Exergia

Parte 1

Energia e Exergia

- Qualidade da energia está diretamente relacionada ao conceito de Exergia
  - Máximo trabalho teórico produzido por um sistema ao interagir com dado ambiente (até atingir o equilíbrio)
- Qualidade da energia => capacidade em convertê-la em outro tipo de energia
  - Por ex: energia elétrica pode ser facilmente convertida => alta qualidade (nobre)
  - Por ex: fonte de calor depende da temperatura
    - Temperaturas baixas dificilmente serão convertidas em outro tipo de energia
    - Por outro lado, se $T_{fonte} >> T_{dispositivo}$ => "perda" de exergia

Energia e Exergia

- Por ex: combustíveis dependem de sua composição química
  - Cerca de 30% da exergia química é destruída na combustão com ar teórico
- Por ex: em grande parte dos processos ind., $T_{utiliz.} < 600°C$. $1400°C < T_{chama} < 1800°C$ => diminuição da qualidade a energia
  - Mesmo se $\eta_T = 90\%$ para caldeiras, grande parte da exergia é perdida
  - Maior parte da perda de exergia em centrais termelétricas se dá na caldeira! (e não em condensadores, que promovem rejeição de calor)

Energia e Exergia

- Cogeração:
  - Permite adequar a elevada disponibilidade de energia resultante da queima dos combustíveis com a extração de energia e transferências de calor.
    - $T_{elevada}$ é utilizada onde é necessário.

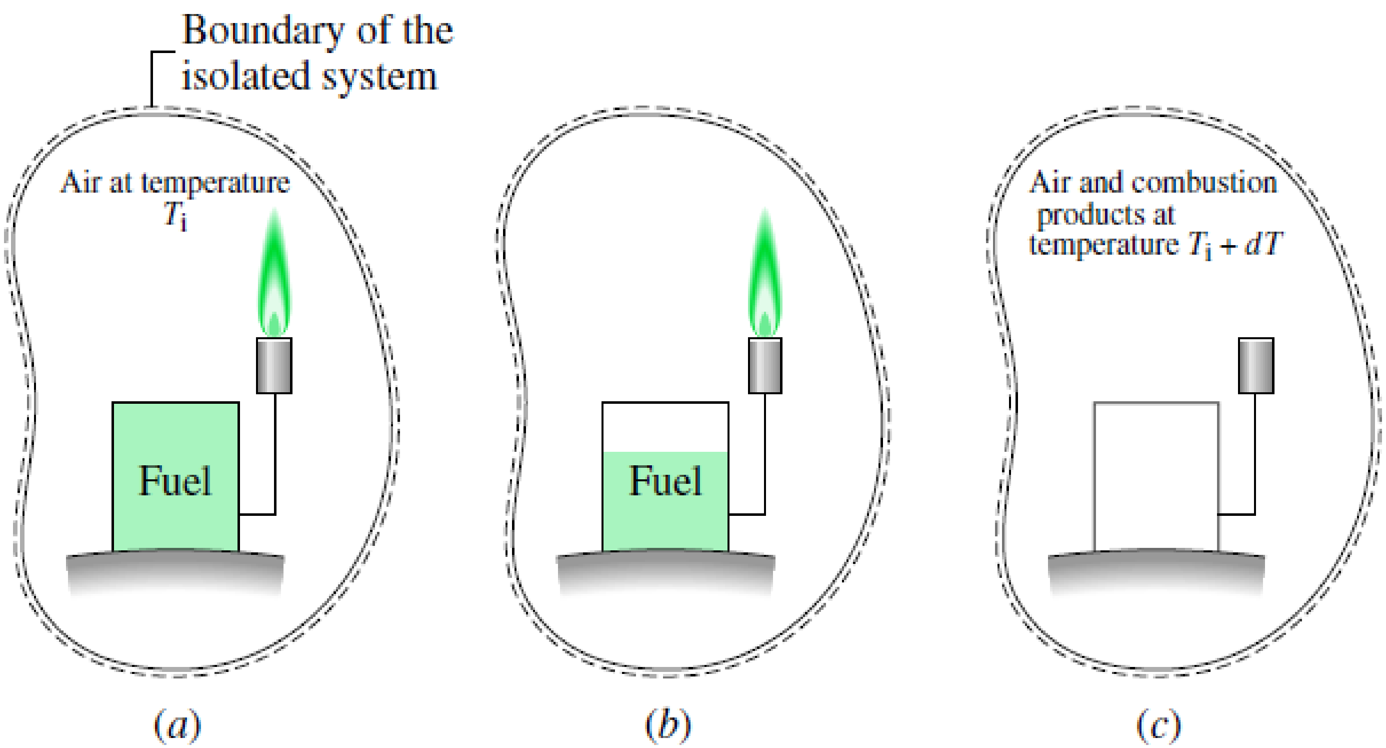
Análise Exergética

- Análise exergética:
  - Faz uso da conservação da massa, da 1ª Lei e da 2ª Lei para o projeto e a análise de sistemas térmicos
- Exergia:
  - Máximo trabalho teórico que pode ser obtido quando um sistema interage até atingir o equilíbrio com dado ambiente
  - Ambiente: sistema idealizado suficientemente longe e grande, onde as propriedades intensivas não são afetadas por processos envolvendo o sistema e a vizinhança imediata.
    - Embora suas propriedades intensivas não mudem, as propriedades extensivas podem mudar

Análise Exergética

- Vizinhança imediata: região próxima ao sistema, onde variações de propriedades intensivas podem ocorrer devido a interações com o sistema
- Estado morto: estado em que o sistema considerado encontra-se em equilíbrio com o ambiente
  - Não existe mais diferença de potencial para realização de trabalho
- OBS: no estado morto, tanto o sistema como o ambiente possuem energia, porém a exergia é nula
  - Não existe diferença de potencial para realizar trabalho

Exemplo



- $E_a = E_c$
- $T_i + dt > T_i$
- $E_a > E_c$

Análise Exergética

- Ambiente
  - Se o ambiente é referência, então KE = PE = 0
  - Variações de U_e, S_e e V_e (energ. int., entropia e volume do ambiente) se relacionam como:

$$\Delta U_e = T_0 \, \Delta S_e - p_0 \, \Delta V_e$$

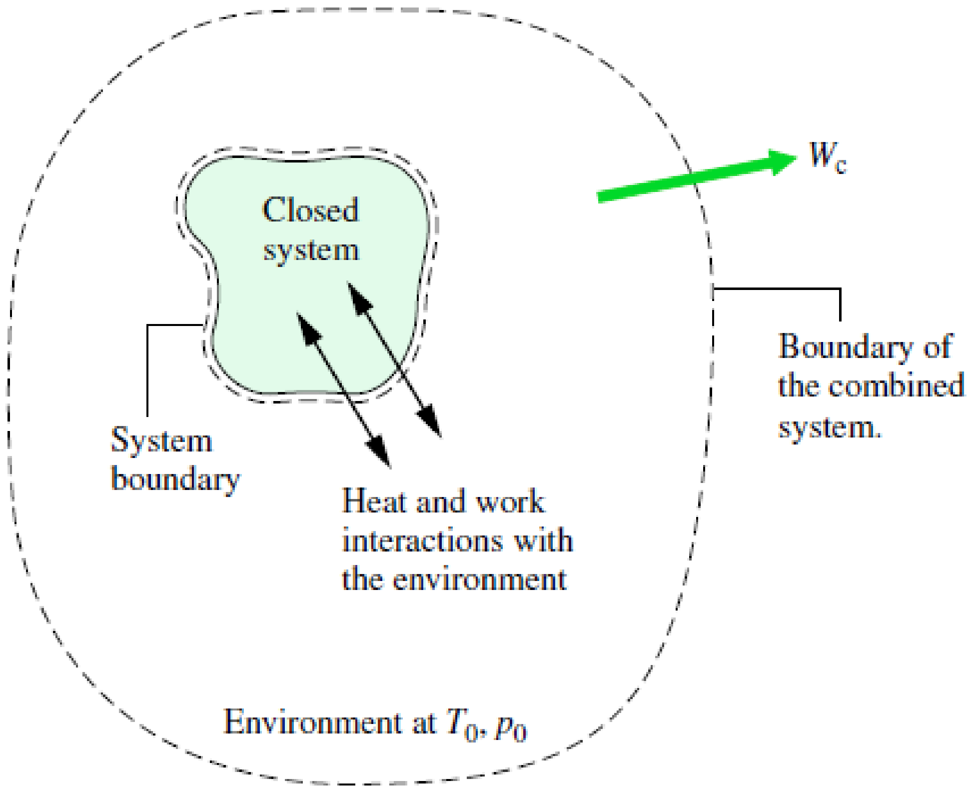
  - onde os índices "o" e "e" se referem ao Estado Morto e ao Ambiente, respectivamente

Análise Exergética

- OBS:
  - Exergia é uma propriedade
  - Exergia é uma medida das diferenças entre o estado de um sistema e o ambiente
  - Exergia não pode ter valores negativos
    - Diferença de potencial => exergia > 0
  - Exergia não é conservada: ela é destruída por irreversibilidades

Exergia de um sistema a dado estado

$$\mathsf{E} = (E - U_0) + p_0(V - V_0) - T_0(S - S_0)$$



Exergia intensiva e variação de exergia

$$e = (u - u_0) + p_0(v - v_0) - T_0(s - s_0) + V^2/2 + gz$$

$$E_2 - E_1 = (E_2 - E_1) + p_0(V_2 - V_1) - T_0(S_2 - S_1)$$

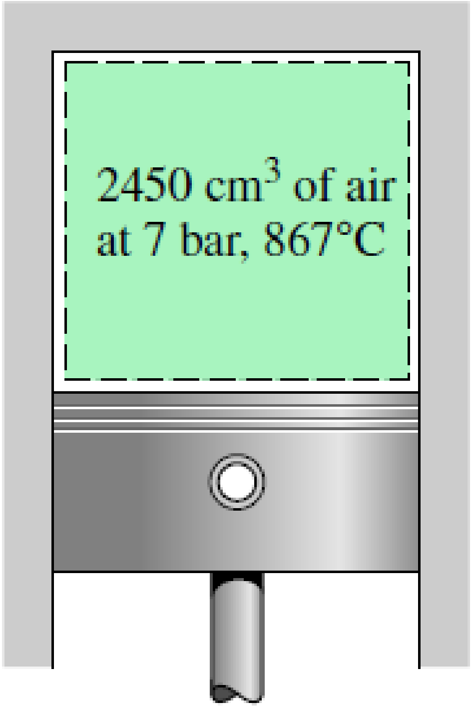
Exemplo1 (livro M.S.)

to determine the specific exergy of saturated water vapor at 120°C, having a velocity of 30 m/s and an elevation of 6 m, each relative to an exergy reference environment where $T_0 = 298$ K (25°C), $p_0 = 1$ atm, and $g = 9.8$ m/s^2. For water as saturated vapor at 120°C, Table A-2 gives $v = 0.8919$ m^3/kg, $u = 2529.3$ kJ/kg, $s = 7.1296$ kJ/kg · K. At the dead state, where $T_0 = 298$ K (25°C) and $p_0 = 1$ atm, water is a liquid. Thus, with Eqs. 3.11, 3.12, and 6.7 and values from Table A-2, we get $v_0 = 1.0029 \times 10^{-3}$ m^3/kg, $u_0 = 104.88$ kJ/kg, $s_0 = 0.3674$ kJ/kg · K. Substituting values

$$
\begin{aligned}
\mathsf{e} &= (u - u_0) + p_0(v - v_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz \\
&= \left[(2529.3 - 104.88)\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right] \\
&\quad + \left[\left(1.01325 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right)(0.8919 - 1.0029 \times 10^{-3})\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}\right]\left|\frac{1\ \text{kJ}}{10^3\ \text{N} \cdot \text{m}}\right| \\
&\quad - \left[(298\ \text{K})(7.1296 - 0.3674)\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right] \\
&\quad + \left[\frac{(30\ \text{m/s})^2}{2} + \left(9.8\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)(6\ \text{m})\right]\left|\frac{1\ \text{N}}{1\ \text{kg} \cdot \text{m/s}^2}\right|\left|\frac{1\ \text{kJ}}{10^3\ \text{N} \cdot \text{m}}\right| \\
&= (2424.42 + 90.27 - 2015.14 + 0.45 + 0.06)\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 500\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \blacktriangleleft
\end{aligned}
$$

Exemplo2 (livro M.S.)

A cylinder of an internal combustion engine contains 2450 cm^3 of gaseous combustion products at a pressure of 7 bar and a temperature of 867°C just before the exhaust valve opens. Determine the specific exergy of the gas, in kJ/kg. Ignore the effects of motion and gravity, and model the combustion products as air as an ideal gas. Take $T_0 = 300$ K (27°C) and $p_0 = 1.013$ bar.



1. The gaseous combustion products are a closed system.
2. The combustion products are modeled as air as an ideal gas.
3. The effects of motion and gravity can be ignored.
4. $T_0 = 300$ K (27°C) and $p_0 = 1.013$ bar.

Table A-22,

$$\begin{aligned} u - u_0 &= 880.35 - 214.07 \\ &= 666.28 \text{ kJ/kg} \\ s - s_0 &= s^\circ(T) - s^\circ(T_0) - \frac{\overline{R}}{M} \ln \frac{p}{p_0} \\ &= 3.11883 - 1.70203 - \left(\frac{8.314}{28.97}\right) \ln\left(\frac{7}{1.013}\right) \\ &= 0.8621 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \\ T_0(s - s_0) &= (300 \text{ K})(0.8621 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}) \\ &= 258.62 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

ideal gas equation of state: $v = (\overline{R}/M)T/p$ and $v_0 = (\overline{R}/M)T_0/p_0$,

$$\begin{aligned} p_0(v - v_0) &= \frac{\overline{R}}{M}\left(\frac{p_0 T}{p} - T_0\right) \\ &= \frac{8.314}{28.97}\left[\frac{(1.013)(1140)}{7} - 300\right] \\ &= -38.75 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$e = u - u_0 + p_0(v - v_0) - T_0(s - s_0)$$

$$\begin{aligned} e &= 666.28 + (-38.75) - 258.62 \\ &= 368.91 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Exemplo3 (livro M.S.)

Refrigerant 134a, initially a saturated vapor at −28°C, is contained in a rigid, insulated vessel. The vessel is fitted with a paddle wheel connected to a pulley from which a mass is suspended. As the mass descends a certain distance, the refrigerant is stirred until it attains a state where the pressure is 1.4 bar. The only significant changes of state are experienced by the suspended mass and the refrigerant. The mass of refrigerant is 1.11 kg. Determine

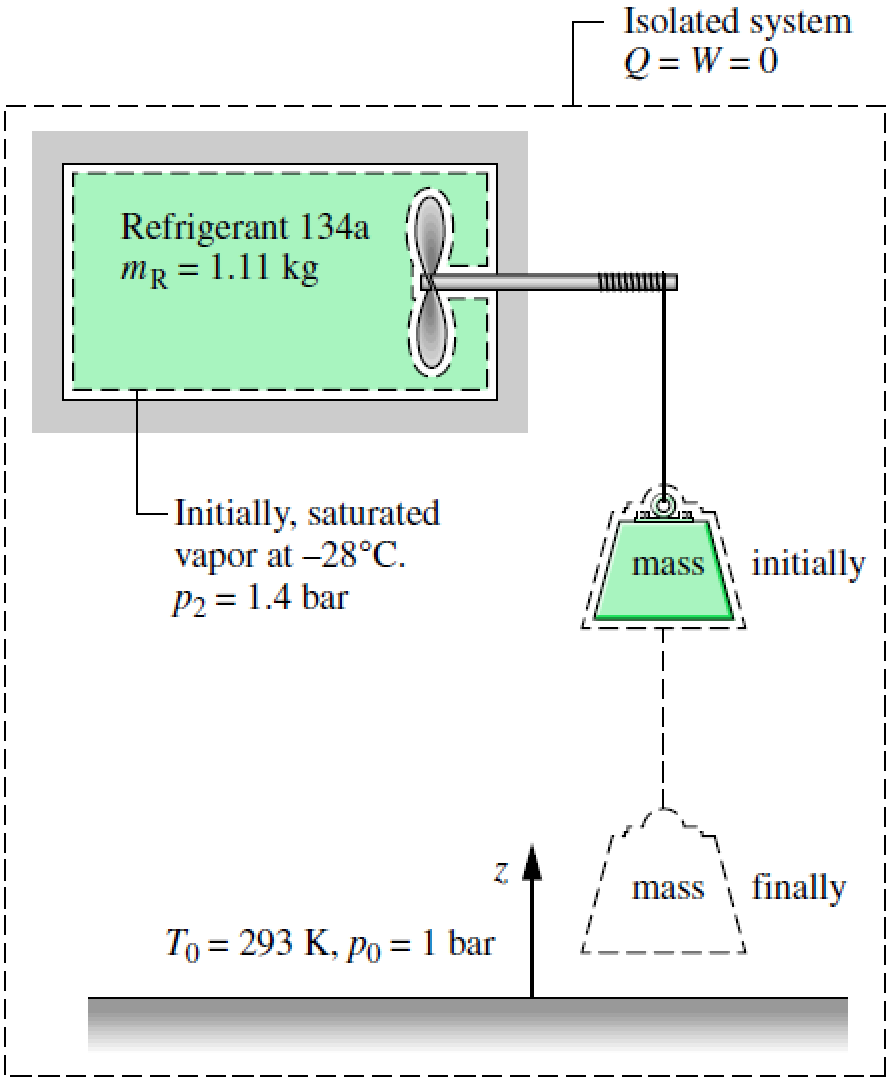
(a) the initial exergy, final exergy, and change in exergy of the refrigerant, each in kJ.

(b) the change in exergy of the suspended mass, in kJ.

(c) the change in exergy of an isolated system of the vessel and pulley–mass assembly, in kJ.

Discuss the results obtained, and compare with the respective energy changes. Let $T_0 = 293$ K (20°C), $p_0 = 1$ bar.

Exemplo3 (livro M.S.)



For the isolated system $Q = 0$, $W = 0$.

$T_0 = 293$ K (20°C), $p_0 = 1$ bar.

For the refrigerant, there is no change in kinetic or potential energy.

For the suspended mass, there is no change in kinetic or internal energy.

(a) the initial exergy, final exergy, and change in exergy of the refrigerant

$$E_1 = m_R[(u_1 - u_0) + p_0(v_1 - v_0) - T_0(s_1 - s_0)]$$

From Table A-10, State 1

From Table A-12 at 1 bar, 20°C, Dead state

$$E_1 = 1.11\ \text{kg}[(-35.38) + (-2.83) + (41.55)]\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 3.7\ \text{kJ}$$

$p_2 = 1.4$ bar and $v_2 = v_1$. Interpolation in Table A-12 State 2

$$E_2 = 1.11\ \text{kg}[(53.49) + (-2.83) + (-45.12)]\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 6.1\ \text{kJ}$$

$$(\Delta E)_{\text{refrigerant}} = E_2 - E_1 = 6.1\ \text{kJ} - 3.7\ \text{kJ} = 2.4\ \text{kJ}$$

(b) the change in exergy of the suspended mass, in kJ.

SF = massa

$$(\Delta \mathrm{E})_{\text{mass}} = (\cancel{\Delta U}^{0} + p_0\cancel{\Delta V}^{0} - T_0\cancel{\Delta S}^{0} + \cancel{\Delta \mathrm{KE}}^{0} + \Delta \mathrm{PE})_{\text{mass}}$$
$$= (\Delta \mathrm{PE})_{\text{mass}}$$

SF = sist. isolado

$$(\cancel{\Delta \mathrm{KE}}^{0} + \cancel{\Delta \mathrm{PE}}^{0} + \Delta U)_{\text{refrigerant}} + (\cancel{\Delta \mathrm{KE}}^{0} + \Delta \mathrm{PE} + \cancel{\Delta U}^{0})_{\text{mass}} = \cancel{Q}^{0} - \cancel{W}^{0}$$

$$\begin{aligned}(\Delta \mathrm{PE})_{\text{mass}} &= -(\Delta U)_{\text{refrigerant}}\\ &= -(1.11\ \mathrm{kg})(300.16 - 211.29)\left(\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg}}\right)\\ &= -98.6\ \mathrm{kJ}\end{aligned}$$

(c) the change in exergy of an isolated system of the vessel and pulley–mass assembly.

$$
\begin{aligned}
(\Delta \mathsf{E})_{isol} &= (\Delta \mathsf{E})_{refrigerant} + (\Delta \mathsf{E})_{mass} \\
&= (2.4\ \mathrm{kJ}) + (-98.6\ \mathrm{kJ}) \\
&= -96.2\ \mathrm{kJ}
\end{aligned}
$$

	Energy Change	Exergy Change
Refrigerant	+98.6 kJ	+ 2.4 kJ
Suspended mass	−98.6 kJ	−98.6 kJ
Isolated system	0.0 kJ	−96.2 kJ

Balanço de exergia para um SF

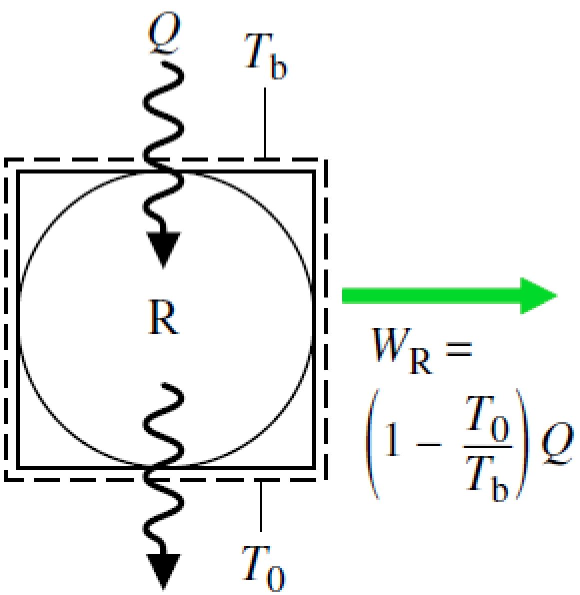
$$\underbrace{\mathsf{E}_2 - \mathsf{E}_1}_{\text{exergy change}} = \underbrace{\int_1^2 \left(1 - \frac{T_0}{T_b}\right)\delta Q - [W - p_0(V_2 - V_1)]}_{\text{exergy transfers}} - \underbrace{T_0\sigma}_{\text{exergy destruction}}$$

$$\frac{d\mathsf{E}}{dt} = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right)\dot{Q}_j - \left(\dot{W} - p_0\frac{dV}{dt}\right) - \dot{\mathsf{E}}_d$$

$$\Delta \mathsf{E}\,\big]_{isol} = -\mathsf{E}_d\,\big]_{isol}$$

Transf. Exergia devido ao calor

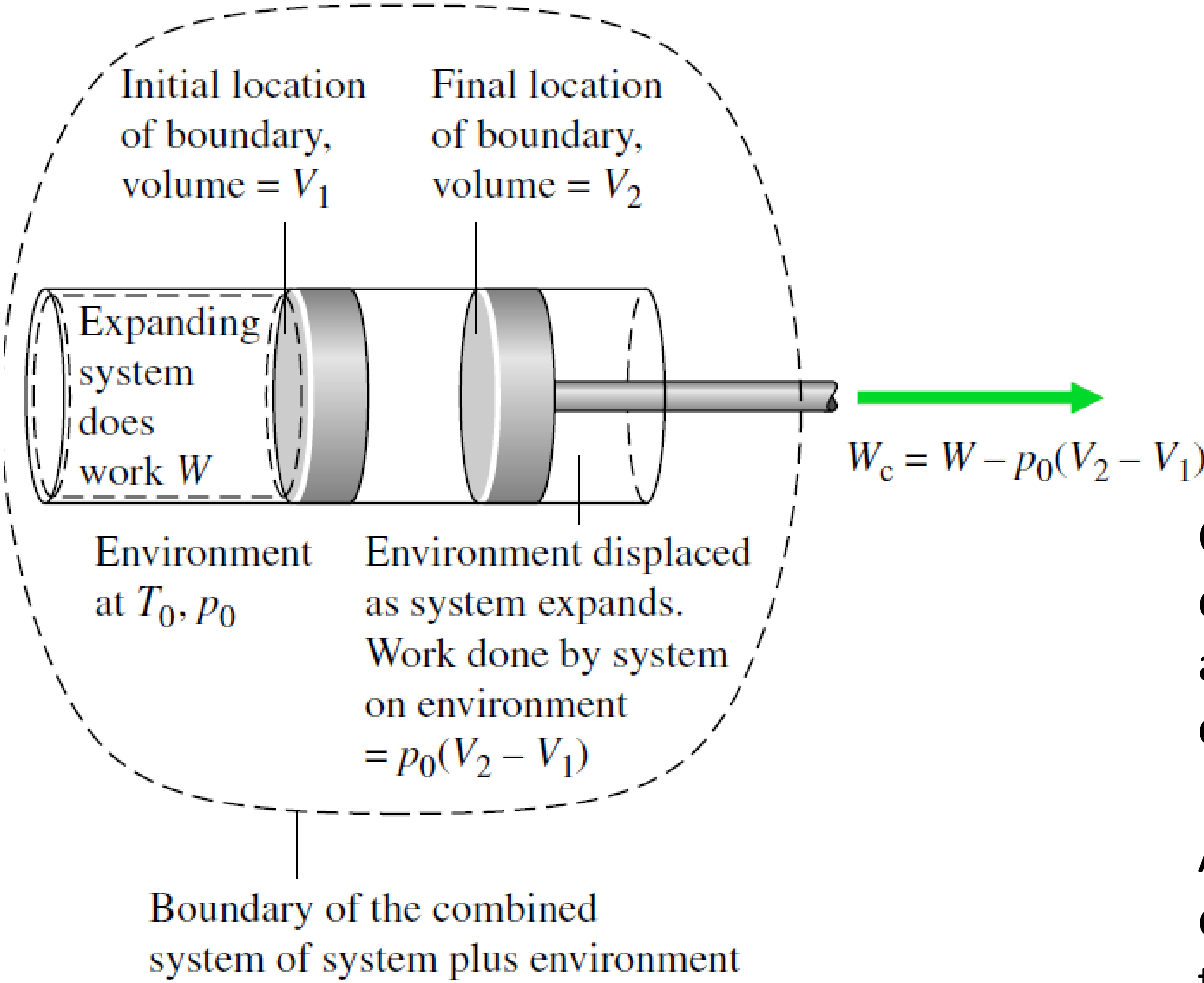
$$\begin{bmatrix} \text{exergy transfer} \\ \text{accompanying heat} \end{bmatrix} = \left(1 - \frac{T_0}{T_b}\right) Q$$



O fluxo de exergia devido ao calor pode ser visto como o trabalho disponível que seria gerado por um ciclo reversível operando entre T_b e T_0.

Transf. Exergia devido ao trabalho

$$\begin{bmatrix} \textit{exergy} \text{ transfer} \\ \text{accompanying work} \end{bmatrix} = [W - p_0(V_2 - V_1)]$$



O sistema em expansão deve comprimir o ambiente, a pressão constante P_0.

Assim, deve ser descontado $P_0(V_2-V_1)$ do trabalho disponível.

Exemplo1 (livro M.S.)

- Um conjunto pistão-cilindro contém água inicialmente a 100°C no estado de líquido saturado. A água sofre um processo de aquecimento internamente reversível que a torna vapor saturado, no qual o pistão pode se mover livremente. Considere T_0 = 20°C e P_0 = 1.014 bar, determine, por unidade de massa: a variação de exergia, a transferência de exergia associada ao trabalho, a transferência de exergia associada ao calor, e a destruição de exergia. Despreze as variações devido às energias cinética e potencial. Estude 2 casos distintos:

(a) o processo é reversível

(b) O processo é adiabático e se deve a trabalho de eixo

(a)

$$\Delta e = u_g - u_f + p_0(v_g - v_f) - T_0(s_g - s_f)$$

Table A-2

$$\Delta e = 2087.56\,\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + \left(1.014 \times 10^5\,\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right)\left(1.672\,\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}\right)\left|\frac{1\text{ kJ}}{10^3\text{ N}\cdot\text{m}}\right| - (293.15\text{ K})\left(6.048\,\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}\right)$$
$$= 484\text{ kJ/kg}$$

$$\begin{bmatrix}\text{exergy transfer}\\ \text{accompanying work}\end{bmatrix} = \frac{W}{m} - p_0(v_g - v_f)$$

Onde: $\dfrac{W}{m} = \int_f^g p\,dv = p(v_g - v_f) = pv_{fg}$

$$\begin{bmatrix}\text{exergy transfer}\\ \text{accompanying work}\end{bmatrix} = (p - p_0)v_{fg} = 0$$

Não há transp. Exergia devido ao trabalho pois P = P_0

$$Q = \int_f^g T\,dS = m\int_f^g T\,ds = T\,(s_g - s_f)$$

Table A-2

$$\frac{Q}{m} = (373.15\ \text{K})(7.3549 - 1.3069)\ \text{kJ/kg}\cdot\text{K} = 2257\ \text{kJ/kg}$$

Ou, alternativamente, utilizando a 1ª lei

$$\frac{Q}{m} = (u_g - u_f) + p(v_g - v_f) = h_g - h_f = 2257\ \text{kJ/kg}$$

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix}\text{exergy transfer}\\ \text{accompanying heat}\end{bmatrix} &= \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)\frac{Q}{m}\\ &= \left(1 - \frac{293.15\ \text{K}}{373.15\ \text{K}}\right)\left(2257\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)\\ &= 484\ \text{kJ/kg}\end{aligned}$$

Finalmente, a destruição de exergia é nula pois o processo é reversível

(b)

Variação de exergia: é a mesma pois os estados iniciais e finais são os mesmos.

Transferência de exergia devido ao calor: é nula, pois o processo é adiabático

$$\begin{bmatrix} \text{exergy transfer} \\ \text{accompanying work} \end{bmatrix} = \frac{W}{m} - p_0(v_g - v_f)$$

Onde, da 1ª lei:

$$\Delta U + \cancel{\Delta KE}^{\,0} + \cancel{\Delta PE}^{\,0} = \cancel{Q}^{\,0} - W \quad \Rightarrow \quad \frac{W}{m} = -(u_g - u_f) = -2087.56 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Logo,

$$\begin{bmatrix} \text{exergy transfer} \\ \text{accompanying work} \end{bmatrix} = -2087.56 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - \left(1.014 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right)\left(1.672 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}\right)\left|\frac{1 \text{ kJ}}{10^3 \text{ N} \cdot \text{m}}\right|$$

$$= -2257 \text{ kJ/kg}$$

Finalmente, do balanço de exergia:

$$\frac{\mathsf{E}_\mathrm{d}}{m} = -\Delta \mathsf{e} - \left[\frac{W}{m} - p_0(v_\mathrm{g} - v_\mathrm{f})\right] = -484 - (-2257) = 1773 \text{ kJ/kg}$$

Obs: alternativamente, poderíamos ter calculado E_d como:

$$\mathsf{E}_\mathrm{d}/m = T_0(\sigma/m),$$

$$\Delta S = \cancelto{0}{\int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_\mathrm{b}} + \sigma \quad \Rightarrow \quad \frac{\sigma}{m} = s_\mathrm{g} - s_\mathrm{f} = 6.048 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\mathsf{E}_\mathrm{d}/m = 1773 \text{ kJ/kg}$$