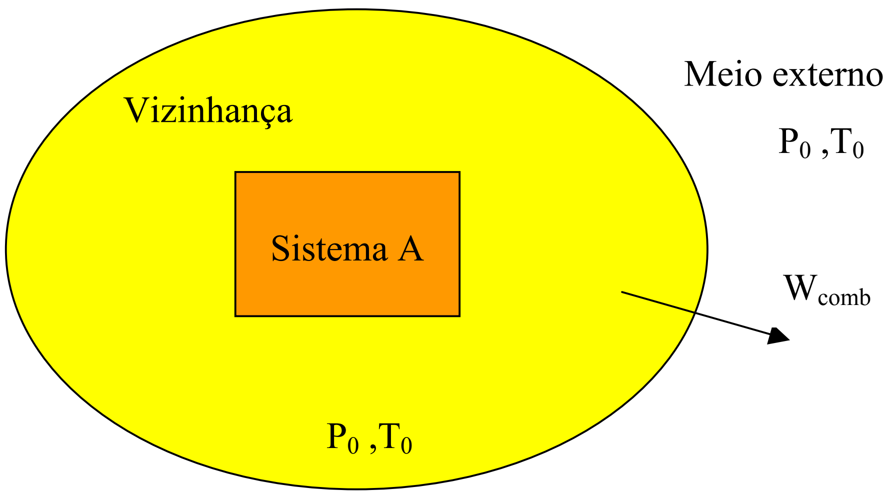
EXERGIA

Sistemas Fechados

A exergia de um sistema fechado em relação a um dado meio pode ser pensada como o trabalho máximo possível de ser obtido quando o sistema e sua vizinhança interagem de modo que o sistema atinja o equilíbrio com o meio.
Considere um sistema **A** e sua vizinhança como um sistema fechado, de acordo com a figura.
O estado inicial do sistema **A** é o estado "1". O estado final é o estado "0", caracterizado pelo equilíbrio com a vizinhança e com o meio externo, os quais se encontram a P_0 e T_0.



Esse **sistema combinado** apresenta somente interação de trabalho com o meio externo.
O **sistema combinado** não troca calor com o meio externo.
A vizinhança e o meio externo estão a uma temperatura e pressão constantes (P_0 ,T_0).
As interações de calor e trabalho entre o sistema **A** e sua vizinhança não alteram a pressão e a temperatura da vizinhança, nem suas propriedades intensivas.

Aplicando a 1ª Lei da Termodinâmica para o sistema combinado (sistema **A** + vizinhança), obtém-se:

$$\Delta E_{comb} = Q_{comb} - W_{comb} = -W_{comb} \tag{1}$$

e também

$$\Delta E_{comb} = \Delta E_{sistema} + \Delta E_{viz} = -W_{comb} \tag{2}$$

para o sistema **A**:

$$\Delta E_{sistema} = U_0 - U_1 - m\frac{V_1^2}{2} - mgz_1 \tag{3}$$

e para a vizinhança:

$$\Delta E_{viz} = \Delta U_{viz} \tag{4}$$

e para o sistema combinado:

$$\Delta E_{comb} = \left[U_0 - U_1 - m\frac{V_1^2}{2} - mgz_1\right] + \left[\Delta U_{viz}\right] = -W_{comb} \tag{5}$$

Aplicando também a equação TdS = dU + PdV para a vizinhança, temos:

$$T_0 \Delta S_{viz} = \Delta U_{viz} + P_0 \Delta V_{viz} \qquad \Rightarrow \qquad \Delta U_{viz} = T_0 \Delta S_{viz} - P_0 \Delta V_{viz} \tag{6}$$

Dessa forma, substituindo a Eq.(6) na Eq.(5):

$$-W_{comb} = \left[U_0 - U_1 - m\frac{V_1^2}{2} - mgz_1\right] + \left[T_0 \Delta S_{viz} - P_0 \Delta V_{viz}\right] \tag{7}$$

Por outro lado assume-se que

$$\Delta V_{viz} = -\Delta V_{sist} = -(V_0 - V_1) \tag{8}$$

A variação de entropia do sistema combinado é devida somente a irreversibilidades ocorridas no interior do sistema e/ou no interior da vizinhança. A produção de entropia é representada por σ_{comb} .

$$\Delta S_{comb} = \sigma_{comb} = \Delta S_{sist} + \Delta S_{viz} = (S_0 - S_1) + \Delta S_{viz} \tag{9}$$

e assim,

$$\Delta S_{viz} = \sigma_{comb} - (S_0 - S_1) \tag{10}$$

substituindo esses valores na Eq. (7),

$$W_{comb} = -\left[U_0 - U_1 - m\frac{V_1^2}{2} - mgz_1\right] - \left[T_0\sigma_{comb} - T_0(S_0 - S_1) + P_0(V_0 - V_1)\right] \tag{11}$$

e rearranjando,

$$W_{comb} = (U_1 - U_0) + m\frac{V_1^2}{2} + mgz_1 - T_0(S_1 - S_0) + P_0(V_1 - V_0) - T_0\sigma_{comb} \tag{12}$$

Como o objetivo é determinar o trabalho máximo, e sabendo que a geração de entropia só pode ser positiva ou no mínimo nula, temos que a exergia do sistema no estado “1” será dada pela Eq. (13).

$$A_1 = (U_1 - U_0) + P_0(V_1 - V_0) - T_0(S_1 - S_0) + m\frac{V_1^2}{2} + mgz_1 \tag{13}$$

O balanço de entropia para um processo entre os estados 1 (inicial) e 2 (final) será expresso por

$$A_2 - A_1 = (U_2 - U_1) + P_0(V_2 - V_1) - T_0(S_2 - S_1) + m\left(\frac{V_2^{\,2}}{2} - \frac{V_1^{\,2}}{2}\right) + mg\,(z_2 - z_1) \quad (kJ) \qquad (14)$$

Por outro lado, para o sistema, a Primeira Lei da Termodinâmica fornece

$$dE_{sistema} = \delta\, Q - \delta\, W \qquad (15)$$

e a Segunda Lei da Termodinâmica estabelece

$$dS_{sistema} = \left(\frac{\delta\, Q}{T}\right)_{fronteira} + \delta\sigma_{\,sistema} \qquad (16)$$

A partir da equação (15) e da equação (16) multiplicada por T_0 obtém-se

$$dE_{sistema} - T_0\, dS_{sistema} = \delta\, Q - T_0\left(\frac{\delta\, Q}{T}\right)_{fronteira} - \delta\, W - T_0\,\delta\sigma_{\,sistema} \qquad (17)$$

$$E_2 - E_1 - T_0\,(S_2 - S_1) = \int_1^2\left(1 - \frac{T_0}{T_f}\right)\delta\, Q - W_{1-2} - T_0\,\sigma_{1-2} \qquad (18)$$

Considerando a equação (14),

$$A_2 - A_1 - p_0\,(V_2 - V_1) = \int_1^2\left(1 - \frac{T_0}{T_f}\right)\delta\, Q - W_{1-2} - T_0\,\sigma_{1-2} \qquad (19)$$

Assim o balanço de exergia para o sistema pode ser escrito

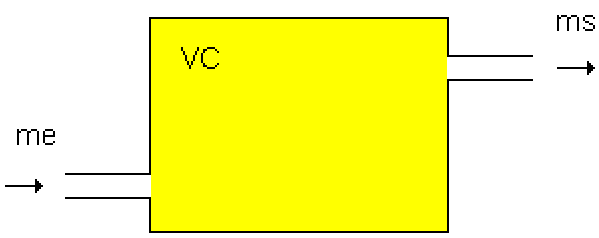
$$A_2 - A_1 = \int_1^2\left(1 - \frac{T_0}{T_f}\right)\delta\, Q - \left[W_{1-2} - p_0\,(V_2 - V_1)\right] - T_0\,\sigma_{1-2} \quad (kJ) \qquad (20)$$

Em termos de taxas instantâneas pode se obter

$$\frac{dA}{dt} = \sum_i \left(1 - \frac{T_0}{T_f}\right)\dot{Q}_j - \left[\dot{W} - p_0\left(\frac{dV}{dt}\right)\right] - T_0\dot{\sigma} \quad (kW) \tag{21}$$

Volumes de Controle

Para volumes de controle, além dos termos que foram considerados na equação (21) para sistemas fechados, há os termos correspondentes ao escoamento de massa para dentro e para fora do volume de controle.



Com o escoamento ocorre o transporte de exergia para dentro e para fora do volume de controle. Ocorre também o trabalho de fluxo (de entrada e de saída), os quais contribuem para a variação do conteúdo de exergia do volume de controle.
A contribuição do transporte de exergia pode ser calculada pela equação (22):

$$\textit{taxa de transporte de exergia} = \sum_e \dot{m}_e a_e - \sum_s \dot{m}_s a_s \tag{22}$$

onde

$$\sum_e \dot{m}_e a_e = \sum_e \dot{m}_e \left[(u_e - u_0) + p_0(v_e - v_0) - T_0(s_e - s_0) + \frac{V_e^{\,2}}{2} + gz_e\right] \tag{23}$$

e

$$\sum_s \dot{m}_s a_s = \sum_s \dot{m}_s \left[(u_s - u_0) + p_0 (v_s - v_0) - T_0 (s_s - s_0) + \frac{V_s^{\,2}}{2} + g z_s \right] \qquad (24)$$

A contribuição do trabalho de fluxo para a variação do conteúdo de exergia do volume de controle pode ser avaliada a partir do valor total dos trabalhos de fluxo apresentado na expressão (25)

$$\textit{potência de fluxo} = \sum_e \dot{m}_e p_e v_e - \sum_s \dot{m}_s p_s v_s \qquad (25)$$

Para que esse valor totalizado dos trabalhos de fluxo possa ser considerado no balanço de exergia, devem ser descontados os termos correspondentes ao produto da pressão do ambiente p_0 pelos volumes específicos dos fluidos que atravessam a fronteira do volume de controle, reduzindo a contribuição dos trabalhos de fluxo à expressão (26)

$$\textit{contribuição da pot. de fluxo} = \sum_e \dot{m}_e (p_e v_e - p_0 v_e) - \sum_s \dot{m}_s (p_s v_s - p_0 v_s) \qquad (26)$$

Adicionando as expressões (22) e (26) à expressão (21), obtém-se a taxa de variação da exergia para volumes de controle:

$$\begin{aligned} \frac{dA_{VC}}{dt} &= \sum_i \left(1 - \frac{T_0}{T_f}\right) \dot{Q}_j - \left[\dot{W}_{VC} - p_0 \left(\frac{dV_{VC}}{dt} \right) \right] - T_0 \dot{\sigma}_{VC} + \\ & \sum_e \dot{m}_e a_e - \sum_s \dot{m}_s a_s + \sum_e \dot{m}_e (p_e v_e - p_0 v_e) - \sum_s \dot{m}_s (p_s v_s - p_0 v_s) \quad (kW) \end{aligned} \qquad (27)$$

simplificando,

$$\frac{dA_{VC}}{dt} = \sum_i \left(1 - \frac{T_0}{T_f}\right) \dot{Q}_j - \left[\dot{W}_{VC} - p_0 \left(\frac{dV_{VC}}{dt} \right) \right] - T_0 \dot{\sigma}_{VC} + \sum_e \dot{m}_e a_{f\,e} - \sum_s \dot{m}_s a_{f\,s} \qquad (28)$$

onde a exergia específica de fluxo é definida pela equação (29)

$$a_f = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz \tag{29}$$

O termo $T_0 \dot{\sigma}_{VC}$ é denominado "taxa de irreversibilidade" e é geralmente representado pelo símbolo $\dot{I}_{VC}$.