



**XV SNTPEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

**GPT/08**

**17 à 22 de outubro de 1999  
Foz do Iguaçu – Paraná - Brasil**

**GRUPO II  
GRUPO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS (GPT)**

**AVALIAÇÃO TERMOECONÔMICA COMO FATOR COMPARATIVO ENTRE CONFIGURAÇÕES DE  
USINAS TERMOELÉTRICAS**

Jean Cesare Negri  
CESP/EPUSP

Silas Vieira \*  
CESP/EPUSP

Silvio de Oliveira Júnior  
IPT/EPUSP

**RESUMO**

É apresentado no presente trabalho uma avaliação termoeconômica de sete módulos de geração termoeletrica e de cogeração, escolhidos baseados no binômio “tecnologia - combustível”. Cada configuração é analisada em três condições de operação, ou seja, com fator de capacidade máximo, com meia carga e com 25 % da carga elétrica nominal. A valorização dos custos específicos dos produtos gerados (eletricidade e vapor ou gases de escape), foi efetuada aplicando-se os métodos de partição dos custos da igualdade e da extração, para as condições de cogeração e da eletricidade, na geração como central termoeletrica.

**PALAVRAS-CHAVE:**

Análise Termoeconômica, Usina Termoeletrica, Exergia, Planejamento Energético

**1.0 – INTRODUÇÃO**

No atual contexto de reestruturação institucional por qual passa o Setor Elétrico Brasileiro, as empresas geradoras de eletricidade que estão surgindo da desverticalização da antes sua monopolizada estrutura, estarão focando seus objetivos e ações na busca da eficiência operacional, procurando reduzir seus custos, ampliando, no entanto, a disponibilidade de energia elétrica.

O papel da comercialização de energia elétrica é redimensionada em todas as empresas, principalmente as geradoras, objetivando tanto a manutenção dos atuais clientes como a atração de clientes novos. O desenvolvimento de projetos de expansão de geração mais eficazes estarão sendo adequados ao mercado em que estas empresas estão inseridas, alocando recursos

prioritariamente aos projetos mais rentáveis.

Há ainda pouca tradição no desenvolvimento e na implantação de empreendimentos termoeletricos no Brasil, que traz como dificuldade inerente a obtenção de dados e de custos de investimentos devido à diversidade de configuração, origem, formatação e base técnico-econômica existentes. A exceção é encontrada no sul do país, que com um parque gerador a carvão nacional de 1.040 MW instalados, já possui capacitação e um conjunto de informações técnico-econômicas disponível de alto nível. As diversidades tendem a ser maiores quando se observa que uma mesma tecnologia pode apresentar diferentes modularizações e configurações de equipamentos.

Embora a cogeração seja conhecida desde o século passado, é relativamente recente o interesse dos empresários nesta modalidade de geração conjunta de calor e trabalho, nos mais diversos setores industriais e não apenas dos setores tradicionalmente envolvidos, casos das industrias sucro-alcooleira e de papel e celulose. Nos próximos anos, as unidades de cogeração estão mais voltadas para a venda de energia elétrica, enquanto o calor é utilizado no processo da indústria. Essa nova atenção à cogeração quer seja para atingir a auto-suficiência ou para a comercialização do excedente de eletricidade, ainda carecem de maior clareza no que diz respeito à legislação.

Nesse contexto, na necessidade do desenvolvimento de análises adequadas para comparar entre si as mais diversas alternativas térmicas de geração conjunta de energia elétrica e de calor, a utilização da metodologia através da Segunda Lei da Termodinâmica, utilizando a análise da exergia e da termoeconomia, se mostra peculiar e apropriada. Com efeito, e do demonstrado no presente trabalho, a análise termoeconômica permite caracterizar efetivamente a performance das

conversões energéticas que ocorrem numa unidade de geração de eletricidade e de calor, quantificando o valor dos fluxos de energia que percorrem este sistema.

Foram analisados no presente trabalho, sete módulos já consagrados para a geração combinada de energia elétrica e de calor, considerando também estes mesmos módulos gerando apenas eletricidade.

Cada módulo foi analisado em três condições de operação, a saber: com o fator de capacidade máximo, com operação em meia carga (50 %) da potência nominal, e operando com apenas 25 % da carga nominal. Visto que as curvas de rendimento tanto das configurações com turbina a gás como as com turbina a vapor, não serem lineares optou-se pela utilização dos dados demonstrados em EPRI[1].

## 2.0 – CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE DOS MÓDULOS DE GERAÇÃO ELÉTRICA E DE COGERAÇÃO

### 2.1 – Análise Termoeconômica

Através da análise exergética de uma unidade de potência é possível caracterizar de que maneira a exergia disponível no combustível é utilizada e destruída durante os processos de conversão de energia. A exergia disponível é devida à queima de um combustível, empregado como insumo energético.

O desenvolvimento da análise termoeconômica foi efetuada para as configurações de módulos e respectivos combustíveis apresentados na Tabela 1, com o fim de permitir avaliar e comparar entre si criteriosamente, tecnologias diferentes. A escolha das configurações foi realizada a partir de módulos usuais e padronizados, contemplando também, nos custos, o aproveitamento dos gases de escape e vapor d'água, na utilização de processos de cogeração.

A valorização econômica dos fluxos termodinâmicos que percorrem estes ciclos será efetuada para as três condições de operação anteriormente citadas, sempre com enfoque para o aproveitamento do vapor ou dos gases de escape para a cogeração.

O Custo Exergético ( $c_{comb}$ ) que entra no sistema, fornecido pelo combustível é calculado a partir da seguinte Equação:

$$c_{comb} = \frac{C_{comb}}{\phi PCI} \quad (1)$$

Os cálculos econômicos para a definição dos custos específicos dos fluxos exergéticos foram conduzidos com base na seguinte Equação Geral do balanço de custo:

$$\sum Ex_s c_{ex} = \sum Ex_e c_{ex} + CC_{equip} \quad (2)$$

Serão utilizados nesses cálculos, três critérios para valorização do custo específico do fluxo de exergia, a saber:

- Método da Igualdade: considera-se que o custo específico dos gases de escape tem o mesmo valor que a energia elétrica produzida no gerador, ou seja, o custo da turbina é repartido entre a eletricidade e o vapor /gases de escape:

$$c_{igual} = \frac{Ex_e c_{comb} + CC_{tot}}{Ex_s + W_{ger}} \quad (3)$$

- Método da Extração: o custo específico dos gases de escape tem o mesmo valor do combustível fornecido ao módulo, ou seja, o custo da turbina é descarregado para o custo da eletricidade:

$$c_{extr} = c_{comb} \left( \frac{Ex_e - Ex_s}{W_{ger}} \right) + \frac{CC_{tot}}{W_{ger}} \quad (4)$$

- Método da Eletricidade: apenas a eletricidade é valorizada, sendo os gases de escape considerados como subproduto sem valor comercial.

$$c_{eletr} = \frac{Ex_e c_{comb} + CC_{tot}}{W_{ger}} \quad (5)$$

Para os módulos em Ciclo Combinado, os custos obtidos através dos balanços termoeconômicos serão:

- Balanço para o Ciclo a Gás:

$$Ex_{comb} c_{comb} + CC_{turb} = W_{Brayton} C_{elBrayton} + Ex_{ge} C_{ge} \quad (6)$$

- Balanço para o Ciclo a Vapor:

$$Ex_{ge} c_{ge} + CC_{Rankine} = W_{Rank} C_{elRank} + Ex_{vb} c_{vb} \quad (7)$$

No Ciclo a Gás, aplicando o método da igualdade, onde o custo específico dos gases de escape tem o mesmo valor do custo da eletricidade gerada, tem-se:

$$c_{el1} = c_{ge} = \frac{Ex_e c_{comb} + CC_{turb}}{W_{Brayton} + Ex_{ge}} \quad (8)$$

e no Ciclo a Vapor:

$$c_{el2} = \frac{c_{el1}}{\eta_{ex}(Rankine)}} + \frac{CC_{Rankine}}{W_{Rankine}} \quad (9)$$

onde a eficiência exergética ( $\eta_{ex}$ ) é dada pela seguinte expressão:

$$\eta_{ex} = \frac{W_{Rankine} + Ex_{vb}}{Ex_{ge}} \quad (10)$$

Na aplicação do método da extração, ou seja, onde os gases de escape tem o mesmo valor que o combustível utilizado, no ciclo a gás será:

$$c_{extr1} = \frac{c_{comb}(Ex_{comb} - Ex_{ge})}{W_{Brayton}} + \frac{CC_{turb}}{W_{Brayton}} \quad (11)$$

e no ciclo a vapor:

$$c_{extr2} = \frac{c_{comb}}{\eta_{ex(Rankine)}} + \frac{CC_{Rankine}}{W_{Rankine}} \quad (12)$$

O custo médio da eletricidade gerada no ciclo combinado é dado pela equação a seguir:

$$c_{eletr} = \frac{(c_{el}W)_{Brayton} + (c_{el}W)_{Rankine}}{W_{Brayton} + W_{Rankine}} \quad (13)$$

Se, entretanto, os gases de escape não forem utilizados, significando que seu valor será nulo, sendo valorizada apenas a energia elétrica, o custo específico será dado por:

$$c_{eletr} = \frac{Ex_g c_{comb} + CC_{tot}}{W_{Brayton} + W_{Rankine}} \quad (14)$$

Ressalte-se que no caso onde não haverá cogeração a geração de energia elétrica será superior ao sistema com cogeração, uma vez que a totalidade do vapor gerado será utilizado na turbina a vapor.

## 2.2 – Caracterização dos módulos analisados

Na Tabela 2 estão apresentados os custos de investimentos dos módulos termoeletrônicos. Estes dados balizaram as análises termoeconômicas aqui desenvolvidas.

Para a definição dos Custos de Capital investidos nos equipamentos, foi utilizado o Fator de Recuperação de Capital (FRC) considerando uma taxa de juros de 12 % ao ano e vida útil de 20 anos. O investimento considerado será o investimento total sem os Juros Durante a Construção (JDC).

Todos os valores de investimentos para os módulos aqui utilizados tiveram como fonte principal o documento produzido pelo EPRI [1], com exceção do módulo de 500 MW utilizando carvão da mina de Candiota, onde os dados foram obtidos junto à Eletrosul [2], e do módulo em Ciclo Diesel cujo custo de investimento considerado foi obtido em PROMON [3], através do custo específico de geração.

TABELA 2 – CUSTO DE INVESTIMENTO TOTAL DOS MÓDULOS

MÓDULO	POTÊNCIA (MW)	CUSTO DE INVESTIMENTO (US\$ * 10 <sup>3</sup> )
1	85	34.701,73
2	168	58.693,06
3	442	202.401,46
4	400	434.629,87
5	500	700.000,00
6	400	363.016,34
7	13	9.243,00

Como simplificações adotadas para o desenvolvimento dos cálculos aqui apresentados, em todas as configurações, não foram consideradas as perdas de carga e as perdas de calor ao longo dos processos, e o combustível utilizado nos módulos com turbina a gás e em ciclo combinado, o gás natural foi considerado como sendo composto apenas por metano.

Os preços considerados para os combustíveis líquidos derivados do petróleo, ou seja, o óleo combustível leve tipo 1B e o óleo combustível ultraviscoso tipo 9A, foram os constantes na Portaria n°. 145, de 03.07.97, estabelecidos pelo Ministério de Estado da Fazenda.

Com referência ao carvão de Candiota, o preço utilizado é o estabelecido pela Eletrobrás, para esse combustível. Para o carvão da Colômbia, o preço foi o que consta no relatório da PROMON [3]. O preço considerado para o gás natural e utilizado nos cálculos, foi o valor de referência extra-oficial.

## 3.0 – ANÁLISE COMPARATIVA DOS MÓDULOS

O cálculo dos custos do fluxo de exergia através da aplicação dos princípios da termoeconomia permite que se identifique os custos envolvidos em cada equipamento analisado, o que possibilita, de forma clara, a identificação e a comparação entre todos componentes, e seus efeitos no custo final do produto. Essa identificação permite que se tenha, de forma objetiva, a identificação do componente de maior custo e, portanto, possível de otimização.

As Tabelas 6 até 8 apresentadas, compilam as informações referentes às varias configurações analisadas, permitindo melhor observação e sensibilidade dos resultados obtidos através da aplicação dos conceitos de exergia e de termoeconomia.

O critério escolhido para o parâmetro de comparação foi o agrupamento dos módulos obedecendo ao fator de disponibilidade de operação operando em regime de complementação termoeletrônica num sistema hidrotérmico.

Como explicado anteriormente, em todas as configurações analisadas, os cálculos foram efetuados considerando a operação desses módulos com o aproveitamento do vapor/gases de escape para utilização no processo. Portanto, os gases de escape das turbinas a gás e do motor diesel seriam aproveitados numa caldeira de recuperação bem como o vapor na saída das turbinas a vapor, seriam utilizados.

Cabe aqui ressaltar que a cogeração é prática difundida em vários setores industriais, no entanto, nem sempre se busca uma otimização no uso dos combustíveis empregados, o que provoca perdas desnecessárias e indesejáveis nessas unidades industriais devido à ocorrência de eventuais desequilíbrios entre os requisitos de potência térmica e mecânica (ou elétrica)

A prática da cogeração está mais difundida no setor sucro-alcooleiro, embora a utilização do bagaço de cana não seja efetuada da forma mais adequada. Tal setor detém o maior potencial de cogeração do estado de São Paulo.

A maior disseminação da cogeração ainda não foi conseguida por problemas principalmente de ordem financeira, porque a tarifa a ser paga pela concessionária compradora da energia elétrica excedente, por força legal, não pode ultrapassar o Custo Marginal da Expansão da Geração de Longo Prazo praticado pelo setor elétrico, situado atualmente em US\$ 40,00/MWh. Este valor é em função dos cálculos que a Eletrobrás pressupõe que balizarão os investimentos em Usinas Termoelétricas a Gás Natural.

Na Tabela 3, que apresenta os valores na condição de fator de disponibilidade máximo, os custos específicos dos sistemas de cogeração apresentam valores abaixo do Custo Marginal de Expansão da Geração, em ambos métodos de partição de custos. A observação dos custos de geração apenas da eletricidade demonstra que os valores obtidos permanecem abaixo dos atuais US\$ 40,00/MWh, exceto no Ciclo Rankine com carvão importado da Colômbia.

Considerando os custos mostrados na Tabela 3, se comparados com as tarifas convencionais atualmente praticadas para os grandes consumidores de energia elétrica, mostrados na Tabela 6, observa-se então, que os obtidos através da análise termoeconômica se mostram competitivos.

#### TABELA 6 - TARIFAS DE FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA (CONVENCIONAL)

	DISCRIMINAÇÃO	CONSUMO (R\$/MWh)
A2	88 a 138 kV	31,76
A3	69 kV	34,24
A3a	30 a 44 kV	69,10
A4	2,3 a 25 kV	71,64

Com o fator de disponibilidade de 50 %, apresentados na Tabela 4, os valores obtidos através da partição de custos pelo método da igualdade, se mantêm abaixo dos valores das tarifas convencionais acima descritas. A exceção é dada pelo Ciclo Diesel.

A Tabela 5, que mostra os custos específicos para a condição de operação com fator de disponibilidade de 25 %, apresenta significativo aumento nos valores do Ciclo Brayton operando em ciclo simples, que utiliza gás natural, principalmente no método da extração, dado o preço comercial desse combustível.

#### 4.0 – CONCLUSÕES

Empreendimentos termoelétricos se tornam atraentes porque são projetos que envolvem capital menos intensivo quando comparado à opção hidroelétrica, baixo tempo de maturação do projeto, facilidade de modularização de equipamentos, custos dos equipamentos preponderantemente menores em relação aos custos de obras civis.

Os critérios de partição aqui utilizados para a obtenção dos custos específicos, baseados no conceito da Segunda Lei da Termodinâmica, demonstram que o custo definido pela exergia e não pela energia, traz o benefício da valorização efetiva das utilidades produzidas. A utilização do método da exergia para a quantificação do desempenho de uma unidade térmica de potência torna possível a identificação da magnitude e as reais causas de perdas termodinâmicas em cada equipamento.

As Tabelas de 6 a 8, anteriormente descritas, demonstram que através da aplicação da termoeconomia, a análise comparativa entre as opções tecnológicas de módulos térmicos de potência e cogeração é mais representativo uma vez que a comparação é efetuada sobre a máxima capacidade de realizar trabalho dos combustíveis utilizados.

O método de partição pela igualdade, onde o vapor e a energia elétrica cogerada tem o mesmo valor, pode ser do interesse da indústria que emprega cogeração e não gera excedente de energia elétrica. Inversamente, o método da extração é mais apropriado para aquelas indústrias onde há excedente de energia elétrica.

#### 5.0 - LISTA DE SÍMBOLOS

c, C : custo específico (\$/kJ), custo (\$ ou \$/s)  
 CC: custo de capital (\$)  
 ex, Ex : exergia específica (kJ/kg), fluxo exergia (kW)  
 PCI : poder calorífico inferior (kJ/kg)  
 W : potência (kW)  
 $\eta$  : rendimento  
 $\phi$  : relação entre exergia química e poder calorífico inferior

*Subscrito:*

comb : referente ao combustível em base exergética  
 e : entrada  
 el : referente a energia elétrica  
 eletr : referente ao método de partição de custos considerando apenas a eletricidade como produto  
 equip : equipamento  
 ex : exergia, exergético  
 extr : referente ao método de partição de custos por extração  
 ge : gases de escape na saída da turbina a gás  
 ger : gerada, gerador  
 igual : referente ao método de partição de custos por igualdade  
 s : saída  
 tot : total

turb : turbina  
 vb : vapor de baixa pressão

## 6.0 - BIBLIOGRAFIA

- [1] EPRI, 1993,. "TAG Technical Assessment Guide - Electricity Supply - 1993", vol. 1. Rev. 7. Palo Alto.  
 [2] ELETROSUL, 1997, Florianópolis, (comunicação pessoal).  
 [3] PROMON/PSR, 1995, "Elaboração de Estudos Visando Formulação de um Plano Diretor de Usinas Termoeletricas no Estado de São Paulo", Relatório Geral, São Paulo.  
 [4] BLACK & VEATCH, 1994, "BHP New Ventures Southeast Brazil Project - Capital and Operating Cost Data for Power Generation Options", Final Report, São Paulo.  
 [5] BEJAN, A., TSATSARONIS, G., MORAN, M., 1996, "Thermal Design & Optimization", John Wiley, New York.  
 [6] VIEIRA, S., 1998, "Estudo de Configurações de Sistemas Térmicos de Geração de Energia Elétrica Através da Análise de Exergia e de Termoeconomia", Dissertação de Mestrado, Instituto de Eletrotécnica e Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo.

TABELA 1 - RESUMO DAS CONFIGURAÇÕES DE GERAÇÃO ANALISADAS

MÓDULO	TECNOLOGIA DE GERAÇÃO	POTÊNCIA (MW)	COMBUSTÍVEL UTILIZADO			
			TIPO	CUSTO COMERCIAL (US\$/kg)	EXERGIA QUÍMICA (kJ/kg)	CUSTO EXERGÉTICO (US\$/MWh)
1	Ciclo Brayton Simples	85	Gás Natural	0,1505	52.052	10,40
2	Ciclo Brayton Simples	168	Gás Natural	0,1505	52.052	10,40
3	Ciclo Combinado	442	Gás Natural	0,1505	52.052	10,40
4	Ciclo Rankine	400	Carvão da Colômbia	0,0460	28.011	5,90
5	Ciclo Rankine	500	Carvão de Candiota	0,0120	14.643	2,95
6	Ciclo Rankine	400	Óleo Combustível Ultraviscoso	0,0650	42.976	5,45
7	Ciclo Diesel	13	Óleo Combustível Leve	0,1549	43.749	12,74

TABELA 3- CUSTOS ESPECÍFICOS DE ELETRICIDADE E VAPOR/GASES DE ESCAPE (FATOR DE DISPONIBILIDADE MÁXIMO)

MÓDULO	MÉTODO DA IGUALDADE		MÉTODO DA EXTRAÇÃO		MÉTODO DA ELETRICIDADE
	ELETRICIDADE	VAPOR/GASES DE	ELETRICIDADE	VAPOR/GASES	

	(US\$/MWh)	ESCAPE <sup>(1)</sup> (US\$/t)	(US\$/MWh)	DE ESCAPE <sup>(1)</sup> (US\$/t)	(US\$/MWh)
1	20,56	1,52	30,64	0,77	40,97
2	20,10	1,70	28,08	0,88	36,65
3	23,56	5,39	27,57	2,27	28,96
4	27,84	11,53	37,13	10,30	44,42
5	21,17	8,77	29,47	7,67	36,66
6	25,01	10,33	34,03	9,18	38,86
7	30,24	1,02	35,25	0,43	38,90

Notas: (1) Módulos 1, 2 e 7 se referem aos gases de escape; Módulos 3, 4, 5 e 6 se referem ao vapor

TABELA 4 - CUSTOS ESPECÍFICOS DE ELETRICIDADE E VAPOR/GASES DE ESCAPE  
(FATOR DE DISPONIBILIDADE = 0,50)

MÓDULO	MÉTODO DA IGUALDADE		MÉTODO DA EXTRAÇÃO		MÉTODO DA ELETRICIDADE (US\$/MWh)
	ELETRICIDADE (US\$/MWh)	VAPOR/GASES DE ESCAPE <sup>(1)</sup> (US\$/t)	ELETRICIDADE (US\$/MWh)	VAPOR/GASES DE ESCAPE <sup>(1)</sup> (US\$/t)	
1	30,00	2,22	56,86	0,77	71,13
2	29,70	2,52	52,74	0,88	65,17
3	38,63	8,84	49,06	3,25	49,43
4	35,27	14,61	48,28	12,88	59,18
5	30,74	12,73	43,84	10,99	55,68
6	31,17	12,87	43,42	11,31	51,19
7	49,82	1,68	55,71	0,43	57,74

Notas: (1) Módulos 1, 2 e 7 se referem aos gases de escape; Módulos 3, 4, 5 e 6 se referem ao vapor

TABELA 5 - CUSTOS ESPECÍFICOS DE ELETRICIDADE E VAPOR/GASES DE ESCAPE  
(FATOR DE DISPONIBILIDADE = 0,25)

MÓDULO	MÉTODO DA IGUALDADE		MÉTODO DA EXTRAÇÃO		MÉTODO DA ELETRICIDADE (US\$/MWh)
	ELETRICIDADE (US\$/MWh)	VAPOR/GASES DE ESCAPE <sup>(1)</sup> (US\$/t)	ELETRICIDADE (US\$/MWh)	VAPOR/GASES DE ESCAPE <sup>(1)</sup> (US\$/t)	
1	56,11	4,15	145,22	0,77	165,52
2	55,10	4,67	128,72	0,88	145,86
3	81,39	18,63	116,98	4,80	111,05
4	51,98	21,53	73,37	18,68	92,40
5	52,26	21,65	76,17	18,47	98,48
6	45,02	18,59	64,56	16,09	78,93
7	168,12	5,66	180,48	0,43	181,49

Notas: (1) Módulos 1, 2 e 7 se referem aos gases de escape; Módulos 3, 4, 5 e 6 se referem ao vapor