

7. Termoeconomia (1ª lei) e Exergoeconomia (2ª Lei) nos ciclos a vapor

Uma completa análise exergoeconômica de um sistema energético consiste de:

- uma detalhada análise exérgica;
- uma análise econômica de cada componente do sistema;
- atribuição de custos exérgicos aos fluxos de energia;
- avaliação exergoeconômica do sistema como um todo e de cada componente individualmente.

Analisando separadamente os conversores ou transformadores de energia dentro do sistema de geração de calor e potência, empregando turbinas a vapor, equacionam-se os custos primeiramente para um ciclo Rankine, na qual o condensador é substituído pelo processo da planta industrial que consome vapor, conforme a Figura 1.

Na bomba, considerando uma compressão adiabática, o custo do produto na saída (C_4) é igual ao custo do insumo ou do fluxo de entrada (C_3), mais o custo anual do equipamento (Z_P), mais o custo da potência consumida pela bomba ($C_{\dot{W}_P}$):

$$C_4 = C_3 + Z_P + C_{\dot{W}_P} \quad (1)$$

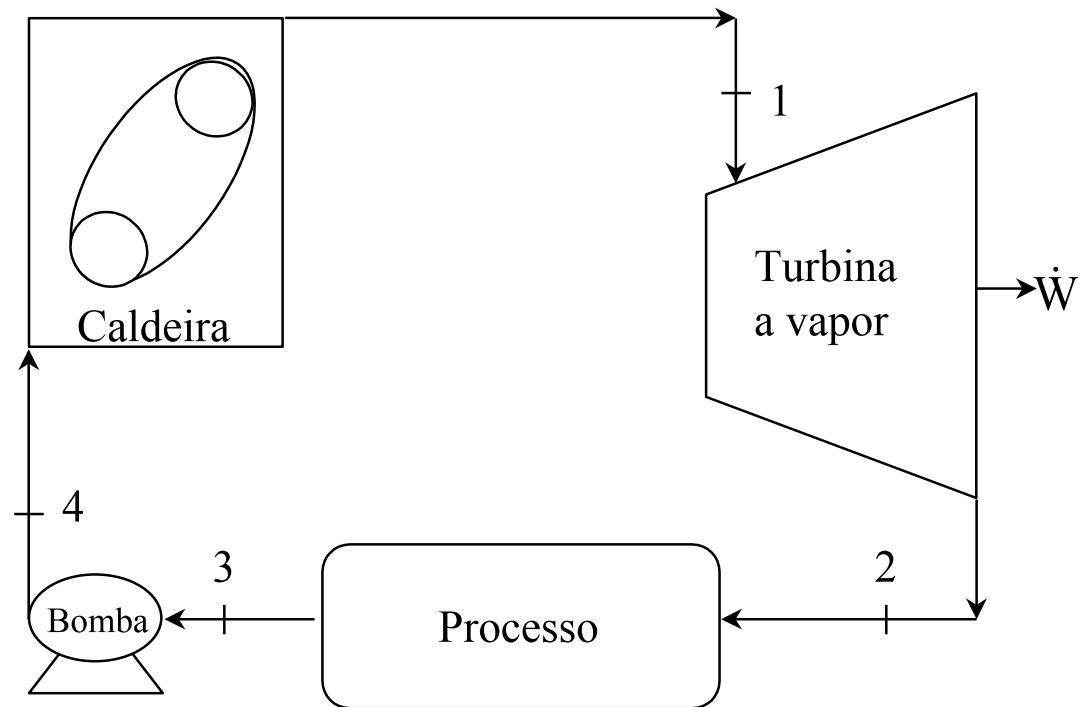


FIGURA 1 - Ciclo de cogeração com turbina a vapor

O custo anual do equipamento em US\$/h, já incluindo a despesa com manutenção e operação é calculado pela expressão:

$$Z_P = \frac{\varphi \cdot f \cdot C_P}{H} \quad (2)$$

na qual φ é o fator de manutenção, f é o fator de amortização, que será definido posteriormente, C_P é o custo da bomba instalada, e H é o número de horas de operação do sistema por ano. O custo do trabalho da bomba ($C_{\dot{W}_P}$) é:

$$C_{\dot{W}_P} = P_{EL} \cdot \dot{W}_P \quad (3)$$

em que \dot{W}_P é a potência consumida pela bomba em kW; este é calculado considerando um rendimento isoentrópico (2ª Lei) na compressão e com rendimento de 1ª Lei englobando o conjunto motor-bomba, e P_{EL} é a tarifa de eletricidade em US\$/kWh. Substituindo as eq.(2) e (3) em (1) tem-se:

$$C_4 = C_3 + \frac{\varphi \cdot f \cdot C_P}{H} + P_{EL} \cdot \dot{W}_P \quad (4)$$

Procedendo analogamente na caldeira, o custo do seu produto (C_I) é igual ao custo do insumo ou fluxo de entrada (C_4), mais o custo anual do equipamento, mais o custo do combustível, portanto:

$$C_1 = C_4 + \frac{\varphi \cdot f \cdot C_{CAL}}{H} + P_{COMB} \cdot \dot{E}_{COMB} \quad (5)$$

com:

$$\dot{E}_{COMB} = \frac{\dot{m}_v \cdot (h_1 - h_4)}{\eta_{CAL}} \quad (6)$$

na qual η_{CAL} é o rendimento de 1ª lei da caldeira, C_{CAL} é o custo da caldeira instalada e P_{COMB} é o preço do combustível em US\$/kWh. Tem-se que C_1 é o custo do vapor (C_v) em US\$/h. Portanto, desenvolve-se a expressão do custo do vapor inserindo a eq.(4) na eq.(5).

$$C_V = C_1 = \frac{\varphi \cdot f \cdot (C_{CAL} + C_P)}{H} + P_{COMB} \cdot \dot{E}_{COMB} + P_{EL} \cdot \dot{W}_P + C_3 \quad (7)$$

Adotando os fatores de custo específicos, da eq.(7) tem-se as seguintes fórmulas para as bases energoeconômica e exergoeconômica, respectivamente:

$$\dot{m}_v \cdot h_1 \cdot c_{vh} = \frac{\varphi \cdot f \cdot (C_{CAL} + C_P)}{H} + P_{COMB} \cdot \dot{E}_{COMB} + P_{EL} \cdot \dot{W}_P + \dot{m}_v \cdot c_3 \cdot h_3 \quad (8)$$

$$\dot{m}_v \cdot e_1 \cdot c_{ve} = \frac{\varphi \cdot f \cdot (C_{CAL} + C_B)}{H} + P_{COMB} \cdot \dot{E}_{COMB} + P_{EL} \cdot \dot{W}_P + \dot{m}_v \cdot c_3 \cdot e_3 \quad (9)$$

Analisando tais custos específicos na saída da caldeira, tanto o da base energoeconômica, quanto o da base exergoeconômica, verifica-se que esses custos contém todas despesas relacionadas ao aumento da entalpia e exergia do fluxo de vapor, então, assume-se que seus valores específicos em US\$/kWh podem ser também igualados aos custos específicos do vapor, nas duas bases, na saída da turbina. Portanto, a exergia gasta para gerar a potência na turbina foi fornecida ao fluido de trabalho em componentes anteriores a turbina (caldeira e bomba) a um custo específico por unidade de exergia, c_{ve} . De acordo com a prática da contabilidade, este custo só mudaria se fosse somada alguma exergia ao fluido de trabalho durante a expansão na turbina. Como isto não ocorre nem na turbina, nem no processo, o custo por unidade de exergia do fluido permanece constante ($C_{ve} = C_{1e} = C_{2e} = C_{3e}$).

Por exemplo, na entrada da turbina tem-se um custo exergético de vapor igual ao seu custo específico, multiplicado pela massa de vapor e pela exergia na entrada da turbina ($C_1 = c_{ve} \cdot \dot{m}_v \cdot e_1$), e na saída da turbina o custo do fluxo de vapor extraído é igual também ao seu custo específico, multiplicado por sua massa e por sua exergia ($C_2 = c_{ve} \cdot \dot{m}_v \cdot e_2$). Note que apesar de se usar o mesmo custo específico, tem-se valores de exergia diferentes, pois $e_1 > e_2$ e portanto $C_1 > C_2$, fazendo

com que toda a irreversibilidade da turbina seja considerada ao se calcular o custo da eletricidade produzida, conforme será demonstrado a seguir.

Concluindo, na saída do processo, o calor não aproveitado é considerado como insumo ao se calcular o custo do fluxo de saída da bomba, vide eq. (1). Portanto, na saída do processo também se iguala o custo específico deste fluxo de saída, tanto o da base energoeconômica, quanto o da base exergoeconômica, ao da saída da caldeira, pois esse calor não aproveitado também é proveniente desta última e como já foi dito anteriormente, não houve nenhum acréscimo de exergia ao fluxo durante o processo. Então as eq.(8) e (9) ficam da seguinte forma:

$$c_{vh} = \frac{\frac{\varphi \cdot f \cdot (C_{CAL} + C_P)}{H} + P_{COMB} \cdot \dot{E}_{COMB} + P_{EL} \cdot \dot{W}_P}{\dot{m}_v \cdot (h_1 - h_3)} \quad (10)$$

$$c_{ve} = \frac{\frac{\varphi \cdot f \cdot (C_{CAL} + C_P)}{H} + P_{COMB} \cdot \dot{E}_{COMB} + P_{EL} \cdot \dot{W}_P}{\dot{m}_v \cdot (e_1 - e_3)} \quad (11)$$

Analisando as equações anteriormente descritas verifica-se que o custo específico do vapor é igual ao total gasto para obtê-lo, dividido pelo total da sua energia (ou exergia) gasta no processo e na produção de eletricidade.

Para um caso genérico, em que n é o número de extrações de uma **turbina de contrapressão**, o custo específico do vapor em US\$/kWh, na base exérgica (c_{Ve}), pode ser determinado por:

$$c_{Ve} = \frac{\frac{\varphi \cdot f \cdot \left(C_{CAL} + \sum_{Cp=1}^n C_{Pn} \right)}{H} + P_{COMB} \cdot \dot{E}_{COMB} + P_{EL} \cdot \sum_{Wp=1}^n \dot{W}_P}{\dot{m}_V \cdot e_1 - \sum_{i=n+2}^{2n+1} \dot{m}_i \cdot e_i} \quad (12)$$

Para o caso de uma **turbina de condensação**:

$$c_{Ve} = \frac{\frac{\varphi \cdot f \cdot \left(C_{CAL} + \sum_{Cp=1}^n C_{Pn} \right)}{H} + P_{COMB} \cdot \dot{E}_{COMB} + P_{EL} \cdot \sum_{Wp=1}^n \dot{W}_P}{\dot{m}_V \cdot e_1 - \sum_{i=n+1}^{2n} \dot{m}_i \cdot e_i} \quad (13)$$

Como o propósito de uma turbina é gerar potência, todos os custos associados com a compra e operação da turbina devem ser atribuídos a potência. Portanto, o custo da eletricidade, na base exergética, em US\$/kWh na saída da turbina será igual ao custo do fluxo de entrada, mais o custo anual do equipamento, menos o custo do vapor extraído:

$$C_{ELE} = c_1 \cdot \dot{m}_1 \cdot e_1 + \frac{\varphi \cdot f \cdot C_{TV}}{H} - c_2 \cdot \dot{m}_2 \cdot e_2 \quad (14)$$

Como $c_v = c_1 = c_2 = c_3$, e fazendo $C_{ELE} = c_{ELE} \cdot Ep$:

$$c_{ELE} = \frac{\varphi \cdot f \cdot C_{TV}}{H \cdot Ep} + \frac{c_{ve} \cdot \dot{m}_v \cdot (e_1 - e_2)}{Ep} \quad (15)$$

Da mesma forma na base energética:

$$c_{ELh} = \frac{\varphi \cdot f \cdot C_{TV}}{H \cdot Ep} + \frac{c_{vh} \cdot \dot{m}_v \cdot (h_1 - h_2)}{Ep} \quad (16)$$

e

$$Ep = \dot{m}_v \cdot (h_1 - h_2) \cdot \eta_{mtv} \cdot \eta_{ger} \quad (17)$$

E_p é a potência elétrica produzida em kW, considerando um ciclo real com rendimento isoentrópico, rendimento mecânico na turbina η_{mtv} e rendimento no gerador η_{ger} . Novamente na forma genérica, em que n é o número de extrações de uma **turbina de contrapressão**, o custo específico da eletricidade produzida em US\$/kWh, na base exergética (c_{Ve}), pode ser determinado por:

$$c_{EL} = \frac{\varphi \cdot f \cdot C_{TV}}{H \cdot E_p} + \frac{c_{Ve} \cdot \left(\dot{m}_V \cdot e_1 - \sum_{i=2}^n \dot{m}_i \cdot e_i \right)}{E_p} \quad (18)$$

Para o caso de uma **turbina de condensação**:

$$c_{EL} = \frac{\varphi \cdot f \cdot C_{TV}}{H \cdot E_p} + \frac{c_{Ve} \cdot \left(\dot{m}_V \cdot e_1 - \sum_{i=2}^{n+1} \dot{m}_i \cdot e_i \right)}{E_p} \quad (19)$$

7.2 Parâmetros Econômicos

Fator de amortização f

$$f = \frac{(1+i)^k \cdot i}{(1+i)^k - 1} \quad (20)$$

Onde qual i é a taxa de juros anual e k é o período de amortização, também em anos.

H é o número de horas de operação do sistema por ano.

Os custos de investimento dos equipamentos são:

$$C_{CAL} = 155 \cdot h_V \cdot \dot{m}_V^{0,37} \cdot \exp\left(\frac{P_1 - 2}{5,26}\right) \quad (21)$$

$$C_P = 4990 \cdot W_P^{0,71} \quad (22)$$

$$C_{TV} = 6000 \cdot E_p^{0,7} \quad (23)$$

FUNÇÃO OBJETIVO DE OTIMIZAÇÃO (MINIMIZAÇÃO)

O Custo Exergético da Manufatura, que é a função objetivo a ser minimizada, é definido como sendo o somatório do custo da eletricidade produzida, do custo do vapor consumido pelo processo, do custo da eletricidade comprada da rede em caso de déficit, subtraindo-se o custo da eletricidade vendida em caso de excedente, ou seja:

Na base exergética, em caso de déficit ou auto-suficiência na produção de eletricidade tem-se:

$$C_{MANe} = E_p \cdot c_{ELe} + (E_r - E_p) \cdot P_{EL} + c_{ve} \cdot \dot{E}_{vp} \quad (24)$$

E em caso de excedente, tem-se:

$$C_{MANe} = E_p \cdot c_{ELe} - (E_p - E_r) \cdot P_{VEL} + c_{ve} \cdot \dot{E}_{vp} \quad (25)$$

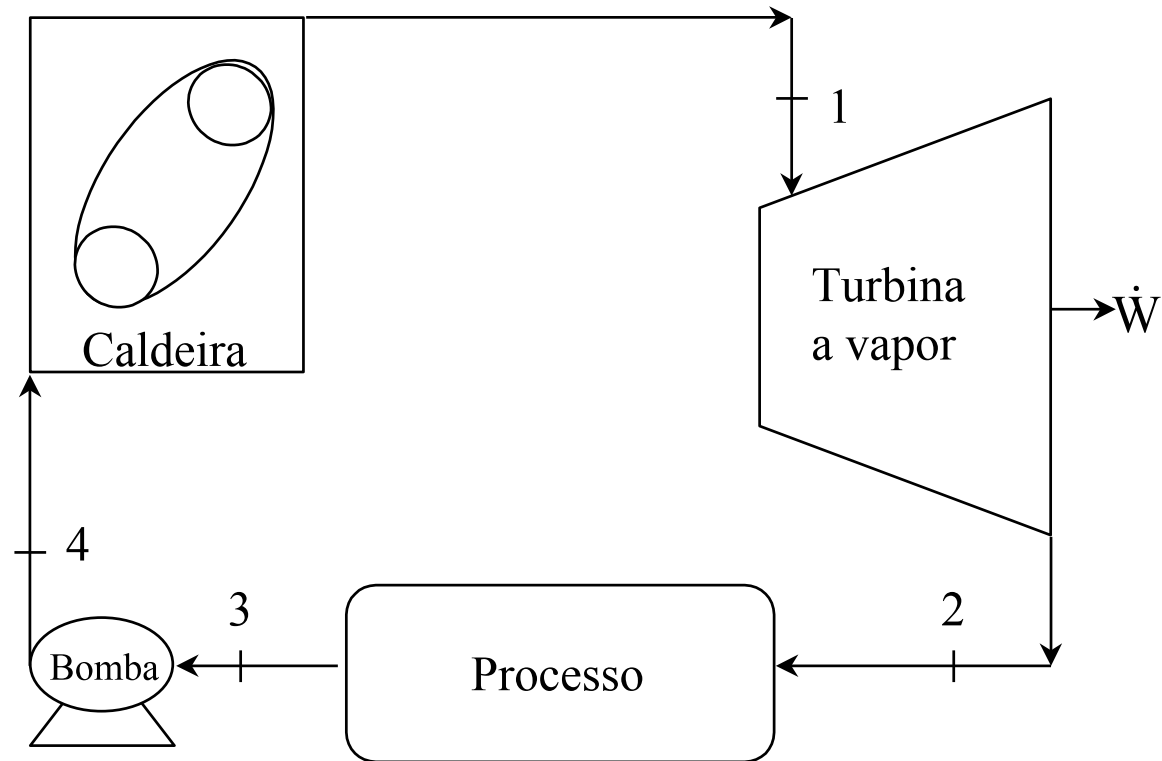
Da mesma forma, na base energética tem-se:

$$C_{MANh} = E_p \cdot c_{ELh} + (E_r - E_p) \cdot P_{EL} + c_{vh} \cdot \dot{H}_{vp} \quad (26)$$

E em caso de excedente, tem-se:

$$C_{MANh} = E_p \cdot c_{ELh} - (E_p - E_r) \cdot P_{VEL} + c_{vh} \cdot \dot{H}_{vp} \quad (27)$$

Exemplo 1 - Seja uma central térmica que opera com os seguintes valores apresentados na tabela abaixo. A) Calcule o custo de manufatura nas bases energética e exergética e o ganho na produção de energia em relação a um sistema convencional.



Parâmetros Fixos

η_{mtv}	0,98	T_o [°C]	25,00
η_{ger}	0,97	P_o [MPa]	0,100
$\eta_{ISO_{TV}}$	0,85	P_{COMB} [US\$/kWh]	0,050
η_P	0,75	P_{EL} [US\$/kWh]	0,129
η_{CAL}	0,90	PCI [kJ/kg]	47.966
H [h]	8000	E_r [kW]	6.000
i [%]	8,00	P_1 [MPa]	5
m_v kg/s	6	T_1 oC	450
P_3 [MPa] Liq sat	0,5	P_2 [MPa]	0,6
K [anos]	5		

Sol:

Ponto	Pressão MPa	Temp oC	h kj/kg	h iso kj/kg	s kJ/kgK
1	5	450	3316,1		6,8185
2	0,6	206	2863	2783	6,992
3	0,5 liq sat	152	640,21		1,8606
4	5	153	647,4	645,6	1,864

$$\eta_{TV} = \frac{h_e - h_s}{h_e - h_{s_{ISO}}} \Rightarrow 0,85 = \frac{3316,1 - h_s}{3316,1 - 2783} \Rightarrow h_s = 2863$$

$$\left. \begin{array}{l} h_s = 2863 \\ P = 0,6 \text{ MPa} \end{array} \right\} s_s = 6,992 \text{ kJ / kgK} \quad T = 206 \text{ oC}$$

$$\eta_P = \frac{h_{Siso} - h_e}{h_s - h_e} \Rightarrow 0,75 = \frac{645,6 - 640,21}{h_s - 640,21} \Rightarrow h_s = 647,4$$

$$\left. \begin{array}{l} h_s = 647,4 \\ P = 5 \text{ MPa} \end{array} \right\} s_s = 1,864 \text{ kJ / kgK} \quad T = 153 \text{ oC}$$

Cálculo da exergia nos pontos:

$$e_i = (h_i - h_0) - T_0 \cdot (S_i - S_0)$$

$$\left. \begin{array}{l} T = 25 \text{ oC} \\ P = 0,1 \text{ MPa} \end{array} \right\} h_0 = 104,87 \text{ kJ / kg} \quad s_0 = 0,3673 \text{ kJ / kgK}$$

$$e_1 = (3316,1 - 104,87) - 298 \cdot (6,8185 - 0,3673) = 1288,8 \text{ kJ / kg}$$

$$e_2 = (2863 - 104,87) - 298 \cdot (6,992 - 0,3673) = 784 \text{ kJ / kg}$$

$$e_3 = (640,21 - 104,87) - 298 \cdot (1,8606 - 0,3673) = 90,3 \text{ kJ / kg}$$

$$e_4 = (647,4 - 104,87) - 298 \cdot (1,864 - 0,3673) = 96,5 \text{ kJ/kg}$$

Na caldeira:

$$\eta_{\text{Cald}} = \frac{\dot{m}_V (h_1 - h_4)}{\dot{m}_{\text{COMB}} \cdot \text{PCI}} \Rightarrow 0,90 = \frac{6(3316,1 - 647,4)}{\dot{m}_{\text{COMB}} \cdot 47966} \Rightarrow \dot{m}_{\text{COMB}} = 0,371 \text{ kg/s}$$

$$E_{\text{COMB}} = 0,371 \cdot 47966 = 17795 \text{ kW}$$

$$f = \frac{(1+i)^k \cdot i}{(1+i)^k - 1} = \frac{(1,08)^5 \cdot 0,08}{(1,08)^5 - 1} = 0,2505$$

$$C_{\text{CAL}} = 155 \cdot h_V \cdot \dot{m}_V^{0,37} \cdot \exp\left(\frac{P_1 - 2}{5,26}\right)$$

$$C_{\text{CAL}} = 155 \cdot 3316,1 \cdot 6^{0,37} \cdot \exp\left(\frac{5 - 2}{5,26}\right) = 1.764.297,00$$

$$W_P = \dot{m}_V (h_4 - h_3) = 6(647,4 - 640,21) = 43,14 \text{ kW}$$

$$C_P = 4990 \cdot W_P^{0,71} = 4990 \cdot 43,14^{0,71} = 72.255,00$$

$$c_{Vh} = \frac{\frac{f \cdot (C_{CAL} + C_P)}{H} + P_{COMB} \cdot \dot{E}_{COMB} + P_{EL} \cdot \dot{W}_P}{\dot{m}_V \cdot (h_1 - h_3)}$$

$$c_{Vh} = \frac{\frac{0,2505 \cdot (1764297 + 72255)}{8000} + 0,050 \cdot 17795 + 0,129 \cdot 43,14}{6 \cdot (3316,1 - 640,21)} = \frac{952,82}{16055,34} = 0,0593 \text{ US\$ / kWh}$$

$$c_{Ve} = \frac{\frac{0,2505 \cdot (1764297 + 72255)}{8000} + 0,050 \cdot 17795 + 0,129 \cdot 43,14}{6 \cdot (1288,8 - 90,3)} = \frac{952,82}{7191} = 0,1325 \text{ US\$ / kWh}$$

Na turbina:

$$E_p = \dot{m}_V \cdot (h_1 - h_2) \cdot \eta_{mtv} \cdot \eta_{ger} = 6 \cdot (3316,1 - 2863) \cdot 0,98 \cdot 0,97 = 2584 \text{ kW}$$

$$C_{TV} = 6000 \cdot E_p^{0,7} = 6000 \cdot 2584^{0,7} = 1.468.101,00$$

$$c_{ELh} = \frac{f \cdot C_{TV}}{H \cdot E_p} + \frac{c_{Vh} \cdot \dot{m}_V \cdot (h_1 - h_2)}{E_p}$$

$$c_{ELh} = \frac{0,2505 \cdot 1468101}{8000 \cdot 2584} + \frac{0,0593 \cdot 6 \cdot (3316,1 - 2863)}{2584} = 0,0178 + 0,0624 = 0,0802 \text{ US\$ / kWh}$$

$$c_{ELe} = \frac{f \cdot C_{TV}}{H \cdot Ep} + \frac{c_{Ve} \cdot \dot{m}_v \cdot (e_1 - e_2)}{Ep} = 0,0178 + \frac{0,1325 \cdot 6 \cdot (1288,8 - 784)}{2584} = 0,0178 + 0,1553 = 0,1731 \text{ US\$/kWh}$$

$$C_{MANh} = Ep \cdot c_{ELh} + (Er - Ep) \cdot P_{EL} + c_{vh} \cdot \dot{H}_{vp}$$

$$\dot{H}_{vp} = \dot{m}_v \cdot (h_2 - h_{36}) = 6 \cdot (2863 - 640,21) = 13.336,74 \text{ kW}$$

$$C_{MANh} = 2584 \cdot 0,0802 + (6000 - 2584) \cdot 0,129 + 0,0593 \cdot 13336,74 = 1438,8 \text{ US\$/h}$$

$$C_{MANe} = Ep \cdot c_{ELe} + (Er - Ep) \cdot P_{EL} + c_{ve} \cdot \dot{E}_{vp}$$

$$\dot{E}_{vp} = \dot{m}_v \cdot (e_2 - e_3) = 6 \cdot (784 - 90,3) = 4162,2 \text{ kW}$$

$$C_{MANe} = 2584 \cdot 0,1731 + (6000 - 2584) \cdot 0,129 + 0,1325 \cdot 4162,2 = 1439,4 \text{ US\$/h}$$

$$\eta_{G2aLei} = \frac{\dot{W}_{Liq} + \dot{E}_{xV}}{\dot{m}_{CT} PCI} = \frac{2584 + 4162,2}{0,371 \cdot 47966} = 0,3791$$

Custo de sistema convencional:

Vapor = 6 kg/s a 0,6 MPa – Vapor saturado seco

$$h_v = 2757 \quad s_v = 6,76 \quad h_e = 647,4 \quad s_e = 1,864$$

$$C_{\text{CAL}} = 155 \cdot 2757 \cdot 6^{0,37} \cdot \exp\left(\frac{0,6 - 2}{5,26}\right) = 635.467,00$$

Considerando um bombeamento de 0,5 a 0,6 MPa (perdas ao longo do escoamento)

$$W_p = \dot{m} \cdot v \Delta p = 6 \cdot 0,001093(600 - 500) = 0,66 \text{ kW}$$

$$C_p = 4990 \cdot W_p^{0,71} = 4990 \cdot 0,66^{0,71} = 3.715,00 \text{ desprezível}$$

$$\eta_{\text{Cald}} = \frac{\dot{m}_v (h_1 - h_4)}{\dot{m}_{\text{COMB}} \cdot \text{PCI}} \Rightarrow 0,90 = \frac{6(2757 - 647,4)}{\dot{m}_{\text{COMB}} \cdot 47966} \Rightarrow \dot{m}_{\text{COMB}} = 0,293 \text{ kg / s}$$

$$E_{\text{COMB}} = 0,293 \cdot 47966 = 14054 \text{ kW}$$

$$c_{\text{Vh}} = \frac{0,2505 \cdot (635467) + 0,050 \cdot 14054}{6 \cdot (2757 - 640,21)} = \frac{722,60}{12701} = 0,0569 \text{ US\$ / kWh}$$

$$C_{\text{MANh}} = E_p \cdot c_{\text{ELh}} + c_{\text{Vh}} \cdot \dot{H}_{\text{vp}}$$

$$C_{\text{MANh}} = 6000 \cdot 0,129 + 0,0569 \cdot 6(2757 - 640,21) = 1496,67 \text{ US\$ / h}$$

$$\text{GPEL} = 1496,67 - 1438,8 = 57,87 \text{ US\$ / h } \times 8000 = 462.960 \text{ US\$ / ano}$$

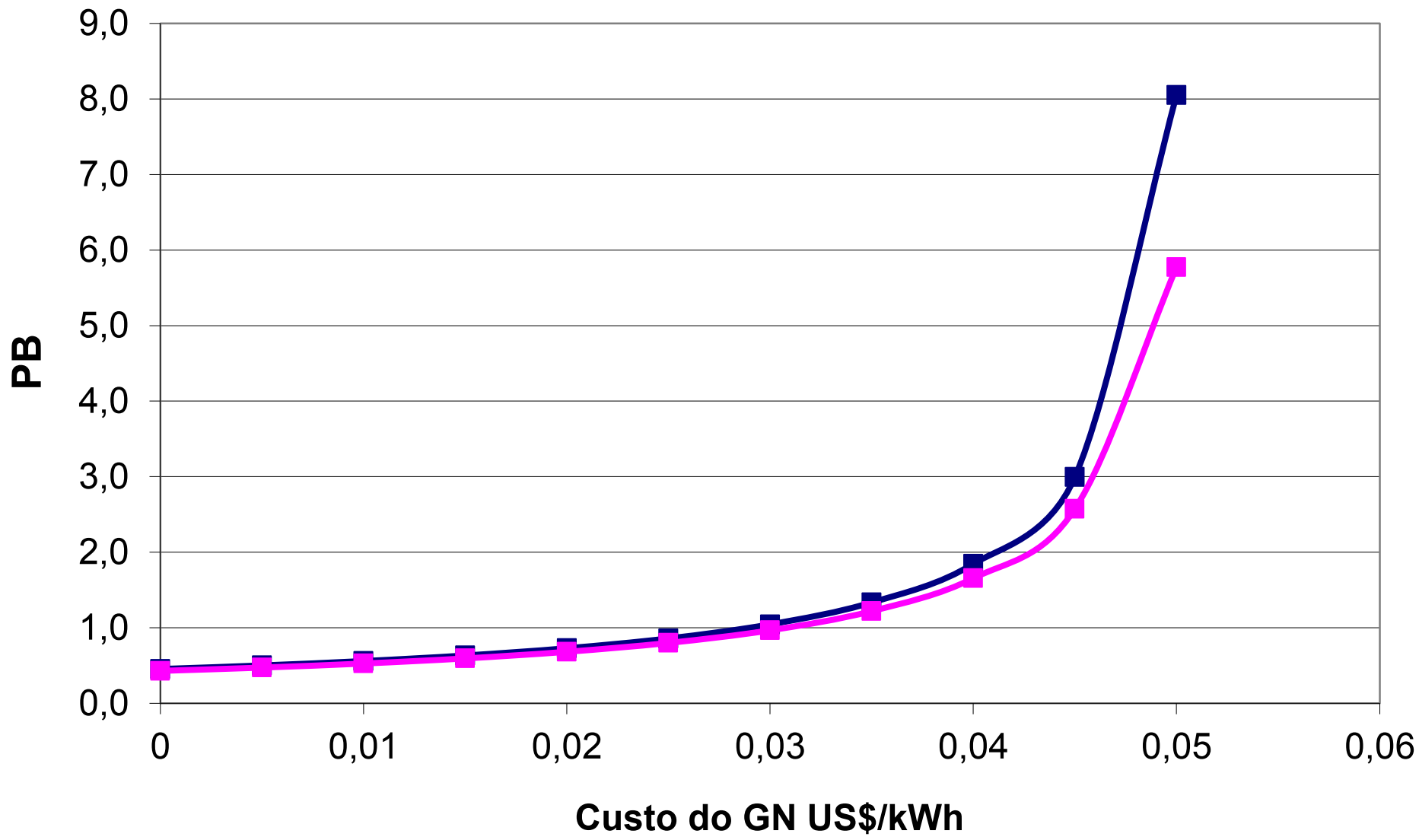
INVESTIMENTO TOTAL = VP US\$ 3.304.653 (1280 US\$/kW)

RECEITA = PMT = 462,960,00

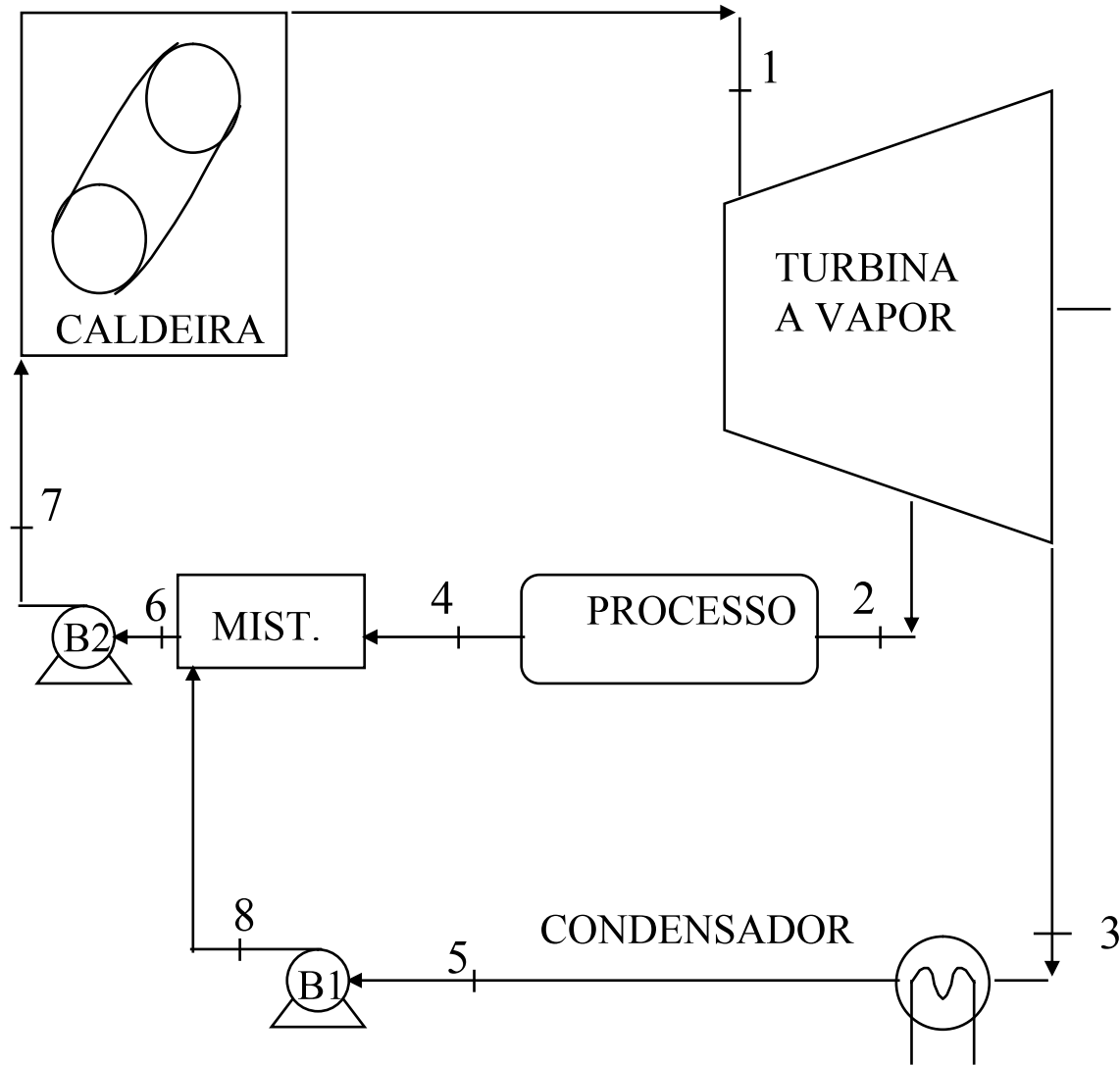
TAXA DE JUROS = 8% a.a.

PAYBACK = 11 anos (para trocar um sistema existente por um de cogeração)

Para uma planta nova, como investimento, deve-se considerar a diferença entre os dois, ou seja: invest. = 3.304.653 – 635.467 = 2.669.186. O que resulta em um payback de 8 anos.



Exemplo 2 - Seja uma central térmica que opera com os seguintes valores apresentados na tabela abaixo. A) Calcule o custo de manufatura nas bases energética e exergética e o ganho na produção de energia em relação a um sistema convencional.



Parâmetros Fixos

η_{mtv}	0,98	T_o [°C]	25,00
η_{ger}	0,97	P_o [MPa]	0,100
$\eta_{ISO_{TV}}$	0,85	P_{COMB} [US\$/kWh]	0,050
η_P	0,75	P_{EL} [US\$/kWh]	0,129
η_{CAL}	0,90	PCI [kJ/kg]	47.966
H [h]	8000	E_r [kW]	6.000
i [%]	8,00	P_1 [MPa]	5
m_v kg/s	6	T_1 oC	450
P_4 [MPa] Liq sat	0,1	P_2 [MPa]	0,6
K [anos]	5	P_3 [MPa]	0,1
P_5 [MPa] Liq sat	0,1	P_6 [MPa] Liq sat	0,1

Sol:

Ponto	Pressão MPa	Temp oC	h kj/kg	h iso kj/kg	s kJ/kgK
1	5	450	3316,1		6,8185
2	0,6	206	2863	2783	6,992
3	0,1	100	2587,6	2539	7,124
4	0,5 liq sat	152	640,21		1,8606
5	0,1 liq sat	100	417,44		1,3025
6	0,5 liq comp	128	540		1,618
7	5 liq comp	129	546,4	544,8	1,622
8	0,5 liq comp	100	418,05	417,9	1,303

$$\eta_{TV} = \frac{h_e - h_s}{h_e - h_{s_{ISO}}} \Rightarrow 0,85 = \frac{3316,1 - h_s}{3316,1 - 2783} \Rightarrow h_2 = 2863$$

$$\left. \begin{array}{l} h_2 = 2863 \\ P_2 = 0,6 \text{ MPa} \end{array} \right\} s_2 = 6,992 \text{ kJ / kgK} \quad T_2 = 206 \text{ oC}$$

No 2º estágio da TV

$$\eta_{TV} = \frac{h_e - h_s}{h_e - h_{s_{ISO}}} \Rightarrow 0,85 = \frac{2863 - h_3}{2863 - 2539} \Rightarrow h_3 = 2587,6$$

$$\left. \begin{array}{l} h_3 = 2587,6 \\ P = 0,1 \text{ MPa} \end{array} \right\} s_3 = 7,124 \text{ kJ / kgK} \quad T = 100 \text{ oC} \quad x = 0,96$$

Bomba 1

$$\eta_P = \frac{h_{\text{Siso}} - h_e}{h_s - h_e} \Rightarrow 0,75 = \frac{417,9 - 417,44}{h_s - 417,44} \Rightarrow h_8 = 418,05 \text{ kJ / kg}$$

$$\left. \begin{array}{l} h_8 = 418,05 \\ P = 0,5 \text{ MPa} \end{array} \right\} s_8 = 1,303 \text{ kJ / kgK} \quad T = 100 \text{ oC}$$

Cálculos das vazões de vapor:

$$\frac{Er}{\eta_{\text{mtv}} \cdot \eta_{\text{ger}}} = m_1 \cdot h_1 - m_2 \cdot h_2 - (m_1 - m_2)h_3$$

$$\frac{Er}{\eta_{\text{mtv}} \cdot \eta_{\text{ger}}} = m_1 \cdot h_1 - m_2 \cdot h_2 - m_1 \cdot h_3 - m_2 \cdot h_3$$

$$\frac{Er}{\eta_{\text{mtv}} \cdot \eta_{\text{ger}}} = m_1(h_1 - h_3) - m_2(h_2 - h_3)$$

$$\frac{Er}{\eta_{\text{mtv}} \cdot \eta_{\text{ger}}} + m_2(h_2 - h_3) = m_1 = \frac{\frac{6000}{0,98 \cdot 0,97} + 6(2863 - 2587,6)}{(3316,1 - 2587,6)} = 10,93 \text{ kg / s}$$

$$\therefore m_3 = 4,93 \text{ kg / s}$$

No misturador

$$\dot{m}_4 \cdot h_4 + \dot{m}_8 \cdot h_8 = \dot{m}_6 \cdot h_6$$

$$6 \cdot 640,21 + 4,93 \cdot 418,05 = 10,93 \cdot h_6 \Rightarrow h_6 = 540,00 \text{ kJ / kg} \quad s_6 = 1,618 \text{ kJ / kgK}$$

Bomba 2

$$\eta_P = \frac{h_{\text{Siso}} - h_e}{h_s - h_e} \Rightarrow 0,75 = \frac{544,8 - 540}{h_s - 540} \Rightarrow h_7 = 546,4 \text{ kJ / kg}$$

$$\left. \begin{array}{l} h_7 = 546,4 \\ P = 5 \text{ MPa} \end{array} \right\} s_7 = 1,622 \text{ kJ / kgK} \quad T = 129 \text{ oC}$$

Cálculo da exergia nos pontos:

$$e_i = (h_i - h_0) - T_0 \cdot (S_i - S_0)$$

$$\left. \begin{array}{l} T = 25 \text{ oC} \\ P = 0,1 \text{ MPa} \end{array} \right\} h_0 = 104,87 \text{ kJ / kg} \quad s_0 = 0,3673 \text{ kJ / kgK}$$

$$e_1 = (3316,1 - 104,87) - 298 \cdot (6,8185 - 0,3673) = 1288,8 \text{ kJ / kg}$$

$$e_2 = (2863 - 104,87) - 298 \cdot (6,992 - 0,3673) = 784 \text{ kJ / kg}$$

$$e_3 = (2587,6 - 104,87) - 298 \cdot (7,124 - 0,3673) = 469,23 \text{ kJ / kg}$$

$$e_4 = (640,21 - 104,87) - 298 \cdot (1,8606 - 0,3673) = 90,34 \text{ kJ / kg}$$

$$e_5 = (417,44 - 104,87) - 298 \cdot (1,3025 - 0,3673) = 33,88 \text{ kJ / kg}$$

$$e_6 = (540 - 104,87) - 298 \cdot (1,618 - 0,3673) = 62,4 \text{ kJ / kg}$$

$$e_7 = (546,4 - 104,87) - 298 \cdot (1,622 - 0,3673) = 67,6 \text{ kJ / kg}$$

$$e_8 = (418,05 - 104,87) - 298 \cdot (1,303 - 0,3673) = 34,3 \text{ kJ / kg}$$

Na caldeira

$$\eta_{\text{Cald}} = \frac{\dot{m}_V (h_1 - h_7)}{\dot{m}_{\text{COMB}} \cdot \text{PCI}} \Rightarrow 0,90 = \frac{10,93(3316,1 - 546,4)}{\dot{m}_{\text{COMB}} \cdot 47966} \Rightarrow \dot{m}_{\text{COMB}} = 0,701 \text{ kg / s}$$

$$E_{\text{COMB}} = 0,701 \cdot 47966 = 33624 \text{ kW}$$

$$f = \frac{(1+i)^k \cdot i}{(1+i)^k - 1} = \frac{(1,08)^5 \cdot 0,08}{(1,08)^5 - 1} = 0,2505$$

$$C_{\text{CAL}} = 155 \cdot h_V \cdot \dot{m}_V^{0,37} \cdot \exp\left(\frac{P_1 - 2}{5,26}\right)$$

$$C_{\text{CAL}} = 155 \cdot 3316,1 \cdot 10,93^{0,37} \cdot \exp\left(\frac{5-2}{5,26}\right) = 2.202.649,00$$

$$W_{P2} = \dot{m}_V (h_7 - h_6) = 10,93(546,4 - 540) = 70 \text{ kW}$$

$$C_{P2} = 4990 \cdot W_P^{0,71} = 4990 \cdot 70^{0,71} = 101.887,00$$

$$W_{P1} = \dot{m}_3(h_8 - h_5) = 4,93(418,05 - 417,44) = 3\text{kW}$$

$$C_{P1} = 4990 \cdot W_P^{0,71} = 4990 \cdot 3^{0,71} = 10.886,00$$

$$c_{Vh} = \frac{\frac{f \cdot (C_{CAL} + C_P)}{H} + P_{COMB} \cdot \dot{E}_{COMB} + P_{EL} \cdot \dot{W}_P}{\dot{m}_1 \cdot h_1 - \dot{m}_2 \cdot h_4 - \dot{m}_3 \cdot h_3}$$

$$c_{Vh} = \frac{\frac{0,2505 \cdot (2202649 + 112773)}{8000} + 0,050 \cdot 33624 + 0,129 \cdot 73}{10,93 \cdot 3316,1 - 6 \cdot 640,21 - 4,93 \cdot 2587,6} = \frac{1763,12}{19646,8} = 0,0898 \text{ US\$ / kWh}$$

$$c_{Ve} = \frac{\frac{0,2505 \cdot (2202649 + 112773)}{8000} + 0,050 \cdot 33624 + 0,129 \cdot 73}{10,93 \cdot 1288,8 - 6 \cdot 90,34 - 4,93 \cdot 469,23} = \frac{1763,12}{11231,2} = 0,1571 \text{ US\$ / kWh}$$

Na turbina:

$$C_{TV} = 6000 \cdot E_p^{0,7} = 6000 \cdot 6000^{0,7} = 2.647.629,00$$

$$c_{ELh} = \frac{f \cdot C_{TV}}{H \cdot E_p} + \frac{c_{Vh} (\dot{m}_1 \cdot h_1 - \dot{m}_2 \cdot h_2 - \dot{m}_3 \cdot h_3)}{E_p}$$

$$c_{ELh} = \frac{0,2505 \cdot 2647629}{8000 \cdot 6000} + \frac{0,0898 \cdot (10,93 \cdot 3316,1 - 6 \cdot 2863 - 4,93 \cdot 2587,6)}{6000} = 0,0138 + 0,0945 = 0,1083$$

$$c_{ELE} = \frac{0,2505 \cdot 2647629}{8000 \cdot 6000} + \frac{0,1571 \cdot (10,93 \cdot 1288,8 - 6 \cdot 784 - 4,93 \cdot 469,23)}{6000} = 0,0138 + 0,1851 = 0,1989$$

$$C_{MANh} = Ep \cdot c_{ELh} + c_{vh} \cdot \dot{H}_{vp}$$

$$\dot{H}_{vp} = \dot{m}_v \cdot (h_2 - h_4) = 6 \cdot (2863 - 640,21) = 13.336,74 \text{ kW}$$

$$C_{MANh} = 6000 \cdot 0,1083 + 0,0898 \cdot 13336,74 = 1847 \text{ US\$ / h}$$

$$C_{MANe} = Ep \cdot c_{ELE} + c_{ve} \cdot \dot{E}_{vp}$$

$$\dot{E}_{vp} = \dot{m}_v \cdot (e_2 - e_4) = 6 \cdot (784 - 90,34) = 4162 \text{ kW}$$

$$C_{MANe} = 6000 \cdot 0,1989 + 0,1571 \cdot 4162 = 1847 \text{ US\$ / h}$$

$$GPEL = 1497 - 1847 = -350 \text{ US\$ / h} \quad \text{inviável}$$