

SIMULAÇÃO PROBABILÍSTICA PARA AVALIAÇÃO DE EXCEDENTE  
ENERGÉTICO COMERCIALIZÁVEL EM INDÚSTRIAS COM COGERAÇÃO

A.H.M. SANTOS<sup>2</sup>  
L.A.H. NOGUEIRA<sup>2</sup>

E.C. BORTONI<sup>1</sup>

E.T. TANAKA<sup>3</sup>  
A. RORIS FILHO<sup>3</sup>

- 1 - DEPARTAMENTO DE ENERGIA - FEM - UNICAMP  
2 - ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ - EFEI  
3 - QUADRANTE SOFTWARES ESPECIALIZADOS LTDA.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia para a avaliação do potencial energético excedente em sistemas industriais com cogeração, fornecendo subsídios para estudos técnico-econômicos para a celebração do contrato entre indústria e concessionária no caso de uma eventual interligação ou o dimensionamento dos equipamentos de cogeração durante o planejamento destes sistemas.

Os dados necessários para esta análise são de fácil obtenção bem como a aplicação da metodologia proposta, através de um programa computacional especialmente desenvolvido para este fim.

**PALAVRAS-CHAVE:** COGERAÇÃO INDUSTRIAL, GERAÇÃO ELÉTRICA, CONTRATO DE DEMANDA, ANÁLISE DE EXCEDENTES, AUTO PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.

1.0 - INTRODUÇÃO

Os sistemas de cogeração, acoplando produção de energia térmica útil à geração de energia mecânica, disponível no eixo de uma turbina e, posteriormente, convertida em energia elétrica através de um turbogerador, representam uma maneira eficiente e racional para a utilização de diversos tipos de combustíveis.

A cogeração não necessariamente pressupõe a interligação do sistema autoprodutor à concessionária, mas é sobretudo nestas condições que se potencializam as vantagens desta alternativa energética.

O Brasil emprega a cogeração há décadas, principalmente no setor sucro-alcooleiro, cuja disponibilidade de um combustível barato, o bagaço, e a alta demanda de vapor propiciam a cogeração. Atualmente tem-se uma capacidade instalada de aproximadamente 900 MW, atendendo cerca de 70% do consumo energético destas plantas e, se for considerado um cenário tecnológico mais evoluído, pode-se prever uma capacidade instalada total de 20000 MW e uma geração anual de 65125 GWh correspondente a 38% do consumo brasileiro.

Sendo assim, atualmente as empresas concessionárias de energia elétrica têm procurado adotar uma postura mais maleável com relação à interligação de indústrias cogedoras ao seu sistema elétrico.

Esta interligação, quando bem efetuada, traz benefícios para ambas as partes pois, para as concessionárias representa a possibilidade de desaceleração das taxas de crescimento de solicitação de energia elétrica e, para o autoprodutor, significa uma forma estratégica de contribuir para diminuir o risco do racionamento.

Observe-se que haverá determinados momentos, em função do processo industrial, em que a indústria deverá comprar energia da concessionária, e que em outros, a indústria possuirá um excedente de geração que poderá ser fornecido para a rede. Este aspecto torna-se fundamental quando da celebração do contrato entre indústria e concessionária.

Pelo quadro exposto, percebe-se a grande necessidade de um ferramental adequado, de efetiva aplicação prática, que possibilite a avaliação das reais condições de trabalho, e forneça subsídios para estas discussões, sobretudo se forem consideradas as atuais perspectivas de abastecimento energético.

2.0 - MODELAGEM E SIMULAÇÃO

O sistema de cogeração estudado neste trabalho - e também o mais difundido e com maiores possibilidades de penetração, principalmente em usinas de açúcar e álcool - é aquele que utiliza turbinas a vapor de contrapressão, conforme esquematizado na Figura 1.

As características típicas do vapor na saída da caldeira são apresentadas na Tabela 1. Neste sistema, o vapor produzido a altas pressões e temperaturas é expandido até as condições solicitadas pelo processo através de uma turbina, determinando a relação entre o trabalho e o calor produzido, para um dado valor da pressão de escape e do rendimento da turbina.

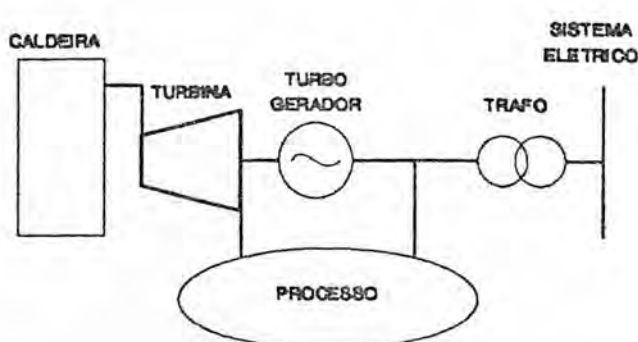


FIGURA 1 - Sistema de cogeração estudado

TABELA 1 - PRESSÕES E TEMPERATURAS MAIS UTILIZADAS

PRESSÃO (bar)	TEMPERATURA (°C)
21	280
30	350
42	400
61	450

A energia mecânica disponível no eixo da turbina é convertida em energia elétrica pelo turbogerador acoplado. Dessa forma, a potência disponível nos bornes do gerador será:

$$P = \dot{m} \cdot \Delta h \cdot \eta_T \cdot \eta_G \quad (1)$$

Onde:

- P - Potência elétrica [kW];
- $\dot{m}$  - Vazão em massa de vapor [kg/s];
- $\Delta h$  - Salto entálpico (isoentrópico) [kJ/kg];
- $\eta_T$  - Rendimento da turbina [pu];
- $\eta_G$  - Rendimento do gerador [pu].

Para a obtenção dos excedentes de energia deve-se comparar a potência gerada, que é uma função da vazão de vapor, com a potência necessária para suprir o sistema.

Contudo, as curvas adotadas devem estar sob a forma de curvas de duração. Conceitualmente, a curva de duração mostra para cada ponto, qual a probabilidade deste ser igualado ou superado. Isto evita o uso das curvas de valores instantâneos que são de difícil obtenção [1], principalmente quando do planejamento de tais sistemas.

Ao se construir a curva de duração perde-se a informação sequencial de ocorrência no tempo, aspecto irrelevante se considerada a limitada reprodutibilidade das curvas de carga. Por outro lado, as curvas de duração contêm informações de fácil manuseio para a identificação de condições operacionais do sistema de cogeração.

É importante observar que tanto na curva de duração como na curva de valores instantâneos, a energia envolvida é a mesma e o seu valor pode ser facilmente obtido através de um cálculo integral.

Outra vantagem em se utilizar a curva de duração reside no fato de poder estimá-la de várias formas, desde métodos simplificados,

como a aproximação trapezoidal, até modelos mais detalhados, envolvendo séries polinomiais. No caso da aproximação trapezoidal, o conhecimento do fator de carga e da potência média, em energia elétrica/térmica ou calor, são suficientes para a sua estimativa. Um caso intermediário é a aproximação em patamares, que requer maiores informações do sistema. A figura 2 apresenta estes modelos de curvas de duração.

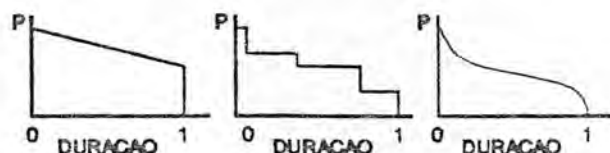


FIGURA 2 - Modelos aproximados de curvas de duração

Sendo assim, para cada ponto da curva de duração pode-se calcular um ponto da curva de potência gerada através da expressão 1. Tendo-se em mãos a curva de duração da potência elétrica produzida e as respectivas probabilidades de que cada ponto dela aconteça, pode-se então compará-la com a potência elétrica necessária, de modo a estimar o excedente energético comercializável.

Define-se então  $P_v$  como sendo a potência elétrica vendida, dada por:

$$P_v = P_g - P_N \quad (2)$$

Onde:

- $P_v$  - Potência elétrica vendida;
- $P_g$  - Potência elétrica gerada;
- $P_N$  - Potência elétrica necessária.

Observe-se que se este valor for negativo, significa que esta é uma potência comprada.

Por outro lado, esta operação matemática não pode ser feita, meramente, ponto a ponto, pois na curva de duração cada um deles está associado a uma probabilidade de ocorrerem no tempo, e não no tempo propriamente dito.

Para solucionar este problema lança-se mão de um artifício matemático denominado convolução [2]. Esta técnica combina todos os pontos da curva de duração da potência gerada com todos os pontos da curva de duração da potência necessária, probabilisticamente, de modo a obter a curva de duração de excedentes (potência vendida) que, provavelmente apresentará o seguinte aspecto.

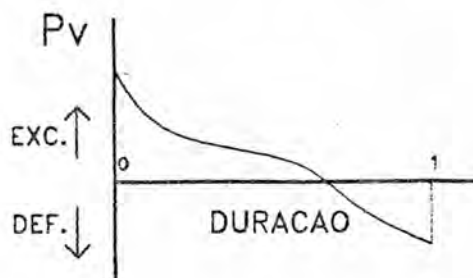


FIGURA 3 - Curva de duração de excedentes

Na curva de duração de excedentes resultante do processo de convolução, a área da parte situada acima do eixo das abscissas, positiva portanto, refere-se à potência vendida, ou seja, o potencial energético excedente. Do mesmo modo, a parte situada abaixo deste eixo representa o déficit energético.

Observa-se porém que, à medida que vai-se aumentando a pressão e a temperatura do vapor na saída da caldeira, há um sensível aumento da queda entálpica que, em última análise, reflete num aumento da potência gerada, de modo que a curva de duração de excedentes desloca-se verticalmente para cima aumentando o potencial energético excedente.

### 3.0 - EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Será estudado um caso real cujo sistema de cogeração, já existente, possui as seguintes características termodinâmicas:

- $P_1 = 21 \text{ bar}$
- $T_1 = 280 \text{ }^\circ\text{C}$
- $P_2 = 2,5 \text{ bar}$

e

- $\eta_T = 0,60$
- $\eta_0 = 0,94$

Onde:

- $P_1$  - Pressão do vapor na entrada da turbina;
- $T_1$  - Temperatura do vapor na entrada da turbina;
- $P_2$  - Pressão do vapor na linha de processo.

Através de medições instantâneas foram levantadas as curvas de duração do vapor de processo e da potência elétrica necessária para suprir o sistema, conforme mostram as Figuras 4 e 5.

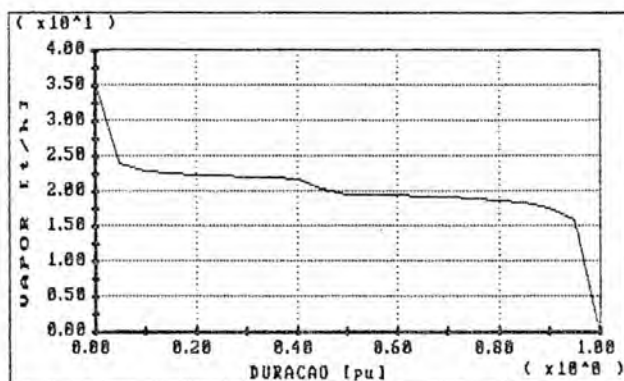


FIGURA 4 - Curva de duração da vazão em massa de vapor

Os cálculos serão efetuados utilizando o software COGERA v 1.0 [3], que é um programa computacional especialmente desenvolvido para este tipo de análise, facilitando as diversas simulações, cujo diagrama em blocos é apresentado na Figura 6.

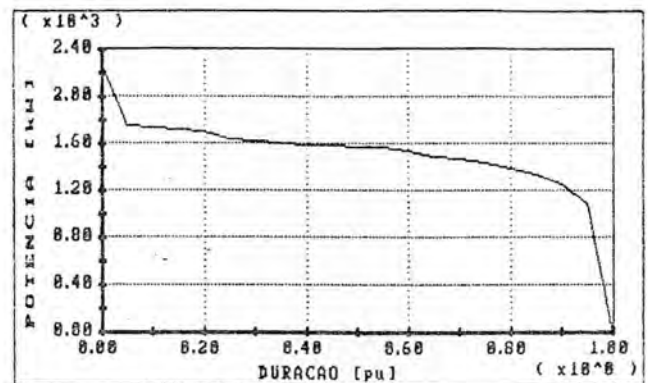


FIGURA 5 - Curva de duração da vazão em massa de vapor

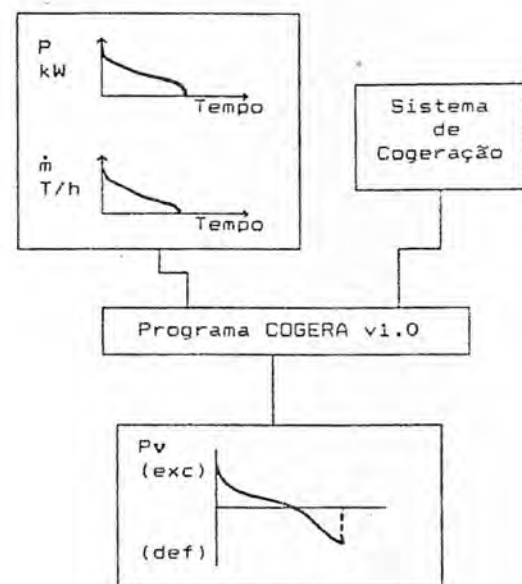


FIGURA 6 - Esquema conceitual do programa COGERA v1.0

Como resultado, obtém-se a curva de duração de excedentes apresentada na Figura 7.

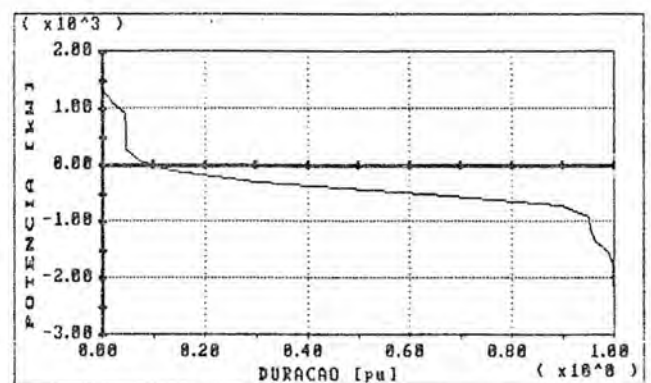


FIGURA 7 - Curva de duração de excedentes  $P = 21 \text{ bar}$ ,  $T = 280 \text{ }^\circ\text{C}$

Analisando a curva resultante percebe-se que em apenas 10% do tempo existe excedente de energia. Por outro lado, mesmo que o sistema não seja auto-suficiente, pode-se considerar o benefício da venda de energia e da redução da demanda contratada junto à concessionária.

As energias calculadas em função deste resultado são:

$$E_v = 58,90 \text{ kW}$$

$$E_c = 456,09 \text{ kW}$$

Onde:

$E_v$  - Energia para venda.

$E_c$  - Energia para compra;

Numa simulação para avaliação do potencial energético para o caso da substituição da caldeira por uma de pressão imediatamente superior, obtém-se a curva de duração de excedentes mostrada na Figura 8.

Observa-se claramente o aumento da geração excedente, que passa a acontecer em aproximadamente 35% do tempo, as energias envolvidas neste caso passam a ser:

$$E_v = 113,60 \text{ kW}$$

$$E_c = 233,24 \text{ kW}$$

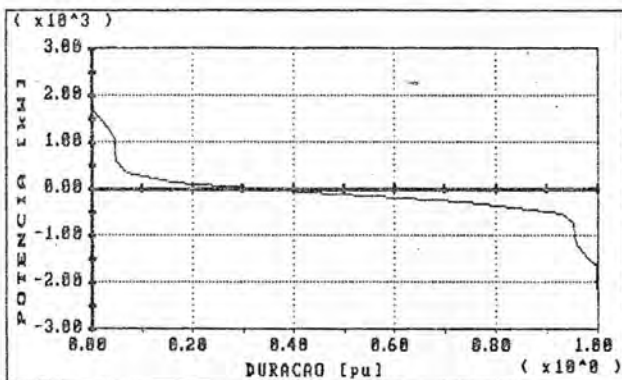


FIGURA 8 - Curva de duração de excedentes  
 $P = 30 \text{ bar}$ ,  $T = 350 \text{ }^\circ\text{C}$

Considerando-se as alternativas típicas para caldeiras definidas pelo mercado nacional, obtém-se a seguinte tabela resultante.

TABELA 2 - RESULTADOS OBTIDOS PARA VÁRIAS CONDIÇÕES OPERATIVAS

$P_1$ [bar]	21	30	42	61
$T_1$ [ $^\circ\text{C}$ ]	280	350	400	450
$E_v$ [kW]	58,90	113,60	236,39	457,13
$E_c$ [kW]	456,09	233,24	121,17	76,57
% EXC.	10%	30%	64%	87%

Tendo em mãos estes resultados, as tarifas vigentes para compra e venda de energia elétrica, mais o custo do investimento em sistemas com caldeiras de pressões diferentes, pode-se tecer avaliações técnico-econômicas para determinar qual a nova pressão a ser instalada no caso de uma eventual substituição da caldeira existente.

#### 4.0 - CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS

O método probabilístico proposto, desenvolvido no software COGERA v 1.0, permite sem o conhecimento prévio das curvas de carga, determinar a curva de duração dos excedentes em sistemas de cogeração e a partir desta estimar índices e parâmetros fundamentais para o dimensionamento e operação econômica, como a energia excedente e a adquirir, e a potência firme a contratar. Em avaliações tarifárias horo-sazonais, em que é importante o horário de ocorrência da disponibilidade de potência, impõe-se uma adaptação do método.

Este método, associado a um programa de análise energética global do sistema de cogeração, permite aperfeiçoar a determinação de condições de operação do sistema, como por exemplo os níveis ótimos de pressão e temperatura a adotar em determinada configuração. Acredita-se que tal ferramenta analítica seja de efetiva aplicação para o setor produtivo, sobretudo quando se consideram as atuais perspectivas de abastecimento energético.

#### 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - Hu, D.S. - Cogeneration. Reston Publishing. Reston 1986.
- [2] - Nogueira, L.A.H.; Santos, A.H.M - "Aplicação do método da convolução na estimativa do comportamento energético de sistemas de cogeração" in anais do II Encontro Nacional de Ciências Térmicas - 1988, pp 281-284.[3].
- [3] - "COGERA v1.0 - MANUAL DO USUÁRIO" - QUADRANTE SOFTWARES ESPECIALIZADOS - 1991. R. Candelária, 135 - 37500 - Itajubá/MG - (035) 622-4869