

artigo técnico

influência de alguns parâmetros de processo no consumo de energia

ALBERTO FERREIRA LIMA
 ANTONIO ÁLVARO DE SOUZA CAMARGO
 JOSÉ MANGOLINI NEVES
 LUIZ MOTOHISSA YOJO
 ROSELY MARIA VIEGAS ASSUMPTÃO
 IPT/CTCP

APRESENTAÇÃO

A redução do consumo de energia, mais especificamente daquela proveniente do petróleo e seus derivados, tem levado ao estudo de novas técnicas ou aprimoramento das já existentes.

Neste trabalho, são enfocadas algumas das

principais áreas consumidoras de energia e quais são as possibilidades que existem de se diminuir este consumo: áreas relacionadas com a recuperação de reagentes químicos, caldeira de recuperação e forno de cal.

I. INTRODUÇÃO

A redução do consumo de energia, particularmente aquela gerada através de derivados do petróleo, tem sido uma preocupação constante nos vários setores industriais, entre eles o de celulose e papel.

O grau de economia que pode ser obtido em cada fábrica depende de inúmeros fatores e um número bastante grande de artigos sobre possibilidades e sugestões para redução do consumo de energia tem sido publicado nos últimos anos (1 e 4).

No caso do processo kraft clássico, algumas áreas têm sido enfocadas com maior frequência pois são áreas que

apresentam maior consumo e onde existem possibilidades de economia. No presente trabalho, procurou-se avaliar algumas dessas áreas e verificar de que forma variações em certos parâmetros de processo podem refletir na economia de combustível. Essas informações associadas a informações de custo poderão auxiliar gerentes industriais na tomada de decisões e no julgamento de alternativas.

Trata-se de um trabalho preliminar que de forma alguma pretende esgotar o assunto.

As áreas analisadas foram aquelas relacionadas com a recuperação de reagentes químicos, mais particularmente eva-

poração, caldeira de recuperação e forno de cal.

Como ferramenta de cálculo foi utilizado um programa de simulação de balanços material e energético, GEMS, o qual foi desenvolvido pelo Dr. L. Edwards da Universidade de Idaho, USA (5) e recentemente adquirido pelo CTCP-IPT.

II. METODOLOGIA

II.1 Evaporação e Caldeira de Recuperação

Foi considerado um sistema de evaporação em 5 estágios — com o licor fraco sendo alirrenado do terceiro corpo e o licor concentrado sendo retirado do

segundo corpo. Esse sistema foi simulado em detalhes com as sub-rotinas do programa GEMS. Foram utilizados 31 blocos e 61 correntes para simulação.

A título de exemplo da forma de utilização das sub-rotinas do sistema GEMS tem-se na figura 1 o esquema clássico de dois efeitos de evaporação e na figura 2 a representação desse esquema com as sub-rotinas.

No sistema considerado os vapores de flash dos condensados dos corpos 2, 3 e 4 eram utilizados para aquecer o licor negro que ia do último para o primeiro corpo. Nesse caso foram introduzidas duas sub-rotinas conforme indicado na figura 3.

O evaporador de contato direto e a caldeira de recuperação foram simulados através das sub-rotinas indicadas na figura 4. Os parâmetros fornecidos a cada sub-rotina foram:

LTV — corpo evaporador indireto: perdas de calor, área de transferência de calor, temperatura do vapor do cabeçote. A sub-rotina pressupõe que não há perdas por radiação e nem subesfriamento do condensado.

FLASH — pressão de flash: Pressupõe que o processo ocorre de forma isoentalpica.

STMIX — misturador de vapor: Número de correntes a serem misturadas. Pressupõe que não há perda de calor.

HEATX — aquecedor: Salto térmico (ΔT); ΔP do lado do vapor; ΔP do lado do líquido. Pressupõe condições adiabáticas e que não há subesfriamento do condensado.

MIXER — misturador de condensados: Número de correntes a serem misturadas.

GREC — evaporador de contato direto: São fornecidas as eficiências de remoção dos vários componentes pela corrente de gases quentes.

KFURN — caldeira de recuperação: Excesso de ar; teor de cloretos nos gases da chaminé, "dregs" no fundido; relação de redução de sulfato a sulfeto; temperatura do fundido, temperatura do gás após o economizador. Pressupõe algumas condições tais como: ar entrando a 25°C e seco; não há geração de vapor, etc.

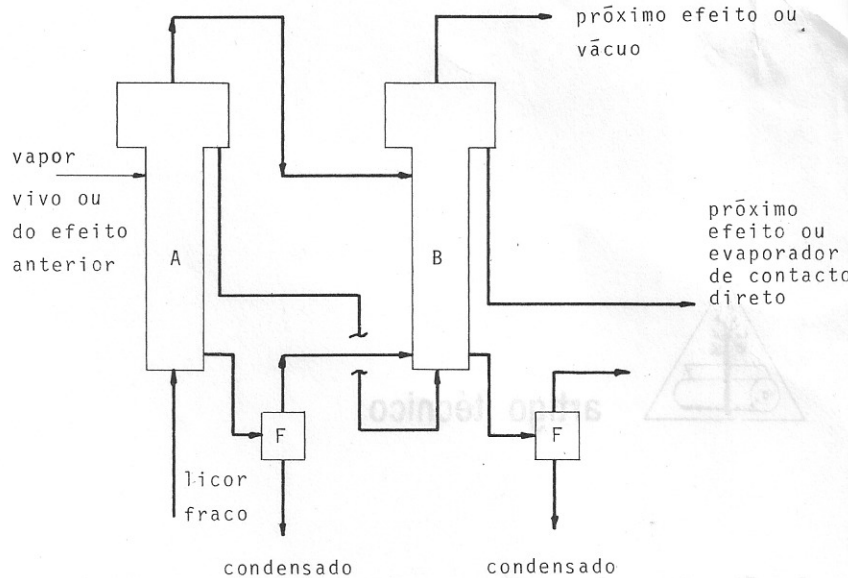


Figura 1. Esquema de dois efeitos de evaporação.

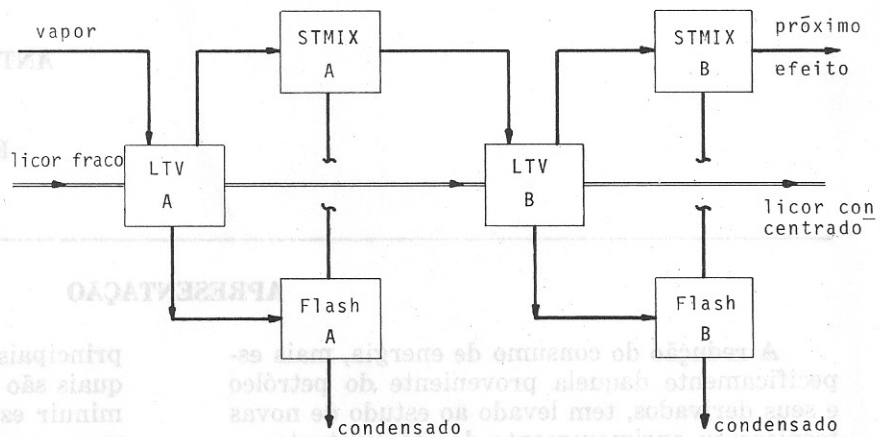


Figura 2. Diagrama de blocos utilizando subrotinas do programa GEMS para simular esquema de dois efeitos de evaporação.

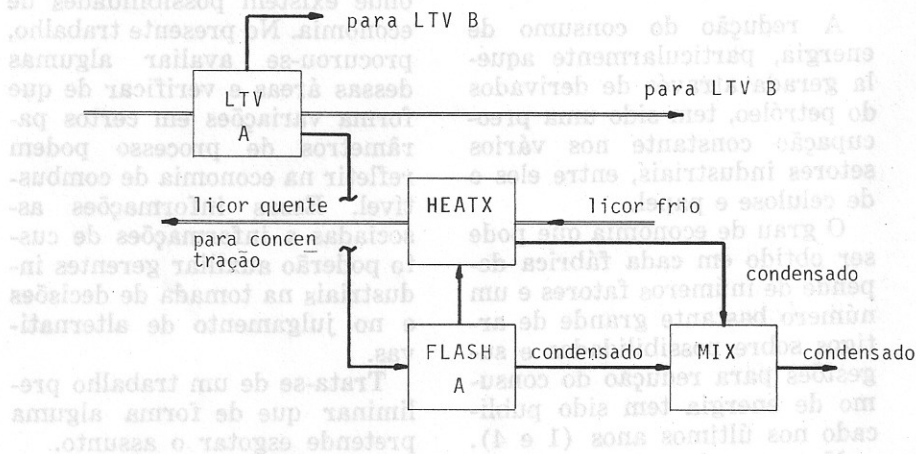


Figura 3. Diagrama de blocos para efeitos de evaporação usando vapor de flash para aquecer o licor proveniente de outros efeitos.

Os parâmetros selecionados foram: teor de sólidos no licor negro alimentado; temperatura do licor negro alimentado; vazão de vapor vivo; produção de calor pela caldeira de recuperação.

Embora seja conhecido que quanto maior o teor de sólidos e a temperatura na entrada dos evaporadores menor o consumo de vapor, o objetivo deste trabalho foi quantificar esses valores através de um balanço material e energético detalhado e considerando as possíveis interações entre esses diferentes parâmetros.

Foi selecionado um caso base a partir do qual foi acertado o programa de simulação e em seguida simuladas várias alternativas:

O caso base foi:

- . concentração do licor fraco: 17% sólidos
- . vazão mássica do licor fraco: 133 t/h
- . temperatura licor fraco: 76°C
- . concentração do licor forte na saída dos evaporadores de múltiplo efeito: 40%
- . temperatura do licor forte: 105°C

As faixas de variações dos parâmetros selecionados foram:

- . concentração do licor fraco: 15, 16, 17 e 18%
- . concentração do licor forte: de 38 a 50% aproximadamente
- . temperatura do licor fraco: 76, 78, 80, 83 e 86°C
- . temperatura do licor forte: 105°C (constante)

No caso da variação no teor de sólidos do licor fraco alimentado foi considerado que a vazão mássica de sólidos nos evaporadores era constante.

II.2 Lavagem da pasta crua

Tendo em vista que o aumento da concentração de sólidos do licor negro fraco na saída dos lavadores implica numa maior perda de sódio com a pasta lavada e num aumento do consumo de cloro no branqueamento, quantificou-se essa per-

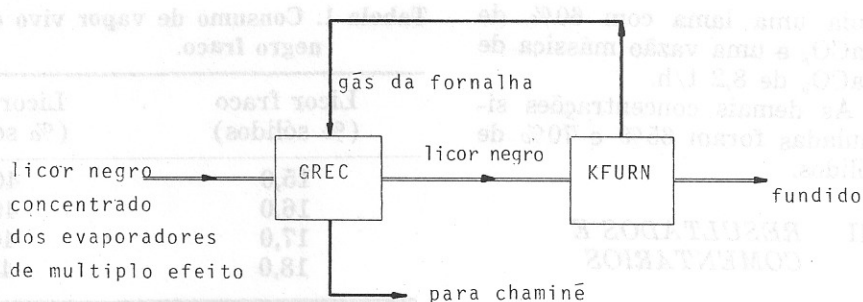


Figura 4. Diagrama de blocos utilizando subrotinas do sistema GEMS para simular o evaporador de contacto direto e a caldeira de recuperação.

da para diferentes fatores de eficiência nos lavadores. Embora matematicamente complexo, o fator de eficiência pode ser interpretado como sendo o número de operações de mistura completa de fluxo que colocadas em série dão o mesmo resultado que o estágio de lavagem considerado (6).

O sistema de lavadores considerado constitui-se de três filtros rotativos em série e dois filtros finais em paralelo. A lavagem é efetuada em contracorrente.

Para se conseguir diferentes concentrações de sólidos no licor negro fraco saindo dos lavadores foram admitidas diferentes vazões de água fresca para cada nível considerado do fator de eficiência.

As faixas de variações dos parâmetros de lavagem foram:

- . fator de eficiência: 1,0; 1,5; 3,0
- . vazão de água fresca: 200, 220, 240, 260 m³/h
- . vazão mássica de pasta crua: 19,6 t/h.

II.3 Forno de Cal

O forno de cal é também um ponto onde há um razoável consumo de combustível. No "Manual de Conservação de Energia" elaborado por técnicos do IPT, na parte referente a forno de cal um enfoque maior foi dado na perda de energia através da poeira (1). Nesse estudo a lama de cal alimentada ao forno apresentava uma concentração de 61% sólidos e verificou-se que a evaporação da água contida nessa lama consu-

mia aproximadamente 35% do total de entrada de energia. Foi sugerido então a colocação de secador tipo flash para pré-secagem da lama, secador este que utilizaria os gases quentes do próprio forno.

Nesta etapa do trabalho procurou-se avaliar o que poderá significar em termos de redução do consumo de óleo a pré-secagem da lama de cal.

Embora esses cálculos possam ser realizados manualmente utilizou-se a sub-rotina KILN do sistema GEMS que calcula o consumo de combustível. Os parâmetros fornecidos foram: % de enxofre no combustível; % de carbono no combustível; poder calorífico; excesso de ar; temperatura de saída da cal; temperatura de saída dos gases; fração do enxofre total que acompanha os gases; excesso de cal na caustificação; fração de cal disponível. Pressupõe que não há perda por radiação e que o ar entra seco a 25°C.

Como caso base foi conside-

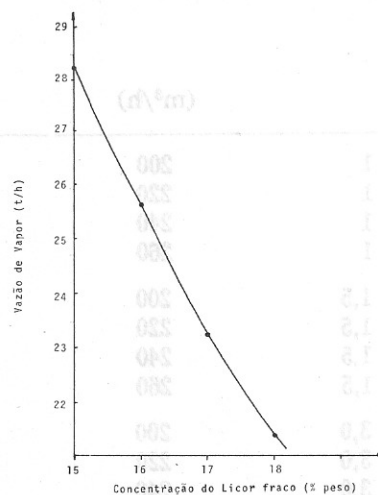


Figura 5. Consumo de vapor vivo X concentração do licor fraco.

rada uma lama com 60% de CaCO_2 e uma vazão mássica de CaCO_3 de 8,2 t/h.

As demais concentrações simuladas foram 65% e 70% de sólidos.

III. RESULTADOS E COMENTÁRIOS

Analisando os resultados apresentados na tabela 1 e figura 5 nota-se que uma redução de 18% para 15% na concentração do licor negro fraco leva a um aumento de 29,8% no consumo de vapor vivo na evaporação, para que seja mantida a mesma concentração de sólidos do licor negro forte. Esse adicional equivale em termos energéticos a 325 kg/h de óleo, ou seja, 16,6 kg de óleo equivalente por tonelada de pasta seca.

Essa redução da concentração de sólidos, no entanto, reduz a perda de sódio. A partir de dados retirados da figura 6 pode-se verificar que para um fator de eficiência dos filtros lavadores de 1,5 ao se passar de 18% para 16% de sólidos no licor fraco diminui-se a perda de sódio de 27,5 kg Na_2SO_4 /t pasta seca para 12 kg Na_2SO_4 /t pasta seca. Isso representa 15,5 kg Na_2SO_4 /t pasta seca ou o

Tabela 1. Consumo de vapor vivo em função da concentração do licor negro fraco.

Licor fraco (% sólidos)	Licor forte (% sólidos)	Vapor vivo (t/h)
15,0	40,0	28,3
16,0	40,0	25,8
17,0	40,0	23,8
18,0	40,0	21,8

Mantidos constantes

- temperatura de entrada do licor fraco
- condições de evaporação nos diversos efeitos
- massa de sólidos para evaporadores

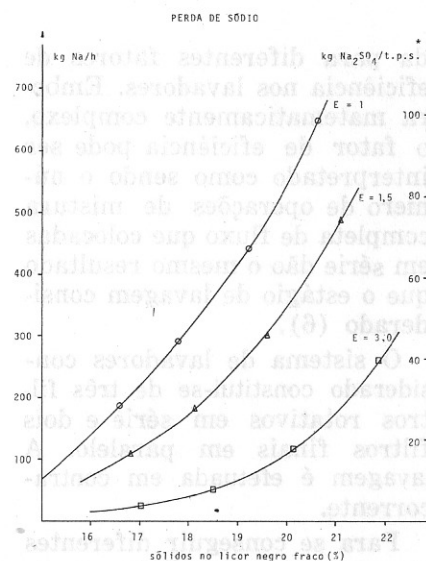


Figura 6. Perda de sódio com a pasta x concentração de sólidos do licor negro para diferentes fatores de eficiência dos filtros lavadores.

* t.p.s. = tonelada de pasta seca

equivalente a cerca de 5,2 kg Na/t pasta seca a ser repostado pelo "make up". Cálculo semelhante para um fator de eficiência 1,0 leva a uma quantidade de sulfato de sódio de "make up" igual a 27,5 kg/t pasta seca.

A tabela 2 contém os valores da perda de sódio com a pasta crua lavada, o teor de sólidos do licor negro fraco e o cloro adicional requerido no branqueamento para neutralização da soda, para diferentes valores de fator de eficiência dos filtros e várias vazões de água fresca introduzidas no sistema de lavagem.

Tabela 2. Perda de sódio com a pasta crua lavada para diferentes valores de fator de eficiência dos filtros e diferentes valores de vazão de água fresca.

Fator de eficiência	Vazão de água fresca (m^3/h)	Sólidos do licor negro fraco (%)	Quantidade de sólidos perdidos com a pasta (kg/h)	Perdas de sódio com a Pasta		Cloro adicional (kg Cl_2 /t pasta seca)
				(kg Na/h)	(kg Na_2SO_4 /t pasta seca)	
1	200	20,6	3732	650	102,5	51,2
1	220	19,2	2460	440	69,1	34,6
1	240	17,9	1630	286	45,1	22,5
1	260	16,6	1090	193	30,2	15,1
1,5	200	21,1	2800	490	77,2	38,6
1,5	220	19,6	1725	300	47,2	23,6
1,5	240	18,2	1038	181	28,4	14,2
1,5	260	16,8	616	110	17,3	8,6
3,0	200	21,9	1490	262	41,4	20,7
3,0	220	20,2	650	120	18,8	9,4
3,0	240	18,6	281	50	7,7	3,9
3,0	260	17,0	123	25	4,0	2,0

A figura 7 ilustra a perda de sódio com a pasta em função do consumo de água fresca para diferentes fatores de eficiência.

Em fábricas de celulose branqueada uma conseqüência da perda de sódio com a pasta na lavagem será o maior consumo de cloro na etapa de branqueamento.

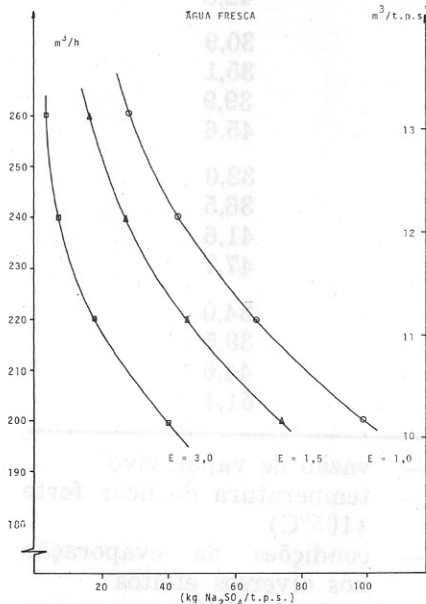


Figura 7. Perda de sódio com a pasta em função do consumo de água fresca de lavagem para diferentes fatores de eficiência nos filtros lavadores.

* t.p.s. = tonelada de pasta seca

Segundo os dados da tabela 2 para uma mesma vazão de água fresca na lavagem e fatores de eficiência de 1,0 e 3,0, consegue-se uma redução no consumo de cloro para neutralização da soda na faixa de 59,6 a 86,8% devido a menor perda de sódio com a pasta.

Conforme pode ser observado pela figura 8 e tabela 3, sem aumentar o consumo de vapor vivo na evaporação e com um acréscimo de 10°C na temperatura de alimentação do licor negro fraco, pode-se elevar a concentração do licor forte de 39,5% para 44,5%. A quantidade de calor necessária para esse aumento de temperatura é da ordem de 1100 Mcal/h, ou seja, 5,5 kg de óleo equivalente/tonelada de pasta seca. Se considerarmos os dados da tabela 4 verificamos que haverá, respectivamente, um ganho de 3395 Mcal/h no calor gerado pela caldeira de recuperação ou o equivalente a 16,9 kg óleo/tonelada de pasta seca. Uma alterna-

Tabela 3. Concentração do licor forte em função da temperatura do licor fraco.

Licor fraco		Licor forte	
Temperatura (°C)	Teor de sólidos (%)	Temperatura (°C)	Teor de sólidos (%)
76	17,0	105	39,8
78	17,0	105	40,6
80	17,0	105	41,4
83	17,0	105	42,8
86	17,0	105	44,8

Mantidos constantes

- vazão de vapor vivo
- condições de evaporação nos diversos efeitos
- vazão do licor fraco

Tabela 4. Produção de calor pela caldeira de recuperação em função da concentração do licor forte na saída dos evaporadores de múltiplo efeito.

Licor forte		Calor gerado na caldeira de recuperação (kcal x 10 ³ /h)
Teor de sólidos (%)	Temperatura (°C)	
34,0	105	49.328
39,5	105	54.434
44,6	105	57.829
51,4	105	61.062

tiva para aquecer o licor, por exemplo, poderá ser através do reaproveitamento de vapor de flash do digestor, caso haja disponibilidade.

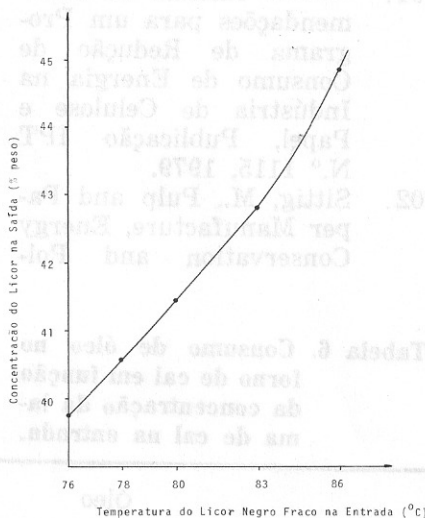


Figura 8. Influência da temperatura do licor fraco na concentração de sólidos do licor negro.

Ainda pela tabela 4 observa-se que um aumento no teor de sólidos do licor forte de 34,0% para 51,4% significa um ganho de calor na caldeira de re-

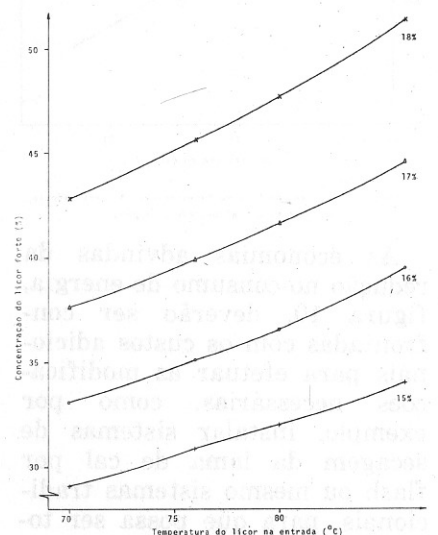


Figura 9. Concentração do licor forte em função da temperatura e teor de sólidos do licor fraco (vazão de vapor vivo constante)

cuperação da ordem de 11.734 Mcal/h ou o equivalente a 58,7 kg óleo/tonelada seca de pasta celulósica.

A tabela 5 e a figura 9 apresentam a variação de concentração do licor forte (29,2 a 51,4%) em função da temperatura de alimentação do licor fraco (70 a 86°C) e de seu teor de sólidos (15 a 18%), mantem-

do-se a vazão de vapor vivo constante.

Com uma temperatura de entrada do licor fraco de 76°C e dependendo do seu teor de sólidos poder-se-á obter concentrações do licor forte de 30,9% até 45,6% (tabela 5). Aumentando-se a temperatura de alimentação para 80°C consegue-se uma elevação relativa do teor de sólidos do licor forte da ordem de 3,6 a 4,6% respectivamente para as concentrações de licor fraco de 15 e 18%.

No caso do forno de cal (tabela 6), passando-se de um teor de sólidos na alimentação de 60% para 70% reduz-se em 16,4% o consumo de óleo combustível, ou seja, em 32 kg óleo/t de CaO produzido.

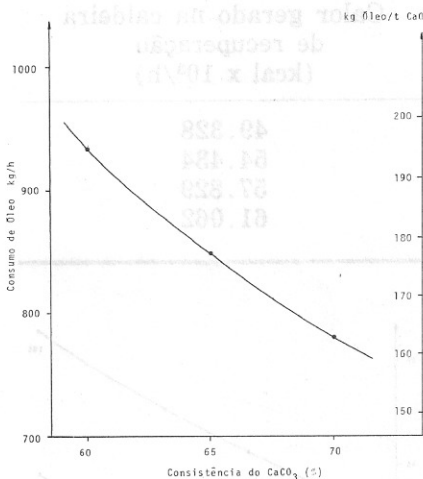


Figura 10. Consumo de Óleo no forno de cal X consistência da lama de cal alimentada ao forno.

As economias advindas da redução no consumo de energia, figura 10, deverão ser confrontadas com os custos adicionais para efetuar as modificações necessárias, como por exemplo, instalar sistemas de secagem da lama de cal por flash ou mesmo sistemas tradicionais, para que possa ser tomada a decisão mais conveniente para a indústria.

Tabela 5. Concentração do licor forte em função da temperatura e do teor de sólidos do licor fraco mantendo constante a vazão de vapor vivo.

Temperatura (°C)	Licor fraco		Licor forte Teor de sólidos (%)
	Temperatura (°C)	Teor de sólidos (%)	
70		15	29,2
		16	33,1
		17	37,6
		18	42,8
76		15	30,9
		16	35,1
		17	39,9
		18	45,6
80		15	32,0
		16	36,5
		17	41,6
		18	47,7
86		15	34,0
		16	39,5
		17	44,6
		18	51,4

Mantidos constantes

- vazão de vapor vivo
- temperatura do licor forte (105°C)
- condições de evaporação nos diversos efeitos
- vazão de sólidos nos evaporadores

IV. BIBLIOGRAFIA

01. — Manual de Recomendações para um Programa de Redução de Consumo de Energia na Indústria de Celulose e Papel, Publicação IPT N.º 1115, 1979.
02. Sittig, M., Pulp and Paper Manufacture, Energy Conservation and Pollution Prevention, Noyes Data Corporation, USA, 1977.
03. Kojo, M., Southern Pulp and Paper Manufacture, July, 1979.
04. Jagannath, S., Pulp and Paper, vol. 53, 4, 1979.
05. Edwards, L., Baldus, R., General Energy and Material Balance Systems, Idaho Research Foundation, Inc.
06. Norden, H.V. et alii, Pulp and Paper Magazine of Canada, vol. 74, 10, October, 1973.

Tabela 6. Consumo de óleo no forno de cal em função da concentração da lama de cal na entrada.

Lama Teor de sólidos (CaCO ₃) (%)	Vazão (t/h)	Óleo (kg/h)	CaO (t/h)	Óleo (kg/t CaO)
60	8,2	934	4,8	195
65	8,2	849	4,8	177
70	8,2	781	4,8	163