

## SOLUZIONI problemi cap.9

### 9.1

(a) Assumiamo l'aria a un gas perfetto con calori specifici costanti a temperatura ambiente:

$$c_p = 1.005 \quad \text{e} \quad c_v = 0.718 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}, \quad \text{e} \quad k = 1.4$$

Trasformazione 1-2: compressione isoentropica.

$$T_2 = T_1 \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} = (300 \text{ K})(8)^{0.4} = 689 \text{ K}$$

$$\frac{p_2 v_2}{T_2} = \frac{p_1 v_1}{T_1} \quad \longrightarrow \quad p_2 = \frac{v_1}{v_2} \frac{T_2}{T_1} p_1 = (8) \left( \frac{689 \text{ K}}{300 \text{ K}} \right) (95 \text{ kPa}) = 1745 \text{ kPa}$$

Trasformazione 2-3: somministrazione di calore a volume costante.

$$q_{23} - l_{23}^{\text{no}} = u_3 - u_2 \quad \longrightarrow \quad q_{23} = u_3 - u_2 = c_v (T_3 - T_2)$$

$$750 \text{ kJ/kg} = (0.718 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K})(T_3 - 689) \text{ K}$$

$$T_3 = 1734 \text{ K}$$

$$\frac{p_3 v_3}{T_3} = \frac{p_2 v_2}{T_2} \quad \longrightarrow \quad p_3 = \frac{T_3}{T_2} p_2 = \left( \frac{1734 \text{ K}}{689 \text{ K}} \right) (1745 \text{ kPa}) = 4392 \text{ kPa}$$

(b) Trasformazione 3-4: espansione isoentropica.

$$T_4 = T_3 \left( \frac{v_3}{v_4} \right)^{k-1} = (1734 \text{ K}) \left( \frac{1}{8} \right)^{0.4} = 755 \text{ K}$$

Trasformazione 4-1: cessione di calore a volume costante.

$$q_{41} - l_{41}^{\text{no}} = u_1 - u_4 \quad \longrightarrow \quad q_{41} = u_1 - u_4$$

ossia

$$q_u = -q_{41} = u_4 - u_1 = C_v(T_4 - T_1) = (0.718 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K})(755 - 300) \text{ K} = 327 \text{ kJ/kg}$$

$$l_n = q_c - q_u = 750 - 327 = 423 \text{ kJ/kg}$$

(c)

$$\eta_{th} = \frac{l_n}{q_c} = \frac{423 \text{ kJ/kg}}{750 \text{ kJ/kg}} = 56.4\%$$

(d)

$$v_1 = \frac{RT_1}{P_1} = \frac{(0.287 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3 / \text{kg} \cdot \text{K})(300 \text{ K})}{95 \text{ kPa}} = 0.906 \text{ m}^3 / \text{kg} = v_{\max}$$

$$v_{\min} = v_2 = \frac{v_{\max}}{r}$$

$$P_{me} = \frac{l_n}{v_1 - v_2} = \frac{l_n}{v_1(1 - 1/r)} = \frac{423 \text{ kJ/kg}}{(0.906 \text{ m}^3 / \text{kg})(1 - 1/8)} \left( \frac{\text{kPa} \cdot \text{m}^3}{\text{kJ}} \right) = 534 \text{ kPa}$$

## 9.2

(a) Assimiliamo l'aria a un gas perfetto con calori specifici costanti a temperatura ambiente,

$$c_p = 1.005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}, \quad c_v = 0.718 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}, \quad \text{e} \quad k = 1.4$$

Trasformazione 1-2: compressione isoentropica.

$$T_2 = T_1 \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} = (300 \text{ K})(16)^{0.4} = 909.4 \text{ K}$$

Trasformazione 2-3: somministrazione di calore a pressione costante.

$$\frac{P_3 v_3}{T_3} = \frac{P_2 v_2}{T_2} \quad \longrightarrow \quad T_3 = \frac{v_3}{v_2} T_2 = 2T_2 = (2)(909.4 \text{ K}) = 1818.8 \text{ K}$$

(b)

$$q_e = h_3 - h_2 = c_p(T_3 - T_2) = (1.005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K})(1818.8 - 909.4) \text{ K} = 913.9 \text{ kJ/kg}$$

Trasformazione 3-4: espansione isoentropica.

$$T_4 = T_3 \left( \frac{v_3}{v_4} \right)^{k-1} = T_3 \left( \frac{2v_2}{v_4} \right)^{k-1} = (1818.8 \text{ K}) \left( \frac{2}{16} \right)^{0.4} = 791.7 \text{ K}$$

Trasformazione 4-1: cessione di calore a volume costante.

$$\begin{aligned} q_u &= -q_{41} = u_4 - u_1 = c_v(T_4 - T_1) \\ &= (0.718 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K})(791.7 - 300) \text{ K} = 353 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\eta_t = 1 - \frac{q_u}{q_e} = 1 - \frac{353 \text{ kJ/kg}}{913.9 \text{ kJ/kg}} = \mathbf{61.4\%}$$

(c)

$$l_n = q_e - q_u = 913.9 - 353 = 560.9 \text{ kJ/kg}$$

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{(0.287 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3 / \text{kg} \cdot \text{K})(300 \text{ K})}{95 \text{ kPa}} = 0.906 \text{ m}^3 / \text{kg} = v_{\max}$$

$$v_{\min} = v_2 = \frac{v_{\max}}{r}$$

$$p_{\text{me}} = \frac{l_n}{v_1 - v_2} = \frac{l_n}{v_1(1 - 1/r)} = \frac{560.9 \text{ kJ/kg}}{(0.906 \text{ m}^3 / \text{kg})(1 - 1/16)} \left( \frac{\text{kPa} \cdot \text{m}^3}{\text{kJ}} \right) = \mathbf{660.4 \text{ kPa}}$$

### 9.3

Assimiliamo l'aria a un gas perfetto con calori specifici costanti a temperatura ambiente,

$$c_p = 1.005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}, \quad c_v = 0.718 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}, \quad \text{e} \quad k = 1.4$$

Quindi,

$$T_{2s} = T_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{(k-1)/k} = (290 \text{ K})(8)^{0.4/1.4} = 525.3 \text{ K}$$

$$T_{4s} = T_3 \left( \frac{P_4}{P_3} \right)^{(k-1)/k} = (1100 \text{ K}) \left( \frac{1}{8} \right)^{0.4/1.4} = 607.2 \text{ K}$$

$$\eta_t = 1 - \frac{q_u}{q_e} = 1 - \frac{c_p(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{607.2 - 290}{1100 - 525.3} = 0.448$$

$$\dot{L}_n = \eta_t \dot{Q}_e = (0.448)(50,000 \text{ kW}) = \mathbf{22,400 \text{ kW}}$$

#### 9.4

(a) Nelle condizioni specificate l'aria può essere assimilata a un gas perfetto. Assumendo calori specifici costanti, otteniamo

$$T_2 = T_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{(k-1)/k} = (290 \text{ K})(8)^{0.4/1.4} = 525.3 \text{ K}$$

$$T_4 = T_3 \left( \frac{P_4}{P_3} \right)^{(k-1)/k} = (1100 \text{ K}) \left( \frac{1}{8} \right)^{0.4/1.4} = 607.2 \text{ K}$$

$$\varepsilon = 100\% \longrightarrow T_5 = T_4 = 607.2 \text{ K} \quad \text{e} \quad T_6 = T_2 = 525.3 \text{ K}$$

$$\eta_t = 1 - \frac{q_u}{q_e} = 1 - \frac{c_p(T_6 - T_1)}{c_p(T_3 - T_5)} = 1 - \frac{T_6 - T_1}{T_3 - T_5} = 1 - \frac{525.3 - 290}{1100 - 607.2} = 0.5225$$

$$\dot{L}_n = \eta_t \dot{Q}_e = (0.5225)(60,000 \text{ kW}) = \mathbf{31,350 \text{ kW}}$$

#### 9.5

(a) Nelle condizioni specificate l'aria può essere assimilata a un gas perfetto con calori specifici costanti. Supponiamo che l'aeromobile sia fisso e che l'aria si muova verso di esso a una velocità  $V_1 = 280 \text{ m/s}$ . Idealmente, l'aria uscirà dal diffusore con velocità trascurabile ( $V \approx 0$ ).

Diffusore:

$$q_{12}^{\text{no}} - l_{12}^{\text{no}} = h_2 - h_1 + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2}$$

$$0 = c_p(T_2 - T_1) - V_1^2 / 2$$

ossia

$$T_2 = T_1 + \frac{V_1^2}{2 c_p} = 260 + \frac{(280 \text{ m/s})^2}{(2)(1.005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K})} \left( \frac{1 \text{ kJ/kg}}{1000 \text{ m}^2/\text{s}^2} \right) = 299.0 \text{ K}$$

$$P_2 = P_1 \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{k/(k-1)} = (48 \text{ kPa}) \left( \frac{299.0 \text{ K}}{260 \text{ K}} \right)^{1.4/0.4} = 78.3 \text{ kPa}$$

Compressore:

$$P_3 = P_4 = (r_p)(P_2) = (13)(78.3 \text{ kPa}) = 1017.9 \text{ kPa}$$

$$T_3 = T_2 \left( \frac{P_3}{P_2} \right)^{(k-1)/k} = (299.0 \text{ K})(13)^{0.4/1.4} = 622.2 \text{ K}$$

Turbina:

$$l_{\text{compr, e}} = l_{\text{turb, u}} \longrightarrow h_3 - h_2 = h_4 - h_5 \longrightarrow c_p(T_3 - T_2) = c_p(T_4 - T_5)$$

ossia

$$T_5 = T_4 - T_3 + T_2 = 1300 - 622.2 + 299.0 = 976.8 \text{ K}$$

$$P_5 = c_p \left( \frac{T_5}{T_4} \right)^{k/(k-1)} = (1017.9 \text{ kPa}) \left( \frac{976.8 \text{ K}}{1300 \text{ K}} \right)^{1.4/0.4} = 374.3 \text{ kPa}$$

(b) Ugello:

$$T_6 = T_5 \left( \frac{P_6}{P_5} \right)^{(k-1)/k} = (976.8 \text{ K}) \left( \frac{48 \text{ kPa}}{374.3 \text{ kPa}} \right)^{0.4/1.4} = 543.2 \text{ K}$$

$$q_{56}^{\text{no}} - l_{56}^{\text{no}} = h_6 - h_5 + \frac{V_6^2 - V_5^2}{2} \longrightarrow 0 = c_p(T_6 - T_5) - V_6^2 / 2$$

ossia

$$V_6 = \sqrt{(2)(1.005 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K})(976.8 - 543.2) \text{ K} \left( \frac{1000 \text{ m}^2 / \text{s}^2}{1 \text{ kJ / kg}} \right)} = 933.6 \text{ m / s}$$

(c) Il rendimento globale (rendimento propulsivo) è il rapporto fra il lavoro globale (lavoro propulsivo) e il calore fornito,

$$l_g = (V_{\text{uscita}} - V_{\text{entrata}}) V_{\text{aeromobile}} \\ = (933.6 - 280) \text{ m / s} (280 \text{ m / s}) \left( \frac{1 \text{ kJ / kg}}{1000 \text{ m}^2 / \text{s}^2} \right) = 183.0 \text{ kJ / kg}$$

$$q_e = h_4 - h_3 = c_p(T_4 - T_3) = (1.005 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K})(1300 - 622.2) \text{ K} = 681.2 \text{ kJ / kg}$$

$$\eta_g = \frac{l_g}{q_e} = \frac{183.0 \text{ kJ / kg}}{681.2 \text{ kJ / kg}} = 26.9\%$$

## 9.6

(a) Dalle tabelle per il vapore acqueo,

$$h_1 = h_{1a \text{ 10 kPa}} = 191.83 \text{ kJ / kg}$$

$$v_1 = v_{1a \text{ 10 kPa}} = 0.00101 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$$\begin{aligned} l_{g,e} &= v_1(p_2 - p_1) \\ &= (0.00101 \text{ m}^3 / \text{kg})(10,000 - 10 \text{ kPa}) \left( \frac{1 \text{ kJ}}{1 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3} \right) \\ &= 10.09 \text{ kJ / kg} \end{aligned}$$

$$h_2 = h_1 + l_{g,e} = 191.83 + 10.09 = 201.92 \text{ kJ / kg}$$

$$\left. \begin{array}{l} p_3 = 10 \text{ MPa} \\ T_3 = 500^\circ \text{C} \end{array} \right\} \begin{array}{l} h_3 = 3373.7 \text{ kJ / kg} \\ s_3 = 6.5966 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K} \end{array}$$

$$\left. \begin{array}{l} p_4 = 10 \text{ kPa} \\ s_4 = s_3 \end{array} \right\} x_4 = \frac{s_4 - s_1}{s_{1v}} = \frac{6.5966 - 0.6493}{7.5009} = \mathbf{0.793}$$

$$h_4 = h_1 + x_4 h_{1v} = 191.83 + (0.793)(2392.8) = 2089.3 \text{ kJ / kg}$$

$$q_e = h_3 - h_2 = 3373.7 - 201.92 = 3171.78 \text{ kJ / kg}$$

(b)

$$q_e = h_3 - h_2 = 3373.7 - 201.92 = 3171.78 \text{ kJ / kg}$$

$$q_u = h_4 - h_1 = 2089.3 - 191.83 = 1897.47 \text{ kJ / kg}$$

$$l_n = q_e - q_u = 3171.78 - 1897.47 = 1274.31 \text{ kJ / kg}$$

e

$$\eta_n = 1 - \frac{q_u}{q_e} = 1 - \frac{1274.31 \text{ kJ / kg}}{3171.78 \text{ kJ / kg}} = \mathbf{40.2\%}$$

(c)

$$\dot{m} = \frac{\dot{L}_n}{l_n} = \frac{300,000 \text{ kJ / s}}{1274.31 \text{ kJ / kg}} = \mathbf{235.4 \text{ kg / s}}$$

**9.7**

Dalle tabelle per il vapore acqueo,

**FORMULE 7.7**

$$h_1 = h_{1a \text{ a } 10 \text{ kPa}} = 271.93 \text{ kJ / kg}$$

$$v_1 = v_{1a \text{ a } 25 \text{ kPa}} = 0.00102 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$$\begin{aligned} l_{g,e} &= v_1(p_2 - p_1) \\ &= (0.00102 \text{ m}^3 / \text{kg})(5,000 - 25 \text{ kPa}) \left( \frac{1 \text{ kJ}}{1 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3} \right) \\ &= 5.07 \text{ kJ / kg} \end{aligned}$$

$$h_2 = h_1 + l_{g,e} = 271.93 + 5.07 = 277.00 \text{ kJ / kg}$$

$$\left. \begin{array}{l} p_3 = 5 \text{ MPa} \\ T_3 = 450^\circ \text{C} \end{array} \right\} \begin{array}{l} h_3 = 3316.2 \text{ kJ / kg} \\ s_3 = 6.8186 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K} \end{array}$$

$$\left. \begin{array}{l} p_4 = 25 \text{ kPa} \\ s_4 = s_3 \end{array} \right\} x_4 = \frac{s_4 - s_1}{s_{lv}} = \frac{6.8186 - 0.8931}{6.9383} = 0.8540$$

$$h_4 = h_1 + x_4 h_{lv} = 271.93 + (0.8540)(2346.3) = 2275.7 \text{ kJ / kg}$$

(a) Il rendimento termico è dato da

$$\begin{aligned} q_c &= h_3 - h_2 = 3316.2 - 277.0 = 3039.2 \text{ kJ / kg} \\ q_u &= h_4 - h_1 = 2275.7 - 271.93 = 2003.8 \text{ kJ / kg} \end{aligned}$$

e

$$\eta_t = 1 - \frac{q_u}{q_c} = 1 - \frac{2003.8}{3039.2} = 34.1\%$$

Perciò,

$$\eta_{\text{complessivo}} = \eta_t \times \eta_{\text{comb}} \times \eta_{\text{gen}} = (0.341)(0.75)(0.96) = 24.6\%$$

(b) Quindi la quantità di carbone fossile che deve essere fornita all'impianto nell'unità di tempo diventa



$$\dot{Q}_e = \frac{\dot{W}_n}{\eta_{\text{compressivo}}} = \frac{300,000 \text{ kJ/s}}{0.246} = 1,219,500 \text{ kJ/s}$$

e

$$\dot{m}_{\text{carbone}} = \frac{\dot{Q}_c}{C_{\text{carbone}}} = \frac{1,219,500 \text{ kJ/s}}{29,300 \text{ kJ/kg}} \left( \frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ kg}} \right) = 0.04162 \text{ tons/s} = \mathbf{150.0 \text{ tons/h}}$$

## 9.8

Dalle tabelle del vapore,

$$h_1 = h_{1a \text{ a } 10 \text{ kPa}} = 191.83 \text{ kJ/kg}$$

$$v_1 = v_{1a \text{ a } 10 \text{ kPa}} = 0.00101 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\begin{aligned} l_{g,e} &= v_1(p_2 - p_1) \\ &= (0.00101 \text{ m}^3/\text{kg})(10,000 - 10 \text{ kPa}) \left( \frac{1 \text{ kJ}}{1 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3} \right) \\ &= 10.09 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$h_2 = h_1 + l_{g,e} = 191.83 + 10.09 = 201.92 \text{ kJ/kg}$$

$$\left. \begin{array}{l} p_3 = 10 \text{ MPa} \\ T_3 = 500^\circ \text{C} \end{array} \right\} \begin{array}{l} h_3 = 3373.7 \text{ kJ/kg} \\ s_3 = 6.5966 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \end{array}$$

$$\left. \begin{array}{l} p_{4s} = 1 \text{ MPa} \\ s_{4s} = s_3 \end{array} \right\} h_4 = 2782.5 \text{ kJ/kg}$$

$$\left. \begin{array}{l} p_5 = 1 \text{ MPa} \\ T_5 = 500^\circ \text{C} \end{array} \right\} \begin{array}{l} h_5 = 3478.5 \text{ kJ/kg} \\ s_5 = 7.7622 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \end{array}$$

$$\left. \begin{array}{l} p_{6s} = 20 \text{ kPa} \\ s_{6s} = s_5 \end{array} \right\} x_6 = \frac{s_{6s} - s_1}{s_{lv}} = \frac{7.7622 - 0.6493}{7.5009} = \mathbf{0.948}$$

$$h_6 = h_1 + x_6 h_{lv} = 191.83 + (0.948)(2392.8) = 2460.2 \text{ kJ/kg}$$

(b)

$$l_{t,u} = (h_3 - h_4) + (h_5 - h_6) = 3373.7 - 2782.5 + 3478.5 - 2460.2 = 1610 \text{ kJ / kg}$$

$$q_e = (h_3 - h_2) + (h_5 - h_4) = 3373.7 - 201.92 + 3478.5 - 2782.5 = 3868 \text{ kJ / kg}$$

$$l_n = l_{t,u} - l_{t,e'} = 1610 - 10.09 = 1600 \text{ kJ / kg}$$

Perciò, il rendimento termico è

$$\eta_t = \frac{l_n}{q_e} = \frac{1600 \text{ kJ / kg}}{3868 \text{ kJ / kg}} = \mathbf{41.4\%}$$

## 9.9

Dalle tabelle per il vapore,

$$h_1 = h_{\text{sat a } 7.5 \text{ kPa}} = 168.79 \text{ kJ / kg}$$

$$v_1 = v_{\text{sat a } 7.5 \text{ kPa}} = 0.001008 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$$T_1 = T_{\text{sat a } 7.5 \text{ kPa}} = 40.29^\circ \text{C}$$

$$\begin{aligned} l_{p,i} &= v_1 (P_2 - P_1) \\ &= (0.001008 \text{ m}^3 / \text{kg})(6,000 - 7.5 \text{ kPa}) \left( \frac{1 \text{ kJ}}{1 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3} \right) \\ &= 6.04 \text{ kJ / kg} \end{aligned}$$

$$h_2 = h_1 + l_{p,i} = 168.79 + 6.04 = 174.83 \text{ kJ / kg}$$

$$\left. \begin{array}{l} P_3 = 6 \text{ MPa} \\ T_3 = 450^\circ \text{C} \end{array} \right\} \begin{array}{l} h_3 = 3301.8 \text{ kJ / kg} \\ s_3 = 6.7193 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K} \end{array}$$

$$\left. \begin{array}{l} s_4 = s_3 \\ \text{vapore sat.} \end{array} \right\} \begin{array}{l} h_4 = h_{1 \text{ a } s_g=s_4} = 2762.1 \text{ kJ / kg} \\ P_4 = P_{1 \text{ a } s_g=s_4} = 0.677 \text{ MPa} \end{array}$$

$$\left. \begin{array}{l} P_5 = 0.677 \text{ MPa} \\ T_5 = 400^\circ \text{C} \end{array} \right\} \begin{array}{l} h_5 = 3269.0 \text{ kJ / kg} \\ s_5 = 7.6554 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K} \end{array}$$

$$\left. \begin{array}{l} P_6 = 7.5 \text{ kPa} \\ s_6 = s_5 \end{array} \right\} \begin{array}{l} x_6 = \frac{s_6 - s_1}{s_{lv}} = \frac{7.6554 - 0.5764}{7.6750} = 0.9223 \\ h_6 = h_1 + x_6 h_{lv} = 168.79 + (0.9223)(2406.0) = 2387.8 \text{ kJ / kg} \end{array}$$

(b)

$$q_e = (h_3 - h_2) + (h_5 - h_4) = 3301.8 - 174.83 + 3269.0 - 2762.1 = 3633.9 \text{ kJ / kg}$$

$$q_u = h_6 - h_1 = 2387.8 - 168.79 = 2219.0 \text{ kJ / kg}$$

Perciò,

$$\eta_t = 1 - \frac{q_u}{q_e} = 1 - \frac{2219.0 \text{ kJ / kg}}{3633.9 \text{ kJ / kg}} = 38.94\%$$

(c) La portata massica dell'acqua di raffreddamento sarà minima quando l'acqua è riscaldata alla temperatura del vapore nel condensatore, la quale è 40,29 °C,

$$\dot{Q}_u = \dot{Q}_e - \dot{L}_n = (1 - \eta_t) \dot{Q}_e = (1 - 0.389)(4 \times 10^4 \text{ kJ/s}) = 2.444 \times 10^4 \text{ kJ/s}$$

$$\dot{m}_{\text{raff}} = \frac{\dot{Q}_u}{c\Delta T} = \frac{2.444 \times 10^4 \text{ kJ/s}}{(4.184 \text{ kJ/kg}\cdot\text{C})(40.29 - 15)^\circ\text{C}} = 231.0 \text{ kg/s}$$

### 9.10

(a) In un ciclo inverso a compressione di vapore ideale, la trasformazione di compressione è isoentropica, il refrigerante entra nel compressore come vapore saturo alla pressione nell'evaporatore ed esce dal condensatore come liquido saturo alla pressione nel condensatore. Dalle tabelle per il refrigerante,

$$\left. \begin{array}{l} p_1 = 120 \text{ kPa} \\ \text{vapore sat.} \end{array} \right\} \begin{array}{l} h_1 = h_{\text{v a } 120 \text{ kPa}} = 233.86 \text{ kJ/kg} \\ s_1 = s_{\text{v a } 120 \text{ kPa}} = 0.9354 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K} \end{array}$$

$$\left. \begin{array}{l} p_2 = 0.7 \text{ MPa} \\ s_2 = s_1 \end{array} \right\} \begin{array}{l} h_2 = 270.22 \text{ kJ/kg} \\ (T_2 = 34.6^\circ\text{C}) \end{array}$$

$$\left. \begin{array}{l} p_3 = 0.7 \text{ MPa} \\ \text{liquido sat.} \end{array} \right\} \begin{array}{l} h_3 = h_{\text{v a } 0.7 \text{ MPa}} = 86.78 \text{ kJ/kg} \end{array}$$

$$h_4 \cong h_3 = 86.78 \text{ kJ/kg} \quad \text{laminazione}$$

Quindi la potenza termica sottratta dall'ambiente refrigerato e la potenza fornita al compressore sono date da

$$\dot{Q}_i = \dot{m}(h_1 - h_4) = (0.05 \text{ kg/s})(233.86 - 86.78) \text{ kJ/kg} = 7.35 \text{ kW}$$

e

$$\dot{L}_e = \dot{m}(h_2 - h_1) = (0.05 \text{ kg/s})(270.22 - 233.86) \text{ kJ/kg} = 1.85 \text{ kW}$$

(b) La potenza termica ceduta all'ambiente è data da

$$\dot{Q}_H = \dot{Q}_L + \dot{L}_e = 7.35 + 1.85 = 9.20 \text{ kW}$$

(c) Il COP del frigorifero, in base alla sua definizione, è

$$\text{COP}_F = \frac{\dot{Q}_i}{\dot{L}_e} = \frac{7.35 \text{ kW}}{1.85 \text{ kW}} = 3.97$$

### 9.11

In un ciclo inverso a compressione di vapore ideale, la trasformazione di compressione è isoentropica, il refrigerante entra nel compressore come vapore saturo alla pressione nell'evaporatore ed esce dal condensatore come liquido saturo alla pressione nel condensatore. Dalle tabelle per il refrigerante,

$$\left. \begin{array}{l} p_1 = 160 \text{ kPa} \\ \text{vapore sat.} \end{array} \right\} \begin{array}{l} h_1 = h_{v a \ 60 \text{ kPa}} = 237.97 \text{ kJ / kg} \\ s_1 = s_{v a \ 160 \text{ kPa}} = 0.9295 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K} \end{array}$$

$$\left. \begin{array}{l} p_2 = 0.7 \text{ MPa} \\ s_2 = s_1 \end{array} \right\} h_2 = 268.40 \text{ kJ / kg}$$

$$\left. \begin{array}{l} p_3 = 0.7 \text{ MPa} \\ \text{sat. liquid} \end{array} \right\} h_3 = h_{v a \ 0.7 \text{ MPa}} = 86.78 \text{ kJ / kg}$$

$$h_4 \cong h_3 = 86.78 \text{ kJ / kg} \quad \text{laminazione}$$

Il carico frigorifero di questa macchina frigorifera è

$$\dot{Q}_i = \dot{m}_{\text{ghiaccio}} (\Delta h)_{\text{ghiaccio}} = (12 / 3600 \text{ kg / s})(384 \text{ kJ / kg}) = 1.28 \text{ kJ / s}$$

Quindi la portata massica del refrigerante e la potenza fornita alla macchina diventano

$$\dot{m}_F = \frac{\dot{Q}_i}{h_1 - h_4} = \frac{1.28 \text{ kJ / s}}{(237.97 - 86.78) \text{ kJ / kg}} = 0.00847 \text{ kg / s}$$

e

$$\dot{L}_e = \dot{m}_F (h_2 - h_1) = (0.00847 \text{ kg / s})(268.40 - 237.97) \text{ kJ / kg} = 0.258 \text{ kW}$$

### 9.12

In un ciclo inverso a compressione di vapore ideale, la trasformazione di compressione è isoentropica, il refrigerante entra nel compressore come vapore saturo alla pressione

nell'evaporatore ed esce dal condensatore come liquido saturo alla pressione nel condensatore. Dalle tabelle per il refrigerante,

$$\left. \begin{array}{l} p_1 = 320 \text{ kPa} \\ \text{vapore sat.} \end{array} \right\} \begin{array}{l} h_1 = h_{v \text{ a } 320 \text{ kPa}} = 248.66 \text{ kJ / kg} \\ s_1 = s_{v \text{ a } 320 \text{ kPa}} = 0.9177 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K} \end{array}$$
$$\left. \begin{array}{l} p_2 = 0.8 \text{ MPa} \\ s_2 = s_1 \end{array} \right\} h_2 = 267.58 \text{ kJ / kg} \quad (T_2 = 34.5^\circ \text{ C})$$
$$\left. \begin{array}{l} p_3 = 0.8 \text{ MPa} \\ \text{sat. liquid} \end{array} \right\} h_3 = h_{l \text{ a } 0.8 \text{ MPa}} = 93.42 \text{ kJ / kg}$$
$$h_4 \cong h_3 = 93.42 \text{ kJ / kg} \quad \text{laminazione}$$

La portata massica del refrigerante e la potenza fornita al compressore sono date da

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_s}{q_s} = \frac{\dot{Q}_s}{h_2 - h_3} = \frac{75,000 / 3,600 \text{ kJ / s}}{(267.58 - 93.42) \text{ kJ / kg}} = 0.120 \text{ kg / s}$$

e

$$\dot{L}_e = \dot{m}(h_2 - h_1) = (0.120 \text{ kg / s})(267.58 - 248.66) \text{ kJ / kg} = 2.27 \text{ kW}$$

La potenza elettrica richiesta in assenza della pompa di calore è

$$\dot{L}_e = \dot{Q}_s = 75,000 / 3,600 \text{ kJ / s} = 20.83 \text{ kW}$$

Perciò,

$$\dot{L}_{\text{risparmiata}} = \dot{L}_e - \dot{L}_e = 20.83 - 2.27 = 18.56 \text{ kW}$$

### 9.13

In un ciclo inverso a compressione di vapore ideale, la trasformazione di compressione è isoentropica, il refrigerante entra nel compressore come vapore saturo alla pressione nell'evaporatore ed esce dal condensatore come liquido saturo alla pressione nel condensatore. Dalle tabelle per il refrigerante,

$$\begin{array}{l}
 p_1 = 320 \text{ kPa} \\
 \text{vapore sat.}
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} p_1 = 320 \text{ kPa} \\ \text{vapore sat.} \end{array}} \right\}
 \begin{array}{l}
 h_1 = h_{\text{va } 320 \text{ kPa}} = 248.66 \text{ kJ / kg} \\
 s_1 = s_{\text{va } 320 \text{ kPa}} = 0.9177 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K}
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 p_2 = 1.4 \text{ MPa} \\
 s_2 = s_1
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} p_2 = 1.4 \text{ MPa} \\ s_2 = s_1 \end{array}} \right\}
 h_2 = 279.14 \text{ kJ / kg}$$

$$\begin{array}{l}
 p_3 = 1.4 \text{ MPa} \\
 \text{liquido sat.}
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} p_3 = 1.4 \text{ MPa} \\ \text{liquido sat.} \end{array}} \right\}
 h_3 = h_{\text{la } 1.4 \text{ MPa}} = 125.26 \text{ kJ / kg}$$

Il carico termico di questa pompa di calore è dato da

$$\dot{Q}_s = [\dot{m}c(T_2 - T_1)]_{\text{acqua}} = (0.18 \text{ kg / s})(4.18 \text{ kJ / kg} \cdot \text{C})(54 - 15)^\circ \text{C} = 29.34 \text{ kW}$$

e

$$\dot{m}_F = \frac{\dot{Q}_s}{q_s} = \frac{\dot{Q}_s}{h_2 - h_3} = \frac{29.34 \text{ kJ / s}}{(279.14 - 125.26) \text{ kJ / kg}} = 0.191 \text{ kg / s}$$

Quindi,

$$\dot{L}_e = \dot{m}_F(h_2 - h_1) = (0.191 \text{ kg / s})(279.14 - 248.66) \text{ kJ / kg} = 5.82 \text{ kW}$$

#### 9.14

Il rendimento termico massimo di questo generatore termoelettrico è il rendimento di Carnot.

$$\eta_{t, \text{max}} = \eta_{t, \text{Carnot}} = 1 - \frac{T_i}{T_s} = 1 - \frac{298 \text{ K}}{423 \text{ K}} = 29.6\%$$

#### 9.15

Il COP massimo di questo frigorifero termoelettrico è il COP di una macchina frigorifera di Carnot funzionante tra gli stessi limiti di temperatura,

$$\text{COP}_{\text{max}} = \text{COP}_{F, \text{Carnot}} = \frac{1}{(T_s / T_i) - 1} = \frac{1}{(293 \text{ K}) / (268 \text{ K}) - 1} = 10.72$$

Perciò,

$$\dot{L}_{e, \min} = \frac{\dot{Q}_i}{\text{COP}_{\max}} = \frac{130 \text{ W}}{10.72} = 12.1 \text{ W}$$

### 9.16

(a) Assimiliamo l'aria a un gas perfetto con calori specifici costanti a temperatura ambiente,

$$c_p = 1.005 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}, \quad c_v = 0.718 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}, \quad \text{e } k = 1.4$$

Trasformazione 1-2: compressione isoentropica.

$$T_2 = T_1 \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} = (290 \text{ K})(8)^{0.4} = 666 \text{ K} .$$

Trasformazione 2-3: somministrazione di calore a volume costante.

$$m = \frac{P_1 V_1}{RT_1} = \frac{(98 \text{ kPa})(0.00006 \text{ m}^3)}{(0.287 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3 / \text{kg} \cdot \text{K})(290 \text{ K})} = 7.065 \times 10^{-4} \text{ kg}$$

$$\begin{aligned} Q_c &= m(u_3 - u_2) = m c_v (T_3 - T_2) \\ &= (7.065 \times 10^{-4} \text{ kg})(0.718 \text{ kJ} / \text{kg} \cdot \text{K})(1800 - 666) \text{ K} = 0.575 \text{ kJ} \end{aligned}$$

(b) Trasformazione 3-4: espansione isoentropica.

$$T_4 = T_3 \left( \frac{v_3}{v_4} \right)^{k-1} = (1800 \text{ K}) \left( \frac{1}{8} \right)^{0.4} = 783 \text{ K}$$

Trasformazione 4-1: cessione di calore a volume costante.



$$\begin{aligned} Q_u &= m(u_4 - u_1) = m c_v(T_4 - T_1) \\ &= (7.065 \times 10^{-4} \text{ kg})(0.718 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K})(783 - 290) \text{ K} = \mathbf{0.250 \text{ kJ}} \end{aligned}$$

$$\dot{L}_n = \dot{Q}_e - \dot{Q}_u = 0.575 - 0.250 = 0.325 \text{ kJ}$$

$$\eta_{th} = \frac{\dot{L}_n}{\dot{Q}_e} = \frac{0.325 \text{ kJ}}{0.575 \text{ kJ}} = \mathbf{56.5\%}$$

(c)

$$\dot{n} = \frac{\dot{L}_n}{n_{\text{cil}} L_{n, \text{cil}}} = \frac{60 \text{ kJ / s}}{4 \times 0.325 \text{ kJ}} \left( \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \right) = \mathbf{2769 \text{ giri al minuto}}$$

### 9.17

Assimiliamo l'aria a un gas perfetto con calori specifici costanti a temperatura ambiente,

$$c_p = 1.005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}, \quad c_v = 0.718 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}, \quad \text{e} \quad k = 1.4$$

Caso 1:  $\beta = 6$

$$T_2 = T_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{(k-1)/k} = T_1 (\beta)^{(k-1)/k} = (300 \text{ K})(6)^{0.4/1.4} = 501 \text{ K}$$

$$T_4 = T_3 \left( \frac{P_4}{P_3} \right)^{(k-1)/k} = T_3 \left( \frac{1}{\beta} \right)^{(k-1)/k} = (1300 \text{ K}) \left( \frac{1}{6} \right)^{0.4/1.4} = 779 \text{ K}$$

$$q_e = h_3 - h_2 = c_p (T_3 - T_2) = (1.005 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K})(1300 - 501) \text{ K} = 803 \text{ kJ / kg}$$

$$q_u = h_4 - h_1 = c_p (T_4 - T_1) = (1.005 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K})(779 - 300) \text{ K} = 481 \text{ kJ / kg}$$

$$l_n = q_e - q_u = 803 - 481 = 322 \text{ kJ / kg}$$

$$\eta_t = \frac{l_n}{q_e} = \frac{322 \text{ kJ / kg}}{803 \text{ kJ / kg}} = 40.1\%$$

**Caso 2:**  $\beta = 12$

$$T_2 = T_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{(k-1)/k} = T_1 (\beta)^{(k-1)/k} = (300 \text{ K})(12)^{0.4/1.4} = 610 \text{ K}$$

$$T_4 = T_3 \left( \frac{P_4}{P_3} \right)^{(k-1)/k} = T_3 \left( \frac{1}{\beta} \right)^{(k-1)/k} = (1300 \text{ K}) \left( \frac{1}{12} \right)^{0.4/1.4} = 639 \text{ K}$$

$$q_c = h_3 - h_2 = c_p (T_3 - T_2) = (1.005 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K})(1300 - 610) \text{ K} = 693 \text{ kJ / kg}$$

$$q_u = h_4 - h_1 = c_p (T_4 - T_1) = (1.005 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K})(639 - 300) \text{ K} = 341 \text{ kJ / kg}$$

$$l_n = q_c - q_u = 693 - 341 = 352 \text{ kJ / kg}$$

$$\eta_t = \frac{l_n}{q_c} = \frac{352 \text{ kJ / kg}}{693 \text{ kJ / kg}} = 50.8\%$$

Perciò,

$$\Delta l_n = 352 - 322 = 30 \text{ kJ / kg} \quad \text{aumento}$$

$$\Delta \eta_t = 50.8\% - 40.1\% = 10.7\% \quad \text{aumento}$$

## 9.18

(a) Dalle tabelle per il vapore

$$h_1 = h_{1a \text{ a } 7.5 \text{ kPa}} = 168.79 \text{ kJ / kg}$$

$$v_1 = v_{1a \text{ a } 7.5 \text{ kPa}} = 0.001008 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$$T_1 = T_{a \text{ a } 7.5 \text{ kPa}} = 40.29^\circ \text{C}$$

$$\begin{aligned} l_{p,e} &= v_1 (P_2 - P_1) \\ &= (0.001008 \text{ m}^3 / \text{kg})(6,000 - 7.5 \text{ kPa}) \left( \frac{1 \text{ kJ}}{1 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3} \right) \\ &= 6.04 \text{ kJ / kg} \end{aligned}$$

$$h_2 = h_1 + l_{p,e} = 168.79 + 6.04 = 174.8 \text{ kJ / kg}$$

$$h_4 = h_{v \text{ a } 7.5 \text{ kPa}} = 2574.8 \text{ kJ / kg}$$

$$s_4 = s_{v \text{ a } 7.5 \text{ kPa}} = 8.2515 \text{ kJ / kg}$$

$$\left. \begin{array}{l} p_3 = 6 \text{ MPa} \\ s_3 = s_4 \end{array} \right\} \begin{array}{l} h_3 = 4856.1 \text{ kJ / kg} \\ T_3 = 1092.4^\circ \text{C} \end{array}$$

(b)

$$q_c = h_3 - h_2 = 4856.1 - 174.8 = 4681.3 \text{ kJ / kg}$$

$$q_u = h_4 - h_1 = 2574.8 - 168.79 = 2406 \text{ kJ / kg}$$

$$l_n = q_c - q_u = 4681.3 - 2406.0 = 2275.3 \text{ kJ / kg}$$

$$\eta_t = \frac{l_n}{q_c} = \frac{2275.3 \text{ kJ / kg}}{4681.3 \text{ kJ / kg}} = 48.6\%$$

Perciò,

$$\dot{L}_n = \eta_t \dot{Q}_c = (0.486)(4 \times 10^4 \text{ kJ / s}) = 1.944 \times 10^4 \text{ kJ / s}$$

(c) La portata massica dell'acqua di raffreddamento sarà minima quando l'acqua è riscaldata alla temperatura del vapore nel condensatore, la quale è 40,29 °C,

$$\dot{Q}_u = \dot{Q}_c - L_n = 4 \times 10^4 - 1.944 \times 10^4 = 2.056 \times 10^4 \text{ kJ/s}$$

$$\dot{m}_{\text{raffr}} = \frac{\dot{Q}_u}{c\Delta T} = \frac{2.056 \times 10^4 \text{ kJ/s}}{(4.184 \text{ kJ/kg}\cdot^\circ\text{C})(40.29 - 18^\circ\text{C})} = 220.5 \text{ kg/s}$$

### 9.19

In un ciclo inverso a compressione di vapore ideale, la trasformazione di compressione è isoentropica, il refrigerante entra nel compressore come vapore saturo alla pressione nell'evaporatore ed esce dal condensatore come liquido saturo alla pressione nel condensatore. Dalle tabelle per il refrigerante,

$$\left. \begin{array}{l} p_1 = 120 \text{ kPa} \\ \text{vapore sat.} \end{array} \right\} \begin{array}{l} h_1 = h_{v \text{ a } 120 \text{ kPa}} = 233.86 \text{ kJ/kg} \\ s_1 = s_{v \text{ a } 120 \text{ kPa}} = 0.9354 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K} \end{array}$$

$$\left. \begin{array}{l} p_2 = 0.7 \text{ MPa} \\ s_2 = s_1 \end{array} \right\} h_2 = 270.22 \text{ kJ/kg} \quad (T_2 = 34.6^\circ\text{C})$$

$$\left. \begin{array}{l} p_3 = 0.7 \text{ MPa} \\ \text{liquido sat.} \end{array} \right\} h_3 = h_{l \text{ a } 0.7 \text{ MPa}} = 86.78 \text{ kJ/kg}$$

$$h_4 \cong h_3 = 86.78 \text{ kJ/kg} \quad \text{laminazione}$$

La portata massica del refrigerante è data da

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_i}{h_1 - h_4} = \frac{100 \text{ kJ/s}}{(233.86 - 86.78) \text{ kJ/kg}} = 0.68 \text{ kg/s}$$

(b) La potenza fornita al compressore è

$$\dot{L}_c = \dot{m}(h_2 - h_1) = (0.68 \text{ kg/s})(270.22 - 233.86) \text{ kJ/kg} = 24.7 \text{ kW}$$

(c) La portata massica dell'acqua di raffreddamento è data da

$$\dot{Q}_s = \dot{m}(h_2 - h_3) = (0.68 \text{ kg/s})(270.22 - 86.78) \text{ kJ/kg} = 124.7 \text{ kW}$$

e

$$\dot{m}_{\text{raffr}} = \frac{\dot{Q}_s}{(c\Delta T)_{\text{acqua}}} = \frac{124.7 \text{ kJ/s}}{(4.184 \text{ kJ/kg}\cdot\text{C})(8^\circ\text{C})} = 3.73 \text{ kg/s}$$

### 9.20

(a) In un ciclo inverso a compressione di vapore ideale, la trasformazione di compressione è isoentropica, il refrigerante entra nel compressore come vapore saturo alla pressione nell'evaporatore ed esce dal condensatore come liquido saturo alla pressione nel condensatore. Dalle tabelle per il refrigerante,

$$\left. \begin{array}{l} p_1 = 240 \text{ kPa} \\ \text{vapore sat.} \end{array} \right\} \begin{array}{l} h_1 = h_{v \text{ a } 240 \text{ kPa}} = 244.09 \text{ kJ/kg} \\ s_1 = s_{v \text{ a } 240 \text{ kPa}} = 0.9222 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K} \\ v_1 = v_{l \text{ a } 240 \text{ kPa}} = 0.0834 \text{ m}^3/\text{kg} \end{array}$$

$$\left. \begin{array}{l} p_2 = 0.9 \text{ MPa} \\ s_2 = s_1 \end{array} \right\} h_2 = 271.41 \text{ kJ/kg}$$

$$\left. \begin{array}{l} p_3 = 0.9 \text{ MPa} \\ \text{liquido sat.} \end{array} \right\} h_3 = h_f @ 0.9 \text{ MPa} = 99.56 \text{ kJ/kg}$$

$$h_4 \cong h_3 = 99.56 \text{ kJ/kg} \quad \text{laminazione}$$

La potenza termica fornita alla casa è data da

$$\dot{Q}_s = \dot{m}(h_2 - h_3) = (0.15 \text{ kg/s})(271.41 - 99.56) \text{ kJ/kg} = 25.78 \text{ kW}$$

(b) La portata volumetrica del refrigerante all'entrata del compressore è

$$\dot{V}_1 = \dot{m}v_1 = (0.15 \text{ kg/s})(0.0834 \text{ m}^3/\text{kg}) = 0.01251 \text{ m}^3/\text{s}$$

(c) Il COP di questa pompa di calore è dato da

$$\text{COP}_F = \frac{q_i}{l_e} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} = \frac{271.41 - 99.56}{271.41 - 244.09} = 6.29$$