



# Estudo energético e econômico de sistema de cogeração associado à indústria de celulose

José Luz Silveira \*

## 1 - Introdução

Produzindo, atualmente, em torno de 4,5 milhões de toneladas de celulose por ano, as plantas de celulose brasileiras têm mostrado um forte desenvolvimento nos últimos anos, incrementando sua importância no cenário econômico e energético. Essas indústrias demandam cerca de 7500 GWh/ano, o que corresponde a 6,5% do consumo da eletricidade industrial no País (1).

No setor brasileiro de fabricação de celulose, em muitas plantas, tem-se utilizado da cogeração como uma forma confiável de suprimento de calor e potência elétrica, permitindo o aumento da eficiência da planta térmica. Esses sistemas, combinados de calor e eletricidade, possuem uma capacidade instalada em torno de 400 MW, não existindo experiências de operação interligadas com as concessionárias, devido principalmente às questões institucionais e tarifárias (2).

Com o aparecimento do progresso, e em particular com a estimativa de déficit de eletricidade para os próximos anos, a cogeração torna-se um atraente caminho racional de garantir o suprimento de energia para as indústrias de celulose. Um estudo precedente da cogeração indus-

trial no Brasil tem apontado a viabilidade técnica de um incremento de cerca de 4,6 vezes a capacidade presente (3).

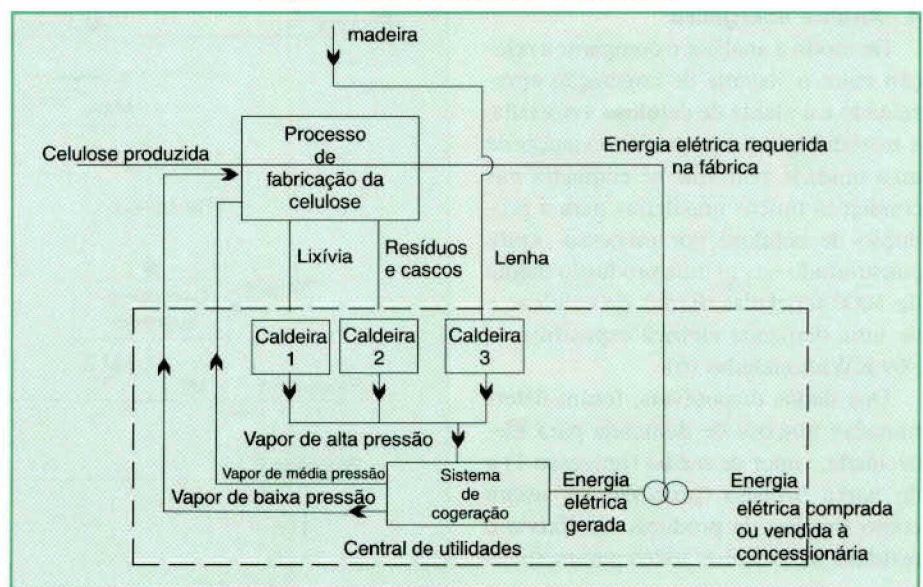
## 2 - A central de utilidades

A central de utilidades recebe da planta industrial a lixívia e os resíduos/cascas de madeira que são queimados em caldeira de recuperação e convencional, respectivamente, gerando vapor de alta pressão, que aciona o sistema de cogeração fornecendo energia elétrica, vapor de média e de baixa pressão para o processo de fabricação. A figura 1, a seguir, mostra a cen-

tral de utilidades.

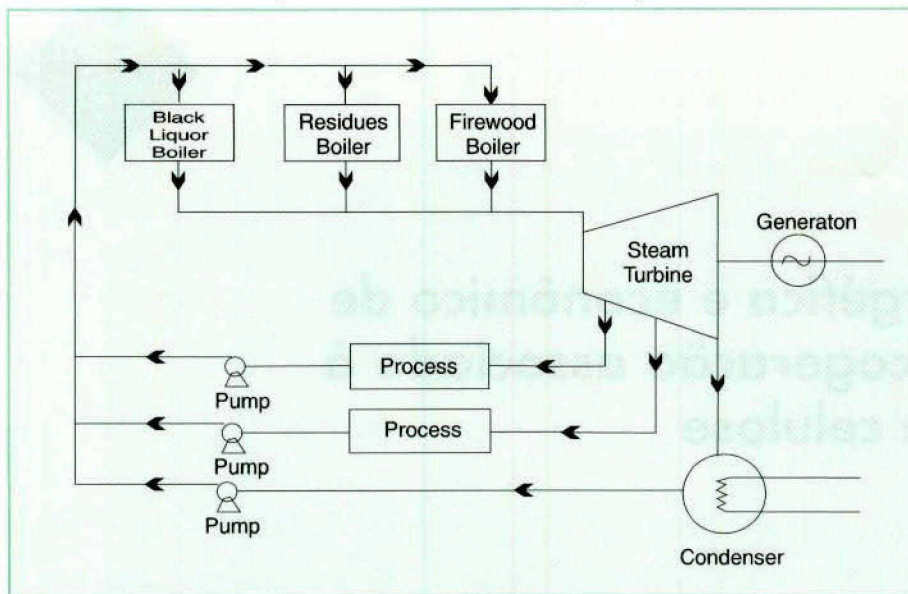
Uma terceira caldeira queimando lenha só é acionada se a produção potencial de vapor não for suficiente para suprir a demanda de processo, implicando num consumo de combustível adicional. A escolha da lenha como combustível auxiliar ou adicional se deve principalmente ao fato de a queima direta desse combustível ser economicamente melhor em termos de custos diretos, sobretudo no setor de papel e celulose, que tradicionalmente produz lenha.

Figura 1: A central de utilidades



\*José Luz Silveira, Departamento de Energia da UNESP - Universidade Estadual Paulista - Campus de Guaratinguetá - SP.

Figura 2: O sistema de cogeração



certas condições operacionais ocorria um déficit de vapor para suprir a demanda dos setores à pressão intermediária. Para solucionar tal situação, foi necessário a instalação de uma válvula redutora de pressão (VRP) e de um dessuperaquecedor entre a linha de vapor vivo e a linha de vapor à pressão intermediária, conforme mostra a figura 3.

Em uma primeira etapa determina-se a energia elétrica requerida para a produção de determinada quantidade de pasta celulósica e assume-se esta energia como sendo igual à produzida no sistema de cogeração, impondo desta maneira, a condição de auto-suficiência em eletricidade à indústria estudada.

Posteriormente, determinou-se, dependendo das condições operacionais, a possibilidade de ocorrer condensação de vapor (no condensador) ou expansão de vapor pela válvula redutora de pressão para suprir a demanda de processo. Estas alternativas decorrem da magnitude das demandas de calor e de potência elétrica, as quais foram avaliadas como fluxo de vapor.

A influência das condições do vapor vivo e do volume de produção da planta industrial sobre a condição de auto-suficiência pode ser avaliada da figura 4.

Observe-se que para as condições de vapor com pressão entre 65 e 70 kgf/cm<sup>2</sup> e temperatura a 450°C, o sistema se equilibra, não havendo praticamente necessidade de expansão de vapor (no condensador) para prevalecer a auto-suficiência em eletricidade.

### 3 - O sistema de cogeração

Neste trabalho se estuda um sistema de cogeração típico de plantas de celulose, utilizando turbina a vapor de condensação com duas extrações. As extrações de vapor para suprimento de calor de processo ocorrem em dois níveis de pressão (13 e 3 kgf/cm<sup>2</sup>), passando o eventual excesso para o condensador (0,07 kgmf/cm<sup>2</sup>).

A figura 2 mostra o sistema de cogeração considerado (4,5).

Este tipo de sistema permite grande flexibilidade à instalação, possibilitando atender uma ampla faixa de demandas térmicas e elétricas, através de um controle automático, que varia adequadamente as vazões de vapor para as extrações e para o condensador.

### 4 - Análise energética

De modo a analisar e comparar a relação entre o sistema de cogeração apresentado e a planta de celulose associada, a metodologia proposta foi o estudo de uma unidade real, que se enquadra nas condições típicas brasileiras para a produção de celulose por processo *kraft*, constituindo-se em uma produção média de 1000 toneladas diárias de celulose e de uma demanda elétrica específica de 869 KWh/toneladas (6).

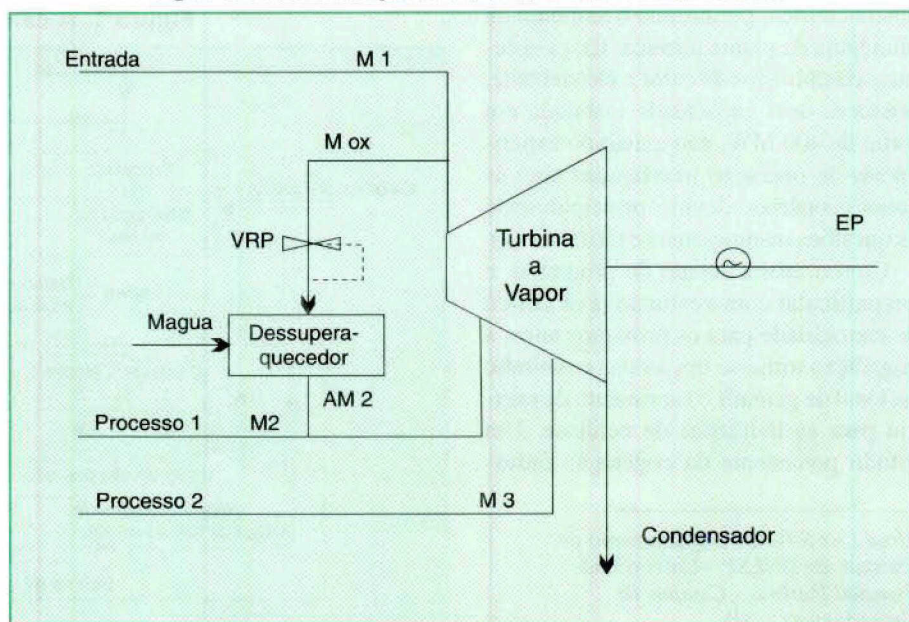
Dos dados disponíveis, foram determinadas funções de demanda para eletricidade, vapor de média (processo 1) e de baixa pressão (processo 2), assim como funções de produção de lixívia e resíduos de madeira, todos parametriza-

dos pelo nível de produção de celulose. Usando estas funções, associadas a um modelo de simulação termodinâmico para estudo de centrais de cogeração (6), tornou-se possível a previsão da influência das condições do vapor vivo e de outras variáveis na análise de auto-suficiência e de excedentes de eletricidade, as quais são descritas a seguir.

#### 4.1 - Análise de auto-suficiência em energia elétrica

Esta análise foi efetuada se interessando com a produção de vapor necessária para garantir a demanda de vapor e de energia elétrica do processo de fabricação. Deste fato, observou-se que para

Figura 3: Sistema para análise de auto-suficiência



#### 4.2 - Análise de geração de excedentes de eletricidade

Neste ponto, preocupou-se de imediato com os combustíveis utilizados no setor de caldeiras de maneira que a demanda de vapor para o processo fosse totalmente suprida, sem a necessidade do uso de válvula redutora de pressão. Assim, através da queima dos insumos energéticos disponíveis (originados no próprio processo industrial), tais como a lixívia e os resíduos de madeira, determina-se a produção potencial de vapor.

Caso esta produção potencial de vapor não seja suficiente para garantir a demanda do processo, determina-se a quantidade de lenha que deverá ser queimada na caldeira auxiliar para balancear a demanda de vapor. Caso contrário, não há necessidade de consumo de lenha, ficando estabelecido o balanço de vapor.

Estabelecido um ou outro caso, determina-se a energia elétrica produzida pelo sistema de cogeração e a compara com a requerida pela planta industrial, analisando assim as condições de excedentes ou déficits de eletricidade.

O excedente específico de eletricidade é apresentado na figura 5, relativo à produtividade de lixívia, considerando uma produção de 1000 toneladas diárias de celulose. Este parâmetro, que usualmente se situa entre 1,00 e 1,30 ton. lixívia/ton. celulose, é uma função da matéria-prima empregada e de procedimentos operacionais, consistindo-se em um índice de disponibilidade energética do processo.

A figura 6 registra a demanda de lenha (para uma produtividade de lixívia de 1,00 ton. lixívia/TSA) e em que condições operacionais é necessário o consumo deste combustível adicional para suprir a demanda de vapor ao processo de fabricação.

#### 5 - Análise econômica

Considerando-se que a cogeração é um processo simultâneo de geração de calor e potência elétrica, uma questão essencial no seu planejamento econômico é a alocação dos custos de energia produzida. Existem diferentes métodos propostos na literatura conforme mostram Hu (7) e Wunsh (8), que consideram custos de investimento, operação, manutenção e de combustível.

Uma metodologia muito interessante é apresentada por Kelhofer (9), que é

Figura 4: Vazão de vapor na VRP ou no condensador, conforme as condições operacionais da planta industrial

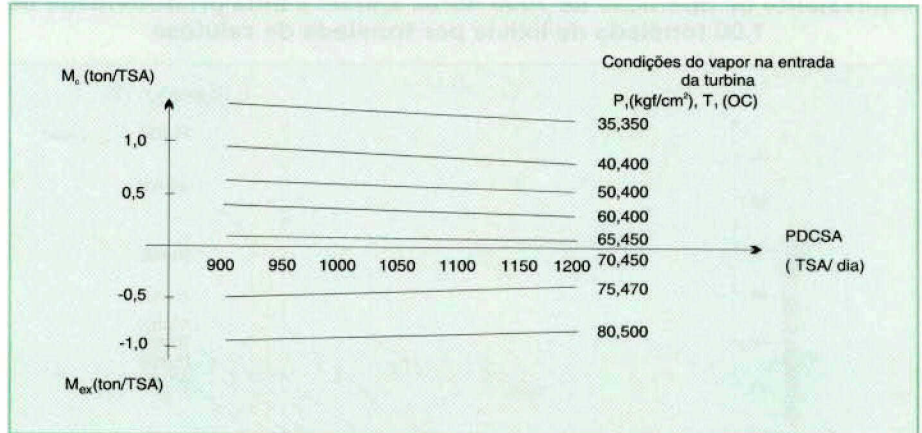


Figura 5: Excedente ou déficit de energia elétrica em função das condições do vapor vivo e da produtividade de lixívia para uma produção de 1000 TSA/dia

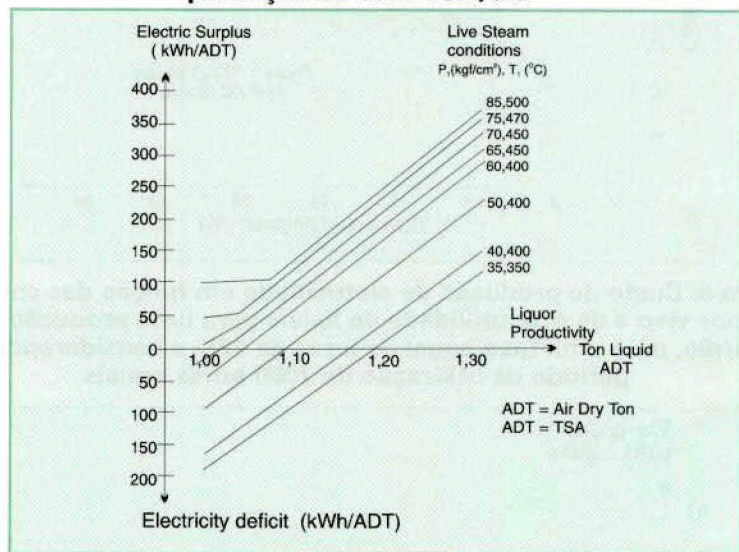
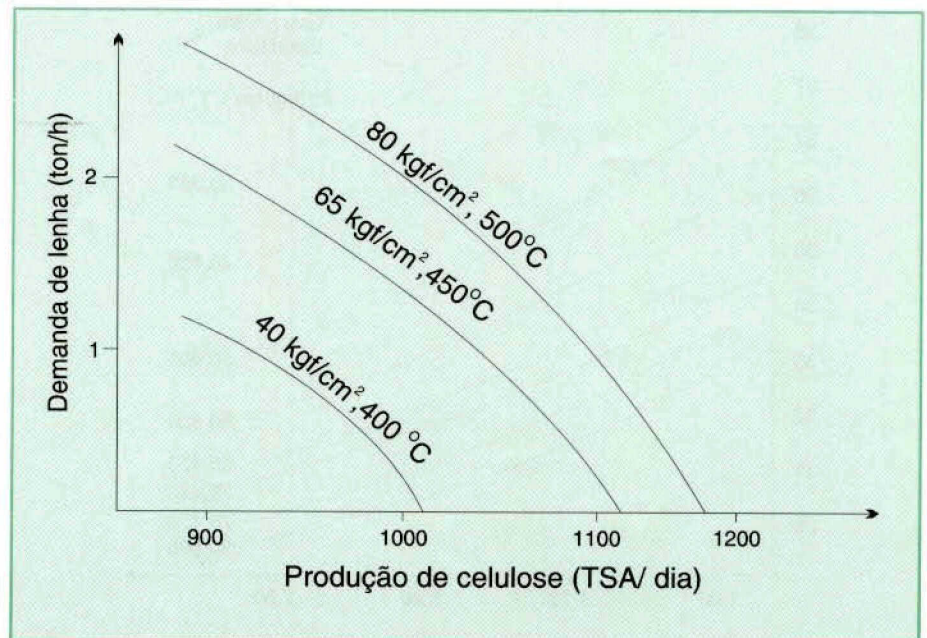
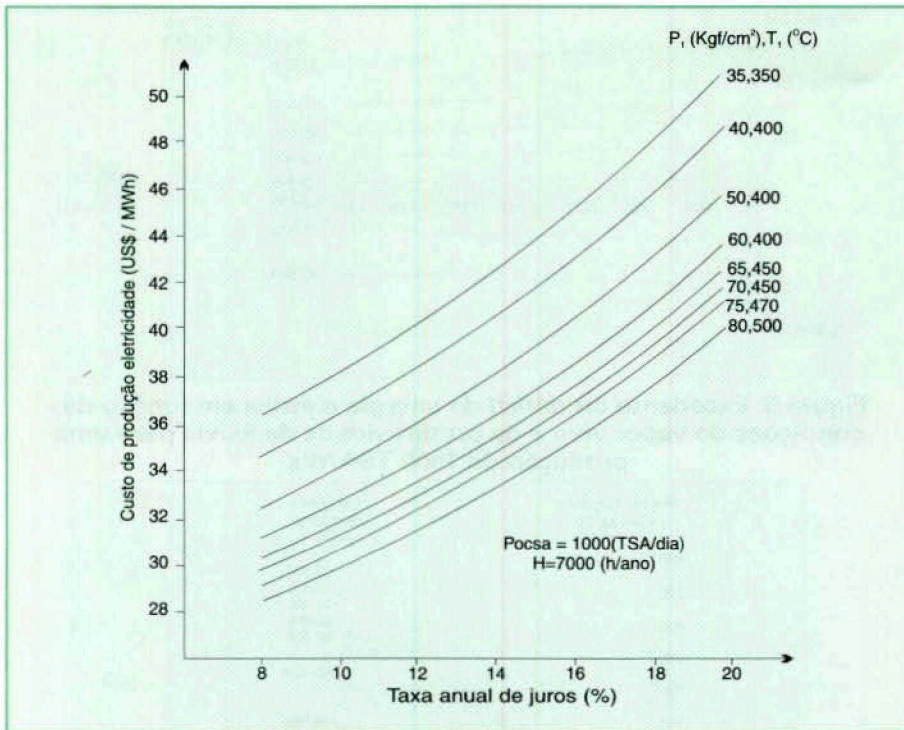


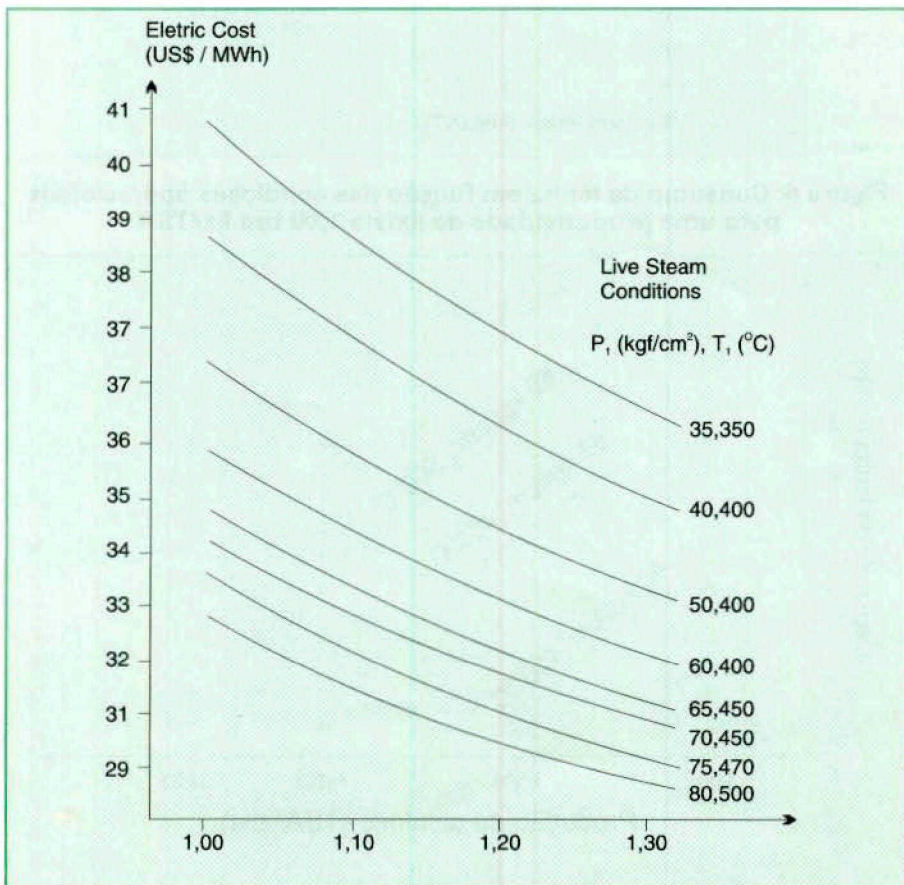
Figura 6: Consumo de lenha em função das condições operacionais para uma produtividade de lixívia 1,00 ton.lix/TSA



**Figura 7: Custo de produção de eletricidade em função das condições do vapor vivo e da taxa anual de juros, considerando um período equivalente de operação de 7000 horas anuais e uma produtividade de 1,00 tonelada de lixívia por tonelada de celulose**



**Figura 8: Custo de produção de eletricidade em função das condições de vapor vivo e da produtividade de lixívia para uma produção de 1000 TSA/dia, para uma taxa anual de juros de 12% e considerando uma período de utilização de 7000 horas anuais**



aqui utilizada com algumas modificações de acordo com Rizhkin (10).

Para custos de investimento foram utilizados valores do mercado nacional, ajustados através da metodologia apresentada por Boehm (11) e Aguilar (12).

Para os preços dos combustíveis, no caso da lenha, adotou-se o custo correspondente ao preço de mercado. Este preço varia conforme o local, disponibilidade de recursos florestais, tipo de lenha, entre outros fatores, mas em termos médios conforme Nogueira (5), se situa em torno de 25 US\$/ton. (5,1 US\$/Gcal).

Para os resíduos de madeira, faz sentido adotar o custo de produção da lenha, também em termos médios, estimado em 20 US\$/ton. (7,94 US\$/Gcal). Certamente, no caso de resíduos poderia ser adotado um custo inferior e até mesmo nulo, devido ao fato de sua existência decorrer do processo de produção da celulose. Por este motivo, adota-se para a lixívia um custo nulo, conforme pratica Jorquera (13).

As figura 7 e 8 apresentam resultados da avaliação econômica para a produção de potência do sistema de cogeração associado à indústria de celulose, sempre para condições brasileiras, onde o preço médio da eletricidade comprada da concessionária se situa por volta de 70 US\$/MWh.

## 6 - Aspectos institucionais

Desde 1986 a Eletrobrás vem desenvolvendo estudos sobre tecnologias para a prática da cogeração e de potenciais para diferentes setores industriais, bem como definindo políticas e regulamentando preços de energia para aquisição do excedente elétrico.

Existe uma diferença institucional entre a política brasileira e aquela praticada nos E.U.A. Enquanto no Brasil as concessionárias estabelecem contratos com autoprodutores quando julgarem necessário, nos E.U.A. estas são obrigadas a adquirir a eletricidade excedente dos cogeneradores qualificados.

A política de preços no Brasil está mudando para a cobrança por custos marginais. Isto é muito favorável à cogeração devido à competição entre os custos desta e os custos da expansão dos sistema hidrotérmico nacional, que inclui novos equipamentos e novas redes. Outra razão é o fato de que os custos marginais alocam responsabilidades pelo pagamen-

to do investimento corretamente.

## 7 - Conclusões

Como apresentado, a produção de potência em indústrias de celulose, usando resíduos de lenha, mostra a conveniência e a oportunidade dos sistemas de cogeração, muito embora seja importante considerar-se o modo como foi projetado e os procedimentos operacionais. Esta viabilidade é corroborada pelos pontos de vista industrial e nacional, com vantagens recíprocas para todos.

Para uma análise da viabilidade econômica real a ser aplicada neste estudo, fez-se necessário quantificar seus benefícios, estabelecendo-se políticas adequadas para pagamento da energia disponível do sistema de cogeração, o que ainda hoje não está bem definido.

## 8 - Referências bibliográficas

1 - Ministério das Minas e Energia - *Balço Energético Nacional*, Brasília 1988.

2 - Eletrobrás - *Capacidade Instalada de Cogeração*, Rio de Janeiro, 1988.

3 - NOGUEIRA, L. A. H. - *Potential for Industrial Cogeneration in Brazil*, Cogeneration 90, Madrid, 1990.

4 - SILVEIRA, J. L.; NOGUEIRA, L. A. H. - *Aspectos da Cogeração na Fabricação de Papel e Celulose*, O Papel, São Paulo, Janeiro de 1990.

5 - NOGUEIRA, L. A. H.; SILVEIRA, J. L. - *Study of Energy Costs and Availabilities in Cogeneration Systems Associated to Pulp Plants*, 6th European Conference on Biomass for Energy-Industry and Environment, Athens, 1991

6 - SILVEIRA, J. L.; NOGUEIRA, L. A. H. - *Thermoeconomic Functional Analysis Applied in Cogeneration Systems Associated to Cellulose Plants*, ECOS - The International Symposium on Efficiency, Costs Optimization and Simulation of Energy Systems ASME - American Society of Mechanical Engineers, Zaragoza,

1992.

7 - HU, S. D. - *Cogeneration*, Reston Publishing, Reston, 1986.

8 - WUNSH, A. - *Conversion of Gas Turbines Into Combined Cycle Power Plants*, Department of Conventional Power Plants, Brown Boveri Company, Zurich, 1986.

9 - KEHLHOFER, R. - *A Comparison of Power Plants for Cogeneration of Heat and Electricity*, Brown Boveri Company, 1987.

10 - RIZHKIN, V. Y. - *Centrales Termoelectricas*, Mir, Moscou, 1979.

11 - BOEHM, R. F. - *Design Analysis of Thermal System*, John Wiley, New York, 1987.

12 - AGUILAR, M. R. - *Criterios de Diseño de Plantas Termoelectricas*, Limusa, México, 1981.

13 - JORQUERA, C. - *Cogeração na Indústria de Papel e Celulose*, I Simpósio Brasileiro sobre Cogeração de Energia na Indústria, Campinas, 1989.

## N O R M A P A R A P U B L I C A Ç Ã O

A revista *O Papel* publica trabalhos de interesse para o setor celulósico papelero, que juntamente com outras informações veiculadas oferecem ao leitor uma visão global da área.

Os trabalhos enviados passarão pelo Conselho Editorial. Os autores conservam os direitos autorais para futuras publicações, no entanto, à revista é permitida a reprodução dos seus artigos.

### Especificação:

Envie três cópias do trabalho para:

ABTCP - Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel  
Conselho Editorial  
Rua Ximbó, 165  
Aclimação 04108-040  
São Paulo - SP

**Tamanho:** os trabalhos não devem exceder a 10 páginas datilografadas em espaço duplo, em folha tamanho A4. Caso isto ocorra, sugerimos ao autor dividi-lo em duas partes.

**Primeira página:** deve trazer o nome do trabalho, o(s) do(s) autor(es), com breve referência à formação acadêmica, o nome da firma ou entidade à qual o(s) autor(es) pertence(m), o resumo do trabalho em Português e em Inglês e as palavras-chaves.  
**Unidade e dimensões:** devem ser expressas de acordo com o Sistema Internacional.

**Figuras:** devem ser limitadas ao mínimo possível. As suas legendas devem ser concisas, auto-explicativas e em Portu-

guês. Suas numerações devem ser em algarismos arábicos.

**Desenhos e fotos:** devem ser suficientemente claros e, preferencialmente, em preto e branco para permitir sua reprodução.

**Tabelas:** devem ser sempre que possível concisas e com cabeçalho auto-explicativo e em Português. Suas numerações devem ser em algarismos arábicos.

**Referências bibliográficas:** devem ser citadas no final do texto seguindo as regras dadas pela norma NBR 6023, que são resumidamente:

### Livro

Sobrenome, nome do autor. Título da obra. Edição. Local de publicação: editora, ano. n°. de pág./volume.

### Capítulos de livro

Sobrenome, nome do autor do capítulo. Título do capítulo. In: sobrenome, nome do autor da obra.

Título da obra. Edição. Local de publicação: editora, ano. n°. de pág./volume. vol., pág.

### Artigos de revista

Sobrenome, nome do autor. Título do artigo. Título da revista, local de publicação, vol., pág.-pág., mês, ano.

### Trabalho publicado em anais de eventos

Sobrenome, nome do autor do trabalho. Título do trabalho. In: título do evento, n°. ano, local de realização. Anais. Local de publicação: entidade responsável/editora, ano de publicação, vol./pág. total. vol., pág.-pág.