

ANÁLISE EXERGEOCONÔMICA APLICADA AO SISTEMA  
 DE COGERAÇÃO DE UMA INDÚSTRIA DE CELULOSE

ROBERTO A. ALMEIDA<sup>(a)</sup> AFONSO H. M. SANTOS<sup>(b)</sup>  
 JOSÉ L. SILVEIRA<sup>(c)</sup>

(a)UNICAMP-Campinas (b)EFEI-Itajubá (c)UNESP-Guaratinguetá

RESUMO

Este artigo apresenta a aplicação de um método exergético e matricial de análise termodinâmica e de alocação de custos em um sistema de cogeração de uma indústria de celulose. Objetiva-se a determinação dos fluxos exergéticos e dos respectivos custos, bem como a eficiência dos equipamentos e a exergia destruída nos mesmos.

INTRODUÇÃO

A cogeração atualmente tem despertado interesse especial de pesquisadores e empresários brasileiros dos mais diversos setores industriais, visando atingir a auto-suficiência e mesmo a geração de excedentes de eletricidade, com pretensões a sua comercialização junto às concessionárias de energia elétrica. O custo do vapor e da energia elétrica cogerada é fortemente afetado pelo método de alocação. Se verifica que o setor industrial por não dispor de um critério único de repartição de custos apresenta custos bem diferenciados. O custeio pela exergia e não pela energia traz o benefício da valorização da qualidade não da quantidade.

ANÁLISE EXERGÉTICA

O sistema de cogeração em estudo pertence a Celulose Nipo-Brasileira S.A. (CENIBRA) e consome principalmente refugos de madeira e lixívia para a geração de vapor e eletricidade, que proporcionaram uma produção de 1.040 toneladas de pasta celulósica.

São considerados subsistemas da planta de cogeração todos os equipamentos, junções e bifurcações que apresentam fluxo líquido de exergia. A figura 1 mostra o sistema de cogeração com seus 43 FCS's (flow constraint system), que é definido como uma partícula infinitesimal de fluxo, localizada na superfície de interface dos subsistemas. Os valores das propriedades termodinâmicas dos FCS's são apresentados na tabela 4.

As saliências referentes aos FCS's 4, 9, 14 e 43 indicam que a superfície está suficientemente afastada, de modo que o material a ser descarregado para o meio externo, ao atravessá-la, estará em total equilíbrio termodinâmico com o meio.

Ao conjunto de mais de um FCS denomina-se LFCS (linked flow constraint system), sendo considerado como um sistema fictício. Para este sistema de cogeração define-se os seguintes LFCS's: LFCS1 composto pelos FCS's 1 a 4; LFCS2, pelos FCS's 5 a 9; LFCS3, pelos FCS's 10 a 14; LFCS4, pelos FCS's 15 a 39; e LFCS5, pelos FCS's 34, 40 e 41.

**Interação Exergética.** A interação exergética (e) é definida como o fluxo líquido de exergia que sai (produto) ou que chega (insumo) a um subsistema, conforme equação 1. Seus valores são apresentados na tabela 1.

$$e = \sum_e \dot{m} b - \sum_s \dot{m} b \quad (1)$$

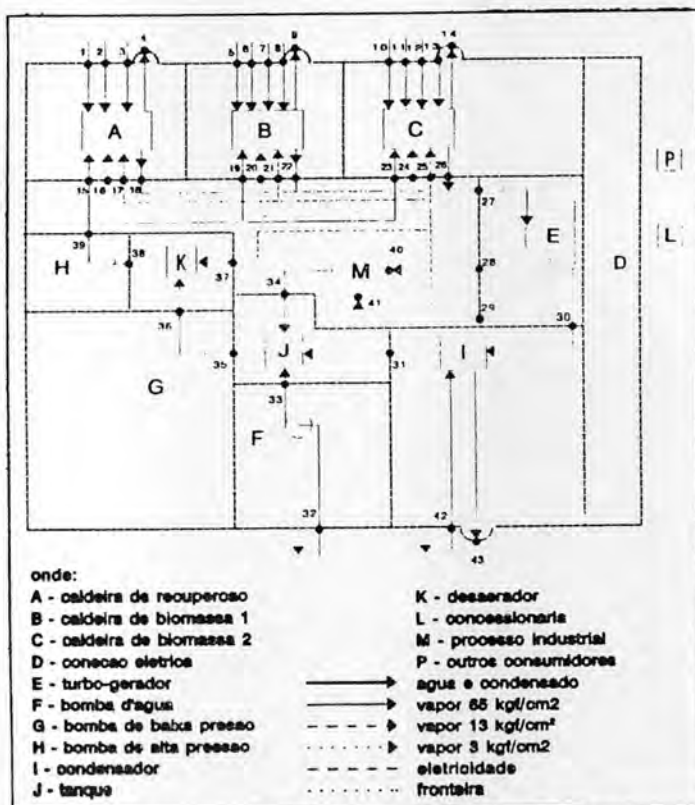


Figura 1. Sistema de Cogeração Discretizado

onde a exergia, para este caso, pode ser calculada por:

$$b = h - t_0 s \quad (2)$$

O conceito de interação exergética possibilitou representar o sistema de cogeração pelo diagrama mostrado na figura 2.

**Matriz Incidência.** A matriz incidência (I) (figura 3) é a representação matricial dos sentidos das interações exergéticas apresentadas na figura 2.



**ANÁLISE EXERGOECONÔMICA**

Denomina-se custo exergoeconômico o custo monetário de uma interação exergetica. Ele é uma composição do custo de investimento ( $\psi$ ) e do custo de combustível ( $\phi$ ). O custo de investimento é apresentado na tabela 1 ( $Z_1$  a  $Z_{16}$ ). O custo total dos combustíveis consumidos por cada caldeira pode ser determinado por:

$$\phi = \sum (C \dot{m}) \tag{7}$$

Os custos exergoeconômicos podem ser calculados pela aplicação de balanço de custos nos subsistemas, resultando em um sistema de equações lineares, representado matricialmente por:

$$I \Pi = - \Psi \tag{8}$$

A equação 8 não apresenta solução, pois a matriz "I" é retangular (m x n), sendo necessárias n-m equações auxiliares, que são obtidas segundo as proposições de Valero (1986).

Proposição combustível - O custo exergoeconômico relativo a um combustível é igual ao seu custo monetário.

$$\pi = \phi \tag{9}$$

Proposição laço - o custo exergoeconômico unitário de qualquer interação exergetica que entra e sai do nó de origem de um ou mais laços são iguais.

$$\left(\frac{\pi}{e}\right)_s - \left(\frac{\pi}{e}\right)_e = 0 \tag{10}$$

Proposição bifurcação - os custos exergoeconômicos unitários são os mesmos para todas as interações exergeticas que deixam uma bifurcação.

$$\left(\frac{\pi}{e}\right)_s = C^{Ls} \tag{11}$$

Assim, obtém-se um novo sistema de equações lineares que matricialmente pode ser representado por:

$$\Pi = A^{-1} Z \tag{12}$$

onde o vetor "Z" (tabela 1) e a matriz custo "A" (figura 4) são compostos pelas constantes e pelos coeficientes deste sistema de equações, respectivamente.

Os custos exergoeconômicos (tabela 1) foram obtidos pela solução da equação 12, através do método de eliminação de Gauss. Essa equação também representa o diagrama de custos exergoeconômicos (figura 5).

<b>A =</b>	<b>I</b>										
	0001	0	0000000000	00	0	0	0	0	0	0	0
	0000	0	0000001000	00	0	0	0	0	0	0	0
	0000	0	0000000100	00	0	0	0	0	0	0	0
	0000	0	0000000010	00	0	0	0	0	0	0	0
	0000	1/e5	0000000000	00	0	0	-1/e21	0	0	0	0
	0000	1/e5	0000000000	00	0	0	0	-1/e22	0	0	0
	0000	1/e5	0000000000	00	0	0	0	0	-1/e23	0	0
	0000	1/e5	0000000000	-1/e160	0	0	0	0	0	0	0
	0000	0	0000000000	00	0	0	0	0	0	1/e24-1/e25	0
0000	0	0000000000	00	-1/e190	0	0	0	0	0	-1/e26	

Figura 4. Matriz Custo

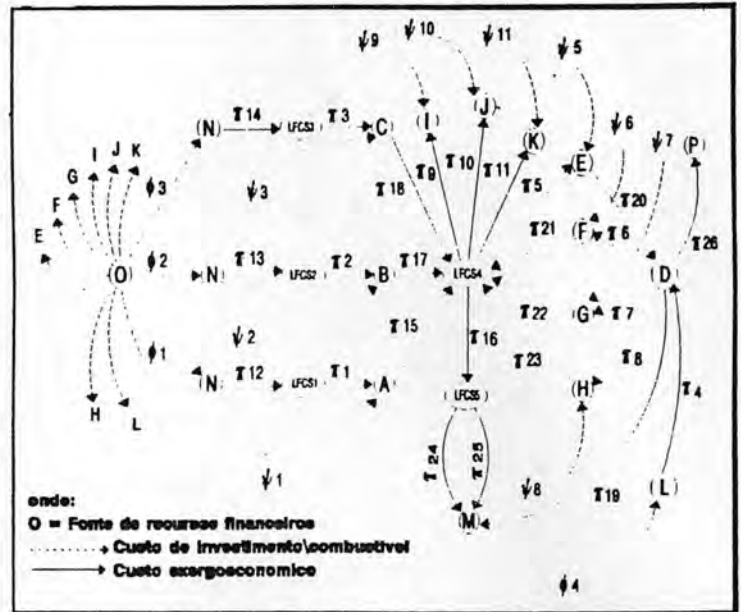


Figura 5. Custos Exergoeconômicos

Tabela 3. Características dos subsistemas

	D (MJ/h)	ξ (%)		D (MJ/h)	ξ (%)
A	578.881	28,9	G	113	49,0
B	120.346	39,2	H	2.967	48,1
C	125.189	35,3	I	2.583	0,0
D	0	100,0	J	440	0,0
E	48.599	72,8	K	6.508	0,0
F	6	51,0	LFCS4	45.318	88,2

**CONCLUSÕES**

A análise exergetica efetuada no sistema de cogeração demonstrou que as maiores perdas ocorrem nas caldeiras. Portanto, estes equipamentos devem ser objeto de estudos mais profundos.

Os custos obtidos são coerentes, podendo, a priori, parecerem altos quando comparados com os valores praticados pelas empresas. Isto deve ao fato de se ter custeado em base exergetica e não em base energética, como é feito atualmente. A explicação é que embora a exergia expresse a qualidade de um fluxo, quantitativamente a exergia é menor que a energia, fazendo com que os custos unitários dos fluxos exergeticos sejam superiores aos custos unitários dos fluxos energéticos.

O presente método possibilita a análise e o rateio dos custos de grandes centrais de utilidades com um mínimo esforço computacional, já que os cálculos matemáticos consistem de operações elementares de matrizes.

Tabela 4. Custos dos Combustíveis

Diesel	115,66 US\$/ton
eletricidade	52,4 US\$/MWh
lixívia	0 US\$/ton
lenha	20 US\$/ton
casca	0 US\$/ton

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, R.A., "Alocação de Custos Segundo uma Visão Exergética: Uma Aplicação à Indústria de Papel e Celulose", Tese de Mestrado, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá, 1993.

McGovern, J.A. e O'toole, F., "A Virtual- System Concept for Exergy Analysis of Flow Network Plant", Proceedings of the International Symposium on Efficiency, Costs, Optimization and Simulation of Energy System, pp. 155-166, Zaragoza, Spain, 1992.

Valero A., Lozano, M.A. and Munoz, M., "A General Theory of Exergy Saving", ASME, WAM 1986, AES-vol.2.3, pp. 123-130

#### ABSTRACT

This paper presents an application of an exergetic and matrix method of thermodynamic analysis and cost allocation in a cogeneration plant of a pulp industry. It aims to determine the exergetic flows and its related cost, as well as the efficiency of equipment and the destructed exergy in each equipment. Such a method provides a visual approach of the exergetic and economic flows through diagrams of the cogeneration plant.