

UM NOVO CONJUNTO DE PARÂMETROS PARA ANÁLISE TERMoeCONÔMICA DE SISTEMAS TÉRMICOS

Cristiano de Lima Logrado

João Nildo de Souza Vianna

Dept. de Engenharia Mecânica - Universidade de Brasília - ENM - UnB

CEP 70910-900 Brasília - Brasil - e-mail: clogrado@diablo.ltmd-enm.unb.br

***Resumo:** Neste artigo um novo conjunto de parâmetros para análise termoeconômica de sistemas térmicos é apresentado. Através destes parâmetros pode-se determinar a importância de cada componente nos resultados finais do sistema. Um código computacional foi desenvolvido para teste destes parâmetros. Este código foi utilizado na análise de 25 turbinas a gás. Os resultados obtidos através do uso das parcelas de ineficiência ($PI's$) e parcela de perdas (PL_{sis}) identificaram as perdas do sistema e destruição de exergia no combustor como principais causas da redução da eficiência térmica das turbinas a gás. A análise termoeconômica, através do uso das parcelas de custo relativo referentes a irreversibilidades (PCR_e) e a capital e O&M (PCR_{cap}) e parcela de custo referente a perdas (PCL_{sis}), mostrou um equilíbrio entre os componentes e as perdas de exergia como fontes de custo para o sistema. Também, mostrou-se que os custos associados a capital e O&M são os maiores que os custos de destruição e perdas de exergia.*

***Palavras-chave:** Exergia, Termoeconomia, Exergoeconomia, Turbinas a Gás, Sistemas Térmicos*

1. INTRODUÇÃO

A expressão termoeconomia é usada para designar as metodologias de análise que combinam análise térmica e econômica de sistemas térmicos. Segundo Bejan *et al* (1996) os objetivos de um processo de análise termoeconômica são: fornecer os custos de todos os produtos de um sistema; permitir uma melhor compreensão do processo de formação destes custos; otimizar variáveis específicas em cada componente e otimizar o sistema como um todo.

Este conjunto amplo de objetivos resultou em diversas variações de métodos de análise termoeconômica. Agazzani & Massardo (1997) reportam duas linhas principais de métodos. A primeira é denominada *Thermoeconomic Functional Analysis* e destina-se principalmente a processos de otimização. Dentre os trabalhos que utilizam esta metodologia destacam-se os de El-Sayed (1989), El-Sayed (1996) e Frangopoulos (1992).

A segunda linha de métodos, baseadas nos trabalhos de Tsatsaronis & Winhold (1985), é denominada *Exergetic Cost Theory*, e adequa-se melhor a processos de análise, podendo também

ser usada em processos de otimização, como em Bejan *et al* (1996). Tsatsaronis (1996) usa o termo "Exergoeconomia" para designar esta metodologia pelo fato dela empregar análise exérgica e econômica de forma conjunta.

Segundo Tsatsaronis *et al* (1994) uma análise Exergoeconomica completa é feita em quatro etapas, a saber: (a) balanço de exergia, no sistema e em cada componente; (b) análise econômica; (c) balanço de custo dos fluxos de exergia, em cada componente; (d) cálculo de parâmetros que permitam a análise e comparação dos processos associados a cada componente. Destas etapas a (d), cálculo de parâmetros, é a mais importante, pois que esta etapa permite a comparação de componentes e fornece informações sobre o processo de formação do custo final dos produtos de um sistema.

Nota-se, entretanto, que os parâmetros sugeridos por este autor adequam-se, principalmente, a análise individual de cada componente ou de todo o sistema separadamente. Estes parâmetros não mostram de forma clara como os resultados de cada componente são somados nos resultados finais do sistema.

Horlock (1992) apresenta um conjunto de parâmetros para análise térmica onde a eficiência de toda a planta é calculada através da soma de contribuições individuais de cada componente, permitindo assim que a importância de cada componente seja determinada.

O objetivo deste trabalho é propor um conjunto de parâmetros que permitam, em um processo de análise exergoeconômica, o cálculo da contribuição de cada componente na composição dos custos finais dos produtos de um sistema. Desta forma, será possível, determinar a importância de cada componente, de forma análoga à análise térmica proposta por Horlock (1992).

Para averiguar a eficiência do conjunto de parâmetros propostos foi desenvolvido um código computacional que emprega a análise exergoeconomica na análise de sistema térmicos. Este código foi utilizado no processo de análise de uma base de dados contendo informações sobre 25 turbinas a gás.

2. ANÁLISE EXERGOECONÔMICA

Balanço de Exergia. O balanço de exergia fornece o valor da destruição de exergia em cada componente. Basicamente, a destruição de exergia é a diferença entre a exergia que entra e a que deixa o volume de controle, como expressa a Eq.(1). Nesta equação \dot{E} é o fluxo de exergia e os índices "D", "in" e "out" referem-se a destruição, entrada e saída, respectivamente. O superíndice "k" indica o número do componente.

$$\dot{E}_D^k = \dot{E}_{in}^k - \dot{E}_{out}^k \quad (1)$$

Análise Econômica. A análise econômica, por sua vez, resulta na determinação dos custos referentes a capital, operação e manutenção do sistema. Neste trabalho, estas duas etapas são feitas segundo a metodologia proposta por Bejan *et al* (1996). O preço dos componentes do sistema é calculado através das equações propostas por Agazzani & Massardo (1997).

Observa-se que para a realização dos passos (a) e (b) não foram feitas quaisquer considerações quanto ao destino ou origem dos fluxos de exergia que cruzam as fronteiras dos volumes de controle. Entretanto os volumes de controle idealizados sempre envolvem equipamentos ou processos que existem ou ocorrem com um objetivo específico. Eles tem uma finalidade, ou seja, geram um produto e para isto utilizam matéria-prima. Assim, a cada fluxo de

exergia que entra ou deixa um componente pode-se atribuir um rótulo, classificando-o como produto ou matéria-prima do componente. Baseada nesta idéia são propostos os seguintes conceitos:

- Fluxo de Matéria-prima, baseada em exergia (\dot{E}_m) - é a soma de todos os fluxos de exergia que entram no volume de controle.
 - Fluxo de Produtos (\dot{E}_p) - é a soma dos fluxos de exergia que deixam o volume de controle e que caracterizam de forma clara o objetivo do componente ou processo contido no volume de controle.
 - Fluxos de Perdas (\dot{E}_l) - são os fluxos que deixam o volume de controle e que não são caracterizados como produtos
- Introduzindo estes conceitos a Eq.(1) é reescrita na forma da Eq.(2).

$$\dot{E}_D^k = \dot{E}_m^k - (\dot{E}_{pt}^k + \dot{E}_l^k) \quad (2)$$

Balanço de Custo dos Fluxos de Exergia. Agora, com os conceitos de Matéria-prima, Produto e Perdas introduzidos é possível a realização de um balanço de custos em cada componente. Este balanço é expresso pela Eq.(3), onde \dot{Z} é o custo associado a capital, operação e manutenção e c_x é o custo da exergia em R\$/kJ.

$$c_p \dot{E}_p = c_m \dot{E}_m - c_l \dot{E}_l + \dot{Z} \quad (3)$$

$$c_p \dot{E}_p = c_m (\dot{E}_m - \dot{E}_l) + \dot{Z} \quad (4)$$

A realização deste balanço, para cada componente, resulta em um sistema com mais incógnitas que equações. Para superar este problema é preciso que sejam utilizadas relações auxiliares.

No interior de um sistema, a exergia perdida por um componente poderá ser utilizada em um componente a jusante. Desta forma uma boa relação auxiliar é fazer o custo de perdas igual ao custo da matéria-prima. Nesta situação a perda é vista como matéria-prima não utilizada neste componente, mas que poderá ser utilizada posteriormente. Usando esta relação o balanço de custos assume a forma da Eq.(4).

Por outro lado, se o sistema é analisado como um todo a possibilidade de reutilização das perdas inexistente. Neste caso a relação auxiliar a ser utilizada é fazer o custo das perdas nulo. Assim, o balanço de custo assume a forma da Eq.(5).

$$c_p \dot{E}_p = c_m \dot{E}_m + \dot{Z} \quad (5)$$

Definição dos Parâmetros. A ultima etapa da análise exergoeconômica é o cálculo de parâmetros para análise e comparação dos componentes.

O primeiro passo é o cálculo das eficiências de cada componente. Duas eficiências, denominadas eficiência exergetica (\mathcal{E}) e eficiência exergética maior (\mathcal{E}^+) são definidas pelas Equações (6) e (7).

$$\varepsilon = \dot{E}_p / \dot{E}_m \quad (6)$$

$$\varepsilon^+ = 1 - \dot{E}_d / \dot{E}_m \quad (7)$$

Um ponto interessante é expressar a eficiência de todo sistema como uma soma da eficiência dos componentes. Como a destruição da exergia no sistema é igual a soma da destruição de exergia de cada componente, pode-se escrever a eficiência exergética do sistema (ε_{sis}) na forma da Eq (8).

$$\varepsilon_{sis} = 1 - \sum_k \left[\frac{E_m^k}{E_m} (1 - \varepsilon_k^+) \right] - \frac{\dot{E}_l}{\dot{E}_m} \quad (8)$$

$$PI^k = \frac{E_m^k}{E_m} (1 - \varepsilon_k^+) \quad (9)$$

Observa-se que o termo entre colchetes determina o quanto cada componente contribui para a queda da eficiência do sistema. Assim, definiu-se a Parcela de Ineficiência (PI) como o valor entre colchetes, expresso pela Eq.(9).

Sob o ponto de vista econômico o parâmetro utilizado é a diferença relativa de custo (r), como definido por Tsatsaronis *et al* (1994), Eq.(10). Nesta equação o valor do custo das perdas é determinado de acordo com a relação auxiliar utilizada. Para componentes usa-se $c_l = c_m$ e para o sistema usa-se $c_l = 0$.

Como no caso das eficiências o custo relativo do sistema pode ser expresso como uma composição dos custos relativos de cada componente. Sabendo que o custo de capital de todo o sistema é a soma do custo de cada componente e a destruição de exergia do sistema é a soma da destruição em cada componente, obtêm-se a Eq.(11), onde PCR é a Parcela de Custo Relativo e os sub-índices referem-se a custos de capital (cap) e custo das ineficiências (ε). Os valores das parcelas são dados pelas Equações (12) e (13).

$$r = \frac{c_p - c_m}{c_m} = \frac{\dot{E}_d}{\dot{E}_p} - \frac{c_l - c_m}{c_m} \frac{\dot{E}_l}{\dot{E}_p} + \frac{\dot{Z}}{c_m \dot{E}_p} \quad (10)$$

$$r_{sis} = \frac{\dot{E}_l}{\dot{E}_p} + \sum_k (PCR_{cap}^k + PCR_{\varepsilon}^k) \quad (11)$$

$$PCR_{cap}^k = \frac{c_m^k \dot{E}_p^k}{c_m \dot{E}_p} \left(r_k - \frac{1 - \varepsilon_k^+}{\varepsilon_k} \right) \quad (12)$$

$$PCR_{\varepsilon}^k = \frac{\dot{E}_p^k}{\dot{E}_p} \frac{1 - \varepsilon_k^+}{\varepsilon_k} \quad (13)$$

Utilizando-se estas expressões pode-se determinar a importância de cada componente na composição do custo relativos dos produtos do sistema. Além disto fica evidente que o custo

relativo do sistema é composto por três parcelas, associadas a custos das perdas de exergia, custo de capital e destruição de exergia. A comparação do valor de cada uma das parcelas pode indicar qual destas parcelas é a mais importante. Em cada componente o valor das PCR permite comparar a importância relativa dos custos de capital e dos custos associados às ineficiências presentes no componente.

Processo de Análise e Utilização dos Parâmetros. Baseado no discutido no item 2, principalmente no sub-item referente a cálculo de parâmetros, é proposta a metodologia de análise descrita a seguir.

Para realização de uma análise puramente térmica deve-se calcular o valor da parcela de ineficiência de cada componente, Eq. (9) e a parcela referente a perdas, terceiro termo da Eq.(8) expresso pela Eq.(14). A comparação das PI 's permitirá a determinação do componente que mais contribui para a perda de eficiência de todo o sistema. A comparação da PL_{sis} com a soma das PI 's, ou com cada PI^k indicará a importância das perdas para este sistema.

$$PL_{sis} = \dot{E}_l / \dot{E}_m \quad (14)$$

Na análise termoeconômica a diferença relativa de custo de todo o sistema (r_{sis}) deve ser calculada através da Eq.(11). Este parâmetro mede a diferença entre os custos exergéticos específicos do combustível e do produto gerado pelo sistema. Assim, ele representa os custos decorrentes das ineficiências (destruição e perda de exergia) e do capital investido na construção, operação e manutenção do sistema. A participação de cada componente do sistema no r_{sis} é dado pelas PCR^k dadas pelas Equações (12) e (13). Além dos componentes as perdas de exergia podem contribuir significativamente no r_{sis} . O valor da parcela referente a perdas é dado pela Eq.(15).

$$PCL_{sis} = \dot{E}_l / \dot{E}_p \quad (15)$$

O processo de análise termoeconômica consiste em fazer-se a comparação dos valores das PCR 's relativas a capital e irreversibilidades de cada componente. Este processo indicará o fator crítico (capital ou irreversibilidade) e em qual componente ele esta associado. Além disto a comparação da PCL_{sis} com a soma das PCR 's faz a comparação dos custos associados às perdas com os custos de capital e/ou destruição de exergia.

3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para verificar-se a eficiência da metodologia de análise exergoeconômica proposta montou-se uma base com informações sobre 25 turbinas a gás, colhidas nas referências Southall&McQuiggan (1996), Product Guide (1987a) e Product Guide (1987b).

Um esquema para a modelagem das turbinas é mostrado na Fig.1. Na modelagem do compressor (CP) e do combustor (CB) utilizou-se a proposta de Bejan *et al* (1996). Na turbina (TB) considerou-se uma expansão resfriada segundo o modelo proposto por El-Masri (1986).

As informações da base de dados, para cada turbina, são: vazão de ar (\dot{m}_1), razão de pressões (r_{cp}), temperatura na entrada da turbina (T_3), temperatura de descarga dos gases (T_4) e potência líquida no eixo (\dot{W}_{lv}). Além disto considerou-se o combustível de todas como gás metano,

admitido a $T_5 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ e $p_5 = 30 \text{ atm}$. As condições de admissão do ar são $T_1 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ e $p_1 = 1.0 \text{ atm}$ e a pressão de descarga das turbinas $p_4 = 1.0 \text{ atm}$. Em todos os casos considerou-se uma queda de pressão de 5% no CB e uma perda de 3% do calor liberado neste componente. Na turbina resfriada assumiu-se a temperatura máxima suportada pelo material $T_m = 1200 \text{ K}$.

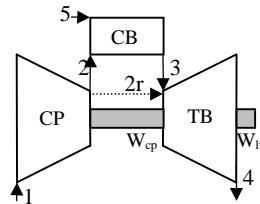


Fig.1 Esquema de Turbina a Gás

Na parte de análise econômica considerou-se uma vida útil de 15 anos, um período de construção de 2 anos e taxa de retorno de investimentos de 12% ao ano. Ao preço do combustível impôs-se uma taxa de crescimento de 6% ao ano e uma taxa de 5% foi imposta a todos os demais itens considerados. Os demais dados são iguais aos utilizados por Bejan *et al* (1996) em sua análise de caso. O preço dos componentes foi estimado através das equações propostas por Agazzani & Massardo (1997).

3.1 Análise Térmica

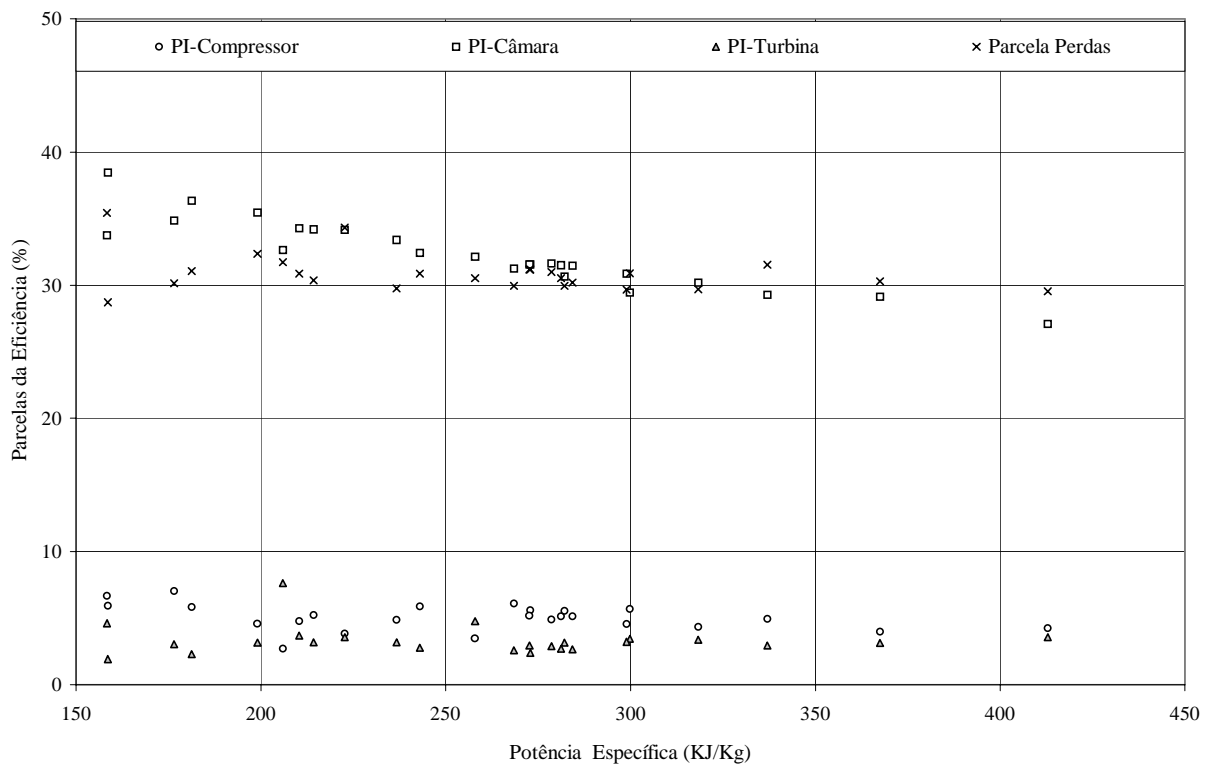


Figura 2- Parcelas de Ineficiência dos Componentes e Perdas do Sistema

O resultado da análise térmica realizada é mostrado na Fig.2. Nesta observa-se o valor das PF 's e da PL_{sis} como função da potência específica dos sistemas analisados.

Observa-se que os principais responsáveis pela redução da eficiência dos sistemas são o CB e as perdas, cada um provocando uma redução de 30%, em média, na eficiência do sistema. A TB e o CP provocam uma redução da ordem de 5% cada um.

Nas turbinas de menor potência específica o CB contribui com uma redução de até 40% na eficiência do sistema. Nas turbinas de mais alta potência específica esta contribuição cai para cerca de 27%, o que indica um aumento da eficiência do processo de combustão com aumentos da potência específica. A parcela de perdas, entretanto, não apresenta variação significativa com o aumento da potência específica.

3.2 Análise Termoeconômica

A realização da análise termoeconômica utilizando-se as PCR 's e a PCL , no contexto deste trabalho, é feita de duas formas distintas, discutidas a seguir.

A primeira possibilidade consiste em comparar: o somatório de PCR_{ϵ} (parcela relativas referentes a irreversibilidades), o somatório de PCR_{cap} (parcela relativa aos custos de Capital e O&M) e a parcela de perdas (PCL_{sis}). Este processo permite que se determine, em todo o sistema, qual destas três parcelas mais contribui para o aumento do preço dos produtos. A Fig.3 mostra o resultado desta análise para as turbinas a gás analisadas.

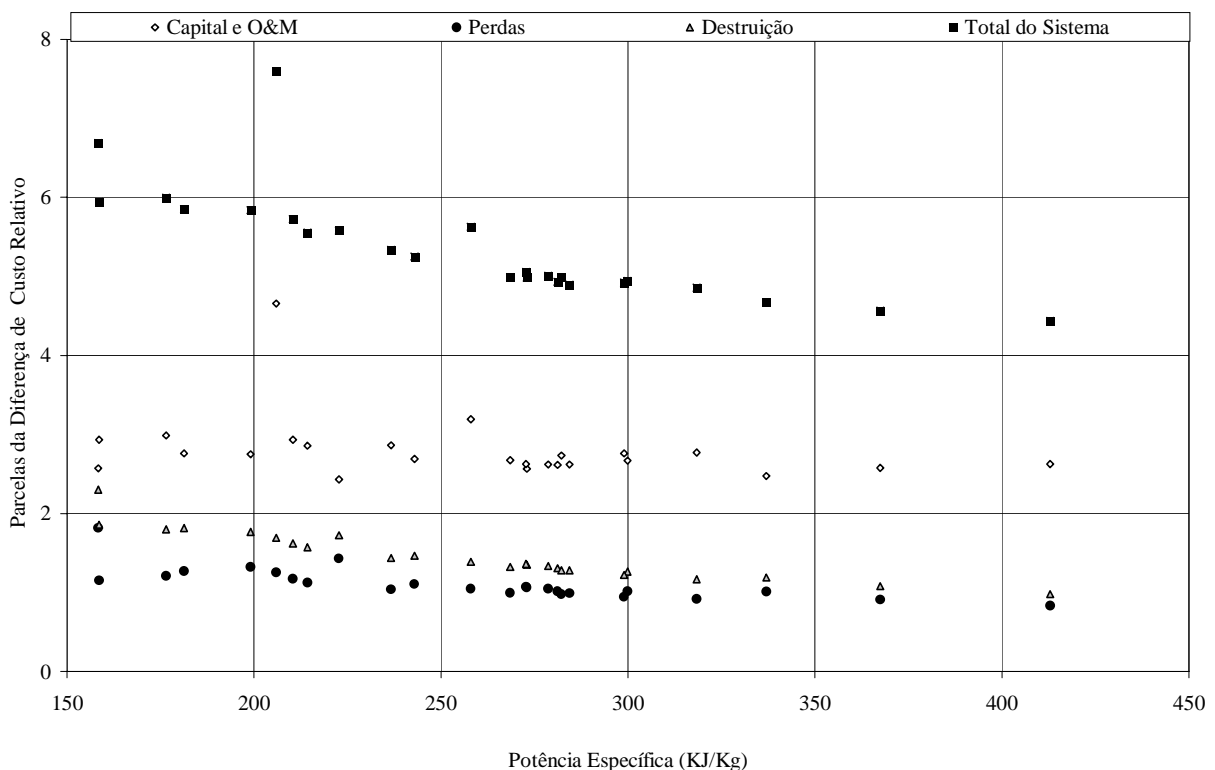


Figura 3 – Parcelas da Diferença Relativo de Custo – Análise do Sistema

Esta figura evidencia que os custos de capital e O&M são os principais responsáveis pela diferença entre o custo do combustível utilizado e preço do produto final gerado. A parcela de capital e O&M é cerca de três vezes maior que as parcelas referentes às perdas ou destruição de exergia. Todavia deve-se observar que a soma das parcelas referentes à perdas e destruição resulta em valores que correspondem a cerca de 70% da parcela de Capital e O&M, o que indica que os custos associados a ineficiências são da mesma ordem de grandeza que os custos associados a Capital e O&M.

Uma outra possibilidade para o uso das *PCR's* é a determinação do componente mais importante no sistema segundo o ponto de vista termoeconômico. Aqui faz-se a soma das *PCR's* relativas a capital e irreversibilidade em cada componente. Os valores obtidos são então comparados. A Fig.4 mostra o resultado deste processo.

Nesta figura nota-se que a turbina é o componente de maior importância na composição dos custos do sistema. Todavia, como na Fig.3, não é possível indicar um elemento dominante, pois os custos associados ao CP e ao CB, se somados, são da mesma ordem de grandeza dos custos da turbina.

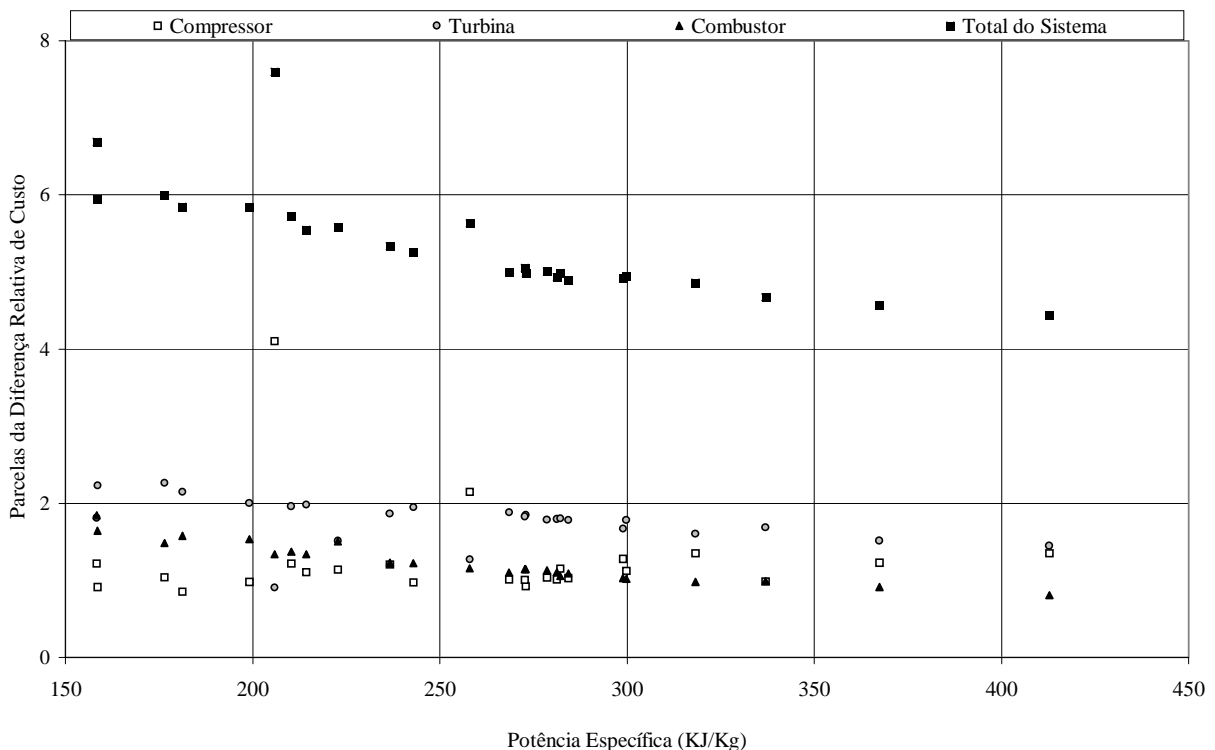


Figura 4 - Custo Relativo do Sistema - parcelas dos componentes

Um ponto a ser notado entre as análise térmica e termoeconômica é a mudança de cenário no que diz respeito à importância de cada componente/processo. Na análise térmica o CB e as perdas destacam-se como principais fontes de ineficiência. A análise termoeconômica, por sua vez, quebra esta dominância pois que CP, CB e TB tem *PCR* na faixa de 1 a 2 como visto na Fig.4, o mesmo valor da PCL_{sis} observado na Fig.3.

A partir destes resultados fica evidente que as parcelas de ineficiência (PI 's) de cada componente e a parcela de perdas (PL_{sis}) como os parâmetros indicados quando apenas a análise térmica será realizada.

Na realização da análise termoeconômica os parâmetros a serem utilizados são as parcelas de custo relativo (PCR 's) referentes a irreversibilidades e a Capital e O&M , bem como a parcela referente ao custo das perdas (PCL_{sis}) utilizando-se a metodologia descrita acima. O uso destes parâmetros permite a identificação segura dos pontos críticos de um sistemas segundo um ponto de vista termoeconômico.

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos mostram que o uso das parcelas de ineficiência na análise térmica permitem a identificação clara das fontes de ineficiência do sistema. Esta metodologia, neste caso, identificou a destruição de exergia no CB e as perdas de exergia como principais fontes de ineficiência das turbinas a gás.

Na análise termoeconômica a metodologia desenvolvida mostrou-se adequada, permitindo a identificação clara das fontes de custo dentro do sistema. O uso destas parcelas, entretanto, exige criatividade e cautela.

A comparação de diferentes fontes de custo para todo o sistema indicou os custos de Capital e O&M como o mais importante em se tratando de turbinas a gás, mas deixando claro que os custos referentes a destruição e perdas de exergia são significativos e não podem ser ignorados.

O uso das parcelas para comparar os componentes do sistema indicou a turbina como a principal fonte de custo na maioria dos sistemas analisados. Todavia a diferença em relação ao compressor e ao combustor foi sempre muito pequena o que indica que os componentes são igualmente importantes no processo de composição do custo final dos produtos do sistema.

BIBLIOGRAFIA

Agazzani, A. ; Massardo, A. F. - 1997 - A Tool for Thermo-economic Analysis and Optimization of Gas, Steam and Combined Plants - Journal of Engineering for Gas Turbines and Power - vol. 119 pp. 885-892

Bejan, A. ; Tsatsaronis, G. ; Moran, M. - 1996 - Design of Thermal Systems – John Wiley & Sons, INC. – New York

Cohen, H. ; Rogers, GFC. ; Saravanamutto, HIH. - 1996 - Gas Turbine Theory - Ed. Addison Wesley Longman Limited - London - England

Dodero, G. 1997 - The 1997 Italian Energy Handbook - from research to construction - Power and Electric Power International Magazines - McGraw-Hill Companies

El-Masri, M. A. – 1986 - On Thermodynamics of Gas Turbines Cycles: Part 2 - A Model for Expansion in Cooled Turbines - Journal of Engineering for Gas Turbines and Power - vol. 108 pp. 151-159

El-Sayed, Y. M. – 1989 - A Decomposition Strategy for Thermo-economic Optimization - Journal of Energy Resources Technology - vol. 111 pp. 111-120

El-Sayed, Y. M. - 1996 - A Second-Law-Based Optimization: Part 1 - Methodology - Journal of Engineering for Gas Turbines and Power - vol. 118 pp. 693-697

Frangopoulos, C. A. - 1992 - Optimal Synthesis and Operation of Thermal Systems by the Thermo-economic Functional Approach - Journal of Engineering for Gas Turbines and Power - vol. 114 pp. 707-714

Korakianitis, T. ; Wilson, D.G. - 1994 - Models for Predicting the performance of Brayton-Cycle Engines - Journal of Engineering for Gas Turbines and Power - vol. 116 pp. 381-388

Product Guide: Gas Turbines - 1987a - Modern Power Systems - May 1987 pp 41-47

Product Guide: Gas Turbines - Large industrial units - part 1- 1987b - Modern Power Systems - April 1987 pp 49-57

Southall, L. ; McQuiggan, G. - 1996 - New 200 MW class 501G Combustion Turbine - Journal of Engineering for Gas Turbines and Power - vol. 118 pp. 572-577

Tsatsaronis, G. ; Lin, L. ; Tawfik, T. ; Gallaspy, D. T. - 1994 - Exergoeconomic Evaluation of a KRW-Based IGCC Power Plant - Journal of Engineering for Gas Turbines and Power - vol. 116 pp. 300-306

Tsatsaronis, G. ; Winhold, M. - 1985 - Exergoeconomic Analysis and Evaluation of Energy Conversion Plants: A New General Methodology - Energy, vol. 10 n° 1, pp. 69-80

Horlock, J. H. - 1992 - The Rational Efficiency of Power Plants and their Components - Journal of Engineering for Gas Turbines and Power - vol. 114 pp. 603-611

A new set of parameters to thermo-economic Analysis

Abstract: *On this paper a new set of parameters to thermo-economic analysis is presented. These parameters show the importance of each component on the final cost composition. A computer code was developed to test these parameters. This code was used to analyse 25 gas turbines. The results using PI's and PL show that exergy losses and exergy destruction on CB are main causes on thermal efficiency reduction. The thermo-economic analysis, using the PCR_{cap} , PCR_{ϵ} and PCL_{sis} show that all the components and the exergy losses have the same importance the final cost composition. Also show that capital cost are greater than exergy destruction and losses costs.*

Keywords: *Exergy, Exergoeconomic Analysis, Gas turbines, Thermal Systems*