

A Segunda Lei da Termodinâmica

TÓPICOS ABORDADOS

MOTORES TÉRMICOS E REFRIGERADORES

A SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA

O PROCESSO REVERSÍVEL

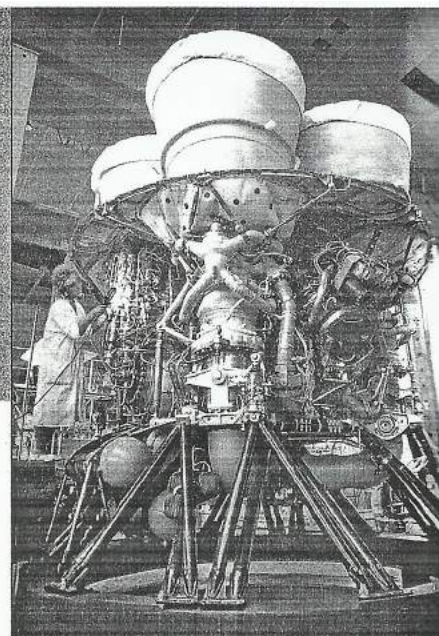
FATORES QUE TORNAM PROCESSOS IRREVERSÍVEIS

O CICLO DE CARNOT

DOIS TEOREMAS SOBRE O RENDIMENTO DO CICLO DE CARNOT

A ESCALA DE TEMPERATURA DE GÁS IDEAL

MAQUINAS REAIS *VERSUS* IDEAIS



A primeira lei da termodinâmica estabelece que, para um sistema que efetua um ciclo, a integral cíclica do calor é igual à integral cíclica do trabalho. A primeira lei, contudo, não impõe restrições quanto ao sentido dos fluxos de calor e trabalho. Um ciclo no qual uma dada quantidade de calor é transferida pelo sistema e uma quantidade equivalente de trabalho é feita sobre o sistema satisfaz a primeira lei, da mesma maneira que um ciclo no qual os fluxos de calor e trabalho se dão em sentidos opostos. Contudo, a experiência mostra que o fato de um ciclo proposto não violar a primeira lei não assegura que esse ciclo possa realmente ocorrer. É esse tipo de evidência experimental que nos leva à formulação da segunda lei da termodinâmica. Assim, um ciclo só ocorrerá se tanto a primeira quanto a segunda lei da termodinâmica forem satisfeitas.

Em seu sentido mais amplo, a segunda lei reconhece que processos ocorrem num dado sentido e não no oposto. Uma xícara de café quente esfria em virtude da transferência de calor para o meio, porém calor não será transferido do meio mais frio para a xícara de café mais quente. Consome-se gasolina quando um carro sobe uma colina, mas o nível de combustível do tanque de gasolina não pode ser restabelecido ao nível original na descida da colina. Observações cotidianas como essas, e várias outras, são evidências da validade da segunda lei da termodinâmica.

Neste capítulo, nós consideramos a segunda lei para um sistema (massa de controle) percorrendo um ciclo e, nos dois próximos capítulos, estendemos os conceitos para uma massa de controle que sofre uma mudança de estado e, em seguida, para um volume de controle.

7.1 MOTORES TÉRMICOS E REFRIGERADORES

Considere o sistema e o meio previamente citados no desenvolvimento da primeira lei, conforme mostrado na Fig. 7.1. Seja o sistema constituído pelo gás e, como em nossa discussão da primeira lei, façamos com que esse sistema percorra um ciclo no qual, inicialmente, trabalho é realizado sobre o sistema pela pá giratória à medida que o peso é abaixado. O ciclo é completado, então, pela transferência de calor para o meio.

A experiência mostra que esse ciclo não pode ser invertido. Isto é, se transferirmos calor ao gás, como mostrado pela flecha pontilhada, a sua temperatura aumentará, mas a pá não girará e não levantará o peso. Com o meio dado (o recipiente, a

pá giratória e o peso), esse sistema pode operar num ciclo para o qual calor e trabalho são negativos, mas ele não pode operar num ciclo no qual calor e trabalho são positivos, embora isto não viole a primeira lei.

Considere um outro ciclo que, segundo nossa experiência, é impossível de ser realizado. Sejam dois sistemas, um a uma temperatura alta e o outro a uma temperatura baixa, passando por um processo no qual uma determinada quantidade de calor é transferida do sistema de alta para o de baixa temperatura. Sabemos que esse processo pode ocorrer. Sabemos, além disso, que o processo inverso, no qual calor é transferido do sistema de baixa

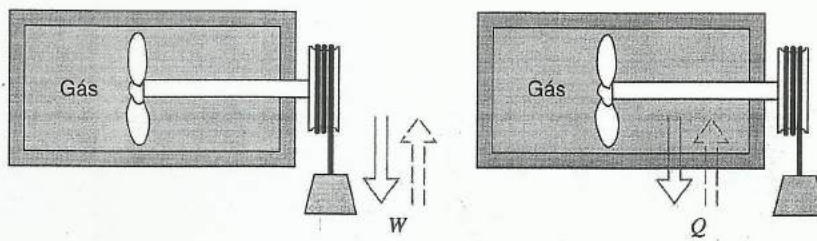


Fig. 7.1 Um sistema que percorre um ciclo envolvendo trabalho e calor.

para o de alta temperatura, não pode ocorrer e que é impossível completar o ciclo apenas pela transferência de calor. Essa impossibilidade está ilustrada na Fig. 7.2.

Esses dois exemplos levam-nos à consideração do motor térmico e do refrigerador, que também é referido como uma bomba de calor. Com o motor térmico, podemos ter um sistema que opera em um ciclo e que realiza um trabalho líquido positivo com uma transferência de calor líquida positiva. Com a bomba de calor, podemos ter um sistema que opera em um ciclo no qual ocorre transferência de calor de um corpo a baixa temperatura para o sistema e transferência de calor do sistema para um corpo a alta temperatura, sendo que trabalho é requerido para fazer isso. Três motores térmicos simples e dois refrigeradores simples serão considerados a seguir.

O primeiro motor térmico está mostrado na Fig. 7.3. Ele consiste em um cilindro com limitadores de curso e um êmbolo. Seja o sistema constituído pelo gás no cilindro. Inicialmente, o êmbolo repousa sobre os batentes inferiores e apresenta um peso sobre sua plataforma. Façamos com que o sistema passe por um processo no qual calor é transferido de um corpo a alta temperatura para o gás, causando a sua expansão e elevando o êmbolo até os batentes superiores. Neste ponto, o peso é removido. Agora, deixemos que o sistema retorne ao seu estado inicial pela transferência de calor do gás para um corpo a baixa temperatura, completando assim o ciclo. Uma vez que o peso foi erguido, é evidente que trabalho foi realizado pelo gás durante o ciclo. Podemos concluir, a partir da primeira lei, que o calor líquido transferido foi positivo e igual ao trabalho realizado durante o ciclo.

Tal dispositivo é chamado de motor térmico e a substância para a qual e da qual calor é transferido é chamada de fluido ou substância de trabalho. Um motor térmico pode ser definido como um dispositivo que opera em um ciclo termodinâmico e que realiza um trabalho líquido positivo por meio da transferência de calor de um corpo de alta temperatura para um corpo de baixa

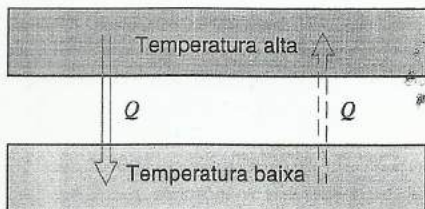


Fig. 7.2 Um exemplo mostrando a impossibilidade de se completar um ciclo pela transferência de calor de um corpo de baixa temperatura para um corpo de alta temperatura.

temperatura. Frequentemente, a denominação motor térmico é utilizada num sentido mais amplo para designar todos os dispositivos que produzem trabalho, seja através de transferência de calor ou através de combustão, mesmo que o dispositivo não opere em um ciclo termodinâmico. O motor de combustão interna e a turbina a gás são exemplos desse tipo de dispositivo e a denominação de motores térmicos é aceitável nesses casos. Neste capítulo, entretanto, nos limitaremos a analisar os motores térmicos que operam segundo um ciclo termodinâmico.

Uma usina termelétrica a vapor simples é um exemplo de um motor térmico nesse sentido restrito. Cada componente dessa instalação pode ser analisado individualmente como um processo em regime permanente, mas a instalação como um todo pode ser considerada como um motor térmico (Fig. 7.4), no qual a água (vapor) é o fluido de trabalho. Uma quantidade de calor, Q_H , é transferida de um corpo a alta temperatura, que pode ser os produtos da combustão numa fornalha, um reator, ou um fluido secundário previamente aquecido num reator. Na Fig. 7.4, a turbina é mostrada esquematicamente acionando a bomba. O que é mais importante, entretanto, é o trabalho líquido produzido durante o ciclo. A quantidade de calor Q_L é rejeitada para um corpo de baixa temperatura, que normalmente é a água de resfriamento em um condensador. Deste modo, a planta de potência a vapor, simples, é um motor térmico no sentido restrito, pois ela tem um fluido de trabalho para o qual e do qual calor é transferido, realizando uma determinada quantidade de trabalho enquanto percorre o ciclo.

Um outro exemplo de motor térmico é o gerador de potência termoeletrônico. Esse equipamento foi discutido no Cap. 1 e mostrado esquematicamente na Fig. 1.10. Calor é transferido de um corpo a alta temperatura para a junção quente (Q_H) e da junção fria para o meio (Q_L). O trabalho é realizado na forma de energia elétrica. Como não existe fluido de trabalho, não o consideramos, geralmente, como um dispositivo que opera em um ciclo. Entretanto, se adotarmos um ponto de vista microscópico, podemos imaginar um ciclo realizado pelo fluxo de elétrons. Além disso, analogamente ao caso da planta de geração de potência a vapor, o estado em cada ponto do gerador termoeletrônico não varia com o tempo sob condições de regime permanente.

Então, por meio de um motor térmico, podemos fazer um sistema passar por um ciclo, no qual ambos, o trabalho líquido e a transferência de calor líquida, são positivos, efeitos que não podemos obter com o sistema e o meio mostrados na Fig. 7.1.

Devemos notar que, ao usar os símbolos Q_H e Q_L , afastamos-nos da nossa convenção de sinais para o calor porque, para um motor térmico, Q_L é negativo quando o fluido de trabalho é considerado como o sistema. Neste capítulo, será mais cômodo usar

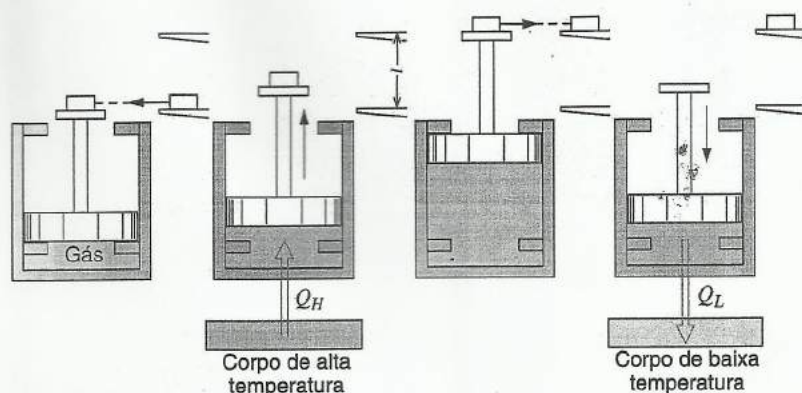


Fig. 7.3 Um motor térmico simples.

o símbolo Q_H para representar o calor transferido para, ou do corpo de alta temperatura, e Q_L para o calor transferido para, ou do corpo de baixa temperatura. O sentido da transferência de calor será evidenciado pelo próprio contexto.

Neste ponto é apropriado introduzir o conceito de rendimento térmico de um motor térmico. Em geral, dizemos que o rendimento é a razão entre a saída, a energia pretendida ou produzida (que dá lucro) e a entrada, a energia comprada ou gasta (que apresenta custos), sendo que essas quantidades devem estar claramente definidas. No limite da simplificação, podemos dizer que, num motor térmico, a energia pretendida é o trabalho e a energia que apresenta custos é o calor transferido da fonte a alta temperatura (indiretamente, os custos do combustível). O rendimento térmico é, neste caso, definido como

$$\eta_{\text{térmico}} = \frac{W(\text{energia pretendida})}{Q_H(\text{energia comprada})} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \quad (7.1)$$

Motores térmicos variam muito em tamanhos e formas, de grandes motores a vapor, turbinas a gás ou motores a jato, até motores a gasolina para carros e motores a diesel para caminhões e carros, ou ainda para pequenos motores de cortadores de grama e equipamen-

tos manuais tais como serras e aparadores. Valores típicos para o rendimento de motores reais estão em torno de 35-50% para equipamentos de grande potência, de 30-35% para motores a gasolina e de 35-40% para motores diesel. Motores utilitários pequenos têm apenas cerca de 20% de rendimento, devido aos seus controles e carburação simples, e ao fato de que algumas perdas de energia crescem comparativamente com o tamanho do motor, passando então a representar uma fração importante para os motores pequenos.

O segundo ciclo que não fomos capazes de completar foi aquele indicando a impossibilidade da transferência de calor diretamente de um corpo de temperatura mais baixa para um corpo de temperatura mais alta. Isso certamente pode ser realizado com um refrigerador ou uma bomba de calor. Um ciclo de refrigeração por compressão de vapor, que foi introduzido no Cap. 1 e mostrado na Fig. 1.7, é mostrado novamente na Fig. 7.5. O fluido de trabalho é o refrigerante, tal como o R-134a ou a amônia, que percorre um ciclo termodinâmico. Calor é transferido para o refrigerante no evaporador, onde sua pressão e temperatura são baixas. Trabalho é fornecido ao refrigerante no compressor e calor é transferido do refrigerante no condensador, onde sua pressão e temperatura são altas. A queda de pressão ocorre quando o refrigerante escoar através da válvula de expansão ou do tubo capilar.

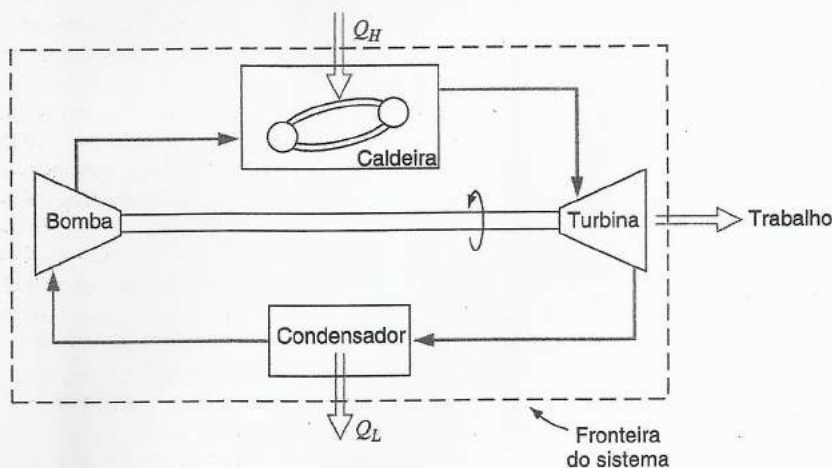


Fig. 7.4 Uma usina termelétrica envolvendo processos em regime permanente.

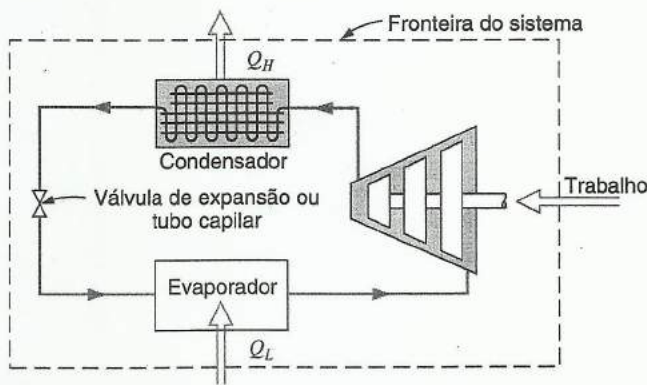


Fig. 7.5 Um ciclo simples de refrigeração.

Então, em um refrigerador ou em uma bomba de calor, temos um dispositivo que opera segundo um ciclo que requer trabalho e que realiza o objetivo de transferir calor de um corpo de baixa temperatura para outro corpo de alta temperatura.

O refrigerador termelétrico, que foi discutido no Cap. 1 e mostrado esquematicamente na Fig. 1.8a, é um outro exemplo de dispositivo que satisfaz a nossa definição de refrigerador. A entrada de trabalho no refrigerador termelétrico é na forma de energia elétrica e calor é transferido do espaço refrigerado para a junção fria (Q_L) e da junção quente para o meio ambiente (Q_H).

O "rendimento" de um refrigerador é expresso em termos do coeficiente de desempenho ou de performance, ou ainda de eficácia,

que designamos pelo símbolo β . Para um refrigerador, o objetivo (a energia pretendida Q_L) é o calor transferido do espaço refrigerado. A energia que apresenta custos é o trabalho W . Assim, o coeficiente de desempenho, β ,¹ é

$$\beta = \frac{Q_L(\text{energia pretendida})}{W(\text{energia comprada})} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{Q_H / Q_L - 1} \quad (7.2)$$

Um refrigerador doméstico pode ter um coeficiente de performance (frequentemente referido como COP) de cerca de 2,5, enquanto um freezer apresenta esse coeficiente em torno de 1,0. Baixas temperaturas do espaço refrigerado e altas temperaturas do espaço aquecido resultam em baixos valores do COP, como será mostrado na Seção 7.6. Uma bomba de calor operando sobre uma faixa moderada de temperaturas tem COP em torno de 4, mas esse coeficiente decresce rapidamente quando a bomba de calor opera numa faixa mais ampla de temperaturas.

Antes de enunciar a segunda lei, devemos introduzir o conceito de reservatório térmico. Um reservatório térmico é um corpo para o qual e do qual calor pode ser transferido indefinidamente, sem variação na temperatura do reservatório. Assim, um reservatório térmico permanece sempre a temperatura constante. O oceano e a atmosfera aproximam-se muito dessa definição. Frequentemente, será útil indicar um reservatório de alta temperatura e um outro de baixa temperatura. Às vezes, um reservatório do qual se transfere calor é chamado de fonte e um reservatório para o qual se transfere calor é chamado de sorvedouro.

7.2 A SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA

Alicerçados na matéria tratada na seção anterior, podemos agora enunciar a segunda lei da termodinâmica. Existem dois enunciados clássicos da segunda lei, conhecidos como enunciado de Kelvin-Planck e enunciado de Clausius.

Enunciado de Kelvin-Planck: É impossível construir um dispositivo que opere num ciclo termodinâmico e que não produza outros efeitos além do levantamento de um peso e a troca de calor com um único reservatório térmico (veja a Fig. 7.6).

Esse enunciado está vinculado à nossa discussão sobre o motor térmico e, de fato, ele estabelece que é impossível construir um motor térmico que opere segundo um ciclo, receba uma determinada quantidade de calor de um corpo a alta temperatura e produza uma igual quantidade de trabalho. A única alternativa é que alguma quantidade de calor deve ser transferida do fluido de trabalho a uma temperatura mais baixa para um corpo de baixa temperatura. Então, trabalho só pode ser realizado por transferência de calor num ciclo se existirem dois níveis de temperatura e se o calor for transferido do corpo de alta temperatura para o motor térmico, e também do motor térmico para o corpo de baixa temperatura. Isso significa que é impossível construir um motor térmico que tenha um rendimento térmico de 100%.

Enunciado de Clausius: É impossível construir um dispositivo que opere num ciclo e que não produza outros efeitos além da transferência de calor de um corpo mais frio para um corpo mais quente (veja a Fig. 7.7).

Esse enunciado está relacionado com o refrigerador ou com a bomba de calor e, de fato, ele estabelece que é impossível construir um refrigerador que opere sem receber trabalho. Isso

¹Devemos notar que um ciclo de um refrigerador ou de uma bomba de calor pode ser usado com dois objetivos: a) Como um refrigerador, em que o objetivo principal é Q_L , o calor transferido para o refrigerante do espaço a ser refrigerado. b) Como um sistema de aquecimento (bomba de calor), em que o objetivo principal é o Q_H , o calor transferido do refrigerante para o corpo de alta temperatura, que é o espaço a ser aquecido. O calor Q_L é transferido para o refrigerante a partir do solo, do ar atmosférico ou ainda de um reservatório de água. O coeficiente de performance para esse caso, β' , é

$$\beta' = \frac{Q_H(\text{energia pretendida})}{W(\text{energia comprada})} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{1 - Q_L/Q_H}$$

Segue que, para um dado ciclo,

$$\beta' - \beta = 1$$

A menos que seja especificado de outra forma, o termo coeficiente de performance referir-se-á sempre a um refrigerador, conforme definido pela Eq. 7.2.

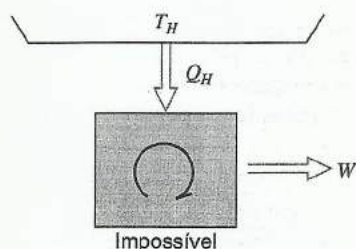


Fig. 7.6 O enunciado de Kelvin-Planck.

também implica que o coeficiente de desempenho é sempre menor do que infinito.

Três observações devem ser feitas sobre esses dois enunciados. A primeira observação é que ambos são enunciados negativos. Naturalmente, é impossível “provar” um enunciado negativo. Entretanto, podemos dizer que a segunda lei da termodinâmica (como qualquer outra lei da natureza) fundamenta-se na evidência experimental. Cada experiência relevante que é realizada nesse campo confirma, direta ou indiretamente, a segunda lei da termodinâmica, e nenhum experimento feito contrariou a segunda lei. A base da segunda lei é, portanto, a evidência experimental.

A segunda observação é que esses dois enunciados da segunda lei são equivalentes. Dois enunciados são equivalentes se a verdade de um implicar na verdade do outro, ou se a violação de um enunciado implicar na violação do outro. A demonstração de que a violação do enunciado de Clausius implica na violação do enunciado de Kelvin-Planck pode ser feita como a seguir. O dispositivo à esquerda na Fig. 7.8 é um refrigerador que não requer trabalho e, portanto, viola o enunciado de Clausius. Admita que uma quantidade de calor Q_L seja transferida do reservatório de baixa temperatura para esse refrigerador e que a mesma quantidade de calor Q_L seja transferida para o reservatório de alta temperatura. Admita também que uma quantidade de calor Q_H , maior do que Q_L , seja transferida do reservatório de alta temperatura para o motor térmico, e que esse motor rejeite o calor Q_L realizando um trabalho W , que é igual a $Q_H - Q_L$. Como não há uma transferência líquida de

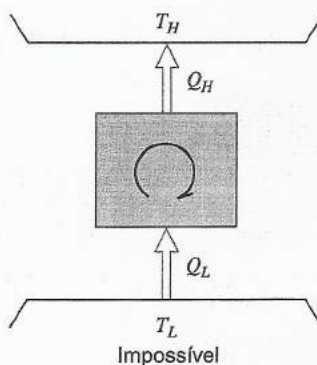


Fig. 7.7 O enunciado de Clausius.

calor para o reservatório de baixa temperatura, esse reservatório, o motor térmico e o refrigerador podem ser considerados juntos como um dispositivo que opera em um ciclo e que não produz outro efeito além do levantamento de um peso (trabalho) e a troca de calor com um único reservatório térmico. Deste modo, a violação do enunciado de Clausius implica na violação do enunciado de Kelvin-Planck. A completa equivalência desses dois enunciados é estabelecida quando é demonstrado, também, que a violação do enunciado de Kelvin-Planck implica na violação do enunciado de Clausius. Isso fica como exercício para o estudante.

A terceira observação é que, freqüentemente, a segunda lei da termodinâmica tem sido enunciada como a impossibilidade da construção de um moto-perpétuo, ou moto-contínuo, de segunda espécie. Um moto-contínuo de primeira espécie criaria trabalho do nada ou criaria massa ou energia, violando assim a primeira lei. Um moto-contínuo de segunda espécie extrairia calor de uma fonte e, em seguida, converteria esse calor completamente em outras formas de energia, violando assim a segunda lei. Um moto-contínuo de terceira espécie não teria atrito e operaria então indefinidamente, porém sem produzir trabalho.

Um motor térmico, que viola a segunda lei da termodinâmica, pode ser transformado num moto-perpétuo de segunda es-

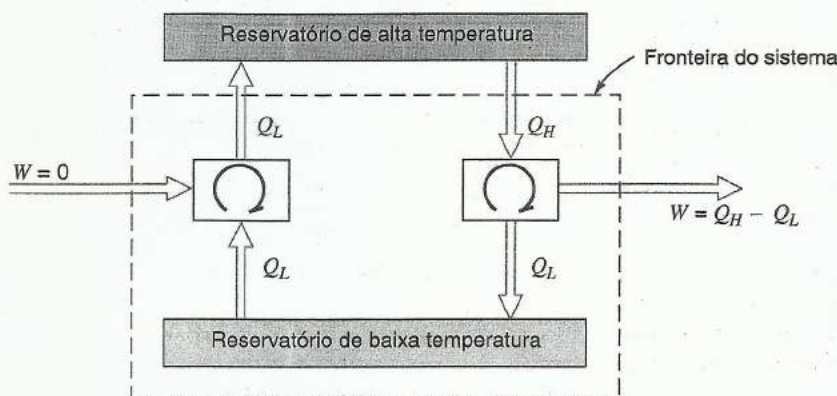


Fig. 7.8 Demonstração da equivalência dos dois enunciados da segunda lei.

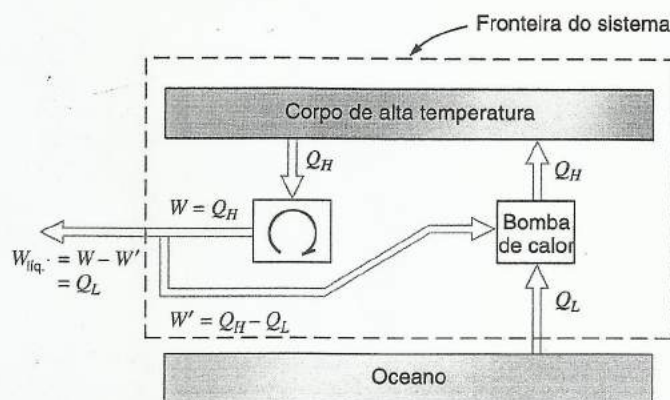


Fig. 7.9 Um moto-contínuo de segunda espécie.

7.3 O PROCESSO REVERSÍVEL

A questão que, logicamente, pode ser colocada agora é a seguinte: Se é impossível ter um motor térmico com rendimento de 100%, qual é o rendimento máximo que pode ser obtido? O primeiro passo para responder essa pergunta é definir um processo ideal que é chamado de processo reversível.

Um processo reversível para um sistema é definido como aquele que, uma vez tendo ocorrido, pode ser revertido e que, após isso, não deixe qualquer vestígio no sistema e no meio.

Ilustremos o significado dessa definição para o gás contido num cilindro provido de êmbolo. Considere primeiro a Fig. 7.10, na qual um gás, que definimos com o sistema, está a alta pressão e com o êmbolo preso por um pino. Quando o pino é removido, o êmbolo sobe e é forçado abruptamente contra os batentes. Algum trabalho é realizado pelo sistema, pois o êmbolo foi elevado. Suponha que queiramos restabelecer o sistema ao seu estado inicial. Uma maneira de fazer isso seria exercer uma força sobre o êmbolo e comprimir o gás até que o pino pudesse ser recolocado. Como a pressão exercida sobre a face do pistão é maior no curso de retorno do que no curso inicial, o trabalho realizado sobre o gás no processo reverso (compressão) é maior do que o trabalho realizado pelo gás no processo inicial (expansão). Uma certa quantidade de calor deve ser transferida do gás durante o curso reverso para

pécie com os passos descritos a seguir. Considere a Fig. 7.9, que pode ser a instalação propulsora de um navio. Uma quantidade de calor Q_L é transferida do oceano para um corpo de alta temperatura, por meio de uma bomba de calor. O trabalho requerido é W' e o calor transferido para o corpo de alta temperatura é Q_H . Admita que essa mesma quantidade de calor seja transferida para o motor térmico que viola o enunciado de Kelvin-Planck da segunda lei e que produz um trabalho $W = Q_H$. Desse trabalho, uma parcela igual a $Q_H - Q_L$ é requerida para acionar a bomba de calor, restando o trabalho líquido, $W_{liq} = Q_L$, disponível para movimentar o navio. Dessa maneira, temos um moto-perpétuo no sentido de que trabalho é realizado utilizando fontes de energia livremente disponíveis, tais como o oceano e a atmosfera.

que o sistema tenha a mesma energia interna do estado inicial. Deste modo, o sistema retorna ao seu estado inicial, mas o meio é modificado pelo fato de que trabalho foi requerido para forçar o êmbolo para baixo e que calor foi transferido para o meio ambiente. O processo inicial é, portanto, irreversível porque ele não pode ser revertido sem provocar uma mudança no meio.

Considere o gás contido no cilindro mostrado na Fig. 7.11 como o sistema e admita que o êmbolo seja carregado com vários pesos. Os pesos são então retirados, um de cada vez, fazendo-os deslizar horizontalmente, permitindo que o gás expanda e realize um trabalho correspondente ao levantamento dos pesos remanescentes sobre o êmbolo. À medida que o tamanho dos pesos é diminuído e o número de pesos aumentado, aproximamo-nos de um processo que pode ser revertido. Isto porque, para cada nível do êmbolo no processo inverso, haverá um pequeno peso que está exatamente no nível da plataforma e que pode, então, ser colocado sobre a plataforma sem requerer trabalho. No limite, portanto, quando os pesos se tornam muito pequenos, o processo inverso pode ser realizado de tal maneira que tanto o sistema como o meio retornam exatamente ao mesmo estado em que se encontravam inicialmente. Esse é um exemplo de processo reversível.

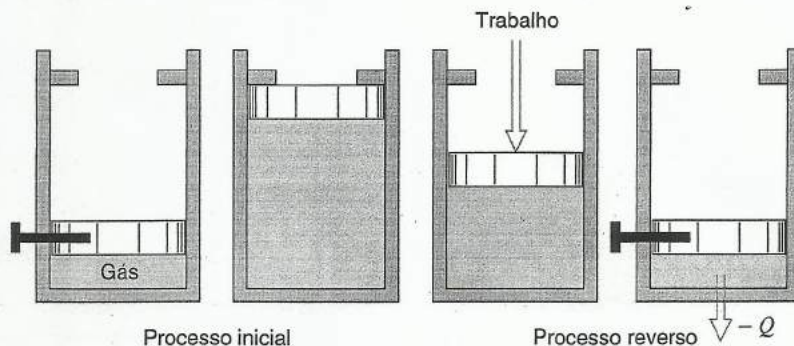


Fig. 7.10 Um exemplo de um processo irreversível.

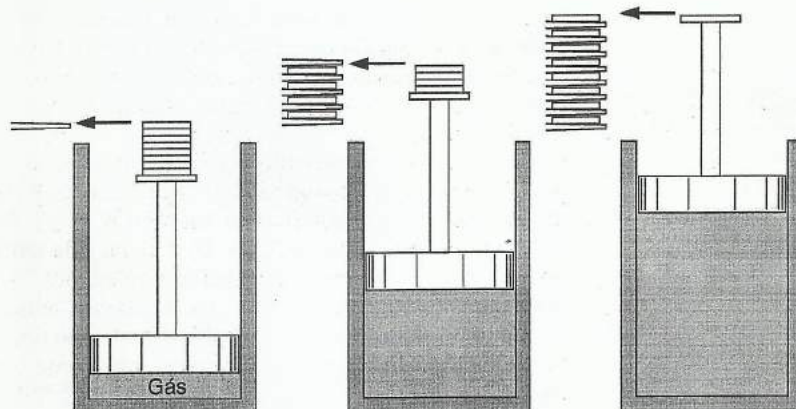


Fig. 7.11 Um exemplo de um processo que se aproxima do processo reversível.

7.4 FATORES QUE TORNAM PROCESSOS IRREVERSÍVEIS

Existem muitos fatores que fazem com que os processos sejam irreversíveis. Quatro desses fatores — atrito, expansão não-resistida, transferência de calor com diferença finita de temperatura e mistura de duas substâncias diferentes — serão considerados nesta seção.

Atrito

É óbvio que o atrito torna um processo irreversível, mas uma breve ilustração pode evidenciar esse fato ainda mais. Sejam um bloco e um plano inclinado constituindo um sistema, como na Fig. 7.12, e considere o bloco sendo puxado para cima no plano inclinado pelos pesos que descem. Uma certa quantidade de trabalho é necessária para fazer isso. Uma parte desse trabalho é requerida para vencer o atrito entre o bloco e o plano, e a outra parte é requerida para aumentar a energia potencial do bloco. O bloco pode ser reconduzido à sua posição inicial pela remoção de alguns pesos, permitindo assim que o bloco deslize para baixo no plano inclinado. Sem dúvida, alguma transferência de calor do sistema para o meio será necessária para que o bloco retorne à sua temperatura inicial. Como o meio não retorna ao seu estado inicial no fim do processo inverso, concluímos que o atrito tornou o processo irreversível. Outro tipo de efeito de atrito é aquele associado ao escoamento de fluidos viscosos em tubos e canais, e ao movimento de corpos através de fluidos viscosos.

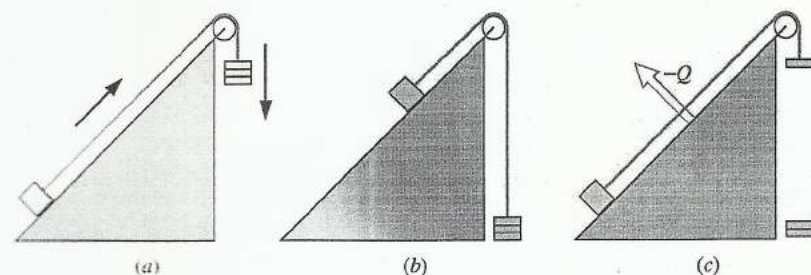


Fig. 7.12 Demonstração de que o atrito torna processos irreversíveis.

Expansão Não-resistida

O exemplo clássico de expansão não-resistida, conforme mostrado na Fig. 7.13, é um gás separado do vácuo por uma membrana. Considere o que acontece quando a membrana se rompe e o gás ocupa todo o recipiente. Pode ser mostrado que esse é um processo irreversível, considerando o que seria necessário para restaurar o sistema ao seu estado original. O gás deveria ser comprimido e calor deveria ser transferido do gás até que o seu estado inicial fosse alcançado. Como trabalho e transferência de calor envolvem uma mudança no meio ambiente, este não retorna ao seu estado inicial, indicando que a expansão não-resistida é um processo irreversível. O processo descrito na Fig. 7.10 é, também, um exemplo de expansão não-resistida.

Na expansão reversível de um gás deve haver apenas uma diferença infinitesimal entre a força exercida pelo gás e a força resistente, de modo que a velocidade com que a fronteira se move será infinitesimal. De acordo com nossa definição anterior, esse é um processo de quase-equilíbrio. Entretanto, sistemas reais envolvem diferenças finitas de forças, que causam taxas finitas de movimento da fronteira e, portanto, são irreversíveis em certo grau.

Transferência de Calor com Diferença Finita de Temperatura

Considere como um sistema um corpo de alta temperatura e outro de baixa temperatura, e deixe que ocorra uma transferência de

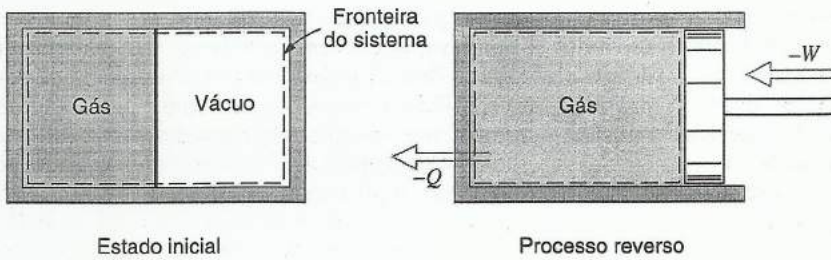


Fig. 7.13 Demonstração de que uma expansão não-resistida torna processos irreversíveis.

calor do corpo de alta temperatura para o corpo de baixa temperatura. A única maneira pela qual o sistema pode retornar ao seu estado inicial é por refrigeração, que requer trabalho do meio e, também, alguma transferência de calor para o meio. Por causa da transferência de calor e do trabalho, o meio não retorna ao seu estado original, indicando que o processo é irreversível.

Surge agora uma questão interessante. Calor é definido como a energia que é transferida por causa de uma diferença de temperatura. Acabamos de mostrar que a transferência de calor devida a uma diferença de temperatura é um processo irreversível. Então, como podemos ter um processo de transferência de calor reversível? Um processo de transferência de calor aproxima-se de um processo reversível quando a diferença de temperatura entre os dois corpos aproxima-se de zero. Assim, definimos um processo de transferência de calor reversível como aquele em que o calor é transferido por meio de uma diferença infinitesimal de temperatura. Naturalmente, percebemos que, para transferir uma quantidade finita de calor por meio de uma diferença infinitesimal de temperatura, será necessário um tempo infinito ou uma área infinita. Portanto, todos os processos reais de transferência de calor ocorrem através de uma diferença finita de temperatura e, por conseguinte, são irreversíveis, de modo que quanto maior for a diferença de temperatura, maior será a irreversibilidade. Nós veremos, no entanto, que o conceito de transferência de calor reversível é muito útil na descrição de processos ideais.

Mistura de Duas Substâncias Diferentes

A Fig. 7.14 ilustra o processo de mistura de dois gases diferentes separados por uma membrana. Quando a membrana se rompe, uma mistura homogênea de oxigênio e nitrogênio ocupa todo o volume. Esse processo será considerado com mais detalhes no Cap. 10. Podemos dizer que o processo de mistura é um caso

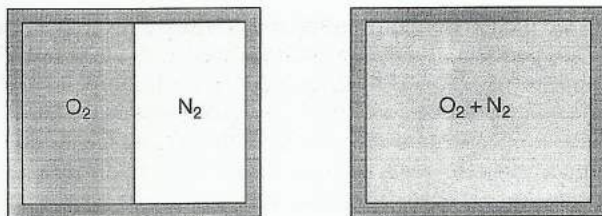


Fig. 7.14 Demonstração de que a mistura de duas substâncias diferentes é um processo irreversível.

especial de expansão não-resistida, se considerarmos que cada gás expande-se sem resistência do outro gás ao ocupar todo o volume. Uma certa quantidade de trabalho será necessária para separar esses gases. Então, para realizar a separação, uma instalação de decomposição do ar, como aquela descrita no Cap. 1, requer trabalho do meio.

Outros Fatores

Existem outros fatores que tornam processos irreversíveis, mas eles não serão considerados em detalhes aqui. Efeitos de histerese e a perda Ri^2 encontrados em circuitos elétricos são fatores que causam irreversibilidade. Uma combustão ordinária também é um processo irreversível.

É importante saber distinguir entre irreversibilidade interna e irreversibilidade externa. A Fig. 7.15 mostra dois sistemas idênticos, para os quais calor é transferido. Admitindo cada sistema como sendo uma substância pura, a sua temperatura, T , permanece constante durante o processo de transferência de calor, pois há uma mudança de fase a pressão constante. Em um sistema, o calor é transferido de um reservatório a uma temperatura $T + dT$, e, no outro, o reservatório está a uma temperatura muito mais alta, $T + \Delta T$, do que o sistema. O primeiro é um processo reversível de transferência de calor e o segundo é um processo irreversível de transferência de calor. Entretanto, quando apenas o sistema (substância pura) é considerado, ele passa exatamente através dos mesmos estados em ambos os processos de mudança de fase que admitimos ser reversíveis. Podemos dizer então

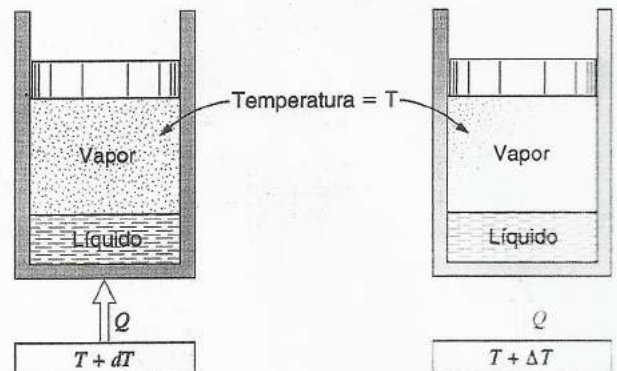


Fig. 7.15 Ilustração da diferença entre processos reversíveis externa e internamente.

que, para o segundo sistema, o processo é internamente reversível, mas externamente irreversível, porque a irreversibilidade ocorre fora do sistema.

Devemos observar também a inter-relação geral de reversibilidade, equilíbrio e tempo. Num processo reversível, o desvio do equilíbrio é infinitesimal e, portanto, ele ocorre numa velocidade infinitesimal. Visto que é desejável que os processos reais

ocorram numa velocidade finita, o afastamento do equilíbrio deve ser finito e, portanto, os processos reais são irreversíveis em determinado grau. Quanto maior o afastamento do equilíbrio, maior é a irreversibilidade e mais rapidamente o processo ocorrerá. Deve-se notar, também, que o processo de quase-equilíbrio, que foi descrito no Cap. 2, é um processo reversível e, daqui por diante, o termo processo reversível será usado.

7.5 O CICLO DE CARNOT

Tendo definido o processo reversível e considerado alguns fatores que tornam processos irreversíveis, vamos colocar novamente a questão levantada na Seção 7.3. Se o rendimento de todo motor térmico é inferior a 100%, qual é o ciclo mais eficiente que podemos ter? Vamos responder a essa questão para um motor térmico que recebe calor de um reservatório térmico de alta temperatura e rejeita calor para um reservatório de baixa temperatura. Como estamos lidando com reservatórios térmicos, ambas as temperaturas, alta e baixa, são constantes e assim permanecem, independente da quantidade de calor transferida.

Vamos admitir que esse motor térmico, que opera entre os dois reservatórios térmicos dados, tenha um ciclo no qual todos os processos são reversíveis. Se cada processo é reversível, o ciclo é também reversível; se o ciclo for revertido, o motor térmico torna-se um refrigerador. Na próxima seção, mostraremos que esse é o ciclo mais eficiente que pode operar entre dois reservatórios de temperaturas constantes. Ele é chamado de ciclo de Carnot em homenagem ao engenheiro francês Nicolas Leonard Sadi Carnot (1796-1832), que estabeleceu os fundamentos da segunda lei da termodinâmica em 1824.

Voltemos a nossa atenção agora para o ciclo de Carnot. A Fig. 7.16 mostra uma planta de potência que é semelhante, em muitos

aspectos, a uma usina termelétrica a vapor simples. Vamos admitir que essa instalação opera num ciclo de Carnot e que o fluido de trabalho é uma substância pura, tal como a água. Calor é transferido do reservatório térmico de alta temperatura para a água (vapor) na caldeira. Para que esse processo seja uma transferência de calor reversível, a temperatura da água (vapor) deve ser apenas um infinitésimo menor do que a temperatura do reservatório. Isso também significa que a temperatura da água deve permanecer constante, posto que a temperatura do reservatório térmico é constante. Portanto, o primeiro processo do ciclo de Carnot é um processo isotérmico reversível, no qual calor é transferido do reservatório de alta temperatura para o fluido de trabalho. A mudança de fase de líquido para vapor a pressão constante é, certamente, um processo isotérmico para uma substância pura.

O processo seguinte ocorre na turbina sem transferência de calor e é, portanto, adiabático. Como todos os processos do ciclo de Carnot são reversíveis, esse deve ser um processo adiabático reversível, durante o qual a temperatura do fluido de trabalho diminui desde a temperatura do reservatório de alta temperatura até aquela do reservatório de baixa temperatura.

No processo seguinte, calor é rejeitado do fluido de trabalho para o reservatório de baixa temperatura. Esse processo deve ser um processo isotérmico reversível, no qual a temperatura do fluido de trabalho é um infinitésimo maior do que aquela do reservatório de baixa temperatura. Durante esse processo isotérmico, parte do vapor d'água é condensado.

O processo final, que completa o ciclo, é um processo adiabático reversível, no qual a temperatura do fluido de trabalho aumenta desde a temperatura mais baixa até a temperatura mais alta. Se esse processo fosse realizado usando a água (vapor) como fluido de trabalho, seria necessário comprimir uma mistura de líquido e vapor saindo do condensador. (Na prática, essa operação seria muito inconveniente e, por isso, em todas as plantas de potência reais, o fluido de trabalho é condensado completamente no condensador. As bombas trabalham apenas com a fase líquida.)

Como o ciclo do motor térmico de Carnot é reversível, cada processo pode ser revertido e, assim procedendo, ele se transforma num refrigerador. O refrigerador é mostrado pelas linhas tracejadas e parênteses na Fig. 7.16. A temperatura do fluido de trabalho no evaporador deve ser um infinitésimo menor do que a temperatura do reservatório de baixa temperatura e, no condensador, ela é um infinitésimo maior do que aquela do reservatório de alta temperatura.

Deve-se salientar que o ciclo de Carnot pode ser executado de várias maneiras diferentes. Diversas substâncias de tra-

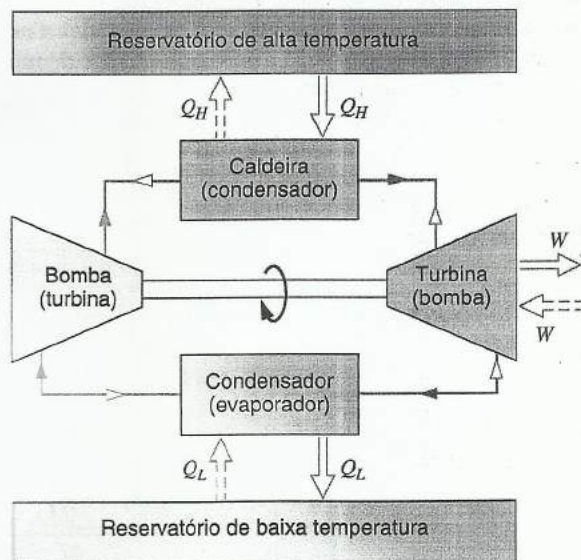


Fig. 7.16 Exemplo de um motor térmico que opera segundo um ciclo de Carnot.

balho podem ser utilizadas, tais como um gás ou um dispositivo termelétrico como aquele descrito no Cap. 1. Existem também vários arranjos possíveis para o conjunto de equipamentos do ciclo. Por exemplo, um ciclo de Carnot pode ser imaginado ocorrendo totalmente no interior de um cilindro e utilizando um gás como substância de trabalho, conforme mostrado na Fig. 7.17.

O ponto importante a ser destacado aqui é que o ciclo de Carnot, qualquer que seja a substância de trabalho, tem sempre os mesmos quatro processos básicos. São eles:

1. Um processo isotérmico reversível, no qual calor é transferido para ou do reservatório de alta temperatura.
2. Um processo adiabático reversível, no qual a temperatura do fluido de trabalho diminui da temperatura mais alta até a temperatura mais baixa.
3. Um processo isotérmico reversível, no qual calor é transferido para ou do reservatório de baixa temperatura.
4. Um processo adiabático reversível, no qual a temperatura do fluido de trabalho aumenta da temperatura mais baixa até a temperatura mais alta.

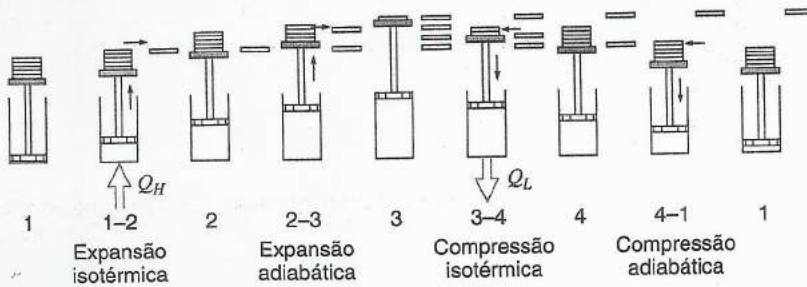


Fig. 7.17 Exemplo de um sistema gasoso operando segundo um ciclo de Carnot.

7.6 DOIS TEOREMAS SOBRE O RENDIMENTO DO CICLO DE CARNOT

Existem dois teoremas importantes relativos ao rendimento térmico de um ciclo de Carnot.

Primeiro Teorema

É impossível construir um motor que opere entre dois reservatórios térmicos dados e que tenha rendimento maior do que um motor reversível operando entre os mesmos dois reservatórios.

A demonstração desse teorema envolve uma “experiência mental”. Uma hipótese inicial é feita e, em seguida, mostra-se

que essa hipótese conduz a conclusões impossíveis. A única conclusão possível é que a hipótese inicial era incorreta.

Admitamos que exista um motor irreversível operando entre dois reservatórios térmicos e que tenha um rendimento térmico maior que o de um motor reversível operando entre os mesmos dois reservatórios. Seja Q_H o calor transferido ao motor irreversível, Q'_L o calor rejeitado e W_{IRR} o trabalho (que é igual a $Q_H - Q'_L$), como mostrado na Fig. 7.18. Admitamos ainda que o motor reversível opere como um refrigerador (isto é possível, pois os processos são reversíveis). Por fim, seja Q_L o calor transferido com o reservatório de baixa temperatura, Q_H o calor transferido

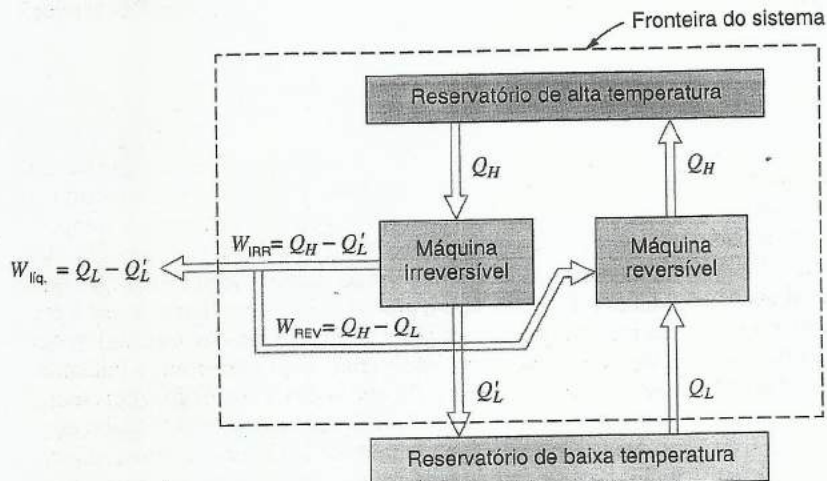


Fig. 7.18 Demonstração de que o ciclo de Carnot é o mais eficiente dos ciclos operando entre dois reservatórios de temperatura fixa.

com o reservatório de alta temperatura e W_{REV} o trabalho requerido (que é igual a $Q_H - Q_L$).

Como a hipótese inicial foi a de que o motor irreversível é mais eficiente, segue que $Q'_L < Q_L$ e $W_{\text{IRR}} > W_{\text{REV}}$ (pois Q_H é o mesmo para ambas as máquinas). Então, o motor irreversível pode movimentar o motor reversível e ainda produzir o trabalho líquido W_{liq} , que é igual a $W_{\text{IRR}} - W_{\text{REV}} = Q_L - Q'_L$. Se consideramos as duas máquinas e o reservatório de alta temperatura como o sistema, conforme indicado na Fig. 7.18, teremos um dispositivo, que opera num ciclo, troca calor com um único reservatório e produz uma determinada quantidade de trabalho. Ora, isso constitui uma violação da segunda lei da termodinâmica e concluímos que a nossa hipótese inicial (aquela de que o motor irreversível é mais eficiente que o motor reversível) está incorreta. Portanto, não podemos ter um motor irreversível que apresente rendimento térmico maior do que aquele de um motor reversível que opere entre os mesmos reservatórios térmicos.

Segundo Teorema

Todos os motores que operam segundo o ciclo de Carnot e entre dois reservatórios térmicos têm o mesmo rendimento térmico. A demonstração desse teorema é similar àquela que acabamos de delinear, mas agora com a hipótese inicial de que existe um ciclo de Carnot que é mais eficiente do que um outro ciclo de Carnot operando entre os mesmos reservatórios térmicos. Fazemos com que o ciclo de Carnot com o rendimento maior substitua o ciclo irreversível da demonstração anterior e deixemos que o ciclo de Carnot com menor rendimento opere como o refrigerador. A demonstração segue a mesma linha de raciocínio do primeiro teorema. Os detalhes ficam como exercício para o estudante.

7.7 A ESCALA DE TEMPERATURA DE GÁS IDEAL

Nesta seção, vamos reconsiderar em detalhes a escala de temperatura de gás ideal introduzida na Seção 3.6. Essa escala é baseada no fato de que à medida que a pressão de um gás real tende a zero, a sua equação de estado aproxima-se daquela de um gás ideal:

$$Pv = RT$$

Mostraremos que a escala de temperatura de gás ideal satisfaz a definição de temperatura termodinâmica dada na seção precedente pela Eq. 7.4, mas primeiramente vamos verificar como um gás ideal pode ser usado para medir temperatura em um termômetro de gás de volume constante, mostrado esquematicamente na Fig. 7.19.

Considere que o bulbo de gás esteja colocado no local onde a temperatura deve ser medida e que a coluna de mercúrio é ajustada de maneira que o nível de mercúrio fique na marca de referência A. Assim, o volume do gás permanece constante. Admita que o gás no tubo capilar está na mesma temperatura do gás no bulbo. Então, a pressão do gás, que é indicada pela altura L da coluna de mercúrio, é uma medida da temperatura.

No parágrafo precedente, nós destacamos que o rendimento de um ciclo de Carnot é independente da substância de trabalho e depende apenas da temperatura. Esse fato fornece a base para uma escala absoluta de temperatura, chamada de escala termodinâmica. Uma vez que o rendimento do ciclo de Carnot é função apenas da temperatura, segue que

$$\eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \psi(T_L, T_H) \quad (7.3)$$

onde ψ designa uma relação funcional.

Existem muitas funções matemáticas que poderiam ser escolhidas para satisfazer a relação dada na Eq. 7.3. Por simplicidade, a escala termodinâmica é definida como

$$\frac{Q_H}{Q_L} = \frac{T_H}{T_L} \quad (7.4)$$

A substituição dessa definição na Eq. 7.3 resulta na seguinte relação entre o rendimento térmico de um ciclo de Carnot e a temperatura absoluta dos dois reservatórios:

$$\eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (7.5)$$

Deve-se notar, contudo, que a definição da Eq. 7.4 não é completa, uma vez que ela não especifica a magnitude do grau da temperatura ou o valor de um ponto de referência fixo. Na próxima seção, discutiremos com mais detalhes a temperatura absoluta de gás ideal, previamente introduzida na Seção 3.6, e mostraremos que essa escala satisfaz a relação definida pela Eq. 7.4.

Vamos medir também a pressão associada com a temperatura do ponto triplo da água (273,16 K) e designá-la por $P_{\text{p.t.}}$. Então, utilizando a definição de gás ideal, qualquer outra temperatura T pode ser determinada a partir da medida da pressão P pela relação

$$T = 273,16 \left(\frac{P}{P_{\text{p.t.}}} \right)$$

Do ponto de vista prático, temos o problema de que nenhum gás se comporta exatamente como um gás ideal. Entretanto, sabemos que, quando a pressão se aproxima de zero, o comportamento de todos os gases se aproxima daquele de um gás ideal. Suponha, então, que uma série de medidas sejam feitas com quantidades diferentes de um gás no bulbo. Isso significa que a pressão medida no ponto triplo e também a pressão medida em outra temperatura qualquer irão variar. Se a temperatura indicada T_i (obtida com a hipótese de que o gás é ideal) for representada graficamente como uma função da pressão, com o bulbo de gás no ponto triplo da água, obtém-se uma curva como a mostrada na Fig. 7.20. Quando essa curva é extrapolada até a pressão zero,

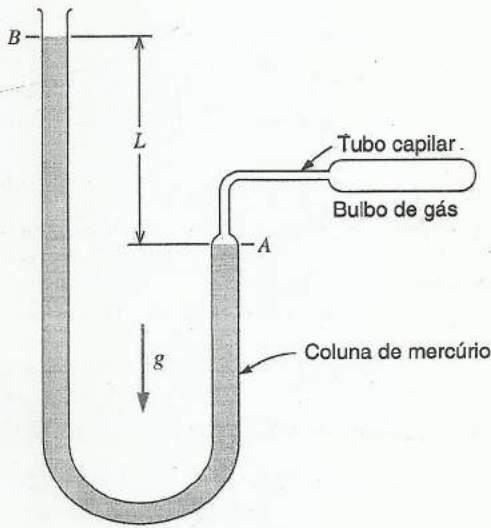


Fig. 7.19 Diagrama esquemático de um termômetro de gás de volume constante.

a temperatura correta de gás ideal é obtida. Se gases diferentes forem utilizados, curvas diferentes serão obtidas, porém todas elas indicarão a mesma temperatura na pressão zero.

Discutimos apenas os aspectos e princípios gerais para a medida de temperatura na escala de temperatura de gás ideal. Trabalhos de precisão nesse campo são difíceis e laboriosos, e existem poucos laboratórios no mundo onde tais trabalhos são realizados. A Escala Internacional de Temperatura, que foi mencionada no Cap. 2, aproxima-se muito da escala termodinâmica de temperatura, sendo mais fácil trabalhar com aquela escala em medidas reais de temperatura.

Agora, demonstraremos que a escala de temperatura de gás ideal é, de fato, idêntica à escala de temperatura termodinâmica que foi definida na discussão sobre o ciclo de Carnot e a segunda lei da termodinâmica. Nosso objetivo pode ser alcançado analisando os quatro processos do ciclo de um motor térmico de Carnot, que utiliza um gás ideal como fluido de trabalho. Os quatro pontos dos estados 1, 2, 3 e 4, e os quatro processos po-

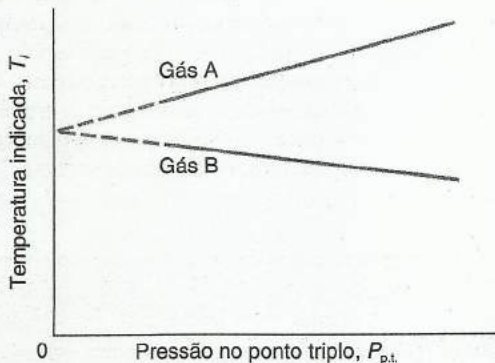


Fig. 7.20 Esquema mostrando como a temperatura de gás ideal é determinada.

dem ser vistos na Fig. 7.21. Por conveniência, vamos considerar uma massa unitária dentro do cilindro. Então, para cada um dos quatro processos, o trabalho reversível devido ao movimento de fronteira é dado pela Eq. 4.2:

$$\delta w = P dv$$

Similarmente, para cada processo, o comportamento do gás dado pela relação de gás ideal, Eq. 3.5, é:

$$Pv = RT$$

e a variação de energia interna, dada pela Eq. 5.20, é

$$du = C_{v0} dT$$

Admitindo que não haja variações nas energias cinética e potencial, a primeira lei, dada pela Eq. 5.7, para uma massa unitária, é

$$\delta q = du + \delta w$$

Substituindo nessa equação as três expressões precedentes, obtemos

$$\delta q = C_{v0} dT + \frac{RT}{v} dv \quad (7.6)$$

A forma dos dois processos isotérmicos mostrados na Fig. 7.21 é conhecido, pois Pv é constante em cada caso. O processo 1-2 é uma expansão a T_H , de modo que v_2 é maior que v_1 . Do mesmo modo, o processo 3-4 é uma compressão a uma temperatura mais baixa, T_L , e v_4 é menor que v_3 . O processo adiabático 2-3 é uma expansão de T_H para T_L , com um aumento no volume específico, enquanto o processo adiabático 4-1 é uma compressão de T_L para T_H , com um decréscimo no volume específico. A área debaixo da linha de cada pro-

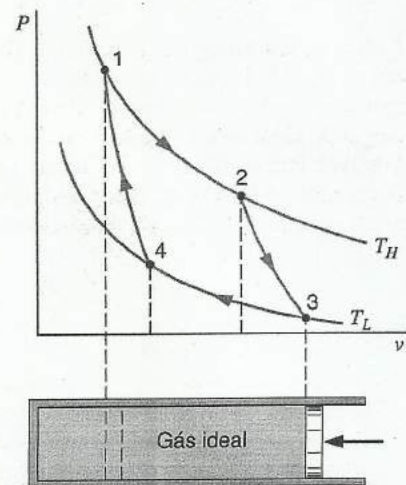


Fig. 7.21 O ciclo de Carnot de gás ideal.

cesso representa o trabalho para aquele processo, como dado pela Eq. 4.2.

Vamos agora integrar a Eq. 7.6 para cada um dos quatro processos que compõem o ciclo de Carnot. Para o processo isotérmico de adição de calor 1-2 temos

$$q_H = q_2 = 0 + RT_H \ln \frac{v_2}{v_1} \quad (7.7)$$

Para o processo de expansão adiabática 2-3, temos

$$0 = \int_{T_H}^{T_L} \frac{C_{v0}}{T} dT + R \ln \frac{v_3}{v_2} \quad (7.8)$$

Para o processo isotérmico de rejeição de calor 3-4, temos

$$\begin{aligned} q_L = -q_4 &= -0 - RT_L \ln \frac{v_4}{v_3} \\ &= +RT_L \ln \frac{v_3}{v_4} \end{aligned} \quad (7.9)$$

e para o processo de compressão adiabática 4-1, temos

$$0 = \int_{T_L}^{T_H} \frac{C_{v0}}{T} dT + R \ln \frac{v_1}{v_4} \quad (7.10)$$

Das Eqs. 7.8 e 7.10, obtemos

$$\int_{T_L}^{T_H} \frac{C_{v0}}{T} dT = R \ln \frac{v_3}{v_2} = -R \ln \frac{v_1}{v_4}$$

Por conseguinte,

$$\frac{v_3}{v_2} = \frac{v_4}{v_1}, \quad \text{ou} \quad \frac{v_3}{v_4} = \frac{v_2}{v_1} \quad (7.11)$$

Finalmente, uma manipulação das Eqs. 7.7, 7.9 e 7.11 permite obter

$$\frac{q_H}{q_L} = \frac{RT_H \ln \frac{v_2}{v_1}}{RT_L \ln \frac{v_3}{v_4}} = \frac{T_H}{T_L}$$

que é a Eq. 7.4, a definição da escala termodinâmica de temperatura em conexão com a segunda lei.

7.8 MÁQUINAS REAIS VERSUS IDEAIS

A partir da definição da escala termodinâmica de temperatura dada pela Eq. 7.4, verificou-se que o rendimento de um motor térmico de Carnot é dado pela Eq. 7.5. Conclui-se, também, que um ciclo de Carnot operando como um refrigerador ou uma bomba de calor terá um coeficiente de performance expresso por

$$\beta = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} = \frac{T_L}{T_H - T_L} \quad (7.12)$$

$$\beta' = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} = \frac{T_H}{T_H - T_L} \quad (7.13)$$

Para todos os três rendimentos nas Eqs. 7.5, 7.12 e 7.13, após o primeiro sinal de igualdade vem a definição com o uso da equação da energia que é, portanto, sempre válida. A definição que vem após o segundo sinal de igualdade é válida somente quando o ciclo é reversível, isto é, um ciclo de Carnot. Qualquer motor térmico, refrigerador ou bomba de calor real, será menos eficiente do que uma máquina de Carnot, de modo que

$$\eta_{\text{térmico real}} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \leq 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

$$\begin{aligned} \beta_{\text{real}} &= \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} \leq \frac{T_L}{T_H - T_L} \\ \beta'_{\text{real}} &= \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} \leq \frac{T_H}{T_H - T_L} \end{aligned}$$

Uma observação final precisa ser feita com respeito ao significado da temperatura de zero absoluto em conexão com a segunda lei e a escala termodinâmica de temperatura. Considere o ciclo de um motor térmico de Carnot que recebe uma dada quantidade de calor de um dado reservatório de alta temperatura. Quando a temperatura, na qual o calor é rejeitado do ciclo, é reduzida, o trabalho líquido produzido aumenta e a quantidade de calor rejeitado diminui. No limite, o calor rejeitado é zero e a temperatura do reservatório que corresponde a esse limite é o zero absoluto.

De maneira semelhante, para um refrigerador de Carnot a quantidade de trabalho requerida para produzir uma dada quantidade de refrigeração aumenta quando a temperatura do espaço refrigerado diminui. O zero absoluto representa o limite de temperatura que pode ser alcançado, e a quantidade de trabalho requerida para produzir uma quantidade finita de refrigeração aproxima-se do infinito quando a temperatura do espaço refrigerado aproxima-se de zero.

Exemplo 7.1

Vamos considerar o motor térmico esquematizado na Fig. 7.22, que recebe uma taxa de transferência de calor de 1 MW a uma

temperatura de 550°C e rejeita energia para o ambiente a 300 K. Trabalho é produzido a uma taxa de 450 kW. Estamos inte-

Exemplo 7.1 (continuação)

ressados em saber quanta energia está sendo descarregada no meio ambiente e qual o rendimento do motor, e em comparar esses dois valores com os de um motor de Carnot operando entre os mesmos dois reservatórios térmicos.

Solução

Se tomarmos o motor térmico como um sistema, a equação da energia dá

$$\dot{Q}_L = \dot{Q}_H - \dot{W} = 1000 - 450 = 550 \text{ kW}$$

e da definição do rendimento

$$\eta_{\text{térmico}} = \dot{W} / \dot{Q}_H = 450 / 1000 = 0,45$$

Para o motor térmico de Carnot, o rendimento é dado pelas temperaturas dos reservatórios

$$\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{300}{550 + 273} = 0,635$$

As taxas de trabalho e de rejeição de calor são

$$\dot{W} = \eta_{\text{Carnot}} \dot{Q}_H = 0,635 \times 1000 = 635 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_L = \dot{Q}_H - \dot{W} = 1000 - 635 = 365 \text{ kW}$$

O motor real tem, portanto, um rendimento menor do que o motor de Carnot (ideal), com um valor típico de 45% para uma usina moderna. Isso implica também que o motor real rejeita uma quantidade maior de calor para o meio ambiente (55%) comparado com o motor de Carnot (36%).

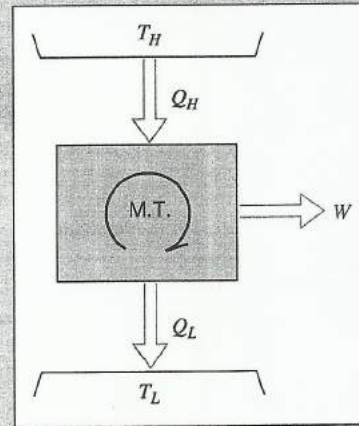


Fig. 7.22 Um motor térmico operando entre dois reservatórios térmicos de temperaturas constantes para o Exemplo 7.1.

Exemplo 7.2

Um condicionador de ar, operando no modo de refrigeração, resfria uma sala num dia quente, como esquematizado na Fig. 7.23. Um total de 4 kW é removido da sala a 24°C para uma atmosfera a 35°C. Gostaríamos de estimar o trabalho requerido para garantir esse resfriamento. Para fazer isso, não analisaremos o processo dentro do refrigerador, tal como é feito no Cap. 11. Aqui, nos limitaremos a determinar a potência mínima requerida pelo refrigerador, admitindo que ele opere num ciclo de Carnot.

Solução

O coeficiente de performance (COP) é

$$\beta = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}} = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{Q}_H - \dot{Q}_L} = \frac{T_L}{T_H - T_L} = \frac{273 + 24}{35 - 24} = 27$$

de modo que a taxa de trabalho ou potência de entrada será

$$\dot{W} = \dot{Q}_L / \beta = 4 / 27 = 0,15 \text{ kW}$$

Uma vez que a potência foi estimada com a hipótese de um refrigerador de Carnot, ela é a menor possível. Reveja também as expressões para as taxas de transferência de calor no Cap. 4. Se o refrigerador deve descarregar 4,15 kW para a atmosfera a 35°C, o lado de alta temperatura do refrigerador deve ter um

valor maior do que esse, digamos 45°C, para que o trocador de calor (condensador) tenha um tamanho razoável. Como a sala deve ser mantida a 24°C, o lado de baixa temperatura do refrigerador (evaporador) deve apresentar uma temperatura menor do que esse valor, digamos 18°C. Recalculando o COP com os valores de temperaturas alta e baixa de 45°C e 18°C, encontramos 10,8, que é um valor mais realista. Um refrigerador real opera com um COP da ordem de 5 ou menor ainda.

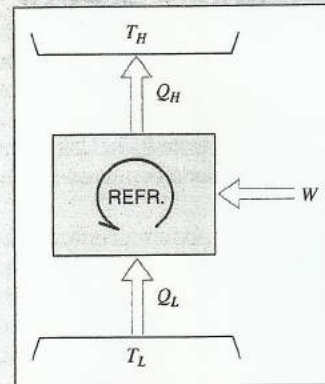


Fig. 7.23 Um condicionador de ar, operando no modo de refrigeração, onde T_L é a temperatura do espaço refrigerado.

PROBLEMAS

Motores térmicos e refrigeradores

7.1 Calcule o rendimento térmico da usina termelétrica a vapor dada no Exemplo 9.8.

7.2 Calcule o coeficiente de performance do refrigerador a R-134a dado no Exemplo 6.9.

7.3 Calcule o rendimento térmico do ciclo da usina termelétrica a vapor dado no Problema 6.63.

7.4 Calcule o coeficiente de performance do ciclo da bomba de calor a R-12 descrito no Problema 6.70.

7.5 Um motor de carro queimou 5 kg de combustível (equivalente a adicionar Q_H) com um rendimento térmico de 28%, rejeitando energia pelo radiador e pela descarga. Considere que o combustível tem um poder calorífico de 40000 kJ/kg e determine a quantidade total de trabalho fornecida pelo motor.

7.6 Uma usina termelétrica a vapor gera 150 MW de potência elétrica. A planta recebe 1000 MW de uma fonte geotérmica e rejeita energia para o ar atmosférico no condensador. Determine a potência rejeitada e a quantidade mínima de ar (kg/s) que deve circular no condensador para que a diferença de temperatura no ar não ultrapasse 10°C.

7.7 Um motor de automóvel libera 25 hp para o eixo com um rendimento térmico de 30%. O combustível tem um poder calorífico de 40 000 kJ/kg. Determine a taxa de consumo de combustível e a potência total rejeitada através do radiador e da descarga.

7.8 Para cada um dos casos a seguir, determine se a máquina térmica satisfaz a primeira lei (equação da energia) e se viola a segunda lei.

- $\dot{Q}_H = 6 \text{ kW}$, $\dot{Q}_L = 4 \text{ kW}$, $\dot{W} = 2 \text{ kW}$
- $\dot{Q}_H = 6 \text{ kW}$, $\dot{Q}_L = 0 \text{ kW}$, $\dot{W} = 6 \text{ kW}$
- $\dot{Q}_H = 6 \text{ kW}$, $\dot{Q}_L = 2 \text{ kW}$, $\dot{W} = 5 \text{ kW}$
- $\dot{Q}_H = 6 \text{ kW}$, $\dot{Q}_L = 6 \text{ kW}$, $\dot{W} = 0 \text{ kW}$

7.9 Em uma usina termelétrica a vapor, 1 MW é adicionado na caldeira, 0,58 MW é rejeitado no condensador e o trabalho na bomba é de 0,02 MW. Determine o rendimento térmico da usina. Se todos os processos da planta fossem reversíveis, determine o coeficiente de performance da planta operando como um refrigerador.

7.10 Células elétricas solares podem produzir eletricidade com 15% de rendimento. Compare isso com um motor térmico acionando um gerador elétrico de eficiência igual a 80%. Qual deveria ser o rendimento do motor térmico para que o ciclo com o gerador tivesse o mesmo rendimento total das células solares?

7.11 Para cada um dos casos no Problema 7.8, determine se a bomba de calor satisfaz a primeira lei (equação da energia) e se viola a segunda lei.

7.12 Um motor de automóvel opera com um rendimento térmico de 35%. Considere que o condicionador de ar (refrigerador) tem um coeficiente de performance $\beta = 3$, e que ele resfria o interior do carro usando trabalho de eixo do motor. Que quantidade extra de energia do combustível deve ser consumida para retirar 1 kJ de energia do interior do carro?

7.13 Um condicionador de ar rejeita 5,1 kW para o meio ambiente com uma potência de entrada de 1,5 kW. Determine a taxa de refrigeração e o coeficiente de performance do condicionador.

7.14 Uma casa necessita ser aquecida por uma bomba de calor, com $\beta' = 2,2$, e mantida permanentemente a 20°C. Estima-se que 0,8 kW são perdidos por grau de diferença entre a temperatura no interior da casa e a do ambiente externo. Considere uma temperatura de -10°C no ambiente externo e determine a potência requerida para acionar a bomba de calor.

7.15 Fluido refrigerante R-12 a 95°C, com título $x = 0,1$ e vazão de 2 kg/s é transformado em vapor saturado em um trocador de calor a pressão constante. A energia é fornecida por uma bomba de calor com um coeficiente de performance $\beta' = 2,5$. Determine a potência requerida para acionar a bomba de calor.

7.16 Um condicionador de ar, com potência de entrada de 1,2 kW, pode trabalhar como um refrigerador ($\beta = 3$) ou como uma bomba de calor ($\beta' = 4$). O condicionador mantém, durante todo o ano, um escritório a 20°C, o qual troca calor com o ambiente externo na razão de 0,5 kW por grau de diferença de temperatura entre o escritório e o exterior. Determine as temperaturas exteriores máxima e mínima, para as quais essa unidade é suficiente para condicionar o ar no escritório.

Segunda lei e processos

7.17 Prove que uma máquina cíclica que viola o enunciado de Kelvin-Planck da segunda lei também viola o enunciado de Clausius da segunda lei.

7.18 Discuta os fatores que fariam o ciclo da planta de geração de potência descrita no Problema 6.63 funcionar como um ciclo irreversível.

7.19 Considere uma máquina cíclica que troca 6 kW com um reservatório a 250°C e tem

- $\dot{Q}_L = 0 \text{ kW}$, $\dot{W} = 6 \text{ kW}$
- $\dot{Q}_L = 6 \text{ kW}$, $\dot{W} = 0 \text{ kW}$

e $\dot{Q}_L$ é trocado com um meio ambiente a 30°C. O que você pode dizer sobre o processo nos dois casos, *a* e *b*, se a máquina for um motor térmico? Repita a questão para o caso de uma bomba de calor.

7.20 Discuta os fatores que fariam o ciclo de bomba de calor descrito no Problema 6.71 funcionar como um ciclo irreversível.

7.21 Um recipiente rígido, com isolamento térmico, tem dois compartimentos separados por uma membrana. O compartimento *A* contém 1 kg de ar a 200°C e o compartimento *B* contém 1,5 kg de ar a 20°C; ambos estão a 100 kPa. Considere dois casos diferentes:

1. O calor transferido entre *A* e *B* cria uma temperatura final uniforme, *T*.
2. A membrana rompe-se e o ar chega a um estado uniforme.

Para ambos os casos, determine a temperatura final. Os dois processos são reversíveis e diferentes? Explique.

7.22 A água em um reservatório raso aquece durante o dia e resfria durante a noite. Calor trocado por radiação, condução e convecção com o meio ambiente recicla, portanto, a temperatura da água. Esse processo cíclico é reversível ou irreversível?

7.23 Considere um motor térmico e uma bomba de calor conectados, conforme mostrado na Fig. P7.23. Admita $T_{H1} = T_{H2} > T_{\text{amb}}$ e determine, para cada um dos três casos, se o conjunto satisfaz a primeira lei e/ou viola a segunda lei.

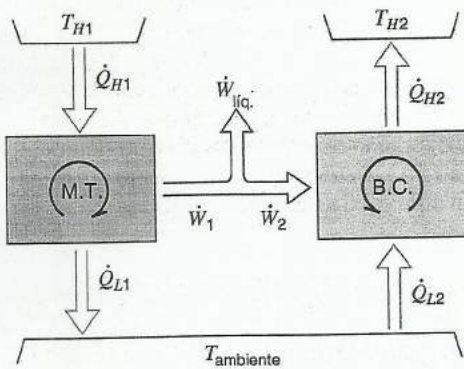


FIGURA P7.23

	$\dot{Q}_{H1}$	$\dot{Q}_{L1}$	$\dot{W}_1$	$\dot{Q}_{H2}$	$\dot{Q}_{L2}$	$\dot{W}_2$
a.	6	4	2	3	2	1
b.	6	4	2	5	4	1
c.	3	2	1	4	3	1

7.24 Considere os quatro casos de um motor térmico no Problema 7.8 e determine se algum deles é um moto-contínuo de primeira ou de segunda espécie.

Ciclos de Carnot e temperatura absoluta

7.25 Calcule o rendimento de um motor térmico-de-ciclo de Carnot operando entre dois reservatórios a 300°C e a 45°C. Compare o resultado com aquele do Problema 7.1.

7.26 Calcule o coeficiente de performance de uma bomba de calor de ciclo de Carnot operando entre dois reservatórios a 0°C e a 45°C. Compare o resultado com aquele do Problema 7.4.

7.27 Determine a potência de saída e a taxa de rejeição de calor a baixa temperatura de um motor térmico de ciclo de

Carnot, que recebe 6 kW a 250°C e rejeita calor a 30°C como no Problema 7.19.

7.28 Um motor de carro queima 5 kg de combustível (equivalente a adicionar Q_H) a 1500 K e rejeita energia para o radiador e descarga a uma temperatura média de 750 K. Admita que o combustível tem um poder calorífico de 40 000 kJ/kg e determine a quantidade máxima de trabalho que o motor pode fornecer.

7.29 Em um determinado local, energia geotérmica de água subterrânea está disponível e é usada como fonte de energia em uma planta de geração de potência. Considere um suprimento de água líquida saturada a 150°C. Qual é o máximo rendimento possível de um motor térmico cíclico usando esta fonte de energia, com a temperatura do meio ambiente a 20°C? Seria melhor usar uma fonte de vapor saturado a 150°C em vez de líquido saturado?

7.30 Diferenças de temperaturas entre águas profundas e águas superficiais podem ser usadas para geração de potência. É proposta a construção de um motor térmico cíclico que operará perto do Haváí, onde a temperatura da água do mar perto da superfície é de 20°C e, a uma certa profundidade, de 5°C. Como você avalia o possível rendimento desse motor térmico?

7.31 Determine o coeficiente de performance máximo de um refrigerador doméstico, admitindo que ele funcione conforme o ciclo de Carnot.

7.32 Um condicionador fornece 1 kg/s de ar a 15°C, resfriado a partir da temperatura do ar atmosférico a 35°C. Estime a quantidade de potência necessária para operar o condicionador de ar. Estabeleça claramente todas as hipóteses feitas.

7.33 Um dispositivo de armazenamento térmico é feito com um leito de pedra (granito) de 2 m³ aquecido até 400 K com energia solar. Um motor térmico recebe Q_H do leito e rejeita calor para o meio ambiente a 290 K. Portanto, o leito de pedra resfria e, quando a sua temperatura chega a 290 K, o processo pára. Determine a energia que o leito de pedra pode fornecer. Qual é o rendimento do motor térmico no início e no final do processo?

7.34 Propõe-se aquecer uma casa no inverno com uma bomba de calor. A casa deve ser mantida a 20°C durante todo o tempo. Quando a temperatura do ambiente exterior cai para -10°C, a taxa na qual a casa perde calor é estimada em 25 kW. Qual é a potência elétrica mínima requerida para acionar a bomba de calor?

7.35 Um comerciante vendendo refrigeradores e congeladores (freezers) garante um coeficiente de performance mínimo anual de 4,5. Como você avalia essa afirmação? O coeficiente de performance seria constante durante todo o ano?

7.36 Uma máquina cíclica, mostrada na Fig. P7.36, recebe 325 kJ de um reservatório de energia a 1000 K. Ela rejeita 125 kJ para um reservatório térmico a 400 K e o ciclo produz 200 kJ de trabalho. Esse ciclo é reversível, irreversível ou impossível?

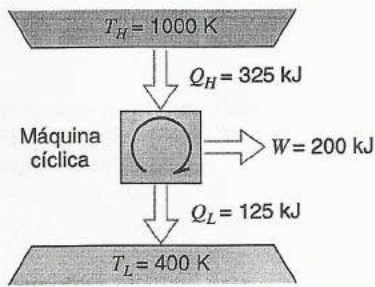


FIGURA P7.36

7.37 Um inventor desenvolveu uma unidade de refrigeração que mantém seu espaço interno refrigerado a -10°C , enquanto opera em um ambiente a 25°C . Um coeficiente de performance de 8,5 é requerido. Como você avalia isso?

7.38 Um freezer doméstico opera em um ambiente a 20°C . Calor deve ser transferido de seu interior a uma taxa de 2 kW para manter sua temperatura interna em -30°C . Teoricamente, qual é o menor (potência) motor requerido para operar esse freezer?

7.39 Em um experimento de criogenia, um contêiner deve ser mantido a -125°C embora ele ganhe 100 W devido à transferência de calor. Qual é o menor (potência) motor requerido para um refrigerador criogênico absorvendo calor do contêiner e rejeitando calor para o ambiente a 20°C ?

7.40 Um certo coletor de energia solar produz uma temperatura máxima de 100°C . A energia é usada em um motor térmico cíclico que opera em um meio ambiente a 10°C . Qual é o rendimento térmico máximo do ciclo? Qual seria o rendimento máximo, se o coletor fosse projetado para concentrar a radiação incidente de modo a obter uma temperatura máxima de 300°C ?

7.41 O hélio tem o menor ponto normal de ebulição entre todos os elementos, 4,2 K. Nesta temperatura, a entalpia de evaporação é de 83,3 kJ/kmol. Um ciclo de refrigeração de Carnot é analisado para a produção de 1 kmol de hélio líquido a 4,2 K a partir de vapor saturado também a essa temperatura. Qual é o trabalho requerido pelo refrigerador e o coeficiente de performance para o ciclo, com uma temperatura ambiente de 300 K?

7.42 Um refrigerador, mantendo 5°C em seu interior, está localizado em um ambiente a 30°C . O refrigerador deve ter uma temperatura alta ΔT graus acima da temperatura ambiente e uma temperatura baixa ΔT graus abaixo daquela no espaço refrigerado, de modo a obter a transferência de calor necessária no ciclo. Para valores de ΔT de 0°C , 5°C e 10°C , calcule o COP do refrigerador, considerando ciclo de Carnot.

7.43 Deseja-se refrigerar um ambiente a -30°C . Um reservatório a 200°C , mostrado na Fig. P7.43, está disponível e a temperatura ambiente é de 30°C . Deste modo, trabalho pode ser produzido por um motor térmico cíclico operando entre o reservatório a 200°C e o meio ambiente. Esse trabalho é usado para acionar um compressor. Determine a razão entre o calor transferido

do reservatório a 200°C e o calor transferido do reservatório a -30°C , considerando que todos os processos são reversíveis.

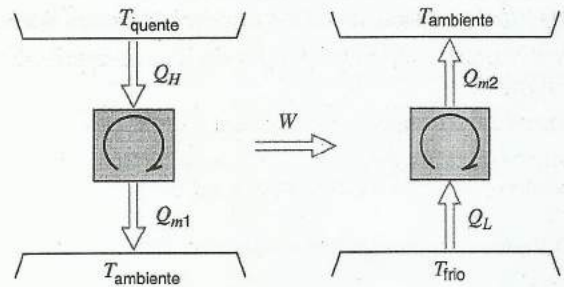


FIGURA P7.43

7.44 Uma garrafa de aço de $V = 0,1 \text{ m}^3$ contém R-134a a 20°C e 200 kPa. A garrafa é colocada em um freezer onde é resfriada a -20°C . O freezer está instalado em uma sala onde a temperatura ambiente é de 20°C e possui uma temperatura interna de -20°C . Determine a quantidade de energia que o freezer deve remover do R-134a e a quantidade extra de trabalho consumida pelo freezer para realizar o processo.

7.45 Sódio líquido sai de um reator nuclear a 800°C e é usado como fonte de energia em uma usina termelétrica a vapor. A água de refrigeração do condensador vem de uma torre de refrigeração a 15°C . Determine o rendimento térmico máximo da usina. É um equívoco usar as temperaturas dadas para calcular o rendimento?

7.46 Uma jarra contendo 4 l de leite a 25°C é colocada num refrigerador doméstico onde o leite é resfriado até 5°C . A temperatura alta no ciclo de refrigeração de Carnot é de 45°C e as propriedades do leite são as mesmas da água. Determine a quantidade de energia que deve ser removida do leite e o trabalho adicional correspondente no compressor.

7.47 Uma combinação de motor térmico e bomba de calor (similar àquela da Fig. P7.43) tira Q_{r1} de energia de rejeito de uma fonte a 50°C para o motor térmico com fonte fria a 30°C . Outra quantidade de energia de rejeito, Q_{r2} , vai para a bomba de calor que libera Q_H a 150°C . Admitindo todos os processos reversíveis e a energia de rejeito total igual a 5 MW, determine a taxa de energia liberada a alta temperatura.

7.48 Um motor térmico tem uma fonte quente constituída por uma substância aquecida até 450 K no interior de um coletor solar que recebe $0,2 \text{ kW/m}^2$. A energia coletada aciona o motor térmico que rejeita calor a 40°C . Se o motor deve produzir 2,5 kW, qual é o tamanho mínimo (área) do coletor solar?

7.49 Um refrigerador requer uma potência de 2,5 kW para resfriar um espaço a 5°C , funcionando em um ciclo com temperatura alta de 50°C . A energia Q_H é rejeitada para o ar ambiente a 35°C em um trocador de calor cujo coeficiente global de transferência de calor é de $50 \text{ W/m}^2\text{K}$. Determine a área de transferência de calor mínima requerida no trocador.

7.50 Sessenta quilos por hora de água escoam através de um trocador de calor, entrando como líquido saturado a 200 kPa e saindo como vapor saturado. O calor é fornecido por uma bomba de calor de Carnot, operando com uma fonte de baixa temperatura a 16°C. Determine a taxa de trabalho entrando na bomba de calor.

7.51 É proposta a construção de uma usina termelétrica com potência de saída de 1000 MW, tendo o vapor d'água como fluido de trabalho. Os condensadores devem ser esfriados com água de rio (veja Fig. P7.51). A temperatura máxima do vapor é de 550°C e a pressão nos condensadores será de 10 kPa. Estime o aumento na temperatura da água do rio a jusante da usina.

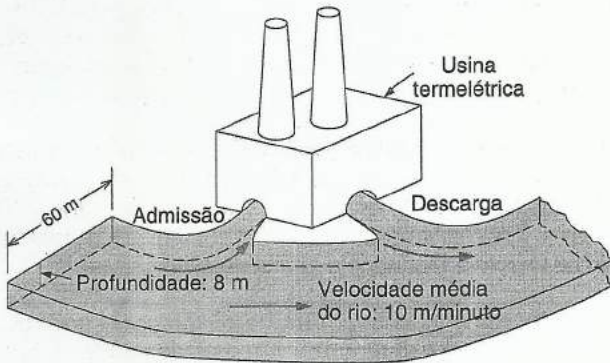


FIGURA P7.51

7.52 Dois combustíveis diferentes podem ser usados em um motor térmico operando entre a temperatura de combustão do combustível e uma fonte de baixa temperatura a 350 K. O combustível A queima a 2200 K, liberando 30 000 kJ/kg, e custa R\$1,50/kg. O combustível B queima a 1200 K, liberando 40 000 kJ/kg, e custa R\$1,30/kg. Que combustível você compraria e por quê?

7.53 Ar em uma caixa rígida de 1 m³ está a 300 K e 200 kPa. O ar é aquecido até 600 K por calor transferido de uma bomba de calor reversível, a qual recebe, além de trabalho, energia de um ambiente a 300 K. Use calor específico constante a 300 K. Como o coeficiente de performance varia, escreva $\delta Q = m_{ar} C_p dT$ e determine δW . Integre δW com a temperatura para determinar o trabalho requerido na bomba de calor.

7.54 Considere o armazenamento térmico no leito de pedra do Problema 7.33. Use o calor específico de forma que você possa escrever δQ_H em termos de dT_{pedra} e encontre uma expressão para δW saindo do motor térmico. Integre esta expressão com a temperatura e determine o trabalho total de saída do motor térmico.

Transferência de calor com ΔT finito

7.55 Uma casa é mantida aquecida, a T_H , por uma bomba de calor acionada por um motor elétrico usando o meio exterior como reservatório a baixa temperatura, T_L . As perdas de energia da casa são diretamente proporcionais à diferença de temperatura e dadas por $\dot{Q}_{perdas} = K(T_H - T_L)$. Determine a potência elétrica mínima requerida para acionar a bomba de calor como uma função dessas duas temperaturas.

7.56 Uma bomba de calor aquece uma casa no inverno e, operando de modo reverso, refrigera a casa no verão. A temperatura interior deve ser de 20°C no inverno e de 25°C no verão. A transferência de calor através das paredes e do teto é estimada em 2400 kJ por hora por grau de diferença de temperatura entre o interior e o exterior.

- Se a temperatura exterior no inverno é de 0°C, qual é a potência mínima requerida para acionar a bomba de calor?
- Para a mesma potência calculada no item a, qual é a temperatura exterior máxima no verão para a qual a casa pode ser mantida a 25°C?

7.57 Uma casa é mantida aquecida, a T_H , por uma bomba de calor elétrica usando o exterior como reservatório a baixa temperatura, T_L . Para diferentes temperaturas exteriores no inverno, estime a economia percentual de energia elétrica se a casa for mantida a 20°C em vez de 24°C. Considere que a casa perde energia para o meio exterior segundo a equação $\dot{Q}_{perdas} = K(T_H - T_L)$.

7.58 Uma casa é mantida refrigerada, a T_L , por uma bomba de calor elétrica usando o exterior como reservatório a alta temperatura, T_H . Para diversas temperaturas exteriores de verão, estime a economia percentual de energia elétrica se a casa for mantida a 25°C em vez de 20°C. Considere que a casa ganha energia do meio exterior segundo a equação $\dot{Q}_{infiltração} = K(T_H - T_L)$.

7.59 Uma fornalha pode fornecer calor, $\dot{Q}_{H1}$, a T_{H1} para ser usado por um motor térmico com rejeição de calor a T_{atm} , conforme mostrado na Fig. P7.59. O motor térmico aciona uma bomba de calor que libera $\dot{Q}_{H2}$ para manter um ambiente a $T_{ambiente}$ usando a atmosfera como reservatório frio. Determine a razão $\dot{Q}_{H2}/\dot{Q}_{H1}$ como uma função das temperaturas. Esta solução é melhor do que o aquecimento direto do ambiente com a fornalha?

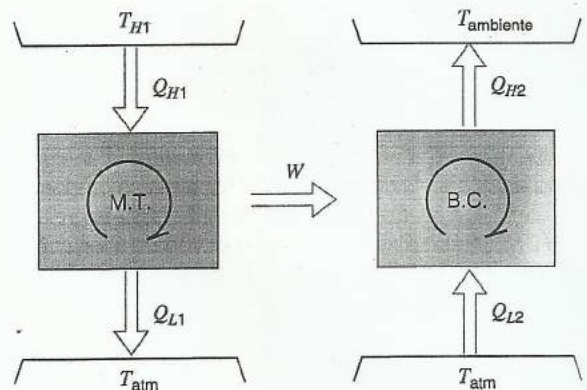


FIGURA P7.59

7.60 Uma bomba de calor tem um COP $\beta' = 0,5\beta'_{Carnot}$ e mantém uma casa a $T_H = 20^\circ\text{C}$, enquanto a casa perde energia segundo a equação $\dot{Q}_{perdas} = 0,6(T_H - T_L)$ [kW]. Para um máximo de potência requerida de 1,0 kW, determine a temperatura exterior mínima, T_L , para a qual a bomba de calor é uma fonte de calor suficiente.

7.61 Um condicionador de ar refrigera uma casa a $T_L = 20^\circ\text{C}$ com uma potência de entrada máxima de 1,2 kW. A casa ganha energia segundo a equação $\dot{Q}_{\text{infiltração}} = 0,6(T_H - T_L)$ [kW] e o COP de refrigeração é $\beta = 0,6\beta'_{\text{Carnot}}$. Determine a temperatura exterior máxima, T_H , para a qual a unidade condicionadora de ar fornece refrigeração suficiente.

7.62 Um motor térmico de Carnot, mostrado na Fig. P7.62, recebe energia de um reservatório a T_{res} através de um trocador de calor, onde o calor transferido é proporcional à diferença de temperatura e dado por $\dot{Q}_H = K(T_{\text{res}} - T_H)$. O motor rejeita calor a uma temperatura dada, T_L . Para projetar o motor térmico de modo a obter a potência máxima de saída, mostre que o reservatório a alta temperatura, T_H , no ciclo deve ser selecionado com $T_H = (T_L T_{\text{res}})^{1/2}$.

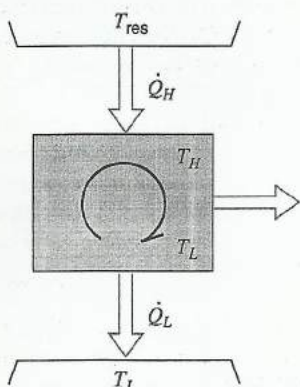


FIGURA P7.62

7.63 Um tanque de 10 m^3 e a 600 kPa age como um reservatório de alta temperatura para um motor térmico de Carnot que rejeita calor a 300 K. Uma diferença de temperatura de 25°C , entre o ar no tanque e o reservatório de alta temperatura do ciclo de Carnot, é necessária para transferir o calor. O motor térmico opera até que a temperatura do ar caia para 400 K e, em seguida, pára. Admita calor específico constante para o ar e determine quanto trabalho é produzido pelo motor térmico.

Ciclo de Carnot para um gás ideal

7.64 Hidrogênio gasoso é usado em um ciclo de Carnot tendo um rendimento de 60%, com uma fonte fria a 300 K. Durante a rejeição de calor, a pressão passa de 90 kPa para 120 kPa. Determine as transferências de calor a alta e a baixa temperatura e o trabalho líquido no ciclo por unidade de massa de hidrogênio.

7.65 Um ciclo de Carnot de gás ideal, com ar em um cilindro-pistão, tem uma temperatura alta de 1200 K e uma rejeição de calor a 400 K. Durante a adição de calor, o volume triplica. Determine as duas transferências de calor por unidade de massa de ar (q) no ciclo e o rendimento global do ciclo.

7.66 Ar em um dispositivo cilindro-pistão passa por um ciclo de Carnot com o diagrama P - v mostrado na Fig. 7.21. As temperaturas alta e baixa são 600 K e 300 K. O calor adicionado a alta temperatura é de 250 kJ/kg e a pressão mais baixa no ciclo é 75 kPa. Determine o volume específico e a pressão após a rejeição de calor e o trabalho líquido por unidade de massa.

- 5.12 $-690,7 \text{ kJ}$
 5.15 $-274,6 \text{ kJ}$
 5.18 $720,5 \text{ kJ}$
 5.21 a. $7,8 \text{ kJ}$
 b. $3,7^\circ\text{C}$
 5.24 a. 400°C
 b. $163,4 \text{ kJ}; 3012 \text{ kJ}$
 5.27 $111,4^\circ\text{C}; 173,7 \text{ kJ/kg}; 3031 \text{ kJ/kg}$
 5.30 $-2068,5 \text{ kJ}$
 5.33 $287,7 \text{ m}^3$
 5.36 115 l
 5.39 a. $829^\circ\text{C}; 25,425 \text{ m}^3$
 b. 3390 kJ
 c. 25961 kJ
 5.42 $2610,7 \text{ kJ}$
 5.45 4603 kJ
 5.48 a. $0,931 \text{ kg}; 0,58 \text{ m}^3$
 b. $85,2 \text{ kJ}$
 c. 588 kJ
 5.51 $-877,4 \text{ kJ}$
 5.54 $41,82 \text{ MJ}$
 5.57 $65,9^\circ\text{C}$
 5.60 $1,005 \text{ kJ/kg K}; 14\%; 21\%$
 5.63 5048 kJ/kg
 5.66 a. 520 kJ/kg
 b. 922 kJ/kg
 c. 842 kJ/kg
 5.69 $298 \text{ kJ}; 368,7 \text{ kJ}$
 5.72 $2,323 \text{ kg}; 3,484 \text{ kg}; 736 \text{ K}; 613 \text{ kPa}$
 5.75 $172,2 \text{ kJ/kg}; 670,5 \text{ kJ/kg}; 0;$
 $-498,3 \text{ kJ/kg}$
 5.78 $-0,192 \text{ kJ}; -0,072 \text{ kJ}$
 5.81 $845,2 \text{ kPa}; 458,8 \text{ K}; -0,0147 \text{ kJ}$
 5.84 $1,7047; 81,45 \text{ kJ/kg}; -61,95 \text{ kJ/kg}$
 5.87 $27,25 \text{ kJ}$
 5.90 $0,53^\circ\text{C/min.}$
 5.93 $2,45 \text{ kW}$
 6.3 $1,52 \text{ kg/s} \pm 2\%$
 6.6 $2,658 \text{ m}^3/\text{s}; 4,33 \text{ m}$
 6.9 $438,7 \text{ m/s}; 1,3 \text{ cm}^2$
 6.12 $123,9 \text{ kPa}; 319,7 \text{ K}$
 6.15 $22,9^\circ\text{C}; 215,7 \text{ kPa}$
 6.18 $0,9414; 0,0586$
 6.21 $482,3 \text{ kJ/kg}; 964,6 \text{ kW}$
 6.24 $1,9925 \text{ kJ/kg}; 3,985 \text{ kW}$
 6.27 $12,0 \text{ kg/s}$
 6.30 a. $1,538$
 b. $-140,0 \text{ kJ/kg}$
 c. $73,8 \text{ kJ/kg}$
 6.33 $0,866 \text{ kW}; 0,99 \text{ kW}$
 6.36 $157,4 \text{ kW}$
 6.39 $20,23^\circ\text{C}; 44,3 \text{ m/s}$
 6.42 $29,43 \text{ m/s}; 2,31 \text{ kg/s}$
 6.45 $91,565 \text{ MW}$
 6.48 $131,2 \text{ m/s}; 1056 \text{ kW}$
 6.51 $1,815 \text{ kg/s}$
 6.54 $0,867$
 6.57 $14,8 \text{ kW}$
 6.60 $0,964 \text{ kg/s}$
 6.63 $49 \text{ m/s}; 24\,805 \text{ kW}$
 6.66 a. $2673,9 \text{ kJ/kg}; 0,9755$
 b. $22,489 \text{ MW}$
 c. $18,394 \text{ MW}$
 d. $0,26$
 6.69 a. $-118,77 \text{ MW}$
 b. $-127,8 \text{ kW}$
 6.72 $25,5 \text{ kJ}$
 6.75 $0,966 \text{ kg}; 20,1 \text{ kJ}$
 6.78 $4,29 \text{ MPa}$
 6.81 $22,36 \text{ m/s}; -0,125 \text{ kJ}$
 6.84 6744 kJ
 7.6 $850 \text{ MW}; 84\,661 \text{ kg/s}$
 7.9 $0,42; 1,38$
 7.12 $0,595 \text{ kJ}$
 7.15 $51,6 \text{ kW}$
 7.21 a. 92°C
 b. 92°C
 7.27 $2,52 \text{ kW}; 3,48 \text{ kW}$
 7.30 $0,051$
 7.33 $0,275; 0$
 7.39 $97,8 \text{ W}$
 7.42 $11,1; 7,8; 5,96$
 7.45 $0,731$
 7.48 41 m^2
 7.51 $1,9^\circ\text{C}$
 7.54 $81\,945 \text{ kJ}$
 7.60 $4,4^\circ\text{C}$
 7.63 $1494,3 \text{ kJ}$
 7.66 $0,2688 \text{ m}^3/\text{kg}; 320 \text{ kPa}; 125 \text{ kJ/kg}$
 8.6 a. $4,05 \text{ kJ/kg K}$
 b. $6,5452 \text{ kJ/kg K}$
 c. $-1,2369 \text{ kJ/kg K}$
 d. $0,2966 \text{ kJ/kg K}$
 e. $0,2945 \text{ kJ/kg K}$
 8.9 a. $23,21 \text{ kJ/kg}; 0,7755 \text{ kJ/kg K}$
 b. $26,07 \text{ kJ/kg}; 1,1022 \text{ kJ/kg K}$
 c. $28,32 \text{ kJ/kg}; 1,8503 \text{ kJ/kg K}$
 8.12 $-20^\circ\text{C}; 0,24; 997 \text{ kJ/kg}; 4,6577 \text{ kJ/kg K}$
 8.15 a. $0,2629; 0,9809$
 c. $7,83$
 8.21 $232,4 \text{ kJ}; 0$
 8.24 $-38,2 \text{ kJ/kg}; -26,3 \text{ kJ/kg}$
 8.27 $-794,2 \text{ kJ}; -727,6 \text{ kJ}$
 8.30 $-3,2 \text{ kJ}; -3,8 \text{ kJ}$
 8.33 $-338 \text{ kJ/kg}; -445,6 \text{ kJ/kg}$
 8.36 $-164,5 \text{ kJ/kg}$