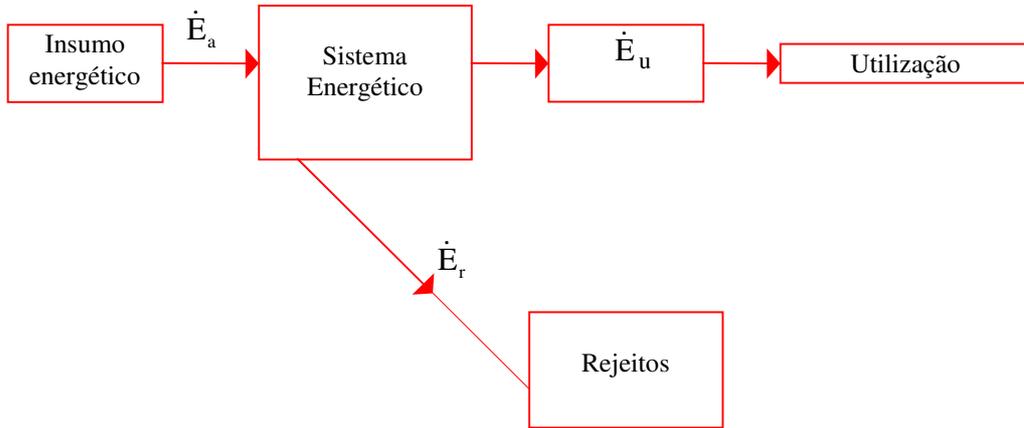


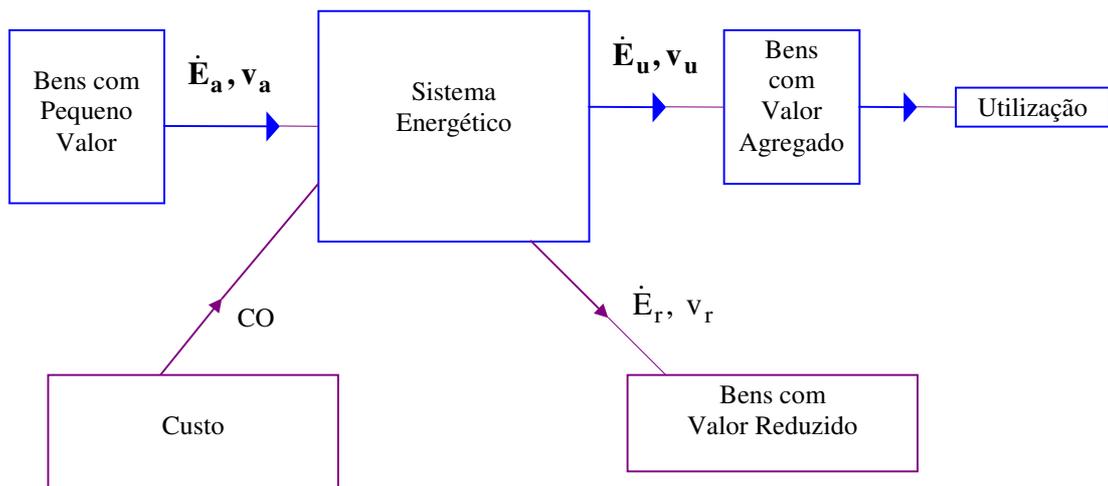
V. INTRODUÇÃO À ANÁLISE TERMOCÔNOMICA

1. BALANÇO DE VALOR DA ENERGIA



$$\text{Balanço de Energia: } \dot{E}_a = \dot{E}_u + \dot{E}_r \quad (\text{VI.1})$$

$$\text{Balanço de Exergia: } (\dot{E}_x)_a = (\dot{E}_x)_u + (\dot{E}_x)_r + (\dot{E}_x)_{\text{dest}} \quad (\text{VI.2})$$



Balanço de Custo:

$$\dot{E}_a v_a + C_o = \dot{E}_u v_u + \dot{E}_r v_r \quad (\text{VI.3})$$

$$\text{custo operatório: } C_o = \dot{E}_u (v_u - v_a) + \dot{E}_r (v_r - v_a) \quad (\text{VI.4})$$

$$\text{custo operatório específico: } c_o = \frac{C_o}{E_u} = \underbrace{(v_u - v_a)}_{\substack{\text{ganho de valor} \\ \text{nos produtos}}} + \underbrace{\frac{E_r}{E_u} (v_r - v_a)}_{\substack{\text{perda de valor} \\ \text{nos rejeitos}}} \quad (\text{VI.5})$$

Introduzindo o investimento energético (I_e), que é a energia necessária para fabricar o sistema energético considerado:

$$\text{valor de } I_e \text{ para } t = 0: v_i I_e$$

$$\text{valor de } I_e \text{ para } t = N: v_f I_e$$

obtém-se a expressão do custo energético integral da operação do sistema energético ao longo de N anos (C_t):

$$C_t = N C_o + I_e (v_i - v_f) \quad (\text{VI.6})$$

O custo integral por unidade de energia útil fica:

$$\frac{C_t}{N \dot{E}_u} = (v_u - v_a) + \frac{\dot{E}_r}{\dot{E}_u} (v_r - v_a) + \frac{I_e}{N \dot{E}_u} (v_i - v_f) \quad (\text{VI.7})$$

2. DEFINIÇÃO GERAL DE RENDIMENTO

$$\eta = \frac{\sum (\dot{E}_u * v_u)}{\sum (\dot{E}_a * v_a)} \quad (\text{VI.8})$$

Escalas de Valor da Energia

a) $v_a = v_u = v_r = v_i = v_f = 1$ (base entálpica)

b) $\left. \begin{array}{l} v_r = 0 \\ v_f = 0 \end{array} \right\}$ cenário normalmente utilizado nas análises de sistemas industriais

c) escala exergética

$$v_W = 1; v_Q = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)$$

d) escala econômica

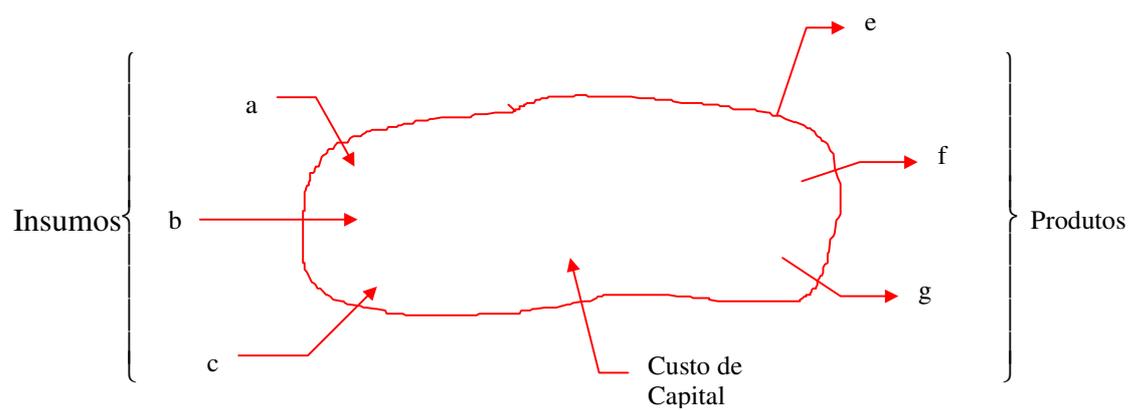
- custo de produção
- custo em divisas no mercado internacional
- custo no mercado nacional

f) escala ecológica

- $v = 1$: recurso não renovável
- $v = 0$: recurso renovável

3. BALANÇO DE CUSTOS

3.1. Balanço Geral de Custos



$$\text{Custo Total dos Produtos} = \sum \text{Despesas}$$

(VI.9)

$$C_e + C_f + C_g = C_a + C_b + C_c + C_{\text{capital}} \quad (\text{VI.10})$$

Introduzindo o custo médio unitário, c_i

$$c_i = \frac{C_i}{N_i} \quad (\text{VI.11})$$

com

$$N_i = \dot{E}x_i, \text{ etc} \quad (\text{VI.12})$$

pode-se reescrever VI.10 como:

$$c_e N_e + c_f N_f + c_g N_g = c_a N_a + c_b N_b + c_c N_c + C_{\text{capital}} \quad (\text{VI.13})$$

Os valores de c_e , c_f e c_g ficam indeterminados quando há mais que um produto, sendo necessárias relações suplementares baseadas em considerações ligadas a aspectos econômicos tais como:

- o produto será de uso interno
- o produto destina-se à venda no mercado
- o produto é um "produto primário"
- o produto é um "sub-produto" do processo, etc

Para um processo com apenas um produto:

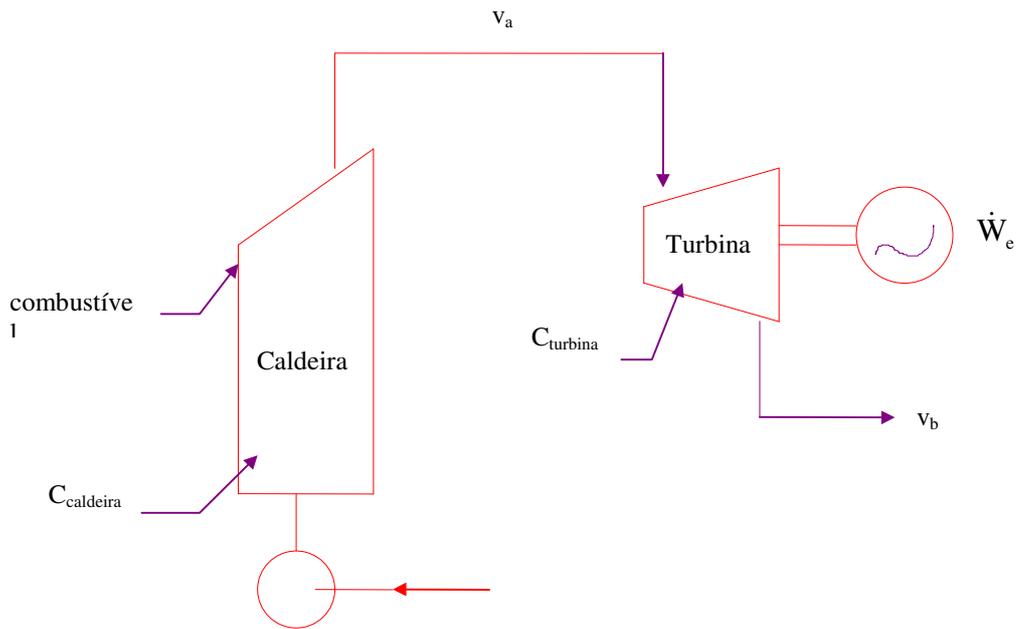
$$c_1 = \frac{\text{Custo Total de Produção}}{N_1 \text{ unidades de Produto}} \quad (\text{VI.14})$$

3.2. Alocação de Custos

Para um processo "multi-produtos" são empregados critérios para determinação dos valores dos c_i dos produtos tais como:

- método da extração
- método da igualdade
- método do subproduto

Considera-se, a título de exemplo, uma planta de cogeração operando com uma turbina de contrapressão como mostrado abaixo



Os balanços de custo para a caldeira e turbina são, respectivamente, em base exergética e desprezando os gases de escape da caldeira:

$$c_{va} \cdot \dot{E}x_{va} = \dot{E}x_{comb} \cdot c_{comb} + C_{caldeira} \quad (VI.15)$$

$$c_e \dot{W}_e + c_{vb} \dot{E}x_{vb} = c_{va} \dot{E}x_{va} + C_{turbina} \quad (VI.16)$$

Introduzindo os rendimentos exergéticos da caldeira ($\eta_{ex\ caldeira}$) e turbina ($\eta_{ex\ turbina}$) tem-se:

$$c_{va} = \frac{c_{comb}}{\eta_{ex\ caldeira}} + \frac{C_{caldeira}}{\dot{E}x_{va}} \quad (VI.17)$$

e

$$c_e \eta_{\text{ex turbina}} + \left(\frac{\dot{E}x_{vb}}{\dot{E}x_{va}} \right) (c_{vb} - c_e) = c_{va} + \frac{C_{\text{turbina}}}{\dot{E}x_{va}} \quad (\text{VI.18})$$

com

$$\eta_{\text{ex caldeira}} = \frac{\dot{E}x_{va}}{\dot{E}x_{\text{combustível}}} \quad (\text{VI.19})$$

$$\eta_{\text{ex turbina}} = \frac{\dot{W}_e + \dot{E}x_{vb}}{\dot{E}x_{va}} \quad (\text{VI.20})$$

Para uma dada planta (ou projeto de planta) são conhecidos os custos dos equipamentos (manutenção e amortização), o custo exerético unitário do combustível ($c_{\text{combustível}}$) bem como os fluxos de exergia ($\dot{E}x_{va}$, $\dot{E}x_{vb}$, \dot{W}_e e $\dot{E}x_{\text{combustível}}$).

Para a determinação dos custos unitários do vapor de alta pressão (c_{va}) são necessárias três equações independentes. Como há apenas duas equações disponíveis: os balanços de custo para a caldeira e a turbina, a terceira equação será dada pelo método de partição/alocação de custos utilizado, como mostrado a seguir.

a) Método da Igualdade de Custos

Todos os produtos tem o mesmo custo exerético unitário

$$c_{vb} = c_e \quad (\text{VI.21})$$

$$c_e = \frac{c_{va}}{\eta_{\text{ex turbina}}} + \frac{C_{\text{turbina}}}{(\dot{W}_e + \dot{E}x_{vb})} \quad (\text{VI.22})$$

Desta forma o custo da turbina é distribuído pelos produtos da planta (eletricidade e vapor à baixa pressão).

b) Método da Extração

Quando a eletricidade é produzida apenas para usuários externos à planta, enquanto que o vapor destina-se ao uso na própria planta, o custo da turbina (necessária para a produção de eletricidade) é descarregado inteiramente no custo de eletricidade. O custo do vapor (independente de seu nível de pressão) é obtido a partir do balanço de custo na caldeira. Assim

$$c_{va} = c_{vb} \quad (\text{VI.23})$$

$$c_e = c_{va} \left(\frac{\dot{E}x_{va} - \dot{E}x_{vb}}{\dot{W}_e} \right) + \frac{C_{turbina}}{\dot{W}_e} \quad (VI.24)$$

c) Método que considera a eletricidade (trabalho) como subproduto

Neste caso considera-se o vapor de baixa pressão (calor) como produto fundamental. O cálculo do custo do vapor de baixa pressão é feito a partir da melhor alternativa possível disponível para obtê-lo. Supondo que esta alternativa seja a produção do vapor em uma caldeira que opera à baixa pressão e gera a mesma vazão de vapor requerida:

$$c_{vb} = \frac{c_{comb}}{\left(\eta_{ex\ caldeira} \right)_{vb}} + \frac{\left(C_{caldeira} \right)_{vb}}{Ex_{vb}} \quad (VI.25)$$

O valor de c_e é então obtido pela equação VI.16 e caso seja inferior ao preço da eletricidade da rede, fica caracterizada a vantagem de se utilizar o sistema de cogeração.

d) Método que considera o vapor a baixa pressão (calor) como subproduto

Considera-se neste método que a eletricidade (trabalho) é o produto fundamental e seu custo será avaliado a partir da melhor alternativa disponível para sua obtenção direta, que pode ser a produção em uma turbina de condensação ou sua compra da rede elétrica.

Uma vez definido o valor de c_e , c_{vb} é calculado pelo balanço de custo da turbina (Eq. VI.16).