

INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA CARGA NO RENDIMENTO DE EQUIPAMENTOS E CICLOS DE CO-GERAÇÃO

MARIO A.B. ERNST – basulto1 @ uol.com.br - basulto@feg.unesp.br

JOSÉ A.P. BALESTIERI – perrella@feg.unesp.br

Universidade Estadual Paulista – UNESP – Departamento de Engenharia Mecânica

Av. Dr Ariberto Pereira da Cunha, 333 – Guaratinguetá – SP – CEP 12500-000

***Resumo.** Neste artigo são apresentadas algumas considerações sobre o efeito da variação da carga em geradores de vapor e turbinas. Quando há variações na carga do equipamento, devidas a variações da demanda do processo industrial, o equipamento passa a operar num ponto diferente daquele definido como de projeto, variando seu rendimento e como consequência o consumo específico de insumo energético. A finalidade deste artigo não é determinar de forma exaustiva a variação do rendimento em função da carga e sim alertar que na escolha de equipamentos e ciclos a variação da eficiência pode ter um efeito sobre o consumo, e portanto, sobre os custos operacionais. No trabalho as variações da carga são dadas como conhecidas e as variações do rendimento dos equipamentos obtidas da literatura. São apresentados exemplos com ciclo Rankine e Brayton, variando-se as condições de operação e estimando-se um custo operacional para cada caso.*

***Palavras-chave:** Co-geração, Rendimento, Demanda*

1. INTRODUÇÃO

Embora a demanda energética real seja quase sempre variável, conhecida a energia total consumida no período - diário, mensal ou anual -, pode ser calculada uma demanda média, equivalente a uma situação em que a demanda seja constante e o consumo energético igual ao que acontece com demanda variável. Os equipamentos podem ser especificados a partir desses valores médios, considerando-os como valores nominais de operação ou valores de projeto, assumindo que nesse ponto a eficiência dos mesmos é a máxima –o que nem sempre é verdadeiro -, motivo pelo qual neste trabalho é considerado que qualquer desvio do ponto de operação implica num menor rendimento desses equipamentos. Dessa forma, a eficiência do ciclo normalmente será máxima no ponto de operação, porém, ao se considerar a co-geração, na qual o calor não aproveitado em produzir trabalho também é útil, tal fato deverá ser verificado. Os casos nos quais o rendimento de um equipamento aumenta com cargas acima da nominal não são considerados, exceto nas turbinas a gás, para focalizar melhor o tema proposto. Nesta análise são considerados apenas aspectos energéticos, sendo que a extensão para a parte econômica é simples, mas não objeto do presente trabalho.

A variação da carga pode ser considerada como “absorvida” pelo equipamento, isto é, adaptando-se este às variações, ou como “ignorada” pelo equipamento, nesse caso, desperdiçando-se ou vendendo-se os excedentes, ou adquirindo de outra fonte o déficit da energia demandada. Na segunda opção não há variação de carga para os equipamentos, sendo o problema apenas econômico.

Neste trabalho é apresentada uma modelagem que considera as flutuações de demanda em um processo em comparação com a variação de carga dos sistemas de geração de energia, procurando verificar a validade da prática corrente de projetar-se tais sistemas de acordo com os valores médios de demanda.

2. DEMANDA MÉDIA E ENERGIA CONSUMIDA ACIMA DA DEMANDA MÉDIA

A “Figura 1” mostra o conceito de demanda média anteriormente aludido; a área do retângulo sombreado representa o total da energia consumida no período T, área por definição igual à área abaixo da linha quebrada, que corresponde à demanda instantânea. Neste estudo os equipamentos deverão variar sua produção, “acompanhando” a curva de demanda instantânea; assume-se que a capacidade do equipamento acima da nominal é suficiente para suprir a demanda requerida.

Para determinar quanto varia o rendimento de um equipamento é necessário saber quanto varia sua produção acima e abaixo da nominal, tanto em valor instantâneo como ao longo do tempo, uma vez que existe o interesse em saber como é afetado o consumo energético. Com o auxílio da “Figura 2” será esclarecida a idéia anterior.

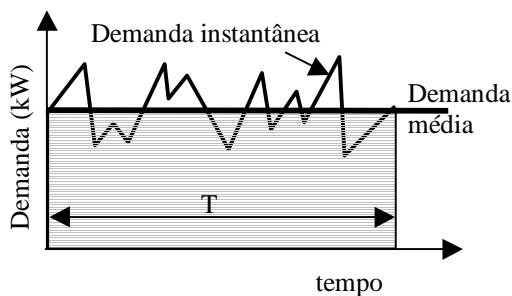


Figura 1 – Demanda média (DM)

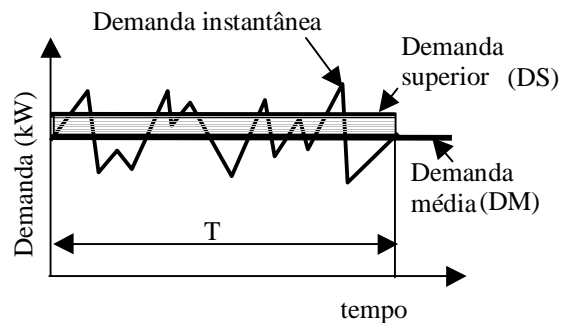


Figura 2 – Demanda superior (DS)

O retângulo sombreado da “Figura 2” representa a energia consumida com demandas maiores do que a média (DM), cuja área é igual à compreendida pela demanda instantânea acima da demanda média. Do ponto de vista do consumo energético poderia ser preferível trabalhar com eficiência 30% menor por um curto intervalo de tempo do que se trabalhar com eficiência 10% menor por longos períodos. Por esse motivo entende-se ser apropriado estimar a quantidade de energia consumida com demandas acima da média em relação à energia total determinando-se uma demanda maior do que a média, denominada demanda superior (DS).

Determinados esses valores através de dados reais ou modelados, é possível estabelecerem-se tanto a relação entre energia consumida acima de média e a energia total (ϵ) quanto a demanda superior, calculando com esta última o rendimento do equipamento correspondente, e com o fator ϵ a quantidade de energia produzida com esse rendimento. O equipamento também trabalhará com capacidades abaixo da nominal, sendo possível deduzir que haverá uma demanda inferior (DI) que pode ser calculada conhecendo-se a superior, como segue:

$$\text{demanda inferior (DI)} = \text{DM} - (\text{DS} - \text{DM}) \quad (\text{kW}) \quad (1)$$

e também se cumpre que:

$$\text{DS} = (1 + \epsilon) \text{DM} \quad (\text{kW}) \quad (2)$$

$$\text{DI} = (1 - \epsilon) \text{DM} \quad (\text{kW}) \quad (3)$$

3. ENERGIA NECESSÁRIA

O consumo total requerido pode ser estimado pela potência E_r :

$$E_r = (1 - 2 \cdot \epsilon) \cdot \text{DM} + \epsilon \cdot \text{DS} + \epsilon \cdot \text{DI} \quad (\text{kW}) \quad (4)$$

e utilizando-se as “Eq. (2) e (3)” resulta em:

$$E_r = (1 - 2 \cdot \epsilon) \cdot \text{DM} + \epsilon \cdot (1 + \epsilon) \cdot \text{DM} + \epsilon \cdot (1 - \epsilon) \cdot \text{DM} \quad (\text{kW}) \quad (5)$$

assumindo-se o período T igual à unidade para simplificação, verificando-se que ϵ corresponde à fração do período em que é utilizada a demanda superior e também a inferior, e $(1 - 2 \cdot \epsilon)$ a fração de operação com demanda média. A “Eq. (5)” é representada na “Figura 3”.

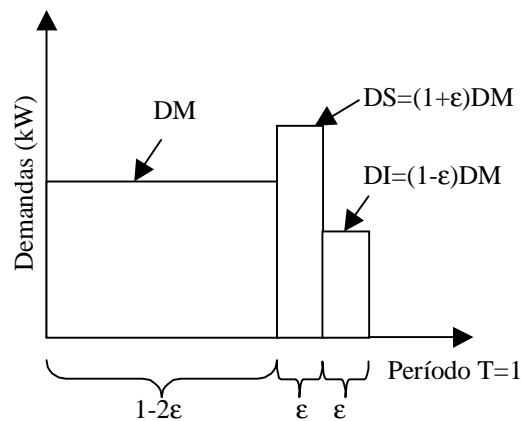


Figura 3 – Consumo separado por demandas

A “Figura 3” e a “Eq. (5)” explicam os critérios adotados, que podem ser deduzidos a partir das simplificações aceitas. Outra simplificação importante é assumir que o equipamento operará com apenas três valores de carga – média, superior e inferior – quando na realidade em princípio existem infinitas condições de carga no equipamento.

4. INSUMO ENERGÉTICO NECESSÁRIO

Uma vez conhecidas as necessidades da fábrica ou processo é o momento de determinar o insumo real de energia, o qual é influenciado pela eficiência dos equipamentos geradores ou conversores de energia – menor eficiência de uma caldeira implica em maior consumo de combustível para uma determinada necessidade do processo, menor eficiência de um

turbogerador resulta numa menor produção elétrica ou num maior consumo de vapor ou combustível para manter uma produção desejada.

Assumindo por simplicidade que haverá um rendimento nominal, η_{nom} , correspondente à demanda média, e um único rendimento menor, $\eta_{mín}$, correspondente às demandas superior e inferior, a partir da “Eq. (5)” pode-se encontrar uma expressão para o insumo energético necessário E_{comb} :

$$E_{comb} = \frac{(1 - 2 \cdot \varepsilon) \cdot DM}{\eta_{nom}} + \frac{\varepsilon \cdot (1 + \varepsilon) \cdot DM}{\eta_{mín}} + \frac{\varepsilon \cdot (1 - \varepsilon) \cdot DM}{\eta_{mín}} \quad (\text{kW}) \quad (6)$$

No caso de turbinas a gás a “Eq. (6)” normalmente exibirá três rendimentos diferentes.

5. RENDIMENTO DOS EQUIPAMENTOS

Serão usadas as curvas de desempenho de geradores de vapor, turbinas a vapor e turbinas a gás, desconsiderando a influência nas bombas de alimentação de caldeiras, por serem pequenas as potências envolvidas em relação ao total. Na Figura 4 são mostradas as formas dessas curvas, assumidas para este trabalho. Aqui são utilizados os valores simplificados (Ernst, 2000) mostrados na Tabela 1, que devem ser apenas tomados como exemplo e não para serem empregados em projetos específicos.

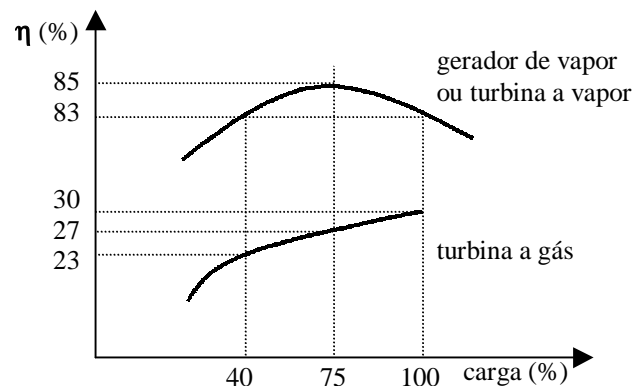


Figura 4 – Curvas de desempenho

Tabela 1 – Rendimento de equipamentos (%)

Equipamento	Produção correspondente à demanda		
	Média	Superior	Inferior
Gerador de vapor	85	83	83
Turbina a vapor	85	83	83
Turbina a gás	27	30	23

Quando eventualmente disponíveis, as curvas utilizadas deveriam ser as fornecidas pelo fabricante, caso contrário, como nesta situação, informações genéricas da literatura e

catálogos orientativos podem ser consideradas para estudos preliminares.

As colunas média, superior e inferior da “Tabela 1” podem ser interpretadas como 75%, 100% e 40% da carga nominal, sendo estes dois últimos valores colocados apenas como exemplo.

6. ANÁLISE DE UM CICLO RANKINE

Na “Tabela 2” é mostrado o resultado obtido de uma série de medições numa fábrica existente. Vale a pena relembrar que os valores das demandas e de ϵ indicados na “Tabela 2” são obtidos a partir das demandas instantâneas coletadas ou modeladas. No caso de uma simulação, a variação de um destes valores implicará na variação dos outros, segundo as “Eq. (1) a (5)”.

Na “Figura 5” é mostrada a disposição física do ciclo de Rankine proposto. Neste exemplo é considerada paridade térmica, pelo que o valor da potência térmica E_{pv} da “Figura 5” corresponde aos 11.100 [kW] da “Tabela 2”, e o valor da potência elétrica $E_p=1.215$ [kW] é **uma consequência** de se ter escolhido satisfazer a demanda térmica do processo.

Tabela 2 – Demandas térmica e elétrica do processo real (kW)

Descrição	Demanda elétrica	Demanda térmica
Demanda média	5.900	11.100
Demanda superior	6.000	12.800
Demanda inferior	5800	9.400
ϵ (%)	1,69	15,32

Com os valores de projeto escolhidos e eficiências nominais de 0,85 para caldeira e turbina, foi determinada a potência térmica total do combustível, E_{comb} , que resultou ser $E_{comb}= 14.100$ [kW], originando um custo operacional para o sistema do co-geração quando não há variação de demanda nem do rendimento.

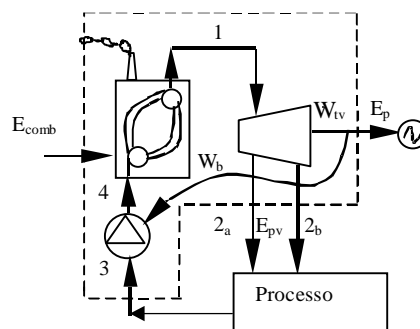


Figura 5 –Ciclo Rankine

Ao se considerar a variação de demanda encontra-se que tanto a demanda térmica quanto a elétrica estão sujeitas a esta variação, não sendo possível atender às duas simultaneamente. Como indicado anteriormente, no exemplo foi escolhido atender à demanda térmica (paridade térmica), pelo que o ciclo operará fornecendo a quantidade de energia térmica demandada

instantaneamente variando-se a produção de vapor no gerador, e por consequência a quantidade que passa pela turbina, de forma que E_p variará controlada pela E_{pv} requerida pela fábrica, sendo afetada também pela variação do rendimento da turbina. Pode-se perceber, então, que a taxa de combustível consumido será afetada apenas pela variação da demanda térmica, para a qual o parâmetro ϵ tem o valor de 15,32%. Com os valores da “Tabela 1”, pode ser facilmente feita uma proporção para determinar o novo consumo de combustível E'_{comb} :

$$\begin{aligned} E'_{comb} &= (1 - 2\epsilon) \cdot E_{comb} + (1 + \epsilon) \cdot E_{comb} \frac{0,85}{0,83} \epsilon + (1 - \epsilon) \cdot E_{comb} \frac{0,85}{0,83} \epsilon \\ &= (1 - 2\epsilon) \cdot E_{comb} + 2 \cdot E_{comb} \frac{0,85}{0,83} \epsilon \end{aligned}$$

e substituindo valores:

$$E'_{comb} = (1 - 2 \cdot 0,1532) \cdot 14100 + 2 \cdot 14100 \frac{0,85}{0,83} 0,1532 = 14.204 \text{ [kW]}$$

e considerando rendimento invariável seriam os mesmos 14.100 [kW] originais. A diferença aparentemente é pequena – 104 [kW] – que num ano representa um custo aproximado de¹

$$104[\text{kW}] \cdot 8760 \left[\frac{\text{h}}{\text{ano}} \right] \cdot 0,01 \left[\frac{\text{US\$}}{\text{kWh}} \right] = 9.110 \left[\frac{\text{US\$}}{\text{ano}} \right]$$

valor também pequeno. Pode ser calculado que se o rendimento da caldeira diminui para 80% o consumo adicional passa para 270 [kW] e o aumento anual do custo para US\$ 23.650. Se ao mesmo tempo o valor de ϵ fosse 20%, o consumo aumentaria em 352,5 [kW] e o custo anual em US\$ 30.880, pelo que sempre vale a pena verificar as condições atuais de operação nestes patamares de consumo, especialmente se comparado o custo de alguns dias ou semanas gastos num estudo, com o potencial de economia mostrado. Posteriormente, o custo de monitorar a manutenção da economia conseguida poderá ser diluído nos custos da operação normal, com eventuais auditorias energéticas. Na “Tabela 3” são resumidos os cenários propostos.

Tabela 3 – Resumo dos cenários para ciclo Rankine

Cenários	$\epsilon=0$ $\eta=0,85$ (caso teórico)	$\epsilon=0,1532$ $\eta_{m\acute{a}x}=0,85$ $\eta_{m\acute{i}n}=0,83$	$\epsilon=0,1532$ $\eta_{m\acute{a}x}=0,85$ $\eta_{m\acute{i}x}=0,80$	$\epsilon=0,20$ $\eta_{m\acute{a}x}=0,85$ $\eta_{m\acute{i}n}=0,80$
Aumentos anuais				
consumo (kW)	0	104	270	352,5
custo (US\$)	0	9.110	23.650	30.880

Neste exemplo, por estar focado na parte energética, não é examinado o impacto econômico da variação da produção elétrica da turbina, impacto caracterizado por um déficit que deverá ser suprido por outras fontes (por exemplo, a concessionária²). A variação da produção elétrica pode ser avaliada da mesma forma que o foi a energia térmica.

1 assumindo operação plena no ano e preço do combustível de 0,01 US\$/kWh

2 nesse caso será necessário avaliar o impacto da demanda de reserva

7. ANÁLISE DE UM CICLO BRAYTON

O ciclo considerado é mostrado na “Figura 6” e os dados da turbina a gás escolhida na “Tabela 4”. É assumido que o rendimento da caldeira de recuperação não varia sensivelmente com a produção, uma vez que é considerada uma temperatura de saída dos gases na chaminé constante e igual a 200 °C, que a eficiência da queima suplementar também o é (Horlock, 1987) assim como também é constante a perda térmica através da carcaça da caldeira de recuperação.

Havendo queima suplementar, sempre será fornecida a demanda térmica, parte pelos gases da turbina, parte pelo combustível suplementar ou auxiliar. Das “Tabelas 2 e 4” pode ser verificado que os gases da turbina nunca serão auto-suficientes para suprir toda a energia térmica necessária ao processo, e, dependendo dos custos dos insumos, pode não ser econômico produzir energia elétrica além da necessária (Ernst, 2000), pelo que neste caso é considerado que a energia elétrica demandada controla a produção elétrica da turbina, num processo que estaria classificado como de paridade elétrica. A paridade térmica, a rigor, seria obtida escolhendo grandes turbinas – com excesso de energia elétrica, que poderia ser vendida – que forneçam a quantidade de gás necessária para toda a demanda térmica; entretanto, essa possibilidade não será aqui explorada.

Tabela 4 –Dados da turbina a gás

Marca/modelo	Potência elétrica E_p (kW)	Rendimento η_{tg}	Consumo E_{comb} (kW)	Potência térmica E_{pv} (kW)
ABB/GTM7	5.780	0,2954	19.567	8.655

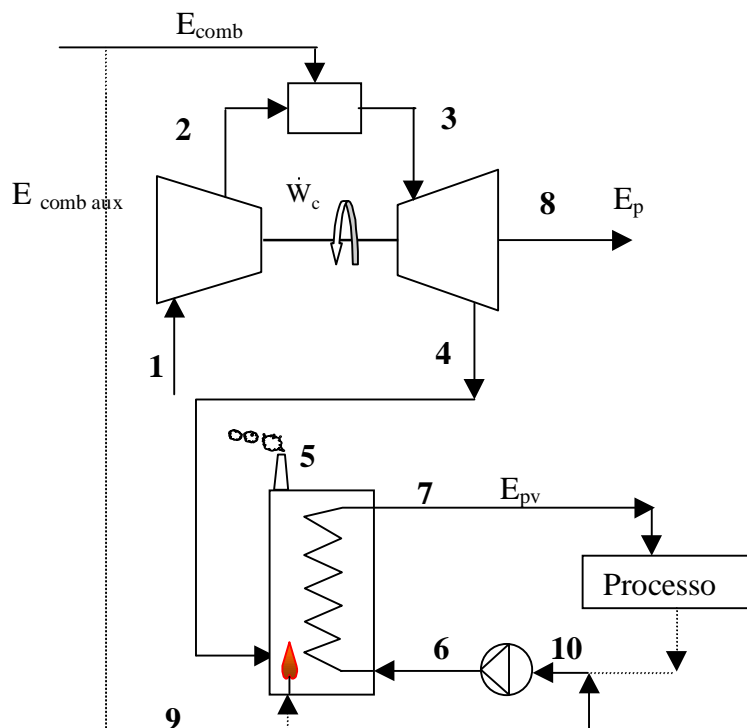


Figura 6 – Ciclo Brayton

Os outros dados da turbina, necessários para calcular a potência térmica E_{pv} , são, segundo a numeração da “Figura 6”, $T_4= 550 \text{ }^\circ\text{C}$; $\dot{m}_4=21,54 \text{ (kg/s)}$; $T_5=200 \text{ }^\circ\text{C}$ e $C_p \text{ gases}=1,148 \text{ (kJ/kg.K)}$, este último segundo Cohen *et al.*(1987). É considerado que as perdas para o meio através da carcaça estão embutidas na alta temperatura admitida para os gases da chaminé, a qual em determinados casos poderia diminuir-se até 100 ou 120 $^\circ\text{C}$ (Kehlhofer, 1991).

Para evitar que este exemplo seja complicado ao ponto de se diluir perdendo o foco inicial, não será considerado que as temperaturas dos gases na entrada e saída da turbina variam segundo a carga, e sim somente a vazão dos gases, de forma proporcional à potência elétrica fornecida. Num estudo real nenhuma das duas simplificações anteriores pode ser adotada antes de um cálculo que utilize a curvas de desempenho fornecidas pelo fabricante.

Considerando que o déficit de energia térmica é fornecida pelo combustível suplementar, com os valores das “Tabelas 1 e 2” pode ser calculado um consumo para o caso de não haver variações e outro quando as há. Para maior clareza, ainda é considerado que o valor da E_p da turbina é igual à demanda média da fábrica, ou seja 5.900 (kW), porém os outros valores serão mantidos. Na “Tabela 5” é mostrado o consumo de combustível para o caso de demanda constante.

Tabela 5 – Consumo com demandas constantes (kW)

Produção elétrica E_p	Déficit elétrico	Produção térmica E_{pv}	Déficit térmico	$E_{\text{comb turbina}}$	$E_{\text{comb aux}}$	$E_{\text{comb total}}$
5.900	0	8.655	2.445	19.567	2.445	22.012

Para considerar a variação da demanda e a conseqüente variação do rendimento, primeiramente é analisada a parte elétrica, de forma similar à realizada para a paridade térmica do ciclo Rankine

$$E_{\text{comb turbina}} = (1 - 2 \cdot 0,0169) \cdot 19567 + 0,0169 \cdot 19567 \frac{0,27}{0,30} (1 + 0,0169) + 0,0169 \cdot 19567 \frac{0,27}{0,23} (1 - 0,0169) = 19.315 \text{ [kW]}$$

valor menor que para o caso original, o que se explica porque neste caso a turbina operou durante uma fração $\epsilon = 0,0169$ com uma eficiência maior (0,30) e uma potência maior que a nominal $(1+0,0169)$. Por outro lado, a fração trabalhada com menor carga foi com eficiência menor, o que em resumo significa que neste caso houve influência positiva do ponto de vista do consumo do maior rendimento com cargas acima da nominal, o que não acontece com a turbina de vapor considerada no ciclo Rankine. Os fabricantes de turbinas indicam de quanto pode ser o pico de carga aceitável e por quantas horas por ano, o que deve ser verificado nos estudos detalhados. Na seqüência é verificada a energia térmica E'_{pv} fornecida pelos gases, considerando que há proporcionalidade entre a vazão destes e a potência elétrica E_p instantânea fornecida. Também pode ser feita a proporcionalidade com a energia térmica nominal $E_{pv}=8.665 \text{ [kW]}$, como segue:

$$E'_{pv} = (1 - 2 \cdot 0,0169) \cdot 8655 + 2 \cdot 0,0169 \cdot 8655 \cdot 0,0169 = 8.655 \text{ [kW]}$$

não havendo diferença com a nominal, devido às suposições efetuadas e que a energia elétrica

fornecida é igual ao valor médio. O consumo total de combustível será igual ao $E_{\text{comb turbina}}$ mais o déficit térmico, ou seja:

$$E_{\text{comb total}} = 19315 + (11100 - 8655) = 21.760 \text{ [kW]}$$

valor 252 [kW] menor que na situação de demanda invariável. Esta vantagem é conseguida pelo fato da turbina trabalhar um período acima da carga nominal, com maior rendimento. Esta situação não pode ser generalizada, e cada caso deve ser estudado em detalhe de forma individual. A economia anual de combustível neste caso é:

$$252 \text{ [kW]} \cdot 8760 \left[\frac{\text{h}}{\text{ano}} \right] \cdot 0,01 \left[\frac{\text{US\$}}{\text{kWh}} \right] = 22.075 \left[\frac{\text{US\$}}{\text{ano}} \right]$$

valor bastante significativo.

8. CONCLUSÕES

A variação da demanda tem influência maior ou menor no desempenho de equipamentos e ciclos, dependendo da variação do rendimento com a carga, e da fração ϵ de energia consumida acima da demanda média. Esta influência poderá ser benéfica ou prejudicial, dependendo se equivale a uma diminuição ou aumento do consumo de combustível, respectivamente.

A economia de energia e de recursos econômicos pode não ser muito significativa, porém os custos de estudos relacionados com os aspectos considerados neste artigo também não deverão ser muito volumosos, considerando que apenas serão empregadas horas de engenharia para selecionar equipamentos e estudar remanejamento de cargas para diminuir a variação das demandas energéticas.

Na estimativa de viabilidade de projetos de co-geração tais aspectos não devem ser desconsiderados, por haver interação entre as energias elétrica e térmica produzidas, havendo necessidade de verificar valores energéticos e econômicos em conjunto.

REFERÊNCIAS

- Cohen, H. & Rogers, G. F. C. & Saravanamuttoo, H. L. H., 1987, Gas Turbine Theory, Longman Singapore Publishers (Pte), Singapura.
- Ernst, M. A. B., 2000, Estudo de gestão energética e co-geração numa indústria de processos químicos, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, Departamento de Engenharia Mecânica, Guaratinguetá, SP.
- Horlock, J. H., 1987, Cogeneration: Combined Heat and Power. Thermodynamics and Economics, Pergamon Press Ltd., Oxford.
- Kehlhofer, Rolf, 1991, Combined-Cycle Gas & Steam Turbine Power Plants, PennWell Publishing Company, Tulsa.

EFFECTS OF VARIABLE LOADS ON EQUIPMENT AND COGENERATION CYCLES PERFORMANCE

This article presents some aspects relative to the effects of changing loads on steam

generators and turbines. When the equipment solicitation varies due to industrial process demand changes, the equipment work in off-design point, altering its efficiency and the specific fuel rate. This work do not look for a detailed and exhaustive determination of the performance variation with the load but shows that in the selection of equipments this variation can have effects over the consume and the costs. In the present article it is assumed that the load variations are known, and the effects on the equipment efficiency were took from the correlated literature. An example of a Rankine cycle and other of a Brayton cycle are discussed, altering the operational conditions estimating the operating cost for each case.

Keywords: *Cogeneration, Efficiency, Demand*