



# uso da simulação no controle do forno de cal por microcomputador\*

J. C. GUIMARÃES<sup>1</sup>

A. F. LIMA<sup>2</sup>

S. W. PARK<sup>2</sup>

L. M. YOJO<sup>3</sup>

## APRESENTAÇÃO

O processo kraft de polpação é responsável por 95% da produção nacional de pastas. O forno de cal representa até 20% do consumo total de energia de uma fábrica kraft. Daí o interesse atual em otimizar a operação desse equipamento.

Por outro lado, a simulação tem se revelado uma ferramenta valiosa na análise e previsão de de-

sempenho do forno de cal. O trabalho apresenta o esboço de um projeto, ora em fase de concepção no CTCP/IPT, para implantar um sistema de controle por microcomputador que utiliza um modelo matemático do forno. Os principais benefícios esperados são: produção mais uniforme e um menor consumo de combustível.

## ABSTRACT

Kraft pulping is responsible for 95% of pulp production in Brazil. The lime kiln represents up to 20% of the total energy consumption in a kraft pulp mill. Hence the present interest in optimizing its operation.

On the other hand, simulation

has proved to be a valuable tool in analyzing and predicting performance of lime kilns. This paper presents the outline of an ongoing project at CTCP/IPT to implement a microcomputer control system that utilizes a mathematical model of the kiln. Main benefits expected are more uniform production and lesser fuel consumption.

## 1. INTRODUÇÃO

O processo kraft ou sulfato de polpação de pasta celulósica é responsável por 95% da produção nacional de pastas. Um dos fatores decisivos para a sua viabilidade econômica é a recuperação de reagentes, cujo diagrama de processo é mostrado na figura 1.

A clarificação do licor branco ( $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{S} + \text{CaCO}_3 \downarrow$ ) produz resíduo rico em carbonato de cálcio que após a lavagem e espessamento em filtro rotativo, é calcinado produzindo óxido de cálcio. Esta cal é utilizada na caustifica-

1 — Engenheiro químico, Chefe da Área de Processos e Instrumentação da Itaú S. A. Planejamento e Engenharia.

2 — Engenheiros químicos, da Seção de Engenharia de Processos e Subprodutos do Centro Técnico em Celulose e Papel/IPT.

\* — Trabalho apresentado no 1.º Simpósio sobre "Otimização de Processos Industriais — IBP — junho/1985 — São Paulo".

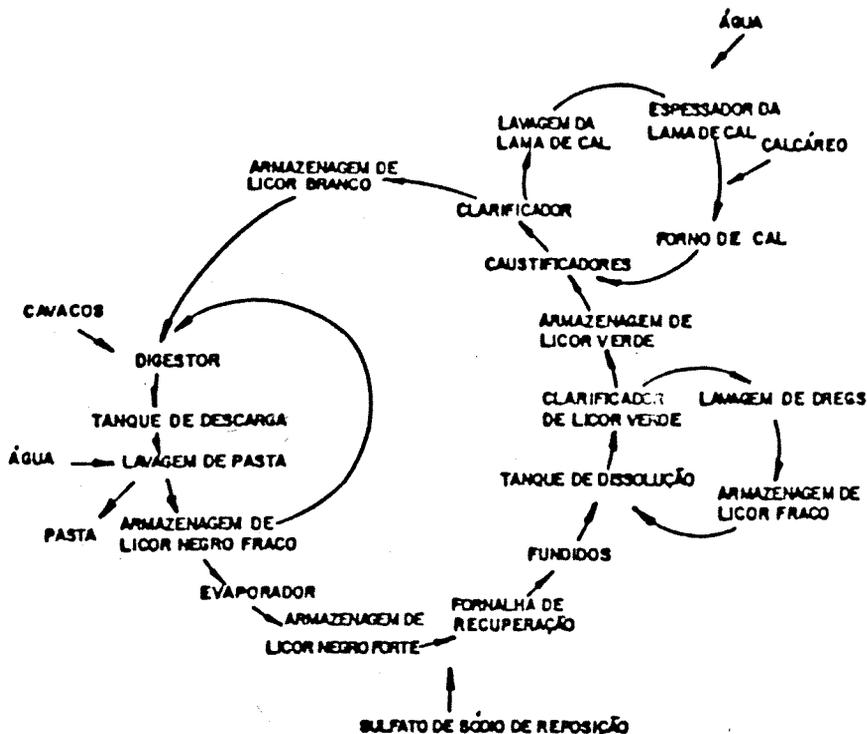


Fig. 1 — Diagrama do processo Kraft.

ção para transformar o carbonato de sódio em hidróxido de sódio, que é o reagente principal do licor branco empregado na etapa de polpação da madeira.

A calcinação é realizada num forno rotativo, e a energia necessária provém, na maioria dos casos, de óleo combustível. O consumo de energia no forno representa 15 a 20% do consumo total de uma fábrica de pasta kraft. Isto pode representar até 40% do total de óleo combustível utilizado. Nas fábricas que já utilizam biomassa na geração de vapor em caldeiras, o forno de cal representa até 100% do consumo de óleo combustível.

Até certo tempo, a operação e o consumo de energia do forno eram relegados a segundo plano. Atualmente, o forno tem recebido maiores atenções devido aos custos crescentes da energia fóssil e a atual política governamental de distribuição de combustíveis.

## 2. PROCESSO DE CALCINAÇÃO

A lama de carbonato de cálcio, proveniente da área de caustificação, é espessada e lavada num filtro rotativo a vácuo. O forno de cal, conforme indicado na figura 2, recebe a lama do filtro, pela câmara de fumaça.

Esta lama percorre o forno, atravessando: zona de correntes onde ocorre a maior parte de evaporação da água; a zona de pré-aquecimento da lama; a zona de calcinação e a zona de combustão onde ocorre a decarbonatação. Nos fornos com resfriadores satélites, o ar secundário é pré-aquecido pela troca de calor com o produto calcinado que deixa o forno.

Os gases gerados pela combustão atravessam o forno em contracorrente à lama, sendo retirados por um exaustor e lavados num "scrubber" para a retenção do pó arrastado.

O forno de cal é um dos equipamentos menos instrumentados na indústria de celulose. Os medidores básicos estão indicados na figura 2. Tem-se, como o mínimo, as medições de: vazão e temperatura do óleo combustível; pressão do ar primário; temperatura da câmara de combustão; rotação do forno; temperatura do gás após a zona de correntes; temperatura, pressão e composição do gás na câmara de fumaça; e pressão na saída do exaustor. Na alimentação do filtro tem-se os medidores de densidade e vazão da lama. Na figura 2 não estão indicados o sistema de pré-aquecimento de óleo combustível e o de alimentação de água do lavador de gases.

Adicionalmente, são realizadas

intermitentemente coletas de amostras para análises de: composição e teor de sólidos da lama da alimentação, teor de sólidos da lama após a zona de correntes, e composição do produto calcinado. A vazão da lama de alimentação é inferida pela densidade e vazão da lama de alimentação do filtro.

As principais variáveis operacionais do forno de cal são: a vazão e a umidade da lama de alimentação, o tempo de residência no forno, a vazão de ar primário e secundário, e a vazão de óleo combustível.

A umidade da lama influi diretamente no consumo de combustível devido à energia necessária para a evaporação. Com uma elevada umidade, além de energia adicional necessária, o forno pode produzir uma cal com reação incompleta. Por outro lado, a baixa umidade aumenta a geração do pó e a temperatura de gases na exaustão.

O tempo de residência é uma função do volume do forno, da vazão da lama e da rotação. Portanto, a rotação está relacionada com a produção do forno.

A vazão de ar, quando em excesso muito superior ao necessário, diminui a temperatura da câmara de combustão e aumenta a temperatura dos gases de exaustão. Quando ocorre o inverso, pode-se incorrer no aumento do TRS (total reduced sulphur) dos gases de saída. O TRS é um dos parâmetros utilizados para medir a qualidade ambiental do ar.

A vazão do óleo combustível, quando em excesso, produz superaquecimento da câmara de combustão e do produto, significando desperdício do insumo.

Todas estas variáveis são inter-relacionadas, de modo que o comportamento operacional do forno depende da soma conjunta das suas características. Informações mais detalhadas sobre o forno e sua operação podem ser encontradas em trabalhos prévios (1-3).

## 3. CONTROLE CONVENCIONAL DO FORNO DE CAL

O controle do forno de cal é feito modificando manualmente os "set-points" das malhas simples ou com a manipulação direta dos elementos finais de controle. Em cada forno, as condições (valores numéricos) são diferentes, porém o operador usualmente conhece os pon-



tos de operação. Descreve-se a seguir o controle manual e o automático convencional típicos do forno de cal.

A primeira verificação da qualidade do produto é feita visualmente pelo operador. Se a cal na câmara de combustão tiver aspecto vermelho-laranja, é considerada de boa calcinação; e se for amarelo-claro, está supercalcificada. O produto esfriado, se supercalcificado, apresentará cor escura. Estas cores dependem da qualidade da cal recirculada, e a qualidade do produto deve ser verificada com análises regulares da sua composição química.

Em função da qualidade do produto e da temperatura da câmara de combustão, as vazões do óleo combustível e do ar primário são modificadas. Quando estabilizadas as novas condições de operação, é verificado o teor de oxigênio na câmara de fumaça. Se estiver fora da faixa de operação, a vazão do ar secundário é modificada.

Outra variável monitorada é a umidade da lama na saída da zona de correntes. Se a umidade for pequena, haverá muita geração de pó e se for elevada, dificultará a calcinação e a cal não apresentará boa granulometria. O operador sabe pela experiência qual a umidade ideal e conhece a temperatura ideal dos gases neste local para que esta umidade seja obtida. Controla-se a temperatura dos gases, portanto, por inferência.

Se a temperatura dos gases após a zona corrente for baixa, abre-se a gelosia ("damper") localizada antes da entrada do exaustor, aumentando a vazão dos gases. O tempo de resposta da temperatura dos gases na zona de correntes é lento (~ 10 min) porém na zona de combustão é rápido. Deste modo, se a abertura da gelosia acarretar queda substancial da temperatura na zona de combustão, a vazão de óleo deverá ser aumentada.

Tentou-se descrever aqui um estilo de controle manual do forno de cal. Deve-se, porém, ressaltar que os operadores possuem entre si diferentes estilos em função de diferentes modelos mentais.

Evitou-se citar os valores numéricos de objetivos de controle (temperaturas, teor de sólidos, vazões) pois estes variam em função do tipo de forno e do nível de produção.

O controle automático convencional possui variações de fábrica para fábrica. Descreve-se aqui um caso típico ilustrado na figura 2.

A vazão de alimentação do forno é controlada indiretamente pela vazão de lama para o filtro. A concentração de sólidos (medida como densidade) desta lama é controlada pela adição de água de diluição.

A vazão de ar secundário é manipulada através de abertura da gelosia antes do exaustor, de acordo com a monitoração do teor de oxigênio nos gases de exaustão. Em casos mais refinados, existe a monitoração de TRS.

O valor desejado de rotação do forno deve ser fixado para obter um tempo de residência adequado em função da produção. O controle de rotação é obtido por um variador de velocidade.

A vazão de ar primário é manipulada de acordo com a vazão de óleo combustível. A vazão do óleo, por sua vez, é manipulada através da variação do seu "set-point" de acordo com a monitoração da temperatura da câmara de combustão, das condições de alimentação da lama e qualidade do produto calcinado.

#### 4. SIMULAÇÃO POR COMPUTADOR

A simulação operacional é uma ferramenta valiosa para analisar fornos de cal. Através da coleta de pequena quantidade de dados operacionais é possível avaliar o de-

sempenho de fornos em termos de capacidade de calcinação e eficiência no consumo de energia.

Em trabalhos prévios (1-3) utilizou-se o modelo matemático KILN desenvolvido por Guimarães (4). É um programa que simula a operação do forno de cal em regime permanente.

O programa utiliza linguagem FORTRAN e quando implantado em um computador CYBER/175/CDC, por exemplo, requer 71 kwords de memória e 70 segundos de CPU para simular um forno de cal de 70 m de comprimento usando um intervalo de integração de 0,3 m. Num IBM 4341, o programa necessita de 100 kbytes e requer 30 segundos de CPU para um forno de idêntica configuração.

O modelo é formado por um conjunto de balanços diferenciais de massa e de energia complementado por equações de cinética química, secagem e restrições dimensionais.

O método de computação adotado consiste em estimar inicialmente, perfis de temperatura e composição da fase sólida. Com base nestes perfis são calculados os perfis da fase gasosa e da parede do forno e novos perfis da fase sólida. Através de sucessivas iterações, a convergência especificada é atingida.

Os dados necessários para simular um forno industrial através de KILN são: composição, vazão e temperatura das correntes de lama

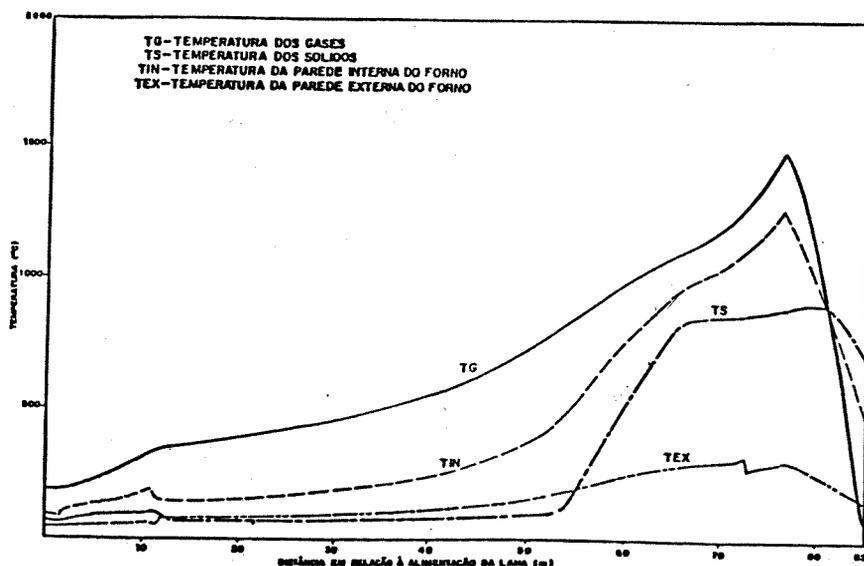
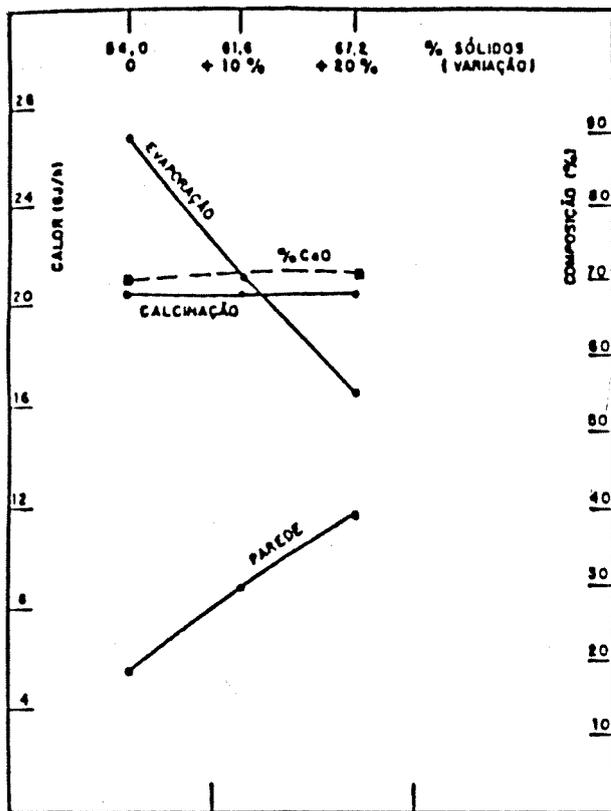
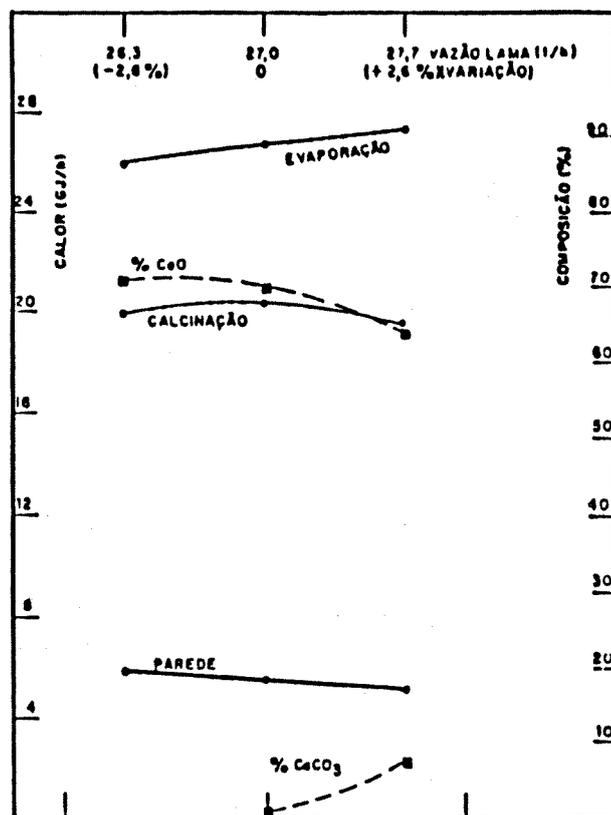


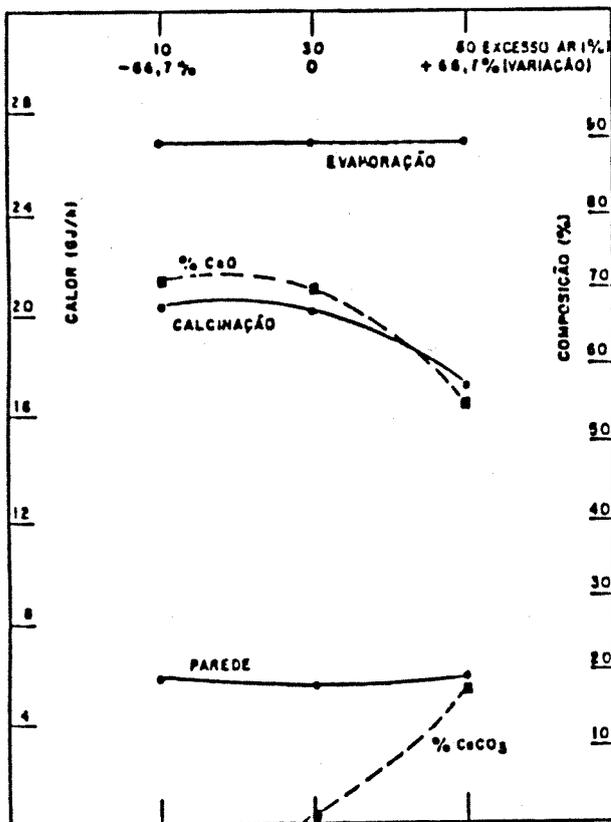
Fig. 3 — Perfil de temperatura ao longo do forno.



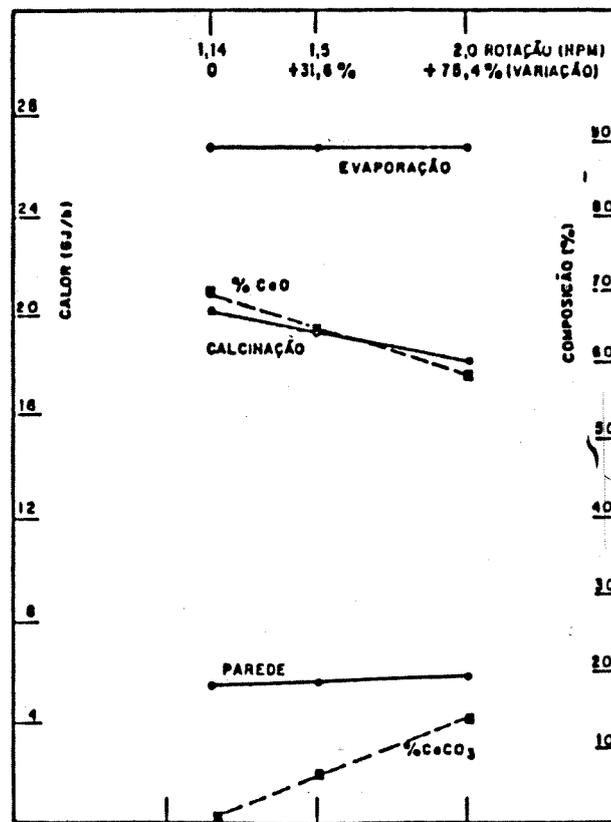
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 4 — Influência das variáveis a) teor de sólidos b) fluxo de lama c) excesso de ar e d) rotação do forno sobre: a energia para evaporação e calcinação da lama, perda de calor pela parede e composição de CaO e CaCO<sub>3</sub> no produto.

de carbonato, combustível e ar; e características geométricas do forno e condutividade dos refratários.

O processamento fornece um relatório cujos principais itens são: balanço global de calor; características do produto e do gás de exaustão; índice de desempenho do forno (GJ/t CaO), perfis de temperatura e composição ao longo do forno (opcional) e arquivo em disco ou fita (opcional). A figura 3 mostra os perfis de temperatura para um caso estudado.

O modelo aplicado a um caso industrial, após validação, pode ser utilizado na análise de sensibilidade de parâmetros do processo que além de contribuir para o aumento do conhecimento sobre o processo e instalação, aponta quais as variáveis que devem ser monitoradas rigidamente para garantir o bom funcionamento do forno e quais são as mais importantes para a redução dos custos operacionais.

As figuras 4a-4d ilustram a influência de algumas variáveis sobre: a energia para processo, a perda de calor pela parede e composição do produto (2).

A simulação "off-line" de um forno em operação possibilita antecipar o efeito das variações operacionais, indicando as correções necessárias para a melhoria operacional e sua otimização para uma produção especificada.

## 5. APLICAÇÕES "ON-LINE" DO MICRO

Discutem-se, em seguida, as aplicações mais imediatas de um sistema de controle por microcomputador, utilizando um modelo do tipo acima descrito, como suporte à operação de um forno de cal.

A configuração mais conveniente, tanto do ponto de vista de confiabilidade operacional quanto de facilidade de implantação numa instalação existente, é a do tipo supervisão. Nesta configuração, as cadeias de controle continuam sendo feitas analogicamente e apenas os "set-points" são calculados pelo microcomputador. É possível, entretanto, utilizar a capacidade computacional da estação remota para realizar aí mesmo os algoritmos de controle e atuar diretamente nos elementos finais.

Propõe-se, portanto, um sistema (figura 5) constituído de:

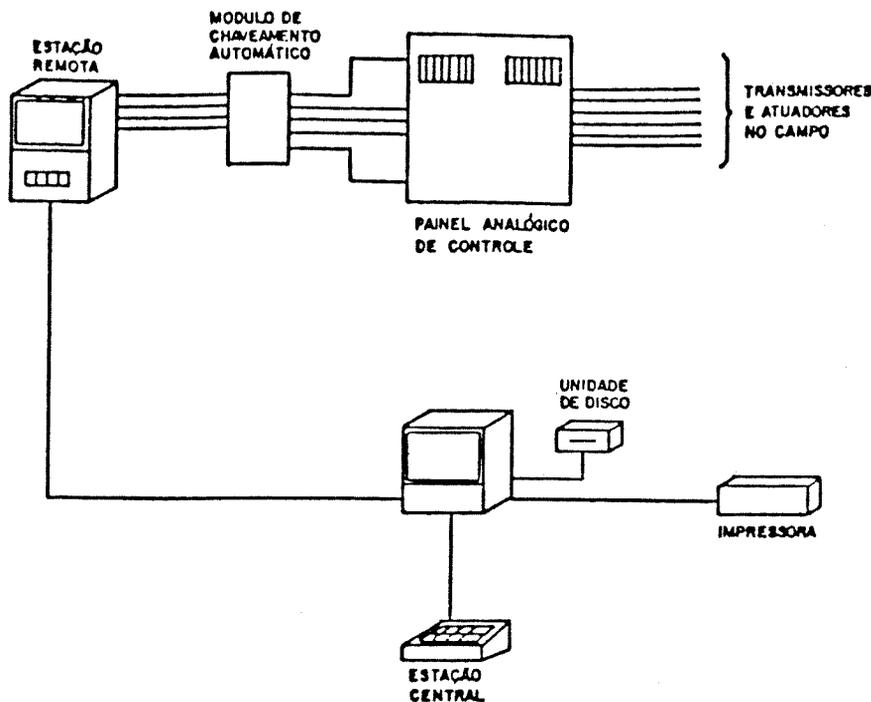


Fig. 5 — Configuração simplificada do sistema.

- Uma estação central com uma CPU, memória, teclado, vídeo, unidade de disco, impressora, e canal serial de comunicação. Ela faz a interface homem-máquina e executa os programas necessários à otimização operação.
  - Uma estação remota com uma CPU, memória, canal serial de comunicação e placas de I/O. Este módulo faz a interface do processo com o sistema a micro.
  - Um módulo de chaveamento automático com "watch-dog" para seleção de "set-point" externo ou interno. Ele retorna o sistema ao controle normal, em caso de falha do microcomputador.
  - Como resultado tem-se um relatório conforme mostrado na tabela 1 que fornece uma idéia exata de como a energia do combustível está sendo utilizada e orientaria o operador nas providências a tomar.
  - Os parâmetros do modelo podem ser determinados "off-line" num computador de grande porte a partir de testes operacionais.
  - Execução de programas simples para mudança de produção. O modelo calcula as vazões da lama, combustível, % O<sub>2</sub> e rotação para a nova condição e modifica lentamente estes "set-points" até os valores finais. Este procedimento, além de economizar combustível, reduz a produção de cal fora de especificação.
  - Ajuste dos valores de operação em função de alteração de temperatura ambiente, umidade da lama, de modo a manter o teor de CaO no produto.
  - O excesso de O<sub>2</sub> pode também ser automaticamente manipulado para manter o valor de TRS dentro de padrões ambientais aceitáveis.
  - Identificação automática dos parâmetros do modelo de modo a minimizar o erro entre os valores calculados e os valores
- O sistema acima descrito permite a execução das seguintes tarefas, por ordem crescente de complexidade.
- Relatório detalhado sobre a eficiência térmica do forno. Isto envolve entrada manual de alguns parâmetros (poder calorífico do combustível, teor de umidade da lama) cuja determinação "on-line" é problemática e alguns cálculos auxiliares como o balanço de sólidos no filtro rotativo.

TABELA 1. EXEMPLO DE RELATÓRIO EMITIDO PELO PROGRAMA KILN (1).

<u>ENTRADAS</u>		<u>SAÍDAS</u>	
<b>1. LAMA</b>			
* VAZÃO	26989	kg/h	
* TEMPERATURA	60	°C	
* COMPOSIÇÃO EM MASSA			
CaO	0.00	%	
CaCO <sub>3</sub>	45.53	%	
H <sub>2</sub> O	44.00	%	
INERTES	10.47	%	
<b>2. COMBUSTÍVEL</b>			
* VAZÃO	1597	kg/h	
* TEMPERATURA	134	°C	
* PCI	40941	MJ/kg	
<b>3. AR</b>			
* VAZÃO	468.7	Nm <sup>3</sup> /min	
* TEMPERATURA	25	°C	
* EXCESSO	30.00	%	
<b>4. ROTAÇÃO</b>			
	1.14	rpm	
<b>5. TEMPERATURA AMBIENTE</b>			
	25	°C	
<b>1. BALANÇO DE CALOR</b>			
* CALOR DE COMBUSTÃO			65.39
* CALOR SENSÍVEL PELA CORRENTE DE GÁS			-11.27
* CALOR SENSÍVEL PELA CORRENTE DE SAÍDA			11.86
* CALOR SENSÍVEL SÓLIDO PARA GÁS			12.27
* PERDAS PELA PAREDE			5.50
* CALOR DE EVAPORAÇÃO			26.79
* CALOR DE CALCINAÇÃO			20.24
* CALOR NÃO CONTABILIZADO			3.60
<b>2. PRODUTO CALCINADO</b>			
* VAZÃO	9754	kg/h	
* TEMPERATURA	703	°C	
* COMPOSIÇÃO EM MASSA			
CaO	70.00	%	
CaCO <sub>3</sub>	1.10	%	
INERTES	28.90	%	
<b>3. GÁS DE EXAUSTÃO</b>			
* VAZÃO	795.5	Nm <sup>3</sup> /min	
* TEMPERATURA	177	°C	
* COMPOSIÇÃO VOLUMÉTRICA (BASE SECA)			
O <sub>2</sub>	3.89	%	
N <sub>2</sub>	77.14	%	
CO <sub>2</sub>	18.96	%	
<b>4. ÍNDICE DE DESEMPENHO</b>			
	8.69	GJ/t CaO	
<b>5. TEMPERATURA MÁXIMA DO REFRAATÁRIO</b>			
	1272	°C	
<b>6. TEMPO DE RESIDÊNCIA</b>			
	3.40	h	

medidos. Este programa tem um longo tempo de execução e só será executado esporadicamente para adaptar o modelo às condições variáveis do forno.

- Como mencionado acima, os algoritmos de controle de cada variável poderão vir a ser executados na própria estação, uma vez que essas têm uma grande capacidade computacional "ociosa". Isto implica, entretanto numa maior exigência de confiabilidade, uma vez que a operação do forno passa a depender intensamente da operação desta estação remota. Esta confiabilidade pode ser obtida, por exemplo, com a duplicação do equipamento.
- Como benefício adicional, podemos citar a possibilidade de o sistema alarmar condições críticas de variáveis calculadas no sistema, o que alertará ao operador que o forno não está operando dentro das "janelas" consideradas aceitáveis. Opcionalmente, pode-se utilizar um vídeo auxiliar para elaboração de gráficos de variáveis ou gráficos vivos do sistema.

## 6. DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE

A implementação de um sistema como a configuração indicada no item anterior envolve um razoável esforço de desenvolvimento de software. Embora grande parte desse software seja de uso geral, o programa aplicativo, incluindo o modelo matemático e as rotinas de estratégia de controle, devem ser escritos com a flexibilidade suficiente para se adaptar a diferentes configurações de fornos.

Um projeto, ora em fase de concepção no CTCP, visa desenvolver

o software aplicativo acima mencionado, para futura aplicação do sistema a uma unidade de produção industrial.

Um futuro trabalho dará detalhes sobre a estrutura desse software e sua implementação numa unidade de teste.

## 7. CONCLUSÕES

A simulação é uma ferramenta valiosa na análise do forno de cal pois, além de aumentar o conhecimento do usuário sobre o seu processo aponta quais as variáveis que devem ser controladas mais rigidamente para garantia do bom funcionamento do forno e redução dos custos operacionais. É possível adaptar um modelo deste tipo para uso "on-line", utilizando um microcomputador.

A implantação de um sistema de controle supervísório do tipo descrito permitirá a operação do forno em condições ótimas ou perto destas através da manutenção:

- da vazão de combustível no mínimo requerido para produzir uma cal de boa qualidade.
- excesso de ar num valor mínimo que assegure boa combustão e mantenha o nível de emissões gasosas aceitável.
- velocidade de rotação do forno num mínimo permissível para atingir a produção desejada e proporcionar a ação de rolamento adequada ao material.

Estima-se que, com a operação cuidadosa do forno, obtenha-se uma economia de combustível de pelo menos 10%. Para um forno produzindo 180 t/dia de cal tal redução significa uma economia anual direta da ordem de US\$ 160.000.

Adicionalmente, evita-se o superaquecimento dos refratários aumentando a sua vida útil; e tem-se, através do aumento e uniformidade da qualidade da cal produzida, uma melhoria no desempenho da área de caustificação.

O CTCP/IPT desenvolve no momento um projeto, ora em fase de concepção, que tem como objetivo final implantar um sistema deste tipo em uma unidade industrial típica. O andamento dos trabalhos, bem como seus resultados, serão divulgados em trabalhos próximos.

## 8. REFERÊNCIAS

### BIBLIOGRÁFICAS

- (1) CTCP/IPT — Relatório nº 17.479/6 — "Influência de algumas características do sistema de recuperação de fábricas de celulose no consumo de óleo combustível do forno de cal". São Paulo — Março, 1985.
- (2) LIMA, A.F.; PARK, S.W. e YOJO, L.M. — "Variáveis operacionais que afetam o consumo de combustíveis no forno de cal". — Parte I. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CELULOSE E PAPEL, 3., São Paulo, 1983. *Anais* São Paulo, ABCP, 1983. V.3, p. 877-883
- (3) —. Idem: Parte II: *O Papel*, 46: 49-54, Jan. 1985.
- (4) GUIMARÃES, J.C. — "Modelo melhorado do forno de cal analisa desempenho de combustíveis alternativos" In: CONGRESSO ANUAL DA ABCP, 14º, São Paulo, 1981. *Anais* São Paulo, ABCP, 1981. V.1, p. 297-330.