



artigo técnico

# variáveis operacionais que afetam o consumo de combustíveis no forno de cal

Lima, A. F.

Park, S. W.

Yojo, L. M.

Centro Técnico em Celulose e Papel  
I P T

## A P R E S E N T A Ç Ã O

Neste artigo é mostrado um diagnóstico, incluindo a maioria dos fornos nacionais, resultante de enquête realizada em 1982, junto às fábricas de celulose. São apresentadas e discutidas, ainda, diver-

sas medidas de conservação de energia, relativas à variáveis operacionais ou à instalação do forno, que podem trazer, para esta área, uma economia de combustível de 2 a 10%.

## I — INTRODUÇÃO

Até alguns anos atrás, a influência do custo de energia térmica, proveniente dos derivados de petróleo, era praticamente ignorada devido à sua pequena participação no custo final da celulose, mesmo levando em consideração o impacto causado pela primeira crise de petróleo, em 1973.

Somente a segunda crise de petróleo, ocorrida em 1979, pela

qual o petróleo passou de US\$ 13,00 para US\$ 26,00 por barril e chegou, em 1981, a atingir US\$ 38,50 (1), aliada à crise financeira mundial que resultou em alta de juros internacionais, a níveis nunca conhecidos, fez o Brasil conhecer escassez de petróleo. Tal situação mudou, consideravelmente, o perfil de custo da celulose, e, levou o governo a tomar as seguintes medidas:

- restrição de uso dos derivados de petróleo
- elevação dos preços dos derivados de petróleo

- orientação e apoio tecnológicos visando a conservação e substituição por fontes domésticas de energia
- assinatura de protocolos de intenções com os setores industriais que mais consomem óleo combustível.

Através do subprograma "Apoio Tecnológico em Conservação de Energia" incluído no "Protocolo de Objetivos Visando a Racionalização Econômica e Substituição de Petróleo por Fontes Energéticas Nacionais" (MIC/STI), o IPT realizou, através do seu Cen-

*Trabalho apresentado no XVII Congresso Anual da ABCP — Semana do Papel, realizado em São Paulo — Brasil — de 19 a 23 de novembro de 1984.*

tro Técnico em Celulose e Papel, o projeto denominado "Influência de algumas características operacionais do sistema de recuperação de fábricas de celulose, no consumo de óleo combustível do forno de cal".

As principais etapas deste projeto foram:

- levantamento de informações sobre os fornos de cal, em operação nas indústrias de celulose.
- estudo de alternativas operacionais através de modelo matemático do forno de cal.
- identificação de medidas de conservação e alternativas de fontes de energia para o forno de cal.

Em publicação anterior (2) foi mostrada a influência de algumas variáveis operacionais do forno de cal sobre certos característicos do processo e do produto com vistas a verificar, com o auxílio de um modelo matemático, quais as variáveis que devem ser monitoradas mais rigorosamente para aumentar a eficiência operacional e reduzir o consumo dos combustíveis do forno.

No presente estudo são mostrados os resultados mais importantes da enquete realizada entre as indústrias de celulose e também são discutidas certas medidas de conservação de energia para a operação da calcinação.

## II — CARACTERIZAÇÃO DOS FORNOS DE CAL NA INDÚSTRIA NACIONAL DE CELULOSE

Os fornos rotativos de cal "por via úmida", no qual a carga entra em estado úmido, tem por finalidade converter carbonato de cálcio, gerado na etapa de caustificação, por meio de aplicação de calor a uma determinada temperatura. A participação do forno de cal no consumo global de óleo combustível em unidades produtoras de celulose está entre 20 e 40%, com casos de até quase 100%, em fábricas que, na geração de vapor, efetivamente subs-

tituíram o óleo combustível por combustíveis alternativos.

Com o objetivo de se conhecer as características operacionais e as específicas das instalações dos fornos de cal foi feita uma enquete entre 14 fábricas que operam fornos de cal. Foram recebidas ao todo, 12 respostas, que englobam 14 fornos, o que constitui um ótimo índice de retorno.

As doze fábricas foram responsáveis pela produção de 2.318.000 t de celulose, quantidade que corresponde a 80% da produção nacional de celulose em 1982, época da enquete.

A partir das informações recebidas, estimou-se que estas fábricas tenham produzido e consumido 650.000 t de cal, o que corresponde a um consumo médio de 280 kg cal/t de celulose seca e a 16% da produção total de cal no Brasil. A figura 1 ilustra a relação entre as produções de cal e de celulose.

Na tabela 1 são arrolados os combustíveis usados nos fornos e seus consumos individuais.

Na tabela 2 classificam-se os fornos pela combustão. Nota-se esforço do setor em empregar fontes alternativas. Todos os fornos

Tabela 1 — Combustíveis usados nos fornos de cal-1982

| Combustível, em tep * | Consumo Anual  |
|-----------------------|----------------|
| Óleo, combustível     | 113.500 **     |
| Gás natural           | 12.000 ***     |
| Hidrogênio            | 2.739 ****     |
| Terebentina           | 284 **         |
| Tall oil              | 2.880 **       |
| Biomassa              | Não disponível |

\* tep — tonelada equivalente de petróleo

\*\* Enquete do CTCP/IPT

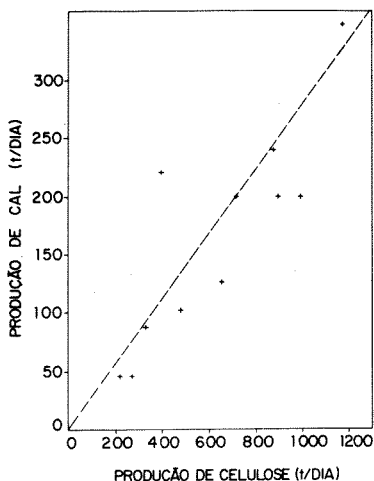
\*\*\* Referência (3)

\*\*\*\* Estimativa com base em dados da referência (4)

Tabela 2 — Classificação dos fornos pela combustão — 1982

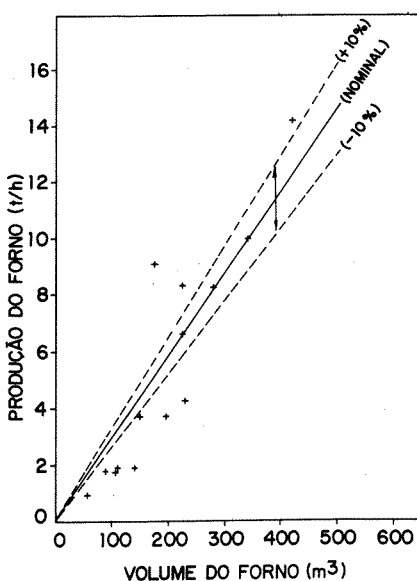
| Número de fornos | óleo | COMBUSTÍVEL        |             |          |           | Emprego de oxigênio |
|------------------|------|--------------------|-------------|----------|-----------|---------------------|
|                  |      | CNP/H <sub>2</sub> | terebentina | tall oil | bio massa |                     |
| 8                | X    | —                  | —           | —        | —         | —                   |
| 2                | X    | —                  | —           | —        | —         | X                   |
| 1                | —    | X                  | —           | —        | —         | —                   |
| 1                | X    | —                  | —           | X        | X         | X                   |
| 1                | X    | —                  | X           | —        | —         | —                   |
| 1                | X    | —                  | X           | X        | —         | —                   |

FIGURA 1  
PRODUÇÃO DO FORNO VERSUS PRODUÇÃO DE CELULOSE



de cal, em funcionamento na indústria de celulose são do tipo rotativo "por via úmida". Este tipo de forno acarreta um consumo específico — 190 kg óleo/t cal — consideravelmente superior ao "por via seca" — 132 kg óleo/t cal — (5).

FIGURA 2  
PRODUÇÃO VERSUS VOLUME DO FORNO



A figura 2 relaciona a variação da produção, de cal com o volume interno do forno. Nota-se aí que fornos de menor capacidade operam abaixo da sua capacidade nominal e fornos maiores produzem ao nível da sua capacidade nominal ou acima dela. Dos quatorze fornos, o mais antigo começou operar em 1959 e nove foram instalados após 1974.

Diâmetro e comprimento do

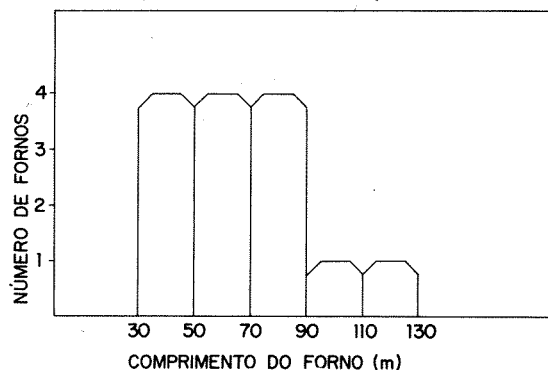
forno dependem da capacidade nominal que se quer estabelecer. Conforme a figura 3, seis fornos possuem comprimento maior que 70 m. A inclinação do forno é em torno de 2,5 cm de elevação

duções dos seus perfis constam na parte I deste trabalho (2). z

Quase todos os fornos são alimentados com lama cujo teor de sólidos é inferior a 65%, sendo mais frequente entre 60 a 65%, conforme indicado na figura 4.

O teor de inertes do produto, conforme figura 5, varia entre 0

FIGURA 3  
DISTRIBUIÇÃO DOS FORNOS EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO

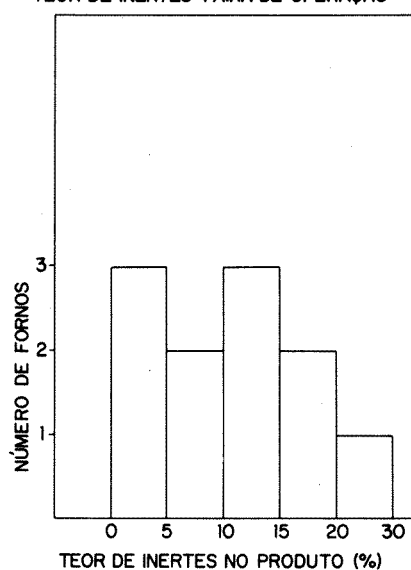


por metro de comprimento e os valores de rotação variam entre 1,0 e 2,3 rpm. Estes dois parâmetros, conjuntamente com as dimensões do forno, influenciam no tempo de residência do material. A zona das correntes, onde a lama seca, constitui, em média, 20% do comprimento do forno, variando entre os marcos de 12,2 e 31,8%. Dos quatorze fornos, cinco não possuem sistema de recuperação de calor do produto final.

A temperatura dos gases de saída e a composição da cal, ao lon-

e 30%. Considera-se indesejáveis valores para o teor de inertes acima de 15%. Na figura 5 estão indicados apenas 11 fornos e os

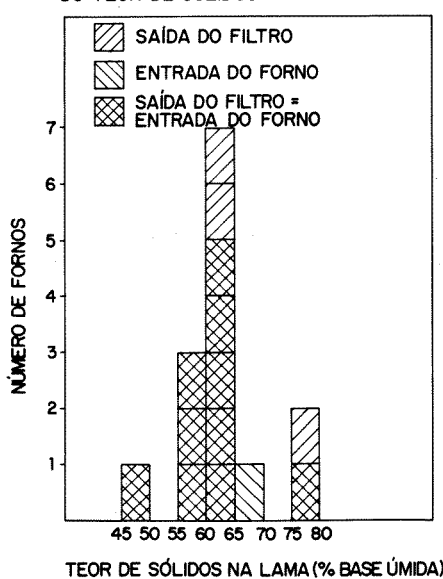
FIGURA 5  
TEOR DE INERTES-FAIXA DE OPERAÇÃO



3 fornos não incluídos, estão operando com a faixa provável de inertes entre 10 e 15%.

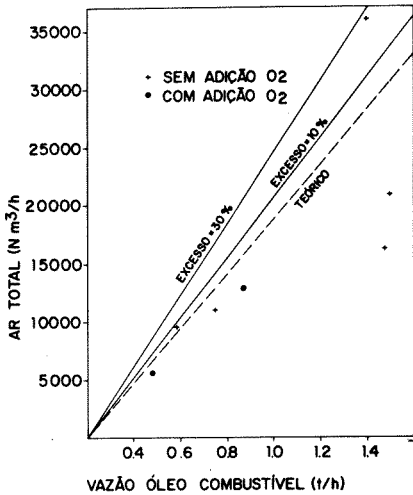
Na época da enquete, em 1982, três fornos operavam com oxigênio. A figura 6 relaciona a distribuição de ar total com a vazão de óleo combustível. Nota-se nesta figura que a medição de vazão é sujeita a considerável erro, indicando até valores inferiores ao valor estequiométrico. A análise

FIGURA 4  
DISTRIBUIÇÃO DOS FORNOS EM FUNÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS



go do forno, variam para os diversos fornos, sendo influenciadas por características particulares de construção e de operação. As repro-

FIGURA 6  
AR DE COMBUSTÃO VERSUS ÓLEO COMBUSTÍVEL

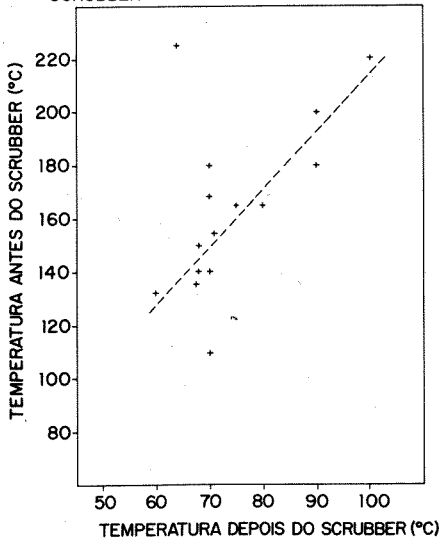


dos gases do forno de cal, que seria importante para avaliar o excesso de ar de combustão e o desempenho do forno, não é comum nas indústrias; conforme a enquete apenas 4 unidades forneceram o teor de CO<sub>2</sub>, faltando qualquer indicação sobre CO.

Quase todas fornecem o teor de O<sub>2</sub>. Daí se sugere estimar a vazão do ar de combustão a partir da vazão e composição da lama de cal e do produto, vazão do óleo combustível e dos gases, como indicado na referência (6).

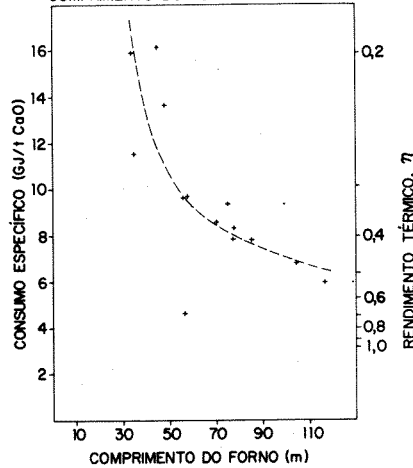
A figura 7 mostra a forte relação existente entre a temperatura dos gases de exaustão antes e depois do "scrubber". Desta figura conclui-se pela existência de várias instalações nas quais haja possibilidade de recuperação adicional de energia, pelo resfriamento dos gases de exaustão a temperaturas em torno de 70 °C.

FIGURA 7  
TEMPERATURA ANTES VERSUS DEPOIS DO SCRUBBER



A figura 8 mostra as variações do consumo específico de energia e do rendimento térmico em relação ao comprimento do forno e, ainda, que em fornos pequenos este consumo específico é elevado. Para o fim em vista define-se como consumo específico de energia, a

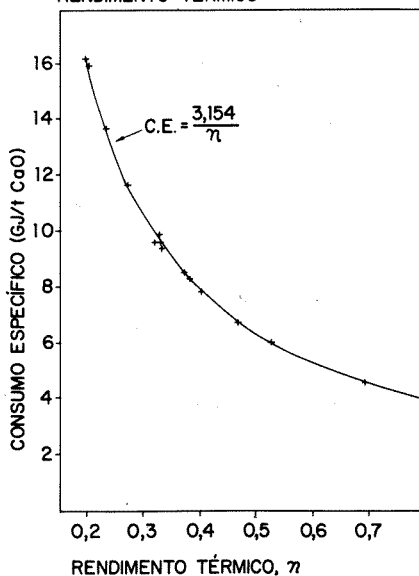
FIGURA 8  
CONSUMO ESPECÍFICO VERSUS COMPRIMENTO DO FORNO



energia total aplicada para produzir uma unidade de cal ativa. O rendimento térmico (7,8) cujo cálculo permite comparar os diversos fornos inclusive aqueles que não operem "por via úmida", tem um valor entre zero e um; é definido pela seguinte relação:

$$\eta = \frac{\text{calor necessário para dissociação térmica do CaCO}_3}{\text{consumo total de calor}}$$

FIGURA 9  
CONSUMO ESPECÍFICO VERSUS RENDIMENTO TÉRMICO

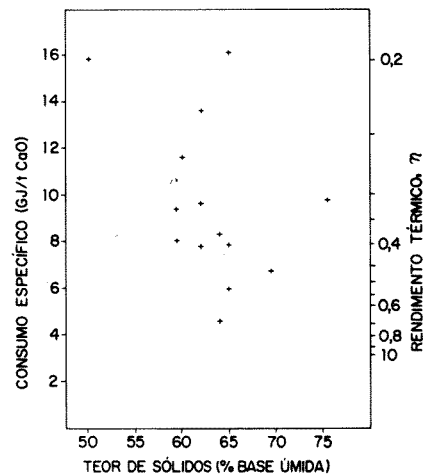


Considera-se um rendimento térmico de 0,6 como bom para fornos de cal "por via úmida"; o

valor atinge até 0,84 em fornos de outros tipos, como por exemplo, forno "Shaft". A figura 9 relaciona o consumo específico de energia com o rendimento térmico.

A figura 10 mostra a variação do consumo específico de energia com o teor de sólidos da lama com a qual se alimenta o forno. A idéia que a quantidade da água, na lama a ser calcinada, afeta desfavoravelmente a eficiência no

FIGURA 10  
CONSUMO ESPECÍFICO VERSUS TEOR DE SÓLIDOS



aproveitamento de energia, e portanto que as variáveis, consumo específico de energia e rendimento

térmico sejam correlacionadas com o teor de sólidos na lama não se confirma pela figura 10 em virtude de existirem outros fatores fortemente influentes: características dimensionais do forno (comprimento, diâmetro interno), composição da lama, tipo e espessura dos refratários e isolantes e existência ou não de satélites.

Deve-se portanto, identificar e quantificar os diversos parâmetros envolvidos antes de se analisar o desempenho do forno, quanto ao consumo de energia, o que foi ressaltado também por Bailey (9).

### III. — MEDIDAS POTENCIAIS DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA

Apresentam-se, a seguir, medidas de conservação de energia, acompanhadas, sempre que possível, com o questionamento da dificuldade da sua implantação.

A escolha e a preferência das alternativas devem resultar de uma análise técnica e econômica realizada para cada caso e pertinente ao programa geral de conservação de energia da empresa.

Convém lembrar que em vários casos, determinadas modificações de equipamentos, alteram as condições de processo da área o que pode levar a afetar a estabilidade operacional de outros setores interrelacionados e; até causar um aumento no consumo específico de energia da unidade. Uma discussão teórica das influências de diversas variáveis operacionais consta na parte I (2); maiores detalhes e referências das possibilidades descritas a seguir, fazem parte do novo "Manual de Conservação de Energia" (6).

**Aumento do teor de sólidos da lama na saída dos filtros lavadores** — A umidade da lama é uma variável que deve ser monitorada e mantida no nível mais baixo possível.

Conforme a figura 4, quase todos os filtros operam com teor de sólidos inferior a 65%. A elevação do teor de sólidos da lama de 60 para 65% representa uma possível diminuição do consumo de energia de até 10%, dependendo da economia real das demais condições operacionais e de outros característicos do forno.

Os filtros devem ser examinados tendo em vista, entre outros, os seguintes tópicos: sobrecarga do filtro; possibilidade de elevar a temperatura da lama e da água de lavagem (65 — 80 °C); elevação do vácuo; verificação de que modo a evaporação "flash" do filtrado afeta o vácuo (instalar ou redimensionar o condensador da linha de vácuo); alteração da vazão do chuveiro, prejudicando ou não a eliminação de soda; otimização da limpeza da tela e a renovação da **pré-camada**.

Ocorre que filtros, apesar das mesmas características de construção e operação, apresentem desempenho diferente em diferentes fábricas devido às propriedades da lama em questão e das condições operacionais da área de caustificação. Para resolver eventuais problemas de incrustação e emperramento de roscas de alimentação ao forro não se deve recorrer simplesmente à adição de água à

lama, mas à mudança do sistema de alimentação. Estando as demais condições de processo em níveis normais, uma intensificação excessiva de formação de pó devido ao aumento do teor de sólidos pode ser limitada pela alteração e transferência da zona das correntes.

**Secador "flash" para lama** — Uma técnica não recente, que tem sido usada inicialmente para aumentar a produção, principalmente, em fornos de menor comprimento. A secagem, com gases de exaustão, de uma parte da lama até uma umidade residual de 10% e a reunião das duas lamas antes da sua entrada no forno, aumenta o teor de sólidos global.

A instalação de secadores "flash" pode sofrer restrições do tipo arranjo físico (espaço físico e construção civil) e de custo de equipamento.

**Pintura da parede do forno** — As perdas de calor, pelas paredes atingem, geralmente, 10-15% da energia total liberada pela combustão. A redução de 0,9 para 0,3 da emissividade da parede do forno pode significar uma diminuição das perdas de calor por radiação 2,5 a 3,0 vezes menor, nas regiões mais quentes. As tintas devem ser testadas, previamente, com respeito ao efeito que tenham sobre a emissividade, a aderência a superfície e resistência ao empolamento a altas temperaturas.

**Isolamento do forno de cal** — A colocação de isolamentos entre o refratário e a parede do forno, hoje, já não é somente uma alternativa mas uma medida indispensável a operação do forno. Lane (10) recomenda espessura mínima de refratários de aproximadamente 230 mm; existem fábricas, no Brasil, que operam com espessura de parede de refratários mais isolantes de 265mm.

**Recuperação de calor de parede por cobertura do forno** — Sua finalidade é de aproveitar o ar circundante à região mais quente do forno como ar secundário. Embora seja uma alternativa razoavelmente conhecida e empregada no Japão por 36% das indústrias, não há nenhuma instalação desta natureza do Brasil. É de esperar que a redução das perdas de calor seja certamente mais sensível com o emprego de melhores refra-

tários e isolantes, porém, para tomar uma decisão deve-se fazer os balanços de energia para cada caso e subsequente análise econômica.

**Recuperação de calor do produto** — Em fornos que não possuem resfriadores tipo satélite, o produto é descarregado num nível de temperatura de 1000 °C; o que implica em perdas de energia entre 5 e 10% da energia total.

Nestes casos há possibilidade para a recuperação do calor do produto com: isolamento total, desde a saída do forno até o silo de cal e utilização deste calor na área de caustificação; ou com isolamento; desde a saída do forno até os transportadores, com passagem do ar em contracorrente, para posterior uso como ar secundário de combustão. Devido ao aumento da temperatura o isolamento pode exigir modificação nos sistemas de correias transportadoras. A vazão do ar no interior dos dutos deve ser sempre em pressão negativa (sucção) para reduzir problemas provenientes da geração de pó.

**Eliminação de perdas de pó de cal por manuseio** — As perdas provocadas pelo transporte e manuseio são dificilmente computáveis de modo teórico, pois variam de fábrica para fábrica.

Para sua estimativa devem ser realizados balanços globais de carbonato de cálcio e cal nas áreas de caustificação e calcinação. As perdas por manuseio podem ser reduzidas com o fechamento de todo o sistema de transporte de cal, juntamente com a manutenção de pressão levemente negativa no interior dos dutos e silos por meio de exaustores.

**Recuperação de calor de gases de exaustão** — Em geral, a atenção no tocante a lavadores de gases está concentrada na eficiência de retenção do pó e em problemas de entupimento do equipamento por lama e pó. Comumente, os dutos de gases e os lavadores não são isolados e a vazão de água nos gases, com ou sem a operação dos lavadores, são iguais pela falta de desnebulização. O aproveitamento desta fonte secundária de calor é uma medida de conservação, em potencial.

**Emprego de combustíveis alternativos** — Esta alternativa cons-

titui antes uma substituição de combustível, não uma conservação propriamente dita e, portanto, não invalida a consideração das medidas pré-citadas. A substituição por gases combustíveis (gás natural e hidrogênio) depende de fontes locais, próximas à instalação.

A substituição parcial de óleo combustível por biomassa na forma de serragem, de gases pobres ou gases quentes é viável; as medidas podem provocar: diminuição da capacidade do forno; aumento do volume de gases e do pó na exaustão e elevação da temperatura dos gases de exaustão. O impacto destes inconvenientes pode ser atenuado mediante uma análise operacional da instalação.

Quando óleo combustível é queimado de maneira eficiente, a temperatura adiabática de chama é da ordem de 2000 °C, enquanto madeira pulverizada produz chamas por volta de 1450 °C; com gás pobre de madeira não se consegue nível acima de 1250 °C. Isto reduz o gradiente térmico resultando na diminuição da transferência de calor para os sólidos.

O emprego de madeira pulverizada requer moagem que pode trazer complicação adicional, além de representar um aumento no custo operacional.

Como o combustível é queimado no interior do forno, deve-se levar em consideração possíveis efeitos da cinza sobre a qualidade do produto e em outras operações. Este aspecto, sendo bastante controvertido, merece acompanhamento mais direto. A substituição do tal do óleo por biomassa em suspensão já foi praticada numa fábrica nacional.

**Controle de processo por computador** — Como apontado em trabalho anterior (2) a taxa de alimentação e o teor de umidade da lama são parâmetros que influenciam, sobremaneira o desempenho do forno pelo seu rendimento térmico; este pode ser corrigido por uma estratégia de controle de forno.

A concentração de sódio e a qualidade da lama são outros parâmetros de comparável importância, cujo efeito indesejável pode ser minimizado através do controle das operações de caustificação

e da vazão dos chuveiros do filtro de lama.

Em várias indústrias do exterior (9, 11 e 12) testaram-se diversos tipos de controle "on-line" e supervisão para o forno de cal. Os principais benefícios destes sistemas são: economia de combustível; minimização das temperaturas; aumento da produção; aumento da vida útil de refratários e menor variação da qualidade do produto.

Além de requererem uma cuidadosa análise econômica a implantação de sistemas deste tipo para o forno de cal depende de orientação geral da empresa.

O emprego de controle "off-line" do processo através da utilização de modelo matemático similar ao descrito em (2) e (13) é viável. A adoção de um sistema deste tipo em conjunto com mais frequente coleta de amostras, requer um menor investimento de capital e possibilita conhecer melhor o processo e a instalação, com subsequente possibilidade de otimização da operação e ainda facilita a disseminação, entre supervisores e, operadores da área do uso de microprocessadores que em futuro próximo são uma realidade e necessidade para as indústrias nacionais.

#### IV — BIBLIOGRAFIA

- (1) Solitrenick, B. — "Indústria de Celulose e Papel no Brasil, Posição do Protocolo de Energia no 3.º Ano de Implantação". — III. — Congresso Latino-Americano de Celulose e Papel — Vol. III: 877-883 — São Paulo — Brasil — 1983.
- (2) Lima, A.F.; Park, S.W. — "Variáveis operacionais que afetam o consumo de combustíveis no forno de cal — Parte I" III. Congresso-Latino Americano de Celulose e Papel — Vol. III: 865-875 — São Paulo — Brasil — 1983.
- (3) Ministério de Minas e Energia — "Balanço Energético Nacional" — 1983.
- (4) Polowski, S. e Valério, F. — "Alternativas Energéticas na Aracruz Celulose" — XV. Congresso Anual da ABCP — Vol. II: 435-450 São Paulo, Brasil, 1982.
- (5) Guimarães, J.E.P. — "A indústria de cal no Brasil — Panorama do setor na década de 80" — Associação Brasileira dos Produtores de Cal — 1983.
- (6) I P T — "Conservação de Energia na Indústria de Celulose e Papel — Manual de Recomendações" (a ser publicada).
- (7) Essenhig, R.H. — "Criteria of thermal efficiency" — Chemtech, Jan.: 58-63 — 1984
- (8) Ruch, H. — "The theoretical limits of heat consumption in lime burning considered on the basis of the physico-chemical relationships" — Zemet-Kalk-Gips, 34 (1): 20-26. — 1981.
- (9) Bailey, R.B.; Martin, F.R. e Willison, T.R. — "Computer optimized kiln operation" — Tappi Engineering Conference: 39-45. — 1981.
- (10) Lane, S.C.; — "Energy reduction in a new line and recausticizing plant" — Tappi Engineering Conference: 143-155 — 1979.
- (11) Skjoth, P., — "Computerized control of the lime reburning process, principle and experience" — Tappi Pulping Conference: 73-75 — 1979.
- (12) Blevins, T. e Rice R. — "Automating a lime kiln control" — Tappi Journal — Vol. 66 n.º 3: 103-105. March — 1983.
- (13) Guimarães, J.C. — "Modelo melhorado do forno de cal analisa desempenho de combustíveis alternativos" — XIV — Congresso Anual de ABCP — Vol. I: 297-330 — Novembro 1981.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Secretaria de Tecnologia Industrial do Ministério da Indústria e do Comércio e às firmas de celulose e de equipamentos que colaboraram na cessão de informações e na discussão de aspectos técnicos relativos ao forno de cal.