

## **SISTEMA TETRA COMBINADO DE COGERAÇÃO. AVALIAÇÃO EXERGÉTICA E TERMOECONÔMICA**

**Domingo Wilson Garagatti Arriola** – wgarriol@usp.br

Escola Politécnica da USP - Depto. de Engenharia Mecânica

Av. Prof. Mello Morais, 2231 - Cidade Universitária Armando de Salles Oliveira, 05508-900  
- São Paulo - SP

**Silvio de Oliveira Júnior** - olivsilj@ipt.br

Escola Politécnica da USP - Depto. de Engenharia Mecânica e

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT)

Av. Prof. Almeida Prado, 532 - Cidade Universitária Armando de Salles Oliveira, 05508-901  
- São Paulo - SP

**Resumo.** *Este artigo descreve um novo sistema de cogeração denominado Tetra-Combinado destinado a gerar eletricidade, produzir água gelada (para emprego em sistemas de ar condicionado) e eventualmente vapor. Este sistema é composto por uma turbina a gás, uma caldeira de recuperação, uma turbina a vapor de extração-condensação e um sistema de refrigeração híbrido absorção-ejeto compressão.*

*O desempenho exergético e termoeconômico (custos em base exergética de produção de eletricidade, vapor e água gelada) deste sistema é comparado com o desempenho de um sistema convencional de cogeração, indicando-se os prós e contras desta nova concepção de sistema de cogeração.*

**Palavras chave:** Sistema de Cogeração, Análise exergética, Análise termoeconômica.

### **1. INTRODUÇÃO**

A integração energética de processos de conversão de energia, conhecida como cascata térmica, racionaliza e aumenta a eficiência da utilização dos insumos energéticos dos processos. A cogeração é uma das técnicas bem conhecidas de integração de processos visando a produção de potência elétrica/mecânica, vapor e água gelada.

A necessidade de se reduzir os custos de produção de utilidades tem estimulado o desenvolvimento de sistemas de cogeração mais eficientes e de operação flexível e confiável.

Com relação aos sistemas de refrigeração e bomba de calor associados a sistemas de potência, destacam-se aqueles baseados no ciclo de absorção, por requererem calor como insumo energético e, portanto, ao utilizarem rejeitos térmicos de sistemas de conversão termomecânica contribuem para maximizar o desempenho do sistema de cogeração.

Nesse contexto, este trabalho apresenta um sistema de cogeração, denominado Tetra-Combinado, baseado em um ciclo combinado acoplado em série térmica a um sistema de refrigeração híbrido absorção - ejeto compressão. Com este sistema de cogeração é possível a

geração termelétrica, a produção de água gelada, para fins de condicionamento ambiental e, eventualmente, vapor.

A avaliação de desempenho deste novo sistema é conduzida através da aplicação da análise exérgica e termoeconômica de processos para determinação do rendimento exérgico e custos de produção de utilidades desse sistema para uma aplicação específica. Os valores obtidos são comparados com um sistema de cogeração composto por uma turbina a gás, turbina a vapor e sistema de refrigeração a absorção comercial de simples estágio, denominado sistema convencional.

## 2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA TETRA-COMBINADO

O sistema Tetra-Combinado, mostrado na “Fig. 1”, é composto por três subsistemas interligados em série térmica: turbina a gás, sistema de cogeração baseado em ciclo vapor e sistema de refrigeração baseado em ciclo híbrido absorção-ejeto compressão (Oliveira Jr. 1991).

A turbina a gás, que consome gás natural como insumo energético, gera potência elétrica ( $E_{p1}$ ) e rejeita os gases de escape para uma caldeira de recuperação (seção 4). Nesta caldeira é gerado vapor (seção 6) que alimenta uma turbina de extração-condensação que gera a potência elétrica  $E_{p2}$ . O vapor extraído da turbina a vapor (seção 9) é enviado para o gerador de um resfriador de líquido (chiller), que opera com o par  $H_2O$ -LiBr como substância de trabalho. O vapor de baixa pressão (seção 11) é enviado para um condensador, em seguida passa por uma bomba e posteriormente a água na fase líquida é misturada com a água proveniente do gerador do resfriador de líquido e com a água líquida proveniente do ejetor de vapor do resfriador de líquido (seção 13). Após a mistura dessas três correntes, o fluxo passa por uma bomba e é enviado para a caldeira de recuperação.

O resfriador de líquido, que opera segundo um ciclo híbrido absorção ejetor compressão, tem como insumo energético o calor transferido à solução de  $H_2O$ -LiBr no gerador (causado pela condensação do vapor de água) e o fluxo de entalpia do vapor de alta pressão enviado para os ejetores (seção 7). Estes ejetores devem aumentar o nível de pressão do vapor de água liberado no evaporador ( $E_v$ ) até o nível de pressão de operação do absorvedor ( $A_b$ ). Este diferencial de pressão aparece devido às condições de temperatura e concentração da solução de  $H_2O$ -LiBr impostas no gerador ( $G_e$ ) que é um dos componentes do separador, no absorvedor ( $A_b$ ), e na água no evaporador ( $E_v$ ).

Os processos pelos quais passa a solução de  $H_2O$ -LiBr e a água são os mesmos de um ciclo de absorção convencional: liberação de vapor de água no gerador, com o conseqüente aumento da concentração da solução na saída do gerador ( $d_s$ ); condensação do vapor de água no condensador ( $C_d$ ); queda de pressão do fluxo de água ( $c_s - e_e$ ) até a pressão do evaporador e do fluxo de solução concentrada ( $d_s - a_e$ ) até a pressão do absorvedor; vaporização da água no evaporador, com resfriamento da água ‘gelada’ do sistema de ar condicionado (de  $12\text{ }^\circ\text{C}$  para  $7\text{ }^\circ\text{C}$ ); absorção do vapor de água egresso do evaporador (no sistema Tetra-Combinado o vapor vem dos ejetores de vapor) pela solução concentrada no absorvedor ( $a_e - a_s$ ); resfriamento da solução concentrada (processo  $d_s - a_e$ ) e aquecimento da solução diluída (processo  $a_s - d_e$ ) no trocador de calor.

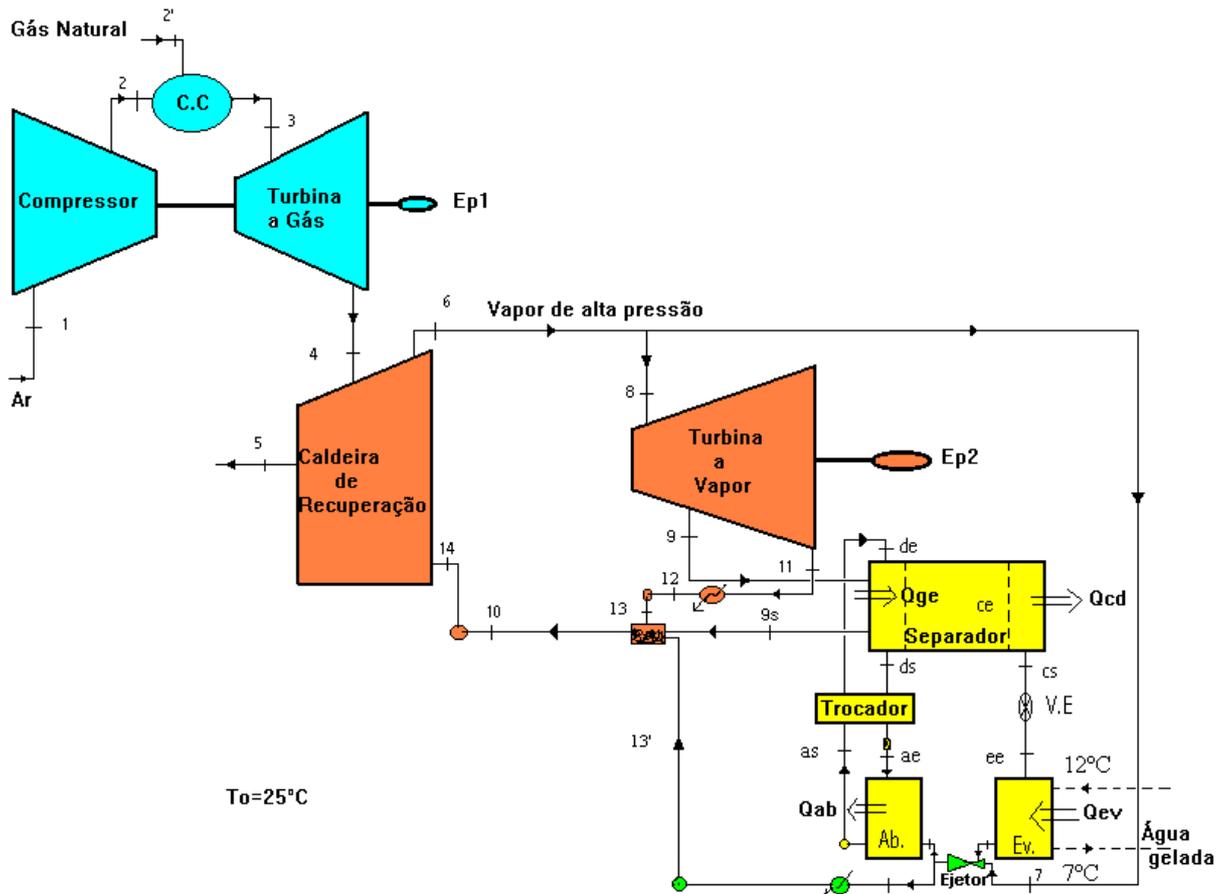


Figura 1 - Sistema Tetra-Combinado de cogeração.

### 3. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO SISTEMA TETRA-COMBINADO

A avaliação de desempenho do sistema Tetra-Combinado é conduzida a partir da elaboração de modelos de comportamento dos componentes do sistema. Estes modelos foram desenvolvidos com a ajuda do aplicativo EES (1999). O desempenho do sistema é quantificado pelos rendimentos energético ( $\eta_e$ ) e exergético ( $\eta_b$ ), definidos por Oliveira Jr. (1998):

$$\eta_e = \frac{E_{p1} + E_{p2} + Q_{ev}}{m_{comb} PCI} \quad (1)$$

Onde  $Q_{ev}$  é a taxa de troca de calor no evaporador do resfriador de líquido,  $m_{comb}$  é a vazão mássica de combustível e  $PCI$  é o poder calorífico inferior do combustível.

$$\eta_b = \frac{E_{p1} + E_{p2} + Q_{ev} \theta_{ev}}{m_{comb} B_{comb}} \quad (2)$$

Onde  $\theta_{ev}$  é o fator de Carnot do evaporador,  $(Q_{ev} \theta_{ev})$  é a taxa de exergia transferida ao processo de resfriamento de água e  $B_{comb}$  é a exergia específica do combustível (gás natural) determinada segundo Szargut et al. (1988).

Pode-se introduzir a relação calor/trabalho ( $\beta$ ), para caracterizar o tipo de aplicação do sistema de cogeração:

$$\beta = \frac{Q_{ev}}{(E_{p1} + E_{p2})} \quad (3)$$

Para fins de otimização preliminar do sistema, foi estudada a variação do rendimento exergético do sistema,  $\eta_b$ , com a pressão de geração de vapor da caldeira de recuperação, dada a importância que este componente tem no desempenho exergético do sistema. A “Fig. 2” mostra a evolução do rendimento exergético e da relação calor/trabalho com a pressão de geração de vapor, indicando um valor máximo de  $\eta_b$  para 3000 kPa.

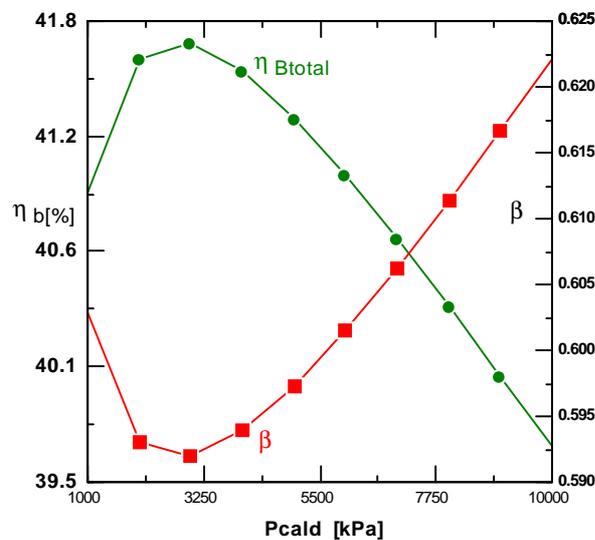


Figura 2 - Evolução do rendimento exergético com a pressão na caldeira de recuperação.

Desta forma foram estabelecidas as seguintes características do sistema Tetra-Combinado, para fins de avaliação de desempenho termodinâmico e termoeconômico:

- potência gerada pela turbina a gás: 5 MW;
- capacidade da caldeira de recuperação: 11 t/h a 3000 kPa e 284°C (sem queima suplementar).

As “Tabelas 1, 2 e 3” apresentam os valores das pressões e temperaturas nas seções indicadas na “Fig. 1” da turbina a gás, sub-sistema a vapor e resfriador de líquido.

Tabela 1. Valores de pressão e temperatura do subsistema turbina a gás.

<b>Seção</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Pressão (kPa)</b>
0-1	25	101,3
2	413	1419,0
3*	1044	1419,0
4	512	101,3
5	175	101,3

\* a combustão é feita com excesso de ar de 270%

Tabela 2. Valores da pressão e temperatura do subsistema a vapor.

<b>Seção</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Pressão (kPa)</b>
4	512,0	101,3
5	175,0	101,3
6	284,0	3000,0
9	80,0	47,4
9s	70,0	47,4
10	61,0	47,4
11	46,0	10,0
12	46,0	10,0
13	46,2	47,4
13'	32,0	47,4
14	76,0	3000,0

Tabela 3. Temperaturas e pressões nos componentes do resfriador de líquido

<b>Componente</b>	<b>Seção</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Pressão (kPa)</b>	<b>Carga Térmica (kW)</b>
Evaporador	ev	2,00	0,70	3872
Absorvedor*	ae	64,00	2,50	4482
	as	53,00		
Condensador	cd	40,00	7,38	4109
Gerador*	de	73,00	7,38	4807
	ds	84,00		

\* a concentração da solução concentrada é de 60% e da solução diluída 55%

Os resultados da avaliação do sistema são apresentados na “Tabela 4” onde são mostrados os valores de potência elétrica total produzida ( $E_{pt}$ ), carga térmica de refrigeração ( $Q_{ev}$ ), a relação calor /trabalho ( $\beta$ ), eficiência energética ( $\eta_e$ ) e a eficiência exergética ( $\eta_b$ ) do sistema Tetra-Combinado (em duas condições de operação: sem e com queima suplementar de combustível na caldeira de recuperação) e de um sistema com ciclo combinado acoplado em série térmica a um resfriador de líquido a absorção comercial (denominado sistema convencional). A condição de operação com queima suplementar é útil quando se pretende:

- aumentar a geração de potência elétrica visando a exportação de eletricidade;
- elevar a capacidade de refrigeração incrementando a produção de água gelada;
- elevar a potência elétrica e produção de água gelada simultaneamente.

Tabela 4. Parâmetros de desempenho do sistema Tetra-Combinado e do sistema convencional.

Sistema	$E_{pt}$ (kW)	$Q_{ev}$ (kW)	$\beta$	$\eta_b$ (%)	$\eta_e$ (%)
Sistema de Cogeração com Ciclo Combinado em Série Térmica com Resfriador de Líquido a absorção Comercial	7156	1176	0,164	39,95	46,99
Sistema Tetra-Combinado	6541	3872	0,592	41,64	64,27
Sistema Tetra-Combinado com Queima Adicional na Caldeira de Recuperação	8437	3872	1,074	37,71	54,00

Os resultados mostrados na “Tabela 4” evidenciam o melhor desempenho do sistema Tetra-Combinado (na condição de sem queima suplementar na caldeira de recuperação) frente ao sistema de cogeração baseado no ciclo combinado. Na condição de operação com queima suplementar nota-se o aumento de capacidade na produção de utilidades sem queda significativa no rendimento exerético do sistema

#### 4. AVALIAÇÃO TERMOECONÔMICA DO SISTEMA TETRA-COMBINADO

A determinação dos custos de produção das utilidades geradas pelo sistema Tetra-Combinado será feita a partir da aplicação dos balanços de custo, em base exerética, aos três subsistemas que formam o sistema Tetra-Combinado. São utilizados os critérios de igualdade e extração nas turbinas a gás e a vapor para determinação dos custos de produção de eletricidade (Garagatti, 2000).

O balanço de custos pode ser escrito para qualquer equipamento/componente do sistema Tetra-Combinado, em termos de taxas de custos (US\$/s), como apresentado pela “Eq. 4” (c = custo específico, B = taxa/fluxo de exergia,  $C_{equip}$  = taxa de custo do equipamento, prod = produto, ins = insumo):

$$\sum c_{prod}B_{prod} = \sum c_{ins}B_{ins} + C_{equip} \quad (4)$$

Para a determinação dos custos de produção específicos das utilidades é necessário utilizar um método de partição de custos toda vez que o equipamento/componente estudado gerar mais de um produto.

Neste trabalho são empregados dois métodos de partição de custos que aplicados à turbina a gás (que gera eletricidade e gases quentes) e à turbina a vapor (que gera eletricidade e vapor em dois níveis de pressão) fornecem as seguintes relações:

- Método da Igualdade

$$c_{Ep1} = c_4 \text{ (para a turbina a gás)} \quad (5)$$

$$c_{Ep2} = c_9 = c_{11} \text{ (para a turbina a vapor)} \quad (6)$$

- Método da Extração

$$c_{2'} = c_4 \text{ (para a turbina a gás)} \quad (7)$$

$$c_8 = c_9 = c_{11} \text{ (para a turbina a vapor)} \quad (8)$$

Assim como feito na avaliação de desempenho, são consideradas duas condições de operação do sistema Tetra-Combinado: com e sem queima suplementar na caldeira de recuperação.

Na análise termoeconômica desenvolvida para os sistemas de cogeração Tetra-Combinado e convencional são utilizados os seguintes valores de parâmetros, considerando uma capacidade de geração de 5 MW de eletricidade na turbina a gás e 11 t/h de vapor gerados na caldeira de recuperação na condição sem queima suplementar:

- custo de combustível: US\$ 7,67/MWh (Comgas);
- custo da turbina a gás: US\$ 2.000.000;
- custo da turbina a vapor: US\$ 2.542.000;
- custo da caldeira de recuperação: US\$ 889.868,000;
- custo do resfriador de líquido: US\$ 600/TR (adotado para os dois sistemas);
- custo de componentes auxiliares: US\$ 400.000.

Os parâmetros econômicos utilizados na análise termoeconômica são:

- período de amortização do investimento: 10 anos;
- fator de carga: 0,80;
- taxa de juros do mercado: 12% ao ano;
- custo anual de operação e manutenção: 10% do capital investido.

Os custos unitários da eletricidade e água gelada utilizados para fins de comparação são:

- Custo de eletricidade: US\$ 62,16/MWh (SER/ANEEL Janeiro-Setembro 1999);
- Custo de água gelada: US\$ 507,10/MWh (Cespedes e Oliveira Jr. (1995)).

Os resultados da avaliação termoeconômica são mostrados na “Tabela 5”, onde  $c_{e1}$ ,  $c_{e2}$  e  $c_{ag}$  são, respectivamente, os custos específicos da eletricidade gerada na turbina a gás, a vapor e da água gelada .

Tabela 5. Custos de produção das utilidades geradas em base exergética e mássica (para a água gelada).

Método	Igualdade				Extração			
Sistema	$C_{e1}$ (US\$/MWh)	$C_{e2}$ (US\$/MWh)	$C_{ag}$ (US\$/MWh)	$C_{ag}$ (US\$/t)	$C_{e1}$ (US\$/MWh)	$C_{e2}$ (US\$/MWh)	$C_{ag}$ (US\$/MWh)	$C_{ag}$ (US\$/t)
Sistema convencional	18,50	55,80	893,00	0,451	30,00	89,75	802,00	0,405
Sistema Tetra-Combinado	18,50	47,30	294,25	0,113	30,00	81,55	270,60	0,103
Sistema Tetra-Combinado com queima suplementar	18,50	37,00	259,65	0,099	30,00	62,60	245,50	0,094

Comparando os custos unitários de eletricidade e água gelada obtidos para o sistema Tetra-Combinado, verifica-se que eles são mais atrativos que o sistema convencional, bem como quando comparados com os valores de referência adotados para a eletricidade e água gelada.

Para se ter uma avaliação comparativa dos custos totais de produção, em base horária, durante o período de amortização do investimento, a “Tabela 6” apresenta os valores do custo total de produção de eletricidade ( $C_{te}$ ), de água gelada ( $C_{tag}$ ) e o custo total das utilidades ( $C_t$ ). Os valores de  $C_{te}$  e  $C_{tag}$  foram obtidos através do uso do critério de igualdade.

Tabela 6. Custos totais dos produtos dos sistemas de cogeração.

Sistema de cogeração	$C_{te}$ (US\$/h)	$C_{tag}$ (US\$/h)	$C_t$ (US\$/h)
Sistema Convencional	214,90	76,20	291,10
Sistema Tetra-Combinado	<b>153,10</b>	<b>62,50</b>	<b>215,60</b>
Sistema Tetra-Combinado com queima suplementar	198,70	120,40	319,10

Os resultados da “Tabela 6” demonstram o melhor desempenho econômico do sistema Tetra-Combinado de cogeração.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema Tetra-Combinado de cogeração é uma opção eficiente e econômica de produção de eletricidade e água gelada para fins de condicionamento ambiental. Este sistema tem também um grande potencial de utilização como sistema de tri-geração, produzindo eletricidade, vapor de processo e água gelada. Trata-se de uma opção potencialmente viável para aplicação no setor terciário e em processos industriais com demandas elétricas, de aquecimento e refrigeração. Um estudo aprofundado das condições de otimização do sistema Tetra-Combinado poderá incrementar sua atratividade técnica e econômica.

## REFERÊNCIAS

Comgas, [www.comgas.com.br](http://www.comgas.com.br)

EES, Engineering Equation Solver, Version 5.020, F – Chart Software, 1999.

Garagatti Arriola, D. W., 2000, Sistema Tri e Tetra Combinado de Cogeração, Avaliação Exergética e Termoeconômica, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

Oliveira Jr., S., 1991, Revalorisation des Effluents Thermiques Industriels. Analyse Exergetique, Entropique et Economique, These de Doctorat, Ecole Nationale Superieure des Industries Chimiques – Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, France.

Oliveira Jr., S., 1998, Exergy Analysis of Cogeneration and Combined Cycle Plants, Proceedings of the Congress ECOS'95, July 8-10, Nancy, vol. II, pp. 759-765.

Peral Cespedes, J., F. & Oliveira Jr, S., 1995, Cogeneration in the Brazilian Tertiary Sector: Exergetic and Thermoeconomic Analysis, Proceedings of the Congress ECOS'95, July 11-15, Istanbul, vol 2, pp. 764-768.

SER/ANEEL, [www.aneel.gov.br/ser/sp](http://www.aneel.gov.br/ser/sp) – Tarifas Médias1999.htm

Szagurt, J. et al., 1988 Exergy Analysis of Thermal, Chemical and Metallurgical Processes, Hemisphere Pub. Corp., N. Y.

Trane Company, [www.trane.com](http://www.trane.com)

## TETRA-COMBINED COGENERATION SYSTEM. EXERGY AND THERMOECONOMIC EVALUATION

**Abstract.** *This paper presents the description and the exergy and thermoeconomic evaluation of a new cogeneration system, called tetra-combined cogeneration system, that generates electricity and chilled water (for air conditioning purposes) and eventually steam. This system is composed of a gas turbine, a heat recovery steam generator, a condensation/extraction steam turbine and a hybrid absorption/steam ejection chiller.*

*The exergy and thermoeconomic performance (exergy based costs of electricity, steam and chilled water production) of this system is compared with the performances of conventional cogeneration systems, pointing out the advantages and disadvantages of this new system.*

**Key-Words:** Cogeneration System, Exergy analysis, Thermoeconomic analysis.