

### ***III. EXERGIA E BALANÇO EXERGÉTICO***

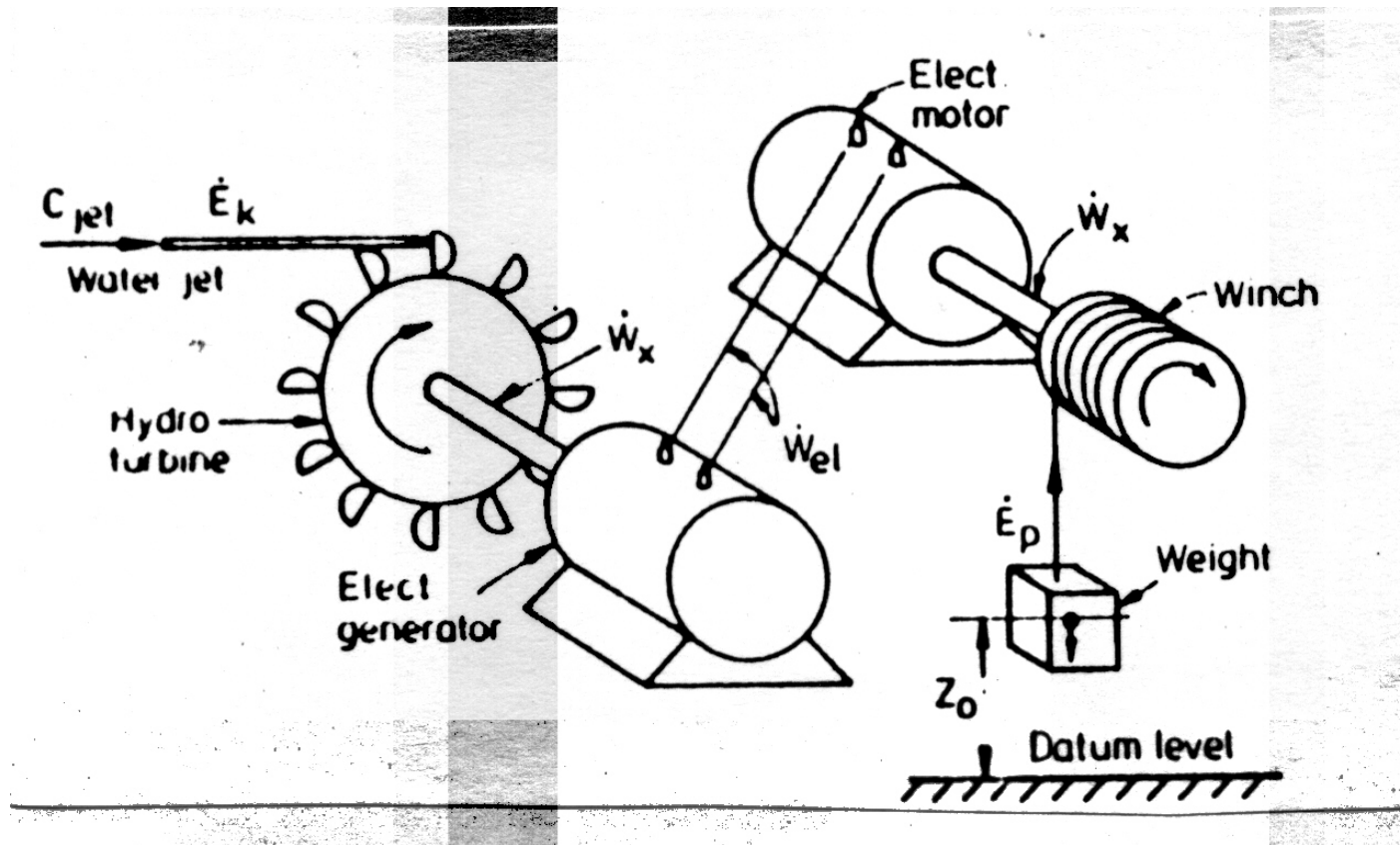
#### ***1. CONSIDERAÇÕES SOBRE CONVERSÃO DE ENERGIA***

- **Qualidade da Energia** = Capacidade de Provocar Mudança

- **Energia Ordenada:**

ENERGIA POTENCIAL: que pode ser armazenada num campo de força do tipo gravitacional, elétrico ou magnético; energia de deformação armazenada numa mola perfeitamente elástica.

ENERGIA CINÉTICA ORDENADA: volante em rotação ou um jato de um fluido ideal ( $\mu = 0$ ,  $\rho = \text{cte.}$ ). Trajetórias das partículas são paralelas entre elas. Sob condições ideais a energia cinética ordenada pode ser completamente convertida em trabalho de eixo (exceto aquela associada ao escoamento turbulento).



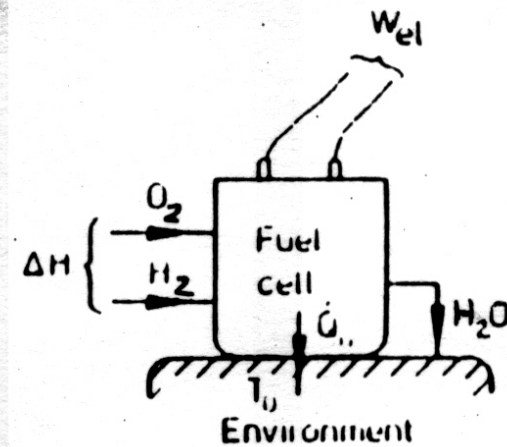
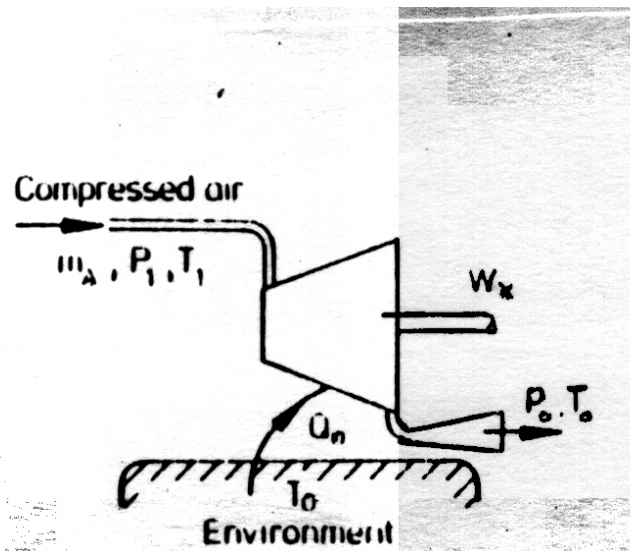
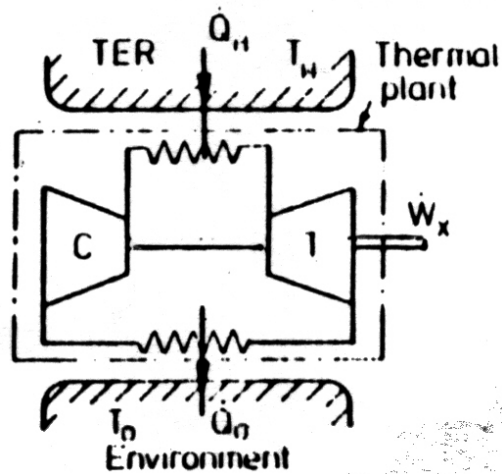
Exemplos de Transformação de ‘Energia Ordenada’.

## **- Características da Energia Ordenada:**

- \* Conversão de uma forma de energia ordenada em outra forma é total, se realizada reversivelmente
- \* A transferência de energia ordenada entre dois sistemas manifesta-se como uma interação do tipo trabalho na fronteira que separa os sistemas (Trabalho é energia ordenada em trânsito).
- \* Transferências Reversíveis de Energia ordenada ocorrem sem variações de entropia dos sistemas envolvidos, podendo ser analisadas apenas através do uso da Primeira Lei da Termodinâmica.
- \* Os parâmetros do meio ambiente ( $T_0$ ,  $P_0$ ) não são necessários para o cálculo de energia ordenada transferida de um sistema a outro.

## - Energia Desordenada

- ENERGIA INTERNA
- RADIAÇÃO TÉRMICA
- ENERGIA QUÍMICA



Exemplos de Conversão de 'Energia Desordenada' em 'Energia Ordenada'.

**- Condições para haver conversão máxima de energia desordenada em energia ordenada.**

- \* Processos de conversão devem ser reversíveis.
- \* O limite superior de conversão depende dos parâmetros termodinâmicos no qual a energia está armazenada e dos parâmetros do meio ambiente.
- \* A análise dos processos de conversão deve envolver o uso da Segunda Lei da Termodinâmica.
- \* A conversão de energia é em geral acompanhada por mudanças nas entropias dos sistemas que estão interagindo.

## ***2. CONCEITUAÇÃO DE EXERGIA***

EXERGIA: é a quantidade de trabalho obtida quando uma massa é trazida até um estado de equilíbrio termodinâmico com os componentes comuns do meio ambiente, através de processos reversíveis, envolvendo interação apenas com os componentes do meio ambiente (Szargut).

EXERGIA: é o trabalho de eixo ou energia elétrica necessária para produzir um material em seu estado especificado a partir de materiais comuns do meio ambiente em processos reversíveis, sendo que o calor trocado resulta apenas de interações com o meio a  $T_0$  (Riekert).

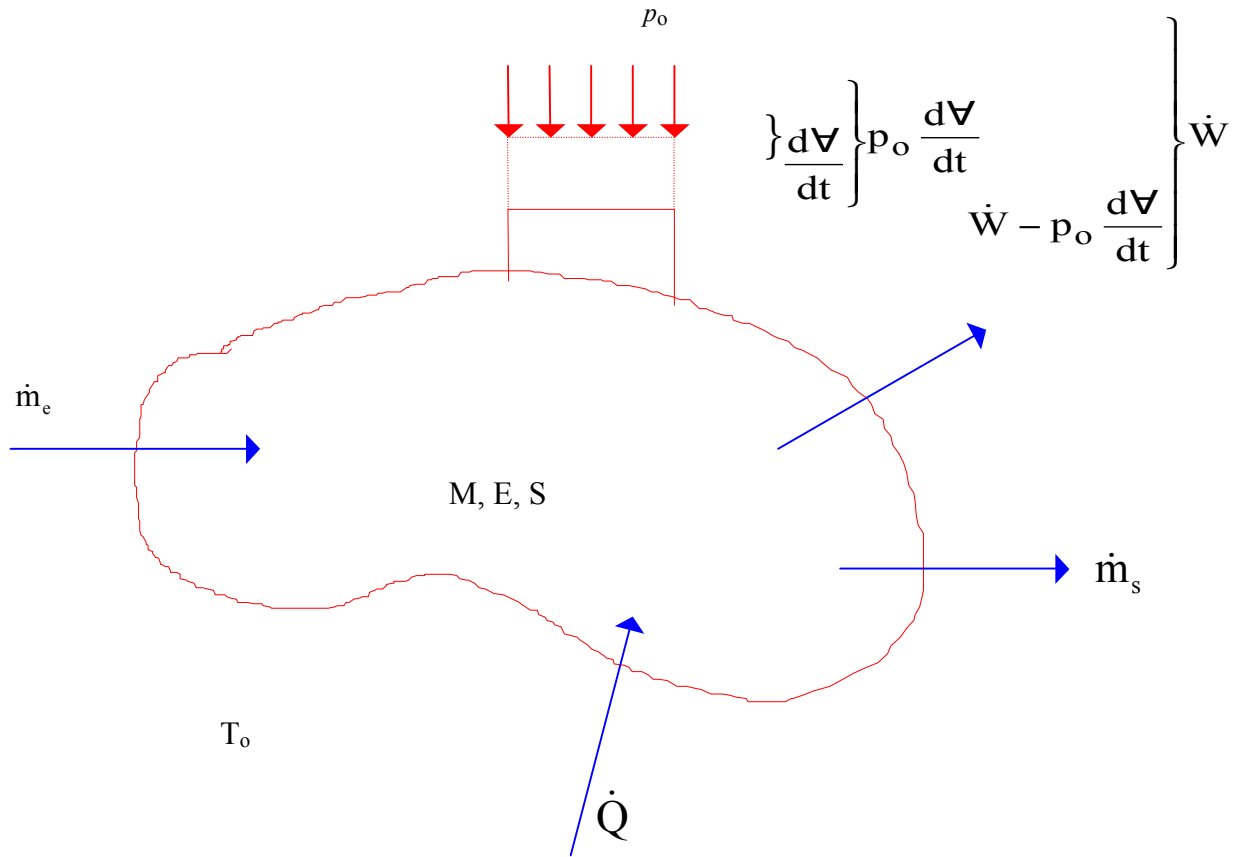
EXERGIA: é a parte da energia que pode ser completamente convertida em qualquer outra forma de energia (Rant).

EXERGIA: padrão de qualidade da energia = máximo trabalho útil que pode ser obtido de uma dada "forma de energia", utilizando os parâmetros do ambiente ( $p_0$ ,  $T_0$ ,  $\mu_{0i}$ ) como aqueles do estado de referência (Kotas).

EXERGIA: propriedade de um sistema que quantifica o máximo trabalho que pode ser obtido quando interagindo unicamente com o ambiente ( $p_0$ ,  $T_0$ ,  $\mu_{0i}$ ), passa de seu estado termodinâmico inicial até o estado morto (em equilíbrio com o ambiente) (Reistad).

EXERGIA: é o mínimo trabalho técnico necessário para constituir um sistema a partir do ambiente de referência (Lozano Serrano).

### 3. BALANÇO DE EXERGIA



$$1^a \text{ Lei: } \frac{dE}{dt} = \sum \dot{Q}_i - \dot{W} + \sum_e \dot{m}h - \sum_s \dot{m}h$$

(III.1)



$$2^{\text{a}} \text{ Lei: } dS / dt + \sum_{\text{s}} \dot{m}s - \sum_{\text{e}} \dot{m}s = \sum \frac{\dot{Q}_i}{T_i} + \dot{S}_{\text{ger}} \quad (\text{III.2})$$

Multiplicando-se a 2ª lei por  $-T_0$  e somando-se com a 1ª lei, tem-se:

$$\dot{W} = -\frac{d}{dt}(E - T_0S) + \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) \dot{Q}_i + \sum \dot{m}(h - T_0s)_e - \sum \dot{m}(h - T_0s)_s - T_0\dot{S}_{\text{ger}} \quad (\text{III.3})$$

$$\text{Introduzindo-se } \dot{W}_{\text{rev}} = \dot{W} + T_0\dot{S}_{\text{ger}} \quad (\text{III.4})$$

$$W_{\text{rev}} = -\frac{d}{dt}(E - T_0 S) + \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) \dot{Q}_i + \sum \dot{m}(h - T_0 s)_e - \sum \dot{m}(h - T_0 s)_s \quad (\text{III.5})$$

$$\dot{W}_{\text{rev}} - \dot{W} = \dot{W}_{\text{perd}} = T_0 \dot{S}_{\text{ger}} \geq 0 \quad (\text{III.6})$$

$\dot{W}_{\text{perd}}$  = "lost available work" (Bejan)

$\dot{W}_{\text{perd}} = T_0 \dot{S}_{\text{ger}} \rightarrow$  teorema do trabalho perdido ou de "Gouy – Stodola"

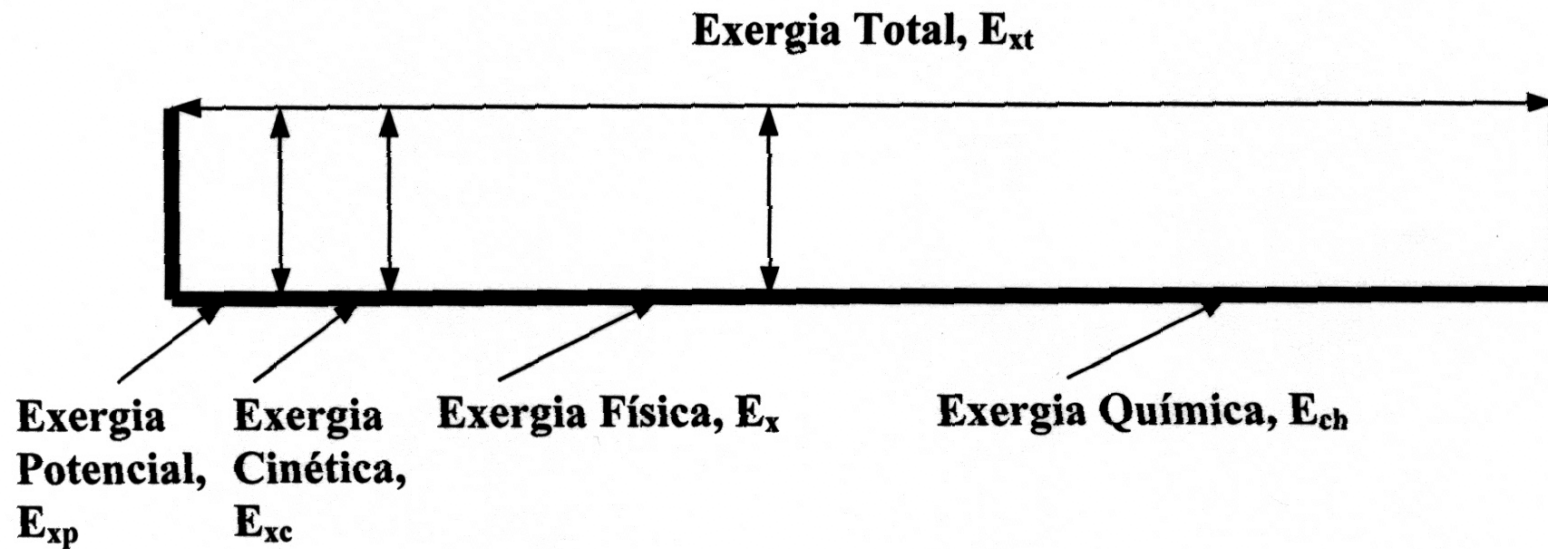
$\dot{W}_{\text{perd}}$  = taxa de exergia destruída

$$\text{- potência (trabalho útil)} = \dot{E}_W = \dot{W} - p_0 \frac{dV}{dt} \quad (\text{III.7})$$

∴ o balanço de exergia fica:

$$\dot{E}_W = -\frac{d}{dt}(E + p_0 V - T_0 S) + \sum \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q}_i + \sum \dot{m}(h - T_0 s)_e - \sum \dot{m}(h - T_0 s)_s - T_0 \dot{S}_{\text{ger}} \quad (\text{III.8})$$

## 4. COMPONENTES DA EXERGIA



- Exergia Física ou Termomecânica de um Sistema

$$E_X^S = E - E_0 + p_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) \quad (\text{III.9})$$

$$e_X^S = e - e_0 + p_0(v - v_0) - T_0(s - s_0) \quad (\text{III.10})$$

## - Exergia Física de um Fluxo

$$E_X = H - H_0 - T_0(S - S_0) \quad (\text{III.11})$$

$$e_X = h - h_0 - T_0(s - s_0) \quad (\text{III.12})$$

OBSERVAÇÃO: Na literatura técnica norte-americana são definidos

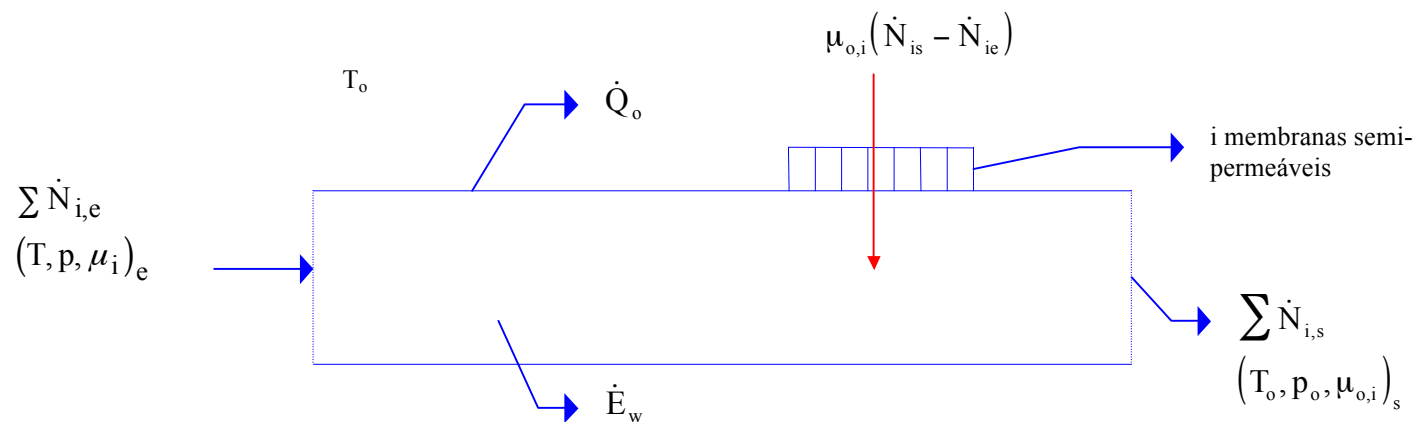
$$\cdot \text{Availability } (A, a) = E - T_0S + p_0V \quad (\text{III.13})$$

$$\cdot \text{Flow Availability } (B, b) = H - T_0S \quad (\text{III.14})$$

- No cálculo da exergia física basta que o meio seja caracterizado por  $p_0$  e  $T_0$ , ou seja, há equilíbrio térmico e mecânico com o meio. Este estado é chamado de Estado de Referência Restrito.

## - Exergia Química

Para haver equilíbrio completo com o meio o sistema deve estar também em equilíbrio químico com ele. O trabalho que pode ser obtido através de um processo reversível que leva o sistema do estado de referência restrito  $(p_o, T_o)$  até o estado de referência onde há equilíbrio completo (chamado de estado morto), é a exergia química.



$$1a \text{ lei: } \dot{E}_W = \dot{Q}_o + \sum (\bar{h}_i \dot{N}_i)_e - \sum (\bar{h}_i \dot{N}_i)_s + \sum \bar{h}_{o,i} (\dot{N}_{i,s} - \dot{N}_{i,e}) \quad (\text{III.15})$$

$$2a \text{ lei: } \dot{S}_{ger} = -\dot{Q}_o / T_o - \sum (\bar{s}_i \dot{N}_i)_e + \sum (\bar{s}_i \dot{N}_i)_s - \sum \bar{s}_{o,i} (\dot{N}_{i,s} - \dot{N}_{i,e}) \quad (\text{III.16})$$

$$\mu_{o,i} = \bar{h}_{o,i} - T_o \bar{s}_{o,i} \quad (\text{III.17})$$

$$\dot{E}_W = \sum \left[ (\bar{h}_i - T_o \bar{s}_i)_e - \mu_{o,i} \right] \dot{N}_{i,e} - \sum \left[ (\bar{h}_i - T_o \bar{s}_i)_s - \mu_{o,i} \right] \dot{N}_{i,s} - T_o \dot{S}_{ger} \quad (\text{III.18})$$

Como a mistura de saída está em equilíbrio completo com o ambiente:

$$(\bar{h}_i - T_o \bar{s}_i)_s = \bar{g}_{o,i} = \mu_{o,i} \quad (\text{III.19})$$

$$\therefore \dot{E}_W = \sum \left[ (\bar{h}_i - T_o \bar{s}_i)_e - \mu_{o,i} \right] \dot{N}_{i,e} - T_o \dot{S}_{ger} \quad (\text{III.20})$$

e

$$(\dot{E}_W)_{\text{rev}} = \bar{h}\dot{N} - T_0\bar{s}\dot{N} - \sum \mu_{o,i}\dot{N}_{i,e} \quad (\text{III.21})$$

com

$$\dot{N} = \sum \dot{N}_{i,e} \quad (\text{III.22})$$

$$\bar{h} = 1/\dot{N} \sum \bar{h}_{i,e} \dot{N}_{i,e} \quad (\text{III.23})$$

$$\bar{s} = 1/\dot{N} \sum \bar{s}_{i,e} \dot{N}_{i,e} \quad (\text{III.24})$$

Assim:

$$\frac{(\dot{E}_W)_{\text{rev}}}{\dot{N}} = \sum (\bar{h}_{i,e} - T_0\bar{s}_{i,e} - \mu_{o,i})x_i \quad (\text{III.25})$$



com

$x_i$  = fração molar do constituinte  $i$  na seção de entrada

$$x_i = \dot{N}_{i,e} / \dot{N} \quad (\text{III.26})$$

∴ define-se a exergia molar total como:

$$\bar{e}_{xt} = \bar{h} - T_0 \bar{s} - \sum_i \mu_{o,i} x_i \quad (\text{III.27})$$

e a exergia química molar:

$$\bar{e}_{ch} = \sum (\mu_i^* - \mu_{o,i}) x_i \quad (\text{III.28})$$

onde

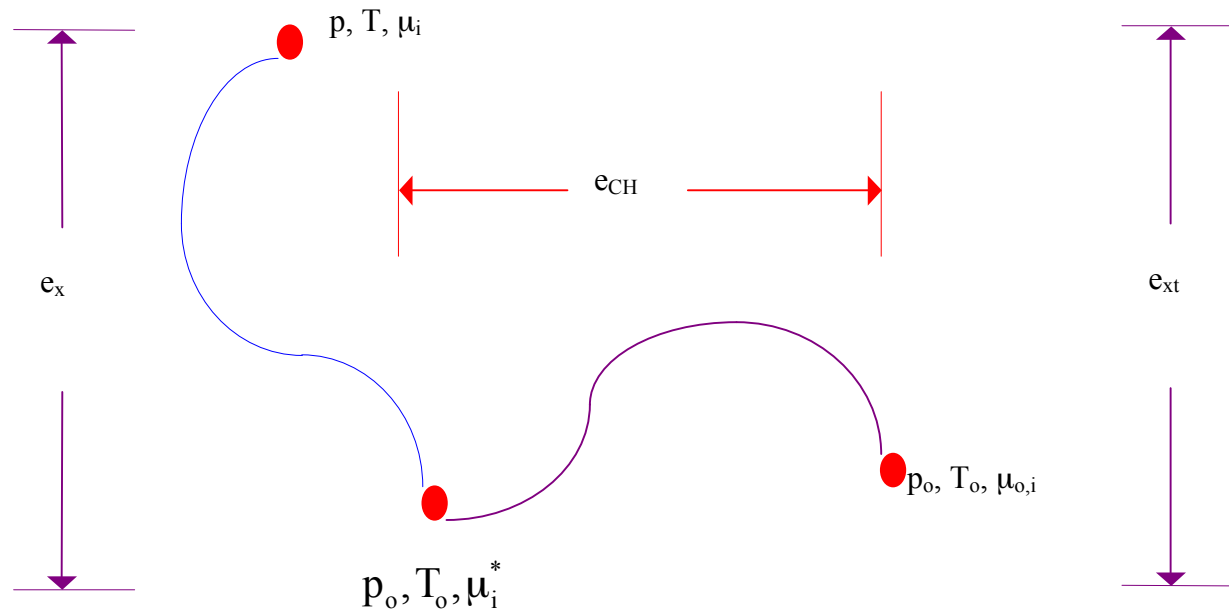
$$\sum \mu_i^* x_i = \bar{h}^* - T_0 \bar{s}^* \text{ (estado de referência restrito)} \quad (\text{III.29})$$

Assim a exergia molar total pode ser reescrita como:

$$\bar{e}_{xt} = \underbrace{\bar{h} - \bar{h}^* - T_0 (\bar{s} - \bar{s}^*)}_{\text{}} + \underbrace{\sum (\mu_i^* - \mu_{o,i}) x_i}_{\text{}} \quad (\text{III.30})$$

$$\bar{e}_{xt} = \bar{e}_x + \bar{e}_{ch} \quad (\text{III.31})$$

Esquemáticamente pode-se representar os dois estados de referência e os componentes da exergia total (físico e químico) como ilustrado abaixo:



Para um sistema pode-se escrever:

$$E_{xt}^S = E - T_o S + p_o V - \sum_{i=1}^n \mu_{o,i} N_i \quad (\text{III.32})$$

$$E_{ch}^S = \sum_{i=1}^n (\mu_i^* - \mu_{i,o}) N_i \quad (\text{III.33})$$

com

$$U^* + p_0 V^* - T_0 S^* = \sum \mu_i^* N_i \quad (\text{III.34})$$

e

$$E_{xt}^S = E_X^S + E_{ch}^S \quad (\text{III.35})$$

Generalizando-se o balanço de exergia:

$$\dot{E}_W = \frac{dE_{xt}}{dt} + \sum_{\ell=1}^P \left(1 - \frac{T_0}{T_\ell}\right) Q_\ell + \sum_{j=1}^q (\dot{N} \bar{e}_{xt})_j - \sum_{k=1}^r (\dot{N} \bar{e}_{xt})_k - T_0 \dot{S}_{ger} \quad (\text{III.36})$$

## 5. EXERCÍCIOS

1. Considere um trocador de calor onde há condensação de Hg a 590 K e evaporação de água a 550 K. Calcule a exergia destruída no trocador de calor supondo que não há perdas para o ambiente, que a carga térmica é 5 MW e  $T_0 = 290$  K.
2. Calcule a exergia física do fluxo de ar a  $p = 2$  bar,  $T = 393$  K com  $p_0 = 1$  bar e  $T_0 = 293$  K. Considere o ar como gás perfeito com  $c_p = 1,0$  kJ.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> e  $R = 0,2871$  kJ.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>.
3. Calcule exergia física de um fluxo de CO<sub>2</sub> ( $c_p = 0,8659$  kJ.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>;  $R = 0,1889$  kJ.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>) para  $p = 0,7$  bar e  $T = 268$  K, sendo  $T_0 = 293$  K e  $p_0 = 1$  bar

4. Calcule a exergia química molar,  $\bar{e}_{ch}$ , do CO<sub>2</sub> e do O<sub>2</sub>. Considere  $p_0 = 1$  bar,  $T_0 = 298$  K, pressões parciais do CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> no ambiente são  $(p_\infty)_{CO_2} = 0,0003$  bar e  $(p_\infty)_{O_2} = 0,2040$  bar.  $R = 8,3144$  kJ.kmol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>.
5. Calcule a exergia química molar,  $\bar{e}_{ch}$ , de uma mistura de gases com a seguinte composição molar: CO<sub>2</sub> = 0,15 e O<sub>2</sub> = 0,85. Considere os dados do meio do exemplo 4.
6. Calcule a  $\bar{e}_{ch}$  do CO. A função de Gibbs molar de formação do CO a 25°C é -137160 kJ.kmol<sup>-1</sup> e a do CO<sub>2</sub> é -394390 kJ.kmol<sup>-1</sup> quando o carbono está na forma de grafite.
7. Uma mistura de CO e ar com 15% de CO em volume entra numa câmara de combustão à taxa de 0,5 kg.s<sup>-1</sup> com  $p = 2,1$  bar,  $T = 125^\circ\text{C}$  e velocidade de 120 m/s. Calcule o fluxo de exergia total na seção de entrada da câmara de combustão (dados do meio iguais ao exemplo 4).