

# LEVANTAMENTO DA CAPACIDADE DE PRODUÇÃO DE VAPOR DE TURBINAS A GÁS PARA COGERAÇÃO

## **Primeiro Autor: Tamer Mogawer**

FEG – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - UNESP – Universidade Estadual Paulista  
R. Ariberto Pereira da Cunha, 333 – CEP 12500-000 – Guaratinguetá, SP, Brasil  
Tel.: (012) 31232800 Fax.: (012) 31232846 e-mail: [tamer.mogawer@power.alstom.com](mailto:tamer.mogawer@power.alstom.com)

## **Segundo Autor: Prof. Dr. Júlio Santana Antunes**

FEG – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - UNESP – Universidade Estadual Paulista  
R. Ariberto Pereira da Cunha, 333 – CEP 12500-000 – Guaratinguetá, SP, Brasil  
Tel.: (012) 31232800 Fax.: (012) 31232846 e-mail: [santana@feg.unesp.br](mailto:santana@feg.unesp.br)

## **RESUMO**

*No contexto energético atual, que tende a valorizar fontes secundárias, confiáveis e ecologicamente adequadas com o objetivo de garantir o fornecimento de eletricidade de forma econômica e independente de flutuações conjunturais, as plantas que produzem calor para processo são, na grande maioria, tecnicamente aptas a gerar eletricidade, constituindo um notável potencial elétrico complementar ainda não aproveitado.*

*Muitas dessas plantas utilizam sistemas de cogeração, que consistem na produção simultânea de energia elétrica e energia térmica a partir da queima de um único combustível, com a recuperação de parte do calor rejeitado, reduzindo-se desta forma as perdas energéticas e aumentando-se a eficiência global do sistema. Nos sistemas de cogeração é comum a utilização de tecnologias utilizando turbinas a gás, que servem para uma larga faixa de aplicações; e tem como principais vantagens: seu curto tempo para partida e o baixo custo de investimento.*

*A partir do estudo realizado sobre os ciclos utilizados para cogeração, e com as características técnicas das turbinas a gás da ALSTOM, foi possível equacionar um sistema de cogeração, utilizando turbina a gás associado a caldeira de recuperação sem queima suplementar, através da aplicação dos princípios da termodinâmica. Para as turbinas a gás utilizadas neste estudo foi traçado as curvas de capacidade de produção de vapor, e a partir destes gráficos, pode-se obter as faixas de pressão em que o vapor está disponível e as vazões em que este pode ser obtido. Podendo desta maneira selecionar a turbina a gás da ALSTOM mais adequada para cada situação.*

**Palavras-Chave:** Turbina a Gás, Cogeração, Vapor, Ciclo Combinado

## 1. INTRODUÇÃO

As turbinas a gás são motores térmicos que realizam a conversão da energia de um combustível em potência de propulsão, potência de eixo ou potência elétrica.

Quando comparadas com os outros motores térmicos, apresentam como características principais:

1. Menor relação entre custo de capital e potência (\$/kW )
2. Menor relação peso por potência ( kg/kW )
3. Menor relação espaço ocupado por potência ( $\text{m}^3/\text{kW}$  )

Existem basicamente dois tipos de turbinas: as de fluxo radial e as de fluxo axial. As turbinas de fluxo radial são mais usuais para fluxos de baixa velocidade e geralmente empregadas em máquinas compactas (Taki, 1991). A vantagem desse tipo de turbina está na equivalência de um simples estágio com dois ou mais estágios de turbina do tipo axial. As turbinas de fluxo radial oferecem melhor benefício quando instalada em conjunto com compressores do tipo centrífugos, e tendem a ser mais baratas do que as turbinas axiais.

Os gases provenientes da câmara de combustão são expandidos na turbina contra a atmosfera, escapando dessa a uma faixa disponível de temperatura maior do que 400 °C e menor do que 600 °C (Taft, 1991).

A eficiência térmica operacional na produção de eletricidade em um sistema com turbina a gás de ciclo simples, situa-se atualmente entre 15% e 38% (Taki, 1991) e (Taft, 1991), sendo que nos casos de maior eficiência existe injeção de vapor na câmara de combustão. A performance depende principalmente da taxa de compressão, sofrendo ainda, alguma influência da temperatura dos gases na entrada da turbina.

Uma alta temperatura na entrada da turbina, é desejável para viabilização de uma maior eficiência térmica, embora isto diminua, em geral, a vida útil da máquina. Para proteger a turbina e a câmara de combustão das altas temperaturas , alguns metais especiais e a cerâmica têm sido incorporados na construção desses componentes, contribuindo para um aumento da temperatura dos gases na entrada da turbina até 1250 °C, conforme Taki (1991), e níveis de eficiência de 42%.

Segundo Kovacik (1984) as unidades de produção de vapor a partir da recuperação do calor dos gases de exaustão de turbinas a gás são disponíveis nas versões sem queima suplementar e com queima suplementar de combustível.

No caso da caldeira de recuperação com queima suplementar (eficiência em torno de 85%), o oxigênio contido nos gases de escape permite a queima de combustível suplementar de modo a aumentar a produção de vapor com relação a caldeira de recuperação sem queima suplementar.

Para unidades sem queima suplementar a eficiência é ligeiramente menor. Taft (1991) e Taki (1991) sugerem eficiências entre 60% e 80%, e mostram que este parâmetro tem um interesse secundário porque estas unidades operam simplesmente para maximizar a recuperação de calor residual. Neste estudo, uma unidade sem queima suplementar foi escolhida com eficiência estimada em 76%.

Um parâmetro muito importante na caldeira de recuperação é o nível de temperatura dos gases de saída na chaminé, que segundo Baharna (1991) situa-se entre 138 °C e 180 °C. Obviamente uma baixa temperatura para esses gases maximiza o calor recuperado, mas isso não é escolhido aleatoriamente, e sim utilizando a análise do “pinch point”, que determina este parâmetro em função da pressão do vapor produzido, de maneira a evitar que ocorra a condensação dos gases na chaminé, ocasionando a corrosão da caldeira.

Desse modo, a quantidade de calor recuperada dos gases de exaustão da turbina é limitada pela temperatura de saturação da água (além da efetividade da caldeira de recuperação).

A tecnologia de turbinas a gás serve para uma larga faixa de aplicações; seu curto tempo para partida e o baixo custo de investimento do ciclo simples (em comparação com outros ciclos, a preços internacionais) fazem estas unidades ideais para atendimento de picos de carga. Um dos mais interessantes desenvolvimentos ocorridos nos últimos anos na indústria de turbinas a gás tem sido a redução das emissões de NO, que a sua penetração no mercado externo tem forçado; os

padrões americanos atuais fixam limites de 10 ppm em algumas jurisdições, e isto vem sendo alcançado através de redução catalítica seletiva em adição às injeções de água e vapor.

## 2. DESENVOLVIMENTO

Foi realizado um estudo sobre os ciclos básicos de cogeração utilizando turbina a gás conforme fig.(1), com isso foi possível dar início ao equacionamento do sistema de turbina a gás associada à caldeira de recuperação, para posteriormente elaborar as curvas de produção de vapor das turbinas a gás da ALSTOM.

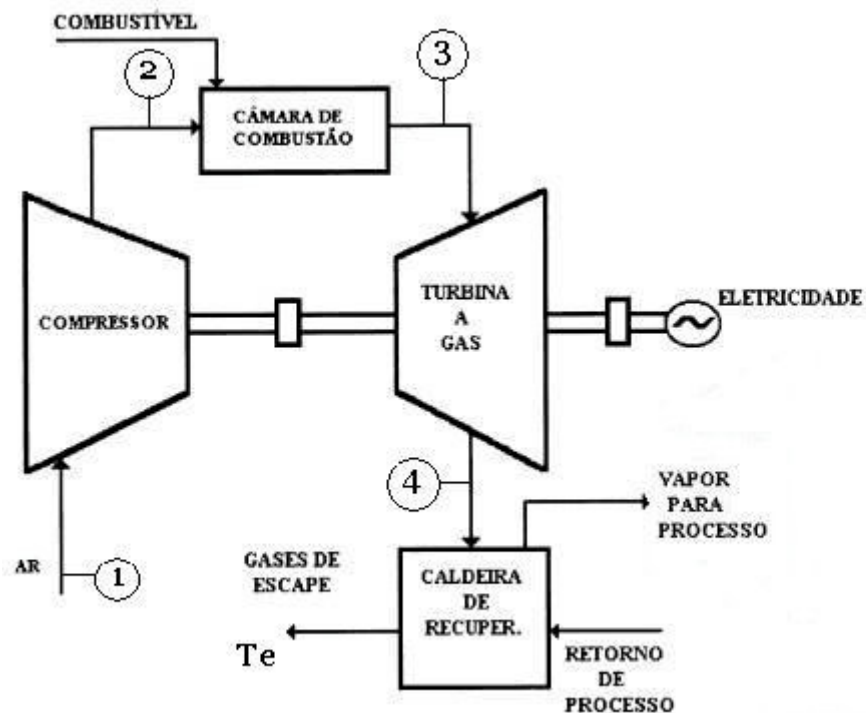


Figura 1 – Ciclo padrão a ar

O equacionamento a seguir mostra a interdependência das diversas variáveis envolvidas e baseia-se nos princípios da termodinâmica, de acordo com procedimentos indicados por Wu (1991) e Taki (1991), sendo válido para a situação de cálculo termodinâmico a ser aplicado nas turbinas em estudo para o levantamento da capacidade de produção de vapor das turbinas ALSTOM.

A eficiência térmica da turbina a gás é derivada da razão entre a potência de eixo e a potência suprida pelo combustível.

$$\eta_T = E_p / E_{\text{comb}} \quad (1)$$

Onde,

$\eta_T$ : Eficiência térmica da turbina a gás;  
 $E_p$ : Potência de eixo;  
 $E_{\text{comb}}$ : Potência suprida pelo combustível

Para caldeira de recuperação define-se eficiência como sendo (Silveira,1994):

$$\eta_{cr} = E_{vapor} / E_{gases} = 0,76 \quad (2)$$

Onde,

$\eta_{cr}$ : Rendimento da caldeira de recuperação;

$E_{vapor}$ : Energia obtida através da evaporação na caldeira de recuperação [kW];

$E_{gases}$ : Energia obtida através da expansão da turbina [kW].

O calor recuperado dos gases de exaustão na saída da turbina é:

$$E_{gases} = m_{gases} \cdot c_p \cdot (T_4 - T_e) \quad (3)$$

Onde,

$m_{gases}$ : Vazão mássica através da turbina [kg/s];

$c_p$ : calor específico a pressão cte. dos gases de exaustão da turbina [kJ/kgK];  $c_p = 1,055$  kJ/kgK

$T_4$ : Temperatura dos gases na saída da turbina [°C];

$T_e$ : Temperatura de escape para a atmosfera [°C]. – Valor utilizado para os cálculos  $T_e = 140$  °C

A análise energética é feita de maneira específica para cada equipamento. Para se calcular a produção de vapor utiliza-se a equação:

$$E_{vapor} = m_{vapor} \cdot (h_v - h_c) = \eta_{cr} \cdot E_{gases} \quad (4)$$

Onde,

$h_v$ : Entalpia do vapor na saída da caldeira [kJ/kg];

$h_c$ : Entalpia da água de alimentação da caldeira [kJ/kg].

Aplicando-se o equacionamento acima, obtém-se:

$$m_{vapor} = \eta_{cr} \cdot m_{gases} \cdot c_p \cdot (T_4 - T_e) / (h_v - h_c) \quad (5)$$

Tabela 1 - Dados técnicos das turbinas a gás ALSTOM

Modelo	$E_p$ [kW]	$m_{gases}$ (Kg/s)	Temp. de exaustão (°C)
GT11N2	114.700	399,17	530
GT13E2	165.100	532,00	524
GT13D	96.000	394,18	490
GT24	171.000	410,00	615
GT26	268.000	630,00	615
GTX100	43.000	122,00	546
GT10	24.630	78,47	534
GT10B	24.800	80,40	543
GT10C	29.100	91,10	518
GT35	17.000	92,30	375
GT8C	52.800	179,17	517
GT8C2	57.000	200,00	508

Modelo	$E_p$ [kW]	$m_{\text{gases}}$ (Kg/s)	Temp. de exaustão (°C)
TYPHOON	4.350	17,70	510
	4.700	19,00	510,55
	5.250	20,80	537,77
TORNADO	6.750	28,98	471
TEMPEST	7.900	29,50	542
CYCLONE	12.900	39,43	561

Utilizando os dados técnicos das turbinas a gás ALSTOM mostrados na Tab. (1), e as equações acima, foram elaboradas tabelas de vazão das turbinas, no Microsoft Excel, para cada turbina, partiu-se sempre das temperaturas de saturação e em seguida fixou-se determinadas condições de temperatura e através da variação de pressão obteve-se a vazão de vapor.

O ponto de partida para os cálculos das vazões são a temperatura e pressão, com isso, obtém-se o respectivo valor para a entalpia, através de tabelas termodinâmicas ou de programas como o CATT, que foi utilizado.

### 3. RESULTADOS

Traçou-se então as curvas de capacidade produção de vapor para cada uma das turbinas ALSTOM analisadas e mostradas a seguir:

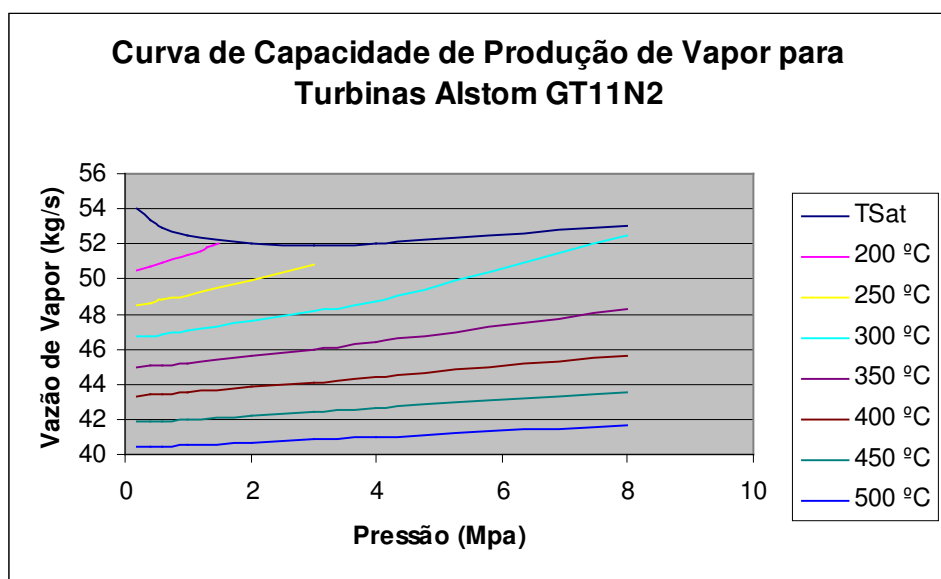


Figura 2 – Curva de Capacidade de Produção de vapor para Turbina GT11N2

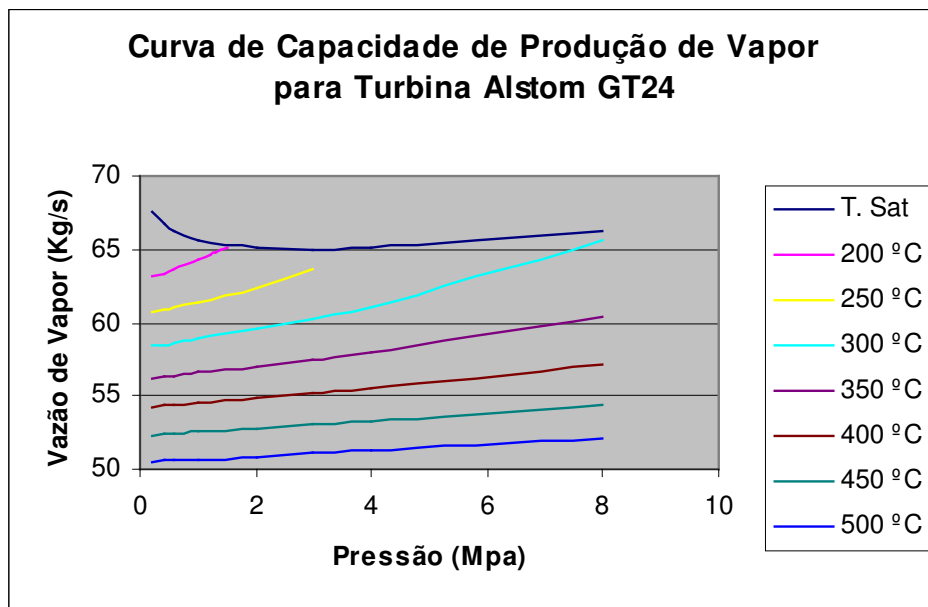


Figura 3 – Curva de Capacidade de Produção de vapor para Turbina GT24

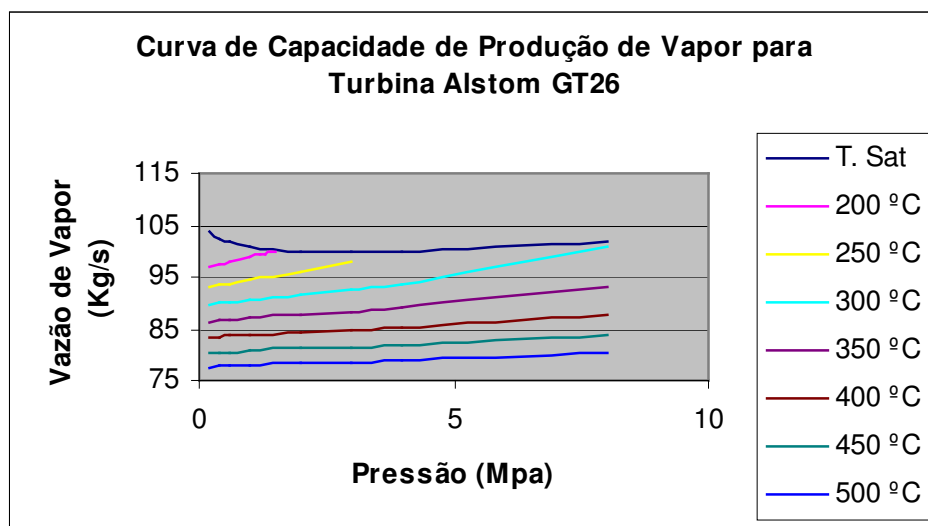


Figura 4 – Curva de Capacidade de Produção de vapor para Turbina GT26

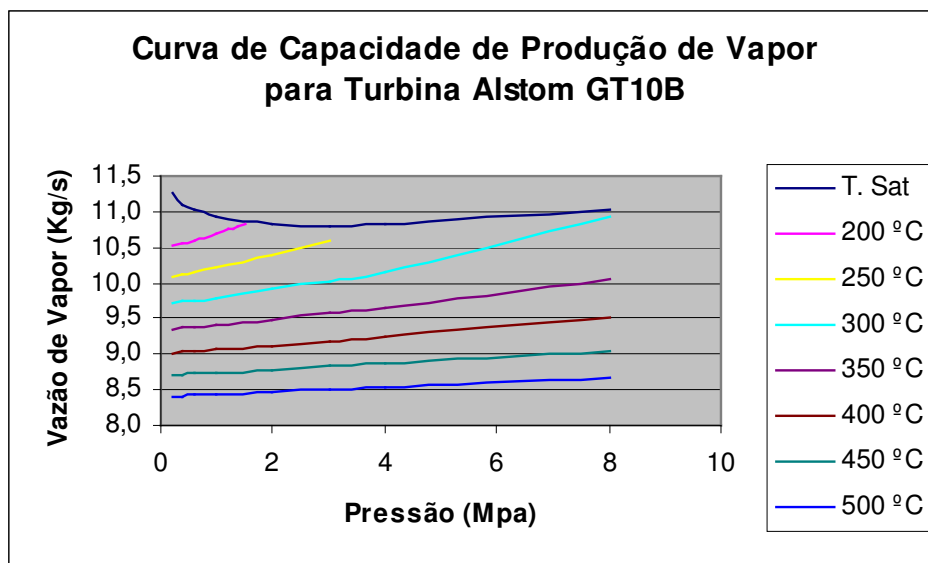


Figura 5 – Curva de Capacidade de Produção de vapor para Turbina GT10B

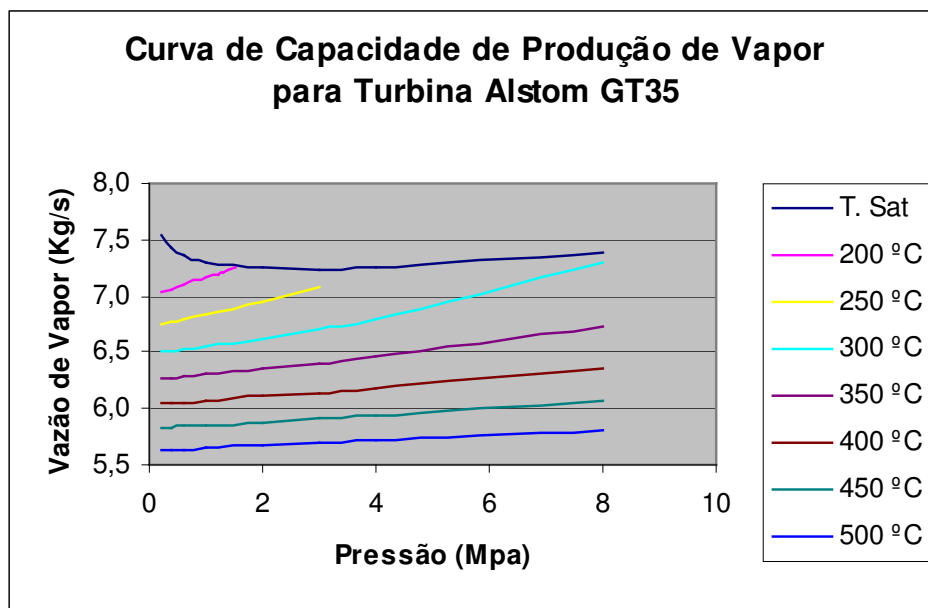


Figura 6 – Curva de Capacidade de Produção de vapor para Turbina GT35

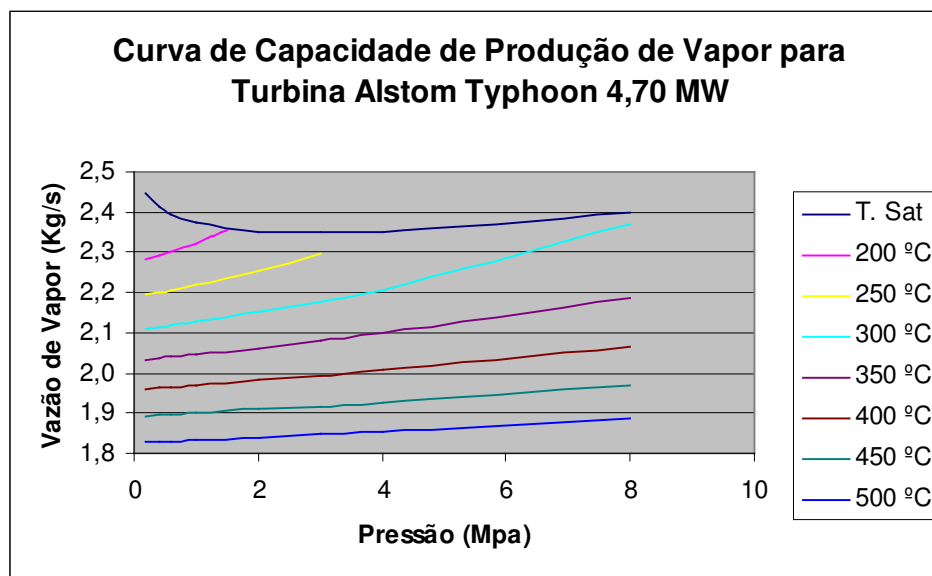


Figura 7 – Curva de Capacidade de Produção de vapor para Turbina Typhoon

#### **4. CONCLUSÕES**

Os gráficos obtidos da curva de capacidade de produção de vapor de cada turbina ALSTOM estudada, fornecem as faixas de pressão em que o vapor está disponível e as vazões em que poderá ser obtido.

As turbinas ALSTOM estudadas, possuem diferentes vazões de vapor para as mesmas condições de temperatura e pressão, podendo ser selecionada, através das curvas de capacidade de produção de vapor, a turbina mais adequada para cada caso.

Nota-se que quanto menor a temperatura, maior será a vazão, e que quanto maior a pressão aumenta a vazão, com exceção feita para a temperatura de saturação.

#### **5. BIBLIOGRAFIA**

- BAHARNA, N., 1992, “Energy savings with combined cycle system for water production”, Número 23, São Paulo.
- KOVACIK, J., 1984, “Cogeneration applications considerations”, General Electric, Gas Turbine Reference Library, p. 13, New York.
- TAFT, M., 1991, “A comprehensive classification of combined cycle and cogeneration plant”, Journal of Power and Energy, Vol. 205, pp. 145-159.
- TAKI, Y., 1991, “Design and analysis of a compact gas turbine for CHP system”, pp. 149-160, Pergamon Press Publishing, London.
- SILVEIRA, J. L., 1994, “Cogeração Disseminada para Pequenos Usuários; Estudos de Casos para o Setor Terciário. Tese de Doutorado, p. 196, Universidade de Campinas, Campinas”
- WU, C., 1991, “Power Optimization – Gas Heat Engine”, Vol. 31, Nº 6, pp. 561-565, Pergamon Press Publishing, London.

#### **6. DIREITOS AUTORAIS**

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso deste trabalho.



# **RIISING OF THE CAPACITY OF STEAM PRODUCTION OF GAS TURBINES FOR COGENERATION**

**Primeiro Autor: CÓDIGO 41017**

**Segundo Autor: CÓDIGO 41017**

## **ABSTRACT**

*In the current energy context, that tends to value sources secondary, reliable and appropriate for the enviroment with the objective of guaranteeing the supply of electricity in economical and independent way of flotations of the situation, the plants that produce heat for process they are, in the great majority, technically capable to generate electricity, on this way they constituting a notable electric potential to complemental still not taken advantage of.*

*Many of those plants use cogeneration systems, that consist of the simultaneous production of electric power and thermal energy from burns of only one fuel, with the recovery of part of the rejected heat, being reduced this way the energy losses and increasing the global efficiency of the system. In the cogeneration systems it is common to use of technologies using turbines to gas, that are used for a wide strip of applications; and have as main advantages: your short time for departure and the low investment cost.*

*Starting from the study accomplished about the cycles used for cogeneration, and with the characteristics techniques of the gas turbines of ALSTOM, it was possible equation a cogeneration system, using gas turbine associated with the boiler without supplement burns, through the application of the principle of the thermodynamics. For the gas turbines used in this study it was traced the curves of capacity of steam production, and from these graphs, it can be obtained the pressure strips in that the steam is available and the flow in that this can be obtained. Being able to this way to select the most appropriate gas turbine from ALSTOM for each situation.*

**Keywords:** Gas Turbine, Cogeneration, Steam, Combined Cycle