



APLICAÇÃO DO MÉTODO DA CONVOLUÇÃO NA ESTIMATIVA DO COMPORTAMENTO ENERGÉTICO DE SISTEMAS DE COGERAÇÃO

LUIZ AUGUSTO NORTA NOGUEIRA
AFONSO HENRIQUES MOREIRA SANTOS
Instituto de Engenharia Mecânica
Escola Federal de Engenharia de Itajubá

RESUMO

Em sistemas de cogeração é importante conhecer as eventuais disponibilidades de excedentes energéticos. Isto impõe determinar as curvas de cargas típicas e analisar instante a instante, o que em geral não é possível. Este trabalho propõe um enfoque alternativo, aplicando-se a convolução entre as distribuições de probabilidade do consumo de vapor e de energia elétrica/mecânica. Obtém-se o valor esperado de excedente ou deficit energético, bem como os parâmetros técnicos característicos de cogeração.

INTRODUÇÃO

Os sistemas de cogeração, acoplando a produção de calor útil à geração de energia elétrica ou mecânica, configuram uma maneira eficiente e racional para a utilização de combustíveis. Suas vantagens são reconhecidas, existindo diversos segmentos industriais no Brasil que já empregam tais sistemas, com destaques para o setor sucro-alcooleiro, através de turbinas a vapor de contrapressão. Ainda assim, acredita-se que exista um amplo espaço para a difusão de sistemas de cogeração no país, com efeitos positivos importantes sobre a situação energética brasileira.

O conceito de cogeração não pressupõe a interligação do autoprodutor com a concessionária, mas é sob estas condições que se potencializam as vantagens da cogeração, [1]. Esta prática já é comum em vários países e busca-se atualmente implantar condições para seu crescimento no país. Nesta situação, podem ocorrer transferências de energia em ambos sentidos entre a concessionária e a indústria cogeneradora, em função das disponibilidades ou necessidades de potência, cujas variações de demanda são inerentes aos processos industriais. Neste trabalho se discutem os métodos que permitem avaliar, probabilisticamente, os blocos de energia a transacionar, cuja determinação é essencial na análise das condições de concepção e operação de sistemas de cogeração, bem como para a discussão de contratos de interligação.

CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE COGERAÇÃO

O sistema de cogeração mais difundido e com maiores possibilidades de penetração é constituído por turbinas a vapor de contrapressão, em que a exaustão do vapor se realiza em níveis de pressão acima da condição atmosférica, de acordo com as imposições de temperatura do processo associado. A figura 1 esquematiza este sistema. As condições do vapor de alta pressão situam-se geralmente entre 21 atm e 280°C e cerca de 60 atm e 450°C, determinando a relação entre o trabalho e o calor produzidos, para um dado valor de pressão de escape e do rendimento da turbina. A Figura 2 apresenta a variação do parâmetro β , definido como o quociente entre a potência disponível na turbina e o calor latente no vapor de escape [2].

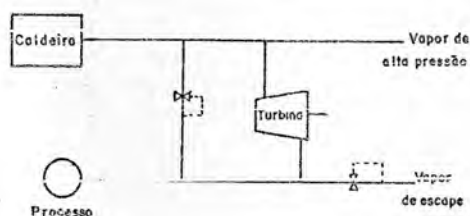


Figura 1. Esquema de sistema de cogeração com turbina a vapor de contrapressão.

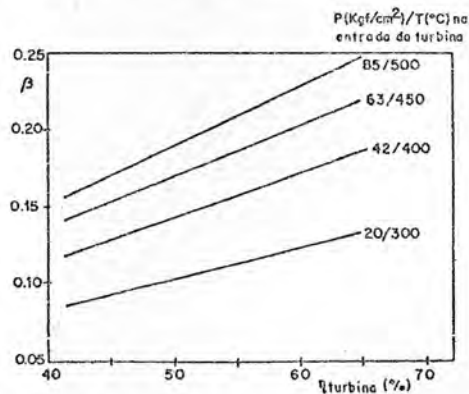


Figura 2. Variação de β com as condições do vapor admitido e rendimento da turbina, para uma pressão de escape de 2,5 ata [2].

Para apresentar as condições de operação de um sistema de cogeração não interligado, admita-se inicialmente uma demanda térmica constante e uma demanda de energia elétrica crescente, a partir de um valor nulo. Em uma primeira condição, a exaustão da turbina, em condições normais, não é suficiente para cobrir as necessidades de vapor para processo. Nesta situação, é preciso expandir vapor em um "by-pass" ou reduzir a eficiência da turbina, através de expansões isentálpicas no sistema de regulação da mesma. Continuando a elevação da demanda de energia elétrica, atinge-se outra condição, correspondente ao equilíbrio entre a necessidade de vapor de escape e sua produção pela turbina. Prosseguindo o aumento de demanda de energia elétrica, tem-se uma terceira situação, quando a produção de vapor de escape é superior à demanda, sendo geralmente liberado o excedente

para a atmosfera.

Quando interligado à concessionária o sistema de cogeração pode operar com menor irreversibilidade e maior eficiência, já que na condição de menor demanda de energia elétrica, mantém-se a geração em níveis correspondentes à necessidade térmica entregando-se à rede o excedente. Analogamente, altos níveis de demanda de energia elétrica podem ser atendidos complementando-se a produção com energia oriunda da rede, sem perdas de vapor. Além dos aspectos estritamente termodinâmicos, associam-se vantagens como maior confiabilidade operacional, estabilidade nos sistemas, etc.

A determinação do nível de autosuficiência energética a ser adotado é tema de considerações técnico-econômicas e estratégicas em cada caso, mas a cogeração interligada é sempre interessante, sobretudo quando coexistem altas demandas de vapor de baixa pressão e consumos variáveis de eletricidade. A figura 3 compara esquematicamente a cogeração independente e a interligada. É preciso qualificar a geração de irreversibilidade e a venda de energia associada como potenciais, já que estão condicionadas à existência de uma demanda de vapor de processo em volume compatível.

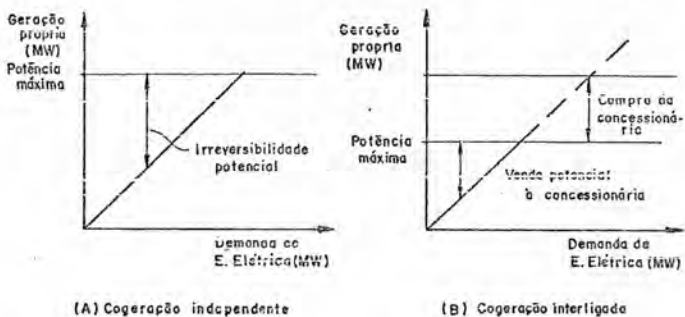


Figura 3. Comparação da cogeração independente e interligada.

SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO DO SISTEMA

Quantificar, mesmo que em bases probabilísticas, a energia a ser comprada ou vendida em sistemas de cogeração interligados é de grande interesse, conforme já apresentado. No entanto os modelos disponíveis são ainda pouco conclusivos, como o proposto por Hu [3], que assume uma curva de carga conhecida e simplificada, de difícil aderência à realidade industrial, onde as demandas são bastante aleatórias e as vezes com grande amplitude. A Figura 4 apresenta o registro de consumo de va

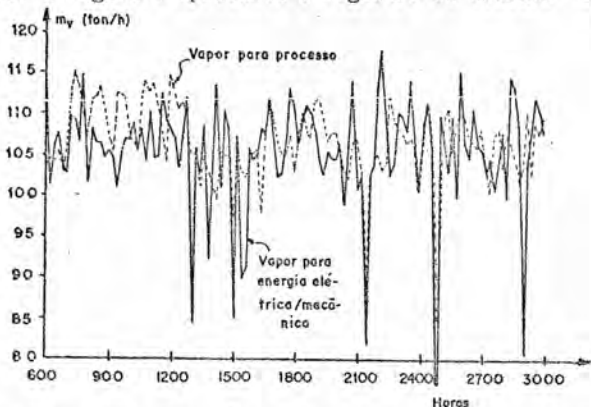


Figura 4. Registro diário de consumo de vapor para processo e geração de energia em uma usina de açúcar [4].

por para geração de energia elétrica/mecânica é para processo em uma usina de açúcar e álcool [4], onde fica patente a dificuldade de análise.

O método determinístico para avaliação da operação permite calcular o excedente ou deficit de potência em valores instantaneos, sendo contudo de pouca aplicabilidade, devendo ser construída uma curva de duração do excedente. Esta curva é o complemento da função probabilidade acumulada, F, relativa ao excedente. Observe-se que este método se apóia essencialmente no conhecimento preciso das curvas de carga representativas do sistema industrial, o que em geral é difícil em plantas existentes e mais ainda em plantas novas.

Ao se construir a curva de duração de excedente perde-se a informação sequencial de ocorrência de disponibilidades, aspecto irrelevante se considerada a limitada reprodutibilidade das curvas de carga. Por outro lado, as curvas de duração contém informações de fácil manuseio para a identificação de condições operacionais do sistema de cogeração. A Figura 5 apresenta uma curva genérica de duração de excedente, e a sua relação com a curva de probabilidade acumulada. Seja a função densidade de de probabilidade de ocorrência de um dado nível de excedente, f(exc), cuja probabilidade acumulada é:

$$F(\text{exc}) = \int_{-\infty}^{\text{exc}} f(x) dx \tag{1}$$

A função duração de excedente é dada por:

$$D(\text{exc}) = 1 - F(\text{exc}) \tag{2}$$

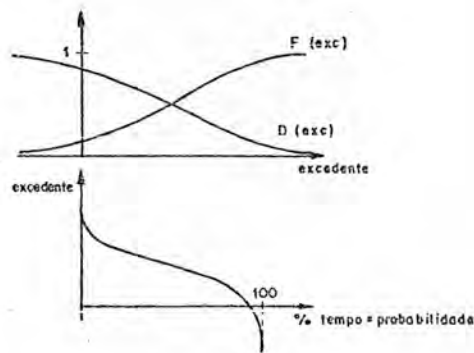


Figura 5. Curva genérica de duração de excedente.

A curva de duração dos excedentes de vapor pode ser transformada em uma curva correspondente para a potência, situação em que permite interessantes avaliações do sistema de cogeração, como mostra a Figura 6, se ja priorizando a geração de vapor ou energia elétrica.

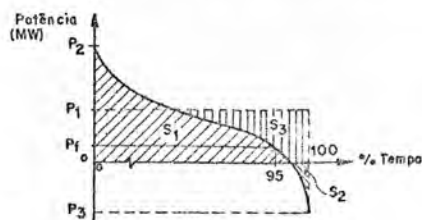


Figura 6. Curva de duração da potência excedente.

Assim, nesta figura, a área sob a curva no primeiro quadrante, S_1 , representa a disponibilidade energética que pode ser vendida à concessionária de energia elétrica. A área sobre a curva S_2 , no quarto quadrante, refere-se a energia a ser complementada pela rede para a operação em condições de equilíbrio. A área sobre a curva no primeiro quadrante, relativa a uma potência P_1 , referida na Figura como S_3 , somada à S_2 , associa-se ao requerimento adicional de vapor para assegurar em 100% do tempo a geração a um nível de potência P_1 . Em termos de potências, P_2 corresponde à máxima potência excedente disponível, P_3 a máxima demanda complementar, a ser suprida pela rede e P_f a potência excedente firme que no conceito usual dos sistemas hidrelétricos corresponde a uma duração de 95% do tempo. Desta forma, P_f poderia ser a potência a ser contratada pelo cogenerador em um fornecimento à rede. Outra interessante linha de estudos sobre a curva de duração contempla a otimização das condições de geração de vapor de alta pressão. É fácil perceber que níveis mais elevados de entalpia na entrada da turbina deslocam verticalmente e de forma assimétrica a curva de duração.

As curvas de duração são de uso corrente no setor energético e sua estimativa pode ser feita de diversas formas, desde métodos simplificados, como aproximação linear até modelos mais detalhados, envolvendo séries polinomiais. No caso linear, o conhecimento do fator de carga e da potência média, em energia elétrica/mecânica ou calor, são suficientes para a estimativa da curva de duração. Um caso intermediário é aproximação em patamares, que requer maiores informações do sistema. A Figura 7 apresenta esquemas destes casos [5].

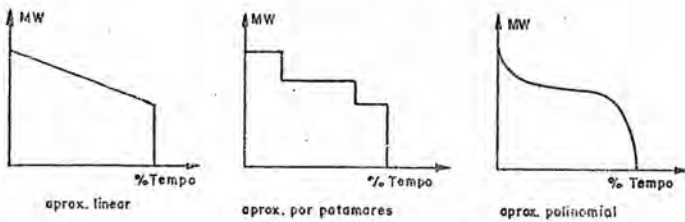


Figura 7. Curvas de duração aproximadas típicas.

O MÉTODO DE CONVOLUÇÃO NA ANÁLISE DA OPERAÇÃO

Após apresentar as limitações da análise determinística dos sistemas de cogeração através das curvas de carga e caracterizar os recursos analíticos que a interpretação das curvas de duração possui, descreve-se a seguir a proposta metodológica central deste trabalho.

Essencialmente, prescinde-se das curvas de carga e estima-se curvas de duração de demanda para energia e calor de processo. Efetuando-se a convolução das funções distribuição de probabilidade para calor e trabalho, obtém-se a função distribuição de probabilidade do excedente energético. As estimativas das curvas de duração de demanda que dão origem as densidades de probabilidades podem resultar de transposições de configurações industriais semelhantes ou de análises cuidadosas das condições operacionais, sem impor uma fase anterior de elaborada aquisição de informações, essencial no método determinístico.

O excedente energético em um sistema de cogeração depende, para uma dada configuração operacional, do excedente mássico de vapor, exc, dado por:

$$exc = q - p \quad (3)$$

onde q e p referem-se respectivamente às demandas de vapor para calor e para energia elétrica. Sejam as seguintes funções densidade de probabilidade:

$f_1(q)$ - densidade de probabilidade da demanda q , associada ao calor de processo

$f_2(p) = f(q-exc)$ - densidade de probabilidade da demanda p , associada à potência elétrica/mecânica

Considerando-se que as variáveis aleatórias calor e trabalho são independentes, pode-se mostrar que a função de probabilidade para o excedente, $f_3(exc)$, é dada pela seguinte integral de convolução modificada:

$$f_3(exc) = \int_{-\infty}^{exc} f_1(q) \cdot f_2(q-exc) dq \quad (4)$$

logo, tem-se que:

$$f_3(exc) = \int_{-\infty}^{exc} \frac{dF_1(q)}{dq} \cdot \frac{dF_2(q-exc)}{dq} dq \quad (5)$$

e, daí,

$$f_3(exc) = \int_{-\infty}^{exc} \frac{dD_1(q)}{dq} \cdot \frac{dD_2(q-exc)}{dq} \cdot dq \quad (6)$$

onde D e F referem-se às funções duração e probabilidade acumulada respectivamente, definidas em (1) e (2). Observa-se de (6) que conhecendo-se as durações das demandas de calor e potência elétrica/mecânica, tem-se a distribuição de probabilidade do excedente.

Numericamente, a integral em (6) pode ser resolvida discretizando-se as curvas de duração, como mostra a figura 8, que permite obter as funções discretas de probabilidades.

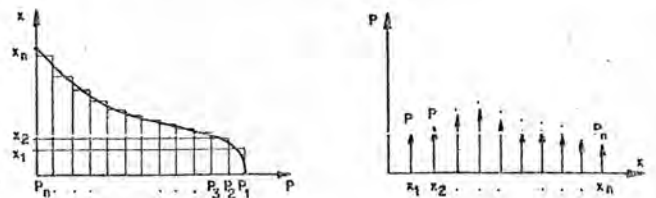


Figura 8. Discretização das curvas de duração e da função discreta de probabilidade.

Combinando-se as funções discretas de probabilidade de para calor e potência, tem-se a função discreta de probabilidade do excedente de vapor. Isto é, em suma, a convolução das funções. De posse da função discreta de probabilidade para o excedente, pode-se obter diretamente a curva de duração desta variável.

APLICAÇÃO DO MÉTODO

Como o objetivo de mostrar a pertinência e adequação do método probabilístico proposto, desenvolve-se a seguir uma análise comparada com o método determinístico. Para tanto, utilizando-se de recursos computacionais e partindo das curvas de carga reais apresentadas na Figura 4, discretizada em intervalos de 15 min, obteve-se a curva de duração do excedente por ambos métodos. A figura 9 apresenta os resultados obtidos nesta aplicação.

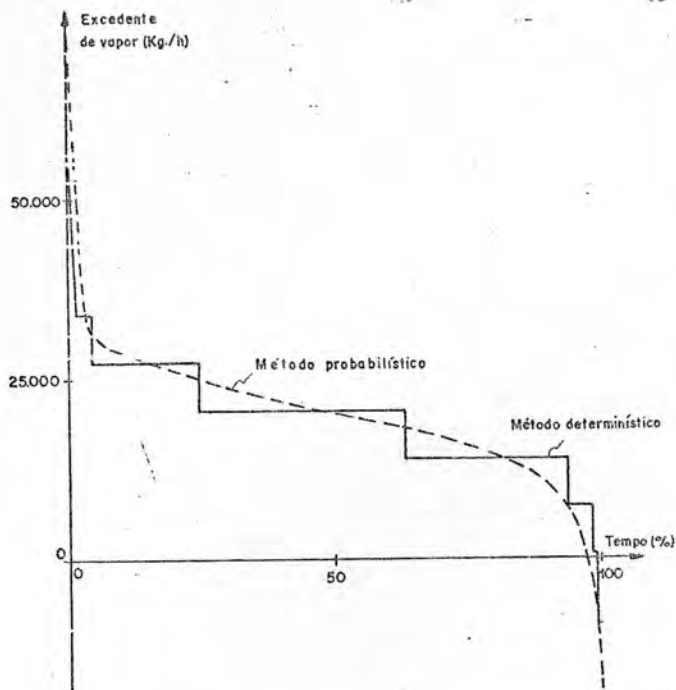


Figura 9. Comparação dos resultados para a curva de duração de excedentes, pelos métodos determinístico e probabilístico, considerando as curvas de carga da figura 4.

Observa-se nesta figura a aderência da curva aproximada com a curva real, de maneira bastante satisfatória, neste nível de discretização. Também o traçado da curva pelo método determinístico, em largos patamares foi resultado da magnitude da classe do histograma correspondente à esta, e um maior número de classes certamente favoreceria a aproximação entre as curvas.

CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS

O método probabilístico proposto 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 horosazonais, 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 da 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.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem a seus alunos Hebert Gottzandt, Delson L. A. Silva e José B. Mota Junior, do Curso de Graduação da Escola Federal de Engenharia de Itajubá, pela colaboração no desenvolvimento do programa computacional [6].

REFERÊNCIAS

- [1] Nogueira, L.A.H. e Santos, A.H.M., Considerações técnico econômicas aplicadas à cogeração de energia elétrica e calor de processo em indústrias. IX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, B. Horizonte, MG, 1987, Anais do XI SNPTEE, grupo II, GPT/12, pp 1-6 (1987).
- [2] Nogueira, L.A.H. Análise da utilização de energia na produção de álcool de cana de açúcar - tese de doutoramento, UNICAMP, Campinas, SP (1987).
- [3] Hu, D.S., Cogeneration, Reston Publish., Reston (1986).
- [4] Instituto de Pesquisas Tecnológicas - Manual de Conservação de Energia em Usinas de Açúcar álcool - (cap. 7) - versão preliminar - IPT - São Paulo - SP (1987).
- [5] Sullivan, R.L., Power System Planning - McGraw-Hill, New York (1977).
- [6] Gottzandt, H. et alli - Cogeração de energia na indústria - trabalho da disciplina Centrais Térmicas e Hidráulicas, na Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá, MG (1988).

ABSTRACT

In interconnected cogeneration systems is important to know the availability or scarcity of energy, in order to design and operate correctly these systems and to make possible energy sales agreements with public utilities. The usual method for this kind of energy analysis requires knowledge of thermal and electrical/mechanical load curves, which is in general difficult to obtain. Facing this obstacle, in this paper one proposes a probabilistic approach, based in the convolution integral of probability distribution function of thermal and electrical/mechanical power demands. Besides this, a discussion of the method is made for an application in real conditions of a sugar industry.