

GRUPO II

GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS - GPT

ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO TERMoeCONÔMICA DE UMA USINA DE FORÇA - ESTUDO DE CASO: USINA TERMELÉTRICA DE FIGUEIRA.

Nome Autor Responsável: Vilmar Graciano.

NOME DA EMPRESA: Universidade Federal do Paraná – UFPR (Aluno).

RESUMO

Este trabalho apresenta a análise energética e exergética e a otimização termoeconômica, da usina termelétrica de Figueira, estado do Paraná. A análise energética é realizada pela aplicação do princípio de conservação da massa e do primeiro princípio da Termodinâmica e a análise exergética pelo segundo princípio da Termodinâmica. A análise e a otimização termoeconômicas pela metodologia do professor George Tsatsaronis (TU Berlin) baseada em alguns parâmetros chave que são, a eficiência exergética, a soma dos custos de operação e manutenção com os custos da exergia destruída, a diferença relativa de custo, o fator termoeconômico e o custo da energia gerada.

PALAVRAS-CHAVE:

Usina termelétrica, análise e otimização termoeconômica.

1.0 - INTRODUÇÃO

A usina térmica de Figueira no Paraná, é alimentada por carvão mineral oriundo de uma mina próxima, com dois circuitos de geração ciclo térmico de Rankine, usando água como fluido de trabalho conforme figura 1:

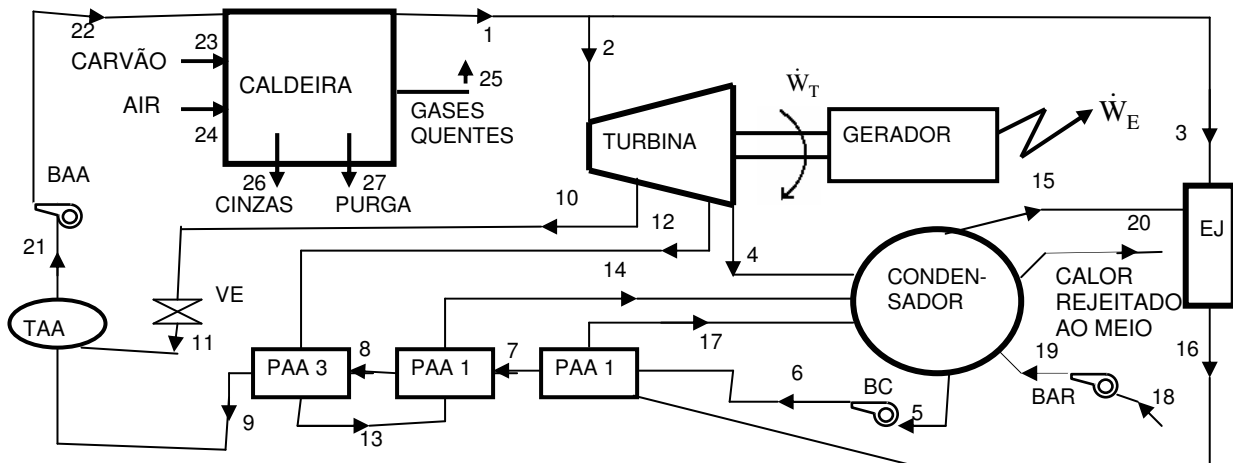


Figura 1 – Esquema funcional dos circuitos de geração da usina de Figueira

A usina tem 2 circuitos de geração semelhantes. Os pontos de 1 a 25 se referem ao circuito de geração 1 e os pontos de 26 a 45 ao circuito de geração 2. Além dos componentes nas figuras 1 e 2, prevalece a seguinte nomenclatura: BAA – bomba de água de alimentação; BAR – bomba de água de refrigeração; BC – bomba de

condensado; EJ – Ejetor; PAA – pré aquecedor de água de alimentação; TAA – tanque de água de alimentação; VE – válvula de expansão; \dot{W}_T - potência da turbina; \dot{W}_E - potência do gerador.

2.0 - DESENVOLVIMENTO

2.1 Análise Energética

A análise energética foi desenvolvida aplicando o princípio de conservação da massa e o primeiro princípio da Termodinâmica, para o sistema trabalhando em regime permanente, conforme Moran (2000):

- Princípio de conservação da massa:

$$\sum_i \dot{m}_i = \sum_e \dot{m}_e \quad (1)$$

\dot{m}_i - Fluxo de massa [kg/s]; e – referido “saída”; i – referido como “entrada”.

- Primeiro princípio da Termodinâmica:

$$\dot{Q}_{cv} + \dot{W}_{cv} + \sum_i \dot{m}_i h_i - \sum_e \dot{m}_e h_e = 0 \quad (2)$$

\dot{Q}_{cv} - Interações de calor entre o meio e o sistema [kW]; \dot{W}_{cv} - Interações de trabalho entre o sistema e o meio [kW]; h – entalpia específica [kJ/kg].

Os valores dos parâmetros funcionais foram medidos nos pontos dos dois circuitos de geração no local da usina (pressão e temperatura). Pela aplicação das equações (1) e (2), obteve-se a análise energética dos dois circuitos de geração, cujos resultados estão na tabela 1 abaixo:

Tabela 1 – Valores dos parâmetros obtidos pela análise energética

| Fluxo | \dot{m} [kg/s] | t [C] | p [MPa] | h [kJ/kg] |
|-------|------------------|--------|---------|-----------|
| 1 | 10,0 | 435,0 | 3,818 | 3298,0 |
| 2 | 9,9802 | 424,0 | 3,72 | 3274,0 |
| 3 | 0,0198 | 425,0 | 3,57 | 3278,0 |
| 4 | 8,6223 | 51,0 | 0,01298 | 2445,0 |
| 5 | 9,028 | 47,5 | 0,0109 | 198,9 |
| 6 | 9,028 | 47,6 | 0,9761 | 200,29 |
| 7 | 9,028 | 54,32 | 0,8624 | 227,7 |
| 8 | 9,028 | 57,81 | 0,6351 | 242,4 |
| 9 | 9,028 | 80,01 | 0,4077 | 335,7 |
| 10 | 0,972 | 245,0 | 0,55 | 2948,0 |
| 11 | 0,972 | 234,0 | 0,2313 | 2937,0 |
| 12 | 10,0 | 130,0 | 0,40 | 546,2 |
| 13 | 10,0 | 130,5 | 5,19 | 553,5 |
| 14 | 1,637 | 25 | 0,1013 | 52,0 |
| 15 | 12,77 | 25,0 | 0,1013 | 298,20 |
| 16 | 0,425 | 1290,0 | 0,1013 | 1525,2 |
| 17 | 0,3 | 251,8 | 0,1013 | 1087,0 |
| 18 | 14,11 | 178,0 | 0,1013 | 213,88 |
| 19 | 0,3859 | 145,0 | 0,17 | 2760,0 |
| 20 | 0,3859 | 71,4 | 0,03312 | 577,1 |
| 21 | 0,3859 | 56,0 | 0,0165 | 234,8 |
| 22 | 0,1 | 120,1 | 0,023 | 2724,0 |
| 23 | 0,1 | 59,4 | 0,0213 | 249,1 |
| 24 | 0,0802 | 47,5 | 0,0109 | 2587,0 |
| 25 | 510,62 | 27,0 | 0,1013 | 112,4 |
| 26 | 510,62 | 27,1 | 0,35 | 112,8 |
| 27 | 510,62 | 36,0 | 0,1013 | 150,29 |
| 28 | 9,528 | 432,0 | 3,818 | 3291,0 |
| 29 | 9,528 | 422,0 | 3,72 | 3270,0 |
| 30 | 8,028 | 62,0 | 0,02186 | 2425,0 |
| 31 | 8,028 | 58,0 | 0,01817 | 243,2 |
| 32 | 8,028 | 58,5 | 0,9565 | 244,6 |
| 33 | 1,5 | 197,0 | 0,46 | 2851 |
| 34 | 9,528 | 130,0 | 0,40 | 546,2 |
| 35 | 9,528 | 130,5 | 5,631 | 554,2 |
| 36 | 1,717 | 25,0 | 0,1013 | 52,0 |
| 37 | 13,39 | 25,0 | 0,1013 | 298,20 |
| 38 | 0,286 | 251,8 | 0,1013 | 1087,0 |
| 39 | 0,446 | 1290,0 | 0,1013 | 1345,2 |
| 40 | 14,81 | 178 | 0,1013 | 213,88 |
| 41 | 419,08 | 27,0 | 0,1013 | 112,4 |
| 42 | 419,08 | 27,1 | 0,35 | 112,8 |
| 43 | 419,08 | 37,0 | 0,1013 | 154,6 |
| 44 | 0,068 | 58,0 | 0,1817 | 243,2 |
| 45 | 0,068 | 58,2 | 0,1013 | 244,00 |
| - | - | - | - | - |

2.2 Análise Exergética

A análise exergética foi realizada aplicando as seguintes equações, obtidas em Moran (2000):

- Exergia física específica:

$$e^{ph} = (u - u_0) + p_0(v - v_0) - T_0(s - s_0) \quad (3)$$

e^{ph} – exergia física específica [kJ/kg]; u – energia interna específica [kJ/kg]; p_0 – pressão atmosférica nas condições de referência [MPa]; v – volume específico [m³/kg]; v_0 volume específico nas condições de referência m³/kg; s – entropia específica [kJ/kgK]; s_0 – entropia específica nas condições de referência [kJ/kgK]; T_0 – temperatura de referência [K]; condições de referência: $T_0 = 25$ e $p_0 = 0,1013$ MPa

A exergia química, e^{ch} , foi obtida por tabela, em Kotas (1985).

- Exergia específica de fluxo:

$$e_f = e^{ph} + e^{ch} \quad (4)$$

e_f – exergia específica de fluxo [kJ/kg]; h_0 – entalpia específica nas condições de referência [kJ/kg].

- Interações na forma de fluxo de trabalho e calor (respectivamente):

$$\dot{E}_w = \dot{W} \quad e \quad \dot{E}_Q = \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j \quad (5)$$

\dot{E}_w - Interação de exergia entre o sistema e o meio na forma de trabalho [kW].; \dot{E}_Q - Interação entre o sistema e o meio na forma de calor [kW]; T_j – Temperatura absoluta da fronteira do sistema [K].

De acordo com Bejan et al (1996) a exergia química de um combustível, pode ser representada pelo seu poder calorífico superior (PCS). O poder calorífico superior do carvão de Figueira é 20400 KJ/Kg. Aplicando as equações (3) e (4), se obteve a análise exergética dos circuitos de geração, a qual está mostrada na tabela 2 abaixo:

Tabela 2 – Valores dos fluxos de exergia nos circuitos de geração da usina de Figueira

| Fluxo | e^{ph} [kJ/kg] | e^{ch} [kJ/kg] | e_f [kJ/kg] | Fluxo | e^{ph} [kJ/kg] | e^{ch} [kJ/kg] | e_f [kJ/kg] |
|-------|------------------|------------------|---------------|-------|------------------|------------------|---------------|
| 1 | 1242.1 | 2.493 | 1244.6 | 24 | 0.0 | 5.39 | 5.39 |
| 2 | 1224.6 | 2.493 | 1227.1 | 25 | 155.89 | 140.12 | 296.01 |
| 3 | 1221.4 | 2.493 | 1223.9 | 26 | 800.75 | 724.45 | 1525.2 |
| 4 | 184.85 | 2.493 | 187.34 | 27 | 168.23 | 2.493 | 170.72 |
| 5 | 3.41 | 2.493 | 5.903 | 28 | 1238.06 | 2.493 | 1240.56 |
| 6 | 3.56 | 2.493 | 6.053 | 29 | 1222.73 | 2.493 | 1225.22 |
| 7 | 5.73 | 2.493 | 8.226 | 30 | 248.33 | 2.493 | 250.82 |
| 8 | 7.14 | 2.493 | 9.628 | 31 | 7.22 | 2.493 | 9.71 |
| 9 | 19.19 | 2.493 | 21.682 | 32 | 7.35 | 2.493 | 9.83 |
| 10 | 805.2 | 2.493 | 807.52 | 33 | 842.61 | 2.493 | 845.10 |
| 11 | 682.51 | 2.493 | 685.00 | 34 | 0.06226 | 2.493 | 2.555 |
| 12 | 577.93 | 2.493 | 580.46 | 35 | 0.04494 | 2.493 | 2.568 |
| 13 | 291.26 | 2.493 | 293.75 | 36 | 1.028 | 2.493 | 3.52 |
| 14 | 6.42 | 2.493 | 8.915 | 37 | 63.62 | 2.493 | 66.11 |
| 15 | 170.92 | 2.493 | 173.41 | 38 | 65.72 | 23.80 | 68.21 |
| 16 | 295.7 | 2.493 | 298.19 | 39 | - | 20642.0 | 20642.0 |
| 17 | 7.81 | 2.493 | 10.30 | 40 | 0.0 | 5.39 | 5.39 |
| 18 | 0.0622 | 2.493 | 2.555 | 41 | 155.89 | 140.12 | 296.01 |
| 19 | 0.0449 | 2.493 | 2.568 | 42 | 168.23 | 2.493 | 170.42 |
| 20 | 1.012 | 2.493 | 3.505 | 43 | 800.75 | 724.45 | 1525.2 |
| 21 | 63.62 | 2.493 | 66.11 | 44 | 7.22 | 2.493 | 9.71 |
| 22 | 65.55 | 2.493 | 68.05 | 45 | 7.24 | 2.493 | 9.733 |
| 23 | 0.0 | 20642.0 | 20642.0 | - | - | - | - |

Aplicando as equações (5) nos dados de pressão e temperatura medidos diretamente no local da usina, se obtém os valores dos fluxos exergéticos de calor e trabalho nos componentes principais dos circuitos de geração

da usina de Figueira. Os resultados estão nas tabelas 3 e 4:

Tabela 3. Valores das interações dos fluxos de calor e trabalho no circuito de geração 1

| Componente | \dot{W}_k [kW] | \dot{E}_Q [kW] |
|---------------|------------------|------------------|
| CALDEIRA 1 | - 533.6 | - 49.96 |
| TURBINA 1 | 7655.00 | 0.0- |
| BAA 1 | - 151.0 | 0.0 |
| BAR 1 | - 294.4 | 0.0 |
| BC 1 | - 29.44 | 0.0 |
| GERADOR 1 | 7402.0 | - 23.85 |
| CONDENSADOR 1 | 0.0 | - 496.11 |
| TAA 1 | 0.0 | 65.98 |
| CIRCUITO 1 | 6493.58 | -17422.77 |

Tabela 4. Valores das interações dos fluxos de calor e trabalho no circuito de geração 2

| Componente | \dot{W}_k [kW] | \dot{E}_Q [kW] |
|---------------|------------------|------------------|
| CALDEIRA 2 | - 533.6 | 52.4 |
| TURBINA 2 | 7402.0 | 0.0 |
| BAA 2 | -151.0 | 0.0 |
| BAR 2 | - 257.6 | 0.0 |
| BC 2 | 22.08 | 0.0 |
| GERADOR 2 | 0.0 | -23.0 |
| CONDENSADOR 2 | 0.0 | - 398.96 |
| TAA 2 | 0.0 | 184.78 |
| CIRCUITO 2 | 6274.28 | -17640.2 |

2.3 Termoeconomia

A análise termoeconômica é uma contabilidade de custos, onde para se gerar um produto o custo deste produto tem que compensar a soma de custos de insumo para produzir, e custos financeiros de aquisição e O&M:

$$\dot{C}_{p,k} = \dot{C}_{f,k} + \dot{Z}_k^{AQ} + \dot{Z}_k^{O\&M} \quad (6)$$

AQ – aquisição; p – referente a “produto” f – referente a “insumo” \dot{C} - fluxo de custos [R\$/s]; O%M – operação e manutenção; \dot{Z} - fluxo de custos de aquisição e O&M [R\$/s].

$$\dot{Z}_k = \dot{Z}_k^{CI} + \dot{Z}_k^{O\&M} \quad (7)$$

Para cada fluxo de massa, trabalho e calor, pode ser associar um custo exerético unitário:

- Fluxo de massa:

$$\dot{C}_i = c_i \dot{E}_i = c_i (\dot{m}_i \dot{e}_{f,i}) \quad \text{ou} \quad \dot{C}_e = c_e \dot{E}_e = c_e (\dot{m}_e \dot{e}_{f,e}) \quad (8)$$

$c_{i,e}$ - Custo exerético unitário na entrada ou saída do sistema [R\$/kJ].

- Trabalho e calor (respectivamente):

$$\dot{C}_w = c_w \dot{E}_w \quad \text{e} \quad \dot{C}_Q = c_Q \dot{E}_Q \quad (9)$$

Inserindo as equações (8) e (9) na equação (6) resulta na equação usual do balanço de custos:

$$\sum_e \dot{C}_{e,k} + \dot{C}_{w,k} = \dot{C}_{Q,k} + \sum_i \dot{C}_{i,k} + \dot{Z}_k \quad (10)$$

O cálculo da exergia destruída internamente no sistema (componentes), da exergia perdida para o meio foi realizado pelas equações abaixo, obtidas de Bejan et al (1996):

- Balanço de exergia:

$$\sum (1 - \frac{T_0}{T_j}) \dot{Q}_j - \dot{W}_{cv} + \sum_i \dot{m}_i e_{f,i} - \sum_e \dot{m}_e e_{f,e} - \dot{E}_d = 0 \quad (11)$$

\dot{E}_d - Fluxo de exergia destruída (dentro do sistema) [kW]

- Balanço de entropia:

$$\sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \sum_i \dot{m}_i s_i - \sum_e \dot{m}_e s_e + \dot{S}_g = 0, \quad \text{com} \quad \dot{S}_g = T_0 \dot{E}_d \quad (12)$$

\dot{S}_g - Entropia gerada internamente no sistema [kJ/kg k].

Segundo Kreith (2000), Eq. (11) pode ser expressa da seguinte forma:

$$\dot{E}_{f,k} = \dot{E}_{p,k} + \dot{E}_{l,k} + \dot{E}_{d,k} \quad (13)$$

k – Referente ao componente “k”.

A exergia destruída e a exergia perdida para o meio, pode-se associar um custo unitário da seguinte forma:

$$c_{d,k} = \frac{\dot{C}_{d,k}}{\dot{E}_{d,k}} \quad \text{ou} \quad c_{l,k} = \frac{\dot{C}_{l,k}}{\dot{E}_{l,k}} \quad (14)$$

2.3 A Metodologia do Professor George Tsatsaronis

A metodologia do professor Tsatsaronis é baseada nos valores de parâmetros termoeconômicos, cuja definição, símbolo e respectiva equação são como segue:

- Taxa de exergia destruída : $y_{d,k} = \frac{\dot{E}_{d,k}}{\dot{E}_{f,tot}} \quad (15)$

- Taxa de exergia perdida: $y_{l,k} = \frac{\dot{E}_{l,k}}{\dot{E}_{f,tot}} \quad (16)$

- Eficiência exergética: $\epsilon_k = \frac{\dot{E}_{p,k}}{\dot{E}_{f,k}} = 1 - \frac{(\dot{E}_{d,k} + \dot{E}_{l,k})}{\dot{E}_{l,k}} \quad (17)$

- Diferença relativa de custo: $r_k = \frac{1 - \epsilon_k}{\epsilon_k} + \frac{\dot{Z}_k^{CI} + \dot{Z}_k^{OM}}{c_{f,k} \dot{E}_{p,k}} \quad (18)$

- Fator termoeconômico: $f_k = \frac{\dot{Z}_k}{\dot{Z}_k + c_{f,k} (\dot{E}_{d,k} + \dot{E}_{l,k})} \quad (19)$

Os critérios para efetuar a avaliação pela metodologia do professor Tsatsaronis são os seguintes:

1. Colocar os componentes em ordem decrescente de custos, segundo a soma ($\dot{Z}_k + \dot{C}_{d,k}$);
2. Dispensar especial atenção aos componentes em que a soma do item anterior for elevada;
3. Dispensar especial atenção ao componente com um valor elevado da diferença relativa de custo, especialmente se o valor da soma ($\dot{Z}_k + \dot{C}_{d,k}$) for também elevada;
4. Se um componente tem um elevado valor para a diferença relativa de custo procurar melhorar a eficiência exergética do componente as expensas de investimento de capital;
5. Considerar em especial, as expensas de investimento de capital, melhorar a eficiência exergética de componentes que tem uma eficiência exergética baixa, valor elevado da razão de destruição de exergia e valor elevado da razão de perda de exergia;
6. Usar o fator termoeconômico para identificar os principais componentes onde é maior a demanda de capital (investimento total de capital, custos de operação e manutenção e custo de destruição de exergia):
 - 6.1 Se f_k for alto, investigar se não é vantajoso, reduzir o capital às expensas da eficiência;
 - 6.2 Se f_k for baixo, melhorar a eficiência às expensas de investimento de capital.

3.0 - APLICAÇÃO DA METODOLOGIA A USINA TERMOELÉTRICA DE FIGUEIRA

Segundo Horlock (2000), os custos de aquisição, O&M e custos dos fluxos exergéticos, devem ser uniformizados para aplicações econômicas, aplicando um fator de correção de capital: obtido pela seguinte equação abaixo:

$$CRP = \frac{i(1+i)^n}{(1+ir)^n - 1} \quad (20)$$

CRP – fator de recuperação de capital; ir = taxa de juros sobre o período (calculada para 15 anos, valor de 4,5 % aa de acordo com MME (2007), dando a CRP = 9.38 %)

O custo uniforme para os circuitos de geração 1 e 2 da usina de Figueira estão nas tabelas 5 e 6 abaixo:

Tabela 5 – Custos uniformes do circuito 1

| Componente | \dot{Z}_k [R\$/S] |
|-----------------|---------------------|
| CALDEIRA 1 | 0.046978 |
| TUB. DE VAPOR 1 | 0.0000071 |
| TUR 1 | 0.016474 |
| GER1 | 0.002957 |
| COND. 1 | 0.0024524 |
| BC 1 | 0.000281 |
| PAA 1 | 0.0001513 |
| PAA 2 | 0.0002739 |
| PAA 3 | 0.0004254 |
| TAA 1 | 0.0006429 |
| BAA 1 | 0.000649 |
| BAR 1 | 0.0007933 |
| EJ | 0.0000071 |
| TOTAL | 0.072092 |

Tabela 6 – Custos uniformes do circuito 2

| Componente | \dot{Z}_k [R\$/S] |
|----------------|---------------------|
| CALDEIRA2 | 0.064519 |
| TUB.DE VAPOR 2 | 0.00000948 |
| TUR 2 | 0.020708 |
| GER 2 | 0.004026 |
| COND 2 | 0.003548 |
| BC1 2 | 0.0003836 |
| Não tem | - |
| Não tem | - |
| Não tem | - |
| TAA 2 | 0.0007673 |
| BAA 2 | 0.0008632 |
| BAR 2 | 0.001054 |
| BV | 0.0000013 |
| TOTAL | 0.09588 |

Aplicando as equações (2) e (6) a (19), em cada componente e em cada circuito de geração da usina de Figueira, se obtém os valores dos parâmetros de avaliação termoeconômica conforme tabela 7 abaixo, com custos de geração obtidos de R\$ 223.83/MWh para o circuito de geração 1 e de R\$ 255.89/MWh para o circuito 2.

Tabela 7 - Parâmetros de avaliação termoeconômica do circuito de geração 1 da usina de Figueira

| COMP | $\dot{E}_{l,k}$ [kW] | \dot{W}_k [kW] | $\dot{E}_{d,k}$ [kW] | $c_{f,k}$ [R\$/kJ] | $\dot{C}_{d,k}$ [R\$/s] | $\dot{E}_{f,k}$ [kW] | $\dot{E}_{p,k}$ [kW] | ϵ_k [%] | $y_{d,k}$ [%] | $y_{l,k}$ [%] | r_k [%] | f_k [%] |
|----------|----------------------|------------------|----------------------|--------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|------------------|---------------|---------------|-----------|-----------|
| CALD | 4277.9 | -533.6 | 12471 | 1.2 E-05 | 0.1493 | 29048 | 11765.3 | 40.50 | 36.8 | 12.6 | 180.25 | 18.9 |
| TV | 0.0 | 0.0 | 174.16 | 4.04 E-05 | 0.0071 | 12421 | 12247.0 | 98.60 | 0.51 | 0.0 | 1.42 | 0.1 |
| TUR | 0.0 | 7655.0 | 1967.8 | 4.04 E-05 | 0.0796 | 9622.8 | 7655.0 | 79.55 | 5.81 | 0.0 | 31.03 | 17.1 |
| GER | 153.1 | 7501.9 | 0.0 | 5.30 E-05 | 0.00 | 7655 | 7501.9 | 98.0 | 0.0 | 0.45 | 2.78 | 31.0 |
| COND | 496.1 | 0.0 | 1066.1 | 4.04 E-05 | 0.0565 | 1552.5 | 496.1 | 31.96 | 3.15 | 1.47 | 225.11 | 3.73 |
| BC | 0.0 | -29.44 | 28.095 | 1.15 E-03 | 0.039 | 29.44 | 1.354 | 4.6 | 0.08 | 0.0 | 2091.9 | 0.86 |
| PAA 1 | 0.0 | 0.0 | 9.18 | 1.15 E-03 | 0.0103 | 28.79 | 19.61 | 68.11 | 0.03 | 0.0 | 47.49 | 1.4 |
| PAA 2 | 0.0 | 0.0 | 97.26 | 8.74 E-04 | 0.085 | 109.92 | 12.66 | 11.52 | 0.29 | 0.0 | 770.53 | 0.32 |
| PAA 3 | 0.0 | 0.0 | 1.82 | 8.01 E-04 | 0.0015 | 110.64 | 108.82 | 98.35 | 0.06 | 0.0 | 2.16 | 22.6 |
| TAA | 65.98 | 0.0 | 134.49 | 4.04 E-05 | 0.0055 | 861.57 | 661.1 | 76.73 | 0.40 | 0.19 | 32.73 | 7.4 |
| BAA | 0.0 | 150.88 | 13148 | 5.30 E-05 | 0.007 | 150.88 | 19.4 | 12.85 | 0.39 | 0.0 | 741.31 | 0.09 |
| BAR | 0.0 | 294.40 | 162.66 | 5.30 E-05 | 0.0086 | 294.4 | 6.638 | 2.25 | 0.48 | 0.0 | 4569.9 | 8.42 |
| EJ | 0.0 | 0.0 | 8.32 | 4.04 E-05 | 0.0003 | 38.14 | 29.82 | 78.19 | 0.02 | 0.0 | 28.48 | 2.06 |
| CIRCUITO | 4993.1 | 6493.6 | 16253 | 1.2 E-05 | 0.1946 | 27739 | 6493.58 | 23.4 | 48.0 | 14.8 | 419.93 | 22.1 |

Pela tabelas 7 e tendo em vista os critérios de avaliação termoeconômica, percebe-se ser necessário trocar as duas caldeiras, que estão com excessiva destruição e perda de exergia, além de revisar as turbinas. Os demais componentes ficam e um novo sistema de controle descentralizado (SDCD) deve ser incorporado, contabilizado junto ao custo das novas caldeiras.

4.0 - NOVAS CONFIGURAÇÕES PARA OS CIRCUITOS DE GERAÇÃO DA USINA DE FIGUEIRA

A escolha de novos componentes foi realizada tendo por meta, fazer a usina produzir os 10 MW originais de potência em cada circuito de geração.

O procedimento de otimização é baseado em alguns parâmetros de otimização os quais estão em algumas equações, conforme Bejan et al (1996), a seguir:

$$\text{Investimento total de capital:} \quad ITC_k = B_k \left(\frac{\varepsilon_k}{1 - \varepsilon_k} \right)^{n_k} (\dot{E}_{p,k})^{m_k} \quad (21)$$

$$\text{Fator de similaridade termoeconômica:} \quad F_k = \frac{1}{1 + \varepsilon_k^{OT}} \quad (22)$$

$$\text{Eficiência exergética ótima:} \quad \varepsilon_k^{OT} = \frac{1}{1 + F_k} \quad (23)$$

$$\text{Custo de O\&M ótimo:} \quad \dot{Z}_k^{OT} = c_{f,k} \dot{E}_{p,k} \frac{F_k}{n_k} \quad (24)$$

$$\text{Diferença relativa de custo ótima:} \quad r_k^{OT} = \frac{n_k + 1}{n_k} F_k \quad (25)$$

$$\text{Fator termoeconômico ótimo:} \quad f_k^{OT} = \frac{1}{1 + n_k} \quad (26)$$

B_k – constante da equação (21) [R/MW]; n_k – expoente de eficiência; m_k – expoente de capacidade; $\dot{E}_{p,k}$ - potência produzida do componente [MW].

Para as caldeiras e turbinas os valores dos parâmetros da equação (21) estão na tabela 8. O ITC foi obtido por consulta a fabricantes:

Tabela 8 - Constante, expoentes, potência produzida e investimento total de capital, para caldeiras e turbinas

| Componente | B_k [MW ⁻¹] | n^k | m^k | $\dot{E}_{p,k}$ [MW] | ε_k [%] | ITC _k [R\$] |
|------------|---------------------------|--------|--------|----------------------|---------------------|------------------------|
| TURBINA 1 | 16.622.2 | 1.5952 | 0.9001 | 10.0 | 87.35 | 3.600.000.00 |
| TURBINA 2 | 16.622.2 | 1.5952 | 0.9001 | 10.1 | 88.21 | 4.100.000.00 |
| CALDEIRAS | 2.166.973 | 1.9992 | 0.9428 | 14.06 | 41.66 | 13.350.000.00 |

Aplicando as equações (21) a (26) se obtém os valores ótimos e os valores reais dos parâmetros de otimização para as novas configurações dos circuitos de geração da usina de Figueira, conforme tabela 9 abaixo:

Tabela 9 – Valores ótimos e valores de reais dos parâmetros de otimização dos componentes dos circuitos de geração de Figueira otimizados

| Novo circuito | $\dot{E}_{p,k}$ [MW] | F_k | ε_k^{OT} [%] | ε_k [%] | \dot{Z}_k^{OT} [R\$/s] | r_k^{OT} [%] | r_k [%] | f_k^{OT} [%] | f_k [%] | $C_{p,k}$ [R\$/kJ] |
|---------------|----------------------|-------|--------------------------|---------------------|--------------------------|----------------|-----------|----------------|-----------|--------------------|
| 1 | 10.0 | 1.29 | 43.8 | 24.0 | 0.166 | 161.2 | 349.3 | 51.9 | 12.1 | 3.426 E-05 |
| 2 | 10.1 | 1.28 | 43.8 | 24.8 | 0.168 | 161.7 | 336.2 | 51.9 | 12.7 | 3.331 E-05 |

Os custos de geração encontrados ($C_{p,k}$), em unidade usuais do setor elétrico, para a nova configuração dos circuitos de geração da usina de Figueira foram de, R\$ 120.28/MWh para o circuito 1 e R\$ 123.34/MWh para o circuito 2.

5.0 - CONCLUSÃO

Figueira é atualmente uma usina antiga e observando os valores obtidos para a diferença relativa de custo, para a eficiência exergética e para o fator termoeconômico dos circuitos de geração, que constam da tabela 7 e comparando com os obtidos nas novas configurações conforme da tabela 9, se observa que a troca das caldeiras e a revisão promovem sensíveis diferenças naqueles valores, o que pode ser entendido como menor destruição e perda de exergia e melhor aproveitamento da exergia química contida no carvão. Mais importante ainda são os novos valores dos custos de geração de energia, que são quase a metade dos atualmente praticados.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bejan, A., Tsatsaronis, G., Moran, M. J., 1996, "Thermal design and optimization", John Wiley & Sons, New York, USA.
- Horlock, J. H., 1987, "Cogeneration - combined heat and power", Pergamon Press, New York, USA.
- Ministério de Minas e Energia-MME. 2007, <http://www.mme.gov.br/site/menu/select_main_menu_item.do?channelId=1432>
- Moran, M. J., Shapiro, H. N., 2000, "Fundamentals of engineering thermodynamics", John Wiley & Sons, New York, USA.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Nome: Vilmar Graciano.

Data de nascimento: 09/04/1957

Email: vgracianos@hotmail.com. gracianos@copel.com

Formação acadêmica: Engenharia Mecânica – Conclusão em 1982

Instituição: UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ - UFPR

Empresa onde trabalha: COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA – COPEL

Local onde estuda: UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ - UFPR

Curso: Mestrado Acadêmico em Engenharia Mecânica

Área de concentração: Fenômenos de Transporte e Engenharia Térmica