

## ANÁLISE EXERGEOCONÔMICA E OTIMIZAÇÃO DE UM MODELO DE SISTEMA DE COGERAÇÃO

**Leonardo S. R. Vieira** – lsrv@cepel.br

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, Área de Conhecimento de Materiais e Mecânica  
Cx. P. 68007 – 21944-970 – Rio de Janeiro, RJ, Brasil

**João L. M. Donatelli** – donatelli@ltdc.com.ufrj.br

Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Engenharia Mecânica  
29060-970 – Vitória, ES, Brasil

**Manuel E. C. Cruz** – manuel@serv.com.ufrj.br

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica  
Cx. P. 68503 – 21945-970 – Rio de Janeiro, RJ, Brasil

***Resumo.** Neste trabalho são efetuadas análises exérgica e exergoeconômica de um modelo de planta de cogeração com turbina a gás e caldeira de recuperação, sendo as demandas de eletricidade e vapor fixas. Na análise exérgica, são determinadas, com auxílio do simulador de sistemas térmicos chamado IPSEpro, as taxas de destruição de exergia, as eficiências exérgicas e os coeficientes de ligações estruturais para cada componente. Na análise exergoeconômica, os custos associados aos fluxos de exergia são obtidos a partir dos balanços de custos e dos critérios de partição de custos adotados para cada componente. A otimização matemática faz uso do método da métrica variável disponível no software EES – Engineering Equation Solver, e do método da programação quadrática sucessiva disponível na biblioteca IMSL do Fortran PowerStation<sup>®</sup>. O sistema também é otimizado exergoeconomicamente com auxílio das variáveis exergoeconômicas e, ainda, através das derivadas da função objetivo em relação às variáveis de decisão, avaliadas numericamente. O trabalho é concluído com uma comparação dos quatro métodos de otimização empregados.*

***Palavras-chave:** Otimização, Cogeração, Análise exergoeconômica, Sistemas térmicos*

### 1. INTRODUÇÃO

O quadro geral da disponibilidade e dos custos dos energéticos atualmente no Brasil, bem como o avanço da legislação pertinente, tem tornado a cogeração uma alternativa exequível para o suprimento energético de instalações industriais e comerciais. Entretanto, para sua viabilidade é recomendado a utilização de ferramentas de simulação, análise e otimização no projeto da planta de cogeração, e também na operação e manutenção da mesma.

Neste trabalho são realizadas as análises exergética e exergoeconômica e a otimização através de métodos matemáticos e exergoeconômico de uma planta de cogeração específica, com a configuração definida. As etapas aqui apresentadas não constituem, na prática, o procedimento completo de projeto de um sistema térmico, desde o problema primitivo, conforme discutido em Bejan *et al.* (1996).

Primeiramente são executadas as análises exergética e exergoeconômica para uma condição operacional base. Na análise exergética são determinadas as taxas de destruição de exergia e as eficiências exergéticas de cada componente, além dos coeficientes de ligações estruturais para todos os componentes em função das variáveis de decisão definidas para o processo de otimização. Na análise exergoeconômica, os custos associados a cada fluxo de exergia são obtidos a partir da resolução de um sistema de equações lineares proveniente dos balanços de custo aplicados a cada componente da planta e das relações auxiliares mais adequadas, que representam os critérios de partição de custos adotados. A análise exergoeconômica é desenvolvida em nível de componentes básicos do sistema global.

Após as análises exergética e exergoeconômica realiza-se uma otimização exergoeconômica do sistema com o auxílio das variáveis exergoeconômicas, calculadas a partir dos balanços apropriados (Tsatsaronis & Winhold, 1995; Bejan *et al.*, 1996). O sistema também é otimizado pela utilização das derivadas da função objetivo em relação às variáveis de decisão, avaliadas através de diferenças finitas. Finalmente, são efetuadas otimizações através do uso de dois métodos matemáticos: o método da métrica variável disponível no *software* EES – *Engineering Equation Solver*, e o método da programação quadrática sucessiva disponível na biblioteca IMSL do *Fortran PowerStation*<sup>®</sup>. O trabalho é concluído com uma avaliação do desempenho dos métodos de otimização empregados.

## 2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE COGERAÇÃO ANALISADO

A planta de cogeração é constituída de quatro componentes básicos: compressor de ar, câmara de combustão, turbina a gás e uma caldeira de recuperação de calor, conforme “Fig. 1”.

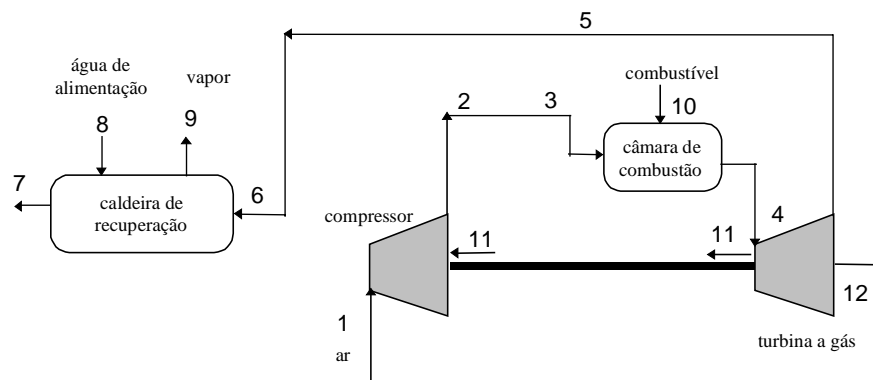


Figura 1. Esquema do sistema de cogeração analisado

As demandas de energia elétrica de 30 MW e 14 kg/s de vapor saturado a 2 MPa são *fixas* (esses são parâmetros a serem adotados exclusivamente pela planta de cogeração). O meio ambiente é definido pela temperatura de 298.15 K e pressão de 101.3 kPa. Considera-se como combustível o metano (CH<sub>4</sub>), com poder calorífico inferior (PCI) de 50000 kJ/kg. Assim, pode-se notar que o sistema aqui estudado deriva do problema CGAM (Tsatsaronis, 1994), do qual o pré-aquecedor de ar é excluído. Por coerência com o problema CGAM original, foi mantida a numeração dos fluxos.

O sistema pode ser representado por uma matriz incidência ( $A$ ), de dimensões  $n \times m$ , onde  $n$  é o número de componentes e  $m$  o número de fluxos do sistema, mostrado na “Tabela 1”. Essa matriz indica quais fluxos interligam quais componentes e se eles estão entrando ou saindo dos componentes. As matrizes combustível ( $A_F$ ) e produto ( $A_P$ ) podem ser obtidas a partir da definição  $F$ - $P$ , onde os fluxos de exergia associados ao combustível ( $F$ ) e os fluxos de exergia associados ao produto ( $P$ ) são mostrados na “Tabela 2” (Valero, Lozano e Munoz, 1986).

Tabela 1. Matriz incidência ( $A$ ) do sistema

Componentes / Fluxos →	1	2	4	5	7	8	9	10	11	12
Compressor	1	-1	0	0	0	0	0	0	1	0
Câmara de Combustão	0	1	-1	0	0	0	0	1	0	0
Turbina	0	0	1	-1	0	0	0	0	-1	-1
Caldeira de Recuperação	0	0	0	1	-1	1	-1	0	0	0

Tabela 2. Definição  $F$ - $P$ - $R$  adotada neste trabalho

Componentes	Combustível - F	Produto - P	Resíduo - R
Compressor	$F=E_{11}$	$P=E_2 - E_1$	----
Câmara de combustão	$F=E_{10} + E_2$	$P=E_4$	----
Turbina	$F=E_4 - E_5$	$P=E_{11} + E_{12}$	----
Caldeira de Recuperação	$F=E_5 - E_7$	$P=E_9 - E_8$	----

A otimização matemática utiliza um modelo matemático completo proveniente dos modelos físico, termodinâmico e econômico e função objetivo do problema CGAM. Neste modelo, todas as variáveis encontram-se explícitas. Nas análises exérgica e exergoeconômica e nas otimizações exergoeconômica e através das derivadas da função objetivo, os modelos físico e termodinâmico utilizados são os do programa de simulação IPSEpro. A função objetivo é a mesma do problema CGAM, porém o modelo econômico utilizado na otimização exergoeconômica é diferente, pois as equações de custo devem ser explicitadas em função do fluxo de exergia no componente e sua eficiência exérgica.

As variáveis de decisão são a relação de pressão no compressor ( $RP_c$ ), rendimentos isoentrópicos do compressor ( $R_c$ ) e da turbina ( $R_t$ ) e a temperatura na entrada da turbina ( $T_4$ ). O custo por unidade de tempo ( $\dot{Z}_i$ ), associado aos custos de aquisição, capital e O&M para cada componente é dado pela “Eq. (1)”, onde  $Z_i$  é o custo de aquisição do componente  $i$ ,  $CRF$  é o fator de recuperação de capital anual (18,2 %),  $\tau$  é o número de horas que a planta opera por ano (8000 h) e  $\gamma$  é o fator de manutenção (1,06). O custo total de operação da instalação por unidade de tempo, que constitui a função objetivo, é dado pela “Eq. (2)”, onde ( $c_F$ ) é o custo específico do combustível e ( $\dot{m}_F$ ) sua vazão mássica.

$$\dot{Z}_i = \frac{Z_i CRF \gamma}{3600 \tau} \quad (1)$$

$$\dot{C}_T = c_F \dot{m}_F PCI + \sum_{i=1}^4 \dot{Z}_i \quad (2)$$

### 3. ANÁLISE EXERGÉTICA

Na análise exergética os balanços de massa, energia e exergia são obtidos através do programa IPSEpro, para cada condição operacional. A exergia química do combustível no ponto 10, considerada igual ao  $PCI$ , é somada à exergia física para obter a exergia no ponto 10 ( $E_{10}$ ). O meio ambiente é definido pela temperatura de 298.15 K e pressão de 101.3 kPa.

Dado o vetor fluxo de exergia ( $\tilde{E}$ ), de dimensão  $m$ , isto é, os fluxos de exergia em todos os pontos, e a matriz incidência ( $A$ ), pode-se determinar o vetor destruição de exergia ( $\tilde{E}_D$ ), de dimensão  $n$ , isto é, as taxas de destruição de exergia nos componentes, através da “Eq. (3)” (Valero, Lozano e Munoz, 1986). Os fluxos de exergia nos pontos do sistema ( $E$ ), os fluxos de combustível ( $F$ ) e produto ( $P$ ), as taxas de destruição de exergia ( $E_D$ ) e os rendimentos exergéticos ( $\varepsilon$ ) nos componentes são mostrados nas “Tabelas 3 e 4”, respectivamente, para a condição operacional base ( $T_4 = 1026.85 \text{ °C} = 1300 \text{ K}$ ,  $RPc = 8$ ,  $Rc = 0.8$  e  $Rt = 0.8$ ). Nota-se que a câmara de combustão é o principal responsável pela destruição total de exergia.

$$A\tilde{E} = \tilde{E}_D \quad (3)$$

Tabela 3. Fluxos de exergia nos pontos para a condição operacional base

Pontos	1	2	4	5	7	8	9	10	11	12
$E$ [kW]	5	44517	139382	52671	28163	27	12788	143582	49776	30000

Tabela 4. Destruição de exergia e rendimento exergético nos componentes (caso base)

Componentes	$E_D$ [kW]	$F$ [kW]	$P$ [kW]	$E_D / E_{Dtotal}$ [%]	$\varepsilon$ [%]
Compressor	5264	49776	44512	7,2	89,4
C. Combustão	48717	188099	139382	67,0	74,1
Turbina	6935	86711	79776	9,5	92,0
Caldeira Rec.	11746	24508	12761	16,2	52,1

Os coeficientes de ligações estruturais são definidos pela “Eq. (4)”, onde  $\dot{E}_{D,total}$  e  $\dot{E}_{D,k}$  são as taxas de destruição de exergia do sistema e do  $k$ -ésimo componente, respectivamente, e  $x_i$  a variável de decisão (Kotas, 1985). Esses coeficientes fornecem a razão entre as variações das taxas de destruição de exergia na planta e nos componentes, ambas em função de uma variação ( $\Delta$ ) nas variáveis de decisão, sendo possível utilizá-los na otimização do sistema.

$$\sigma_{k,i} = \left( \frac{\partial \dot{E}_{D,total}}{\partial \dot{E}_{D,k}} \right)_{x_i = \text{var.}} \quad (4)$$

Tabela 5. Coeficientes de ligações estruturais para a condição operacional base (caso base)

Componentes / Variáveis	$T_4$ [ $\Delta = 20 \text{ °C}$ ]	$RPc$ [ $\Delta = 2$ ]	$Rc$ [ $\Delta = 2 \%$ ]	$Rt$ [ $\Delta = 2 \%$ ]
Compressor	6,29	-6,53	3,12	14,37
Câmara de combustão	1,36	0,78	1,89	1,56
Turbina	4,81	-2,92	9,03	4,53
Caldeira de recuperação	-9,76	4,53	24,74	14,40

#### 4. ANÁLISE EXERGEOCONÔMICA

Nesta etapa, para a determinação dos custos exergeticos ( $E^*$ ) e dos custos termoeconômicos ( $\Pi$ ) utiliza-se a matriz incidência ampliada ( $A'$ ), mostrada na “Tabela 6”, Essa matriz é obtida a partir da matriz incidência ( $A$ ), adicionando-se as linhas correspondentes às equações dos critérios de partição de custos adotado Aos fluxos de exergia entrando no sistema atribui-se um custo exergetico unitário (Valero, Lozano e Munoz ,1986).

Tabela 6. Matriz incidência ampliada ( $A'$ ) do sistema

Componentes / Fluxos →	1	2	4	5	7	8	9	10	11	12
Compressor	1	-1	0	0	0	0	0	0	1	0
Câmara de Combustão	0	1	-1	0	0	0	0	1	0	0
Turbina	0	0	1	-1	0	0	0	0	-1	-1
Caldeira de Recuperação	0	0	0	1	-1	1	-1	0	0	0
Combustível (ponto 1)	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Combustível (ponto 8)	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Combustível (ponto 10)	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Turbina (proposição 2F)	0	0	1	$-E_4/E_5$	0	0	0	0	0	0
Caldeira (proposição 2F)	0	0	0	1	$-E_5/E_7$	0	0	0	0	0
Turbina (proposição 2P)	0	0	0	0	0	0	0	0	1	$-E_{11}/E_{12}$

Os custos exergeticos ( $E^*$ ) dos fluxos do sistema são definidos como a quantidade de exergia por unidade de tempo (kW) requerida para produzi-los. O custo exergetico, assim como a exergia, é uma função termodinâmica apenas. Já os custos termoeconômicos ( $\Pi$ ) dos fluxos do sistema, definidos como a quantidade de unidades monetárias por unidade de tempo (US\$/s) requeridas para produzi-los, é uma função termodinâmica e econômica. Neste caso, é necessário dispor de informações tais como os custos de aquisição dos componentes, de O&M, *overheads*, dos combustíveis entrando no sistema, de resíduos e de sub-produtos. Todos os custos da “Tabela 7” podem ser calculados seguindo o hexágono dos custos apresentado por Valero, Lozano e Munoz (1986).

Tabela 7. Custos dos fluxos do sistema para a condição operacional base

Pontos	Exergia $E$ [kW]	C. Exerget.. $E^*$ [kW]	C. Exerget. Unit. $k^*$ [-]	C. Termoecon.Unit. $c^*$ [US\$/GJ]	C. Exergo.Unit. $c$ [US\$/GJ]	C. Termoecon. $\Pi$ [US\$/h]
1	5,40	5,40	1,00	0,00	0,00	0,00
2	44517,14	91101,03	2,05	4,71	9,64	1545,45
4	139381,76	234683,01	1,68	4,26	7,18	3602,15
5	52670,61	88683,75	1,68	4,26	7,18	1361,21
7	28163,03	47419,29	1,68	4,26	7,18	727,84
8	26,69	26,69	1,00	0,00	0,00	0,00
9	12787,84	41291,15	3,23	4,68	15,11	695,44
10	143581,97	143581,97	1,00	3,96	3,96	2047,31
11	49775,74	91095,63	1,83	4,40	8,05	1442,02
12	30000,00	54903,63	1,83	4,40	8,05	869,11

Pode-se observar uma discrepância entre os custos termoeconômicos unitários ( $c^*$ ) e os custos exergoeconômicos unitários ( $c$ ), principalmente no valor atribuído ao vapor (fluxo 9), cujo conteúdo energético é diferente do exergetico. As diferenças relativas dos custos termoeconômicos e exergoeconômicos unitários também apresentam diferenças. A análise termoeconômica indica que o compressor é responsável pela maior diferença relativa dos

custos termoeconômicos unitários, enquanto a análise exergoeconômica mostra a caldeira com a maior diferença relativa dos custos exergoeconômicos unitários.

## 5. OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE COGERAÇÃO

### 5.1 Aplicação de métodos matemáticos de otimização

A otimização de um sistema térmico através de métodos matemáticos exige um modelo matemático completo, o que nem sempre é possível. No caso em estudo, o problema CGAM fornece tal modelo e a otimização matemática convencional pôde ser realizada.

Na otimização pelo método da métrica variável (*EES*), as restrições de igualdade representadas pelo balanço térmico e pelas equações que compõem a função objetivo foram incorporadas em um conjunto único de equações. As restrições de desigualdade também foram incorporadas ao sistema através de funções penalidade. O problema de minimização foi resolvido a partir da solução numérica do sistema de equações global formado.

Na otimização pelo método da programação quadrática sucessiva (biblioteca IMSL do FORTRAN *PowerStation*<sup>®</sup>), as restrições de desigualdade foram programadas separadamente das restrições de igualdade, o que permitiu reduzir o número total de variáveis da rotina de otimização. No caso em estudo, o balanço térmico foi calculado através da rotina DNEQNF disponível na biblioteca IMSL.

### 5.2 Aplicação das derivadas da função objetivo em relação às variáveis de decisão

A otimização termoeconômica foi realizada utilizando-se somente as derivadas da função objetivo em relação às variáveis de decisão, cuja expressão é dada na “Eq. (5)” para  $T_4$ . As derivadas com maior valor afetam mais intensamente a função objetivo. Os valores dessas derivadas dependem dos incrementos usados, os quais devem ser reduzidos sempre que os valores da função objetivo oscilem até valores limites pré-fixados. Quando o valor da derivada é positivo, aumenta-se a variável de decisão correspondente; se o valor é negativo, deve-se diminuir a variável de decisão correspondente. A magnitude das alterações das variáveis não é definida *a priori*. Neste caso, é aconselhável que o projetista esteja familiarizado com o sistema. Não existindo restrições, no ponto ótimo, todas as derivadas assumiriam um valor nulo. A evolução das condições operacionais nesta otimização é mostrado na “Tabela 8”.

$$\frac{\partial \dot{C}_T}{\partial T_4} = \frac{\dot{C}_T(T_4 + \Delta T_4) - \dot{C}_T(T_4 - \Delta T_4)}{2\Delta T_4} \quad (5)$$

Tabela 8. Evolução das condições operacionais na otimização pelas derivadas de  $\dot{C}_T$

$T_4$ [°C]	$RPC$ [-]	$Rc$ [%]	$Rt$ [%]	Função Objetivo [\$/h]	Investimento [\$/] x (10 <sup>6</sup> )
1027	8	80	80	2108,6	2,54
1027	12	85	90	1477,5	7,03
1227	18	85	89,5	1355,8	8,16
1201	18	85	89	1349,7	6,98
1201	19	84	89,5	1344,3	7,32
1202	19,5	84,4	89,62	1344,0	7,85

### 5.3 Aplicação da metodologia de otimização exergoeconômica

Na otimização exergoeconômica utilizou-se as “Eqs. 6 e 7”, onde  $c_{F,k}$  e  $c_{P,k}$  são os custos médios por unidade de exergia do combustível e do produto do componente  $k$ , respectivamente,  $r_k$  é a diferença de custo entre produto e combustível relativa ao custo do combustível,  $f_k$  é o fator exergoeconômico e  $\dot{E}_{L,k}$  é o fluxo de exergia perdido. Neste caso, pôde-se usar a “Eq. (2)” como função objetivo, pois os produtos são fixos.

$$r_k = \frac{c_{P,k} - c_{F,k}}{c_{F,k}} = \frac{1 - \varepsilon_k}{\varepsilon_k} + \frac{\dot{Z}_k}{c_{F,k} \dot{E}_{P,k}} \quad (6)$$

$$f_k = \frac{\dot{Z}_k}{\dot{Z}_k + c_{F,k} (\dot{E}_{D,k} + \dot{E}_{L,k})} \quad (7)$$

Podendo contar com equações apropriadas de custos dos equipamentos, fluxos constantes de exergia do produto e custo fixo do combustível de um determinado componente, é possível obter-se as “Eqs. (8 e 9)” envolvendo  $r^{OPT}$  e  $\varepsilon^{OPT}$ ,  $\Delta\varepsilon_k$  e  $\Delta r_k$  (Bejan *et al.*, 1996 e Tsatsaronis, 1996), onde o sobrescrito (*OPT*) corresponde ao ótimo obtido considerando o componente isolado.

$$\Delta\varepsilon_k = \frac{\varepsilon_k - \varepsilon_k^{OPT}}{\varepsilon_k^{OPT}} 100 \quad (8)$$

$$\Delta r_k = \frac{r_k - r_k^{OPT}}{r_k^{OPT}} 100 \quad (9)$$

Durante o procedimento da otimização exergoeconômica, contou-se ainda com o auxílio de um estudo de sensibilidade, conforme o mostrado na “Tabela 9”.

Tabela 9. Sensibilidade das variáveis exergoeconômicas vs. variáveis de decisão (caso base)

Componentes	$RPC=8+10\% / T_4=1300K+10\% / Rt=0,8+10\% / Rc=0,8+10\%$								
	$\varepsilon$			$r$			$f$		
Compressor	0,3 / 0,0 / 0,0 / 4,6	0,0 / 1,2 / 0,4 / 50,2	8,2 / 3,7 / 1,3 / 170,1						
Câmara de combustão	1,1 / 0,4 / 0,0 / -1,3	-3,2 / -1,0 / 0,0 / 3,6	7,0 / 23,8 / 0,7 / -12,9						
Turbina	-0,2 / 0,6 / 3,7 / 0,0	1,0 / -3,4 / -10,5 / -0,7	-5,4 / 26,7 / 217,8 / -4,5						
Caldeira de recuperação	1,1 / -3,0 / 6,5 / 1,6	-1,1 / 3,1 / -6,5 / -1,7	2,8 / -5,2 / 24,1 / -0,2						
Custo total		-1,3 / -5,8 / -10,7 / -3,3							

**Iteração 1.** Foram inicialmente escolhidas as variáveis de decisão que afetam simultaneamente eficiência e custo, neste caso  $RPC$ ,  $Rt$ ,  $Rc$  e  $T_4$ , e calculadas as variáveis  $r$ ,  $f$  e  $\varepsilon$ , bem como os custos de destruição de exergia e de investimento, mostrado na “Tabela 10”.

Nota-se que o custo total atribuído à câmara de combustão é muito maior do que os demais, sendo a destruição de exergia a principal causa. Portanto, a otimização foi realizada com ênfase na eficiência. Observando-se a “Tabela 9”, pode-se verificar que as variáveis de decisão a serem modificadas são  $T_4$  e  $RPC$ , que, após alteradas gradualmente, produzem os resultados da “Tabela 11”.

Tabela 10. Variáveis exergoeconômicas para o caso base (Custo total = 2141 US\$/h)

Componente	$\epsilon$	$r$	$f$	$\dot{C}_D$	$\dot{Z}$	$\dot{C}_D + \dot{Z}$
Compressor	0,89	0,14	0,27	114	85	199
Câmara de combustão	0,74	0,26	0,00	896	3	899
Turbina a gás	0,92	0,09	0,15	173	29	202
Caldeira de recuperação	0,52	0,49	0,04	293	12	305

Tabela 11. Simulação para  $RPc=15$ ,  $T4=1500K$ ,  $Rt=0,8$ ,  $Rc=0,8$  (Custo total = 1803 US\$/h)

Componente	$\Delta\epsilon$	$\Delta r$	$\dot{C}_D$	$\dot{Z}$	$\dot{C}_D + \dot{Z}$
Compressor	7,9	-38,2	117	98	215
Câmara de combustão	-15,1	44,8	641	8	649
Turbina a gás	3,3	-48,9	163	41	204
Caldeira de recuperação	-39,6	-35,1	279	12	291

Considerando agora os outros componentes com elevado valor de  $\dot{C}_D + \dot{Z}$ , nota-se, na “Tabela 11”, que o compressor, a turbina e a caldeira de recuperação têm custos totais semelhantes, predominando o custo da destruição de exergia. Porém, como o custo total da caldeira é maior, ela foi escolhida inicialmente como referência para as modificações das outras variáveis de decisão ainda não alteradas ( $Rt$  e  $Rc$ ). Predominando o custo da destruição de exergia, aqui também a minimização foi realizada com ênfase na eficiência, ou seja, redução de  $\Delta\epsilon$ . A variável  $Rt$  foi escolhida para ser modificada por exercer maior influência na eficiência da caldeira e o valor adotado foi  $Rt=0,9$ . Prosseguiu-se com a avaliação da turbina e do compressor, observando-se o efeito da variável  $Rc$  ainda não modificada. Nestes dois componentes a destruição de exergia é preponderante, sendo a otimização realizada com ênfase na minimização de  $\Delta\epsilon$  ao invés de  $\Delta r$ . Como  $Rc$  não exerce influência no rendimento da turbina, ela foi modificada considerando apenas seu efeito no valor de  $\Delta\epsilon$  para o compressor. Assim, os valores das variáveis de decisão ao final da primeira iteração são os da “Tabela 12”.

Tabela 12. Simulação para  $RPc=15$ ,  $T4=1500K$ ,  $Rt=0,9$ ,  $Rc=0,8$  (Custo total = 1455,5 US\$/h)

Componente	$\Delta\epsilon$	$\Delta r$	$\dot{C}_D$	$\dot{Z}$	$\dot{C}_D + \dot{Z}$
Compressor	7,9	-38,4	129	44	173
Câmara de combustão	-15,1	45,5	513	7	520
Turbina a gás	7,8	-42,5	71	145	216
Caldeira de recuperação	-31,6	-43,9	224	14	238

**Iteração 2.** Aqui as variáveis que afetam eficiência e custo são as mesmas. A câmara de combustão apresenta o maior custo e a maior contribuição é dada pelo custo da destruição de exergia. As variáveis modificadas foram  $RPc$  e  $T4$  e os resultados encontram-se na “Tabela 13”.

Tabela 13. Simulação para  $RPc=19$ ,  $T4=1500 K$ ,  $Rt=0,9$ ,  $Rc=0,8$  (Custo total = 1438,1 US\$/h)

Componente	$\Delta\epsilon$	$\Delta r$	$C_D$	$Z$	$C_D+Z$
Compressor	8,4	-35,3	100	105	205
Câmara de combustão	-13,5	37,7	480	7	487
Turbina a gás	7,4	-45,2	77	130	207
Caldeira de recuperação	-28,2	-46,6	192	15	207



Na “Tabela 13”, observa-se que os outros componentes possuem custos totais semelhantes e na caldeira de recuperação o custo da destruição de exergia é elevado. Assim, a otimização neste componente enfatiza a eficiência. As modificações impostas a  $Rt$  e  $Rc$  foram auxiliadas pela avaliação de seus efeitos sobre  $\Delta\varepsilon$  e  $\Delta r$  para os componentes, com exceção da caldeira, onde só se avaliou o efeito sobre  $\Delta\varepsilon$ , cujos resultados são mostrados na “Tabela 14”.

Tabela 14. Efeitos de  $Rt$  e  $Rc$  sobre  $\Delta\varepsilon$  e  $\Delta r$

Componente	Ação a ser tomada para reduzir $\Delta\varepsilon$		Ação a ser tomada para reduzir $\Delta r$	
Compressor	-	Redução de $Rc$	-	Elevação de $Rc$
Turbina	Redução de $Rt$	-	Redução de $Rt$	Elevação de $Rc$
Caldeira de recup	Elevação de $Rt$	Elevação de $Rc$	-	-

A “Tabela 14” indica que algumas decisões são conflitantes. Como não há nenhum componente predominante e como os desvios em relação ao ótimo são maiores na avaliação de  $\Delta r$ , decidiu-se pela elevação de  $Rc$  e redução de  $Rt$ , observando-se, no entanto, seus efeitos sobre a função objetivo. O resultado final obtido é dado na “Tabela 15”, bem como os obtidos na otimização matemática, na otimização pela derivada de  $\dot{C}_T$  e no problema CGAM.

Tabela 15. Valores das variáveis de decisão no ponto de mínimo

Variável	CGAM original	<i>EES</i>	<i>FORTRAN</i>	Ot. Exergoeoc.	Derivada
$RPc$	8,52	17,9	17,9	17,0	19,5
$Rt$	0,8786	0,896	0,896	0,90	0,8962
$Rc$	0,8468	0,847	0,847	0,82	0,844
$T4$ (K)	1492,6	1477,4	1477,4	1500	1475,2
$T3$ (K)	914,6	-	-	-	-
Custo total (US\$/h)	1303,40	1446,01	1446,02	1436,9	1344,02

## 6. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

Os resultados obtidos pelos métodos matemáticos de otimização, quando comparados ao resultado do problema CGAM, revelam o impacto do pré-aquecedor de ar, e quando comparados ao resultado da otimização pela derivada da função objetivo, pode-se atribuir a diferença aos diferentes modelos usados. No que se refere aos resultados obtidos pela otimização exergoeconômica, eles são aproximadamente iguais aos resultados obtidos pelos métodos matemáticos de otimização, porém utilizam modelos físico e termodinâmico distintos, bem como diferentes equações de custo dos equipamentos.

A otimização exergoeconômica apresenta pontos positivos, como uma identificação clara dos componentes que mais contribuem para o custo final dos produtos do sistema e da participação dos custos de destruição de exergia e investimento. Conhecendo-se a formação do custo total dos produtos, torna-se mais fácil decidir entre melhorar a eficiência e diminuir o investimento. Entretanto, o método não indica em qual variável de decisão mexer, a magnitude dos incrementos e a condição de otimalidade. Desta forma, às vezes é necessário realizar uma análise de sensibilidade dos parâmetros a serem minimizados em relação às variáveis de decisão, o que nem sempre é viável. Para determinar os incrementos é necessário realizar algumas iterações ou opcionalmente definir algum algoritmo de busca adicional a ser integrado ao programa de simulação do processo. Além disso, as equações de custo dos equipamentos,

importantes para obtenção de valores confiáveis, devem ser em função da eficiência exergetica e do fluxo exergetico de cada componente, nem sempre disponível.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem à Fundação José Bonifácio, processo nº 8491-3, pela aquisição do programa de simulação IPSEpro, utilizado neste trabalho.

### **REFERÊNCIAS**

- Bejan, A., Tsatsaronis, G. e Moran, M., 1996, Thermal Design and Optimization, John Wiley & Sons, NY.
- Kotas, T. J., 1985, The Exergy Method of Thermal Plant Analysis, Butterworths.
- Tsatsaronis, G. & Winhold, M., 1985, Exergoeconomic Analysis and Evaluation of Energy Conversion Plants I- A New General Methodology, II – Analysis of a Coal-Fired Steam Power Plant, International Journal of Energy, Vol. 10, No.1, pp. 69-94.
- Tsatsaronis, G., 1994, Invited Papers on Exergoeconomics, International Journal of Energy, Vol. 19, No. 3 (Special Issue).
- Valero, A., Lozano, M. A. e Munoz, M., 1986, A General Theory of Exergy Savings: Part I – On the Exergetic Cost, Part II – On the Thermo-economic Cost, Part III – Energy Savings and Thermo-economics, ASME, Vol. 3, pp.1-22.

*Title. Exergoeconomic Analysis and Optimization of a Model Cogeneration System*

*Abstract. In this paper we perform exergetic and exergoeconomic analyses, a mathematical optimization and an exergoeconomic optimization of a gas turbine-heat recovery boiler cogeneration system with fixed electricity and steam production rates. The exergy balance is calculated with the IPSEpro thermal system simulation program. In the exergetic analysis, exergy destruction rates, exergetic efficiencies and structural bond coefficients for each component are evaluated as functions of the decision variables of the optimization problem. In the exergoeconomic analysis the cost for each exergetic flow is determined through cost balance equations and additional auxiliary equations from cost partition criteria. Mathematical optimization is performed by the metric variable method (software EES – Engineering Equation Solver) and by the successive quadratic programming (IMSL library – Fortran PowerStation®). The exergoeconomic optimization is performed on the basis of the exergoeconomic variables. System optimization is also performed by evaluating the derivative of the objective function through finite differences. This paper concludes with a comparison between the four optimization techniques employed.*

*Keywords. Optimization, Cogeneration, Exergoeconomic analysis, Thermal systems*