

### 3.2 Máquinas térmicas de sentido inverso

As máquinas térmicas podem funcionar no sentido inverso. Neste caso, é retirado calor à fonte fria e é introduzido calor na fonte quente (figura 3.10). Pelo segundo princípio da termodinâmica, isto só é possível se for fornecido trabalho ao sistema termodinâmico.

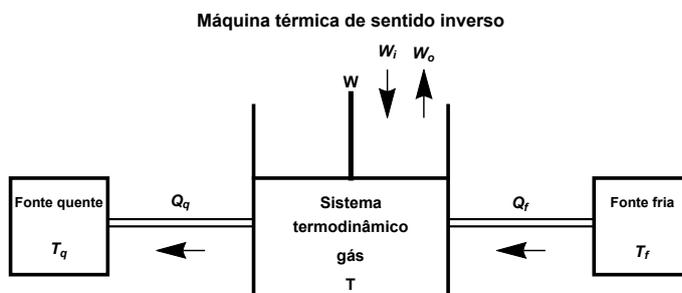


Figura 3.10: As máquinas térmicas de sentido inverso são o modelo termodinâmico para os frigoríficos e para as bombas de calor. Nestas máquinas, tem-se que  $T_q > T_f$  e a temperatura  $T$  do sistema termodinâmico é variável.

Nos frigoríficos (figura 3.11), a fonte fria é o interior do frigorífico e a fonte quente o exterior. O sistema termodinâmico é constituído por um gás de refrigeração, o freon ou o isobutano.<sup>12</sup> Para que seja possível extrair calor da fonte fria, usa-se a propriedade de alguns gases se poderem liquefazer perto dos  $0\text{ }^\circ\text{C}$ .

Para se contabilizar a eficiência com que se retira calor da fonte fria, a eficiência de uma máquina frigorífica é

$$e_{\text{frig}} = \frac{Q_f}{W_i}, \quad (3.10)$$

em que  $W_i$  é a quantidade de trabalho que se fornece ao gás de arrefecimento, de modo a retirar da fonte fria a quantidade de calor  $Q_f$ . No caso em que o

<sup>12</sup>O freon designa um grupo de compostos químicos com cloro, fluor e carbono (CFC), usados como líquidos de refrigeração. Por exemplo o freon-11, é o triclourofluormetano, tem a fórmula química  $\text{CCl}_3\text{F}$ , e, à pressão atmosférica, o seu ponto de ebulição é de  $23.8\text{ }^\circ\text{C}$ . Devido aos efeitos nefastos dos CFC sobre a camada de ozono, os freons foram substituídos por outros líquidos de refrigeração. Um dos novos refrigerantes é o isobutano ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ) e o seu ponto de ebulição é a  $-11.7\text{ }^\circ\text{C}$ .

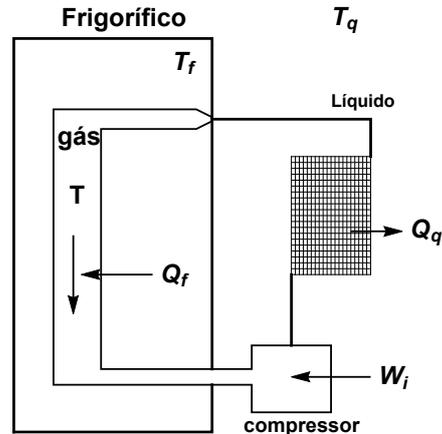


Figura 3.11: Princípio de funcionamento dos frigoríficos. A fonte fria é o interior do frigorífico, e o exterior é a fonte quente. O líquido de refrigeração ao circular na grelha exterior perde calor. Ao entrar no frigorífico, o líquido de refrigeração expande-se adiabaticamente e vaporiza. Devido ao calor latente de evaporação que é gasto na transição de fase, no início do circuito fechado do refrigerador que está no interior do frigorífico, a temperatura do gás baixa,  $T \leq T_f$ . Ao circular pelo frigorífico, o gás recebe calor da fonte fria. No compressor, o gás é comprimido voltando ao estado líquido. Na compressão, é fornecido o trabalho  $W_i$  ao gás e a sua temperatura aumenta.

sistema termodinâmico é constituído por um gás perfeito, e a máquina térmica funciona num ciclo de Carnot de sentido inverso. Por análise da figura (3.3), conclui-se que  $Q_f = nRT_f \ln V_C/V_D$  e  $W_i = nRT_q \ln V_B/V_A + nc_V(T_q - T_f)$ . Assim, o rendimento de um frigorífico operando segundo um ciclo de Carnot de sentido inverso é

$$e_{frig}^{Carnot} = \frac{RT_f \ln V_C/V_D}{RT_q \ln V_B/V_A + c_V(T_q - T_f)}. \quad (3.11)$$

Se  $T_f = 0$  K, então  $e_{frig}^{Carnot} = 0$ , sendo impossível extrair calor de um sistema termodinâmico à temperatura de 0 K.

**Exemplo 3.4** Um frigorífico doméstico tem a potência de  $P_0 = 100$  watt e o seu rendimento é  $e_{frig} = Q_f/W_i = 0.3$ . Como para a água  $c_p = 4186$  J/(kg

K) e o calor latente de fusão é  $L = 3.33 \times 10^5$  J/kg, para congelar 1 l de água, inicialmente a  $20^\circ\text{C}$ , é necessário retirar à água a quantidade de calor  $\Delta Q = m \times 4186 \times 20 + m \times 3.33 \times 10^5 = 4.17 \times 10^5$  J, em que  $m = 1$  kg. Assim, para um frigorífico com a potência indicada, o tempo de congelação da água é  $t = \Delta Q / (e_{\text{frig}} P_0) = 3$  h e 52 m, em que  $e_{\text{frig}} P_0$  é a quantidade de calor retirada por unidade de tempo. ■

Veja-se um modelo termodinâmico possível para um frigorífico. O mecanismo descrito na figura 3.12 sugere que o ciclo termodinâmico de funcionamento de um frigorífico é constituído por uma expansão adiabática ( $A \rightarrow B$ ), seguindo-se um aquecimento isocórico ( $B \rightarrow C$ ). Finalmente, o motor do frigorífico executa a compressão adiabática do gás de refrigeração ( $C \rightarrow D$ ), seguindo-se um arrefecimento isocórico ( $D \rightarrow A$ ). O ciclo termodinâmico é percorrido no sentido contrário ao das rotações dos ponteiros do relógio (figura 3.12). Neste modelo, o frigorífico funciona num ciclo de Otto de sentido inverso.

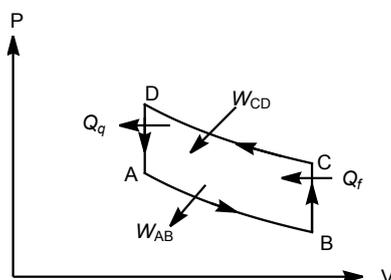


Figura 3.12: Ciclo termodinâmico de um frigorífico em que as transformações  $A \rightarrow B$  e  $C \rightarrow D$  são adiabáticas e as transformações  $B \rightarrow C$  e  $D \rightarrow A$  são isocóricas. Comparando com o esquema da figura 3.11, tem-se que  $T_A = T_q$  e  $T_C = T_f$ .

A análise do ciclo termodinâmico da figura 3.12 permite concluir que

$$\begin{aligned} W_{AB} &= nc_V(T_B - T_q) \\ W_{CD} &= nc_V(T_D - T_f) \\ Q_{BC} &= Q_f = nc_V(T_f - T_B) \\ Q_{DA} &= Q_q = nc_V(T_q - T_D), \end{aligned} \quad (3.12)$$

em que  $T_A = T_q$  é a temperatura exterior e  $T_C = T_f$  é a temperatura no interior do frigorífico. De (3.10) e (3.12), conclui-se então que o rendimento do frigorífico

é

$$e_{frig} = \frac{Q_f}{W_{CD}} = \frac{(T_f - T_B)}{(T_D - T_f)}. \quad (3.13)$$

Quando  $T_f$  se aproxima de  $T_B$ , a eficiência do frigorífico decresce, tornando-se eventualmente nula para  $T_f \approx T_B$ . Em geral  $T_D > T_q$ .

Do ponto de vista termodinâmico, os sistemas de ar condicionado funcionam como os frigoríficos. A fonte quente é o exterior das casas ou dos edifícios, e a fonte fria é o interior. Neste sistemas, o ar interior é aspirado e arrefecido na máquina de ar condicionado. O calor retirado é expelido para o exterior através de uma grelha de arrefecimento. Em seguida, o ar arrefecido é reintroduzido no interior das casas. O rendimento dos sistemas de ar condicionado é calculado como o rendimento dos frigoríficos.

Muitos sistemas de aquecimento modernos são baseados no conceito de bomba de calor. Numa bomba de calor, extrai-se calor da fonte fria e introduz-se calor na fonte quente. A bomba de calor funciona como um frigorífico em que a fonte fria é o exterior e a fonte quente está no interior das casas ou edifícios para onde é libertado calor.

O rendimento das bombas de calor é calculado através da expressão

$$\eta_{bcalor} = \frac{|Q_q|}{W_i}. \quad (3.14)$$

Se a bomba de calor funcionar num ciclo de Otto de sentido inverso, por (3.12), o rendimento da bomba de calor é

$$\eta_{bcalor}^{Otto} = \frac{(T_D - T_q)}{(T_D - T_f)}.$$