

FIGURA 1 – UNIDADE DE COGERAÇÃO

EXERCÍCIO DE TERMOECONOMIA

SOLUÇÃO

NOMENCLATURA

ci – custo específico do elemento i (carvão, vapor de alta, eletricidade etc) (US\$/kJ)
cim- custo específico em base mássica do elemento i (US\$/t)
Caturb – custo anual da turbina (US\$/ano)
Cturb- custo da turbina (US\$/s)
Cacald – custo anual da caldeira (US\$/ano)
Ccald – custo da caldeira (US\$/s)
Ex – fluxo de exergia (kW)
ex – exergia específica (kJ/kg)
fa - fator de amortização do capital investido
FC – fator de carga
fomf – fração do investimento inicial gasto anualmente com despesas fixas de operação e manutenção dos equipamentos
fomv – fração do investimento inicial gasto anualmente com despesas variáveis de operação e manutenção dos equipamentos
H – fluxo de entalpia (kW)
h – entalpia específica (kJ/kg)
Ic – investimento necessário para aquisição e montagem da caldeira (US\$)
It – investimento necessário para aquisição e montagem da turbina (US\$)
m - vazão mássica (kg/s)
n – período de amortização do investimento (anos)
PCS – poder calorífico superior (kJ/kg)
r – taxa anual de juros (%)
To – período de operação anual da unidade (h)
We – potência de eixo da turbina (= potência elétrica gerada) (kW)
 η - rendimento (adimensional)

Subscritos

aa – água de alimentação
ac – ar de combustão
c – carvão
cap – capital
e – eletricidade
en – energético
ex –exergético
va – vapor de alta pressão
vb – vapor de baixa pressão

I. BALANÇO ENERGÉTICO

1. Vazão mássica de combustível (calculada a partir do rendimento energético da caldeira)

$$m_c = \frac{m_{va} \cdot (h_{va} - h_o)}{\eta_{en} \cdot PCS} = \frac{10,1 \cdot (3301 - 84)}{0,83 \cdot 27620} = 1,42 \text{ kg / s}$$

2. Potência térmica relacionada ao combustível

$$H_c = mc.PCS = 1,42.27620 = 39220 \text{ kW}$$

3. Fluxo de entalpia relacionado à água de alimentação da caldeira

$$H_{aa} = m_{aa}.h_o = 10,1.84 = 848 \text{ kW}$$

4. Fluxo de entalpia relacionado ao vapor de alta pressão

$$H_{va} = m_{va}.h_{va} = 10,1.3301 = 33340 \text{ kW}$$

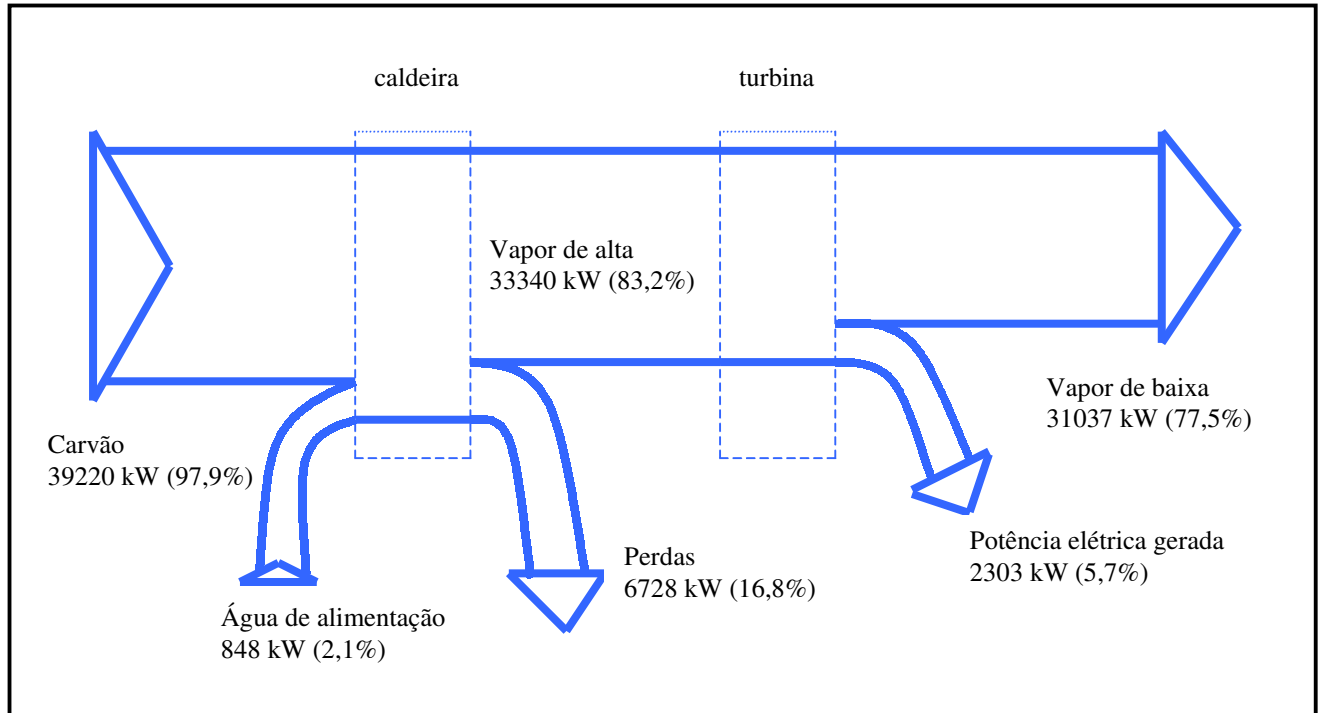
5. Fluxo de entalpia relacionado ao vapor de baixa pressão

$$H_{vb} = m_{vb}.h_{vb} = 10,1.3073 = 31037 \text{ kW}$$

6. Potência desenvolvida pela turbina (= potência elétrica gerada)

$$W_e = m_{va}(h_{va} - h_{vb}) = 10,1.(3301 - 3073) = 2303 \text{ kW}$$

7. Diagrama de Sankey



8. Rendimento energético da planta

$$\eta_{en} = \frac{We + Hvb - Haa}{Hc} = \frac{2303 + 31037 - 848}{39220} = \frac{32492}{39220} = 0,83$$

II – BALANÇO EXERGÉTICO

1. Fluxo de exergia relacionado ao combustível

$$Exc = mc.exc = 1,42.28840 = 40876kW$$

2. Fluxo de exergia relacionado ao vapor de alta pressão

$$Exva = mva.exva = 10,1.1295 = 13080kW$$

3. Exergia destruída na caldeira (calculada a partir do balanço de exergia da caldeira)

$$Exdc = Exc - Exva = 40876 - 13080 = 27796kW$$

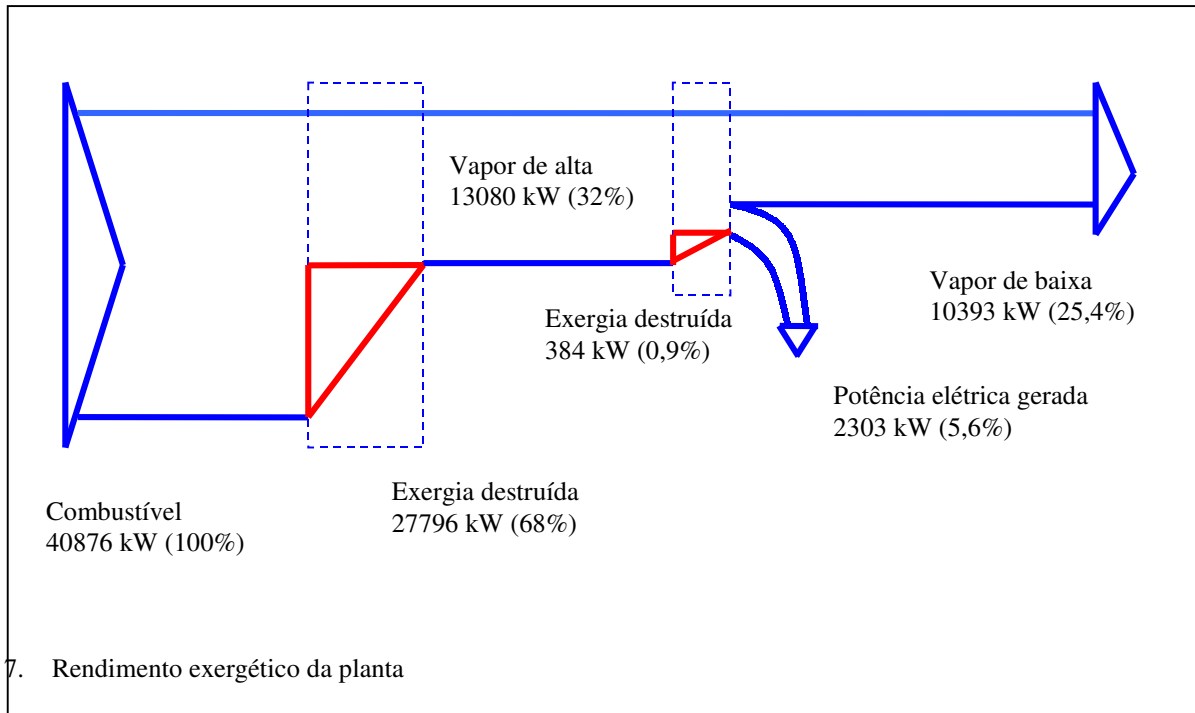
4. Fluxo de exergia relacionado ao vapor de baixa pressão

$$Exvb = mvb.exvb = 10,1.1029 = 10393kW$$

5. Exergia destruída na turbina (calculada a partir do balanço de exergia da turbina)

$$Ex_{dt} = Ex_{va} - Ex_{vb} - We = 13080 - 10393 - 2303 = 384 \text{ kW}$$

6. Diagrama de Grassman



$$\eta_{ex} = \frac{We + Ex_{vb}}{Exc} = \frac{2303 + 10393}{40876} = 0,31$$

III. CUSTO ESPECÍFICO DOS INSUMOS

1. Carvão

$$(cc)_{ex} = \frac{ccm}{exc} = \frac{75}{1000.28840} = 2,6.10^{-6} \text{ US\$ / kJ}$$

$$(cc)_{en} = \frac{ccm}{PCS} = \frac{75}{1000.27620} = 2,7.10^{-6} \text{ US\$ / kJ}$$

2. Água de alimentação e ar de combustão

$$caa = cac = 0$$

IV. CUSTO DOS EQUIPAMENTOS

1. Cálculo do fator de amortização do investimento

$$fa = \frac{r}{1 - (1 + r)^{-n}} = \frac{0,15}{1 - (1 + 0,15)^{-15}} = 0,171$$

2. Caldeira

$$Cacald = Ccap + Comf + FC.Comv = fa.Ic + fomf.Ic + FC.fomv.Ic = Ic.(fa + fomf + FC.fomv) = \\ = 960000.(0,171 + 0,09 + 0,75.0,01) = 257760US\$/ano$$

$$Ccald = \frac{Cacald}{To.3600} = \frac{257760}{6000.3600} = 0,0119US\$/s$$

3. Turbina

$$Caturb = Ccap + Comf + FC.Comv = fa.It + fomf.It + FC.fomv.It = It.(fa + fomf + FC.fomv) = \\ = 480000.(0,171 + 0,09 + 0,75.0,01) = 128880US\$/ano$$

$$Cturb = \frac{Caturb}{To.3600} = \frac{128880}{6000.3600} = 0,0060US\$/s$$

V. CUSTO DOS PRODUTOS

1. Custo do vapor de alta (determinado através do balanço de custos da caldeira)

1.1. Base exergética

$$cva = cc \frac{Exc}{Exva} + \frac{Ccald}{FC.Exva} = 2,6.10^{-6} \frac{40876}{13080} + \frac{0,0119}{0,75.13080} = 9,3.10^{-6} \text{ US\$/kJ}$$

$$cvam = exva.cva = 1295 . 9,3.10^{-6} = 12,04 \text{ US\$/t}$$

1.2. Base energética

$$cva' = cc \frac{Hc}{Hva} + \frac{Ccald}{FCHva} = 2,7.10^{-6} \frac{39220}{33340} + \frac{0,0119}{0,75.33340} = 3,65.10^{-6} \text{ US\$/kJ}$$

$$cvam' = hva.cva' = 3301 . 3,65.10^{-6} = 12,05 \text{ US\$/t}$$

2. Custos do vapor de baixa e da eletricidade (determinados através do balanço de custos da turbina e utilizando um dos critérios de partição de custos)

$$cva.Exva + Cturb = cvb.Exvb + ce.We$$

- 2.1. Critério da igualdade ($cvb=ce$)

- 2.1.1. Base exergetica

$$ce = cva \frac{Exva}{(We + Exvb)} + \frac{Cturb}{FC.(We + Exvb)} = 9,3 \cdot 10^{-6} \frac{13080}{(2303 + 10393)} + \frac{0,0060}{0,75(2303 + 10393)} =$$

$$= 10,21 \cdot 10^{-6} \text{ US\$/kJ} = 36,76 \text{ US\$/MWh}$$

$$cvb = ce$$

$$cvbm = cvb \cdot exvb = 10,21 \cdot 10^{-6} \cdot 1029 = 10,51 \text{ US\$/t}$$

- 2.1.2. Base energética

$$ce' = cva' \frac{Hva}{(We + Hvb)} + \frac{Cturb}{FC(We + Hvb)} = 3,65 \cdot 10^{-6} \frac{33340}{(2303 + 31073)} + \frac{0,0060}{0,75(2303 + 31073)} =$$

$$= 3,89 \cdot 10^{-6} \text{ US\$/kJ} = 14,00 \text{ US\$/MWh}$$

$$cvb' = ce'$$

$$cvbm' = cvb' \cdot hvb = 3,89 \cdot 10^{-6} \cdot 3073 = 11,95 \text{ US\$/t}$$

- 2.2. Critério da extração ($cvb=cva$)

- 2.2.1. Base exergetica

$$cvb = cva$$

$$cvbm = cvb \cdot exvb = 9,30 \cdot 10^{-6} \cdot 1029 = 9,57 \text{ US\$/t}$$

$$ce = cva \frac{(Exva - Exvb)}{We} + \frac{Cturb}{FC.We}$$

$$ce = 9,3 \cdot 10^{-6} \frac{(13080 - 10393)}{2303} + \frac{0,0060}{0,75 \cdot 2303}$$

$$ce = 14,32 \cdot 10^{-6} \text{ US\$/kJ} = 51,57 \text{ US\$/MWh}$$

- 2.2.2. Base energética

$$cvb' = cv'$$

$$cvbm' = cvb' hvb = 3,65 \cdot 10^{-6} \cdot 3073 = 11,22 \text{ US\$/t}$$

$$ce' = cva' \frac{(Hva - Hvb)}{We} + \frac{Cturb}{FC \cdot We}$$

$$ce' = 3,65 \cdot 10^{-6} \frac{(33340 - 31037)}{2303} + \frac{0,0060}{0,75 \cdot 2303}$$

$$ce' = 7,12 \cdot 10^{-6} \text{ US\$/kJ}$$

$$ce' = 7,12 \cdot 10^{-6} \cdot 1000 \cdot 3600 = 25,65 \text{ US\$/MWh}$$

2.3. Critério que considera o vapor como subproduto

O custo específico da energia elétrica é obtido a partir da melhor alternativa disponível para sua obtenção direta. Neste caso é admitido que a melhor opção seja comprar da rede por 12,5E-6 US\$/kJ (45US\$/MWh).

2.3.1. Base exergetica

$$cvb = \frac{cva \text{ Exva} - ceWe}{Exvb} + \frac{Cturb}{FC \cdot Exvb}$$

$$cvb = \frac{9,3 \cdot 10^{-6} \cdot 13080 - 12,5 \cdot 10^{-6} \cdot 2303}{10393} + \frac{0,0060}{0,75 \cdot 10393}$$

$$cvb = 9,70 \cdot 10^{-6} \text{ US\$/kJ}$$

$$cvbm = cvb \cdot exvb = 9,70 \cdot 10^{-6} \cdot 1029 = 9,98 \text{ US\$/t}$$

2.3.2. Base energética

$$cvb' = \frac{cva' \text{ Hva} - ce' We}{Hvb} + \frac{Cturb}{FC \text{ Hvb}}$$

$$cvb' = \frac{3,65 \cdot 10^{-6} \cdot 33340 - 12,5 \cdot 10^{-6} \cdot 2303}{31037} + \frac{0,0060}{0,75 \cdot 31037} = 3,2 \cdot 10^{-6} \text{ US\$/kJ}$$

$$cvbm' = cvb' \cdot hvb = 3,25 \cdot 10^{-6} \cdot 3073 = 9,99 \text{ US\$/t}$$

2.4. Critério que considera a eletricidade como subproduto

O cálculo do custo específico do vapor é feito a partir da melhor alternativa possível disponível para obtê-lo. Neste caso é admitido que a melhor opção seja gerar o vapor de baixa pressão em uma caldeira que apresenta rendimento exergetico igual a 0,28 e apresente o mesmo custo que o indicado no exercício.

2.4.1. Base exergetica

$$cvb = \frac{cc}{\eta_{ex}} + \frac{C_{cald}}{FC \cdot Exvb}$$

$$cvb = \frac{2,6 \cdot 10^{-6}}{0,28} + \frac{0,0119}{FC \cdot 10393} = 10,81 \cdot 10^{-6} \text{ US\$/kJ}$$

$$cvbm = cvb \cdot exvb = 10,81 \cdot 10^{-6} \cdot 1029 = 11,13 \text{ US\$/t}$$

$$ce = \frac{cva \cdot Exva - cvb \cdot Exvb}{We} + \frac{C_{turb}}{FC \cdot We}$$

$$ce = \frac{9,3 \cdot 10^{-6} \cdot 13080 - 10,81 \cdot 10^{-6} \cdot 10393}{2303} + \frac{0,0060}{0,75 \cdot 2303}$$

$$ce = 7,51 \cdot 10^{-6} \text{ US\$/kJ} = 27,04 \text{ US\$/MWh}$$

2.4.2. Base energética

$$cvbm' = cvbm$$

$$ce' = ce$$

3. Comparação entre os valores obtidos através dos quatro critérios

3.1. Base exergetica

Custos	Igualdade	Extração	Vapor como subproduto	Eletricidade como subproduto
cvam (US\$/t)	12,04	12,04	12,04	12,04
cvbm (US\$/t)	10,51	9,57	9,98	11,13
ce(US\$/MWh)	36,76	51,57	45,00	27,04

3.2. Base energética

Custos	Igualdade	Extração	Vapor como subproduto	Eletricidade como subproduto
cvam' (US\$/t)	12,05	12,05	12,05	12,05
cvbm' (US\$/t)	11,95	11,22	9,99	11,13
ce'(US\$/MWh)	14,00	25,65	45,00	27,04