,  $\dot{W}_{vc} = 0$  e a transferência de calor entre a tubulação e as vizinhanças é desprezível. Da mesma forma que anteriormente, o presente caso também exibe uma conversão irreversível de energia mecânica em energia interna devido ao atrito.

Utilizando esses pressupostos, o balanço da taxa de energia dado pela Eq. 4.13 se reduz a:

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \dot{m} \left( u_i + p_i v_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right) - \dot{m} \left( u_e + p_e v_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) \quad (a)$$

em que  $\dot{m}$  representa o fluxo de massa nos pontos de entrada (i) e saída (e).

Rearranjando a equação e simplificando os termos relacionados com o fluxo de massa, a equação anterior assume a forma:

$$\frac{\left( p_i v_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right) - \left( p_e v_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right)}{\text{diminuição de energia mecânica}} = \frac{(u_e - u_i)}{\text{aumento de energia interna}} \quad (b)$$

Cada termo na Eq. (b) encontra-se em unidades por unidade de massa. Os termos  $pv$  contabilizam a transferência de energia pela realização de trabalho na entrada e na saída, associado à pressão do material que flui nesses pontos. Esta forma de trabalho é chamada *trabalho de fluxo* (ou de escoamento) na Seção 4.4.2. Os termos de energia cinética e potencial, associados a  $V^2/2$  e  $gz$ , respectivamente, representam formas de energia mecânica associadas ao fluxo de matéria também nos pontos de entrada e saída. Para simplificar a compreensão das formas de energia descritas na equação, essas três quantidades são tratadas aqui como formas de *energia mecânica*. Termos designados por  $u$  representam a energia interna associada ao fluxo de matéria entre os pontos de entrada e saída.

A experiência indica que a energia mecânica tem um maior valor termodinâmico que a energia interna, e o efeito do atrito à medida que a matéria escoar da entrada para a saída em um sistema é uma conversão *irreversível* de energia mecânica em energia interna. Essas observações são alguns dos aspectos qualitativos da segunda lei.

Adicionalmente, como mostrado na Eq. (b), a diminuição da energia mecânica é compatível com um aumento na energia interna e, portanto, a energia é conservada se analisada como a soma de todas as formas de energia envolvidas.

Para um líquido que assume um volume específico constante  $v$ , o balanço da taxa de massa requer que a velocidade,  $V$ , seja constante através do sistema (de diâmetro constante). Com isso, a Eq. (b) assume a forma

$$\frac{v(p_i - p_e) + g(z_i - z_e)}{\text{diminuição de energia mecânica}} = \frac{(u_e - u_i)}{\text{aumento de energia interna}} \quad (c)$$

Finalmente, para o sistema simplificado formado pelo tubo de diâmetro constante, o papel do atrito é explicitado pela diminuição na energia mecânica do sistema em termos da energia cinética específica da substância sob escoamento,  $V^2/2$ , e do tamanho do tubo. Ou seja:

$$v(p_i - p_e) + g(z_i - z_e) = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2} \quad (d)$$

### fator de atrito

em que  $D$  é o diâmetro interno do tubo,  $L$  é o comprimento e  $f$  é um parâmetro adimensional experimentalmente determinado, chamado de fator de atrito.

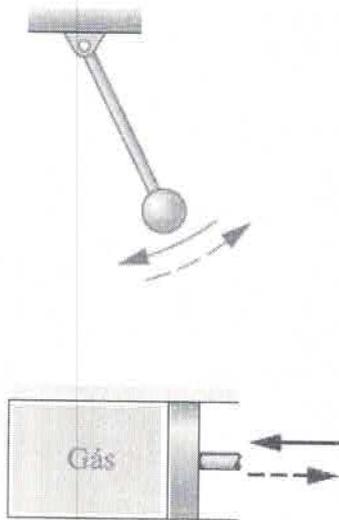
A Eq. (d) é o ponto de partida para aplicações envolvendo atrito em tubos de diâmetro constante pelos quais escoam substâncias incompressíveis. Veja o Problema 5.10D para uma aplicação destes conceitos.

### 5.3.3 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 da discussão sobre processos irreversíveis 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 líquido, atrito ou qualquer uma das outras irreversibilidades listadas anteriormente pode ser reversível. No sentido estrito da palavra, um processo reversível é aquele que é executado de *uma forma perfeita*.

Todos os processos reais são irreversíveis. Processos reversíveis não ocorrem. Mesmo assim, certos processos que realmente acontecem são aproximadamente reversíveis. A passagem de um gás através de um bocal ou difusor adequadamente projetado é um exemplo (Seção 6.12). Muitos outros dispositivos também podem ser construídos de modo a aproximarem-se de uma operação reversível através de medidas para reduzir a importância das irreversibilidades, como a lubrificação das superfícies para redução do atrito. Um processo reversível é um *caso-limite* à medida que as irreversibilidades, tanto internas quanto externas, são cada vez mais reduzidas.

Embora processos reversíveis não possam ocorrer de fato, eles podem ser imaginados. Foi considerado, na Seção 5.3.1, como a transferência de calor se aproxima da reversibilidade à medida que a diferença de temperatura se aproxima de zero. Vamos considerar dois exemplos adicionais:



► Um exemplo particularmente elementar é o do pêndulo oscilando em um espaço em vácuo. O movimento do pêndulo aproxima-se da reversibilidade à medida que o atrito no pivô é reduzido. No limite, quando o atrito fosse eliminado os estados do pêndulo e de sua vizinhança seriam completamente recuperados ao final de cada período de movimento. Por definição, o processo é reversível.

► Um sistema consistindo em um gás comprimido adiabaticamente e expandido em um conjunto cilindro-pistão fornece um outro exemplo. Com um aumento muito pequeno na pressão externa o pistão comprimiria levemente o gás. Em cada volume intermediário durante a compressão as propriedades intensivas  $T$ ,  $p$ ,  $v$  etc. seriam no geral uniformes: o gás passaria por uma série de estados de equilíbrio. Com uma pequena diminuição da pressão externa o pistão se moveria lentamente para fora, à medida que o gás se expandisse. Em cada volume intermediário da expansão as propriedades intensivas do gás teriam os mesmos valores uniformes que elas tinham no passo correspondente durante a compressão. Quando o volume de gás retornasse ao seu estado inicial todas as propriedades seriam também restituídas ao seu estado inicial. O trabalho executado *sobre* o gás durante a compressão seria igual ao trabalho realizado *pelo* gás durante a expansão. Se o trabalho ocorrido entre o sistema e sua vizinhança fosse fornecido a, e recebido de, um conjunto massa-polia sem atrito, ou equivalente, não haveria, também, variação líquida alguma na vizinhança. Esse processo seria reversível.



## HORIZONTES

### Segunda Lei Leva Grande Mordida do Hidrogênio

O hidrogênio não ocorre de modo natural, ele tem que ser produzido. Atualmente o hidrogênio pode ser produzido a partir da água por *eletrólise* e do gás natural por um processo químico denominado reforma (*reforming*). O hidrogênio produzido por esses meios e sua posterior utilização é um peso para a segunda lei.

Em eletrólise, é empregada uma corrente elétrica para dissociar o hidrogênio da água de acordo com  $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2$ . Quando o hidrogênio é posteriormente usado pela célula de combustível para gerar eletricidade, a reação na célula é:  $\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ . Embora a reação na célula seja o inverso do que está ocorrendo na eletrólise, o ciclo global entrada elétrica–hidrogênio–eletricidade gerada por célula de combustível *não* é reversível. As irreversibilidades relativas ao eletrolizador e à célula de combustível agem em conjunto para assegurar que a eletricidade gerada pela célula de combustível seja muito menor do que a entrada elétrica inicial. Alguns dizem que é um desperdício, pois a eletricidade fornecida pela eletrólise poderia, em vez disso, ser *completamente* dirigida para a maioria das aplicações previstas para o hidrogênio, inclusive transporte. Além disso, quando combustível fóssil é queimado em uma usina para gerar eletricidade para eletrólise os gases estufa produzidos podem ser associados às células de combustíveis em virtude do hidrogênio que elas consomem. Embora detalhes técnicos difiram, resultados

similares apontam para o processo de reforma do gás natural para o hidrogênio.

Enquanto se espera que o hidrogênio e as células de combustível exerçam um papel em nossa energia do futuro, as barreiras da segunda lei e de outros assuntos técnicos e econômicos continuam de pé.

### 5.3.4 Processos Internamente Reversíveis

#### processo internamente reversível

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

► POR EXEMPLO pense em água se condensando, indo de vapor saturado a líquido saturado a 100°C, enquanto escoar por um tubo de cobre, cuja superfície externa está exposta ao ambiente, a 20°C. A água passa por um processo internamente reversível, mas há transferência de calor da água para o ambiente através do tubo. Para o volume de controle que engloba a água no interior do tubo, a transferência de calor é uma irreversibilidade *externa*.

#### TOME NOTA...

Os termos processo *internamente* reversível e processo *em quase equilíbrio* podem ser usados alternadamente. Entretanto, para evitar a utilização de dois termos que se referem à mesma situação, nas seções posteriores nos referiremos a quaisquer desses processos como processos internamente reversíveis.

Em cada estado intermediário de um processo internamente reversível em um sistema fechado todas as propriedades intensivas são uniformes ao longo de cada fase presente. Isto é, temperatura, pressão, volume específico e outras propriedades intensivas não variam com a posição. Se houvesse uma variação espacial na temperatura, por exemplo, existiria uma tendência a ocorrer uma transferência espontânea de energia por condução *dentro* do sistema no sentido decrescente da temperatura. Para a reversibilidade, contudo, nenhum processo espontâneo pode estar presente. A partir dessas considerações pode-se concluir que o processo internamente reversível consiste em uma série de estados de equilíbrio: é um processo em quase equilíbrio.

O uso do conceito de um processo internamente reversível em termodinâmica é comparável às idealizações feitas na mecânica: massas pontuais, polias sem atrito, vigas rígidas e assim por diante. Da mesma maneira que essas idealizações são usadas na mecânica para simplificar uma análise e chegar-se a um modelo tratável, modelos termodinâmicos simples para situações complexas podem ser obtidos com a utilização de processos internamente reversíveis. Os cálculos baseados em processos internamente reversíveis frequentemente podem ser ajustados através de eficiências ou fatores de correção, de modo a obter estimativas razoáveis do desempenho real sob várias condições de operação. Os processos internamente reversíveis também são úteis na investigação do melhor desempenho termodinâmico dos sistemas.

Finalmente, empregando o conceito de processo internamente reversível refinamos a definição de reservatório térmico apresentada na Seção 5.2.2 como a seguir: nas discussões posteriores supomos que não estão presentes irreversibilidades internas em um reservatório térmico. Assim, todo processo em um reservatório térmico é *internamente reversível*.

## 5.4 Interpretando o Enunciado de Kelvin–Planck

Nesta seção, vamos reformular a Eq. 5.1, a forma analítica do enunciado de Kelvin–Planck, para uma expressão mais explícita, a Eq. 5.3. Essa expressão é aplicada nas seções posteriores para obter um número de deduções importantes. Nessas aplicações as seguintes idealizações são admitidas: o reservatório térmico e a porção da vizinhança com a qual as interações de trabalho ocorrem estão livres de irreversibilidades. Isso permite que o sinal “menor do que”

seja associado às irreversibilidades *dentro* do sistema de interesse e que o sinal “igual a” seja empregado quando as irreversibilidades internas não estão presentes.

### forma analítica do enunciado de Kelvin–Planck

Consequentemente, a forma analítica do enunciado de Kelvin–Planck agora toma a forma

$$W_{\text{ciclo}} \leq 0 \begin{cases} < 0: & \text{Presença de irreversibilidades internas.} \\ = 0: & \text{Ausência de irreversibilidades internas.} \end{cases} \text{ (reservatório único)} \quad (5.3)$$

Para detalhes, veja o boxe a seguir.

### Associando Sinais ao Enunciado de Kelvin–Planck

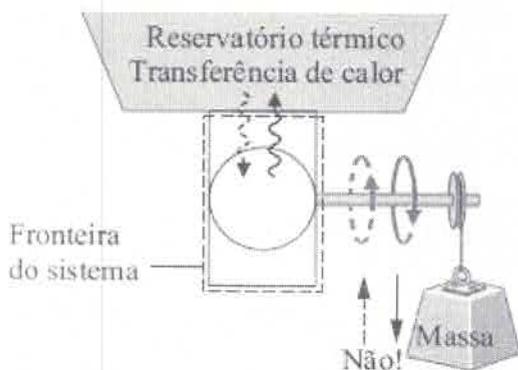
Considere um sistema que passa por um ciclo enquanto troca energia por transferência de calor com um único reservatório, como ilustrado na Fig. 5.4. Trabalho é fornecido a, ou recebido de, um conjunto massa–polia localizado na vizinhança. Um volante, mola ou algum outro dispositivo também pode realizar a mesma função. O conjunto massa–polia, o volante ou outro dispositivo ao qual é fornecido trabalho, ou do qual é recebido, é idealizado como livre de irreversibilidades. Supõe-se que o reservatório térmico também seja livre de irreversibilidades.

Para demonstrar a relação do sinal de “igual a” da Eq. 5.3 com a ausência de irreversibilidades, considere um ciclo operando como ilustrado na Fig. 5.4 para o qual a igualdade se aplica. Ao final de um ciclo,

- ▶ O sistema retornaria necessariamente ao seu estado inicial.
- ▶ Como  $W_{\text{ciclo}} = 0$ , não haveria variação *líquida* na altura da massa usada para armazenar energia na vizinhança.
- ▶ Como  $W_{\text{ciclo}} = Q_{\text{ciclo}}$ , segue-se que  $Q_{\text{ciclo}} = 0$ , de forma que também não haveria variação *líquida* na condição do reservatório.

Desse modo, o sistema e todos os elementos de sua vizinhança seriam restituídos exatamente a suas respectivas condições iniciais. Por definição, o ciclo é reversível. Consequentemente, não pode haver irreversibilidades presentes dentro do sistema ou em sua vizinhança. Deixa-se como um exercício mostrar o inverso: se o ciclo ocorrer reversivelmente, a igualdade se aplica (veja o Problema 5.4, no final do capítulo).

Uma vez que um ciclo é reversível *ou* irreversível e nós vinculamos a igualdade com os ciclos reversíveis, concluímos que a desigualdade implica na presença de irreversibilidades internas. Além disso, a desigualdade pode ser interpretada como se segue: o trabalho líquido realizado *sobre* o sistema, por ciclo, é convertido pela ação das irreversibilidades internas em energia interna, que é descarregada por transferência de calor ao reservatório térmico em uma quantidade igual de trabalho líquido.



**Fig. 5.4** Sistema percorrendo um ciclo enquanto troca energia por transferência de calor com um único reservatório térmico.

### Conclusão – Comentário

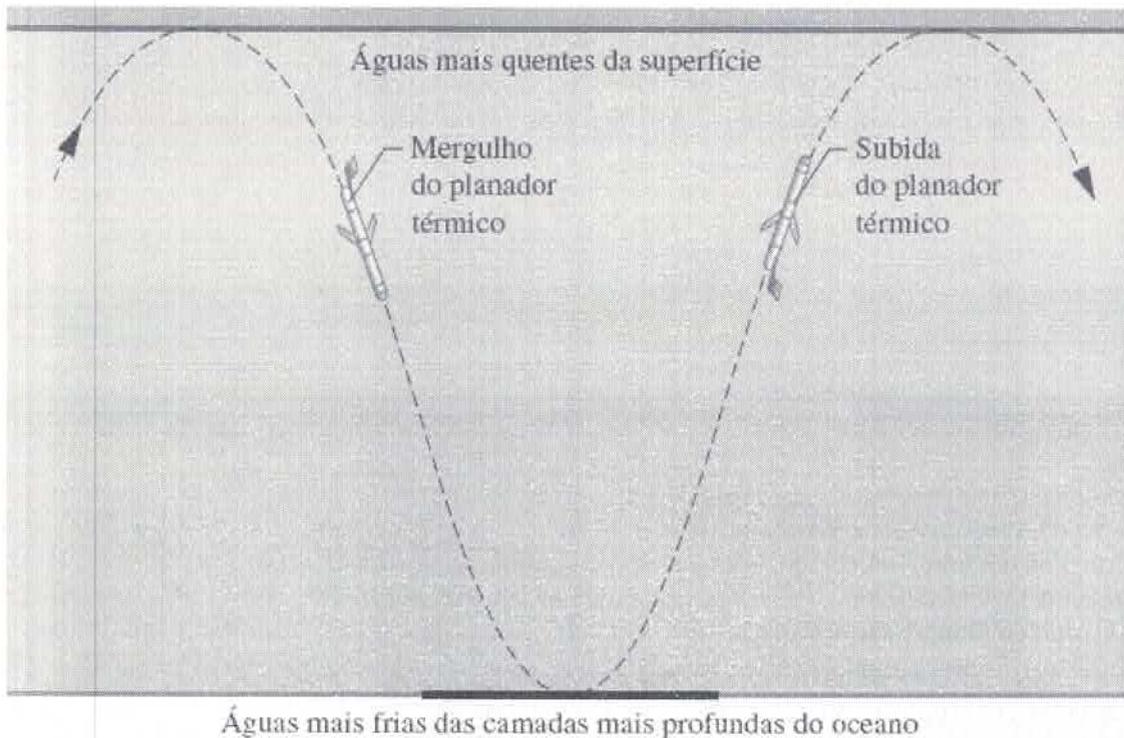
O enunciado de Kelvin–Planck considera sistemas que percorrem ciclos *termodinâmicos* enquanto trocam energia por transferência de calor com *um* reservatório térmico. Essas restrições devem ser rigorosamente observadas (veja o boxe a seguir).

### O Planador Térmico Contraria o Enunciado de Kelvin–Planck?

Em 2008, um comunicado do *Instituto Oceanográfico Woods Hole* à imprensa, “Pesquisadores fazem o primeiro *test-drive* no oceano do Novo Veículo Híbrido”, anunciou o sucesso do teste de um *planador térmico* submarino que “colhe... energia do oceano (termicamente) para se movimentar”. Esse veículo submarino contraria o enunciado de Kelvin-Planck da segunda lei?

O estudo do planador térmico mostra que ele é capaz de sustentar o movimento subaquático por semanas enquanto interage termicamente apenas com o oceano e percorre um ciclo *mecânico*. Ainda assim, o planador não representa um desafio com relação ao enunciado de Kelvin-Planck, uma vez que não troca energia por transferência de calor com um *único* reservatório térmico e não executa um ciclo *termodinâmico*.

A propulsão do planador é alcançada a partir da interação térmica das águas mais quentes com as águas mais frias das camadas profundas do oceano para alterar sua flutuabilidade permitindo que este mergulhe, suba em direção à superfície e mergulhe novamente, conforme ilustrado na figura correspondente. Consequentemente, o planador não interage termicamente com um *único* reservatório térmico conforme requerido pelo enunciado de Kelvin-Planck. O planador também não satisfaz todas as necessidades de energia por meio da interação com o oceano: necessita-se de baterias para os sistemas eletrônicos. Embora essas necessidades de energia sejam relativamente menores, as baterias perdem carga com o uso, e assim o planador não executa um ciclo termodinâmico conforme requerido pelo enunciado de Kelvin-Planck.



## 5.5 Aplicando a Segunda Lei a Ciclos Termodinâmicos

Enquanto o enunciado de Kelvin–Planck da segunda lei (Eq. 5.3) fornece a base para o restante deste capítulo, aplicações da segunda lei relacionadas a ciclos termodinâmicos não estão limitadas ao caso da transferência de calor com um *único* reservatório ou mesmo com *quaisquer* reservatórios. Sistemas que percorrem ciclos enquanto interagem termicamente com *dois* reservatórios térmicos são considerados a partir do ponto de vista da segunda lei, nas Seções 5.6 e 5.7, fornecendo resultados com importantes aplicações. Além disso, as discussões relativas a um e dois reservatórios fornecem a base para a Seção 5.11, no qual o caso *geral* é considerado – ou seja, o que a segunda lei diz sobre *qualquer* ciclo termodinâmico sem levar em conta a natureza do corpo ou corpos com os quais a energia é trocada por meio de transferência de calor.

Nas seções a seguir, são consideradas aplicações da segunda lei relacionadas a ciclos de potência e ciclos de refrigeração e bomba de calor. Esse conteúdo necessita familiaridade com os ciclos termodinâmicos. Nós recomendamos que seja revista a Seção 2.6, na qual os ciclos são considerados sob uma perspectiva de energia e são apresentados a eficiência térmica dos ciclos de potência e coeficientes de desempenho para os sistemas de refrigeração e bomba de calor. Em particular, as Eqs. 2.40 a 2.48 e discussões correspondentes devem ser revistas.

## 5.6 Aspectos da Segunda Lei de Ciclos de Potência Interagindo com Dois Reservatórios

### 5.6.1 Limite da Eficiência Térmica

Uma limitação significativa no desempenho de sistemas percorrendo ciclos de potência pode ser mostrada utilizando-se o enunciado de Kelvin–Planck da segunda lei. Considere a Fig. 5.5, a qual mostra um sistema que executa um ciclo enquanto se comunica termicamente com *dois* reservatórios térmicos, um reservatório quente e um reservatório frio, e desenvolve o trabalho líquido  $W_{\text{ciclo}}$ . A eficiência térmica do ciclo é

$$\eta = \frac{W_{\text{ciclo}}}{Q_H} = 1 - \frac{Q_C}{Q_H} \quad (5.4)$$

em que  $Q_H$  é a quantidade de energia recebida pelo sistema do reservatório quente por transferência de calor, e  $Q_C$  é a quantidade de energia descarregada do sistema para o reservatório frio por transferência de calor.

Se o valor de  $Q_C$  fosse zero, o sistema da Fig. 5.5 retiraria energia  $Q_H$  do reservatório quente e produziria uma quantidade de trabalho igual, enquanto percorresse um ciclo. A eficiência térmica do ciclo corresponderia à unidade (100%). Porém, esse método de operação viola o enunciado de Kelvin–Planck e, portanto, não é permitido.

Segue-se que, para *qualquer* sistema executando um ciclo de potência enquanto opera entre dois reservatórios, somente uma parcela da transferência de calor  $Q_H$  pode ser obtida como trabalho, e a remanescente,  $Q_C$ , tem que ser descarregada por transferência de calor para o reservatório frio. Isto é, a eficiência térmica tem que ser menor do que 100%.

Para chegar a essa conclusão *não* foi necessário

- ▶ identificar a natureza da substância contida no sistema,
- ▶ especificar a série exata de processos que compõem o ciclo,
- ▶ indicar se os processos são processos reais ou de alguma maneira idealizados.

A conclusão de que a eficiência térmica tem que ser menor do que 100% se aplica a *todos* os ciclos de potência,

quaisquer que sejam os detalhes da operação. Isso pode ser considerado como um corolário da segunda lei. Outros corolários se seguem.

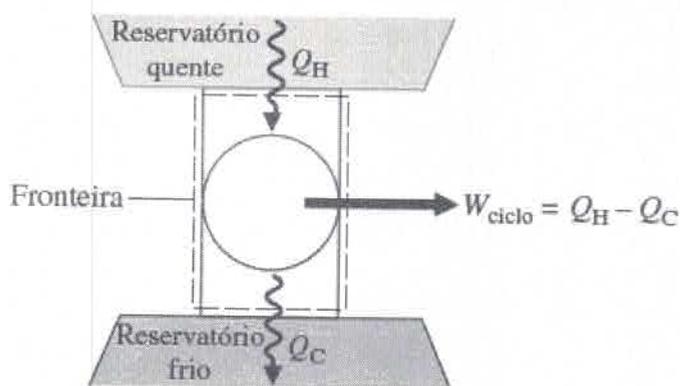


Fig. 5.5 Sistema percorrendo um ciclo de potência enquanto troca energia por transferência de calor com dois reservatórios.

### TOME NOTA...

A transferência de energia na Fig. 5.5 é positiva nas direções indicadas pelas setas.

## 5.6.2 Corolários da Segunda Lei para Ciclos de Potência

### corolários de Carnot

Considerando que nenhum ciclo de potência pode ter 100% de eficiência térmica, é de interesse investigar a eficiência teórica máxima. A eficiência teórica máxima para sistemas que percorrem ciclos de potência enquanto se comunicam termicamente com dois reservatórios térmicos a temperaturas diferentes é avaliada na Seção 5.9, com referência aos dois corolários seguintes da segunda lei, chamados 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 um opera entre os mesmos dois reservatórios térmicos.
2. Todos os ciclos de potência reversíveis operando entre os mesmos dois reservatórios térmicos têm a mesma eficiência térmica.

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

A ideia básica do primeiro corolário de Carnot está de acordo com o que se espera com base na discussão da segunda lei até agora — isto é, a presença de irreversibilidades durante a execução de um ciclo exige um preço, como esperado. Se dois sistemas operando entre os mesmos reservatórios recebem cada um a mesma quantidade de energia  $Q_H$  e um deles executa um ciclo reversível enquanto o outro executa um ciclo irreversível, é intuitivo que o trabalho líquido desenvolvido pelo ciclo irreversível será menor e assim o ciclo irreversível terá a menor eficiência térmica.

O segundo corolário de Carnot refere-se apenas a ciclos reversíveis. Todos os processos de um ciclo reversível são executados perfeitamente. Dessa maneira, se dois ciclos reversíveis operando entre os mesmos reservatórios recebessem cada um a mesma quantidade de energia  $Q_H$ , mas um deles pudesse produzir mais trabalho do que o outro, isso somente poderia resultar de uma seleção mais vantajosa da substância que compõe o sistema (podemos imaginar que, digamos, o ar pudesse ser melhor do que o vapor d'água) ou da série de processos que compõe o ciclo (processos sem escoamento poderiam ser preferíveis a processos com escoamento). Esse corolário nega ambas as possibilidades, e indica que os ciclos têm que ter a mesma eficiência quaisquer que sejam as escolhas para a substância de trabalho ou para a série de processos.

Os dois corolários de Carnot podem ser demonstrados usando-se o enunciado de Kelvin–Planck da segunda lei. Para detalhes, veja o boxe a seguir.

### Demonstrando os Corolários de Carnot

O primeiro corolário de Carnot pode ser demonstrado utilizando-se o arranjo da Fig. 5.6. Um ciclo de potência reversível R e um ciclo de potência irreversível I operam entre os mesmos dois reservatórios, e cada um recebe a mesma quantidade de energia  $Q_H$  do reservatório quente. O ciclo reversível produz o trabalho  $W_R$ , enquanto o ciclo irreversível produz o trabalho  $W_I$ . De acordo com o princípio da conservação de energia, cada ciclo descarrega energia no reservatório frio igual à diferença entre  $Q_H$  e o trabalho produzido. Deixemos agora R operar no sentido oposto como um ciclo de refrigeração (ou bomba de calor). Uma vez que R é reversível, as magnitudes das transferências de energia  $W_R$ ,  $Q_H$  e  $Q_C$  permanecem as mesmas, mas as transferências de energia são em sentidos opostos, como ilustrado pelas linhas pontilhadas na Fig. 5.6. Além disso, com R operando no sentido oposto o reservatório quente não experimentaria *variação líquida alguma* na sua condição, já que receberia  $Q_H$  de R enquanto passasse  $Q_H$  para I.

A demonstração do primeiro corolário de Carnot é completada considerando-se o sistema combinado mostrado pela linha pontilhada na Fig. 5.6, que consiste nos dois ciclos e no reservatório quente. Já que seus componentes executam ciclos ou não experimentam variação líquida alguma, o sistema combinado opera em um ciclo. Além disso, o sistema combinado troca energia por transferência de calor com um único reservatório: o reservatório frio. Assim, o sistema combinado tem que satisfazer à Eq. 5.3, expressa como

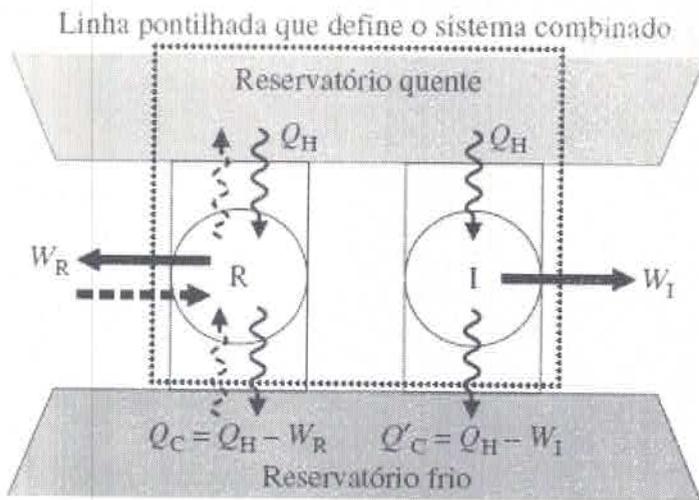
$$W_{\text{ciclo}} < 0 \quad (\text{reservatório único})$$

em que a desigualdade é usada porque o sistema combinado é irreversível em sua operação, já que o ciclo irreversível I é um de seus componentes. Avaliando-se  $W_{\text{ciclo}}$  para o sistema combinado em termos das quantidades de trabalho  $W_I$  e  $W_R$ , essa desigualdade torna-se

$$W_I - W_R < 0$$

a qual mostra que  $W_I$  tem que ser menor do que  $W_R$ . Como cada ciclo recebe a mesma entrada de energia,  $Q_H$ , segue-se que  $\eta_I < \eta_R$ , e isso completa a demonstração.

O segundo corolário de Carnot pode ser demonstrado, de maneira análoga, considerando-se dois ciclos reversíveis quaisquer,  $R_1$  e  $R_2$ , operando entre os mesmos dois reservatórios. Então, se deixarmos  $R_1$  desempenhar o papel de R e  $R_2$  o papel de I no desenvolvimento anterior, pode ser formado um sistema combinado composto pelos dois ciclos e o re-servatório quente que tem que obedecer à Eq. 5.3. Porém, ao aplicar-se a Eq. 5.3 a esse sistema combinado a igualdade é aplicada, porque o sistema é reversível em sua operação. Assim, pode-se concluir que  $W_{R1} = W_{R2}$ , e, consequentemente,  $\eta_{R1} = \eta_{R2}$ . Os detalhes são deixados como um exercício (veja o Problema 5.7, no final do capítulo).



**Fig. 5.6** Representação demonstrando que um ciclo reversível R é mais eficiente do que um ciclo irreversível I quando ambos operam entre os mesmos dois reservatórios.

## 5.7 Aspectos da Segunda Lei Relativos aos Ciclos de Refrigeração e Bomba de Calor Interagindo com Dois Reservatórios

### 5.7.1 Limites dos Coeficientes de Desempenho

A segunda lei da termodinâmica coloca limites no desempenho de ciclos de refrigeração e bombas de calor da mesma maneira que o faz para ciclos de potência. Considere a [Fig. 5.7](#), a qual mostra um sistema percorrendo um ciclo enquanto se comunica termicamente com dois reservatórios térmicos, um quente e o outro frio. As transferências de energia indicadas na figura estão nos sentidos indicados pelas setas. De acordo com o princípio da conservação de energia, o ciclo descarrega a energia  $Q_H$  por transferência de calor para o reservatório quente igual à soma da energia  $Q_C$ , recebida por transferência de calor do reservatório frio, com a entrada líquida de trabalho. Esse ciclo poderia ser um ciclo de refrigeração ou um ciclo de bomba de calor, dependendo se sua função é remover energia  $Q_C$  do reservatório frio ou fornecer energia  $Q_H$  para o reservatório quente.

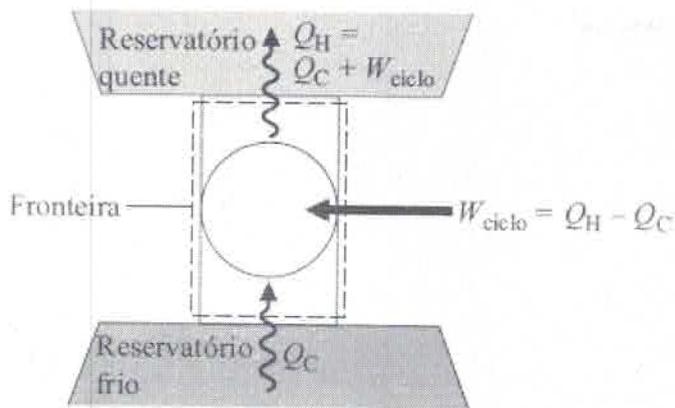
Para um ciclo de refrigeração, o coeficiente de desempenho é

$$\beta = \frac{Q_C}{W_{\text{ciclo}}} = \frac{Q_C}{Q_H - Q_C} \quad (5.5)$$

O coeficiente de desempenho para uma bomba de calor é

$$\gamma = \frac{Q_H}{W_{\text{ciclo}}} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_C} \quad (5.6)$$

Conforme o fornecimento líquido de trabalho  $W_{\text{ciclo}}$  para o ciclo tende a zero, os coeficientes de desempenho dados pelas Eqs. 5.5 e 5.6 aproximam-se de um valor infinito. Se  $W_{\text{ciclo}}$  fosse identicamente nulo, o sistema da [Fig. 5.7](#) retiraria a energia  $Q_C$  do reservatório frio e forneceria a energia  $Q_C$  ao reservatório quente, enquanto percorresse um ciclo. Entretanto, esse método de operação viola o enunciado de Clausius da segunda lei e, portanto, não é permitido. Segue-se que os coeficientes de desempenho  $\beta$  e  $\gamma$  têm que ter invariavelmente um valor finito. Isso pode ser considerado como outro corolário da segunda lei. Outros corolários são apresentados em seguida.



**Fig. 5.7** Sistema percorrendo um ciclo de refrigeração ou de bomba de calor enquanto troca energia por transferência de calor com dois reservatórios.

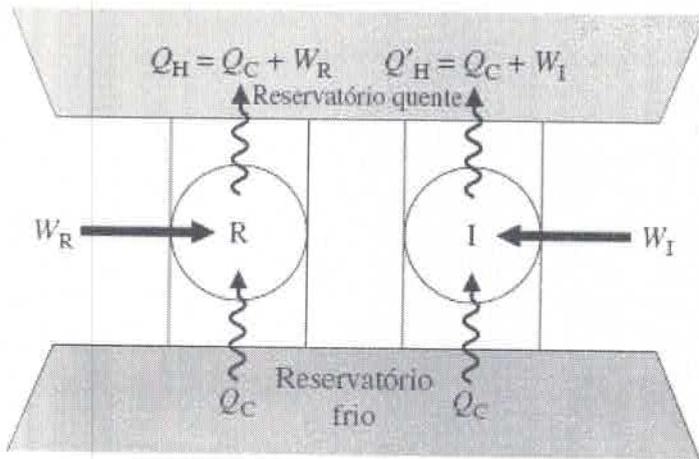
### 5.7.2 Corolários da Segunda Lei para Ciclos de Refrigeração e Bomba de Calor

Os coeficientes de desempenho teóricos máximos para sistemas que percorrem ciclos de refrigeração e bomba de calor, enquanto se comunicam termicamente com dois reservatórios a temperaturas diferentes, são avaliados na Seção 5.9 no que se refere aos seguintes corolários da segunda lei:

1. O coeficiente de desempenho de um ciclo de refrigeração irreversível é sempre menor do que o coeficiente de desempenho de um ciclo de refrigeração reversível quando cada um opera entre os mesmos dois reservatórios térmicos.
2. Todos os ciclos de refrigeração reversíveis operando entre os mesmos dois reservatórios térmicos têm o mesmo coeficiente de desempenho.

Substituindo o termo *refrigeração* por *bomba de calor*, obtemos corolários equivalentes para ciclos de bomba de calor.

O primeiro desses corolários está de acordo com as expectativas provenientes da discussão da segunda lei até agora. Para explorar esse fato, considere a Fig. 5.8, que mostra um ciclo de refrigeração reversível R e um ciclo de refrigeração irreversível I operando entre os mesmos dois reservatórios. Cada ciclo retira a mesma quantidade de energia  $Q_C$  do reservatório frio. A entrada líquida de trabalho necessária para operar R é  $W_R$ , enquanto a entrada líquida de trabalho para I é  $W_I$ . Cada ciclo descarrega energia por transferência de calor para o reservatório quente igual à soma de  $Q_C$  com a entrada líquida de trabalho. Os sentidos das transferências de energia estão indicados por setas na Fig. 5.8. A presença de irreversibilidades durante a operação de um ciclo de refrigeração exige um preço, como esperado. Se dois refrigeradores trabalhando entre os mesmos reservatórios receberem, cada um, uma transferência idêntica de energia do reservatório frio,  $Q_C$ , e um deles executar um ciclo reversível enquanto o outro executa um ciclo irreversível, esperamos que o ciclo irreversível requeira um aporte líquido de trabalho maior e, desse modo, tenha o coeficiente de desempenho menor. Com uma simples extensão desse raciocínio segue-se que todos os ciclos de refrigeração reversíveis operando entre os mesmos dois reservatórios têm o mesmo coeficiente de desempenho. Argumentos similares se aplicam aos enunciados equivalentes para ciclos de bomba de calor.



**Fig. 5.8** Representação demonstrando que um ciclo de refrigeração reversível R tem um coeficiente de desempenho maior do que um ciclo irreversível I quando ambos operam entre os mesmos dois reservatórios.

Esses corolários podem ser formalmente demonstrados utilizando-se o enunciado de Kelvin–Planck da segunda lei e um procedimento similar ao empregado para os corolários de Carnot. Os detalhes são deixados como exercício (veja o Problema 5.8, no final do capítulo).



## ENERGIA & MEIO AMBIENTE

Mantas quentes carregadas de poluição do ar envolvem as principais cidades. Telhados que absorvem a luz solar e expansões de pavimento, junto com quase nenhuma folhagem, agem em conjunto com outras características do modo de vida da cidade para elevar as temperaturas urbanas vários graus acima das temperaturas das áreas dos subúrbios adjacentes. A Fig. 5.9 mostra a variação da temperatura da superfície nas proximidades de uma cidade, conforme registrado através de medidas com infravermelho realizadas a partir de voos rasantes sobre a área. Profissionais da saúde se preocupam com o impacto dessas “ilhas de calor”, especialmente com relação aos mais velhos. Paradoxalmente, o ar quente expelido pelos condicionadores de ar que os moradores da cidade usam para manter o ambiente refrigerado também faz com que bairros abafados se tornem até mesmo mais quentes. As irreversibilidades nos condicionadores de ar contribuem para o efeito do aquecimento; esses aparelhos podem responder por até 20% do aumento da temperatura urbana. Os veículos e as atividades comerciais também contribuem para esse fato. Planejadores urbanos estão combatendo as “ilhas de calor” de muitas formas, inclusive com o uso de produtos para telhados coloridos e altamente reflexivos e a instalação de jardins de telhado. Os arbustos e as árvores de jardins de telhados absorvem a energia solar, conduzindo, no verão, a temperaturas de telhado significativamente abaixo daquelas de edifícios vizinhos sem jardins de telhado, reduzindo a necessidade de ar condicionado.

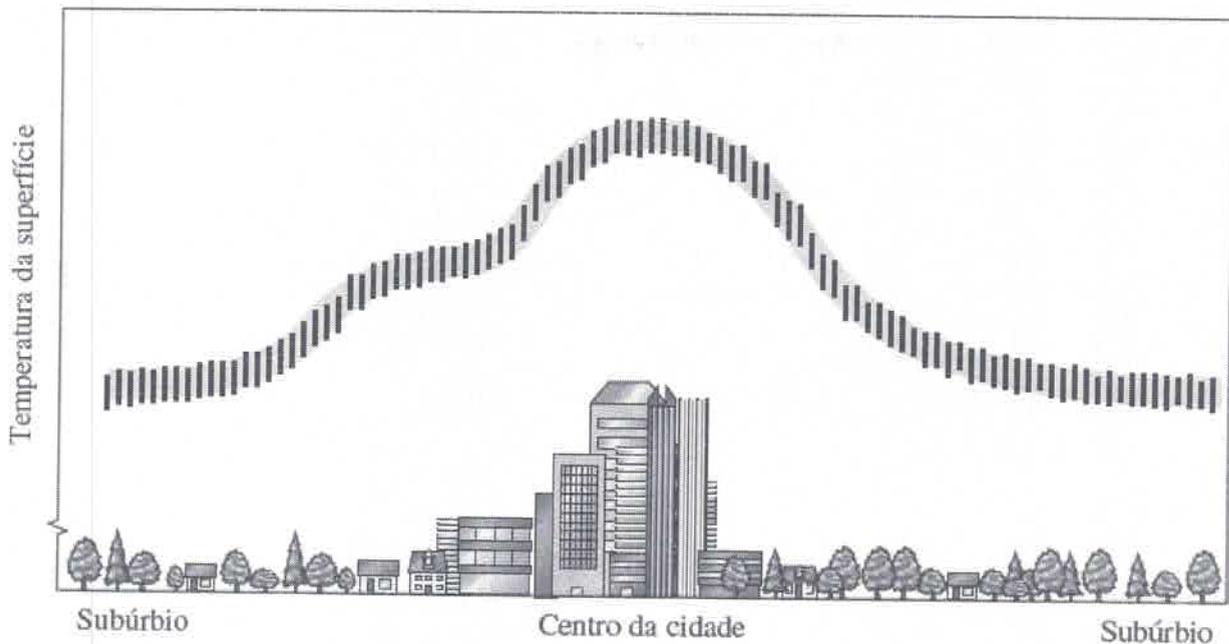


Fig. 5.9 Variação da temperatura da superfície em uma área urbana.

## 5.8 As Escalas de Temperatura Kelvin e Internacional

Os resultados das Seções 5.6 e 5.7 estabelecem limites superiores teóricos para o desempenho de ciclos de potência, refrigeração e bomba de calor que se comunicam termicamente com dois reservatórios. Expressões para a eficiência térmica teórica *máxima* para ciclos de potência e para os coeficientes de desempenho teóricos *máximos* para ciclos de refrigeração e bomba de calor são desenvolvidos na Seção 5.9, utilizando-se a escala de temperatura Kelvin considerada a seguir.

### 5.8.1 A Escala Kelvin

Do segundo corolário de Carnot sabemos que todos os ciclos de potência operando entre os mesmos dois reservatórios têm a mesma eficiência térmica, não importando a natureza da substância que compõe o sistema executando o ciclo ou a série de processos. Uma vez que a eficiência é independente desses fatores, o seu valor pode ser relacionado somente à natureza dos reservatórios. Observando que é a diferença na *temperatura* entre os dois reservatórios que fornece o ímpeto para transferência de calor entre eles, e assim para a produção de trabalho durante um ciclo, concluímos que a eficiência depende *somente* das temperaturas dos dois reservatórios.

Da Eq. 5.4 também segue que, para ciclos de potência reversíveis, a razão entre as transferências de calor  $Q_C/Q_H$  depende *somente* das temperaturas dos reservatórios. Ou seja,

$$\left(\frac{Q_C}{Q_H}\right)_{\text{ciclo rev}} = \psi(\theta_C, \theta_H) \quad (\text{a})$$

em que  $\theta_H$  e  $\theta_C$  indicam a temperatura dos reservatórios e a função  $\Psi$  não está, por ora, especificada. Observe que as palavras “ciclo rev” são adicionadas a essa expressão para enfatizar que ela se aplica apenas a sistemas percorrendo ciclos reversíveis enquanto operam entre dois reservatórios térmicos.

#### escala Kelvin

A Eq. (a) fornece uma base para a definição de uma escala *termodinâmica* de temperatura: uma escala independente

das propriedades de qualquer substância. Há escolhas alternativas para a função  $\Psi$  que conduzem a esse fim. A escala Kelvin é obtida fazendo-se uma escolha particularmente simples, a saber,  $\Psi = T_C/T_H$ , em que  $T$  é o símbolo usado com base no acordo internacional para indicar temperaturas na escala Kelvin. Com isso, obtemos

$$\left(\frac{Q_C}{Q_H}\right)_{\text{ciclo rev}} = \frac{T_C}{T_H} \quad (5.7)$$

Assim, duas temperaturas na escala Kelvin estão na mesma razão que os valores das transferências de calor absorvido e rejeitado, respectivamente, por um sistema percorrendo um ciclo reversível enquanto se comunica termicamente com reservatórios a essas temperaturas.

### TOME NOTA...

Alguns leitores preferem prosseguir diretamente para a Seção 5.9, na qual a Eq. 5.7 é aplicada.

Se um ciclo de potência reversível fosse operado no sentido oposto como um ciclo de refrigeração ou bomba de calor, as magnitudes das transferências de energia  $Q_C$  e  $Q_H$  permaneceriam as mesmas, mas as transferências de energia estariam no sentido oposto. Consequentemente, a Eq. 5.7 se aplica a cada tipo de ciclo considerado até agora, desde que o sistema percorrendo o ciclo opere entre dois reservatórios térmicos e o ciclo seja reversível.

### Mais sobre a Escala Kelvin

A Eq. 5.7 fornece apenas uma razão entre temperaturas. Para completar a definição da escala Kelvin é necessário proceder como na Seção 1.7.3, com a atribuição do valor 273,16 K à temperatura do ponto triplo da água. Então, se um ciclo reversível é operado entre um reservatório a 273,16 K e outro reservatório à temperatura  $T$ , as duas temperaturas estão relacionadas através de

$$T = 273,16 \left(\frac{Q}{Q_{\text{pt}}}\right)_{\text{ciclo rev}} \quad (5.8)$$

em que  $Q_{\text{pt}}$  e  $Q$  são as transferências de calor entre o ciclo e os reservatórios a 273,16 K e à temperatura  $T$ , respectivamente. No caso em questão, a transferência de calor  $Q$  desempenha o papel da *propriedade termométrica*. Porém, uma vez que o desempenho de um ciclo irreversível é independente da natureza do sistema que executa o ciclo, a definição de temperatura dada pela Eq. 5.8 não depende de modo algum das propriedades de qualquer substância ou classe de substâncias.

Na Seção 1.7.2 observamos que a escala Kelvin tem um zero de 0 K, e temperaturas abaixo dessa não são definidas. Vamos sintetizar esses pontos considerando um ciclo de potência reversível operando entre reservatórios a 273,16 K e a uma temperatura mais baixa  $T$ . No que se refere à Eq. 5.8, sabemos que a energia rejeitada do ciclo por transferência de calor  $Q$  não seria negativa e, assim,  $T$  deve ser não negativo. A Eq. 5.8 também mostra que, quanto menor o valor de  $Q$ , menor o valor de  $T$ , e vice-versa. Dessa maneira, à medida que  $Q$  se aproxima de zero, a temperatura  $T$  se aproxima de zero. Pode-se concluir que uma temperatura de zero na escala Kelvin é a menor temperatura concebível. Essa temperatura é chamada de zero *absoluto*, e a escala Kelvin é chamada de *escala absoluta de temperatura*.

Quando valores numéricos de temperatura termodinâmica tiverem que ser determinados não será possível utilizar ciclos reversíveis, já que estes só existem em nossa imaginação. Porém, as temperaturas avaliadas utilizando-se o termômetro de gás a volume constante apresentado na Seção 5.8.2 são idênticas àsquelas da escala Kelvin na faixa de temperaturas em que o termômetro de gás pode ser usado. Outras abordagens empíricas podem ser empregadas para temperaturas acima e abaixo da faixa acessível à termometria a gás. A escala Kelvin fornece uma definição contínua

de temperatura válida em todas as faixas e fornece uma conexão essencial entre as várias medidas empíricas de temperatura.

### 5.8.2 O Termômetro de Gás

O termômetro de gás a volume constante mostrado na Fig. 5.10 é tão excepcional em termos de precisão e acurácia que foi adotado internacionalmente como o instrumento-padrão para se calibrar outros termômetros. A *substância termométrica* é o gás (normalmente hidrogênio ou hélio), e a *propriedade termométrica* é a pressão exercida pelo gás. Como ilustrado na figura, o gás está contido em um bulbo, e a pressão exercida por ele é medida por um manômetro de mercúrio de tubo aberto. Conforme a temperatura aumenta, o gás se expande, forçando a subida do mercúrio no tubo aberto. O gás é mantido em volume constante deslocando-se o reservatório para cima ou para baixo. O termômetro de gás é usado mundialmente como um padrão por órgãos de normatização e laboratórios de pesquisa. Entretanto, devido ao fato de os termômetros de gás necessitarem de equipamentos elaborados e por serem dispositivos grandes, que respondem lentamente e demandam procedimentos experimentais tediosos, termômetros menores e que respondem mais rapidamente são usados para a maioria das medições de temperaturas, sendo calibrados (direta ou indiretamente) por comparação a termômetros de gás. Para discussão adicional sobre termometria a gás, veja o boxe a seguir.

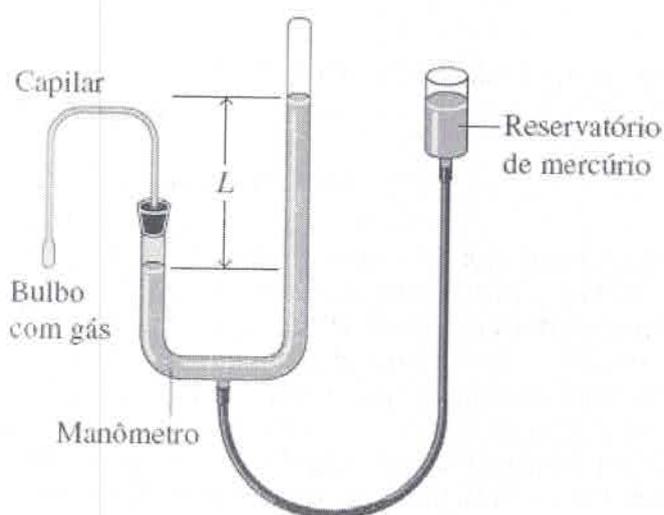


Fig. 5.10 Termômetro de gás sob volume constante.

#### 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. Consideremos  $p$  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

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

em que  $\alpha$  é uma constante arbitrária.

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

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

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

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

Entretanto, uma vez que os valores de ambas as pressões,  $p$  e  $p_{pt}$ , dependem *em parte* da quantidade de gás no bulbo, o valor indicado pela Eq. (b) para a temperatura do banho varia com a quantidade de gás no termômetro. Essa dificuldade é contornada na termometria de precisão repetindo-se as medidas (no banho original e no banho de referência) várias vezes e com uma quantidade menor de gás no bulbo em cada tentativa subsequente. Para cada tentativa, a razão  $p/p_{pt}$  é calculada pela Eq. (b) e plotada *versus* a pressão  $p_{pt}$  de referência correspondente do gás na temperatura do ponto triplo. Quando vários desses pontos são plotados, a curva resultante é extrapolada para a ordenada, em que  $p_{pt} = 0$ . Isso é ilustrado na Fig. 5.11 para termômetros de volume constante para uma série de gases distintos.

A inspeção da Fig. 5.11 mostra que para cada valor não nulo da pressão de referência os valores de  $p/p_{pt}$  mudam com o gás empregado no termômetro. No entanto, conforme a pressão decresce os valores de  $p/p_{pt}$  dos termômetros com gases distintos se aproximam, e no limite, quando a pressão tende a zero, o mesmo valor de  $p/p_{pt}$  é obtido para cada gás. Baseada nesses resultados gerais, a *escala de temperatura de gás* é definida pela relação

$$T = 273,16 \lim_{p_{pt} \rightarrow 0} \frac{p}{p_{pt}} \quad (c)$$

em que “lim” significa que ambos,  $p$  e  $p_{pt}$ , tendem a zero. Deve ser evidente que a determinação das temperaturas por esse procedimento demanda procedimentos experimentais extremamente cuidadosos e elaborados.

Embora a escala de temperatura da Eq. (c) seja independente das propriedades de um certo gás, ela ainda depende das propriedades dos gases em geral. Dessa maneira, a medição de baixas temperaturas demanda um gás que não se condense nessas temperaturas, e isso impõe um limite ao intervalo de temperaturas que podem ser medidas por um termômetro de gás. A menor temperatura que pode ser medida pelo instrumento é cerca de 1 K, obtida com hélio. Em altas temperaturas os gases se dissociam, e assim essas temperaturas também não podem ser determinadas por um termômetro de gás. Outros meios empíricos, que utilizam as propriedades de outras substâncias, devem ser empregados para a medição de temperatura em que o termômetro de gás é inadequado. Para uma discussão mais profunda, veja a Seção 5.8.3.

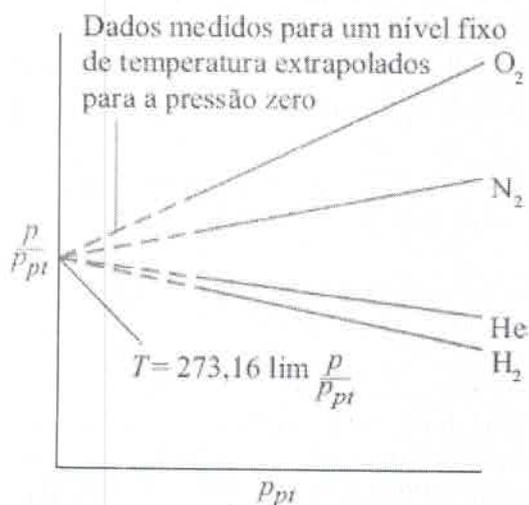


Fig. 5.11 Leituras de termômetro de gás sob volume constante, quando diferentes gases são utilizados.

### 5.8.3 Escala Internacional de Temperatura

Para fornecer um padrão para a medição de temperatura levando em conta tanto considerações teóricas quanto práticas, a Escala Internacional de Temperatura (ITS) foi adotada em 1927. Essa escala tem sido aprimorada e aumentada ao longo de diversas revisões, a mais recente em 1990. A *Escala Internacional de Temperatura de 1990 (ITS-90)* é definida de modo que a temperatura nela medida condiz com a temperatura termodinâmica, cuja unidade é o kelvin, até os limites de precisão das medições alcançáveis em 1990. A ITS-90 é baseada nos valores de temperatura atribuídos a vários *pontos fixos* reproduzíveis (Tabela 5.1). A interpolação entre as temperaturas dos pontos fixos é efetuada por fórmulas que fornecem a relação entre as leituras de instrumentos-padrão e os valores da ITS. Na faixa entre 0,65 e 5,0 K, a ITS-90 é definida por equações que fornecem a temperatura como funções das pressões de vapor de isótopos particulares de hélio. A faixa entre 3,0 e 24,5561 K é baseada em medições utilizando-se um termômetro de gás hélio a volume constante. Na faixa entre 13,8033 e 1234,93 K, a ITS-90 é definida por intermédio de termômetros de resistência de platina. Acima de 1234,93 K a temperatura é definida utilizando-se a equação de Planck para radiação de corpo negro e medições da intensidade de radiação no espectro visível.

## 5.9 Medidas de Desempenho Máximo para Ciclos Operando entre Dois Reservatórios

A discussão continua nesta seção com o desenvolvimento de expressões para a eficiência térmica máxima dos ciclos de potência e para os coeficientes de desempenho máximos dos ciclos de refrigeração e bomba de calor em termos das temperaturas dos reservatórios avaliadas na escala Kelvin. Essas expressões podem ser usadas como padrão de comparação para ciclos reais de potência, refrigeração e bomba de calor.

### 5.9.1 Ciclos de Potência

A substituição da Eq. 5.7 na Eq. 5.4 resulta em uma expressão para a eficiência térmica de um sistema que percorre um *ciclo de potência* reversível enquanto opera entre reservatórios térmicos às temperaturas  $T_H$  e  $T_C$ . Ou seja,

$$\eta_{\text{máx}} = 1 - \frac{T_C}{T_H} \quad (5.9)$$

#### eficiência de Carnot

que é conhecida como eficiência de Carnot. Como as temperaturas na escala Rankine diferem das temperaturas em Kelvin apenas por um fator de 1,8, os  $T$ 's na Eq. 5.9 podem estar em qualquer uma dessas escalas de temperatura.

Recordando-se dos dois corolários de Carnot, deve ficar evidente que a eficiência dada pela Eq. 5.9 é a eficiência térmica de *todos* os ciclos de potência reversíveis operando entre dois reservatórios às temperaturas  $T_H$  e  $T_C$ , e a eficiência *máxima* que *qualquer* ciclo de potência pode ter enquanto operar entre os dois reservatórios. Por inspeção, o valor da eficiência de Carnot aumenta à medida que  $T_H$  aumenta e/ou  $T_C$  diminui.

#### TABELA 5.1

Definindo os Pontos Fixos da Escala Internacional de Temperatura de 1990

$T$ (K)	Substância <sup>a</sup>	Estado <sup>b</sup>
3 a 5	He	Ponto de pressão de vapor

13,8033	e-H <sub>2</sub>	Ponto triplo
≈ 17	e-H <sub>2</sub>	Ponto de pressão de vapor
≈ 20,3	e-H <sub>2</sub>	Ponto de pressão de vapor
24,5561	Ne	Ponto triplo
54,3584	O <sub>2</sub>	Ponto triplo
83,8058	Ar	Ponto triplo
234,3156	Hg	Ponto triplo
273,16	H <sub>2</sub> O	Ponto triplo
302,9146	Ga	Ponto de fusão
429,7485	In	Ponto de congelamento
505,078	Sn	Ponto de congelamento
692,677	Zn	Ponto de congelamento
933,473	Al	Ponto de congelamento
1234,93	Ag	Ponto de congelamento
1337,33	Au	Ponto de congelamento
1357,77	Cu	Ponto de congelamento

$\alpha$ He denota <sup>3</sup>He ou <sup>4</sup>He; e-H<sub>2</sub> é hidrogênio na concentração de equilíbrio das formas orto e paramolecular.

bPonto triplo: temperatura na qual as fases sólida, líquida e vapor estão em equilíbrio. Ponto de fusão, ponto de congelamento: temperatura, a uma pressão de 101,325 kPa, na qual as fases sólida e líquida estão em equilíbrio.

Fonte: H. Preston-Thomas, "The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90)," *Metrologia* 27,

3-10 (1990). Veja também [www.ITS-90.com](http://www.ITS-90.com).

A Eq. 5.9 é apresentada graficamente na Fig. 5.12. A temperatura  $T_C$  usada na construção da figura é de 298 K em reconhecimento ao fato de que ciclos de potência reais acabam por descarregar energia por transferência de calor quase na mesma temperatura da atmosfera local ou da água de resfriamento retirada de um rio ou lago nas proximidades. Note que a possibilidade de aumentar-se a eficiência térmica através da redução de  $T_C$  para abaixo da temperatura do meio ambiente não é viável. Por exemplo, para manter  $T_C$  abaixo da temperatura ambiente por meio de um ciclo de refrigeração *real*, seria preciso uma entrada de trabalho no ciclo de refrigeração que excederia o aumento no trabalho do ciclo de potência, gerando uma saída *líquida* de trabalho mais baixa.

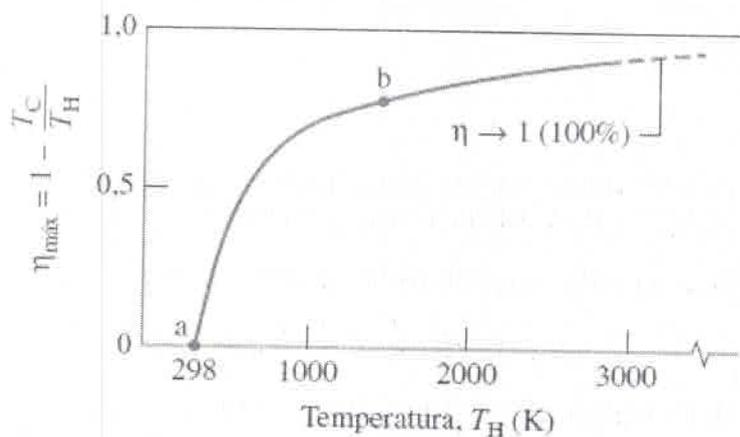


Fig. 5.12 Eficiência de Carnot versus  $T_H$ , para  $T_C = 298$  K.

A Fig. 5.12 mostra que a eficiência térmica aumenta com  $T_H$ . Referindo-nos ao segmento a-b da curva, em que  $T_H$  e  $\eta$  são relativamente pequenos, podemos observar que  $\eta$  aumenta rapidamente à medida que  $T_H$  aumenta, mostrando que nessa faixa mesmo um aumento pequeno em  $T_H$  pode ter um efeito grande na eficiência. Embora essas conclusões, obtidas a partir da Eq. 5.9, apliquem-se estritamente apenas a sistemas percorrendo ciclos reversíveis, elas estão qualitativamente corretas para ciclos de potência reais. Observa-se que as eficiências térmicas dos ciclos reais aumentam à medida que a temperatura *média* na qual a energia é adicionada por transferência de calor aumenta e/ou a temperatura *média* na qual a energia é descarregada por transferência de calor diminui. Entretanto, maximizar a eficiência térmica de um ciclo de potência pode não ser um objetivo principal. Na prática, outras considerações, como custo, podem ser mais importantes.

Ciclo\_de\_Potência

A.9 – Aba c



Os ciclos convencionais de produção de potência têm eficiência térmica variando até cerca de 40%. Esse valor pode parecer baixo, mas a comparação deveria ser feita com um valor-limite apropriado, e não 100%.

► **POR EXEMPLO** considere um sistema que realiza um ciclo de potência para o qual a temperatura média de adição de calor é 745 K e a temperatura média na qual o calor é descarregado é 298 K. Para um ciclo reversível recebendo e descarregando energia por transferência de calor nessas temperaturas, a eficiência térmica dada pela Eq. 5.9 é de 60%. Quando comparada a esse valor, uma eficiência térmica real de 40% não parece ser tão baixa. O ciclo estaria

operando a dois terços do máximo teórico. ◀◀◀◀◀

No próximo exemplo, avaliaremos o desempenho de um ciclo de potência utilizando os corolários de Carnot, assim como as Eqs. 5.4 e 5.9.

▶▶▶▶ **EXEMPLO 5.1** ▶

**Avaliando o Desempenho de um Ciclo de Potência**

Um ciclo de potência operando entre dois reservatórios térmicos recebe energia  $Q_H$  por transferência de calor de um reservatório a  $T_H = 2000 \text{ K}$  e descarta  $Q_C$  por transferência de calor para um reservatório a  $T_C = 400 \text{ K}$ . Determine, para cada um dos seguintes casos, se o ciclo opera irreversível, reversivelmente ou se é impossível.

(a)  $Q_H = 1000 \text{ kJ}$ ,  $\eta = 60\%$ .

(b)  $Q_H = 1000 \text{ kJ}$ ,  $W_{\text{ciclo}} = 850 \text{ kJ}$ .

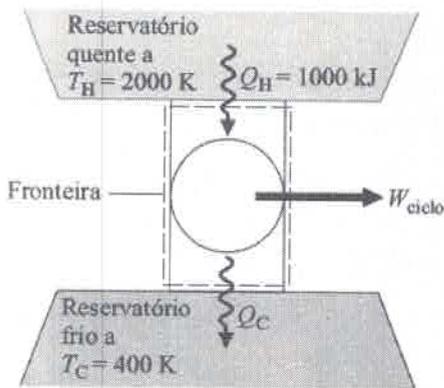
(c)  $Q_H = 1000 \text{ kJ}$ ,  $Q_C = 200 \text{ kJ}$ .

**SOLUÇÃO**

**Dado:** Um sistema opera em um ciclo de potência enquanto recebe calor de uma fonte quente a  $2000 \text{ K}$  e descarta calor a  $40 \text{ K}$ .

**Pede-se:** Para cada um dos casos, determine se o ciclo opera de forma reversível, irreversível ou se é impossível.

**Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:**



**Modelo de Engenharia:**

1. O sistema representado na figura executa um ciclo de potência.
2. Cada transferência de energia é positiva no sentido indicado pelas setas.

**Fig. E5.1**

**Análise:** A eficiência térmica máxima para *qualquer* ciclo de potência operando entre dois reservatórios térmicos é dada pela Eq. 5.9. Utilizando as temperaturas especificadas no enunciado, tem-se:

1

$$\begin{aligned}\eta_{\text{máx}} &= 1 - \frac{T_C}{T_H} = 1 - \frac{400 \text{ K}}{2000 \text{ K}} \\ &= 0,8 \text{ (80\%)}\end{aligned}$$

(a) A eficiência térmica fornecida é  $\eta = 60\%$ . Sendo  $\eta < \eta_{\text{máx}}$ , o ciclo opera irreversivelmente.

(b) Utilizando os dados fornecidos,  $Q_H = 1000 \text{ kJ}$  e  $W_{\text{ciclo}} = 850 \text{ kJ}$ , a eficiência térmica será:

$$\eta = \frac{W_{\text{ciclo}}}{Q_H} = \frac{850 \text{ kJ}}{1000 \text{ kJ}}$$

$$= 0,85 \text{ (85\%)}$$

Uma vez que  $\eta > \eta_{\text{máx}}$ , o ciclo é impossível.

(c) Aplicando um balanço de energia juntamente aos dados fornecidos, tem-se:

$$W_{\text{ciclo}} = Q_H - Q_C$$

$$= 1000 \text{ kJ} - 200 \text{ kJ} = 800 \text{ kJ}$$

A eficiência térmica é, então:

$$\eta = \frac{W_{\text{ciclo}}}{Q_H} = \frac{800 \text{ kJ}}{1000 \text{ kJ}}$$

$$= 0,80 \text{ (80\%)}$$

Uma vez que  $\eta = \eta_{\text{máx}}$ , o ciclo opera reversivelmente.

### Habilidades Desenvolvidas

Habilidades para...

aplicar os corolários de Carnot, utilizando as Eqs. 5.4 e 5.9 adequadamente

① As temperaturas  $T_C$  e  $T_H$  utilizadas nos cálculos devem estar nas escalas K ou °R.

### Teste-Relâmpago

Se  $Q_C = 300 \text{ kJ}$  e  $W_{\text{ciclo}} = 2700 \text{ kJ}$ , determine se o ciclo opera de forma reversível, irreversível ou se é impossível.

**Resposta:** Impossível.

### 5.9.2 Ciclos de Refrigeração e Bomba de Calor

A Eq. 5.7 também é aplicável a ciclos de refrigeração e bomba de calor reversíveis operando entre dois reservatórios térmicos, mas, para esses,  $Q_C$  representa o calor adicionado ao ciclo através do reservatório frio à temperatura  $T_C$  na escala Kelvin e  $Q_H$  é o calor descarregado para o reservatório quente à temperatura  $T_H$ . Introduzindo a Eq. 5.7 na Eq. 5.5, resulta a seguinte expressão para o coeficiente de desempenho de qualquer sistema que percorre um ciclo de refrigeração reversível enquanto opera entre os dois reservatórios:

$$\beta_{\text{máx}} = \frac{T_C}{T_H - T_C} \quad (5.10)$$

De maneira similar, a substituição da Eq. 5.7 na Eq. 5.6 fornece a seguinte expressão para o coeficiente de

desempenho de qualquer sistema que percorre um ciclo de bomba de calor reversível enquanto opera entre os dois reservatórios

$$\gamma_{\text{máx}} = \frac{T_H}{T_H - T_C} \quad (5.11)$$

Observe que as temperaturas usadas para avaliar  $\eta_{\text{máx}}$  e  $\gamma_{\text{máx}}$  devem ser temperaturas absolutas na escala Kelvin ou Rankine.

Da discussão da Seção 5.7.2 segue-se que as Eqs. 5.10 e 5.11 são os coeficientes de desempenho máximos que quaisquer ciclos de refrigeração e bomba de calor podem possuir enquanto operarem entre os reservatórios às temperaturas  $T_H$  e  $T_C$ . Como no caso da eficiência de Carnot, essas expressões podem ser usadas como padrão de comparação para refrigeradores e bombas de calor reais.

No próximo exemplo avaliaremos o coeficiente de desempenho de um refrigerador, comparando-o ao valor teórico máximo e ilustrando o uso dos corolários da segunda lei da Seção 5.7.2 junto com a Eq. 5.10.

Ciclo de Refrigeração

A.10 – Aba c



Ciclo de Bomba de Calor

A.11 – Aba c

### ▶ ▶ ▶ EXEMPLO 5.2 ▶

#### Avaliando o 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  $-5^\circ\text{C}$  quando a temperatura do ar circundando o refrigerador está a  $22^\circ\text{C}$ . A taxa de transferência de calor entre o compartimento do congelador e o refrigerante é de  $8000 \text{ kJ/h}$ , e a potência de entrada necessária para operar o refrigerador é de  $3200 \text{ kJ/h}$ . 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.

#### SOLUÇÃO

**Dado:** um refrigerador mantém o compartimento do congelador a uma temperatura especificada. A taxa de transferência de calor do espaço refrigerado, a potência de entrada para operar o refrigerador e a temperatura ambiente são conhecidas.

**Pede-se:** determine o coeficiente de desempenho e compare com aquele de um refrigerador reversível operando entre reservatórios às mesmas duas temperaturas.

**Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:**

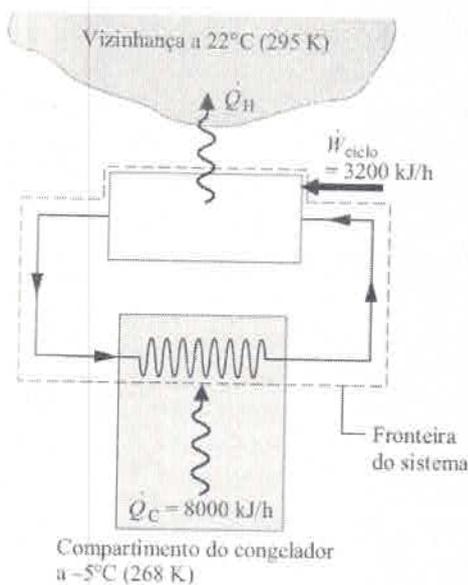


Fig. E5.2

**Análise:** inserindo na Eq. 5.5 os dados de operação fornecidos, expressos em uma base *temporal*, o coeficiente de desempenho do refrigerador é

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

A substituição de valores na Eq. 5.10 fornece o coeficiente de desempenho de um ciclo de refrigeração reversível operando entre reservatórios a  $T_C = 268 \text{ K}$  e  $T_H = 295 \text{ K}$

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

De acordo com os corolários da Seção 5.7.2, o coeficiente de desempenho do refrigerador é menor do que para um ciclo de refrigeração reversível operando entre reservatórios às mesmas duas temperaturas. Ou seja, há irreversibilidades dentro do sistema.

### Habilidades Desenvolvidas

Habilidades para...

aplicar os corolários da Seção 5.7.2, usando as Eqs. 5.5 e 5.10, apropriadamente.

1 As temperaturas  $T_C$  e  $T_H$  utilizadas na avaliação de  $\beta_{\text{máx}}$  *devem* ser em K ou °R.

2 A diferença entre os coeficientes de desempenho real e máximo sugere que pode haver alguma possibilidade de melhorar o desempenho termodinâmico. Contudo, o objetivo *deve* ser estudado com cuidado, pois uma melhora no desempenho pode requerer aumentos no tamanho, na complexidade e no custo.

### Teste-Relâmpago

### Modelo de Engenharia:

1. O sistema mostrado na figura correspondente está em regime permanente.
2. O compartimento do congelador e o ar à sua volta exercem o papel dos reservatórios frio e quente, respectivamente.
3. As transferências de energia são positivas nas direções das setas no diagrama.

Um inventor alega que a potência necessária para operar o refrigerador pode ser reduzida de 800 kJ/h enquanto todos os outros dados permanecem inalterados. Avalie essa afirmativa utilizando a segunda lei. **Resposta:**  $\beta = 10$ . A afirmativa é inválida.

No Exemplo 5.3 determinamos o aporte de trabalho teórico mínimo e o custo de um dia de operação de uma bomba de calor elétrica, ilustrando o uso dos corolários da segunda lei da Seção 5.7.2 junto com a Eq. 5.11.

### ▶ ▶ ▶ EXEMPLO 5.3 ▶

#### Avaliando o Desempenho de uma Bomba de Calor

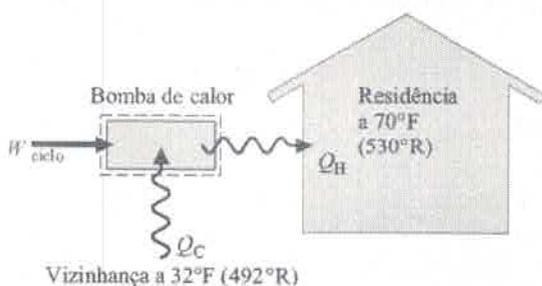
Uma residência requer  $5 \times 10^5$  Btu por dia para manter sua temperatura em  $70^\circ\text{F}$  ( $21,1^\circ\text{C}$ ) quando a temperatura externa é  $32^\circ\text{F}$  ( $0^\circ\text{C}$ ). (a) Se uma bomba de calor elétrica é usada para suprir essa energia, determine o fornecimento de trabalho teórico mínimo para um dia de operação, em Btu/dia. (b) Estimando a eletricidade em 13 centavos por  $\text{kW} \cdot \text{h}$ , determine o custo teórico mínimo para operar a bomba de calor, em  $\$/\text{dia}$ .

#### SOLUÇÃO

**Dado:** uma bomba de calor mantém uma residência a uma temperatura especificada. A energia fornecida para a residência, a temperatura ambiente e o custo unitário da eletricidade são conhecidos.

**Pede-se:** determine o trabalho teórico *mínimo* requerido pela bomba de calor e o custo da eletricidade correspondente.

#### Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:



#### Modelo de Engenharia:

1. O sistema mostrado na figura correspondente executa um ciclo de bomba de calor.
2. A residência e o ar exterior exercem o papel dos reservatórios quente e frio, respectivamente.
3. O valor da eletricidade é de 13 centavos por  $\text{kW} \cdot \text{h}$ .
4. As transferências de calor são positivas no sentido das setas no diagrama.

Fig. E5.3

#### Análise:

(a) Usando a Eq. 5.6, o trabalho de qualquer ciclo de bomba de calor pode ser expresso por  $W_{\text{ciclo}} = Q_H/\gamma$ . O coeficiente de desempenho  $\gamma$  de uma bomba de calor real é menor ou igual ao coeficiente de desempenho  $\gamma_{\text{máx}}$  de um ciclo de bomba de calor reversível quando ambos operam entre os mesmos dois reservatórios:  $\gamma \leq \gamma_{\text{máx}}$ . Desse modo, para um dado valor de  $Q_H$  obtemos

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

Utilizando a Eq. 5.11

1

$$\gamma_{\text{máx}} = \frac{T_H}{T_H - T_C} = \frac{530^\circ\text{R}}{38^\circ\text{R}} = 13,95$$

Inserindo os valores

$$W_{\text{ciclo}} \geq \frac{5 \times 10^5 \text{ Btu/dia}}{13,95} = 3,58 \times 10^4 \frac{\text{Btu}}{\text{dia}}$$

O fornecimento de trabalho teórico *mínimo* é de  $4,3 \times 10^4$  Btu/dia.

(b) Usando o resultado da parte (a) junto com o custo fornecido e um fator de conversão apropriado

$$\textcircled{2} \left[ \begin{array}{c} \text{custo} \\ \text{mínimo} \\ \text{teórico por dia} \end{array} \right] = \left( 3,58 \times 10^4 \frac{\text{Btu}}{\text{dia}} \left| \frac{1 \text{ kW} \cdot \text{h}}{3413 \text{ Btu}} \right| \right) \left( 0,13 \frac{\$}{\text{kW} \cdot \text{h}} \right) = 1,36 \frac{\$}{\text{dia}}$$

① Observe que as temperaturas  $T_C$  e  $T_H$  devem ser em K ou °R.

② Devido às irreversibilidades, deve-se fornecer mais trabalho do que o mínimo a uma bomba de calor real para produzir o mesmo efeito de aquecimento. O custo diário real poderia ser substancialmente maior do que o custo teórico mínimo.

### Habilidades Desenvolvidas

Habilidades para...

aplicar os corolários da Seção 5.7.2, usando as Eqs. 5.6 e 5.11, apropriadamente.

conduzir uma avaliação econômica elementar.

### Teste-Relâmpago

(a) Se uma bomba de calor cujo coeficiente de desempenho seja 3,0 fornece o aquecimento necessário, determine o custo da operação, em \$/dia. (b) Repita o cálculo se o aquecimento for fornecido por um sistema de resistência elétrica. **Resposta:** (a) 6,35; (b) 19,04.

## 5.10 Ciclo de Carnot

### ciclo de Carnot

O ciclo de Carnot, apresentado nessa seção, fornece exemplos específicos de ciclos reversíveis operando entre dois reservatórios térmicos. Outros exemplos são apresentados no [Cap. 9](#): os ciclos de Ericsson e Stirling. Em um ciclo de Carnot o sistema que está executando o ciclo passa por uma série de quatro processos internamente reversíveis: dois processos adiabáticos alternados com dois processos isotérmicos.

#### 5.10.1 Ciclo de Potência de Carnot

A [Fig. 5.13](#) mostra o diagrama  $p-v$  de um ciclo de potência de Carnot no qual o sistema é um gás em um conjunto cilindro-pistão. A [Fig. 5.14](#) fornece detalhes de como o ciclo é executado. As paredes do pistão e do cilindro são não condutoras. As transferências de calor ocorrem nos sentidos das setas. Observe também que existem dois reservatórios às temperaturas  $T_H$  e  $T_C$ , respectivamente, e um apoio isolado. Inicialmente, o conjunto cilindro-pistão está sobre o apoio isolado e o sistema está no estado 1, no qual a temperatura é  $T_C$ . Os quatro processos do ciclo são

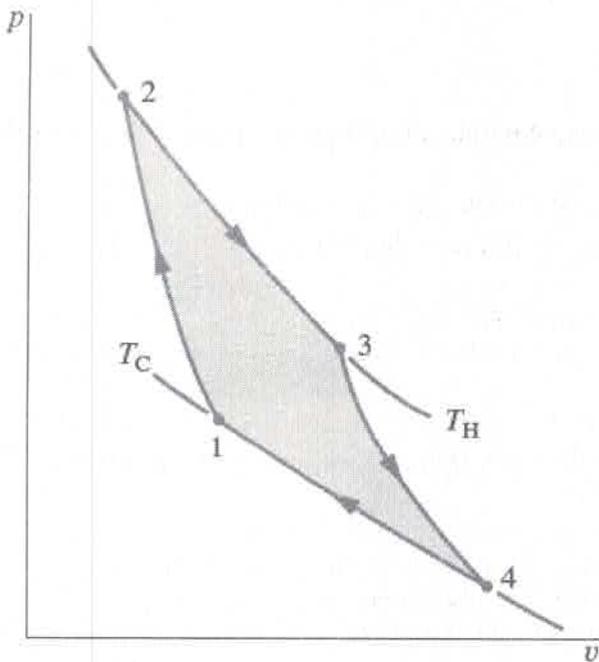
**Processo 1-2:** o gás é comprimido *adiabaticamente* até o estado 2, no qual a temperatura é  $T_H$ .

**Processo 2-3:** o conjunto é colocado em contato com o reservatório a  $T_H$ . O gás se expande *isotermicamente* enquanto recebe a energia  $Q_H$  do reservatório quente por transferência de calor.

**Processo 3-4:** o conjunto é colocado novamente sobre o apoio isolado e o gás continua a se expandir *adiabaticamente* até a temperatura cair para  $T_C$ .

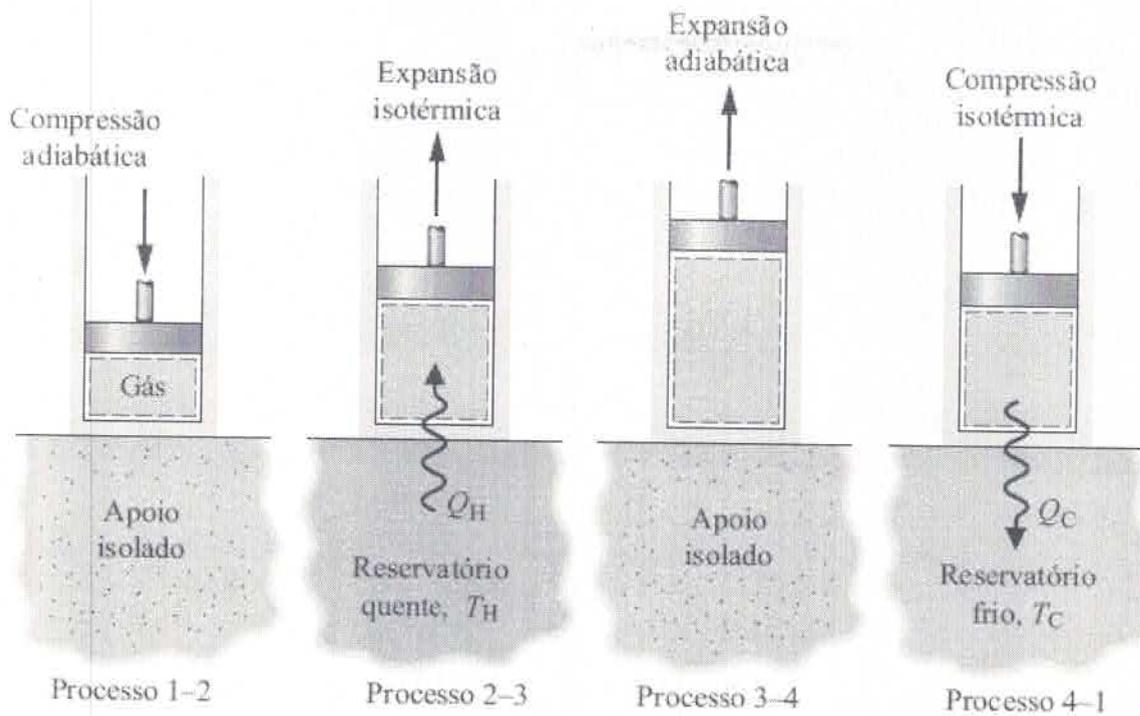
**Processo 4-1:** o conjunto é colocado em contato com o reservatório a  $T_C$ . O gás é comprimido *isotermicamente* até o seu estado inicial enquanto descarrega a energia  $Q_C$  para o reservatório frio por transferência de calor.

Para que a transferência de calor durante o Processo 2-3 seja reversível, a diferença entre a temperatura do gás e a temperatura do reservatório quente deve ser infinitamente pequena. Como a temperatura do reservatório permanece constante, isso implica que a temperatura do gás também permanece constante durante o Processo 2-3. O mesmo pode ser concluído para a temperatura do gás durante o Processo 4-1.



**Fig. 5.13** Diagrama  $p-v$  para um ciclo de potência de Carnot realizado por um gás.

Para cada um dos quatro processos internamente reversíveis do ciclo de Carnot o trabalho pode ser representado como uma área na Fig. 5.13. A área sob a linha do processo adiabático 1-2 representa o trabalho realizado por unidade de massa para comprimir o gás nesse processo. As áreas sob as linhas dos Processos 2-3 e 3-4 representam o trabalho realizado por unidade de massa pelo gás à medida que ele se expande nesses processos. A área sob a linha do Processo 4-1 é o trabalho realizado por unidade de massa para comprimir o gás nesse processo. A área delimitada pelas linhas no diagrama  $p-v$ , mostrada em sombreado, é o trabalho líquido desenvolvido pelo ciclo por unidade de massa. A eficiência térmica desse ciclo é dada pela Eq. 5.9.



**Fig. 5.14** Ciclo de potência de Carnot executado por um gás em um conjunto cilindro-pistão.

O ciclo de Carnot não se limita aos processos de sistema fechado que ocorrem em um conjunto cilindro-pistão. A Fig. 5.15 mostra o esquema e o diagrama  $p-v$  correspondente para um ciclo de Carnot executado por água circulando em regime permanente através de uma série de quatro componentes interligados que têm características em comum com uma instalação de potência a vapor simples mostrada na Fig. 4.16. À medida que a água flui através da caldeira, uma *mudança de fase* de líquido para vapor na temperatura constante  $T_H$  ocorre como resultado da transferência de calor do reservatório quente. Uma vez que a temperatura permanece constante, a pressão também permanece constante durante a mudança de fase. O vapor d'água que deixa a caldeira se expande adiabaticamente através da turbina, e o trabalho é desenvolvido. Nesse processo, a temperatura decresce até a temperatura do reservatório frio,  $T_C$ , e ocorre um decréscimo correspondente na pressão. À medida que o vapor d'água passa através do condensador, ocorre uma transferência de calor para o reservatório frio, e parte do vapor d'água condensa à temperatura constante  $T_C$ . Como a temperatura permanece constante, a pressão também permanece constante enquanto a água passa através do condensador. O quarto componente é uma bomba, ou compressor, que recebe uma mistura bifásica de líquido-vapor do condensador e a retorna adiabaticamente ao estado na entrada da caldeira. Durante esse processo, que requer fornecimento de trabalho para elevar a pressão, a temperatura aumenta de  $T_C$  para  $T_H$ . A eficiência térmica desse ciclo também é dada pela Eq. 5.9.

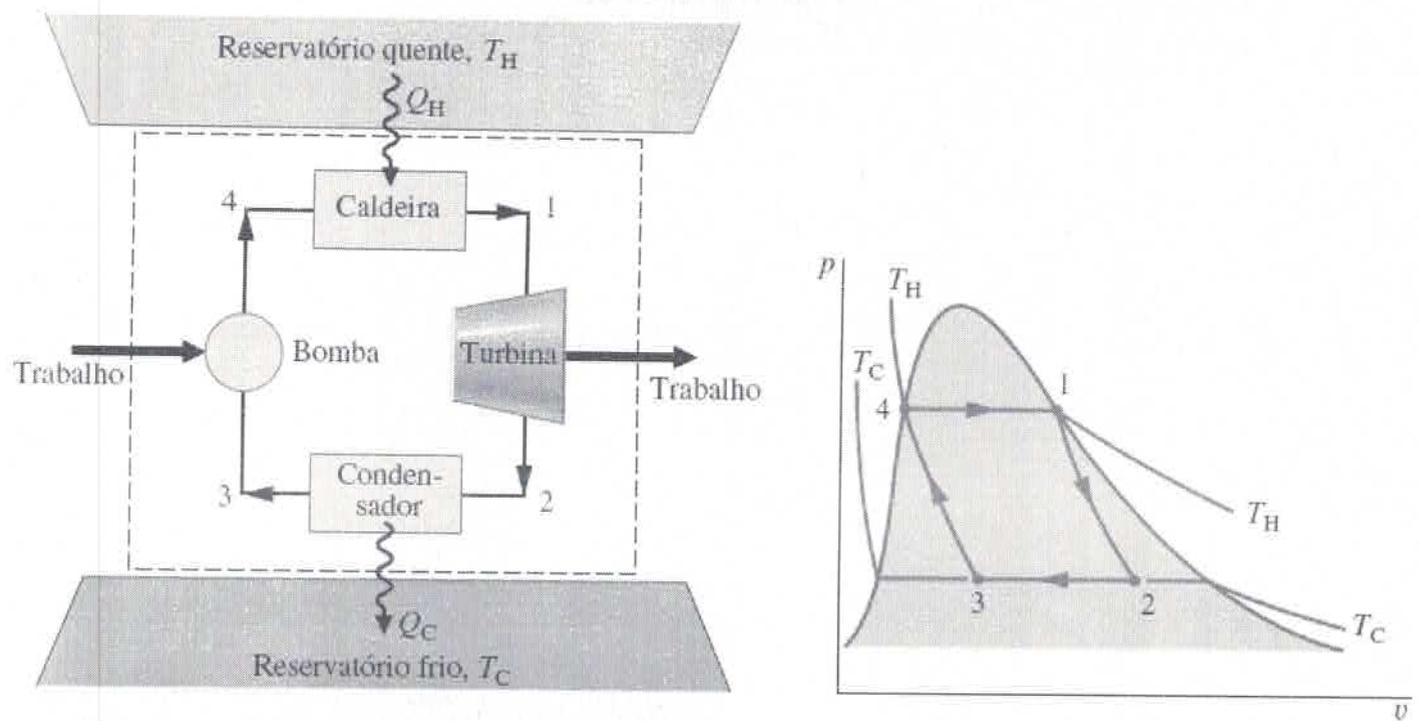


Fig. 5.15 Ciclo de potência a vapor de Carnot.

### 5.10.2 Ciclos de Refrigeração e Bomba de Calor de Carnot

Se um ciclo de potência de Carnot for operado no sentido oposto, as magnitudes de todas as transferências de energia permanecem as mesmas, mas as transferências de energia estarão dirigidas de forma oposta. Esse ciclo pode ser considerado um ciclo de refrigeração ou bomba de calor reversível, para o qual os coeficientes de desempenho são dados pelas Eqs. 5.10 e 5.11, respectivamente. Um ciclo de refrigeração ou bomba de calor de Carnot executado por um gás em um conjunto cilindro-pistão é mostrado na Fig. 5.16. O ciclo consiste nos seguintes quatro processos em série:

**Processo 1-2:** o gás se expande *isotermicamente* a  $T_C$  enquanto *recebe* a energia  $Q_C$  do reservatório frio por transferência de calor.

**Processo 2-3:** o gás é comprimido *adiabaticamente* até a sua temperatura atingir  $T_H$ .

**Processo 3-4:** o gás é comprimido *isotermicamente* a  $T_H$  enquanto *descarrega* a energia  $Q_H$  no reservatório quente por transferência de calor.

**Processo 4-1:** o gás se expande *adiabaticamente* até a sua temperatura decrescer para  $T_C$ .

Um efeito de refrigeração ou bomba de calor pode ser realizado em um ciclo somente se uma quantidade líquida de trabalho for fornecida ao sistema que executa o ciclo. No caso do ciclo mostrado na Fig. 5.16 a área sombreada representa a entrada de trabalho líquido por unidade de massa.

### 5.10.3 Resumo do Ciclo de Carnot

Além das configurações previamente discutidas, os ciclos de Carnot também podem ser enxergados como ciclos compostos de processos nos quais um capacitor é carregado e descarregado, uma substância paramagnética é magnetizada e desmagnetizada, e assim por diante. Contudo, não importa o tipo de dispositivo ou a substância de trabalho utilizada,

1. o ciclo de Carnot *sempre* apresenta os mesmos quatro processos internamente reversíveis: dois processos adiabáticos alternados com dois processos isotérmicos.
2. a eficiência térmica do ciclo de potência de Carnot é *sempre* dada pela Eq. 5.9 em termos das temperaturas avaliadas na escala Kelvin ou Rankine.
3. os coeficientes de desempenho dos ciclos de refrigeração e bomba de calor de Carnot são *sempre* dados pelas Eqs. 5.10 e 5.11, respectivamente, em termos das temperaturas avaliadas na escala Kelvin ou Rankine.

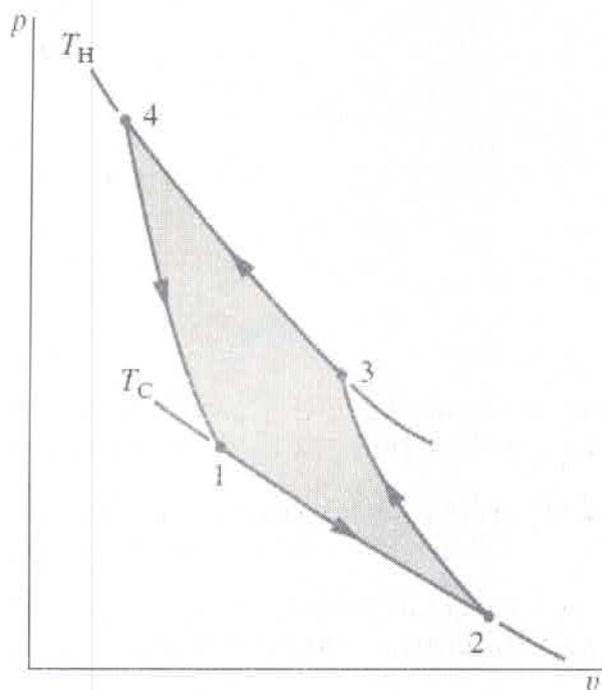


Fig. 5.16 Diagrama  $p-v$  para um ciclo de refrigeração ou bomba de calor de Carnot realizado por um gás.

## 5.11 A Desigualdade de Clausius

Os corolários da segunda lei desenvolvidos até agora neste capítulo são para sistemas submetidos a ciclos enquanto termicamente conectados a *um* ou *dois* reservatórios de energia térmica. Na presente seção é apresentado um corolário da segunda lei, conhecido como *desigualdade de Clausius*, que é aplicável a *qualquer* ciclo a despeito do corpo, ou dos corpos, a partir dos quais o ciclo recebe energia através de transferência de calor ou para os quais o ciclo rejeita energia por meio de transferência de calor. A desigualdade de Clausius fornece a base para o desenvolvimento adicional no Cap. 6 dos conceitos de entropia, geração de entropia e balanço de entropia introduzidos na Seção 5.2.3.

A *desigualdade de Clausius* estabelece que para qualquer ciclo termodinâmico

$$\oint \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_b \leq 0 \quad (5.12)$$

em que  $\delta Q$  representa a quantidade de calor transferido em uma parcela da fronteira do sistema durante uma parte do ciclo, e  $T$  é a temperatura absoluta nessa parcela da fronteira. O subscrito “b” serve como um lembrete de que o integrando é avaliado na fronteira do sistema que executa o ciclo. O símbolo  $\oint$  indica que a integral deve ser avaliada sobre todo o contorno e sobre a totalidade do ciclo. A igualdade e a desigualdade têm a mesma interpretação do enunciado de Kelvin–Planck: a igualdade é válida quando não ocorrem irreversibilidades internas conforme o ciclo executa o ciclo, e a desigualdade é válida quando irreversibilidades estão presentes. A desigualdade

de Clausius pode ser demonstrada a partir do enunciado de Kelvin–Planck para a segunda lei. Veja o boxe para detalhes.

### desigualdade de Clausius

A desigualdade de Clausius pode ser expressa de forma equivalente como

$$\oint \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_b = -\sigma_{\text{ciclo}} \quad (5.13)$$

em que  $\sigma_{\text{ciclo}}$  pode ser associado à “intensidade” da desigualdade. O valor de  $\sigma_{\text{ciclo}}$  é positivo quando irreversibilidades internas estão presentes, zero quando irreversibilidades internas não estão presentes e nunca pode ser negativo.

Em resumo, a natureza de um ciclo executado por um sistema é indicada pelo valor de  $\sigma_{\text{ciclo}}$  conforme descrito a seguir:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{ciclo}} &= 0 && \text{ausência de irreversibilidades no sistema} \\ \sigma_{\text{ciclo}} &> 0 && \text{presença de irreversibilidades no sistema} \\ \sigma_{\text{ciclo}} &< 0 && \text{impossível} \end{aligned} \quad (5.14)$$

► POR EXEMPLO aplicando a Eq. 5.13 ao ciclo do Exemplo 5.1(c), obtemos

$$\begin{aligned} \oint \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_b &= \frac{Q_{\text{entra}}}{T_H} - \frac{Q_{\text{sai}}}{T_C} = -\sigma_{\text{ciclo}} \\ &= \frac{1000 \text{ kJ}}{2000 \text{ K}} - \frac{200 \text{ kJ}}{400 \text{ K}} = 0 \text{ kJ/K} \end{aligned}$$

em que  $\sigma_{\text{ciclo}} = 0 \text{ kJ/K}$ , e o valor indica que não há irreversibilidade no sistema. Essa informação está de acordo com a conclusão do Exemplo 5.1(c). Aplicando a Eq. 5.13, em uma base temporal, ao ciclo do Exemplo 5.2, obtemos  $\dot{\sigma}_{\text{ciclo}} = 8,12 \text{ kJ/h} \cdot \text{K}$ . O valor positivo indica que existem irreversibilidades presentes no sistema que está percorrendo o ciclo, o que está de acordo com a conclusão do Exemplo 5.2. ◀◀◀◀◀

Na Seção 6.7, a Eq. 5.13 é usada para desenvolver o balanço de entropia de sistemas fechados. A partir desse desenvolvimento, o termo  $\sigma_{\text{ciclo}}$  da Eq. 5.13 pode ser interpretado como a *entropia produzida* (ou *gerada*) por irreversibilidades internas durante o ciclo.

### Desenvolvendo a Desigualdade de Clausius

A desigualdade de Clausius pode ser demonstrada utilizando o arranjo da Fig. 5.17. Um sistema recebe energia  $\delta Q$  em um local de sua fronteira em que a temperatura absoluta é  $T$ , enquanto o sistema realiza o trabalho  $\delta W$ . Mantendo-se a convenção de sinal para o calor transferido, a expressão *recebe a energia*  $\delta Q$  inclui a possibilidade de transferência de calor *a partir do* sistema. A energia  $\delta Q$  é recebida de um reservatório térmico a  $T_{\text{res}}$ . Para garantir que nenhuma irreversibilidade seja introduzida como resultado da transferência de calor entre o reservatório e o sistema, considere que essa transferência é realizada através de um sistema intermediário que passa por um ciclo sem qualquer tipo de irreversibilidade. O ciclo recebe a quantidade de energia  $\delta Q'$  do reservatório e fornece  $\delta Q$  para o sistema enquanto produz uma quantidade de trabalho  $\delta W'$ . A partir da definição da escala Kelvin (Eq. 5.7), temos a seguinte relação entre as transferências de calor e as temperaturas:

$$\frac{\delta Q'}{T_{\text{res}}} = \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_b \quad (\text{a})$$

À medida que a temperatura  $T$  pode variar, diversos desses ciclos reversíveis podem ser necessários.

Considere a seguir o sistema combinado mostrado pela linha pontilhada na Fig. 5.17. Um balanço de energia para o sistema combinado é

$$dE_C = \delta Q' - \delta W_C$$

em que  $\delta W_C$  é o trabalho total do sistema combinado, a soma de  $\delta W$  e  $\delta W'$ , e  $dE_C$  denota a variação de energia do sistema combinado. Resolvendo o balanço de energia para  $dW_C$  e utilizando a Eq. (a) para eliminar  $\delta Q'$  da expressão obtida, temos

$$\delta W_C = T_{\text{res}} \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_b - dE_C$$

Deixemos o sistema percorrer um único ciclo enquanto o sistema intermediário percorre um ou mais ciclos. O trabalho total do ciclo combinado é

$$W_C = \oint T_{\text{res}} \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_b - \oint dE_C = T_{\text{res}} \oint \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_b \quad (\text{b})$$

Como a temperatura do reservatório é constante,  $T_{\text{res}}$  pode ser extraída da integral. O termo envolvendo a energia do sistema combinado se anula, já que a variação de energia para qualquer ciclo é zero. O sistema combinado opera em um ciclo, pois suas partes executam ciclos. Uma vez que o sistema combinado é submetido a um ciclo e troca energia por transferência de calor com um único reservatório, a Eq. 5.3, que expressa o enunciado de Kelvin-Planck da segunda lei, deve ser satisfeita. Com isso, a Eq. (b) se reduz à Eq. 5.12, na qual a igualdade vale quando *não existem irreversibilidades no interior do sistema* à medida que este executa o ciclo, e a desigualdade é válida quando *irreversibilidades internas estão presentes*. Essa interpretação na verdade se relaciona à combinação do sistema com o ciclo intermediário. Entretanto, o ciclo intermediário é livre de irreversibilidades, de modo que a única possibilidade de irreversibilidades ocorre para o sistema sozinho.

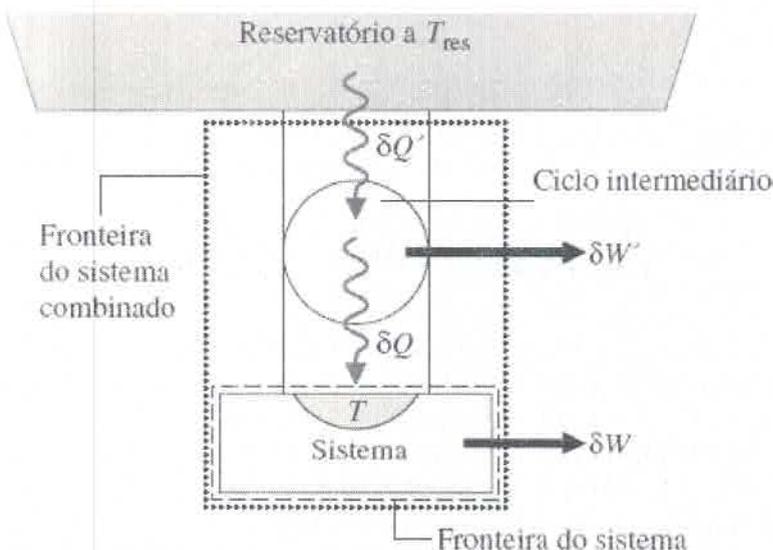


Fig. 5.17 Ilustração usada para o desenvolvimento da desigualdade de Clausius.

## ► RESUMO DO CAPÍTULO E GUIA DE ESTUDOS

Neste capítulo estimulamos a percepção da necessidade e da utilidade da segunda lei da termodinâmica e fornecemos a base para aplicações posteriores envolvendo a segunda lei nos Caps. 6 e 7. Três enunciados da segunda lei, os enunciados de Clausius, de Kelvin–Planck e da entropia, são apresentados junto com vários corolários que estabelecem o melhor desempenho teórico para sistemas que percorrem ciclos enquanto interagem com reservatórios térmicos. O conceito de irreversibilidade é apresentado, e as noções de irreversibilidade, reversibilidade e processos internamente reversíveis são discutidas. A escala de temperatura Kelvin é definida e utilizada na obtenção de expressões para o desempenho máximo de ciclos de potência, refrigeração e bomba de calor que operam entre dois reservatórios térmicos. O ciclo de Carnot é apresentado de maneira a fornecer um exemplo específico de um ciclo reversível que opera entre dois reservatórios térmicos. Finalmente, a desigualdade de Clausius, que fornece uma ponte do Cap. 5 ao Cap. 6, é apresentada e discutida.

Os itens a seguir fornecem um guia de estudo para este capítulo. Ao término do estudo do texto e dos exercícios dispostos no final do capítulo, você estará apto a

- ▶ descrever o significado dos termos dispostos em negrito ao longo do capítulo e entender cada um dos conceitos relacionados. O conjunto de conceitos fundamentais listados mais adiante é particularmente importante para os capítulos subsequentes.
- ▶ fornecer o enunciado de Kelvin–Planck da segunda lei, interpretando corretamente os sinais de “menor que” e “igual a” na Eq. 5.3.
- ▶ listar diversas irreversibilidades importantes.
- ▶ aplicar os corolários das Seções 5.6.2 e 5.7.2 juntamente com as Eqs. 5.9, 5.10 e 5.11 de modo a obter o desempenho de ciclos de potência e de ciclos de refrigeração e bomba de calor.
- ▶ descrever o ciclo de Carnot.
- ▶ interpretar a desigualdade de Clausius.

## ▶ **CONCEITOS FUNDAMENTAIS NA ENGENHARIA**

**ciclo de Carnot**

**corolários de Carnot**

**desigualdade de Clausius**

**eficiência de Carnot**

**enunciados da segunda lei**

**escala Kelvin**

**irreversibilidades**

**irreversibilidades interna e externa**

**processo internamente reversível**

**processo irreversível**

**processo reversível**

**reservatório térmico**

## ► EQUAÇÕES PRINCIPAIS

$W_{\text{ciclo}} \leq 0 \begin{cases} < 0: & \text{Presença de irreversibilidades internas.} \\ = 0: & \text{Ausência de irreversibilidades internas.} \end{cases}$	(Reservatório único)	(5.3)	Forma analítica do enunciado de Kelvin-Planck.
$\eta_{\text{máx}} = 1 - \frac{T_C}{T_H}$		(5.9)	Eficiência térmica máxima: ciclo de potência operando entre dois reservatórios.
$\beta_{\text{máx}} = \frac{T_C}{T_H - T_C}$		(5.10)	Coefficiente de desempenho máximo: ciclo de refrigeração operando entre dois reservatórios.
$\gamma_{\text{máx}} = \frac{T_H}{T_H - T_C}$		(5.11)	Coefficiente de desempenho máximo: ciclo de bomba de calor operando entre dois reservatórios.
$\oint \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_b = -\sigma_{\text{ciclo}}$		(5.13)	Desigualdade de Clausius.

## ► EXERCÍCIOS: PONTOS DE REFLEXÃO PARA OS ENGENHEIROS

- Qual seria um exemplo de processo que satisfaria o princípio de conservação de energia, porém não observável na natureza?
- Existem riscos associados ao consumo de tomates com amadurecimento induzido por *spray* de etileno? Explique.
- Qual é o custo, por lb, do refrigerante utilizado no ar condicionado do seu carro?
- Que irreversibilidades são encontradas nos seres vivos? Explique.
- A energia gerada pelas células a combustível é limitada pela eficiência de Carnot? Explique.
- A segunda lei impõe limites de desempenho em atletas de elite que buscam recordes mundiais em eventos como atletismo e natação? Explique.
- Que método de aquecimento é melhor em termos de custos operacionais: aquecimento com base em resistência elétrica ou bomba de calor? Explique.
- O que está atrasando o lançamento dos carros movidos a HFC (*hydrogen fuel cells*, células a combustível de hidrogênio) nos grandes salões de carros internacionais?
- Que opções existem para o uso eficiente da energia descarregada por transferência de calor a partir de centrais de potência?
- Qual é a importância da rugosidade da superfície interna de um tubo na determinação do fator de atrito? Explique.
- Um automóvel recomenda o óleo de motor 5W20 enquanto outro especifica o óleo 5W30. O que essas designações significam e porque diferem para os dois automóveis?
- Que fatores influenciam o coeficiente de desempenho *real* alcançado pelos refrigeradores nas residências familiares?
- O que significa a classificação indicada por SEER no rótulo dos refrigeradores em *showrooms* de

eletrodomésticos?

14. Como o *planador térmico* (Seção 5.4) sustenta o movimento subaquático para missões científicas que duram semanas?

#### ► VERIFICAÇÃO DE APRENDIZADO

1. Um ciclo de bomba de calor reversível opera entre dois reservatórios térmicos, a  $300^{\circ}\text{C}$  e  $500^{\circ}\text{C}$ , respectivamente. O coeficiente de desempenho é, aproximadamente (a) 1,5; (b) 3,87; (c) 2,87; (d) 2,5.
2. Referindo-se à lista da Seção 5.3.1, as irreversibilidades presentes durante a operação de um motor de combustão interna de um automóvel incluem (a) atrito; (b) transferência de calor; (c) reação química; (d) todos os anteriores.
3. Referindo-se à lista da Seção 5.3.1, as irreversibilidades presentes durante a operação de uma fornalha alimentada por gás natural e fluxo forçado de ar incluem, exceto (a) reação química; (b) atrito do fluido; (c) polarização; (d) transferência de calor.
4. Aplicações da Segunda Lei da Termodinâmica incluem (a) a definição da escala de temperatura Kelvin; (b) a previsão da direção de processos; (c) o desenvolvimento de métodos para avaliar a energia interna em termos de propriedades medidas mais facilmente; (d) todos os anteriores.
5. Para o aquecimento de uma residência, qual dispositivo consome menos energia elétrica: uma bomba de calor ou um sistema de resistências? Explique.
6. Um ciclo de potência opera entre um reservatório quente, a  $2000^{\circ}\text{F}$  ( $1093,3^{\circ}\text{C}$ ) e um reservatório frio, a  $1000^{\circ}\text{F}$  ( $537,778^{\circ}\text{C}$ ), respectivamente. Se a eficiência térmica do ciclo é 45%, seu modo de operação (a) é reversível; (b) é irreversível; (c) é impossível; (d) não pode ser determinado a partir dos dados fornecidos.
7. Quando acondicionado no ambiente externo, sob pressão atmosférica, um cubo de gelo funde formando uma fina camada de líquido sobre o chão. À noite, o líquido congela, retornando à temperatura inicial do cubo. A água que formava inicialmente o cubo passa por (a) um ciclo termodinâmico; (b) um processo reversível; (c) um processo irreversível; (d) nenhum dos anteriores.
8. Ampliando a discussão da [Fig. 5.1a](#), como o trabalho deve ser desenvolvido se  $T_i$  for menor que  $T_0$ ?
9. Ampliando a discussão da [Fig. 5.1b](#), como o trabalho deve ser desenvolvido se  $p_i$  for menor que  $p_0$ ?
10. Um gás ideal em um sistema pistão-cilindro expande isotermicamente, realizando trabalho e recebendo uma quantidade equivalente de energia por transferência de calor da atmosfera circundante. Este processo pelo qual o gás passa é uma violação da formulação de Kelvin-Planck da segunda lei? Explique.
11. O coeficiente de desempenho máximo para *qualquer* ciclo operando entre dois reservatórios, um quente e um frio, com temperaturas de  $80^{\circ}\text{F}$  ( $26,7^{\circ}\text{C}$ ) e  $40^{\circ}\text{F}$  ( $4,4^{\circ}\text{C}$ ), respectivamente, é \_\_\_\_\_.
12. Um *processo de estrangulamento* é (a) reversível; (b) internamente reversível; (c) irreversível; (d) isobárico.
13. As escalas absolutas de energia incluem (a) a escala Rankine; (b) a escala de graus centígrados; (c) a escala Fahrenheit; (d) a escala Kelvin.
14. A energia de um sistema isolado permanece constante, porém a variação de entropia deve satisfazer (a)  $\Delta S = 0$ ; (b)  $\Delta S > 0$ ; (c)  $\Delta S = 0$ ; (d)  $\Delta S < 0$ .
15. A eficiência térmica máxima para *qualquer* ciclo operando entre dois reservatórios, um quente e um frio, com temperaturas de  $1000^{\circ}\text{C}$  e  $500^{\circ}\text{C}$ , respectivamente, é \_\_\_\_\_.

16. Um ciclo de potência operando entre dois reservatórios, um quente e um frio, com temperaturas de 500 K e 300 K, respectivamente, recebe 1000 kJ por transferência de calor do reservatório quente. A quantidade de energia dispensada no reservatório frio deve satisfazer (a)  $Q_C > 600$  kJ; (b)  $Q_C \geq 600$  kJ; (c)  $Q_C = 600$  kJ; (d)  $Q_C \leq 600$  kJ.
17. Referindo-se à Fig. 5.13, se o gás obedece ao comportamento descrito pelo modelo de gases ideais, com  $p_1 = 3$  atm,  $v_1 = 4,2$  ft<sup>3</sup>/lb,  $p_4 = 1$  atm, o volume no estado 4 será \_\_\_\_\_ ft<sup>3</sup>/lb.
18. Referindo-se à Fig. 5.15, se as pressões do aquecedor e o condensador forem 50 bar e 0,5 bar, respectivamente, a eficiência térmica do ciclo seria \_\_\_\_\_.
19. Uma das irreversibilidades em um sistema de caixa de marchas é (a) reação química; (b) expansão livre de um gás; (c) mistura; (d) atrito.
20. O coeficiente de desempenho de um ciclo de refrigeração reversível é sempre (a) maior que; (b) menor que; (c) igual ao coeficiente de desempenho de um ciclo de refrigeração irreversível operando entre os mesmos dois reservatórios térmicos.
21. Quando fluxos de gás quente e frio passam em contracorrente em um trocador de calor, ambos sob pressão constante, a principal irreversibilidade interna no trocador de calor é \_\_\_\_\_.
22. Um telefone celular está inicialmente com a bateria completamente carregada. Após um período de uso, a bateria é recarregada até o seu estado inicial. A quantidade de energia para recarregar a bateria é (a) menor que; (b) igual a; (c) maior que a quantidade de energia necessária para o funcionamento do telefone. Explique.
23. Referindo-se à Fig. 5.12, se a temperatura correspondente ao ponto b for 1225°C, a eficiência de Carnot é \_\_\_\_\_ %.
24. A eficiência térmica de um sistema que está submetido a um ciclo de potência recebendo 1000 kJ de energia por transferência de calor de um reservatório a 1000 K e dispensando 500 kJ de energia por transferência de calor para um reservatório frio a 400 K é \_\_\_\_\_.
25. O coeficiente de desempenho de um ciclo de bomba de calor irreversível é sempre (a) igual a; (b) maior que; (c) menor que o coeficiente de desempenho de um ciclo de bomba de calor reversível que opere entre os mesmos dois reservatórios térmicos.
26. Para um sistema fechado, a entropia (a) pode ser produzida dentro do sistema; (b) deve ser transferida através da fronteira; (c) pode permanecer constante através do sistema; (d) todos os anteriores.
27. Referindo-se à lista da Seção 5.3.1, as irreversibilidades significativas presentes durante a operação de um refrigerador doméstico incluem (a) deformação inelástica; (b) reação química; (c) transferência de calor devido a uma diferença finita de temperatura; (d) nenhum dos anteriores.
28. Como mostrado na Fig. P5.28C, a transferência de energia entre os reservatórios quente e frio ocorre através de uma haste com a superfície exterior isolada e sob regime permanente. A principal fonte de irreversibilidades é \_\_\_\_\_.

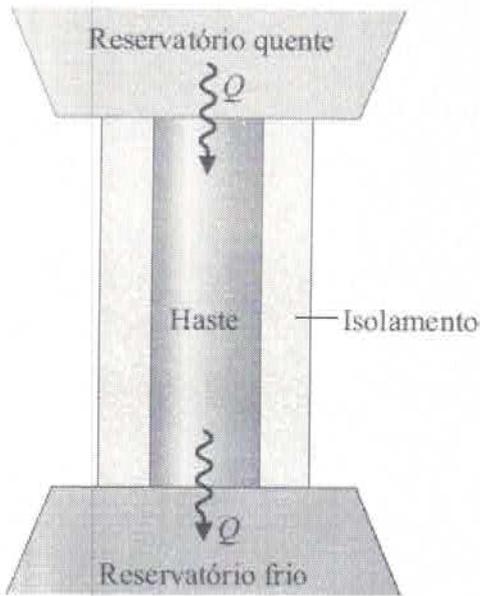


Fig. P5.28C

29. Como mostrado na Fig. P5.29C, um tanque rígido e isolado é dividido em duas metades, uma contendo gás e a outra evacuada. Quando a válvula de conexão é aberta, o gás expande e preenche todo o volume. A principal fonte de irreversibilidades nesse sistema é \_\_\_\_\_.

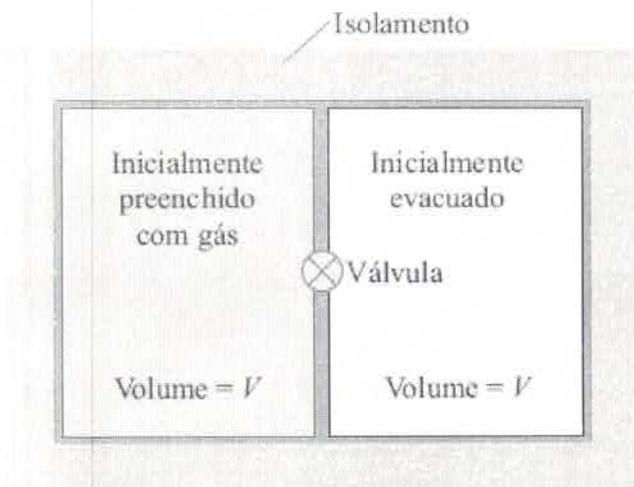


Fig. P5.29C

30. Como mostrado na Fig. P5.30C, quando o vapor no sistema pistão-cilindro expande, a transmissão converte o movimento do pistão em movimento rotatório que aciona as hélices que se movimentam dentro de um líquido viscoso. Após esse estágio, o vapor retorna ao seu estado inicial. O vapor passou por um processo reversível? Explique.

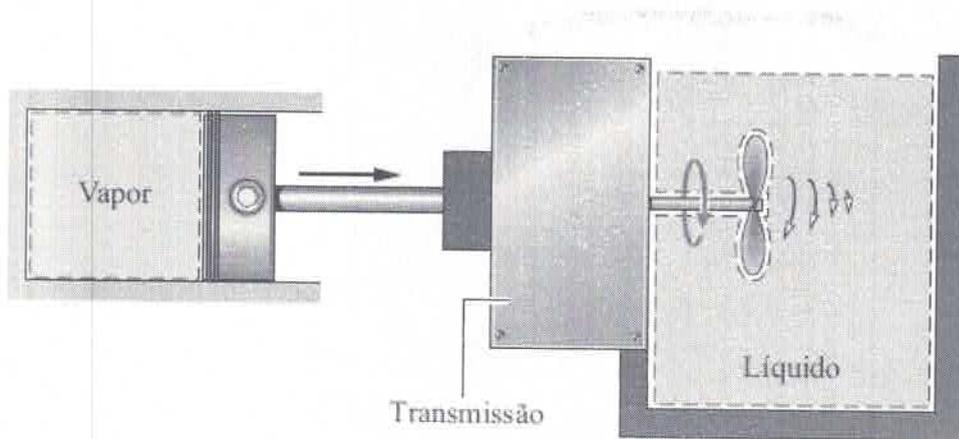


Fig. P5.30C

Nas questões 31 a 50, indique se cada afirmativa é verdadeira ou falsa. Explique.

31. A variação de entropia de um sistema fechado é a mesma para qualquer processo entre dois estados finais determinados.
32. A eficiência térmica máxima de qualquer ciclo de potência operando entre dois reservatórios, um frio e um quente, a  $500^{\circ}\text{C}$  e  $1000^{\circ}\text{C}$ , respectivamente, é 50%.
33. Um processo em um sistema fechado que não obedece à segunda lei da termodinâmica necessariamente viola a primeira lei da termodinâmica.
34. Uma formulação da segunda lei da termodinâmica afirma que a propriedade extensiva entropia é *produzida* em sistemas sempre que irreversibilidades internas estiverem presentes.
35. Em princípio, a *desigualdade de Clausius* se aplica a qualquer ciclo.
36. A escala Kelvin é a única escala absoluta de temperatura.
37. O atrito associado ao escoamento de fluidos através de tubos e ao redor de objetos constitui um tipo de irreversibilidade.
38. Não há irreversibilidades em um sistema submetido a um processo *internamente reversível*.
39. O *segundo* corolário de Carnot estabelece que todos os ciclos de potência operando entre os mesmos reservatórios térmicos possuem a mesma eficiência térmica.
40. Quando se observam sistemas sem a ação de forças externas, eles tendem a passar por variações espontâneas até que o equilíbrio seja atingido, tanto internamente quanto em relação às vizinhanças.
41. Processos internamente reversíveis não ocorrem realmente, porém, servem como casos limite hipotéticos à medida que irreversibilidades internas são progressivamente reduzidas.
42. Para ciclos reversíveis de refrigeração e potência operando entre os mesmos reservatórios térmicos, a relação entre os coeficientes de desempenho é  $\gamma_{\text{máx}} = \beta_{\text{máx}} + 1$ .
43. O coeficiente de desempenho máximo para *qualquer* ciclo de refrigeração operando entre dois reservatórios a  $40^{\circ}\text{F}$  ( $4,4^{\circ}\text{C}$ ) e  $80^{\circ}\text{F}$  ( $26,7^{\circ}\text{C}$ ) é, aproximadamente, 12,5.
44. Massa, energia, entropia e temperatura são exemplos de propriedades extensivas.
45. Todos os processos que respeitem o princípio de conservação da energia e o princípio de conservação da massa

podem ocorrer na natureza.

46. A formulação de Clausius da Segunda Lei nega a possibilidade de transferência de energia por calor de um corpo mais frio para um corpo mais quente.

47. Quando um sistema *isolado* é submetido a um processo, os valores de energia e entropia somente podem aumentar ou permanecer iguais.

48. As formulações de Kelvin-Planck e Clausius para a segunda lei da termodinâmica são equivalentes, pois a violação de uma das duas implica na violação da outra.

49. A eficiência de Carnot limita também a eficiência de turbinas eólicas na geração de eletricidade.

50. Na Eq. 5.13, a condição  $\sigma_{\text{ciclo}} = 0$  se refere a um ciclo que você não vai encontrar no seu emprego.

► **PROBLEMAS: DESENVOLVENDO HABILIDADES PARA ENGENHARIA**

**Explorando a Segunda Lei**

5.1 Complete a demonstração da equivalência entre os enunciados de Clausius e Kelvin-Planck da segunda lei dados na Seção 5.2.2, mostrando que uma violação do enunciado de Kelvin-Planck implica na violação do enunciado de Clausius.

5.2 A Fig. P5.2 mostra a proposta de um sistema submetido a um ciclo enquanto opera entre um reservatório frio e um quente. O sistema recebe 500 kJ do reservatório frio e descarta 400 kJ no reservatório quente, enquanto fornece trabalho para as vizinhanças, equivalente a 100 kJ. Não há outras formas de transferência de energia entre o sistema e as vizinhanças. Avalie o desempenho do sistema utilizando

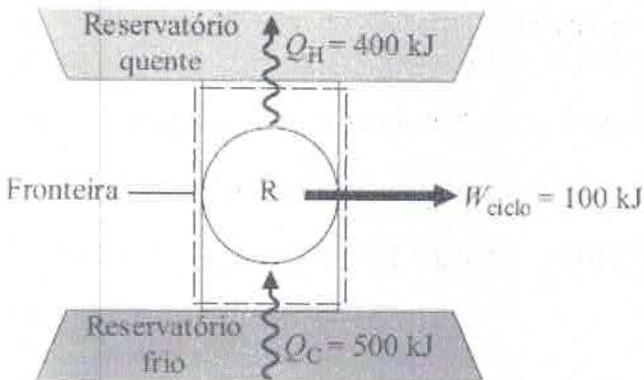


Fig. P5.2

- (a) a formulação de Clausius da segunda lei;
- (b) a formulação de Kelvin-Planck da segunda lei.

5.3 Classifique os seguintes processos de um sistema fechado como *possível*, *impossível* ou *indeterminado*.

	Variação de Entropia	Transferência de Entropia	Produção de Entropia
(a)	>0	0	
(b)	<0		>0

(c)	0	>0	
(d)	>0	>0	
(e)	0	<0	
(f)	>0		<0
(g)	<0	<0	

5.4 Complete a discussão do enunciado de Kelvin–Planck da segunda lei na Seção 5.4, mostrando que se um sistema percorre um ciclo termodinâmico reversível enquanto se comunica termicamente com um único reservatório aplica-se a igualdade na Eq. 5.3.

5.5 Como mostrado na Fig. P5.5, um ciclo reversível de potência R e um ciclo irreversível de potência I operam entre os mesmos reservatórios térmicos. O ciclo I tem uma eficiência térmica igual a um terço da eficiência térmica do ciclo R.

- (a) Se cada ciclo recebe a mesma quantidade de energia por transferência de calor do reservatório quente, determine qual dos ciclos (i) fornece a maior quantidade de trabalho; (ii) descarta a maior quantidade de energia por transferência de calor para o reservatório frio.
- (b) Se cada ciclo fornece a mesma quantidade de trabalho líquido, determine qual ciclo (i) recebe a maior quantidade de energia por transferência de calor do reservatório quente; (ii) descarta a maior quantidade de energia por transferência de calor para o reservatório frio.

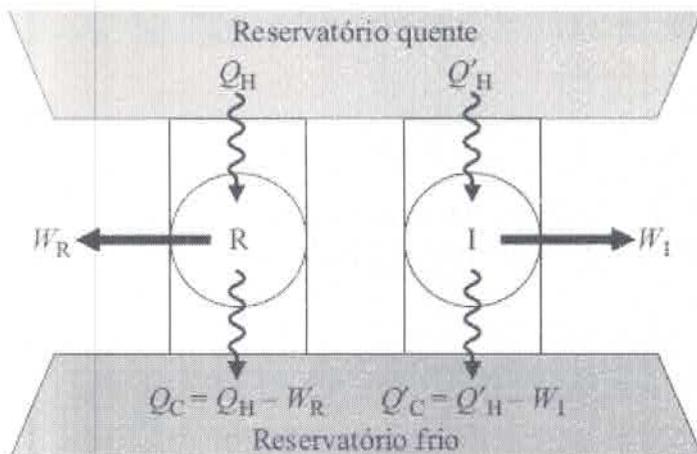


Fig. P5.5

5.6 Um ciclo de potência I e um ciclo de potência reversível R operam entre os mesmos dois reservatórios, como ilustrado na Fig. 5.6. O ciclo I tem uma eficiência térmica igual a dois terços daquela do ciclo R. Usando o enunciado de Kelvin–Planck da segunda lei, mostre que o ciclo I tem que ser irreversível.

5.7 Forneça os detalhes deixados para o leitor na demonstração do segundo corolário de Carnot dado no boxe da Seção 5.6.2.

- 5.8 Usando o enunciado de Kelvin–Planck da segunda lei da termodinâmica, demonstre os seguintes corolários:
- (a) O coeficiente de desempenho de um ciclo de refrigeração irreversível é sempre menor do que o coeficiente de desempenho de um ciclo de refrigeração reversível quando ambos trocam energia por transferência de calor com os mesmos dois reservatórios.
  - (b) Todos os ciclos de refrigeração reversíveis que operam entre os mesmos dois reservatórios têm o mesmo coeficiente de desempenho.
  - (c) O coeficiente de desempenho de um ciclo de bomba de calor irreversível é sempre menor do que o coeficiente de desempenho de um ciclo de bomba de calor reversível quando ambos trocam energia por transferência de calor com os mesmos dois reservatórios.
  - (d) Todos os ciclos de bomba de calor reversíveis que operam entre os mesmos dois reservatórios têm o mesmo coeficiente de desempenho.

5.9 Utilize a formulação de Kelvin–Planck da segunda lei para mostrar que o seguinte processo é irreversível.

- (a) Como mostrado na Fig. P5.9a, um reservatório térmico quente encontra-se separado de um reservatório térmico frio por uma haste cilíndrica isolada externamente. A transferência de energia entre os reservatórios acontece através da haste, a qual permanece em regime permanente.

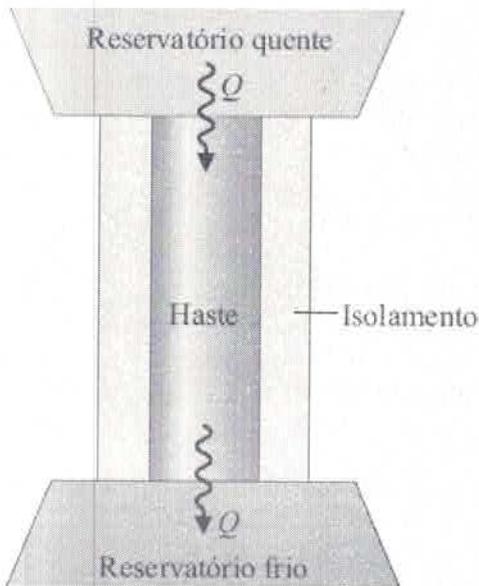


Fig. P5.9a

- (b) Como mostrado na Fig. 5.9b, um tanque rígido isolado é dividido à metade. Um dos lados encontra-se inicialmente evacuado, enquanto o outro é inicialmente preenchido com gás. Após a abertura da válvula, o gás se expande e preenche todo o volume.

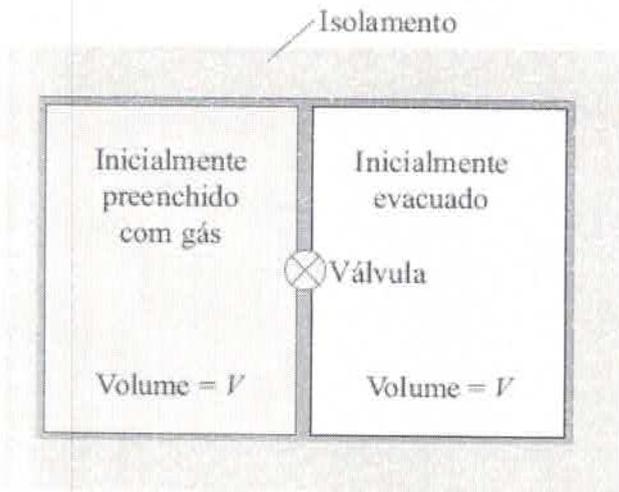


Fig. P5.9b

5.10 A Fig. P5.10 mostra a representação de dois ciclos de potência, designados 1 e 2, operando em série, juntamente a três reservatórios térmicos. A transferência de calor para o ciclo 2 é igual à transferência de calor do ciclo 1. Todas as transferências de calor são positivas no sentido indicado pelas setas na figura.

- (a) Determine uma expressão para a eficiência térmica de um ciclo consistindo em ambos os ciclos 1 e 2, expressa em termos das eficiências térmicas de cada um dos ciclos.
- (b) Se ambos os ciclos 1 e 2 são reversíveis, aplique o resultado obtido na parte (a) para obter uma expressão para a eficiência térmica total do ciclo em termos das temperaturas  $T_H$ ,  $T$  e  $T_C$ . Comente.
- (c) Se ambos os ciclos 1 e 2 são reversíveis e possuem a mesma eficiência térmica, obtenha uma expressão para a temperatura  $T$  em termos de  $T_H$  e  $T_C$ .

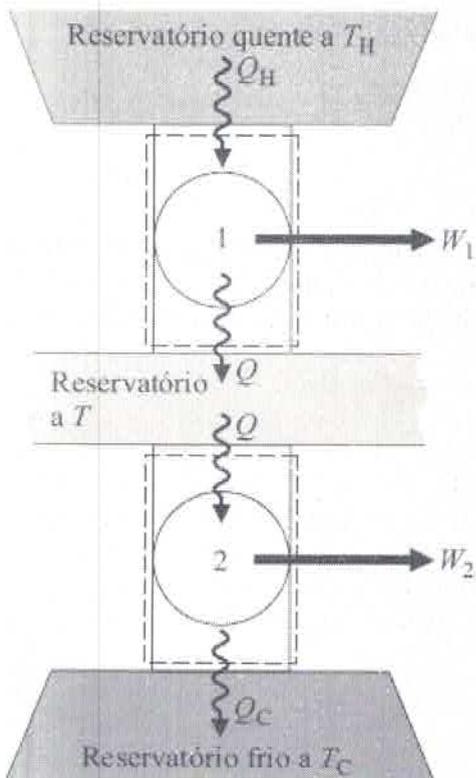


Fig. P5.10

5.11 Dois ciclos reversíveis de refrigeração encontram-se arranjados em série. O primeiro ciclo recebe energia por transferência de calor de um reservatório frio a uma temperatura  $T_C$  e descarta energia por transferência de calor a um reservatório com uma temperatura intermediária  $T$  maior que  $T_C$ . O segundo ciclo recebe energia por transferência de calor do reservatório com temperatura  $T$  e descarta energia por transferência de calor em um reservatório com uma temperatura  $T_H$ , mais alta que  $T$ . Obtenha uma expressão para o coeficiente de desempenho de um único ciclo de refrigeração operando entre os reservatórios com  $T_H$  e  $T_C$ , em termos dos coeficientes dos dois ciclos individuais.

5.12 Repita o problema anterior para o caso de dois ciclos reversíveis de bomba de calor.

5.13 Dois ciclos reversíveis operam entre os reservatórios quente e frio nas temperaturas  $T_H$  e  $T_C$ , respectivamente.

(a) Se um é um ciclo de potência e o outro é um ciclo de bomba de calor, qual é a relação entre os coeficientes de desempenho do ciclo de bomba de calor e a eficiência térmica do ciclo de potência?

(b) Se um é um ciclo de refrigeração e o outro é um ciclo de bomba de calor, qual é a relação entre seus coeficientes de desempenho?

5.14 A Fig. P5.14 mostra um sistema que consiste em um ciclo de potência reversível acionando uma bomba de calor reversível. O ciclo de potência recebe  $\dot{Q}_s$  por transferência de calor a  $T_s$  da fonte de alta temperatura e fornece  $\dot{Q}_1$  para uma residência a  $T_d$ . A bomba de calor recebe  $\dot{Q}_0$  do exterior a  $T_0$  e fornece  $\dot{Q}_2$  para a residência. Obtenha uma expressão para a razão entre o total de calor fornecido para a residência e a transferência de calor produzida pela fonte de alta temperatura:  $(Q_1 + Q_2)/Q_s$  em termos das temperaturas  $T_s/T_d$  e  $T_0$ .

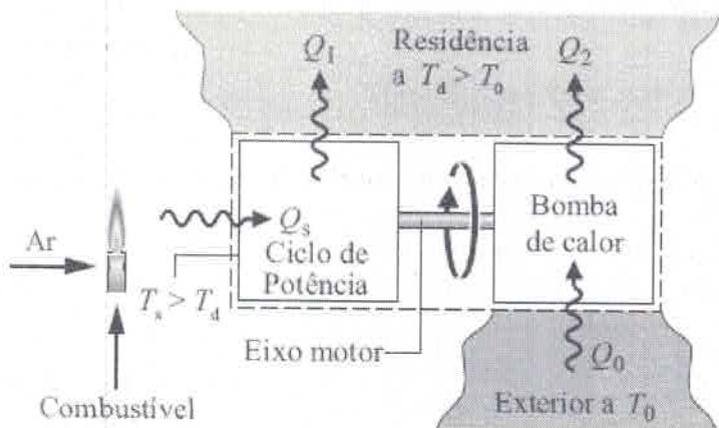


Fig. P5.14

5.15 Para aumentar a eficiência térmica de um ciclo de potência reversível que opera entre reservatórios a  $T_H$  e  $T_C$ , você aumentaria  $T_H$  enquanto mantivesse  $T_C$  constante ou diminuiria  $T_C$  enquanto mantivesse  $T_H$  constante? Existe algum *limite natural* para o aumento da eficiência térmica que pudesse ser alcançado dessa forma?

5.16 Antes de apresentar a escala de temperatura agora conhecida como escala Kelvin, Kelvin sugeriu uma escala *logarítmica* na qual a função  $\Psi$  da Seção 5.8.1. toma a forma

$$\Psi = \exp \theta_C / \exp \theta_H$$

em que  $\theta_H$  e  $\theta_C$  representam, respectivamente, as temperaturas dos reservatórios quente e frio nessa escala.

(a) Mostre que a relação entre a temperatura Kelvin  $T$  e a temperatura  $\theta$  na escala logarítmica é

$$\theta = \ln T + C$$

em que  $C$  é uma constante.

(b) Na escala Kelvin, as temperaturas variam de 0 a  $+\infty$ . Determine a faixa de valores de temperatura na escala logarítmica.

(c) Obtenha uma expressão para a eficiência térmica de qualquer sistema percorrendo um ciclo de potência reversível enquanto opera entre reservatórios às temperaturas  $\theta_H$  e  $\theta_C$  na escala logarítmica.

### Aplicações do Ciclo de Potência

**5.17** Os dados listados a seguir são afirmados para um ciclo de potência que opera entre reservatórios quente e frio a 1500 K e 450 K, respectivamente. Para cada caso, determine se o ciclo opera *reversivelmente*, *irreversivelmente* ou é *impossível*.

(a)  $Q_H = 600 \text{ kJ}$ ,  $W_{\text{ciclo}} = 300 \text{ kJ}$ ,  $Q_C = 300 \text{ kJ}$ .

(b)  $Q_H = 400 \text{ kJ}$ ,  $W_{\text{ciclo}} = 280 \text{ kJ}$ ,  $Q_C = 120 \text{ kJ}$ .

(c)  $Q_H = 700 \text{ kJ}$ ,  $W_{\text{ciclo}} = 300 \text{ kJ}$ ,  $Q_C = 500 \text{ kJ}$ .

(d)  $Q_H = 800 \text{ kJ}$ ,  $W_{\text{ciclo}} = 600 \text{ kJ}$ ,  $Q_C = 200 \text{ kJ}$ .

**5.18** Um ciclo de potência recebe a energia  $Q_H$  por transferência de calor de um reservatório quente a  $T_H = 1200^\circ\text{R}$  ( $393,5^\circ\text{C}$ ) e rejeita a energia  $Q_C$  por transferência de calor para um reservatório frio a  $T_C = 400^\circ\text{R}$  ( $-50,9^\circ\text{C}$ ). Para cada um dos seguintes casos, determine se o ciclo opera *reversivelmente*, *irreversivelmente* ou é *impossível*.

(a)  $Q_H = 900 \text{ Btu}$  (949,5 kJ),  $W_{\text{ciclo}} = 450 \text{ Btu}$  (474,8 kJ)

(b)  $Q_H = 900 \text{ Btu}$  (949,5 kJ),  $Q_C = 300 \text{ Btu}$  (316,5 kJ)

(c)  $W_{\text{ciclo}} = 600 \text{ Btu}$  (633 kJ),  $Q_C = 400 \text{ Btu}$  (422 kJ)

(d)  $\eta = 70\%$

**5.19** Um ciclo de potência que opera em regime permanente recebe energia por transferência de calor a uma taxa  $\dot{Q}_H$  a  $T_H = 1800 \text{ K}$  e rejeita energia por transferência de calor para um reservatório frio a uma taxa  $\dot{Q}_C$  a  $T_C = 600 \text{ K}$ . Para cada um dos seguintes casos, determine se o ciclo opera *reversivelmente*, *irreversivelmente* ou é *impossível*.

(a)  $\dot{Q}_H = 500 \text{ kW}$ ,  $\dot{Q}_C = 100 \text{ kW}$ .

(b)  $\dot{Q}_H = 500 \text{ kW}$ ,  $\dot{W}_{\text{ciclo}} = 250 \text{ kW}$ ,  $\dot{Q}_C = 200 \text{ kW}$ .

(c)  $\dot{W}_{\text{ciclo}} = 350 \text{ kW}$ ,  $\dot{Q}_C = 150 \text{ kW}$ .

(d)  $\dot{Q}_H = 500 \text{ kW}$ ,  $\dot{Q}_C = 200 \text{ kW}$ .

**5.20** Conforme ilustrado na Fig. P5.20, um ciclo de potência reversível recebe a energia  $Q_H$  por transferência de calor de um reservatório quente a  $T_H$  e rejeita a energia  $Q_C$  por transferência de calor para um reservatório frio a  $T_C$ .

(a) Se  $T_H = 1600 \text{ K}$  e  $T_C = 400 \text{ K}$ , qual é a eficiência térmica?

- (b) Se  $T_H = 500^\circ\text{C}$ ,  $T_C = 20^\circ\text{C}$  e  $W_{\text{ciclo}} = 1000 \text{ kJ}$ , quanto é  $Q_H$  e  $Q_C$ , ambos em kJ?
- (c) Se  $\eta = 60\%$  e  $T_C = 40^\circ\text{F}$  ( $4,4^\circ\text{C}$ ), quanto é  $T_H$ , em  $^\circ\text{F}$ ?
- (d) Se  $\eta = 40\%$  e  $T_H = 727^\circ\text{C}$ , quanto é  $T_C$ , em  $^\circ\text{C}$ ?

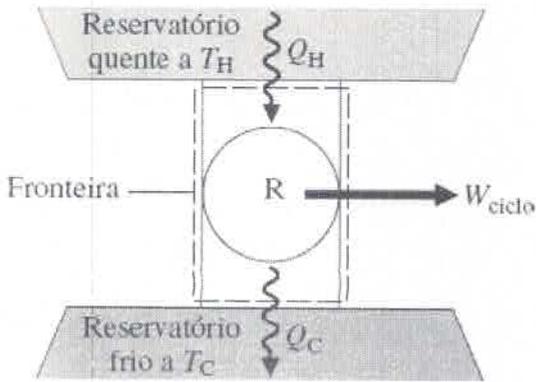


Fig. P5.20

- 5.21 Um ciclo de potência reversível, cuja eficiência térmica é de 40%, recebe 50 kJ por transferência de calor de um reservatório quente a 600 K e rejeita energia por transferência de calor para um reservatório frio a temperatura  $T_C$ . Determine a energia rejeitada, em kJ, e  $T_C$ , em K.
- 5.22 Em uma dada latitude, o magma existe há vários quilômetros abaixo da crosta terrestre a uma temperatura de  $1100^\circ\text{C}$ , enquanto a temperatura média da atmosfera próxima à superfície da Terra é de aproximadamente  $15^\circ\text{C}$ . Determine a eficiência térmica máxima para *qualquer* ciclo de potência operando entre um reservatório quente e um frio nestas temperaturas.
- 5.23 Em princípio, pode-se gerar potência utilizando-se a diminuição da temperatura da água do oceano com a sua profundidade. Em certo ponto, a temperatura da água próxima ao nível da superfície é  $60^\circ\text{F}$  ( $15,6^\circ\text{C}$ ), enquanto a uma profundidade de 1800 ft (548,64 m) a temperatura é  $35^\circ\text{F}$  ( $1,7^\circ\text{C}$ ). Determine a eficiência térmica máxima para *qualquer* ciclo de potência operando entre um reservatório quente e um frio nestas temperaturas.
- 5.24 Durante o mês de janeiro, em certa localidade no Alasca, ocorrem ventos de  $-30^\circ\text{C}$ . No entanto, vários metros abaixo do solo a temperatura permanece em  $13^\circ\text{C}$ . Um inventor afirma ter desenvolvido um ciclo de potência entre essas temperaturas com uma eficiência térmica de 5%. Avalie essa afirmativa.
- 5.25 Um ciclo reversível de potência opera como mostrado na Fig. 5.5 recebendo energia  $Q_H$  por transferência de calor de um reservatório quente com temperatura  $T_H$  e descartando energia  $Q_C$  por transferência de calor para um reservatório frio a  $40^\circ\text{F}$  ( $4,4^\circ\text{C}$ ). Se  $W_{\text{ciclo}} = 3 Q_C$ , determine (a) a eficiência térmica e (b)  $T_H$  em  $^\circ\text{F}$ .
- 5.26 Conforme ilustra a Fig. P5.26, dois ciclos reversíveis são colocados em série de maneira que cada um produza a mesma quantidade de trabalho líquido,  $W_{\text{ciclo}}$ . O primeiro ciclo recebe a energia  $Q_H$  por transferência de calor de um reservatório quente  $1000^\circ\text{R}$  ( $282,4^\circ\text{C}$ ) e rejeita a energia  $Q$  por transferência de calor para um reservatório a uma temperatura intermediária  $T$ . O segundo ciclo recebe a energia  $Q$  por transferência de calor do reservatório à temperatura  $T$  e rejeita a energia  $Q_C$  por transferência de calor para um reservatório a  $400^\circ\text{R}$  ( $250,9^\circ\text{C}$ ). Todas as transferências de energia são positivas nos sentidos das setas. Determine
- (a) a temperatura intermediária  $T$ , em  $^\circ\text{R}$ , e as eficiências térmicas dos dois ciclos de potência.
- (b) a eficiência térmica de um *único* ciclo de potência reversível operando entre os reservatórios quente e frio a  $1000^\circ\text{R}$  e  $400^\circ\text{R}$ , respectivamente. Determine também o trabalho líquido desenvolvido pelo único ciclo, expresso em

termos do trabalho líquido desenvolvido por cada um dos dois ciclos,  $W_{\text{ciclo}}$ .

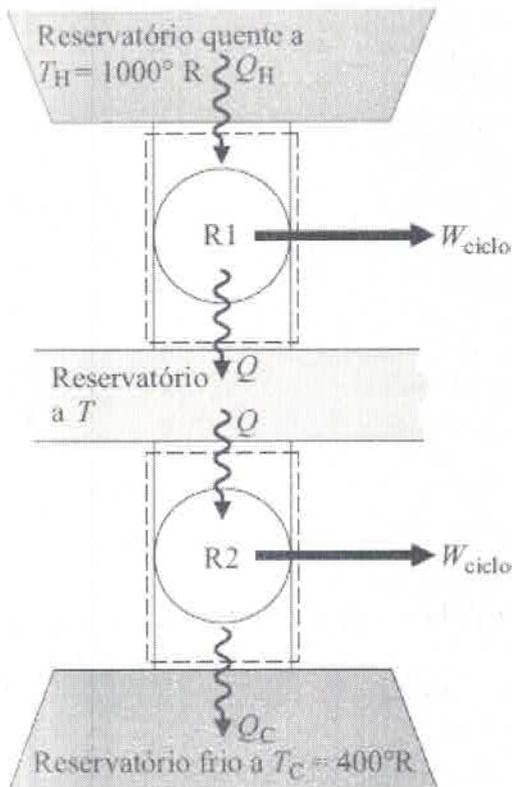


Fig. P5.26

5.27 Dois ciclos reversíveis são colocados em série. O primeiro ciclo recebe energia por transferência de calor de um reservatório quente a  $1000^\circ R$  ( $282,4^\circ C$ ) e rejeita energia por transferência de calor para um reservatório a uma temperatura  $T$  ( $< 1000^\circ R$ ). O segundo ciclo recebe energia por transferência de calor do reservatório à temperatura  $T$  e rejeita energia por transferência de calor para um reservatório a  $500^\circ R$  ( $4,6^\circ C$ ) ( $< T$ ). A eficiência térmica do primeiro ciclo é de 50% maior do que a do segundo ciclo. Determine

(a) a temperatura intermediária  $T$ , em  $^\circ R$ , e as eficiências térmicas dos dois ciclos de potência.

(b) a eficiência térmica de um único ciclo de potência reversível operando entre os reservatórios quente e frio a  $1000^\circ R$  e  $500^\circ R$ , respectivamente.

5.28 Afirma-se que os dados listados abaixo são referentes a ciclos de potência operando entre um reservatório quente e um frio, a  $1000\text{ K}$  e  $400\text{ K}$ , respectivamente. Para cada caso, determine se o ciclo respeita a primeira e a segunda lei da termodinâmica.

(a)  $Q_H = 300\text{ kJ}$ ,  $W_{\text{ciclo}} = 160\text{ kJ}$ ,  $Q_C = 140\text{ kJ}$ .

(b)  $Q_H = 300\text{ kJ}$ ,  $W_{\text{ciclo}} = 180\text{ kJ}$ ,  $Q_C = 120\text{ kJ}$ .

(c)  $Q_H = 300\text{ kJ}$ ,  $W_{\text{ciclo}} = 170\text{ kJ}$ ,  $Q_C = 140\text{ kJ}$ .

(d)  $Q_H = 300\text{ kJ}$ ,  $W_{\text{ciclo}} = 200\text{ kJ}$ ,  $Q_C = 100\text{ kJ}$ .

5.29 Um ciclo de potência opera entre a água da superfície de um lago à temperatura de  $300\text{ K}$  e a água a uma profundidade cuja temperatura é de  $285\text{ K}$ . Em regime permanente, o ciclo desenvolve  $10\text{ kW}$  de potência de saída enquanto rejeita  $14.400\text{ kJ/min}$  de energia por transferência de calor para a água com temperatura inferior.

Determine (a) a eficiência térmica do ciclo de potência e (b) a eficiência térmica máxima para qualquer ciclo de potência.

5.30 Um inventor afirma ter desenvolvido um ciclo de potência que tem uma eficiência térmica de 40%, enquanto opera entre os reservatórios quente e frio nas temperaturas  $T_H$  e  $T_C = 300$  K, respectivamente, em que  $T_H$  é (a) 900 K, (b) 500 K, (c) 375 K. Analise a afirmativa para cada caso.

5.31 Um ciclo de potência recebe 1000 Btu (1055,06 kJ) por transferência de calor de um reservatório a  $1000^\circ\text{F}$  ( $537,8^\circ\text{C}$ ) e descarta energia por transferência de calor para um reservatório a  $300^\circ\text{F}$  ( $148,9^\circ\text{C}$ ). A eficiência térmica do ciclo é 75% daquela observada para um ciclo reversível de potência operando entre as mesmas temperaturas. (a) Para o ciclo real, determine a eficiência térmica e a quantidade de energia descartada no reservatório frio, em Btu. (b) Repita os seus cálculos para o ciclo reversível de potência.

5.32 Com relação ao ciclo da Fig. 5.13, se  $p_1 = 2$  bar,  $v_1 = 0,31$  m<sup>3</sup>/kg,  $T_H = 475$  K,  $Q_H = 150$  kJ, e o gás é o ar, que obedece o modelo de gás ideal, determine  $T_C$ , em K, o trabalho líquido do ciclo, em kJ, e a eficiência térmica.

5.33 Afirma-se que, em regime permanente, um novo ciclo de potência desenvolve uma potência líquida de (a) 4 hp; (b) 5 hp para uma taxa de transferência de calor de 300 Btu/min entre dois reservatórios térmicos, a  $1500^\circ\text{R}$  ( $560,2^\circ\text{C}$ ) e  $500^\circ\text{R}$  ( $4,6^\circ\text{C}$ ), respectivamente. Avalie a afirmação.

5.34 Um ciclo de potência opera entre os reservatórios quente e frio a 500 K e 310 K, respectivamente. Em regime permanente, o ciclo desenvolve uma potência de saída de 0,1 MW. Determine a taxa teórica mínima na qual a energia é rejeitada por transferência de calor para o reservatório frio, em MW.

5.35 Em regime permanente, um novo ciclo de potência desenvolve potência a uma taxa de (a) 90 hp; (b) 100 hp; (c) 110 hp para uma taxa de adição de calor de  $5,1 \times 10^5$  Btu/h (149,5 kW), segundo o seu inventor, enquanto opera entre os reservatórios quente e frio a 1000 K e 500 K, respectivamente. Avalie cada uma das afirmativas.

5.36 Um inventor afirma ter desenvolvido um ciclo de potência operando entre os reservatórios quente e frio a 1175 K e 295 K, respectivamente, que fornece uma potência de saída em regime permanente de (a) 28 kW; (b) 31,2 kW, enquanto recebe energia por transferência de calor de um reservatório quente a uma taxa de 150.000 kJ/h. Avalie estas afirmativas.

5.37 Em regime permanente, um ciclo de potência desenvolve uma potência de saída de 10 kW enquanto recebe energia por transferência de calor a uma taxa de 10 kJ *por ciclo de operação* a partir de uma fonte na temperatura  $T$ . O ciclo rejeita energia por transferência de calor para a água de resfriamento a uma temperatura mais baixa, correspondente a 300 K. Se existem 100 ciclos por minuto, qual o valor teórico mínimo para  $T$ , em K?

5.38 Um ciclo de potência opera entre os reservatórios quente e frio a 600 K e 300 K, respectivamente. Em regime permanente, o ciclo desenvolve uma potência de saída de 0,45 MW, enquanto recebe energia por transferência de calor de um reservatório quente a uma taxa de 1 MW.

(a) Determine a eficiência térmica e a taxa na qual energia é rejeitada por transferência de calor para o reservatório frio, em MW.

(b) Compare os resultados da parte (a) com aqueles de um ciclo de potência reversível operando entre esses reservatórios e recebendo a mesma taxa de transferência de calor do reservatório quente.

5.39 Conforme ilustrado na Fig. P5.39, um sistema que percorre um ciclo de potência desenvolve a potência líquida de saída de 1 MW enquanto recebe energia por transferência de calor de vapor d'água condensando de vapor saturado para líquido saturado à pressão de 100 kPa. A energia é descarregada do ciclo por transferência de calor para um lago próximo a  $17^\circ\text{C}$ . Essas são as únicas trocas de calor significantes. Os efeitos de energia cinética e de energia potencial 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.

5.40 Um ciclo de potência operando em regime permanente recebe energia por transferência de calor a partir da combustão de um combustível a uma temperatura média de 1000 K. Por questões ambientais, o ciclo descarrega energia por transferência de calor para a atmosfera a 300 K a uma taxa que não seja superior a 60 MW. Com base no custo do combustível, o custo para fornecer a transferência de calor é \$4,50 por GJ. A potência desenvolvida pelo ciclo é estimada em \$0,10 por kW · h. Para 8000 horas de operação anual, determine para qualquer ciclo como esse, em \$ por ano, (a) o valor máximo da potência gerada e (b) o custo mínimo do combustível.

5.41 Em regime permanente, uma usina de 750 MW recebe energia por transferência de calor a partir da combustão de um combustível a uma temperatura média de 317°C. Como ilustra a Fig. P5.41, a usina descarrega energia por transferência de calor para um rio, cuja vazão mássica é  $1,65 \times 10^5$  kg/s. A montante da usina o rio está a 17°C. Determine o aumento na temperatura do rio,  $\Delta T$ , observável para essa transferência de calor, em K e esboce um gráfico dessa variação *versus* a eficiência térmica da usina, de 20% para cima.

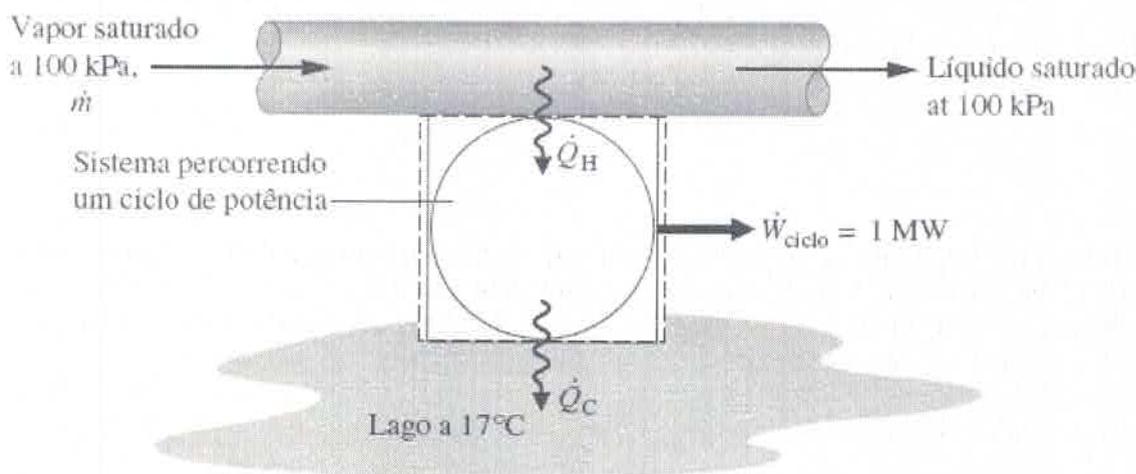


Fig. P5.39

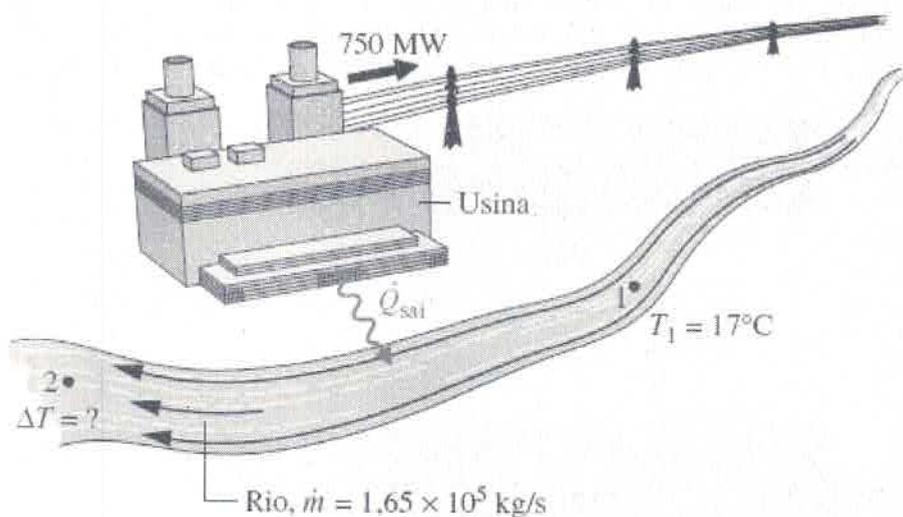


Fig. P5.41

5.42 A Fig. P5.42 mostra um sistema para coletar energia solar e utilizá-la para conversão em energia elétrica. O coletor solar recebe uma média anual diária de energia solar da ordem de  $4 \text{ kW} \cdot \text{h}$  por  $\text{m}^2$  de coletor. A energia coletada é transferida sem perdas para uma unidade de armazenamento, mantida a 400 K. O ciclo de potência recebe energia por transferência de calor da unidade de armazenamento e descarta energia por transferência de calor para as vizinhanças a 285 K. O coletor tem dimensões de 15 m por 25 m. Se a eletricidade gerada puder ser vendida a 8 centavos por  $\text{kW} \cdot \text{h}$ , elabore um gráfico do valor (em \$) gerado anualmente, contra a eficiência térmica do ciclo de

potência. Comente.

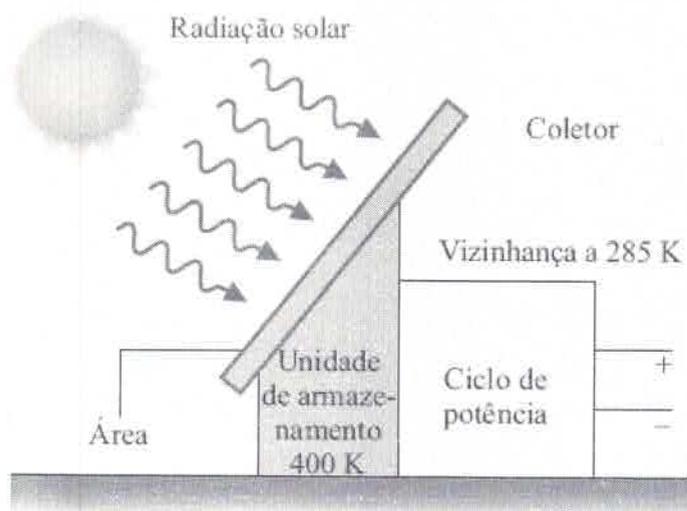


Fig. P5.42

### Aplicações dos Ciclos de Refrigeração e Bomba de Calor

5.43 Um ciclo de refrigeração operando entre dois reservatórios recebe a energia  $Q_C$  do reservatório frio a  $T_C = 275$  K e rejeita a energia  $Q_H$  para o reservatório quente a  $T_H = 315$  K. Para cada um dos seguintes casos, determine se o ciclo opera *reversivelmente*, *irreversivelmente* ou *é impossível*:

- (a)  $Q_C = 1000$  kJ,  $W_{\text{ciclo}} = 80$  kJ.
- (b)  $Q_C = 1200$  kJ,  $Q_H = 2000$  kJ.
- (c)  $Q_H = 1575$  kJ,  $W_{\text{ciclo}} = 200$  kJ.
- (d)  $\beta = 6$ .

5.44 Um ciclo de refrigeração reversível opera entre os reservatórios frio e quente nas temperaturas  $T_C$  e  $T_H$ , respectivamente.

- (a) Se o coeficiente de desempenho for 3,5 e  $T_H = -40^\circ\text{F}$  ( $-40^\circ\text{C}$ ), determine  $T_C$ , em  $^\circ\text{F}$ .
- (b) Se  $T_C = -30^\circ\text{C}$  e  $T_H = 30^\circ\text{C}$ , determine o coeficiente de desempenho.
- (c) Se  $Q_C = 500$  Btu (527,5 kJ),  $Q_H = 800$  Btu (844 kJ) e  $T_C = 20^\circ\text{F}$  ( $26,7^\circ\text{C}$ ), determine  $T_H$ , em  $^\circ\text{F}$ .
- (d) Se  $T_C = 30^\circ\text{F}$  ( $21,1^\circ\text{C}$ ) e  $T_H = 100^\circ\text{F}$  ( $37,8^\circ\text{C}$ ), determine o coeficiente de desempenho.
- (e) Se o coeficiente de desempenho for 8,9 e  $T_C = -5^\circ\text{C}$ , determine  $T_H$ , em  $^\circ\text{C}$ .

5.45 Em regime permanente, um ciclo de bomba de calor reversível descarrega energia a uma taxa  $\dot{Q}_H$  para um reservatório quente a temperatura  $T_H$ , enquanto recebe energia a uma taxa  $\dot{Q}_C$  de um reservatório frio à temperatura  $T_C$ .

(a) Se  $T_H = 13^\circ\text{C}$  e  $T_C = 2^\circ\text{C}$ , determine o coeficiente de desempenho.

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

(c) Se o coeficiente de desempenho for 10 e  $T_H = 27^\circ\text{C}$ , determine  $T_C$ , em  $^\circ\text{C}$ .

**5.46** Um sistema de aquecimento deve manter o interior de um edifício a  $20^\circ\text{C}$  durante o período em que a temperatura do ar exterior está a  $5^\circ\text{C}$ , sendo a transferência de calor do edifício pelas suas paredes e teto é de  $3 \times 10^6 \text{ kJ}$ . Para esta tarefa, bombas de calor são consideradas para operar entre a edificação e

(a) o solo, a  $15^\circ\text{C}$ .

(b) uma lagoa, a  $10^\circ\text{C}$ .

(c) o ar exterior, a  $5^\circ\text{C}$ .

Para cada caso, avalie o trabalho líquido mínimo necessário para operar *qualquer* bomba de calor, em kJ.

**5.47** Um ciclo de refrigeração rejeita  $Q_H = 500 \text{ Btu}$  por ciclo ( $527,5 \text{ kJ/ciclo}$ ) para um reservatório quente a  $T_H = 540^\circ\text{R}$  ( $26,8^\circ\text{C}$ ), enquanto recebe  $Q_C = 375 \text{ Btu}$  por ciclo ( $395,6 \text{ kJ/ciclo}$ ) de um reservatório frio à temperatura  $T_C$ . Para 10 ciclos de operação, determine (a) o trabalho líquido de entrada, em Btu, e (b) a temperatura teórica mínima  $T_C$ , em  $^\circ\text{R}$ .

**5.48** A eficiência térmica de um ciclo reversível de potência operando entre dois reservatórios térmicos é 20%. Avalie o coeficiente de desempenho de

(a) um ciclo reversível de refrigeração operando entre os mesmos reservatórios térmicos.

(b) um ciclo reversível de bomba de calor operando entre os mesmos reservatórios térmicos.

**5.49** A [Figura P5.49](#) mostra um sistema consistindo em um ciclo de potência e um ciclo de bomba de calor, cada um operando entre dois reservatórios térmicos com temperaturas de  $500 \text{ K}$  e  $300 \text{ K}$ , respectivamente. Todas as transferências de energia são positivas no sentido indicado pelas setas na figura. A tabela que acompanha a figura contém dados para a operação em regime permanente, em kW. Para cada conjunto de dados, determine se o sistema opera respeitando a Primeira e a Segunda Lei da Termodinâmica.

	Ciclo de potência			Ciclo de bomba de calor		
	$\dot{Q}_H$	$\dot{Q}_C$	$\dot{W}_{\text{ciclo}}$	$\dot{Q}'_H$	$\dot{Q}'_C$	$\dot{W}'_{\text{ciclo}}$
(a)	60	40	20	80	60	20
(b)	120	80	40	100	80	20

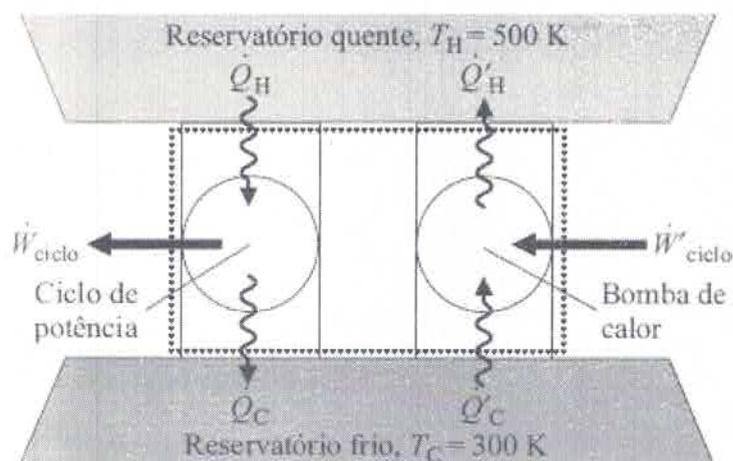


Fig. P5.49

- 5.50 Um inventor desenvolveu um refrigerador capaz de manter seu compartimento do congelador a  $20^{\circ}\text{F}$  ( $26,7^{\circ}\text{C}$ ), enquanto opera em uma cozinha a  $70^{\circ}\text{F}$  ( $21,1^{\circ}\text{C}$ ), e afirma que o dispositivo tem um coeficiente de desempenho de (a) 10, (b) 9,6, (c) 4. Avalie essa afirmação para cada um dos três casos.
- 5.51 Um inventor afirma ter desenvolvido um *freezer* de alimentos que, em regime permanente, requer uma entrada líquida de potência de  $0,6\text{ kW}$  para remover energia por transferência de calor a uma taxa de  $3000\text{ J/s}$  do compartimento do congelador a  $270\text{ K}$ . Avalie essa afirmação para um ambiente a temperatura de  $293\text{ K}$ .
- 5.52 Um inventor afirma ter desenvolvido um refrigerador que, em regime permanente, requer uma entrada líquida de potência de  $0,7\text{ hp}$  ( $0,5\text{ kW}$ ) para remover  $12.000\text{ Btu/h}$  ( $3,5\text{ kW}$ ) de energia por transferência de calor do compartimento do congelador a  $0^{\circ}\text{F}$  ( $-17,8^{\circ}\text{C}$ ) e descarregar energia por transferência de calor para uma cozinha a  $70^{\circ}\text{F}$  ( $21,1^{\circ}\text{C}$ ). Avalie essa afirmação.
- 5.53 Um inventor afirma ter inventado um ciclo de refrigeração operando entre os reservatórios quente e frio a  $300\text{ K}$  e  $250\text{ K}$ , respectivamente, que remove uma quantidade de energia  $Q_C$  por transferência de calor do reservatório frio que é múltiplo do trabalho líquido de entrada – isto é,  $Q_C = N W_{\text{ciclo}}$ , no qual todas as quantidades são positivas. Determine o valor teórico máximo do número  $N$  para qualquer ciclo como esse.
- 5.54 Dados são fornecidos por dois ciclos de refrigeração reversíveis. Um ciclo opera entre os reservatórios quente e frio a  $27^{\circ}\text{C}$  e  $-8^{\circ}\text{C}$ , respectivamente. O outro ciclo opera entre o mesmo reservatório quente a  $27^{\circ}\text{C}$  e um reservatório frio a  $-28^{\circ}\text{C}$ . Se cada refrigerador remove a mesma quantidade de energia por transferência de calor do seu reservatório frio, determine a razão relativa ao trabalho líquido de entrada dos dois ciclos.
- 5.55 Um refrigerador mantém o congelador a  $-26^{\circ}\text{C}$  em um dia em que a temperatura da vizinhança é  $22^{\circ}\text{C}$  removendo energia por meio de transferência de calor do compartimento do seu congelador a uma taxa de  $1,25\text{ kW}$ . Determine a potência teórica mínima, em  $\text{kW}$ , requerida pelo refrigerador em regime permanente.
- 5.56 Um ciclo de refrigeração em regime permanente mantém uma *sala limpa* a  $55^{\circ}\text{F}$  ( $12,8^{\circ}\text{C}$ ), removendo a energia que entra na sala por transferência de calor a partir dos espaços adjacentes a uma taxa de  $0,12\text{ Btu/s}$  ( $126,5\text{ W}$ ). O ciclo rejeita energia por transferência de calor ao exterior em que a temperatura é de  $80^{\circ}\text{F}$  ( $26,7^{\circ}\text{C}$ ).
- (a) Considerando que a taxa na qual o ciclo rejeita energia por transferência de calor para o exterior é de  $0,16\text{ Btu/s}$  ( $168,7\text{ W}$ ), determine a potência requerida, em  $\text{Btu/s}$ .
- (b) Determine a potência requerida para manter a temperatura da sala limpa por meio de um ciclo de refrigeração reversível operando entre reservatórios frio e quente a  $55^{\circ}\text{F}$  e  $80^{\circ}\text{F}$ , respectivamente, e a taxa correspondente na qual energia é rejeitada por transferência de calor para o exterior, ambas em  $\text{Btu/s}$ .

5.57 Para cada kW de potência de entrada para uma máquina de fazer gelo em regime permanente, determine a taxa máxima na qual o gelo pode ser produzido, em lb/h, a partir de água líquida a 32°F (0°C). Admita que 144 Btu/lb (334,9 kJ/kg) de energia devam ser removidos por transferência de calor para congelar água a 32°F e que a vizinhança está a 78°F (25,6°C).

5.58 Um ciclo de refrigeração opera, em regime permanente, entre os reservatórios quente e frio a 300 K e 275 K, respectivamente, e remove energia por transferência de calor do reservatório frio a uma taxa de 600 kW.

(a) Se o coeficiente de desempenho do ciclo for 4, determine a potência de entrada requerida, em kW.

(b) Determine a potência teórica mínima requerida, em kW, para *qualquer* ciclo como esse.

5.59 Um condicionador de ar operando em regime permanente mantém uma residência a 20°C em um dia em que a temperatura externa é 35°C. Energia é removida por transferência de calor da residência a uma taxa de 2800 J/s enquanto a potência de entrada do condicionador é de 0,8 kW. Determine (a) o coeficiente de desempenho do condicionador de ar e (b) a potência de entrada requerida por um ciclo reversível de refrigeração que fornece o mesmo efeito de resfriamento operando entre reservatórios quente e frio a 35°C e 20°C, respectivamente.

5.60 Uma bomba de calor está sendo analisada para o aquecimento de uma estação de pesquisa localizada em uma plataforma de gelo da Antártida. O interior da estação é conservado em 15°C. Determine a taxa teórica máxima de aquecimento fornecida por uma bomba de calor, em kW por kW da potência de entrada, em cada um dos casos: o papel do reservatório frio é desempenhado pela (a) atmosfera a -20°C, (b) água do oceano a 5°C.

5.61 Um ciclo de refrigeração tem um coeficiente de desempenho igual a 75% do valor para um ciclo de refrigeração reversível operando entre os reservatórios frio e quente a -5°C e 40°C, respectivamente. Para operação em regime permanente, determine a potência líquida de entrada, em kW por kW de resfriamento, requerida (a) pelo ciclo real de refrigeração e (b) pelo ciclo de refrigeração reversível. Compare os valores.

5.62 Um condicionador de ar de janela mantém um quarto a 22°C em um dia em que a temperatura externa é de 32°C, removendo energia por meio de transferência de calor do quarto.

(a) Determine, em kW por kW de resfriamento, a potência teórica *mínima* requerida pelo ar condicionado.

(b) Para alcançar as taxas de transferência de calor requeridas com unidades de tamanho prático, condicionadores de ar tipicamente recebem energia por transferência de calor a uma temperatura *inferior* à do quarto que está sendo resfriado e descarregam energia por transferência de calor a uma temperatura *superior* à das vizinhanças. Considere o efeito disso na determinação da potência teórica *mínima*, em kW por kW de resfriamento, requerida quando  $T_C = 18^\circ\text{C}$  e  $T_H = 36^\circ\text{C}$ , e compare com os valores obtidos na parte (a).

5.63 Um ciclo de bomba de calor é usado para manter o interior de uma residência a 21°C. Em regime permanente, a bomba de calor recebe energia por transferência de calor da água de um poço a 9°C e descarrega energia por transferência de calor para a residência a uma taxa de 120.000 kJ/h. Em um período de 14 dias, um medidor de energia elétrica registra que a bomba de calor recebe 1490 kW·h de eletricidade. Determine

(a) a quantidade de energia que a bomba de calor recebe da água do poço em um período de 14 dias por transferência de calor, em kJ.

(b) o coeficiente de desempenho da bomba de calor.

(c) o coeficiente de desempenho de um ciclo de bomba de calor reversível operando entre os reservatórios quente e frio a 21°C e 9°C.

5.64 Conforme ilustrado na Fig. P5.64, um condicionador de ar operando em regime permanente mantém uma residência a 70°F (21,1°C) em um dia em que a temperatura externa é 90°F (32,2°C). Se a taxa de transferência de

calor para a residência através das paredes e do teto fosse de 30.000 Btu/h (8,8 kW), seria suficiente para o compressor do condicionador uma potência líquida de entrada de 3 hp (2,2 kW)? Se a resposta for positiva, determine o coeficiente de desempenho. Se a resposta for negativa, determine a potência teórica mínima de entrada, em hp.

5.65 Em regime permanente, um ciclo de refrigeração operado por um motor elétrico mantém o interior de um edifício a  $T_C = 20^\circ\text{C}$ , enquanto a temperatura exterior é  $T_H = 35^\circ\text{C}$ . A taxa de transferência de calor para o prédio através das paredes e do teto é dada pela expressão  $R(T_H - T_C)$ , em que  $R$  é uma constante em kW/K. O coeficiente de desempenho do ciclo é 20% daquele referente a um ciclo de refrigeração reversível operando entre dois reservatórios térmicos com as mesmas temperaturas  $T_H$  e  $T_C$ .

(a) Se o motor fornece uma potência de 3 kW, determine o valor da constante  $R$ .

(b) Se  $R$  for reduzido a 5%, determine a potência que o motor deveria fornecer, em kW, assumindo que os demais parâmetros permaneçam sem alterações.

5.66 Em regime permanente, um ciclo de refrigeração operado por um motor elétrico deve manter o interior de um laboratório de computação a  $18^\circ\text{C}$ , enquanto a temperatura exterior é  $30^\circ\text{C}$ . A carga térmica consiste nas transferências de calor entrando pelas paredes e pelo teto do laboratório, a uma taxa de 75.000 kJ/h e emanada pelos computadores, iluminação e pessoas, a uma taxa de 15.000 kJ/h.

(a) Determine a potência teórica mínima necessária para a operação do motor elétrico, em kW, e o coeficiente de desempenho correspondente.

(b) Se a potência real necessária pelo motor for 8,3 kW, determine o seu coeficiente de desempenho.

(c) Se os dados fornecidos de temperatura e carga térmica forem observados durante 100 h, com um custo de energia elétrica de 13 centavos por kW · h, determine o custo total, em \$, para os casos (a) e (b).

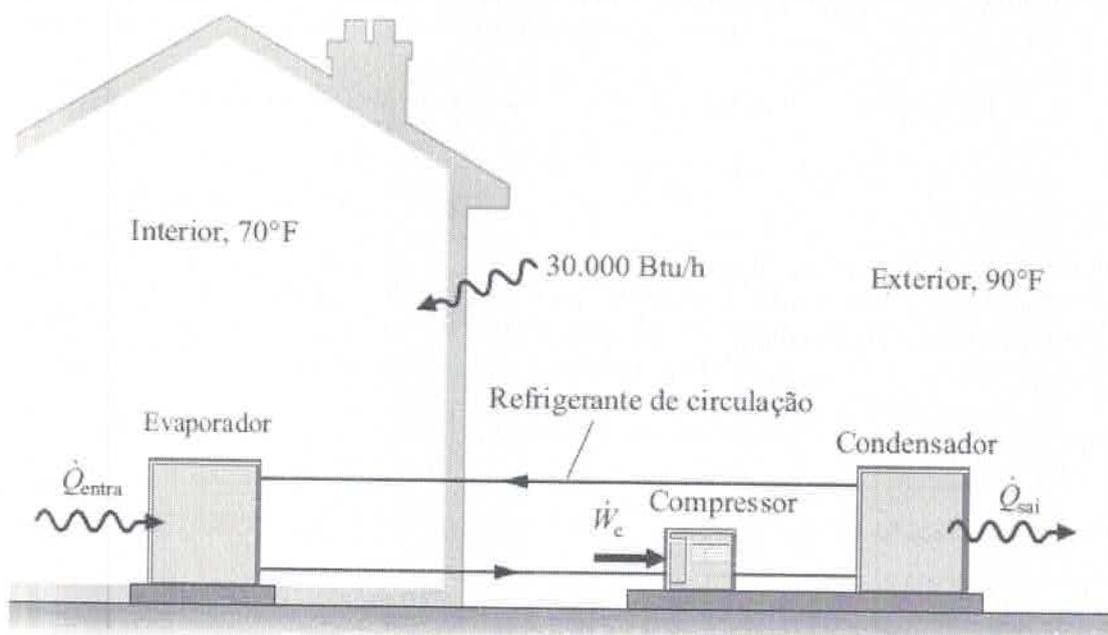


Fig. P5.64

5.67 Em regime permanente, uma bomba de calor operada por um motor elétrico mantém o interior de um edifício a  $T_H = 293 \text{ K}$ . A taxa de transferência de calor, em kJ/h, do edifício através das paredes e do teto é dada por  $R(T_H - T_C)$ , em que  $R = 8000 \text{ kW/K}$  e  $T_C$  é a temperatura exterior. Elabore um gráfico da potência teórica mínima, em kW,

necessária para operar a bomba de calor, contra a temperatura  $T_C$ , entre 273 K e 293 K.

5.68 O refrigerador mostrado na Fig. P5.68 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 da 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.

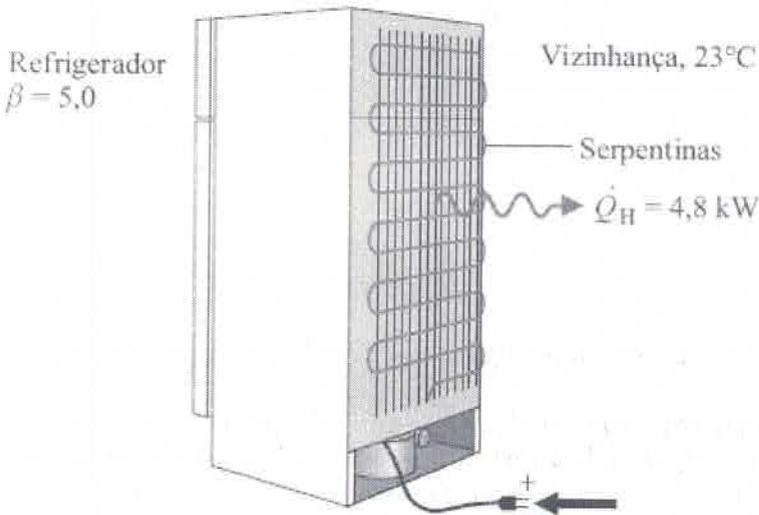


Fig. P5.68

5.69 Em regime permanente, uma bomba de calor fornece energia por transferência de calor a uma taxa de 25.000 Btu/h (7326,8 W) para manter uma residência a 70°F (21,1°C) em um dia em que a temperatura externa é 30°F (-1,1°C). A potência de entrada da bomba de calor é 4,5 hp (3,4 kW). Determine

(a) o coeficiente de desempenho da bomba de calor.

(b) o coeficiente de desempenho de uma bomba de calor reversível operando entre reservatórios quente e frio a 70°F e 30°F, respectivamente, e a taxa correspondente na qual energia seria fornecida por transferência de calor para uma residência, considerando uma potência de entrada de 4,5 hp.

5.70 Com o fornecimento de energia a uma taxa média de 24.000 kJ/h, uma bomba de calor mantém a temperatura de uma residência em 20°C. Se a eletricidade custa 8,5 centavos por kW · h, determine o custo de operação mínimo teórico por dia de operação se a bomba de calor receber energia por transferência de calor

(a) do ar exterior a -7°C.

(b) da base a 5°C.

5.71 Uma bomba de calor com coeficiente de desempenho de 3,5 fornece energia a uma taxa média de 70.000 kJ/h para manter um edifício a 20°C em um dia em que a temperatura externa é -5°C. Se a eletricidade custa 8,5 centavos por kW · h,

(a) determine o custo de operação real e o custo de operação mínimo teórico, ambos em \$/dia.

(b) compare os resultados da parte (a) com o custo de aquecimento por resistência elétrica.

5.72 Conforme ilustrado na Fig. P5.72, uma bomba de calor fornece energia por transferência de calor para a água

evaporando de líquido saturado a vapor saturado à pressão de 2 bar e uma vazão mássica de 0,05 kg/s. A bomba de calor recebe energia por transferência de calor de um lago a 16°C. Essas são as únicas trocas de calor significantes. Os efeitos de energia cinética e de energia potencial podem ser ignorados. Uma folha de dados desbotada e de difícil leitura indica que a potência requerida pela bomba é de 35 kW. Esse valor pode estar correto? Explique.

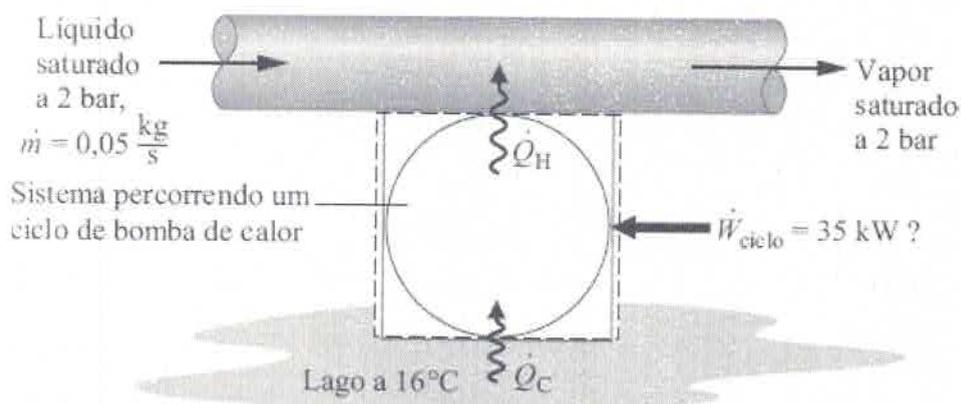


Fig. P5.72

5.73 Como mostrado na Fig. P5.73, uma bomba de calor recebe energia por transferência de calor do subsolo, onde a temperatura é 50°F (10°C) e fornece energia por transferência de calor para um sistema contendo amônia, vaporizando desde o estado de líquido saturado até o estado de vapor saturado a 75°F (23,9°C). Neste sistema, estas são as únicas transferências de calor significantes. Em regime permanente, a potência de operação da bomba de calor é 3 hp. Determine a vazão mássica máxima teórica de amônia, em lb/min, para uma bomba de calor operando sob essas condições. Ignore efeitos de energia cinética e potencial para a amônia.

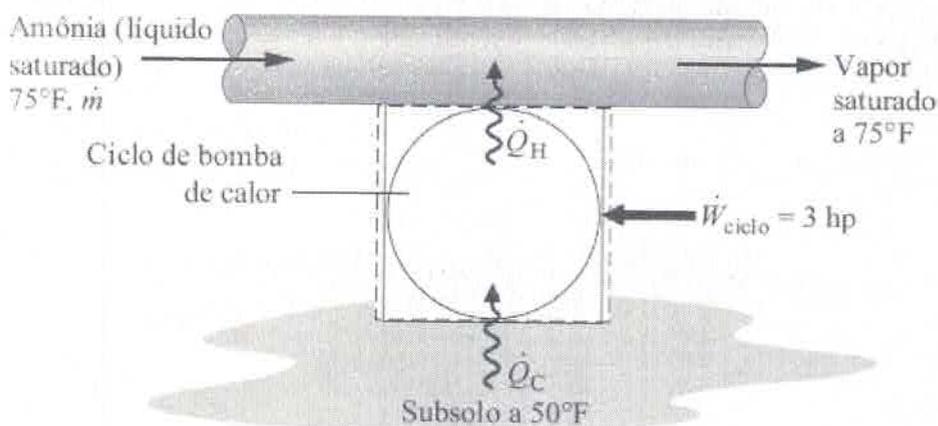


Fig. P5.73

5.74 Para manter uma residência permanentemente à temperatura de 68°F (20,0°C) quando a temperatura exterior é 32°F (0°C), deve-se promover o aquecimento a uma taxa média de 700 Btu/min (12,3 kW). Compare a potência elétrica requerida, em kW, para fornecer o aquecimento usando (a) resistência elétrica, (b) uma bomba de calor cujo coeficiente de desempenho é de 3,5, (c) uma bomba de calor reversível.

5.75 Um sistema de aquecimento deve manter o interior de um edifício a  $T_H = 20^\circ\text{C}$ , enquanto a temperatura exterior é  $T_C = 2^\circ\text{C}$ . Se a taxa de transferência de calor do edifício através das paredes e do teto é de 16,4 kW, determine a potência elétrica necessária, em kW, para aquecer o edifício utilizando (a) um sistema de aquecimento por resistências elétricas; (b) uma bomba de calor com coeficiente de desempenho 3,0; (c) uma bomba de calor reversível operando entre dois reservatórios térmicos, a 20°C e 2°C.

### Aplicações do Ciclo de Carnot

5.76 Um gás em um sistema pistão-cilindro executa um ciclo de potência de Carnot durante o qual o processo de expansão isotérmica ocorre a  $T_H = 600$  K e o de compressão isotérmica a  $T_C = 300$  K. Determine

(a) a eficiência térmica.

(b) a variação percentual na eficiência térmica se  $T_H$  aumentar 15%, enquanto  $T_C$  permanecer inalterado.

(c) a variação percentual na eficiência térmica se  $T_C$  diminuir 15%, enquanto  $T_H$  permanecer inalterado.

(d) a variação percentual na eficiência térmica se  $T_H$  aumentar 15%, enquanto  $T_C$  diminuir 15%.

5.77 Com relação a bomba de calor do ciclo da Fig. 5.16, se  $p_1 = 14,7$  e  $p_4 = 18,7$ , ambas em  $\text{lbf/in}^2$  (101,3 kPa e 128,9 kPa),  $v_1 = 12,6$  e  $v_4 = 10,6$ , ambas em  $\text{ft}^3/\text{lb}$  (0,8  $\text{m}^3/\text{kg}$  e 0,6  $\text{m}^3/\text{kg}$ ), e o gás é o ar, que obedece o modelo de gás ideal, determine  $T_H$  e  $T_C$ , ambas em  $^\circ\text{R}$ , e o coeficiente de desempenho.

5.78 Um gás ideal em um sistema pistão-cilindro executa um ciclo de potência de Carnot, como mostrado na Fig. 5.13. O processo de compressão isotérmica ocorre a 300 K de 90 kPa a 120 kPa. Se a eficiência térmica for 60%, determine (a) a temperatura do processo de expansão isotérmica, em K e (b) o trabalho líquido, em kJ por mol de gás.

5.79 Um gás ideal em um sistema pistão-cilindro é submetido a um ciclo de Carnot de refrigeração, como mostrado na Fig. 5.16. A compressão isotérmica ocorre a 325 K de 2 bar a 4 bar. A expansão isotérmica ocorre a 250 K. Determine (a) o coeficiente de desempenho; (b) a transferência de calor para o gás durante a expansão isotérmica, em kJ por mol de gás; (c) o trabalho líquido, em kJ por mol de gás.

5.80 Ar em um sistema pistão-cilindro executa um ciclo bomba de calor de Carnot, como mostrado na Fig. 5.16. Para o ciclo,  $T_H = 600$  K e  $T_C = 300$  K. A energia descartada por transferência de calor a 600 K é de 250 kJ por kg de ar. A pressão no início do processo de expansão isotérmica é 325 kPa. Assumindo comportamento ideal para o ar, determine (a) o trabalho líquido, em kJ por kg de ar; (b) a pressão ao final do processo de expansão isotérmica, em kPa.

5.81 Uma quantidade de água em um conjunto cilindro-pistão executa um ciclo de potência de Carnot. Durante a expansão isotérmica, a água é aquecida de líquido saturado a 50 bar até a condição de vapor saturado. O vapor então se expande adiabaticamente até uma pressão de 5 bar, enquanto realiza 364,31 kJ/kg de trabalho.

(a) Esboce o ciclo em coordenadas  $p-v$ .

(b) Estime o calor transferido por unidade de massa e o trabalho por unidade de massa para cada processo, em kJ/kg.

(c) Estime a eficiência térmica.

5.82 Uma libra e meia de água em um conjunto cilindro-pistão executa um ciclo de potência de Carnot. Durante a expansão isotérmica, a água é aquecida a 500 $^\circ\text{F}$  (260,0 $^\circ\text{C}$ ), da condição de líquido saturado a vapor saturado. O vapor então se expande adiabaticamente até uma temperatura de 100 $^\circ\text{F}$  (37,8 $^\circ\text{C}$ ) e um título de 70,38%.

(a) Esboce o ciclo em coordenadas  $p-v$ .

(b) Estime o calor transferido e o trabalho para cada processo, em Btu.

(c) Estime a eficiência térmica.

5.83 Dois quilogramas de ar em um conjunto cilindro-pistão executa um ciclo de potência de Carnot com temperaturas máxima e mínima de 750 K e 300 K, respectivamente. A transferência de calor para o ar, durante a

expansão isotérmica, é de 60 kJ. Ao final da expansão isotérmica, o volume é de  $0,4 \text{ m}^3$ . Admitindo o modelo de gás ideal para o ar, determine

- (a) a eficiência térmica.
- (b) a pressão e o volume no início da expansão isotérmica em kPa e  $\text{m}^3$ , respectivamente.
- (c) o trabalho e a transferência de calor para cada um dos quatro processos, em kJ.
- (d) Esboce o ciclo em coordenadas  $p$ - $V$ .

### Aplicações da Desigualdade de Clausius

**5.84** Um sistema executa um ciclo de potência enquanto recebe 1000 kJ por transferência de calor a uma temperatura de 500 K e descarrega energia por transferência de calor a uma temperatura de 300 K. Não ocorrem outras trocas de calor. Aplicando a Eq. 5.13, determine  $\sigma_{\text{ciclo}}$  se a eficiência térmica é (a) 100%, (b) 40%, (c) 25%. Identifique os casos (se existirem) que sejam internamente reversíveis ou impossíveis.

**5.85** Um sistema executa um ciclo de potência enquanto recebe 1050 kJ por transferência de calor a uma temperatura de 525 K e descarrega 700 kJ por transferência de calor a 350 K. Não ocorrem outras trocas de calor.

- (a) Usando a Eq. 5.13, determine se o ciclo é *internamente reversível*, *irreversível*, ou *impossível*.
- (b) Determine a eficiência térmica usando a Eq. 5.4 e os dados de transferência de calor fornecidos. Compare esse valor com a *eficiência de Carnot* calculada usando a Eq. 5.9 e comente.

**5.86** Para o refrigerador do Exemplo 5.2, aplique a Eq. 5.13 em função das taxas temporais para determinar se o ciclo opera reversivelmente, irreversivelmente ou se é impossível. Repita para o caso no qual não haja potência aplicada ao sistema.

**5.87** Para cada conjunto de dados do Problema 5.49, aplique a Eq. 5.13 em função das taxas temporais para determinar se o ciclo opera reversivelmente, irreversivelmente ou se é impossível.

**5.88** Os dados em regime permanente listados a seguir foram apresentados para um ciclo de potência operando entre dois reservatórios térmicos, entre 1200 K e 400 K. Para cada caso, calcule a potência líquida desenvolvida pelo ciclo, em kW, e a eficiência térmica. Também para cada caso, aplique a Eq. 5.13 em função das taxas temporais para determinar se o ciclo opera reversivelmente, irreversivelmente ou se é impossível.

- (a)  $\dot{Q}_H = 600 \text{ kW}$ ,  $\dot{Q}_C = 400 \text{ kW}$
- (b)  $\dot{Q}_H = 600 \text{ kW}$ ,  $\dot{Q}_C = 0 \text{ kW}$
- (c)  $\dot{Q}_H = 600 \text{ kW}$ ,  $\dot{Q}_C = 200 \text{ kW}$

**5.89** Sob regime permanente, um ciclo termodinâmico operando entre dois reservatórios térmicos a 1000 K e 500 K recebe energia por transferência de calor do reservatório quente a uma taxa de 1500 kW, descartando energia para o reservatório frio e desenvolvendo uma potência de (a) 1000 kW; (b) 750 kW; (c) 0 kW. Para cada caso, aplique a Eq. 5.13 em função das taxas temporais para determinar se o ciclo opera reversivelmente, irreversivelmente ou se é impossível.

**5.90** A Fig. P5.90 fornece um desenho esquemático de uma usina a vapor na qual água circula em regime permanente ao longo dos quatro componentes ilustrados. A água escoar ao longo da caldeira e do condensador a pressão constante e através da turbina e da bomba de forma adiabática. As variações de energia cinética e de energia potencial podem ser ignoradas. Os dados dos processos são apresentados a seguir:

**Processo 4-1:** passagem de líquido saturado a vapor saturado à pressão constante de 1 MPa.

**Processo 2-3:** passagem de  $x_2 = 88\%$  a  $x_3 = 18\%$  à pressão constante de 20 kPa.

(a) Usando a Eq. 5.13 expressa em uma base temporal, determine se o ciclo é *internamente reversível*, *irreversível* ou *impossível*.

(b) Determine a eficiência térmica usando a Eq. 5.4 expressa em uma base temporal e os dados da tabela de vapor.

(c) Compare o resultado da parte (b) com a *eficiência de Carnot* calculada usando a Eq. 5.9 com as temperaturas da caldeira e do condensador e comente.

5.91 Repita o Problema 5.90 para o seguinte caso:

**Processo 4-1:** passagem de líquido saturado a vapor saturado à pressão constante de 8 MPa.

**Processo 2-3:** passagem de  $x_2 = 67,5\%$  a  $x_3 = 34,2\%$  à pressão constante de 8 kPa.

5.92 Repita o Problema 5.90 para o seguinte caso:

**Processo 4-1:** passagem de líquido saturado a vapor saturado à pressão constante de 0,15 MPa.

**Processo 2-3:** passagem de  $x_2 = 90\%$  a  $x_3 = 10\%$  à pressão constante de 20 kPa.

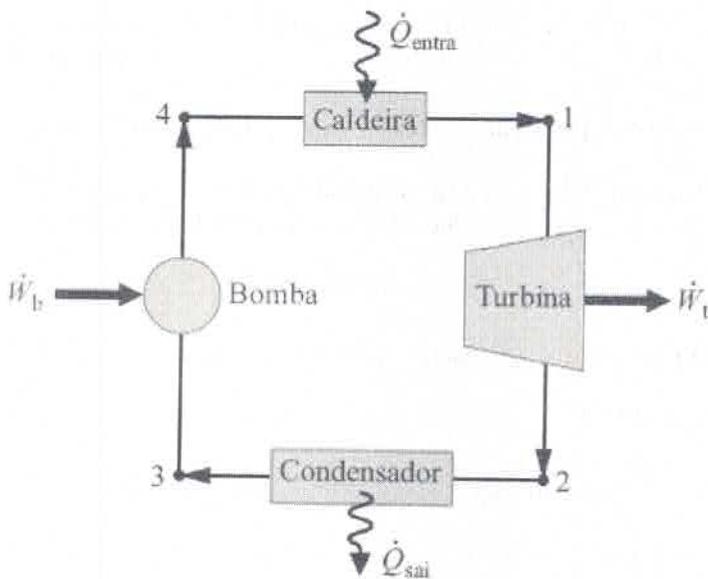


Fig. P5.90-92

5.93 Conforme ilustrado na Fig. P5.93, um sistema executa um ciclo de potência enquanto recebe 750 kJ por transferência de calor a uma temperatura de 1500 K e descarrega 100 kJ por transferência de calor a uma temperatura de 500 K. Outra transferência de calor do sistema ocorre a uma temperatura de 1000 K. Usando a Eq. 5.13, esboce um gráfico da eficiência térmica do ciclo em razão de  $\sigma_{ciclo}$ , em kJ/K.

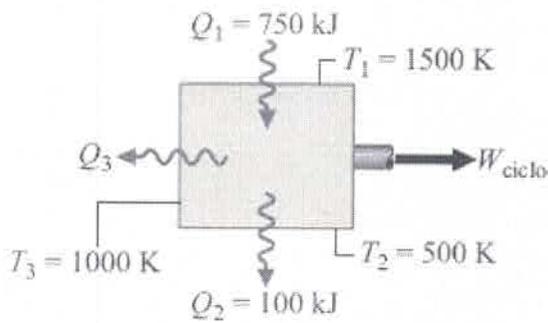


Fig. P5.93

5.94 A Fig. P5.94 mostra um sistema que executa um ciclo de potência recebendo 600 Btu por transferência de calor a uma temperatura de  $1000^{\circ}\text{R}$  ( $282,4^{\circ}\text{C}$ ) e descartando 400 Btu ( $422\text{ kJ}$ ) por transferência de calor a  $800^{\circ}\text{R}$  ( $171,3^{\circ}\text{C}$ ). Uma terceira transferência de calor ocorre a  $600^{\circ}\text{R}$  ( $60,2^{\circ}\text{C}$ ). Estas são as únicas transferências de calor as quais o sistema está submetido.

(a) Aplicando um balanço de energia, juntamente com a Eq. 5.13, determine a direção e a faixa de valores permitidos, em Btu, para a transferência de calor a  $600^{\circ}\text{R}$ .

(b) Para o ciclo de potência, determine a eficiência térmica teórica máxima.

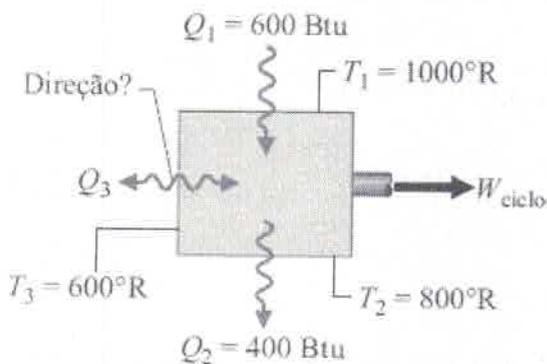


Fig. P5.94

### ► PROJETOS E PROBLEMAS EM ABERTO: EXPLORANDO A PRÁTICA DE ENGENHARIA

5.1P A segunda lei da termodinâmica é algumas vezes citada em publicações de disciplinas muito distantes da engenharia e da ciência, incluindo mas não estando limitada a filosofia, economia e sociologia. Investigue o uso da segunda lei em publicações arbitradas não tecnológicas. Para três dessas publicações, cada uma de uma disciplina diferente, escreva uma crítica de três páginas. Para cada publicação, identifique e comente os principais objetivos e conclusões. Explique claramente como a segunda lei é usada para informar ao leitor e impulsionar a apresentação. Pontue cada publicação em uma escala de 10 pontos, com 10 indicando o uso altamente eficaz da segunda lei e 1 para o uso ineficiente. Forneça uma explicação para cada pontuação.

5.2P Investigue condições adversas de saúde que poderiam ser exacerbadas para pessoas que moram em *ilhas de calor* urbanas. Escreva um relatório com no mínimo três referências.

5.3P Para três diferentes instalações com tamanhos compatíveis, como uma escola, um escritório com gabinetes e uma residência, verifique a viabilidade da utilização de um sistema de ar condicionado por bomba de calor empregando um refrigerante *natural*. Considere os aspectos (mas não se limite a estes) associados a questões de saúde e segurança, legislações aplicáveis, desempenho para alcançar as necessidades dos ocupantes daquela instalação, custo anual de eletricidade, impacto ambiental, cada um em comparação a sistemas que utilizem refrigerantes convencionais para executar as mesmas funções. Resuma as informações coletadas e analisadas em um

relatório, incluindo ao menos três referências.

**5.4P** Para um refrigerador em sua casa, dormitório ou local de trabalho, use um medidor de potência, conforme o ilustrado na Fig. P5.4P, para determinar as necessidades de potência do aparelho, em  $\text{kW} \cdot \text{h}$ . Compare sua estimativa do uso anual de eletricidade com a postada no *website* ENERGY STAR<sup>®</sup> para o mesmo refrigerador ou um similar. Racionalize qualquer discrepância significativa entre esses valores. Prepare uma apresentação em pôster detalhando suas metodologias e conclusões.



**Fig. P5.4P**

**5.5P** O objetivo desse projeto é identificar uma avaliação comercial de um sistema de bomba de calor disponível no mercado que atenda as necessidades anuais de aquecimento e arrefecimento de uma residência em local de sua escolha. Considere cada um dos dois tipos de bomba de calor: com o ar como fonte e com o solo como fonte. Estime os custos de instalação, de operação, e outros custos pertinentes para cada tipo de bomba de calor. Para uma vida útil de 10 anos, especifique o sistema de bomba de calor mais econômico. E se a eletricidade custasse o dobro do que custa hoje? Prepare uma apresentação em pôster com suas conclusões.

**5.6P** Insulina e vários outros medicamentos necessários diariamente para aqueles que sofrem de diabetes e outras doenças têm estabilidade térmica relativamente baixa. Aqueles que vivem ou viajam para climas quentes correm o risco de que seus medicamentos sofram alguma alteração induzida pelo calor. Projete um compartimento de refrigeração para o transporte dos medicamentos sensíveis à temperatura que seja prático, leve e seguro. Além disso, o compartimento de refrigeração tem que ser movido apenas pelo movimento humano. Enquanto o objetivo a longo prazo é um produto de consumo de custo moderado, o relatório de projeto final precisa apenas fornecer o preço de custo de um único protótipo.

**5.7P** Ao longo dos anos, máquinas com *movimento perpétuo* têm sido rejeitadas porque violam leis físicas, essencialmente a primeira ou a segunda lei da termodinâmica, ou ambas. No entanto, enquanto o ceticismo está profundamente enraizado com relação ao movimento perpétuo, diz-se que o relógio *ATMOS* desfruta de uma vida útil operacional quase ilimitada e anúncios o caracterizam como um *relógio com movimento perpétuo*. Investigue como o *ATMOS* opera. Forneça uma explanação completa de sua operação, incluindo esboços e referências à primeira e segunda lei, conforme apropriado. Estabeleça de modo claro se o *ATMOS* pode ser chamado de uma máquina com movimento perpétuo, se aproxima de uma ou apenas aparenta ser uma. Resuma suas conclusões em um memorando.

**5.8P** Cerca de 400 ft (121,92 m) no subsolo de uma cidade ao sul de Illinois encontra-se uma mina de chumbo abandonada, submersa em um volume de aproximadamente 70 bilhões de galões (265 bilhões de litros) de água que permanecem a uma temperatura constante de 58°F (14,4°C). O engenheiro da prefeitura propôs a utilização dessa quantidade de água como reservatório térmico, para aquecimento e resfriamento do edifício da administração central municipal, um prédio de tijolos de dois andares construído em 1975 com uma área de 8500 ft<sup>2</sup> (789,7 m<sup>2</sup>) organizada em escritórios. Você foi selecionado para desenvolver uma proposta preliminar, incluindo uma estimativa de custo.

A proposta deve especificar os sistemas disponíveis comercialmente que utilizem água subterrânea para essa finalidade. O custo estimado deve incluir o desenvolvimento do projeto, equipamentos e o custo anual de operação. Elabore uma apresentação comercial do seu projeto.

**5.9P** A Fig. P5.9P mostra um daqueles pássaros de brinquedo que aparentemente tomam uma série interminável de goles em um copo cheio de água. Prepare uma apresentação de 30 minutos adequada para um curso de ciências do ensino fundamental, explicando os princípios de operação desse dispositivo e se o seu comportamento está em conflito ou não com a segunda lei.

**5.10P** Como mostrado na Fig. 5.10P, uma bomba transfere água através de um tubo de 500 ft (152,4 m) a uma pressão de  $55 \text{ lbf/in}^2$  (379,2 kPa) e uma temperatura de  $60^\circ\text{F}$  ( $15,6^\circ\text{C}$ ). O tubo fornece água a uma vazão volumétrica de  $200 \text{ ft}^3/\text{min}$  ( $5,67 \text{ m}^3/\text{min}$ ) para um tanque de armazenamento cuja pressão não pode ser menor que  $20 \text{ lbf/in}^2$  (137,9 kPa). Para um tubo de aço ANSI 40, determine o menor diâmetro, em in, que se encaixe nas especificações do projeto. Assuma uma operação sob regime permanente, com efeitos desprezíveis de elevação da tubulação entre a entrada e a saída, aplicando o diagrama de fator de atrito de *Moody*.

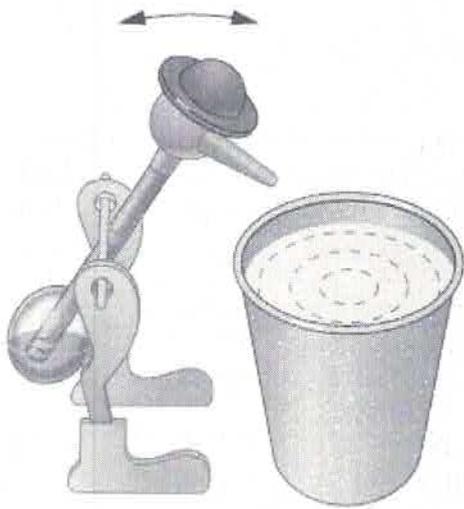


Fig. P5.9P

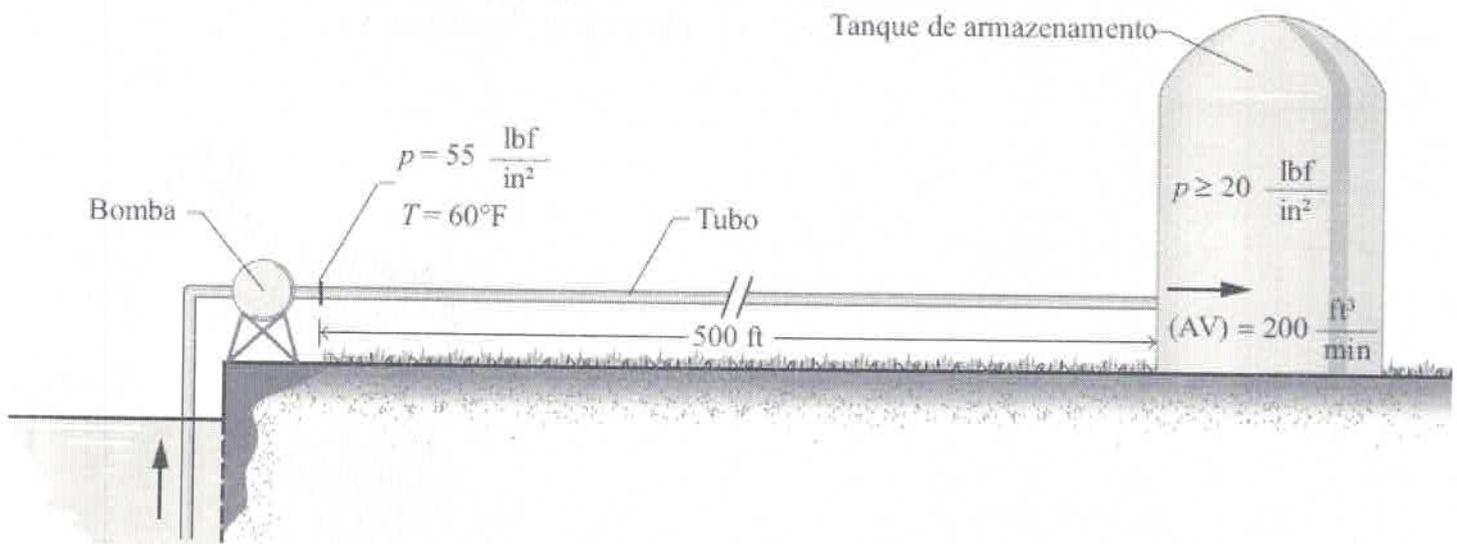


Fig. P5.10P



O sentido em que os processos ocorrem pode ser determinado usando o conceito de entropia, conforme discutido na Seção 6.8. © davidf/iStockphoto

**CONTEXTO DE ENGENHARIA** Até o momento, nosso estudo sobre a segunda lei tem se concentrado principalmente no enunciado aplicado a sistemas submetidos a ciclos termodinâmicos. Neste capítulo são apresentadas formas para a análise de sistemas a partir da segunda lei no momento em que estes sistemas passam por processos que não são necessariamente ciclos. A propriedade *entropia* e o conceito de *geração de entropia*, apresentados no Cap. 5, exercem um importante papel nessas considerações.

O **objetivo** deste capítulo é desenvolver a compreensão dos conceitos de entropia, incluindo o uso de balanços de entropia para sistemas fechados e volumes de controle em formas úteis para a análise de sistemas de engenharia. A desigualdade de Clausius, desenvolvida na Seção 5.11 e expressa pela Eq. 5.13, fornece a base necessária.