

# Análise Exergética Aplicada à Usina Termelétrica de Figueira

Pedro Augusto Vieira<sup>1</sup>  
José Antônio Velásquez Alegre<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Copel Geração SA  
pedro.vieira@copel.com

<sup>2</sup> PUC - PR  
velasqz@rla01.pucpr.br

**Abstract:** An analysis of the Figueira thermal power plant was conducted in this work with the primary objectives of knowing its current operating condition and evaluating the costs of internal flows. The Theory of Exergetic Costs was the basic tool for this analysis. The conducted study was preceded by some preparatory activities among which the main ones are: determination of actual productive structure of the plant; implementation of the proper measurement instruments in strategically selected spots and evaluation of the plant performance by testing it in accordance to standard norm codes. These analyses allowed the identification, location and quantification of the main plant inefficiency sources as well as the exergetic and economic costs of every internal flow of the plant.

**Resumo:** Uma análise da Usina Termelétrica de Figueira foi conduzida neste trabalho, objetivando avaliar a sua atual condição operativa. A análise termoeconômica, compreendendo a análise exergética seguida da aplicação da teoria dos custos exergéticos, foi o método utilizado. Este estudo foi precedido por alguns preparativos como a determinação da estrutura produtiva da planta; a implementação da instrumentação adequada em pontos estrategicamente selecionados e a avaliação de seu desempenho, através de testes conforme as normas específicas. Essas análises permitiram identificar, localizar e quantificar as principais fontes de ineficiência, assim como o cálculo dos custos exergéticos e econômicos dos fluxos internos da planta.

**Palavras chave:** Usina termelétrica, testes de desempenho, análise exergética, análise termoeconômica.

B fluxo de exergia [kW]  
B\* custo exergético [kW]  
C taxa de custo econômico [\$/s]  
F combustível

$h$  entalpia [kJ/kg]  
 $l$  irreversibilidade [kW]  
 $k^*$  custo exergético unitário

L perdas  
 $\dot{m}$  fluxo de massa [kg/s] pressão  
 $p$  [kgf/cm<sup>2</sup>]  
P produto  
 $\dot{Q}$  taxa de transferência de calor [kW]  
 $s$  entropia [kJ/kg-K]  
 $T$  temperatura [°C]  
 $\dot{W}$  potência [kW]  
 $y$  fração molar  
 $\varepsilon$  eficiência exergética  
 $\eta$  eficiência energética

## 1 Introdução

O aumento da oferta de energia para atender ao crescente aumento de demanda está condicionado a dois tipos de medidas: aumento da potência instalada e ao aumento da eficiência do parque gerador instalado.

Este trabalho apresenta uma contribuição ao segundo grupo de medidas (aquelas que objetivam uma melhor eficiência das plantas) e consiste de uma completa avaliação das instalações da Usina Termelétrica de Figueira – UTE FRA, de forma a oferecer subsídios para decisões em relação à sua operação. Tal estudo baseia-se na utilização de modernas técnicas de análise e otimização, como análise exergética [1], [2], [3], e análise termoeconômica [4], [5], [6], fundamentadas na Segunda Lei da Termodinâmica. Esta ferramenta possibilita a identificação, localização e quantificação das fontes de perdas e de desperdícios da energia disponível, permitindo realizar um diagnóstico detalhado da planta. A partir deste diagnóstico pode-se implementar medidas que visam ao aumento de sua eficiência.

## 2 Usina Termelétrica de Figueira – UTE FRA

A UTE FRA utiliza carvão mineral pulverizado como combustível e opera atualmente com dois turbogeradores, cada um deles com 10 MW de capacidade; inseridos em dois Ciclos Rankine com regeneração de vapor. Esses ciclos compartilham uma estação de bombeamento de água de alimentação dos geradores de vapor e com circuito aberto de água de circulação.

Em seu longo período de operação, desde o ano de 1963, essa planta foi submetida a algumas reformas e alterações em sua estrutura produtiva. Desta forma, a Figura 1 apresenta o atual diagrama funcional simplificado. Esse diagrama

está em seu nível de agregação escolhido como referência para o corrente estudo e nele estão

identificados todos os equipamentos e fluxos de

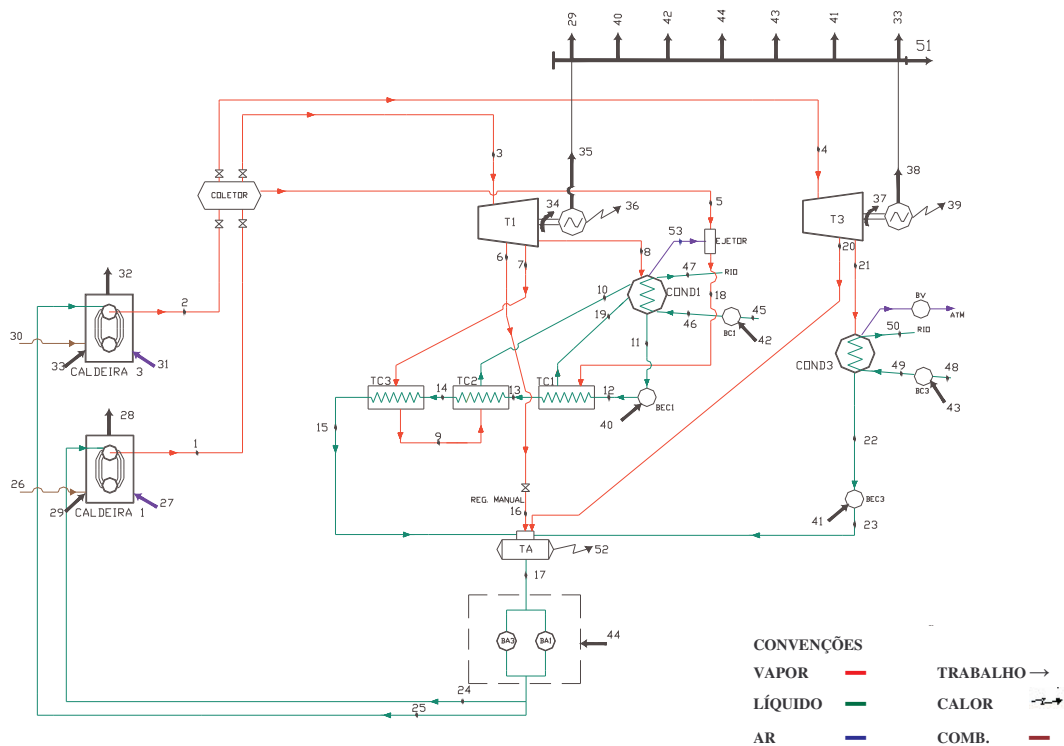


FIGURA 1. Diagrama funcional.

matéria e energia envolvidos na análise. É importante ressaltar que ambos os ciclos estão ligados a um coletor de vapor que confere uma maior flexibilidade operacional à planta, permitindo operar os dois turbogeradores com qualquer um dos geradores de vapor.

Os fluxos de energia elétrica gerados estão representados em um barramento de saída, que capta a energia elétrica gerada nos turbogeradores e a distribui para o consumo interno dos equipamentos auxiliares da planta, assim como o fluxo principal de saída para a rede.

### 3 Preparação para os testes

Após o levantamento da estrutura produtiva da usina, fez-se necessário avaliar a condição da instrumentação existente e a sua autonomia para a obtenção dos dados essenciais ao estudo. Nessa avaliação detectou-se a necessidade da instalação de novos instrumentos nos pontos selecionados para a coleta de dados, assim como efetuar sua calibração, segundo a norma ASME PTC 46 - Seção 4, relativa a instrumentos e métodos de medição. Foram estrategicamente inseridos cinco medidores de vazão do tipo placa de orifício, dezoito medidores de temperaturas do

tipo termo-resistores (RTD PT-100) e treze medidores de pressão (manômetros e vacuômetros) tipo Bourdon. Para a aquisição simultânea dos dados foi utilizado um sistema de aquisição incorporado do programa de instrumentação virtual Lab View 5.0.

Após a instalação desses instrumentos, foi efetuada uma sopragem de vapor em alguns trechos da linha de vapor, de forma a limpar a tubulação de corpos estranhos (cavacos e escórias remanescentes dos serviços de furação e soldagem), que poderiam danificar os elementos internos das turbinas. Complementando esses cuidados, para garantir a integridade e a estanqueidade da tubulação, foram efetuados ensaios de líquido penetrante em todas as soldas onde foram instalados os medidores de vazão.

Uma outra importante precaução foi efetuar a limpeza interna dos geradores de vapor e dos condensadores, de forma a restabelecer a melhor condição de transferência de calor nesses equipamentos, fator primordial para alcançar seu melhor desempenho e, conseqüentemente, o melhor desempenho da usina.

Todo esse trabalho demandaria um período prolongado de indisponibilidade da usina. Para reduzir esse tempo, os serviços de aferição e instalação dos instrumentos foram efetuados em

duas etapas, permanecendo em operação um dos ciclos de vapor de cada vez; mantendo-se assim 50% da capacidade produtiva disponível o tempo todo.

Uma vez completados os preparativos, foram realizados ensaios de desempenho da usina de acordo com as normas ASME PTC [7]. Além dessas medições de temperatura, pressão e vazão do fluido de trabalho, durante o período de execução dos testes, também foram feitas coletas para as análises imediata e elementar do carvão, assim como o monitoramento dos gases de combustão. As Tabelas 1, 2 e 3 mostram os parâmetros medidos.

**Tabela 1:** Dados para análise do circuito água/vapor

Descrição do ponto	Fluxo	T (°C)	p (bar)	m (kg/s)
Ambiente	0	25	1,01	
Saída de vapor - Caldeira 1	1	435	38,18	10
Saída de vapor - Caldeira 3	2	432	38,18	9,528
Vapor de entrada - Turbina 1	3	424	37,20	
Vapor de entrada - Turbina 3	4	422	37,20	
Entrada de vapor no ejetor	5	425	35,7	
Primeira sangria da turbina 1	6	245	5,50	
Segunda sangria da turbina 1	7	145	1,7	
Exaustão da turbina 1	8	51		
Saída de vapor do TC3	9	71,4		
Saída de vapor do TC2	10	56		
Sucção da BEC1/Saída do cond.1	11	47,5		
Saída de água da BEC1	12		9,761	
Saída de água do TC1/Entrada no TC2	13	54,2		9,028
Saída de água do TC2	14	57,8		
Saída de água do TC3	15	80	4,077	
Entrada de vapor no tanque de alim.	16	234	2,313	0,972 2
Sucção de água da bomba de alim.	17	130	4	
Saída do ejetor	18	120		0,1
Saída do TC1/Entrada do condensador	19	59,4	0,213	
Primeira sangria da turbina 3	20	197	4,6	1,5
Exaustão da turbina 3	21	62		
Sucção da BEC3/Saída do cond.3	22	58		
Saída de água da BEC3	23		9,565	8,028
Saída da bomba de alimentação/Calcd. 1	24		51,9	
Saída da bomba de alimentação/Calcd. 3	25		56,31	

**Tabela 2:** Dados para análise da UTE de Figueira utilizados nos ensaios.

Consumo de carvão na Caldeira 1 (base seca)	$\dot{m}_{25}$	1.637 kg/s
Consumo de carvão na Caldeira 3 (base seca)	$\dot{m}_{30}$	1.717 kg/s
Fração molar de O <sub>2</sub> nos gases de exaustão (base seca)		4.5%
Fração molar de CO nos gases de exaustão (base seca)		0.75%

**Tabela 3:** Características do carvão mineral

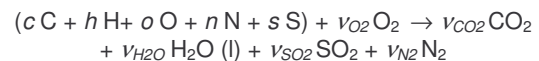
	Composição Elementar (fração em massa, %)		
	BASE ÚMIDA	BASE SECA	DAF
Carbono	49,76	54,15	75,48
Hidrogênio	3,12	3,4	4,74
Oxigênio	7,78	8,47	11,8
Nitrogênio	1,15	1,25	1,74
Enxofre	4,11	4,47	6,23
Cinzas	25,97	28,26	0
Água	8,1	0	0
Poder Calorífico			
PCS (kJ/kg)	20448,84	22294,71	31077,1
PCI (kJ/kg)	19815,5	21562,02	30055,8

#### 4 Análises energética e exergetica

Com os dados obtidos durante os ensaios é possível determinar os fluxos de exergia em cada ponto do ciclo. Para isso, é necessário estabelecer e resolver o sistema de equações, decorrente das equações de balanço de massa, de energia e de entropia, apresentadas na Tabela 4. Na solução desse sistema de equações, as eficiências dos geradores ( $\eta_{Gi}$ ) foram estimadas em 98%, enquanto que para as eficiências isentrópicas das bombas ( $\eta_{bec,i}$  e  $\eta_{BA,i}$ ) adotou-se o valor de 70%.

#### 5 Exergia do combustível

A partir das características do combustível mostradas na Tabela 3, foram calculadas as entropias absolutas e a exergia química do combustível, utilizando o procedimento descrito por [4]. Para esse cálculo considerou-se a seguinte equação de combustão completa de 1 kg de carvão DAF – Dry and Ash Free (carvão seco e isento de cinzas), em presença de oxigênio:



onde os valores  $c$ ,  $h$ ,  $o$ ,  $n$ ,  $s$  representam a composição elementar do carvão (em kmol/kg-DAF).

Um balanço de átomos conduz para:  $\nu_{CO_2} = c$ ;  $\nu_{H_2O} = h/2$ ;  $\nu_{SO_2} = s$ ,  $\nu_{N_2} = n/2$ ,  $\nu_{O_2} = c + h/4 + s - o/2$ . Os coeficientes estequiométricos da equação de combustão acima, as entropias absolutas e as exergias químicas padrão dos produtos de combustão são apresentados na Tabela 5.

A entropia específica ( $s_{DAF}$ ) e a exergia química do carvão ( $b^{ch}_{DAF}$ ) foram determinadas pelas seguintes expressões [4]:

$$s_{DAF} = c \left[ 37.1653 - 31.4767 \cdot \exp\left(\frac{-0.56 \cdot h}{c+n}\right) + \frac{20.11 \cdot o + 54.31 \cdot n + 44.67 \cdot s}{c+n} \right]$$

$$b^{ch}_{DAF} = PCS_{DAF} - T_0 \left( s_{DAF} + \nu_{O_2} \bar{s}_{O_2} - \nu_{CO_2} \bar{s}_{CO_2} - \nu_{H_2O} \bar{s}_{H_2O} - \nu_{SO_2} \bar{s}_{SO_2} - \nu_{N_2} \bar{s}_{N_2} \right) + \nu_{CO_2} \bar{b}^{ch}_{CO_2} + \nu_{H_2O} \bar{b}^{ch}_{H_2O} + \nu_{SO_2} \bar{b}^{ch}_{SO_2} + \nu_{N_2} \bar{b}^{ch}_{N_2} - \nu_{O_2} \bar{b}^{ch}_{O_2}$$

resultando os valores de  $s_{DAF} = 1.325$  kJ/kg K;  $b^{ch}_{DAF} = 32512.4$  kJ/kg.

Dos valores mostrados na Tabela 2 resulta que cada kg de carvão DAF está acompanhado de 0.1228 kg de água. Assim, o fluxo de exergia associado ao combustível pode ser calculado utilizando-se a equação:

$$\dot{B}_{fuel} = \dot{m}_{DAF} \cdot (b^{ch}_{DAF} + 0.1228 b^{ch}_{H_2O})$$

Com os fluxos de massa mostrados na Tabela 3, obtêm-se:  $\dot{B}_{26} = 38180 \text{ kW}$ ;  $\dot{B}_{30} = 40050 \text{ kW}$ .

**Tabela 4:** Equações para análise energética

$$\begin{aligned} \dot{m}_{18} &= \dot{m}_{19} \\ \dot{m}_{11} &= \dot{m}_{12} = \dot{m}_{13} = \dot{m}_{14} = \dot{m}_{15} \\ \dot{m}_5 &= \dot{m}_{18} = \dot{m}_{53} \\ \dot{m}_6 &= \dot{m}_{16} \\ \dot{m}_4 &= \dot{m}_{20} + \dot{m}_{23} \\ \dot{m}_2 &= (\dot{m}_{13} + \dot{m}_{16} + \dot{m}_{20} + \dot{m}_{23}) - \dot{m}_1 \\ \dot{m}_3 &= \dot{m}_{13} + \dot{m}_{16} \\ \dot{m}_{17} &= \dot{m}_{13} + \dot{m}_{16} + \dot{m}_{20} + \dot{m}_{23} \\ \dot{m}_9 &= \dot{m}_7 = \dot{m}_{10} \\ \dot{m}_8 &= \dot{m}_3 - \dot{m}_6 - \dot{m}_7 \\ h_{10} &= h_9 - h_{13} / \dot{m}_7 (h_{14} - h_{13}) \\ \dot{m}_7 &= \dot{m}_{13} (h_{15} - h_{14}) / (h_7 - h_9) \\ h_8 &= (\dot{m}_3 h_3 - \dot{m}_7 h_7 - \dot{m}_6 h_6 - W_{34}) / \dot{m}_8 \\ \dot{W}_{34} &= \dot{W}_{35} / \eta_{G1} \\ \dot{Q}_{36} &= \dot{W}_{34} - \dot{W}_{35} \\ h_{12} &= h_{11} + v_{11} (p_{12} - p_{11}) / \eta_{bec1} \\ \dot{W}_{40} &= \dot{m}_{13} (h_{12} - h_{11}) \\ \dot{m}_{53} &= (\dot{m}_{18} \cdot h_{18} - \dot{m}_5 \cdot h_5) / h_{53} \\ p_{11} &= p_{53} \\ \dot{Q}_{c1} &= \dot{m}_8 h_8 + \dot{m}_{10} h_{10} + \dot{m}_{19} h_{19} - \dot{m}_{11} h_{11} - \dot{m}_{53} h_{53} \\ \dot{m}_{21} &= \dot{m}_{22} = \dot{m}_{23} \\ h_{21} &= (\dot{m}_4 h_4 - \dot{m}_{20} h_{20} - \dot{W}_{37}) / \dot{m}_{21} \\ \dot{W}_{37} &= \dot{W}_{38} / \eta_{G3} \\ \dot{Q}_{39} &= \dot{W}_{37} - \dot{W}_{38} \\ h_{23} &= h_{22} + v_{22} (p_{23} - p_{22}) / \eta_{bec3} \\ \dot{W}_{41} &= \dot{m}_{23} (p_{23} - p_{22}) \\ \dot{Q}_{c3} &= \dot{m}_{23} (h_{21} - h_{22}) \\ \dot{m}_{24} &= \dot{m}_1 \\ \dot{m}_{25} &= \dot{m}_2 \\ \dot{m}_{25} &= (\dot{m}_{13} + \dot{m}_{16} + \dot{m}_{20} + \dot{m}_{23}) - \dot{m}_1 \\ \dot{W}_{44a} &= \dot{m}_{24} v_{17} (p_{25} - p_{17}) / \eta_{BA1} \\ h_{24} &= h_{17} + \dot{W}_{44a} / \dot{m}_{24} \\ \dot{W}_{44b} &= \dot{m}_{25} v_{17} (p_{25} - p_{17}) / \eta_{BA2} \\ h_{25} &= h_{17} + \dot{W}_{44b} / \dot{m}_{25} \\ \dot{W}_{44} &= \dot{W}_{44a} + \dot{W}_{44b} \\ \dot{Q}_1 &= \dot{m}_{23} h_{23} + \dot{m}_{20} h_{20} + \dot{m}_{16} h_{16} + \dot{m}_{15} h_{15} - \dot{m}_{17} h_{17} \\ \dot{Q}_1 &= \dot{m}_1 (h_1 - h_{24}) \\ \dot{Q}_3 &= \dot{m}_2 (h_2 - h_{25}) \\ \dot{m}_{45} &= \dot{m}_{46} = \dot{m}_{47} \\ \dot{m}_{48} &= \dot{m}_{49} = \dot{m}_{50} \\ h_{46} &= h_{45} + \dot{W}_{42} / \dot{m}_4 \\ \dot{m}_{46} &= \dot{Q}_{c1} / (h_{47} - h_{46}) \\ h_{49} &= h_{48} + \dot{W}_{43} / \dot{m}_{48} \\ \dot{m}_{49} &= \dot{Q}_{c3} / (h_{50} - h_{49}) \\ \dot{W}_{42} &= \dot{m}_{45} \cdot v_{45} (p_{46} - p_{43}) / \eta_{b1} \\ \dot{W}_{43} &= \dot{m}_{48} \cdot v_{48} (p_{49} - p_{48}) / \eta_{b1} \end{aligned}$$

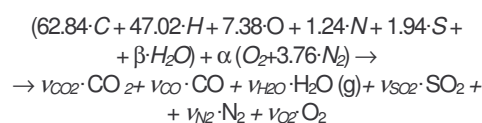
**Tabela 5:** Valores para o cálculo de entropia e da exergia do combustível ( $T_0 = 298,15 \text{ K}$  e  $p_0 = 1 \text{ atm}$ ).

Substância	v [kmol/ kg carvão DAF]	$\bar{s}_o$ [kJ/kmol K] <sup>(a)</sup>	$\bar{b}^{ch}$ [kJ/kmol] <sup>(a)</sup>
O <sub>2</sub> (g)	0.07284	205.15	3970
CO <sub>2</sub> (g)	0.06284	231.79	19870
H <sub>2</sub> O (l)	0.02351	69.95	9500
SO <sub>2</sub> (g)	0.00194	248.09	313400
N <sub>2</sub> (g)	0.00062	191.61	720

<sup>(a)</sup> Bejan et. Al. 1996.

## 6 Exergia dos produtos da combustão

A reação de combustão de uma tonelada de carvão DAF pode ser representada pela seguinte expressão:



onde  $\beta$  representa a quantidade de água (em kmols) que entra nos geradores de vapor com uma tonelada de carvão DAF. A quantidade de produtos formados pode ser obtida pela solução do sistema de equações formado a partir dos balanços de átomos (de C, H, O, N e S) e dos valores conhecidos das concentrações de O<sub>2</sub> e CO nos gases de exaustão (Tabela 3). Conhecidos os coeficientes da reação de combustão, torna-se possível obter as frações molares ( $y_i$ ) dos gases de combustão. Os resultados deste cálculo estão mostrados na Tabela 6. A partir das frações molares dos produtos da combustão, foram calculados os fluxos de massa e de exergia associados aos gases da combustão [8].

**Tabela 6.** Coeficientes da reação de combustão do carvão e frações molares dos produtos da combustão.

$\alpha = 90.35$	$\beta = 6.818$
$v_{CO_2} = 59.66$	$y_{CO_2} = 0.1313$
$v_{CO} = 3.182$	$y_{CO} = 0.007$
$v_{H_2O} = 30.33$	$y_{H_2O} = 0.06672$
$v_{N_2} = 340.3$	$y_{N_2} = 0.7488$
$v_{O_2} = 19.09$	$y_{O_2} = 0.042$
$v_{SO_2} = 1.943$	$y_{SO_2} = 0.004275$

## 7 Custos exergéticos e econômicos

Através da aplicação da Teoria dos Custos Exergéticos [6] é possível avaliar os custos (exergéticos e econômicos) de todos os fluxos de matéria e de energia da planta. Isso demanda definir os fluxos ou combinações de fluxos que constituem os produtos (P), os combustíveis (F) e as perdas (L) de cada subsistema. Neste estudo, tais definições estão estabelecidas como mostrado na Tabela 7.

**Tabela 7.** Definição dos combustíveis (F), produtos (P) e perdas (L).

EQUIPAMENTO	Insumo (F)	Produto (P)	Perdas (L)
Caldeira 1	26+27+29	1-24	28
Coletor	1+2	3+4+5	
Turbina 1	3-6-7-8	34	
Gerador 1	34	35	36
Bomba de Extração 1	40	12-11	
Trocador de Calor 1	18-19	13-12	
Trocador de Calor 2	9-19	14-13	
Trocador de Calor 3	7-9	15-14	
Tanque de Alimentação	15+16+20+23	17	52
Estação de Bombeamento	44	25+24-17	
Bomba de Circulação 1	42	46-45	
Ejetor	5 + 53	18	
Caldeira 3	30+31+33	2-25	32
Turbina 3	4-20-21	37	
Gerador 3	37	38	39
Bomba de Circulação 3	43	49-48	
Bomba de Extração 3	41	23-22	
Barramento	35+38	51+(29+40+42+44+43+41+33)	

As regras de atribuições de custos propostas por [6] permitem formar o sistema de equações mostrado na Tabela 8, cuja resolução fornece os custos exergéticos  $B$  de cada fluxo. Estes custos exergéticos foram usados para se obter os custos exergéticos unitários de cada fluxo  $k^* = B^*/B$ . Os custos econômicos de cada fluxo foram também calculados levando-se em conta apenas as despesas relativas ao combustível (utilizando o custo unitário de 43.10 \$/ton – base seca ou 1.86 \$/GJ-ex). Os custos calculados estão mostrados na Tabela 9.

A Tabela 10 mostra as eficiências e os custos exergéticos de cada unidade da planta.

**Tabela 8:** Equações para o cálculo dos custos exergéticos.

Conservação dos custos exergéticos	
$B_{24}^* + B_{26}^* + B_{27}^* + B_{29}^* - B_{1}^* - B_{28}^* = 0$	
$B_{1}^* + B_{2}^* - (B_{3}^* + B_{4}^* + B_{5}^*) = 0$	
$B_{3}^* - (B_{6}^* + B_{7}^* + B_{8}^* + B_{34}^*) = 0$	
$B_{34}^* - (B_{35}^* + B_{36}^*) = 0$	
$B_{9}^* + B_{10}^* + B_{19}^* + B_{46}^* - (B_{11}^* + B_{47}^* + B_{53}^*) = 0$	
$B_{11}^* + B_{40}^* - B_{12}^* = 0$	
$B_{12}^* + B_{18}^* - (B_{13}^* + B_{19}^*) = 0$	
$B_{9}^* + B_{13}^* - (B_{10}^* + B_{14}^*) = 0$	
$B_{7}^* + B_{14}^* - (B_{9}^* + B_{15}^*) = 0$	
$B_{6}^* - B_{16}^* = 0$	
$B_{15}^* + B_{16}^* + B_{20}^* + B_{23}^* - (B_{17}^* + B_{52}^*) = 0$	
$B_{17}^* + B_{44}^* - (B_{24}^* + B_{25}^*) = 0$	
$B_{42}^* + B_{45}^* - B_{46}^* = 0$	
$B_{5}^* + B_{53}^* - B_{18}^* = 0$	
$B_{25}^* + B_{30}^* + B_{31}^* + B_{33}^* - (B_{2}^* + B_{32}^*) = 0$	
$B_{4}^* - (B_{20}^* + B_{21}^* + B_{37}^*) = 0$	
$B_{37}^* - (B_{38}^* + B_{39}^*) = 0$	
$B_{21}^* + B_{49}^* - (B_{22}^* + B_{50}^*) = 0$	
$B_{43}^* + B_{48}^* - B_{49}^* = 0$	
$B_{22}^* + B_{41}^* - B_{23}^* = 0$	
$B_{35}^* + B_{38}^* - B_{29}^* - B_{33}^* - B_{40}^* - B_{41}^* - B_{42}^* - B_{43}^* - B_{44}^* - B_{51}^* = 0$	

Regras de atribuição dos custos exergéticos	
$B_{28}^* = 0$	$B_9^*/B_9 - B_{10}^*/B_{10} = 0$
$B_{26}^* - B_{26} = 0$	$B_7^*/B_7 - B_9^*/B_9 = 0$
$B_{27}^* - B_{27} = 0$	$B_{52}^* = 0$
$B_{32}^* = 0$	$B_{51}^*/B_{51} - B_{29}^*/B_{29} = 0$
$B_{30}^* - B_{30} = 0$	$B_{51}^*/B_{51} - B_{33}^*/B_{33} = 0$
$B_{31}^* - B_{31} = 0$	$B_{51}^*/B_{51} - B_{40}^*/B_{40} = 0$
$B_3^*/B_3 - B_4^*/B_4 = 0$	$B_{51}^*/B_{51} - B_{41}^*/B_{41} = 0$
$B_3^*/B_3 - B_5^*/B_5 = 0$	$B_{51}^*/B_{51} - B_{42}^*/B_{42} = 0$
$B_3^*/B_3 - B_6^*/B_6 = 0$	$B_{51}^*/B_{51} - B_{43}^*/B_{43} = 0$
$B_3^*/B_3 - B_7^*/B_7 = 0$	$B_{51}^*/B_{51} - B_{44}^*/B_{44} = 0$
$B_3^*/B_3 - B_8^*/B_8 = 0$	$B_{47}^* = 0$
$B_4^*/B_4 - B_{20}^*/B_{20} = 0$	$B_{11}^*/B_{11} - B_{53}^*/B_{53} = 0$
$B_4^*/B_4 - B_{21}^*/B_{21} = 0$	$B_{50}^* = 0$
$B_{36}^* = 0$	$B_{45}^* = B_{45}$
$B_{39}^* = 0$	$B_{48}^* = B_{48}$
$B_{18}^*/B_{18} - B_{19}^*/B_{19} = 0$	$B_{24}^*/B_{24} - B_{25}^*/B_{25} = 0$

**Tabela 9:** Propriedades termodinâmicas e custos exergéticos

Fluxo	PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS					CUSTO EXERGÉTICO			
	m (KG/S)	T (OC)	p (bar)	h (kJ/kg)	E (kW)	B (kW)	B* (kW)	K*	C (R\$/h)
0		25,0	1,010	104,0					
1	10,000	435,0	38,180	3298,0	31940,000	12420,000	58249,452	4,690	241,177
2	9,528	432,0	38,180	3291,0	30365,736	11790,000	59672,512	5,061	228,943
3	9,819	424,0	37,200	3274,0	31126,230	12120,000	60091,036	4,958	235,351
4	9,528	422,0	37,200	3270,0	30165,648	11640,000	57711,193	4,958	226,030
5	0,020	425,0	35,700	3279,0	62,770	24,150	119,736	4,958	0,469
6	0,972	245,0	5,500	2948,0	2764,937	782,400	3879,144	4,958	15,193
7	0,391	145,0	1,700	2760,0	1037,434	225,900	1120,014	4,958	4,387
8	8,428	51,0	0,130	2438,0	19670,952	1561,000	7739,448	4,958	30,312
9	0,391	71,4	0,331	586,7	188,543	20,460	101,441	4,958	0,397
10	0,419	56,0	0,165	234,8	54,818	2,452	2,642	1,077	0,048
11	9,028	47,5	0,109	198,9	856,757	30,000	6331,804	211,060	0,583
12	9,028	47,6	9,761	200,3	869,396	39,070	6408,329	164,022	0,759
13	9,028	54,2	8,624	226,8	1108,638	50,020	9343,229	186,790	0,971
14	9,028	57,8	6,351	242,0	1245,864	62,960	9442,028	149,969	1,223
15	9,028	80,0	4,077	336,0	2094,496	181,500	10460,601	57,634	3,524
16	0,972	234,0	2,313	2937,0	2754,243	663,800	3879,144	5,844	12,890
17	19,530	130,0	4,000	546,2	8636,166	1274,000	30959,968	24,301	24,739
18	0,100	120,0	0,230	2724,0	262,000	29,550	3013,370	101,975	0,574
19	0,100	59,4	0,213	249,1	14,510	0,770	78,470	101,975	0,015
20	1,500	197,0	4,600	2851,0	4120,500	1113,000	5518,261	4,958	21,613
21	8,028	62,0	0,219	2425,0	18632,988	1990,000	9866,432	4,958	38,643

PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS					CUSTO EXERGÉTICO				
22	8,028	58,0	0,182	243,2	1117,498	67,060	11035,527	164,562	1,302
23	8,028	58,5	9,565	244,6	1128,737	75,040	11101,962	147,947	1,457
24	10,000	130,5	51,900	553,5	4495,000	718,600	16262,168	22,630	13,954
25	9,528	130,6	56,310	554,2	4289,506	689,600	15605,888	22,630	13,391
26	1,174	X	X	X	35285,780	38170,000	38170,000	1,000	741,200
27		25,0	1,010		54,860	54,860	54,860	1,000	1,065
28	15,850	178,0	1,010	X	3204,000	3204,000	0,000	0,000	62,217
29	X	X	X	X	619,000	619,000	3762,424	6,078	12,020
30	1,232	X	X	X	37028,720	40040,000	40040,000	1,000	777,513
31		25,0	1,010		57,540	57,540	57,540	1,000	1,117
32	16,660	178,0	1,010	X	3360,000	3360,000	0,000	0,000	65,246
33	X	X	X	X	653,000	653,000	3969,084	6,078	12,680
34	X	X	X	X	7655,000	7655,000	47352,430	6,186	148,648
35	X	X	X	X	7502,000	7502,000	47352,430	6,312	145,677
36	X	X	X	X	153,100	0,000	0,000	0,000	0,000
37	X	X	X	X	7402,000	7402,000	42326,499	5,718	143,735
38	X	X	X	X	7254,000	7254,000	42326,499	5,835	140,861
39	X	X	X	X	148,000	0,000	0,000	0,000	0,000
40	X	X	X	X	12,590	12,590	76,525	6,078	0,244
41	X	X	X	X	10,930	10,930	66,435	6,078	0,212
42	X	X	X	X	245,100	228,800	1390,699	6,078	4,443
43	X	X	X	X	209,600	190,400	1157,295	6,078	3,697
44	X	X	X	X	149,400	149,400	908,088	6,078	2,901
45	504,200	27,0	1,013	112,5	4285,700	14,180	14,180	1,000	0,275
46	504,200	27,1	3,500	113,0	4537,800	140,500	1404,879	9,999	2,728
47	504,200	36,0	1,013	150,4	23394,880	421,500	0,000	0,000	8,185
48	419,500	27,0	1,013	112,5	3565,750	11,800	11,800	1,000	0,229
49	419,500	27,1	3,500	113,0	3775,500	116,900	1169,095	10,001	2,270
50	419,500	37,0	1,013	154,7	21268,650	416,500	0,000	0,000	8,088
51	X	X	X	X	13250,000	12890,000	78348,380	6,078	250,303
52	X	X	X	X	1462,000	0,000	0,000	0,000	0,000
53	0,080	47,7	0,109	2587,0	199,211	13,710	2893,634	211,060	0,266

Tabela 10: Eficiências e custos exergeticos dos equipamentos da planta

EQUIPAMENTO	Eficiências		Propriedades do Combustível		Propriedades do Produto		K <sub>p</sub> */K <sub>F</sub> *
	Energética	Exergética	B (kW)	kF*	B (kW)	KP*	
Caldeira 1	0,763	0,301	38843,86	1,081	11701,4	3,588	3,32
Coletor	1	0,978	24210	4,871	23784,15	4,958	1,018
Turbina 1	1	0,809	9550,7	4,958	7655	6,186	1,248
Gerador 1	0,98	0,98	7655	6,186	7502	6,312	1,02
Condensador 1	1		1704,722	5,412	465,21	19,831	3,664
Bomba de Extração 1	1	0,72	12,59	6,078	9,07	8,437	1,388
Trocador de Calor 1	1	0,38	28,781	101,975	10,95	268,027	2,628
Trocador de Calor 2	1	0,719	18,008	5,486	12,94	7,635	1,392
Trocador de Calor 3	1	0,577	205,44	4,958	118,54	8,593	1,733
Válvula K	1		782,4	4,958	663,8	5,844	1,179
Tanque de Alimentação	0,855	0,627	2033,34	15,226	1274	24,301	1,596
Estação de Bombeamento	1	0,778	149,4	6,078	134,2	6,767	1,113
Bomba de Circulação 1	1	0,552	228,8	6,078	126,32	11,009	1,811
Ejetor	1	0,925	37,86	79,592	29,55	101,975	1,281
Caldeira 3	0,691	0,272	40750,54	1,081	11100,4	3,97	3,671
Turbina 3	1	0,802	8537	4,958	7402	5,718	1,153
Gerador 3	0,98	0,98	7402	5,718	7254	5,835	1,02
Condensador 3	1		2106,9	5,238	483,56	22,821	4,357
Bomba de Circulação 3	1	0,552	190,4	6,078	105,1	11,011	1,812
Bomba de Extração 3	1	0,73	10,93	4,209	7,98	8,325	1,978
Barramento	1	1	14756	6,077	14754,12	6,078	1
PLANTA	0,183	0,165	78322,4	1	12890	6,078	6,078

## 8 Discussão

Uma análise dos valores apresentados nas Tabelas 9 e 10 permitem fazer as seguintes observações:

1. Os custos exergéticos unitários dos produtos das caldeiras 1 e 3 são respectivamente 3,3 e 3,6 vezes maiores que os dos fluxos dos combustíveis processados. Isso se deve à grande irreversibilidade dos processos que ocorrem nesses equipamentos (combustão e transferência de calor dos gases para a água), bem como à perda de exergia com os gases de exaustão;
2. Os custos exergéticos unitários dos fluxos de condensado que saem do condensador são relativamente altos (da ordem de 20). Isso se deve à característica dissipativa desses equipamentos. Assim, o custo exergético dos fluxos de entrada reflete-se no fluxo de saída, que tem baixo conteúdo de exergia.
3. Turbinas e geradores não provocam aumentos significativos nos custos exergéticos unitários, em função de apresentarem eficiências satisfatórias. Esses aumentos são um pouco maiores no caso das bombas.
4. O tanque de alimentação que opera como um trocador de calor de mistura (tanque "flash"), também contribui para o aumento do custo exergético em função das destruições de exergia, decorrente do processo de mistura de fluidos em diferentes estados termodinâmicos.
5. A exergia do combustível é utilizada conforme mostrado na Figura 2. A eficiência exergética da planta é de apenas 16,5%. A Figura 2 também mostra que as caldeiras respondem por 86% da irreversibilidade total da planta.

## 9 Conclusão

As avaliações de desempenho energético, na prática, são baseadas na Primeira Lei da Termodinâmica. Em face de seu caráter conservativo, tais avaliações são capazes de enxergar apenas as perdas de energia e não permitem julgar sobre a qualidade dessa energia perdida. O conceito de exergia, de outro modo, quando aplicado na análise de um subsistema ou de uma planta inteira, permite tanto avaliar as degradações da energia, como obter uma medida da qualidade das perdas energéticas. Assim, é possível determinar corretamente a eficiência da planta e de seus subsistemas. Isso mostra que os testes convencionais de desempenho, conforme preconizados pela ASME, são insuficientes quando se deseja determinar as causas do baixo desempenho dos equipamentos de uma planta e

quantificar seus efeitos sobre o consumo adicional de combustíveis, quando comparado com o previsto.

Com algum esforço extra em medições e cálculos não muito complexos, como mostrado neste trabalho, o clássico teste de desempenho, segundo a norma ASME, cujo objetivo central é determinar a eficiência global das unidades, pode também fornecer os custos exergéticos e econômicos de cada fluxo de matéria e de energia, bem como as eficiências exergéticas de cada um dos equipamentos que constitui a planta.

Finalmente, pode-se afirmar que a análise exergética apresenta-se como uma poderosa ferramenta para projetar, avaliar, e aperfeiçoar sistemas térmicos. Sua importância prática tem sido demonstrada em vários estudos aplicados na análise de diferentes sistemas energéticos, utilizando diferentes combustíveis, tais como plantas térmicas convencionais de geração de energia, usinas nucleares, ciclos combinados e plantas petroquímicas e de cogeração.

Finalizando, este estudo mostra que as maiores fontes de irreversibilidades da planta analisada estão nos geradores de vapor, cujas eficiências resultaram em 30,1% e 27,2%, respectivamente para as caldeiras 1 e 3. Verificou-se que esses equipamentos juntos contribuem com 86% da irreversibilidade total da planta, o que comprova as previsões da literatura a respeito.

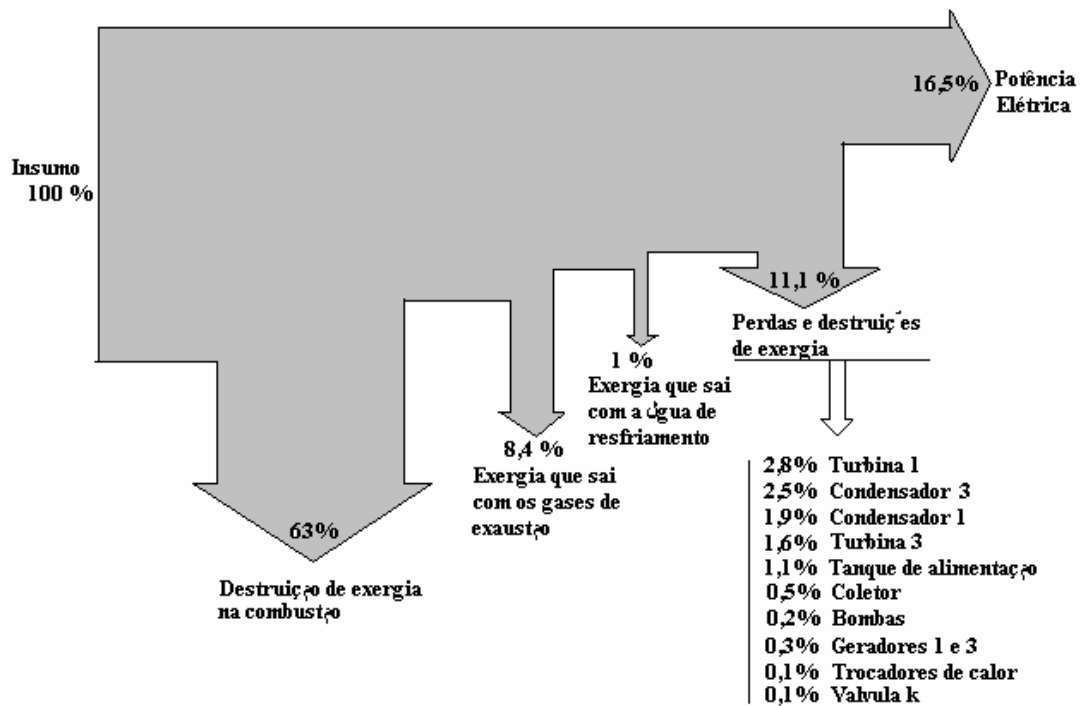


Figura 2: Distribuição da exergia do combustível.

## 10 Referências

- [1] KOTAS T. J. The exergy method of thermal plant analysis. Krieger, Melbourne, FL, 1995.
- [2] Moran M. J. Availability analysis: a guide to efficient energy use. ASME Press, New York, 1989.
- [3] Sama D. A. The use of second law of thermodynamics in process designs. Transactions of the ASME, Journal of Energy Resources Technology. V 117, pp. 179 – 185, 1995.
- [4] Bejan A., Tsatsaronis G., Moran M. Thermal design and optimization. John Wiley & Sons, Inc, New York, 1996.
- [5] Tsatsaronis G. Thermo-economic analysis and optimization of energy systems, Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 19, 1993, p. 227-257.
- [6] Lozano M. A., Valero A. Theory of the exergetic cost. Energy. Vol. 18, No. 9, pp. 939 – 960, 1993.
- [7] American Society of Mechanical Engineers - ASME PTC 46-1996; Performance test code on overall plant performance. 1997. New York.
- [8] Moran M. J., Shapiro H. N. Fundamentals of engineering thermodynamics. John Wiley & Sons Inc. 4th Edition, New York, 1999.
- [9] Ministério das Minas e Energia do Brasil - MME, Portaria nº 43 do Decreto nº 3371 de 24/02/2000.
- [10] Tiago Filho G. L., Perspectivas das PCHs face ao novo quadro institucional do Brasil. CERPCH Notícias, Jun/Jul/Ago/99. Available: <http://www.cerpch.efei.br>.