

**Variáveis operacionais que afetam o consumo de combustíveis no forno de cal - Parte 1**

MFN -0720

N CHAMADA:

TITULO: Variáveis operacionais que afetam o consumo de combustíveis no forno de cal - Parte 1

AUTOR(ES): LIMA, A.F.PARK, S.W.YOJO, L.M.

EDICAO:

IDIOMA: português

ASSUNTO:

TIPO: Congresso

EVENTO: Congresso Anual da ABCP, 16

PROMOTOR: ABTCP

CIDADE: São Paulo

DATA: 21-26.11.1983

IMPRESSÃO: Sao Paulo, 1983, ABTCP

PAG/VOLUME: p.865-876, v.3

FONTE: Congresso Anual da ABCP, 16, 1983, São Paulo, v.3, p.865-876

AUTOR ENTIDADE:

DESCRIPTOR:

RESUMO:

VARIÁVEIS OPERACIONAIS QUE AFETAM O  
CONSUMO DE COMBUSTÍVEIS NO FORNO DE CAL - PARTE I

Lima, A.F.; Park, S.W. e Yojo, L.M.  
Centro Técnico em Celulose e Papel - IPT - São Paulo Brasil



Resumo

Neste trabalho foi levantada a influência de algumas variáveis operacionais do forno de cal sobre certas características de processo e produto com vistas a verificar quais as variáveis que devem ser monitoradas mais rigidamente para aumentar a eficiência operacional, quais as variáveis que oferecem oportunidades para melhorias no custo operacional do forno e alternativas operacionais e de combustíveis.

As variáveis operacionais estudadas foram: umidade da lama, regime de alimentação, ar para combustão, velocidade de rotação, teor de inertes, espessura de revestimento refratário e combustíveis alternativos. Determinou-se a influência da variação destes parâmetros sobre as seguintes características de processo e produto: magnitude das zonas de secagem, de aquecimento e de calcinação; perfil de temperatura e da composição de gases e de sólidos ao longo do forno, composição do produto e dos gases de exaustão, balanço térmico global e índice de desempenho do forno.

1. Introdução

Os fornos de cal são grandes consumidores de óleo combustível nas fábricas de celulose, particularmente naquelas que já operam com caldeiras a lenha, pois chegam a requerer cerca de 70% do óleo empregado na fábrica.

Até certo tempo o modo de operar e o consumo do forno de cal eram ignorados devido ao seu pequeno impacto na eficiência energética da fábrica de celulose. Esta posição vem se alterando, face as restrições da disponibilidade de óleo combustível e ao seu preço crescente o que eleva o custo operacional dos fornos, conforme ressaltado em mesa redonda sobre "Uso de Combustíveis Alternativos em Fornos de Cal" (1). Deste modo, qualquer melhoria no seu desempenho pode resultar em economia substancial para a fábrica.

"Trabalho apresentado no III Congresso Latino-Americano de Celulose e Papel, realizado em São Paulo - Brasil de 21 a 26 de novembro de 1983.

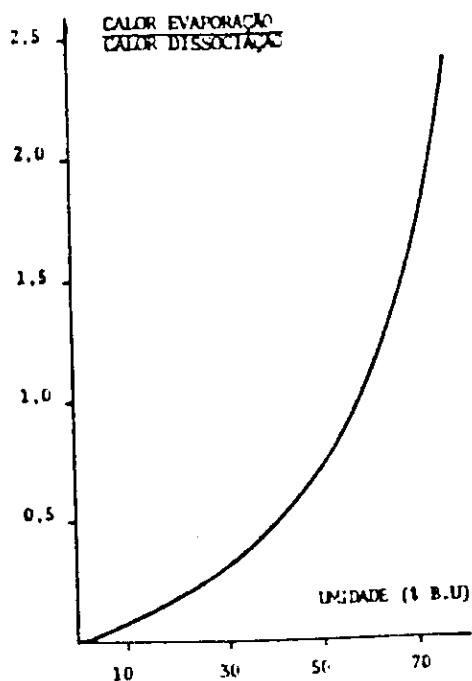
Neste trabalho preliminar procurou-se determinar a influência de algumas variáveis operacionais do forno de cal sobre certas características de processo e produto com vistas a verificar: quais as variáveis que oferecem oportunidades para melhoria no custo operacional e alternativas operacionais e de combustíveis.

Tal estudo foi realizado com o auxílio de modelagem matemática que tem se mostrado uma ferramenta poderosa na análise de processos industriais, pois a partir de dados operacionais e num espaço curto de tempo, permite avaliar o desempenho de equipamentos e operações unitárias sob diversas condições de operação.

## 2. Considerações Gerais

O forno de cal, cuja descrição detalhada é feita por Kramm (2 e 3), tem por finalidade converter carbonato de cálcio em óxido de cálcio por meio de adição de calor a uma determinada temperatura. Naturalmente, espera-se obter uma boa conversão com o menor gasto possível de combustíveis. Procurou-se aqui, salientar alguns itens relativos ao consumo energético do forno.

Secagem - Como os processos de calcinação nas indústrias de celulose são em geral por via úmida, é grande a influência da umidade da lama de cal no consumo de calor. Por exemplo: 1 tonelada de lama com 50% de  $\text{CaCO}_3$  e 50% de água consumiria 1486 MJ para dissociação e 1128 MJ para evaporação; ao passo que com 60% de  $\text{CaCO}_3$  e 40% de água necessitaria respectivamente, de 1784 e 902 MJ. A figura 1 apresenta a variação desta proporção em função da umidade da lama.



A pasta de lama de cal, ao entrar no forno, atravessa uma zona de correntes onde a secagem se dá por aquecimento direto, convectivo, entre gases e sólidos, e por aquecimento indireto entre sólidos, correntes, paredes e gases. A taxa de evaporação depende da temperatura da lama e temperatura de gases, interagindo com o deslocamento na zona de secagem e aquecimento dos sólidos. Por isso, apesar da existência, na literatura, de balanços simplificados, uma melhor estimativa das trocas térmicas e perfil de umidade ao longo do forno pode ser obtida através de modelagem matemática (4 e 5).

Figura 1. Relação calor evaporação/calor dissociação em função do teor de umidade da lama.

Dissociação do carbonato - Na zona de aquecimento, a temperatura aumenta gradativamente, proporcionando a "queima" total de matéria orgânica contida na lama, e provocando uma expansão no retículo cristalino do calcário acompanhada de microfissuras cuja existência auxilia no estágio posterior de calcinação. Segundo Ruch (6), a reação  $\text{CaCO}_3 \xrightarrow{\Delta} \text{CaO} + \text{CO}_2$  requer 2973 kJ a 900°C e 3154 kJ/kgCaO referida a 20°C. Diversos autores verificaram que a ordem desta reação varia entre 0,2 e 1,0 (7 e 8).

Perda de calor pela parede - A troca de calor entre a parede do forno e o meio circundante está em torno de 5 - 10% do calor total. A transferência se deve à radiação e convecção, não considerando as chuvas.

A perda total de calor pela parede pode ser expressa como  $Q_{total} = Q_{rad} + Q_{conv}$ , onde  $Q_{rad} = \int A q_{rad} dA$  e  $Q_{conv} = \int A q_{conv} dA$ . Nota-se aqui que os fluxos de calor,  $q_{rad}$  e  $q_{conv}$ , estão relacionados com a área do forno pois a temperatura varia ao longo deste. Tais fluxos podem ser calculados pelas equações:  $q_{rad} = \tau B \epsilon (T_p - T_a^4)$  e  $q_{conv} = \alpha (T_p - T_a)$ , onde  $T_p$  e  $T_a$  = temperatura da parede e do ar, respectivamente, em  $^{\circ}K$ ;  $\tau B$  = constante de Stefan Boltzmann ( $J/m^2 sK^4$ );  $\epsilon$  = emissividade e  $\alpha$  coef. de transferência de calor ( $J/m^2 sK$ ).

Um tratamento mais detalhado destas expressões e formas de avaliação dos coeficientes podem ser encontrados em Gardeik (9) e Bird (10).

Na figura 2 nota-se que a  $200^{\circ}C$  a radiação a  $\epsilon = 0,9$  passa a ter a mesma importância que a convecção com o vento a 3m/s, e a  $450^{\circ}C$  é aproximadamente três vezes maior. É ressaltada também a diferença entre a radiação às emissividades,  $\epsilon = 0,9$  e  $\epsilon = 0,3$ .

A figura 3 ilustra a importância da espessura da camada de material isolante na perda de calor pela parede. Os valores desta figura não podem ser aplicados diretamente a um forno em funcionamento pois não foram considerados o material refratário e a espessura da carcaça de ferro. Pretendeu-se apenas mostrar que existe uma região onde uma diminuição de espessura do isolante causa uma grande perda de energia e por outro lado, uma região onde o incremento em espessura não apresenta um ganho significativo em conservação de calor.

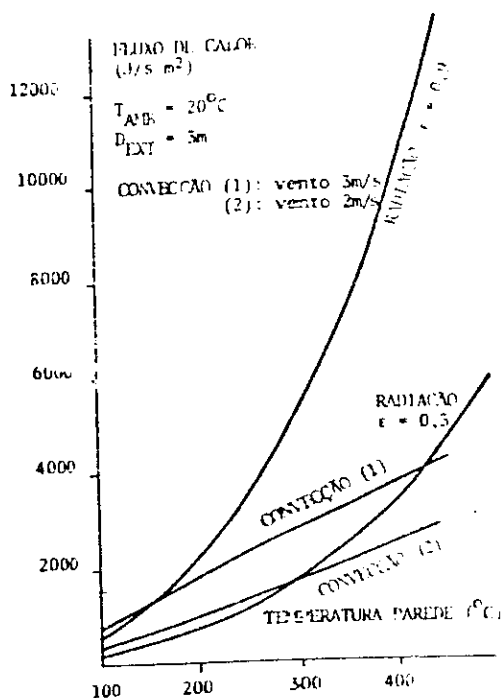


Figura 2. Fluxo de calor através da parede em função da temperatura.

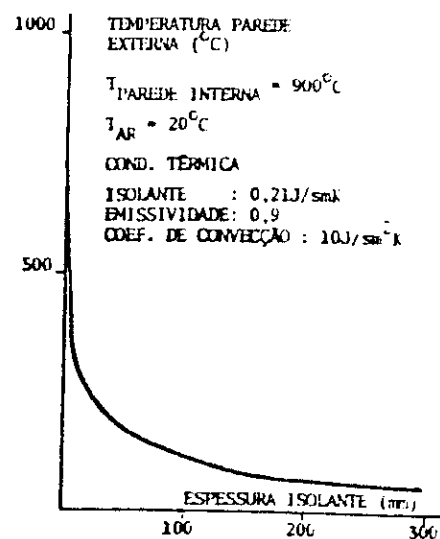


Figura 3. Temperatura da parede externa do forno em função da espessura isolante.

Perda de calor pelos produtos, pó e gases - Os sólidos são considerados todos como  $CaO$ , ao saírem do forno a  $1100^{\circ}C$ , carregam consigo uma entalpia de  $265,5 Kcal/Kg CaO$ , referida a  $20^{\circ}C$ , o que representa 35% de calor em relação ao calor de dissociação. Este calor pode ser recuperado através de troca térmica com o ar secundário de combustível por meio de satélites, ou

No caso de resfriadores satélites, Vogel (11) aponta uma eficiência aproximada de 68%. Convém notar que, do ponto de vista energético, o superaquecimento do produto traz um gasto desnecessário de energia. Perdas de calor associadas ao pó são de dois tipos. Uma delas é a perda direta de cal produzida, pelo transporte e manuseio incorretos. Outra perda de calor seria pelo pó retido na sua maior parte pelo lavador dos gases de exaustão, apresentando um subreciclo interno ao ciclo do cal. A quantidade é estimada em 8 - 12% do produto. A figura 4 apresenta uma análise granulométrica de uma amostra de pó coletada antes do sistema de lavagem dos gases.

A figura 5 quantifica a energia recuperável dos gases de exaustão do forno em função de sua temperatura. No trecho 100 a 200°C a variação é pequena, porém a energia envolvida é apreciável devido a quantidade de gases. Foi assumida condensação total de água, mas nota-se, industrialmente, uma evasão considerável de vapor em vários lavadores devido a falta de desnebulização.

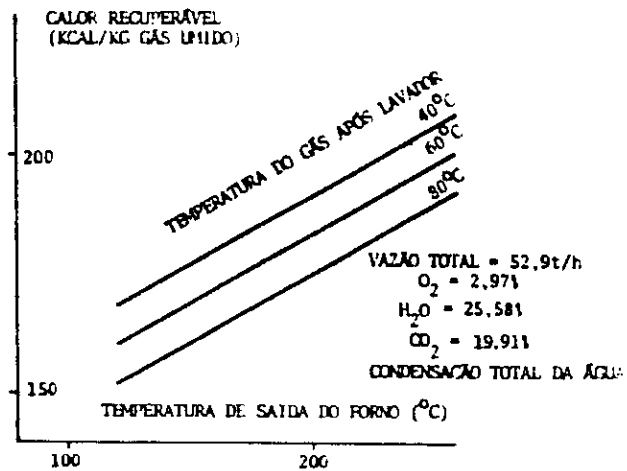
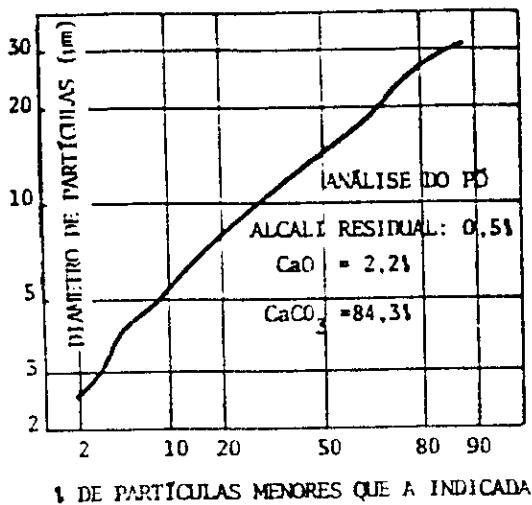


Figura 4. Análise granulométrica de amostra de pó coletada nos gases de exaustão do forno de cal.

Figura 5. Energia recuperável nos gases de exaustão em função de sua temperatura.

Inertes - O reciclo de inertes no forno de cal implica em gastos de energia no forno, no manuseio e em carga morta ao longo de todo o processo com conseqüente diminuição da capacidade e perda de material pela sinterização, principalmente quando ocorre superaquecimento de cal na zona de combustão com temperaturas superiores a 1200 - 1300°C (12).

Apesar de existir fábricas operando com até 25% ou mais de inertes, este efeito não é bem estudado nas indústrias de celulose e portanto, seria importante trabalhos futuros visando sua caracterização e quantificação.

Combustão - Todas as medidas para redução de perdas de calor afetam diretamente o consumo de combustível pois a injeção de calor é igual ao consumo intrínseco do processo de calcinação mais as perdas.

A zona de combustão pode ser considerada quase que igual ao comprimento da chama e portanto, quanto mais longa e afilada a chama, melhor.

Este comprimento depende do diâmetro interno da zona de combustão tipo de queimador, poder calorífico do combustível, taxa de ar primário e secundário, velocidade de saída do queimador, vazão e viscosidade do combustível, velocidade do gás, grau de mistura comb-comb (eficiência de atomização), velocidade de reação, excesso de ar e outros. Ludera (13) apre

sentam equações empíricas que estimam este comprimento.

O excesso de ar não é apenas importante no aumento da vazão de gás. Cada acréscimo de 10% sobre o mínimo de ar requerido implica em decréscimo de 25 a 32°C na temperatura da combustão (13). Isto é agravado pelo fato da transferência de calor nesta região ser predominantemente proporcional à diferença da quarta potência da temperatura, o que significa que uma queda de temperatura nesta faixa implica numa redução, da ordem de 25%, na taxa de transferência de calor (14). Concomitantemente, esta queda do fluxo de calor na zona de combustão implica no aumento de temperatura dos gases de exaustão.

Por outro lado, a má combustão libera  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  e drasticamente fuligem, o que implica em um potencial de calor não liberado. Vale a pena lembrar que, entre vários, os principais fatores requeridos para uma boa combustão são: boa atomização e distribuição de combustível, ângulo apropriado dos quemadores e da entrada de ar. May (15) e Sayles (16) publicaram artigos interessantes sobre o controle da combustão.

Em trabalhos futuros, resultantes de estudo relativo ao Forno de Cal, em execução pelo CTCPI/IPT (17), serão apresentadas e comentadas medidas para redução do consumo energético, baseadas nas características operacionais e de equipamentos destas instalações no Brasil.

### 3 - Modelo Matemático

O modelo matemático empregado foi elaborado por Guimarães (4), em 1980, que aperfeiçoou modelos anteriormente desenvolvidos. Utiliza um sistema de equações diferenciais que regem os perfis de temperatura e concentração das fases de gases e de sólidos, movendo-se em contra-corrente no interior do forno. As equações resultam dos balanços de massa e de energia ao longo do forno de cal.

A solução deste sistema de equações é feita por um programa de computador "KILN", constituído de um programa principal e seis subrotinas. Este programa está implantado em um computador IBM 370/155 e requer um tempo de execução (CPU) da ordem de 4 minutos para realizar o balanço de um forno com 110m de comprimento e adotando intervalo de integração de 0,3m.

Para alimentar o programa são necessários parâmetros que controlam a execução do programa (passo de integração, número limite de iterações, etc) e parâmetros relativos ao processo (dimensão do forno; características dos refratários; vazão, temperatura e composição da lama, ar, combustível e velocidade de rotação do forno).

Como resposta o programa gera uma tabela contendo: dados de entrada, mensagens de execução, geometria do forno mostrando os limites das zonas de secagem, aquecimento e calcinação do calcário, perfil de temperatura e de composição para sólidos e gases, balanço térmico global e caracterização do produto e do gás de exaustão.

O modelo, após uma fase de ajustes dos seus parâmetros pode ser empregado para determinar o desempenho de um forno em operação ou como auxiliar na análise de alternativas operacionais e de combustíveis, tendo sido já aplicado a fornos em indústrias dos Estados Unidos e Brasil. Uma descrição detalhada do modelo referido foi apresentada no XIV Congresso Anual da ABCP (18).

#### 4 - Estudo de Alternativas Operacionais e de Combustíveis

O objetivo do estudo de alternativas foi determinar o efeito da variação de alguns parâmetros sobre as características mais importantes do processo: magnitude das zonas de secagem, de aquecimento e de calcinação; perfil de temperatura e da composição de gases e de sólidos ao longo do forno, composição do produto e dos gases de exaustão, balanço térmico global e índice de desempenho do forno.

Inicialmente, realizou-se a análise do desempenho de um forno de cal (caso de referência) cujas características de equipamento e operação são:

. dimensões e geometria do forno conforme figuras 6 e 7.

$L_1 = 1,83m$	$L_2 = 11,28m$	$L_3 = 76,81m$	$L_t = 85,0m$
$S = 2,25\%$	$D_o = 3,30m$	$D_1 = 3,05m$	$D_2 = 2,97m$
$D_3 = 2,80m$	$Ld_1 = 11,89m$	$Ld_2 = 72,85m$	

. condutividade térmica dos refratários conforme a figura 7 (unidades em  $J/s m^{\circ}C$ )

$$K_1 = \{0,11382 + 0,9375 \times 10^{-5} \times 1,8 (t + 273)\} \times 1,731$$

$$K_2 = \{0,39086 + 0,1833 \times 10^{-3} \times 1,8 (t + 273)\} \times 1,731$$

$$K_3 = \{0,23156 + 0,3125 \times 10^{-3} \times 1,8 (t + 273)\} \times 1,731$$

onde  $t$  = temperatura da parede, em  $^{\circ}C$

. características da lama

Vazão - 27,0 t/h

Temperatura -  $60^{\circ}C$

Calor específico -

$1088,6 J/Kg^{\circ}C$

Composição (%)

$CaCO_3 - 45,53 H_2O - 44,00$

Material inerte - 10,47

. características do ar

Vazão - 34,1 t/h

Excesso - 30%

Temperatura -  $25,3^{\circ}C$

. características do combustível

Tipo - BPF

Vazão - 1,60 t/h

Temperatura -  $134^{\circ}C$

Poder calorífico -

40941 kJ/kg

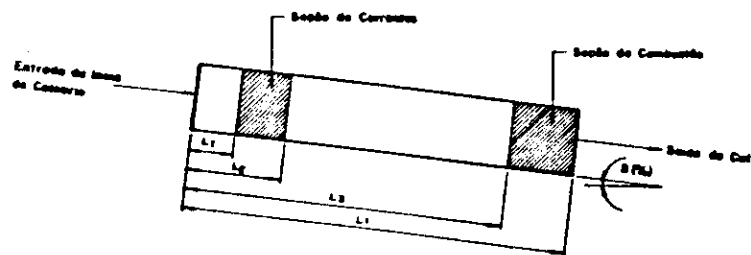


Figura 6. Dimensões e geometria do forno

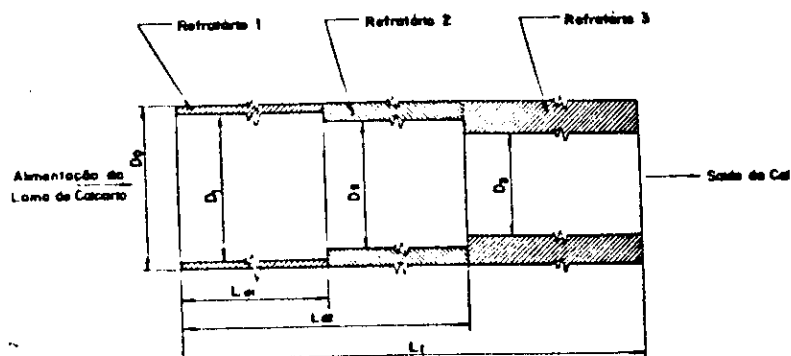


Figura 7. Características do forno com relação ao material refratário.

Foram estudados um total de 13 casos. A tabela 1 mostra as alterações de cada caso em relação ao caso de referência. A tabela 2 resume os principais resultados das simulações. Nas figuras 8 e 9 são apresentados os perfis de temperatura dos gases, dos sólidos, da parede interna e externa do forno e os de concentração ao longo do forno, para o caso de referência. Detalhes adicionais e figuras dos outros casos são encontrados no relatório final da referência 17.

Tabela 1 - Casos alternativos estudados

Caso	Variável estudada	Valor no caso de referência	Varição em relação ao caso de referência
1	Teor seco - 61,6%	56,0%	+ 10,0%
2	Teor seco - 67,2%	56,0%	+ 20,0%
3	Fluxo de lama - 27,7 t/h	27,0 t/h	+ 2,6%
4	Fluxo de lama - 26,3 t/h	27,0 t/h	- 2,6%
5	Excesso de ar - 50%	30%	+ 66,7%
6	Excesso de ar - 10%	30%	- 66,7%
7	Combustível alternativo	Óleo BPF	Gás pobre de madeira
8	Combustível alternativo	Óleo BPF	Gás pobre de carvão
9	Rotação do forno - 1,5rpm	1,14rpm	+ 31,6%
10	Rotação do forno - 2,0rpm	1,14rpm	+ 75,4%
11	Espessura dos refratários	-	5cm a menos na zona da queima e 3cm a menos na zona intermediária.
12	Teor de inertes - 7,3%	10,47%	- 30,3%
13	Teor de inertes - 3,66%	10,47%	- 65,0%

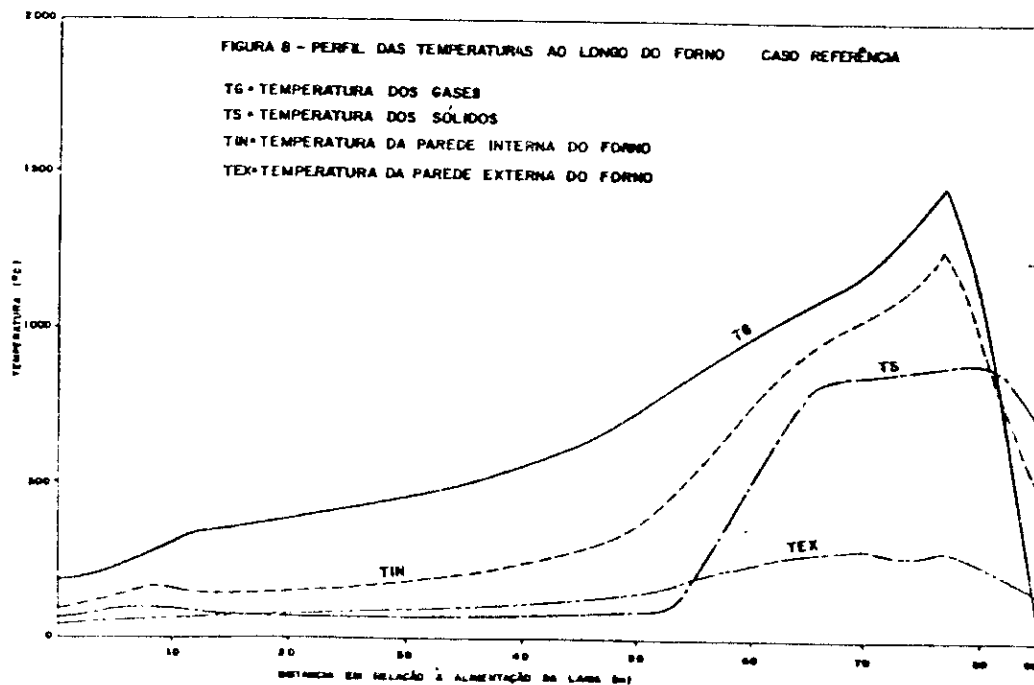
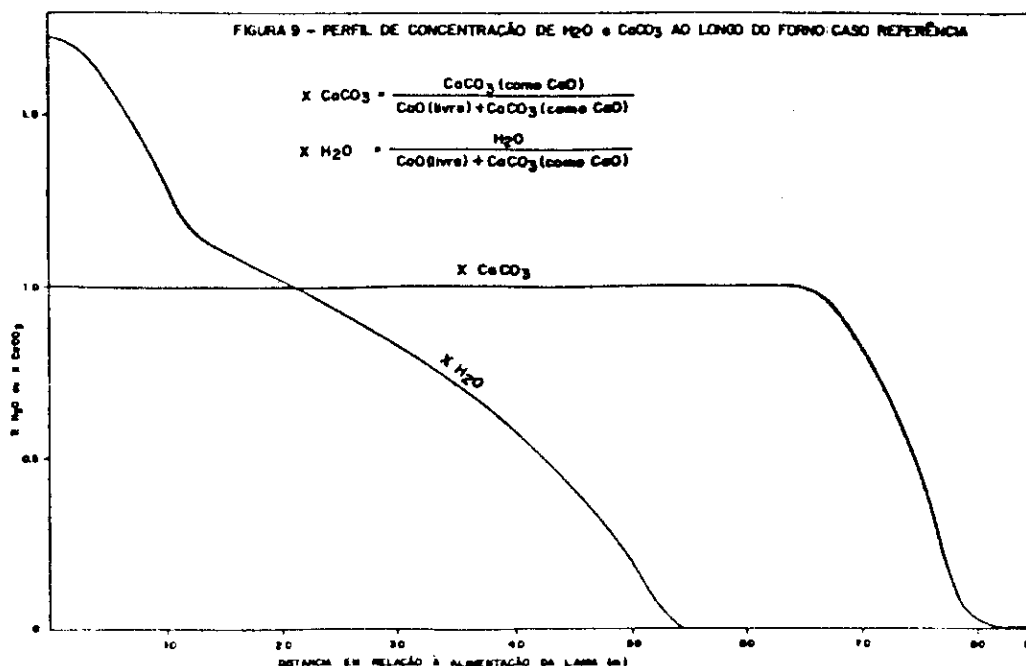




Tabela 2 - Resultados dos casos estudados

PARÂMETROS	CASO													
	REFERÊNCIA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<b>A. Balanço de calor (C J/h)</b>														
• Calor de combustão	65,39	65,39	65,39	65,39	65,39	65,39	65,39	65,39	65,39	65,39	65,39	65,39	65,39	65,39
• Calor sensível pela corrente de gás	- 11,27	- 4,84	11,46	- 11,04	- 11,04	- 15,81	- 9,83	- 11,01	- 11,01	- 10,62	- 9,97	- 11,16	- 10,53	- 9,99
• Calor sensível para corrente de sólidos	11,86	13,57	13,83	12,0	12,34	11,30	14,00	11,87	12,08	11,85	11,97	11,67	12,01	11,33
• Calor sensível (sólido para gás)	12,27	9,56	7,53	12,55	12,10	11,23	13,92	11,40	11,60	12,44	12,67	12,12	11,64	10,73
• Perdas pela parede	5,50	8,83	11,82	5,24	5,96	5,81	5,97	6,43	6,36	5,63	5,78	6,40	6,72	8,64
• Calor para evaporação	26,79	21,26	16,64	27,47	26,12	26,79	26,79	26,79	26,79	26,79	26,79	26,79	25,05	23,31
• Calor para calcinação	20,24	20,41	19,58	19,90	19,90	17,23	20,41	18,73	19,58	19,27	18,11	19,56	20,41	20,41
• Calor não contabilizado (M J/h)	3,60	-	10,0	10,0	10,0	20,0	110,0	-	- 10,0	30,0	40,0	10,0	90,0	60,0
(1J = 0,2389 cal)														
<b>B. Produto calcinado</b>														
• Vazão (t/h)	9,75	9,71	10,3	9,46	9,46	10,55	9,71	10,15	9,93	10,01	10,32	9,93	8,73	7,74
• Temperatura (°C)	702	843	695	776	776	671	900	711	722	701	707	690	798	785
• CaO (Z)	70,0	70,9	64,1	70,9	70,9	55,1	70,9	62,3	66,5	64,9	59,2	66,4	78,9	88,9
• CaCO <sub>3</sub> (Z)	1,1	-	7,8	-	-	18,2	-	9,9	5,0	6,8	13,4	5,2	-	-
• Inertes (Z)	28,9	29,1	28,1	29,1	29,1	26,7	29,1	27,8	28,5	28,3	27,4	28,4	21,1	11,1
<b>C. Cases de Exaustão</b>														
• Vazão (t/h)	52,9	50,5	53,1	52,5	52,5	57,4	47,7	58,5	57,0	52,7	52,4	52,7	52,2	51,5
• Temperatura (°C)	177	196	175	179	179	197	157	213	208	188	200	174	184	198
• O <sub>2</sub> (Z)	2,97	3,11	2,97	3,00	3,00	4,57	1,10	2,30	2,15	2,99	3,00	2,98	3,01	3,06
<b>D. Temperatura máxima do refratário (°C)</b>	1272	1721	1760,4	1262	1321	1175	1671	1171	1305	1286	1303	1266	1432	1709
<b>E. Índice de desempenho (GJ/t CaO)</b>	8,69	8,62	9,00	8,84	8,84	10,21	8,62	9,39	8,99	9,12	9,71	9,00	8,62	8,62
<b>F. Tempo de residência (h)</b>	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	2,58	1,94	3,33	3,40	3,4



### 5. Comentários

A seguir são feitos comentários sobre as modificações mais significativas ocorridas, com vistas a identificar as variáveis que devem ser monitoradas mais rigidamente para aumentar a eficiência operacional e aquelas que oferecem oportunidades para melhorias no custo operacional.

Teor seco da lama ( Casos 1 e 2 ) - foram testados dois valores de teor de sólidos na corrente de alimentação. Em ambos os casos a alimentação tinha o mesmo fluxo de material calcinável e de inertes, mas diferente teor de umidade.

Como era esperado um aumento no teor seco contribuiu para uma calcinação total e elevação do desempenho do forno. Isto realça a importância do sistema de filtração, anterior ao forno, no sentido de manter a alimentação no teor de sólidos o mais alto possível. O fato de não se ter alterado a quantidade de óleo introduzido provocou a elevação da temperatura dos gases de exaustão, da temperatura máxima dos refratários e uma maior perda de calor pela parede. Sugere-se, para as fábricas que não possam instalar monitoria contínua para o teor de umidade da lama, realizar com mais frequência amostragem e análise do seu teor de umidade o que permitirá uma economia de energia através da utilização da proporção adequada de combustível.

Fluxo de lama ( Casos 3 e 4 ) - O fluxo de lama alimentada ao forno é uma variável crítica. Uma elevação pequena (+2,6%) causa uma diminuição de 8,5% no teor de CaO do produto e um aumento na zona de secagem. A diminuição do fluxo, na mesma proporção, eleva a conversão da reação de calcinação em 1,0%. Estes valores mostram que a estabilidade do fluxo de alimentação é importante não só para a economia de energia como também para a qualidade de cal produzida.

Excesso de ar ( Casos 5 e 6 ) - A elevação do excesso de ar de 30 para 50% causa a diminuição do índice de desempenho do forno (8,69 para 10,29 GJ/t CaO) e de teor de CaO no produto (21%), além da perda extra de ener

gia para aquecimento de maior volume de nitrogênio e oxigênio não aproveitados para a reação. No valor inferior de excesso de ar (10%) a conversão de  $\text{CaCO}_3$ , não é alterada, mas como a vazão de combustível não foi variada, há tendência de ocorrer superaquecimento dos refratários na zona de combustão. De uma maneira geral recomenda-se trabalhar com valores mínimos de excesso de ar exigido para cada tipo de combustível e instalação. Para tal, é importante a monitoria da concentração de  $\text{O}_2$  nos gases de saída, se possível continuamente, prática esta pouco vista em nossas fábricas.

Combustível alternativo ( Casos 7 e 8 ) - O emprego de gás pobre de madeira e de carvão com a mesma capacidade energética gerada pelo óleo combustível, no caso de referência, causa uma diminuição na conversão de  $\text{CaCO}_3$ , 11 e 5%, respectivamente, e uma elevação da temperatura dos gases da ordem de  $30^\circ\text{C}$ . Neste estudo o excesso de ar não foi alterado em relação ao caso de referência (30%), embora seja de conhecimento que combustíveis gasosos requerem um excesso menor (10 a 15%). Mesmo assim o volume final de gás sofrerá um aumento da ordem de 3 - 5%, o que poderá causar problemas operacionais caso o sistema de lavagem de gases não comportar tal aumento.

Rotação do forno ( Casos 9 e 10 ) - O aumento da rotação leva à redução do tempo de residência, uma vez que são inversamente proporcionais. Deste modo o material fica menos tempo exposto ao calor, causando uma menor calcinação, aumento na temperatura dos gases de exaustão e na perda pela parede. Além disso, velocidades baixas contribuem para obtenção de uma ação de rolamento apropriada, o que traz uma melhoria nas propriedades da cal (2 e 3).

Espessura dos refratários ( Caso 11 ) - A espessura dos refratários foi reduzida em relação ao caso de referência, com a finalidade de representar o desgaste natural dos mesmos. Em consequência observa-se o aumento de perdas pela parede, a queda do índice de desempenho e uma pequena redução no tempo de residência.

Teor de inertes ( Casos 12 e 13 ) - A redução no teor de inertes foi analisada com o objetivo de salientar a sua importância relativa à economia de energia. A diminuição em 30% representa uma economia de óleo combustível da ordem de 1% e 0,3%, para fornos sem e com satélites, respectivamente. Cabe lembrar que tal redução tem efeitos benéficos em todo o sistema de caustificação.

## 6. Conclusões

O estudo de alternativas dos parâmetros operacionais mostrou que o teor de umidade da lama alimentada é uma variável crítica para o funcionamento do forno e consumo de combustível e deve ser mantido constante e no valor mais baixo possível através da operação adequada no filtro de lama.

Variações no fluxo de lama e elevação no excesso de ar comprometem negativamente o desempenho energético do forno e portanto devem ser evitadas. Para uma certa produção e melhor qualidade de cal produzida a rotação do forno deve ser mantida em níveis baixos.

A operação do forno em faixas adequadas traz consequências imediatas na economia de energia apesar dos efeitos de alterações isoladas serem pequenos.

Embora estes resultados sejam conhecidos qualitativamente, a aplicação de um modelo matemático permite a avaliação quantitativa destas variações. Isto é de grande auxílio na análise técnica e econômica de parâmetros operacionais, particularmente no estudo de combustíveis alternativos.

## 7. Bibliografia

- 1 - "Uso de Combustíveis Alternativos em Fornos de Cal" - Mesa Redonda - Maio/1983 - CTCP/IPT - São Paulo.
- 2 - Kramm, D.J. - Selection and Use of Rotary Lime Kiln and its Auxiliares Part I, II - Paper Trade Journal - July 3; August 21 - 1972.
- 3 - Kramm, D.J. - Up date on Lime Sludge Kilns in the Pulp Mill Environment - Part I, II - Paper Trade Journal - May, 15; May 30 - 1979.
- 4 - Guimarães, J.C. - Modeling, Simulation and Control of Energy Intensive processes in the Pulp and Paper Industry - Tese de Doutorado Universidade de Idaho - USA - 1980.
- 5 - Bailey, R.B. e Willison, T.R. - Rotary Lime Kiln Simulation: Design Technique for Improving Efficiency - TAPPI Engineering Conference Proceedings - 1978.
- 6 - Ruch, H. - The Theoretical Limits of Heat Consumption in Lime Burning Considered on the Basis of the Physico - Chemical Relationships - Zement-Kalk-Gips - nº 1 - 1981.
- 7 - Freeman, E.S. e Carrol, B. - The Termogravimetric Evaluation of the Kinetics of the Decomposition of Calcium Oxalate Monohydrate - J. Phys. Chem., 62 - 1958.
- 8 - Carrol, B. e Manche, E.P. - Kinetic Analysis of Chemical Reactions for Non - Isothermal Procedures - Thermochim - Acta, 3 - 1972.
- 9 - Gardeik, H.O. et alii - Calculation of Heat Loss Through the Walls of Rotary Kilns and Mills - Part I: Fundamentals - Zement-Kalk-Gips nº 2 - 1980.
- 10 - Bird et alii - Transport Phenomena - John Willey & Sons - 1960.
- 11 - Vogel, R. e Winter, B. - The Assesment of Rotary Coolers from the Thermal Point of View - Zement-Kalk-Gips - nº 11 - 1980.
- 12 - Ulerich et alii - The influence of Limestone Calcination on the Utilization of the Sulphur - Sorbent in Atmospheric Pressure Fluid Bed Combustors - EPRI FP-426 - ( Research Project 720-1) Final Report August - 1977.
- 13 - Ludera, L. - Burning Zone Lengths and Burner Nozzle Diameters in Rotary Kilns - Zement-Kalk-Gips - nº 11 - 1980,
- 14 - Lane, S.C. - Energy Reduction in a New Lime Kiln and Reausticizing Plant - TAPPI Eng. Conf. November - 1979
- 15 - May, D.L. - Cutting Boiler Fuel Costs with Combustion Controls - Chem. Eng. 22 - 1975.

- 16 - Sayles D. e Noakes, B. - Air Fuel Ratio Calculation Gives Easy Energy Savinys - Process Eng. August - 1977.
- 17 - "Influência de algumas características operacionais do sistema de recuperação de fábricas de celulose no consumo de óleo combustível do forno de cal" - Contrato MIC/STI nº 012/82 - CTCP/IPT - São Paulo.
- 18 - Gimarães, J.C - Modelo Melhorado do Forno de Cal Analisa Desempenho de combustíveis Alternativos - XIV Congresso Anual da ABCP - Vol I - Novembro/1981 - São Paulo.

#### 8. Agradecimento

Os autores agradecem o apoio financeiro da Secretaria de Tecnologia Industrial do Ministério da Indústria e do Comércio que possibilitou a realização deste trabalho.