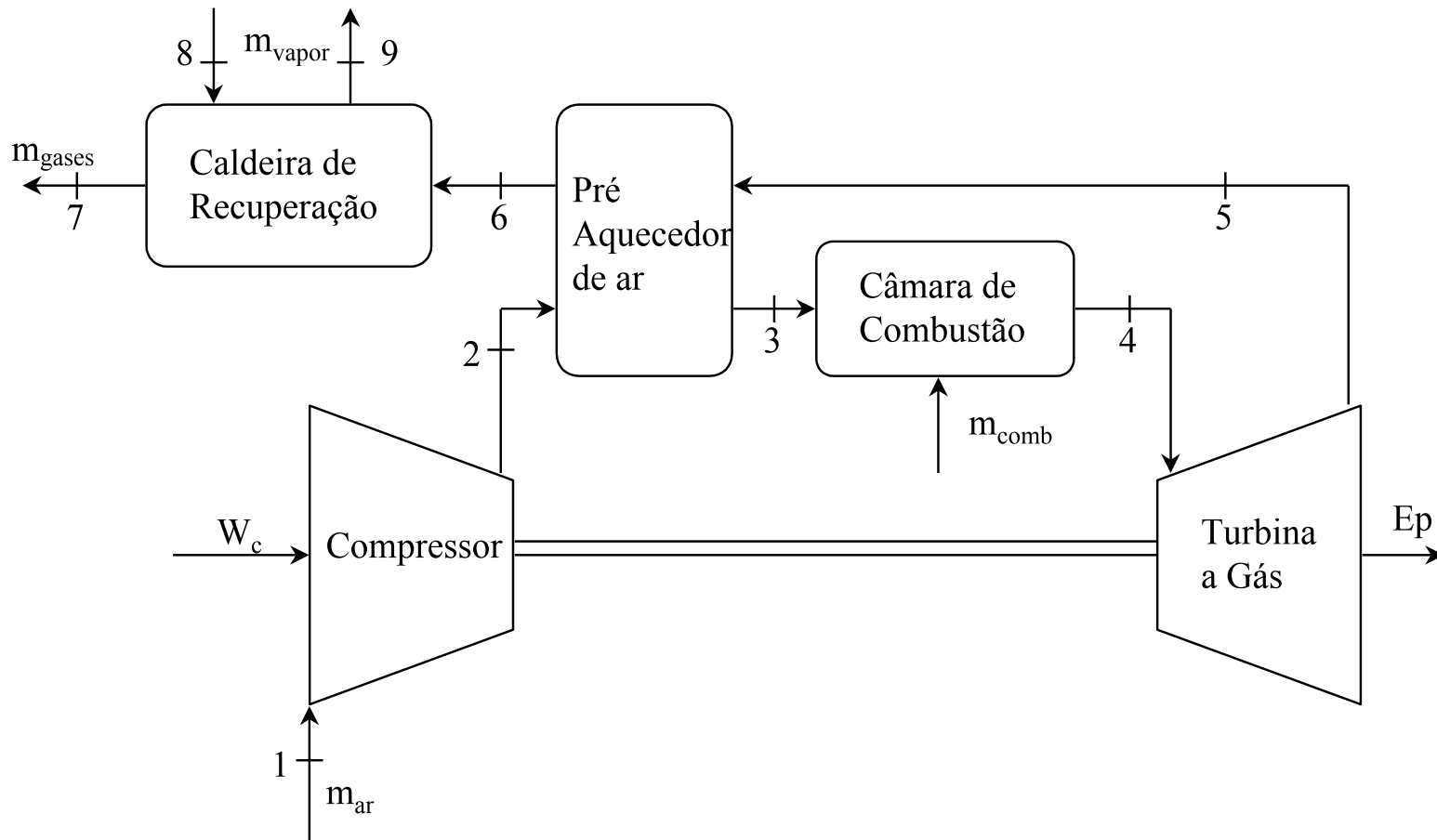


### 7.3 Termoeconomia (1ª lei) e Exergoeconomia (2ª Lei) nos ciclos a gás

Procedendo de modo análogo, desenvolve-se o método para um ciclo empregando turbina a gás, com pré aquecedor do ar de combustão e caldeira de recuperação, conforme mostrado na Figura.



Tem-se então determinado todas as condições operacionais do sistema e seus respectivos valores. Trata-se o fluido de trabalho desse ciclo (gás) da mesma forma que foi tratado no ciclo vapor no que se relaciona a geração de entalpia e exergia nesse fluxo para a determinação de seus custos específicos. Portanto, o custo específico do gás na saída da câmara de combustão, da eletricidade produzida e do vapor em US\$/kWh, na base exergética, são definidos por:

$$c_{Ge} = \frac{\dot{E}_{COMB} \cdot P_{COMB}}{\dot{m}_G \cdot (e_4 - e_7)} \quad (28)$$

$$c_{ELE} = \frac{f \cdot \phi \cdot (C_C + C_{CC} + C_{TG})}{H \cdot E_p} + \frac{c_{Ge} \cdot \dot{m}_G \cdot (e_4 - e_6)}{E_p} \quad (29)$$

$$c_{Ve} = \frac{f \cdot \phi \cdot C_{CR}}{H \cdot \dot{E}_V} + \frac{c_{Ge} \cdot \dot{m}_G \cdot (e_6 - e_7) + \dot{E}_{COMB_S} \cdot P_{COMB}}{\dot{E}_V} \quad (30)$$

$$\dot{E}_V = \dot{m}_V \cdot (e_9 - e_8) \quad (31)$$

$$\dot{E}_{COMB} = \dot{m}_{COMB} \cdot PCI \quad (32)$$

Na base energética as equações de custos ficam da seguinte forma:

$$c_{Gh} = \frac{\dot{E}_{COMB} \cdot P_{COMB}}{\dot{m}_G \cdot (h_4 - h_7)} \quad (33)$$

$$c_{ELh} = \frac{f \cdot \varphi \cdot (C_C + C_{CC} + C_{TG})}{H \cdot Ep} + \frac{c_{Gh} \cdot \dot{m}_G \cdot (h_4 - h_6)}{Ep} \quad (34)$$

$$c_{Vh} = \frac{f \cdot \varphi \cdot C_{CR}}{H \cdot \dot{H}_V} + \frac{c_G \cdot \dot{m}_G \cdot (h_6 - h_7) + \dot{E}_{COMB_S} \cdot P_{COMB}}{\dot{H}_V} \quad (35)$$

Caso sejam conhecidas as condições de operação do ciclo a gás, as funções de custos utilizadas para o cálculo dos custos de aquisições de compressores, câmaras de combustão, turbinas a gás, e caldeiras de recuperação, são respectivamente:

$$C_C = \left( \frac{75 \cdot \dot{m}_{AR}}{0,9 - \eta_C} \right) \cdot \left( \frac{P_{Saida}}{P_{Entrada}} \right) \cdot \ln \left( \frac{P_{Saida}}{P_{Entrada}} \right) \quad (36)$$

$$C_{CC} = \left( \frac{48,64 \cdot \dot{m}_{AR}}{0,995 - \left( \frac{P_{Saida}}{P_{Entrada}} \right)} \right) \cdot [1 + \exp(0,018 \cdot T_{Saida} - 26,4)] \quad (37)$$

$$C_{TG} = \left( \frac{1536 \cdot \dot{m}_G}{0,92 - \eta_{TG}} \right) \cdot (\ln Pr) \cdot [1 + \exp(0,036 \cdot T_{Entrada} - 54,4)] \quad (38)$$

$$C_{CR} = 4745 \cdot \left( \frac{h_{saida}}{\log(T_{ent} - T_{saida})} \right)^{0,8} + 11820 \cdot \dot{m}_V + 658 \cdot \dot{m}_G \quad (39)$$

A Função Objetivo de Otimização são as mesmas das do ciclo a vapor: Eq (24 a 27)

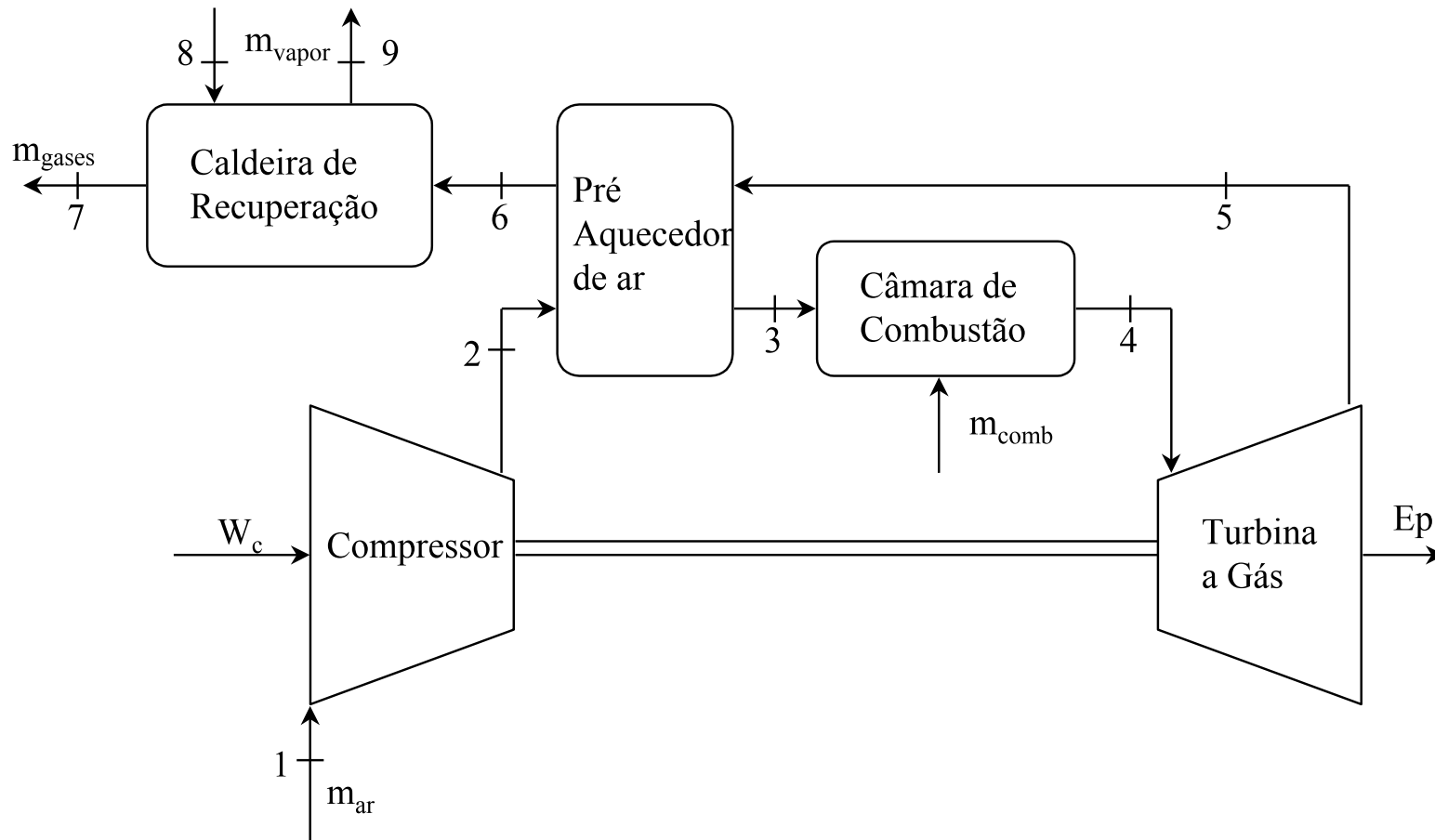
$$C_{MANe} = Ep \cdot c_{ELe} + (Er - Ep) \cdot P_{EL} + c_{Ve} \cdot \dot{E}vp \quad (24)$$

$$C_{MANe} = Ep \cdot c_{ELe} - (Ep - Er) \cdot P_{VEL} + c_{Ve} \cdot \dot{E}vp \quad (25)$$

$$C_{MANh} = Ep \cdot c_{ELh} + (Er - Ep) \cdot P_{EL} + c_{Vh} \cdot \dot{H}vp \quad (26)$$

$$C_{MANh} = Ep \cdot c_{ELh} - (Ep - Er) \cdot P_{VEL} + c_{Vh} \cdot \dot{H}vp \quad (27)$$

Exemplo 3 - 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 deste sistema em paridade elétrica e o ganho na produção de energia em relação a um sistema convencional.



### Parâmetros Fixos

$\eta_{mtg}$	0,98	$T_o$ [°C]	25,00
$\eta_{ger}$	0,97	$P_o$ [MPa]	0,100
$\eta_P$	0,75	$P_{COMB}$ [US\$/kWh]	0,050
$\eta_{CAL}$	0,90	$P_{EL}$ [US\$/kWh]	0,129
H [h]	8000	PCI [kJ/kg]	47.966
i [%]	8,00	$E_r$ [kW]	6.000
$m_v$ kg/s	6	$P_9$ [MPa] vap sat	0,6
$P_8$ [MPa] Liq sat	0,5		
K [anos]	5		

Procurando em catálogos de turbinas a gás, selecionou-se a seguinte:

Solar Turbines, modelo Taurus 65,  $E_p = 6300$  kW,  $m_g = 75950$  kg/h = 21,10 kg/s,  $T_g = 550$  oC, Heat rate = 10945 kJ/kWh.

Do gás Turbine Word Handbook retira-se um custo de 520 US\$/kW, totalizando  $520 \times 6300 =$  US\$ 3,276,000.00 + 30% de instalação, engenharia e instrumentação = 4,258,800.00.

Solução:

Das tabelas retira-se:

vapor saturado a 600 kPa  $\dot{m}_V = 6$  kg/s, saída do processo conforme exemplo 1, liq saturado a 500 kPa que em seguida é bombeado para 600 kPa  $\Rightarrow$

$$h_8 = h_{\text{liqsat } 500 \text{ kPa}} + v\Delta p = 640,21 + 0,001093 (600 - 500) = 640,32 \text{ kJ / kg} \quad T_8 = 151,86 \text{ oC}$$

$$h_9 = h_{\text{vapsat } 600 \text{ kPa}} = 2756,8 \text{ kJ / kg} \quad h_{\text{liqsat } 600 \text{ kPa}} = 670,54 \text{ kJ / kg} \quad T_{\text{sat}=9} = 158,85 \text{ oC}$$

$$s_8 = s_{\text{liqsat } 500 \text{ kPa}} = 1,8606 \text{ kJ / kgK} \quad s_9 = s_{\text{vapsat } 600 \text{ kPa}} = 6,76 \text{ kJ / kgK}$$

CG Taurus 65 -  $T_{pp} = T_{SAT} + \Delta T_{pp}$  (entre 10 e 30°C). Então:  $T_{pp} = 169$  oC

$$\eta_{CR} \cdot \dot{m}_g \cdot c_{p_g} (T_g - T_{pp}) = \dot{m}'_V \cdot (h_{VP} - h_\ell)$$

$$\dot{m}'_V = \frac{\eta_{CR} \cdot \dot{m}_g \cdot c_{p_g} (T_g - T_{pp})}{(h_{VP} - h_\ell)} = \frac{0,9 \cdot 21,1 \cdot 1,148 (550 - 169)}{(2756,8 - 670,54)} = 3,98 \text{ kg / s}$$

$$\eta_{CR} \cdot \dot{m}_g \cdot c_{p_g} (T_g - T_{CH}) = \dot{m}'_V (h_{VP} - h_{ent}) \Rightarrow T_{CH} = 550 - \frac{3,98(2756,8 - 640,32)}{0,9 \cdot 21,1 \cdot 1,148} = 163 \text{ oC OK}$$

$$Q_g = \dot{m}_g \cdot c_{p_g} (T_g - T) = 21,1 \cdot 1,148 (550 - 163) = 9374,2 \text{ kW}$$

$$Q_a = Q_{25^\circ C} = \dot{m}_V \cdot (h_{VP} - h_{ent}) = 6(2756,8 - 640,32) = 12698,9 \text{ kW}$$

$$\dot{m}_{c_s} = \frac{\left[ \frac{\dot{m}_V (h_{VP} - h_{ent})}{\eta_{CR}} - \dot{m}_g \cdot c_{p_g} (T_g - T_{ch}) \right]}{PCI} = \frac{\left[ \frac{\dot{Q}_a}{\eta_{CR}} - \dot{Q}_g \right]}{PCI} = \frac{\left[ \frac{12698,9}{0,9} - 9374,2 \right]}{47966} = 0,0987 \text{ kg / s}$$

$$\dot{m}_c = \frac{\dot{W}_{Liq} \cdot HR}{3600 \cdot PCI} = \frac{6000 \cdot 10945}{3600 \cdot 47966} = 0,3803 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_c + \dot{m}_{cS} = 0,3803 + 0,0987 = 0,4790 \text{ kg/s}$$

$$\dot{E}x_V = \dot{m}_V [(h_{vS} - h_a) - T_0(s_{vS} - s_a)] = 6[(2756,8 - 640,32) - 298(6,76 - 1,8606)] = 3938,8 \text{ kW}$$

$$\eta_{G2aLei} = \frac{\dot{W}_{Liq} + \dot{E}x_V}{\dot{m}_{CT} PCI} = \frac{6000 + 3938,8}{0,4790 \cdot 47966} = 0,4326$$

Cálculo dos custos. O custo da caldeira de recuperação é determinado por:

$$C_{CR} = 4745 \cdot \left( \frac{h_{saida}}{\log(T_{gent} - T_{gsaida})} \right)^{0,8} + 11820 \cdot \dot{m}_V + 658 \cdot \dot{m}_G$$

$$C_{CR} = 4745 \cdot \left( \frac{2756,8}{\log(550 - 163)} \right)^{0,8} + 11820 \cdot 6 + 658 \cdot 21,1 = 1,338,602 \text{ US\$}$$

$$\dot{E}_{COMB} = \dot{m}_{COMB} \cdot PCI = 0,3803 \cdot 47966 = 18241,5 \text{ kW}$$

Utilizando a tabela A.7 de propriedades de gás ideal

$$T_6 = (550 + 273) = 823 \text{ K}; \quad P_6 = 1 \text{ bar}; \quad h_6 = 847,59 \text{ kJ/kg}; \quad s_6^0 = 7,9159 \text{ kJ/kgK}$$

$$T_4 = 1300 \text{ K (adotado)}; \quad P_4 = 15 \text{ bar (catálogo)}; \quad h_4 = 1395,89 \text{ kJ/kg}; \quad s_4^0 = 8,44046 \text{ kJ/kgK}$$

$$T_7 = (163 + 273) = 436 \text{ K}; \quad P_7 = 1 \text{ bar}; \quad h_7 = 437,87 \text{ kJ/kg}; \quad s_7^0 = 7,2466 \text{ kJ/kgK}$$



$$(e_4 - e_7)^{PH} = (h_4 - h_7) - T_0 \cdot (s_4^0 - s_7^0 - R \ln \frac{p_4}{p_7})$$

$$\dot{m}(e_4 - e_7)^{PH} = 21,1[(1395,89 - 437,87) - 298 \cdot (8,44046 - 7,2466 - 0,287 \ln \frac{15}{1})] = 17.594,4 \text{ kW}$$

$$c_{Ge} = \frac{\dot{E}_{COMB} \cdot P_{COMB}}{\dot{m}_G \cdot (e_4 - e_7)} = \frac{18241,5 \cdot 0,050}{17594,4} = 0,0518 \text{ US\$/kWh}$$

$$(e_4 - e_6)^{PH} = (h_4 - h_6) - T_0 \cdot (s_4^0 - s_6^0 - R \ln \frac{p_4}{p_6})$$

$$\dot{m}(e_4 - e_6)^{PH} = 21,1[(1395,89 - 847,59) - 298 \cdot (8,44046 - 7,9159 - 0,287 \ln \frac{15}{1})] = 13157,7 \text{ kW}$$

$$c_{ELe} = \frac{f \cdot (C_C + C_{CC} + C_{TG})}{H \cdot E_p} + \frac{c_{Ge} \cdot \dot{m}_G \cdot (e_4 - e_6)}{E_p}$$

$$= \frac{0,2505 \cdot 4258800}{8000 \cdot 6000} + \frac{0,0518 \cdot 13157,7}{6000} = 0,0222 + 0,1136 = 0,1358 \text{ US\$/kW}$$

$$(e_6 - e_7)^{PH} = (h_6 - h_7) - T_0 \cdot (s_6^0 - s_7^0 - R \ln \frac{p_6}{p_7})$$

$$\dot{m}(e_6 - e_7)^{PH} = 21,1[(847,59 - 437,87) - 298 \cdot (7,9159 - 7,2466 - 0,287 \ln \frac{1}{1})] = 4436,7 \text{ kW}$$

$$c_{Ve} = \frac{f \cdot \phi \cdot C_{CR}}{H \cdot \dot{E}_V} + \frac{c_{Ge} \cdot \dot{m}_G \cdot (e_6 - e_7) + \dot{E}_{COMB_s} \cdot P_{COMB}}{\dot{E}_V}$$

$$= \frac{0,2505 \cdot 1338602}{8000 \cdot 3938,8} + \frac{0,0518 \cdot 4436,7 + 0,0987 \cdot 47966 \cdot 0,050}{3938,8} = 0,0106 + 0,1185 = 0,1291 \text{ US\$/kWh}$$

$$C_{MANe} = 6000 \cdot 0,1358 + 0,1291 \cdot 3938,8 = 1323,3 \text{ US\$/h}$$

$$GPEL = 1496,67 - 1323,3 = 173,37 \text{ US\$/h} \times 8000 = 1.386.960 \text{ US\$/ano}$$

INVESTIMENTO TOTAL = VP US\$ 5.597.402 (933 US\$/kW)

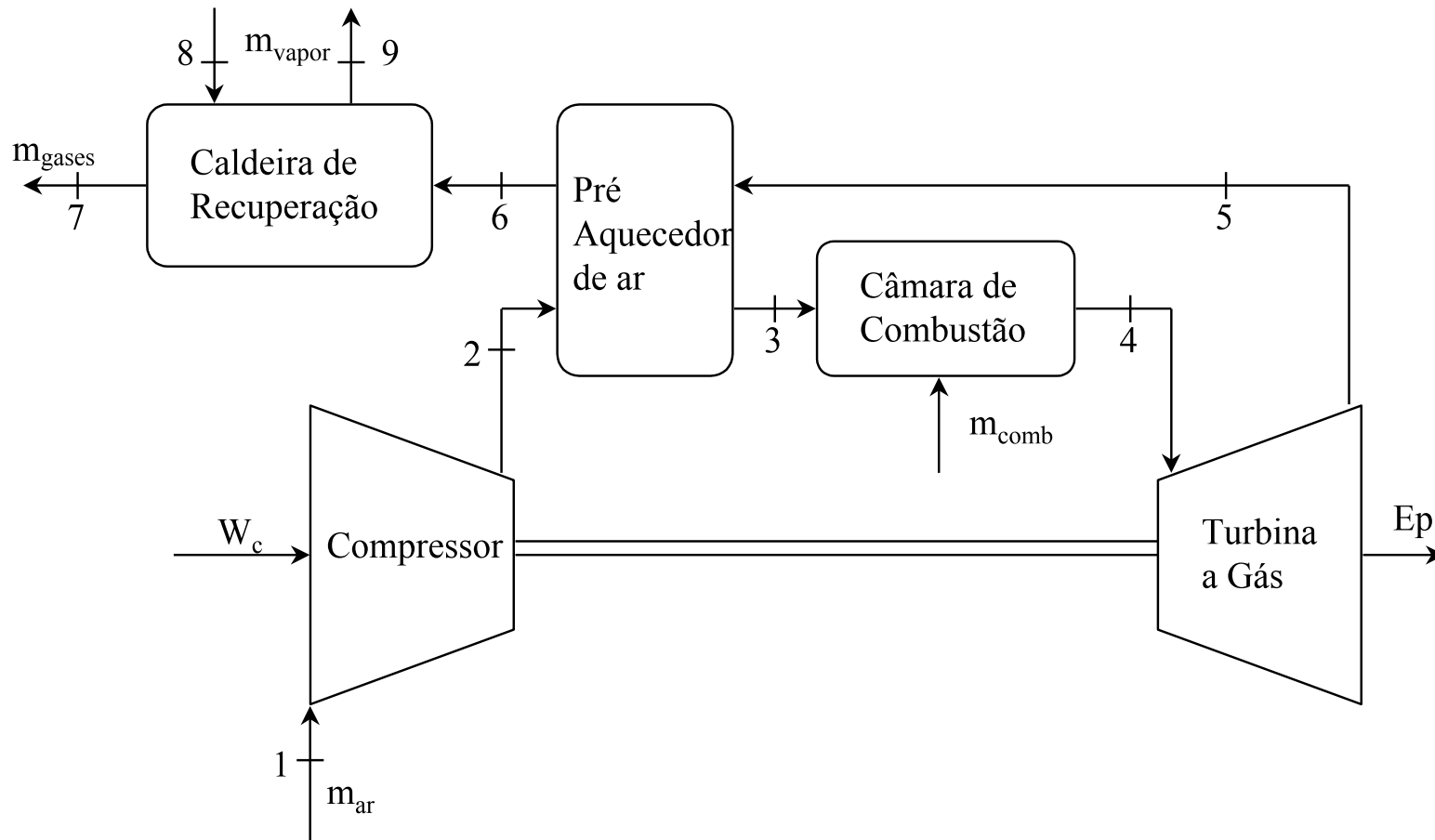
RECEITA = PMT = 1.386.960,00

TAXA DE JUROS = 8% a.a.

PAYBACK = 5 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. = 5.597.402 – 635.467 = 4.961.935. O que resulta em um payback de 4,4 anos.

Exemplo 4 - 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 deste sistema em paridade térmica e o ganho na produção de energia em relação a um sistema convencional.



### Parâmetros Fixos

$\eta_{mtg}$	0,98	$T_o$ [°C]	25,00
$\eta_{ger}$	0,97	$P_o$ [MPa]	0,100
$\eta_P$	0,75	$P_{COMB}$ [US\$/kWh]	0,050
$\eta_{CAL}$	0,90	$P_{EL}$ [US\$/kWh]	0,129
H [h]	8000	PCI [kJ/kg]	47.966
i [%]	8,00	$E_r$ [kW]	6.000
$m_v$ kg/s	6	$P_9$ [MPa] vap sat	0,6
$P_8$ [MPa] Liq sat	0,5		
K [anos]	5		

Solução:

Das tabelas retira-se:

vapor saturado a 600 kPa  $m_v = 6$  kg/s, saída do processo conforme exemplo 1, liq saturado a 500 kPa que em seguida é bombeado para 600 kPa =>

$$h_8 = h_{liqsat\ 500\ kPa} + v\Delta p = 640,21 + 0,001093 (600 - 500) = 640,32\text{kJ / kg} \quad T_8 = 151,86\text{ oC}$$

$$h_9 = h_{vapsat\ 600\ kPa} = 2756,8\text{ kJ / kg} \quad h_{liqsat\ 600\ kPa} = 670,54\text{ kJ / kg} \quad T_{sat=9} = 158,85\text{ oC}$$

$$s_8 = s_{liqsat\ 500\ kPa} = 1,8606\text{ kJ / kgK} \quad s_9 = s_{vapsat\ 600\ kPa} = 6,76\text{ kJ / kgK}$$

Na CR:

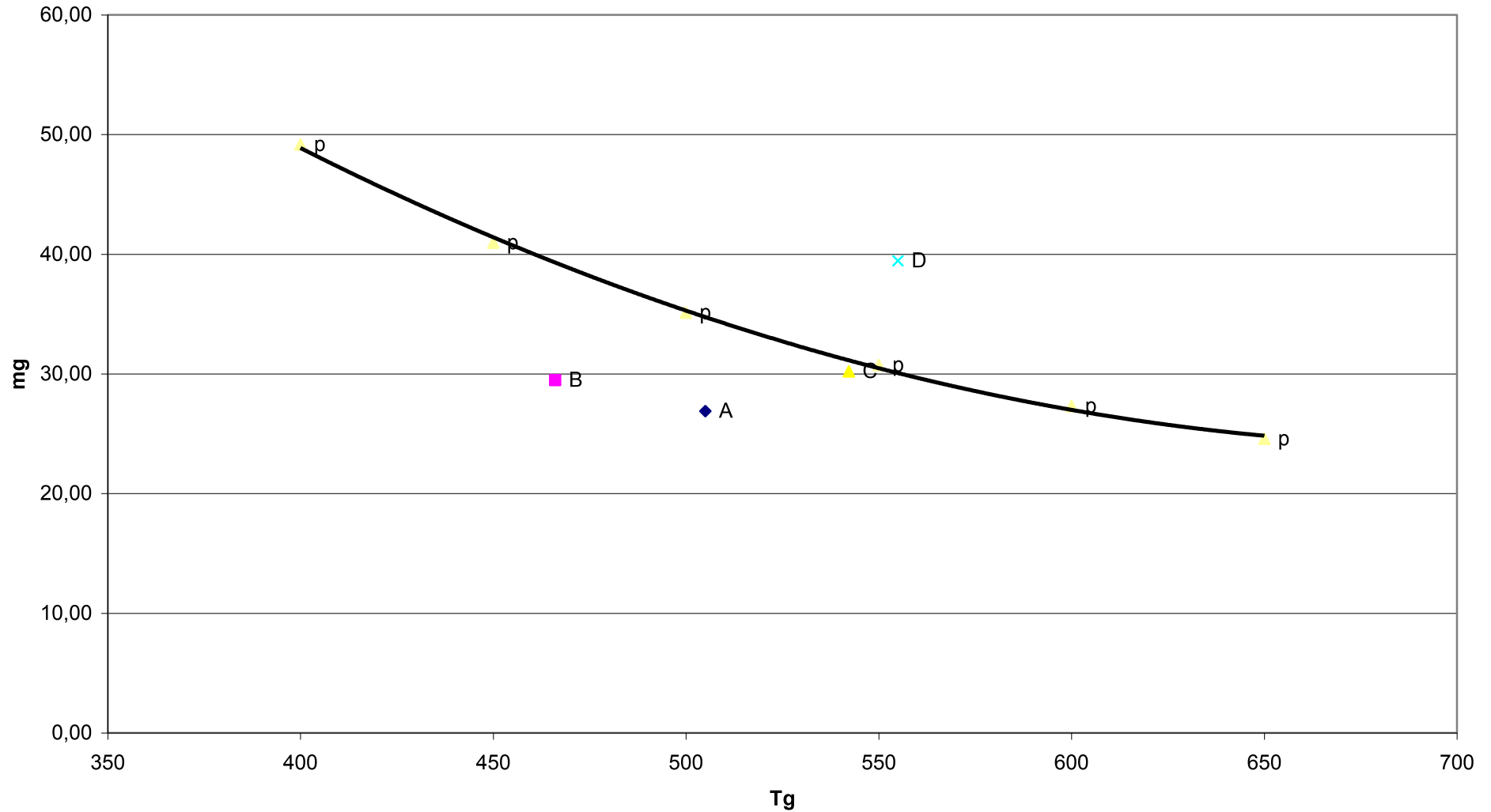
$$\eta_{CR} = \frac{\dot{m}_V (h_{VP} - h_{ent})}{\dot{m}_g \cdot c_{p_g} (T_g - T_{CH})} \Rightarrow 0,9 \cdot \dot{m}_g \cdot 1,148 (T_g - 150) = 6(2756,8 - 640,32)$$

$$\dot{m}_g (T_g - 150) = 12290,8$$

Tg	mg (kg/s)
400	49,16
450	40,97
500	35,12
550	30,73
600	27,31
650	24,58

CG	Modelo	W <sub>liq</sub> kW	HR kJ/kWh	η	Pr	m kg/s	T <sub>G</sub> °C
A	Taurus 70	7965	10505	34,3	17,6	26,88	505
B	SGT 200	6750	11419	31,5	12,3	29,48	466
C	SGT 300	7900	11773	30,6	14	30,20	542
D	SGT 400	12900	10357	34,8	16,9	39,45	555

mg vs Tg



Obs: os pontos abaixo da curva tem maior probabilidade de chegar a paridade térmica com a utilização de um queimador suplementar.

- selecionar um dentre os CG com déficit térmico: A, B, C
- critério: menor HR → maior rendimento térmico

$$HR = \frac{3600}{\eta_T}$$

- pela ordem: A ; B ; C

CG A Taurus 70 -  $T_{pp} = T_{SAT} + \Delta T_{pp}$  (entre 10 e 30°C). Então:  $T_{pp} = 169$  oC

$$\eta_{CR} \cdot \dot{m}_g \cdot cp_g (T_g - T_{pp}) = \dot{m}'_V \cdot (h_{VP} - h_\ell)$$

$$\dot{m}'_V = \frac{\eta_{CR} \cdot \dot{m}_g \cdot cp_g (T_g - T_{pp})}{(h_{VP} - h_\ell)} = \frac{0,9 \cdot 26,88 \cdot 1,148 (505 - 169)}{(2756,8 - 670,54)} = 4,47 \text{ kg/s}$$

$$\eta_{CR} \cdot \dot{m}_g \cdot cp_g (T_g - T_{CH}) = \dot{m}'_V (h_{VP} - h_{ent}) \Rightarrow T_{CH} = 505 - \frac{4,47 (2756,8 - 640,32)}{0,9 \cdot 26,88 \cdot 1,148} = 164 \text{ oC OK}$$

$$Q_g = \dot{m}_g \cdot cp_g (T_g - T) = 26,88 \cdot 1,148 (505 - 164) = 10522,7 \text{ kW}$$

$$Q_a = Q_{25^\circ C} = \dot{m}'_V \cdot (h_{VP} - h_{ent}) = 4,47 (2756,8 - 640,32) = 12698,9 \text{ kW}$$

$$\dot{m}_{c_s} = \frac{\left[ \frac{\dot{m}'_V (h_{VP} - h_{ent})}{\eta_{CR}} - \dot{m}_g \cdot cp_g (T_g - T_{ch}) \right]}{PCI} = \frac{\left[ \frac{\dot{Q}_a}{\eta_{CR}} - \dot{Q}_g \right]}{PCI} = \frac{\left[ \frac{12698,9}{0,9} - 10522,7 \right]}{47966} = 0,0748 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_c = \frac{\dot{W}_{Liq} \cdot HR}{3600 \cdot PCI} = \frac{7965 \cdot 10505}{3600 \cdot 47966} = 0,4846 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_c + \dot{m}_{c_s} = 0,4846 + 0,0748 = 0,5594 \text{ kg/s}$$

$$\dot{E}X_V = \dot{m}_V [(h_{VS} - h_a) - T_0(s_{VS} - s_a)] = 6[(2756,8 - 640,32) - 298(6,76 - 1,8606)] = 3938,8 \text{ kW}$$

$$\eta_{G2aLei} = \frac{\dot{W}_{Liq} + \dot{E}X_V}{\dot{m}_{CT}PCI} = \frac{7965 + 3938,8}{0,5594 \cdot 47966} = 0,4436$$

CG B SGT 200 -  $T_{pp} = T_{SAT} + \Delta T_{pp}$  (entre 10 e 30°C). Então:  $T_{pp} = 169 \text{ oC}$

$$\eta_{CR} \cdot \dot{m}_g \cdot cp_g (T_g - T_{pp}) = \dot{m}'_V \cdot (h_{VP} - h_\ell)$$

$$\dot{m}'_V = \frac{\eta_{CR} \cdot \dot{m}_g \cdot cp_g (T_g - T_{pp})}{(h_{VP} - h_\ell)} = \frac{0,9 \cdot 29,48 \cdot 1,148(466 - 169)}{(2756,8 - 670,54)} = 4,34 \text{ kg/s}$$

$$\eta_{CR} \cdot \dot{m}_g \cdot cp_g (T_g - T_{CH}) = \dot{m}'_V (h_{VP} - h_{ent}) \Rightarrow T_{CH} = 466 - \frac{4,34(2756,8 - 640,32)}{0,9 \cdot 29,48 \cdot 1,148} = 164 \text{ oC OK}$$

$$Q_g = \dot{m}_g \cdot cp_g (T_g - T) = 29,48 \cdot 1,148(466 - 164) = 10220,6 \text{ kW}$$

$$Q_a = Q_{25^\circ C} = \dot{m}_V \cdot (h_{VP} - h_{ent}) = 6(2756,8 - 640,32) = 12698,9 \text{ kW}$$

$$\dot{m}_{c_s} = \frac{\left[ \frac{\dot{m}_V (h_{VP} - h_{ent})}{\eta_{CR}} - \dot{m}_g \cdot cp_g (T_g - T_{ch}) \right]}{PCI} = \frac{\left[ \frac{\dot{Q}_a}{\eta_{CR}} - \dot{Q}_g \right]}{PCI} = \frac{\left[ \frac{12698,9}{0,9} - 10220,6 \right]}{47966} = 0,0811 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_c = \frac{\dot{W}_{Liq} \cdot HR}{3600 \cdot PCI} = \frac{6750 \cdot 11419}{3600 \cdot 47966} = 0,4464 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_c + \dot{m}_{c_s} = 0,4464 + 0,0811 = 0,5275 \text{ kg/s}$$

$$\dot{E}X_V = \dot{m}_V [(h_{VS} - h_a) - T_0(s_{VS} - s_a)] = 6[(2756,8 - 640,32) - 298(6,76 - 1,8606)] = 3938,8 \text{ kW}$$



$$\eta_{G2aLei} = \frac{\dot{W}_{Liq} + \dot{E}x_V}{\dot{m}_{CT} PCI} = \frac{6750 + 3938,8}{0,5275 \cdot 47966} = 0,4224$$

CG C SGT 300 -  $T_{pp} = T_{SAT} + \Delta T_{pp}$  (entre 10 e 30°C). Então:  $T_{pp} = 169$  oC

$$\eta_{CR} \cdot \dot{m}_g \cdot cp_g (T_g - T_{pp}) = \dot{m}'_V \cdot (h_{VP} - h_\ell)$$

$$\dot{m}'_V = \frac{\eta_{CR} \cdot \dot{m}_g \cdot cp_g (T_g - T_{pp})}{(h_{VP} - h_\ell)} = \frac{0,9 \cdot 30,20 \cdot 1,148(542 - 169)}{(2756,8 - 670,54)} = 5,58 \text{ kg/s}$$

$$\eta_{CR} \cdot \dot{m}_g \cdot cp_g (T_g - T_{CH}) = \dot{m}'_V (h_{VP} - h_{ent}) \Rightarrow T_{CH} = 542 - \frac{5,58(2756,8 - 640,32)}{0,9 \cdot 30,20 \cdot 1,148} = 163 \text{ oC OK}$$

$$Q_g = \dot{m}_g \cdot cp_g (T_g - T) = 30,20 \cdot 1,148(542 - 163) = 13139,8 \text{ kW}$$

$$Q_a = Q_{25^\circ C} = \dot{m}'_V \cdot (h_{VP} - h_{ent}) = 6(2756,8 - 640,32) = 12698,9 \text{ kW}$$

$$\dot{m}_{c_s} = \frac{\left[ \frac{\dot{m}'_V (h_{VP} - h_{ent})}{\eta_{CR}} - \dot{m}_g \cdot cp_g (T_g - T_{ch}) \right]}{PCI} = \frac{\left[ \frac{\dot{Q}_a}{\eta_{CR}} - \dot{Q}_g \right]}{PCI} = \frac{\left[ \frac{12698,9}{0,9} - 13139,8 \right]}{47966} = 0,0202 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_c = \frac{\dot{W}_{Liq} \cdot HR}{3600 \cdot PCI} = \frac{7900 \cdot 11773}{3600 \cdot 47966} = 0,5386 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_c + \dot{m}_{c_s} = 0,5386 + 0,0202 = 0,5588 \text{ kg/s}$$

$$\dot{E}x_V = \dot{m}'_V [(h_{VS} - h_a) - T_o(s_{VS} - s_a)] = 6[(2756,8 - 640,32) - 298(6,76 - 1,8606)] = 3938,8 \text{ kW}$$

$$\eta_{G2aLei} = \frac{\dot{W}_{Liq} + \dot{E}x_V}{\dot{m}_{CT} PCI} = \frac{7900 + 3938,8}{0,5588 \cdot 47966} = 0,4417$$

Turbina	Vazão comb CR	Vazão Comb TG	vazão comb total	Wliq	Rendimento
SGT 300	0,0202	0,5386	0,5588	7900	0,4417
SGT 200	0,0811	0,4464	0,5275	6750	0,4224
Taurus 70	0,0748	0,4846	0,5594	7965	0,4436

Do gás Turbine Word Handbook retira-se um custo de:

Turbina	US\$ / kW	Wliq	+ 30% de inst
SGT 300	486	7900	4.991.220
SGT 200	508	6750	4.457.700
Taurus 70	500	7965	5.177.250

SGT 200 e Taurus 70 (queima suplementar semelhante a Taurus 65 -> 0,0987 kg/s)

SGT 300 (praticamente não há queima complementar)

Cálculo dos custos para a SGT 300. O custo da caldeira de recuperação é determinado por:

$$C_{CR} = 4745 \cdot \left( \frac{h_{saida}}{\log(T_{gent} - T_{g_{saida}})} \right)^{0,8} + 11820 \cdot \dot{m}_V + 658 \cdot \dot{m}_G$$

$$C_{CR} = 4745 \cdot \left( \frac{2756,8}{\log(542 - 163)} \right)^{0,8} + 11820 \cdot 6 + 658 \cdot 30,20 = 1,348,118 \text{ US\$}$$

$$\dot{E}_{COMB} = \dot{m}_{COMB} \cdot PCI = 0,5386 \cdot 47966 = 25834,5 \text{ kW}$$

Utilizando a tabela A.7 de propriedades de gás ideal

$$T_6 = (542+273) = 815 \text{ K}; \quad P_6 = 1 \text{ bar}; \quad h_6 = 838,76 \text{ kJ/kg}; \quad s_6^0 = 7,9052 \text{ kJ/kgK}$$

$$T_4 = 1300 \text{ K (adotado)}; \quad P_4 = 13,8 \text{ bar (catálogo)}; \quad h_4 = 1395,89 \text{ kJ/kg}; \quad s_4^0 = 8,44046 \text{ kJ/kgK}$$

$$T_7 = (163+273) = 436 \text{ K}; \quad P_7 = 1 \text{ bar}; \quad h_7 = 437,87 \text{ kJ/kg}; \quad s_7^0 = 7,2466 \text{ kJ/kgK}$$

$$(e_4 - e_7)^{PH} = (h_4 - h_7) - T_0 \cdot (s_4^0 - s_7^0 - R \ln \frac{p_4}{p_7})$$

$$\dot{m}(e_4 - e_7)^{PH} = 30,20[(1395,89 - 437,87) - 298 \cdot (8,44046 - 7,2466 - 0,287 \ln \frac{15}{1})] = 25182,5 \text{ kW}$$

$$c_{Ge} = \frac{\dot{E}_{COMB} \cdot P_{COMB}}{\dot{m}_G \cdot (e_4 - e_7)} = \frac{25834,5 \cdot 0,050}{25182,5} = 0,0513 \text{ US\$ / kWh}$$

$$(e_4 - e_6)^{PH} = (h_4 - h_6) - T_0 \cdot (s_4^0 - s_6^0 - R \ln \frac{p_4}{p_6})$$

$$\dot{m}(e_4 - e_6)^{PH} = 30,20[(1395,89 - 838,76) - 298 \cdot (8,44046 - 7,9052 - 0,287 \ln \frac{13,8}{1})] = 18787,4 \text{ kW}$$

$$c_{ELe} = \frac{f \cdot (C_C + C_{CC} + C_{TG})}{H \cdot Ep} + \frac{c_{Ge} \cdot \dot{m}_G \cdot (e_4 - e_6)}{Ep}$$

$$= \frac{0,2505 \cdot 4991220}{8000 \cdot 7900} + \frac{0,0513 \cdot 18787,4}{7900} = 0,0198 + 0,1220 = 0,1418 \text{ US\$ / kW}$$

$$(e_6 - e_7)^{PH} = (h_6 - h_7) - T_0 \cdot (s_6^0 - s_7^0 - R \ln \frac{p_6}{p_7})$$

$$\dot{m}(e_6 - e_7)^{PH} = 30,20[(838,76 - 437,87) - 298 \cdot (7,9052 - 7,2466 - 0,287 \ln \frac{1}{1})] = 6179,7 \text{ kW}$$

$$c_{ve} = \frac{f \cdot \phi \cdot C_{CR}}{H \cdot \dot{E}_V} + \frac{c_{Ge} \cdot \dot{m}_G \cdot (e_6 - e_7) + \dot{E}_{COMB_S} \cdot P_{COMB}}{\dot{E}_V}$$

$$= \frac{0,2505 \cdot 1348118}{8000 \cdot 3938,8} + \frac{0,0513 \cdot 6179,7 + 0,0202 \cdot 47966 \cdot 0,050}{3938,8} = 0,0107 + 0,0928 = 0,1035 \text{ US\$/kWh}$$

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

$$C_{MANe} = 7900 \cdot 0,1418 - (7900 - 6000) \cdot 0,129 + 0,1035 \cdot 3938,8 = 1282,8 \text{ US\$/h}$$

OU

$$C_{MANe} = 7900 \cdot 0,1418 - (7900 - 6000) \cdot 0,100 + 0,1035 \cdot 3938,8 = 1337,9 \text{ US\$/h}$$

$$GPEL = 1496,67 - 1337,9 = 158,77 \text{ US\$/h} \times 8000 = 1.270.160 \text{ US\$/ano}$$

INVESTIMENTO TOTAL = VP US\$ 6.339.338 (802 US\$/kW)

RECEITA = PMT = 1.270.160,00

TAXA DE JUROS = 8% a.a.

PAYBACK = 6,6 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. = 6.339.338 – 635.467 = 5.703.871. O que resulta em um payback de 5,8 anos.

### Resultado Final

Exemplo 1	TV de contrapressão EP = 2584 kW	GPEL = 57,87 US\$/h	Payback 1 = 11	Payback 2 = 8
Exemplo 2	TV de condensação Ep = 6000 kW	GPEL = -350 US\$/h		
Exemplo 3	TG c/ HRSG Ep = 6000 kW	GPEL = 173,37 US\$/h	Payback 1 = 5	Payback 2 = 4,4
Exemplo 4	TG c/ HRSG Ep = 7900 kW	GPEL = 158,77 US\$/h	Payback 1 = 6,6	Payback 2 = 5,8