

Otimização de sistemas de evaporação através da simulação de evaporadores de múltiplo efeito

MFN -0539

N CHAMADA:

TITULO: Otimização de sistemas de evaporação através da simulação de evaporadores de múltiplo efeito

AUTOR(ES): LEITES, J.M.M.PAIVA, M.A.S.

EDICAO:

IDIOMA: português

ASSUNTO:

TIPO: Congresso

EVENTO: Congresso Anual da ABCP, 19

PROMOTOR: ABTCP

CIDADE: São Paulo

DATA: 24-28.11.1986

IMPRESSA: Sao Paulo, 1986, ABTCP

PAG/VOLUME: p.277-292,

FONTE: Congresso Anual da ABCP, 19, 1986, São Paulo, p.277-292

AUTOR ENTIDADE:

DESCRIPTOR:

RESUMO: Os evaporadores de múltiplo efeito (EME) são equipamentos largamente utilizados para concentração de soluções na indústria de processos químicos. Particularmente na indústria de papel e celulose, processo Kraft, o EME é utilizado na concentração de licor negro, constituindo uma operação unitária de vital importância no processo produtivo, sendo ainda responsável por uma parcela significativa do consumo energético da unidade industrial. Dificuldades no controle e otimização operacional dos EME e na forma de decisões para a implantação de medidas de racionalização energética tem sido frequentemente detectadas entre os usuários desse tipo de equipamento. Entre outros motivos, isto se deve ao fato dos EME serem constituídos por vários corpos e incluírem periféricos como ejetores, condensadores, trocadores de calor, tanques de evaporação e outros, tornando razoavelmente complexa a execução dos balanços materiais e de energia

OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE EVAPORAÇÃO ATRAVÉS DA SIMULAÇÃO DE EVAPORADORES DE MÚLTIPLO EFEITO

José Manuel Martins Leites
Marco Antonio Soares de Paiva

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
S.A. - IPT

1. INTRODUÇÃO

Os evaporadores de múltiplo efeito (EME) são equipamentos largamente utilizados para concentração de soluções na indústria de processos químicos. Particularmente na indústria de papel e celulose, processo Kraft, o EME é utilizado na concentração de licor negro, constituindo uma operação unitária de vital importância no processo produtivo, sendo ainda responsável por uma parcela significativa do consumo energético da unidade industrial.

Dificuldades no controle e otimização operacional dos EME e na tomada de decisões para a implantação de medidas de racionalização energética tem sido frequentemente detectadas entre os usuários desse tipo de equipamento. Entre outros motivos, isto se deve ao fato dos EME serem constituídos por vários corpos e incluírem periféricos como ejetores, condensadores, trocadores de calor, tanques de evaporação e outros, tornando razoavelmente complexa a execução dos balanços materiais e de energia.

Trabalho apresentado no 19º Congresso Anual de Celulose e Papel, Semana do Papel, da ABCP, realizado em São Paulo - SP - Brasil, de 24 a 28 de novembro de 1986.

Tais balanços podem permitir ao técnico:

- o acompanhamento, o controle e a otimização do funcionamento do EME;
- o estudo da resposta do sistema diante da variação de parâmetros operacionais;
- o estudo de possíveis medidas de racionalização energética ou outras modificações, visando, por exemplo, o aumento da capacidade de sistemas já instalados.

Com esses objetivos foi desenvolvido um programa de microcomputador que permite a simulação matemática da operação de um EME, reduzindo drasticamente o tempo dispendido para a avaliação desse equipamento.

2. A ANÁLISE DOS EME ATRAVÉS DA SIMULAÇÃO MATEMÁTICA

Para os técnicos da indústria, talvez a maior utilidade de uma simulação matemática resida na possibilidade de avaliação das condições de operação do EME a partir de uns poucos parâmetros de entrada. Nesse caso, normalmente se dispõe das áreas de troca dos corpos dos evaporadores, das concentrações de entrada e saída da solução sendo concentrada, da vazão inicial de solução, das condições de pressão e temperatura nas cabeças dos efeitos, e a simulação matemática permite estabelecer o valor do coeficiente global de troca térmica (U) em cada efeito.

A simulação pode ser efetuada periodicamente, e os resultados dão uma perspectiva da taxa de aumento das incrustações em cada corpo. Dessa forma, a programação da frequência das paradas para limpeza pode ser otimizada, podendo-se prever com mais segurança o momento mais adequado para a execução dessa operação e o(s) corpo(s) onde a incrustação se dá com maior intensidade. Também o estabelecimento de uma relação de causa e efeito entre as incrustações e alguns parâmetros de processo ou medidas corretivas pode resultar facilitado.

Uma outra finalidade que a simulação matemática pode cumprir é a previsão do comportamento do EME face a algumas alterações que objetivem a racionalização energética ou o aumento da capacidade do sistema. Algumas das medidas possi

veis para otimização dos EME são comentadas no item seguinte.

3. POTENCIALIDADES DE OTIMIZAÇÃO DOS EME

A otimização de um EME visa principalmente a obtenção da máxima evaporação de água com o mínimo consumo energético, e as medidas possíveis para a consecução de tal objetivo podem implicar a instalação de periféricos (como tanques de "flash", ejetores, trocadores de calor, etc), modificações na configuração do sistema (como aumento do número de efeitos e alteração das formas de alimentação), ou mesmo outras medidas.

A seguir são feitos comentários sucintos a respeito de algumas dessas medidas.

3.1. Aumento do Número de Efeitos

Um sistema de evaporação de múltiplo efeito é constituído de uma série de corpos de evaporação simples interligados, de modo que o vapor liberado em cada um deles (a menos do último) é o agente de aquecimento do seguinte. Considerando uma situação ideal, na qual as perdas para o ambiente fossem desprezíveis, as diferenças nas entalpias de vaporização do vapor insignificantes para as faixas de pressões de trabalho, os calores de solução nulos e não houvesse efeito de "flasheamento", nem preaquecimento da solução a ser concentrada, ter-se-ia que a condensação de 1 kg de vapor provocaria a vaporização de 1 kg de água solvente da solução. Se o evaporador considerado fosse o primeiro efeito de um sistema múltiplo, repetindo o raciocínio anterior, 1 kg de vapor liberado nesse primeiro efeito, ao ser aproveitado como agente de aquecimento no segundo, provocaria a vaporização de 1 kg de água neste último. Estendendo o processo idealizado até o último efeito chega-se a conclusão que, num evaporador de N efeitos, 1 kg de vapor fornecido poderia provocar a vaporização de N kg de água.

Embora na prática a situação considerada nunca aconteça, o exemplo serve para visualizar a redução de consumo de vapor "vivo" que o aumento do número de efeitos pode proporcionar num sistema de evaporação. Deve-se contudo ressaltar

que para as mesmas condições de operação e construtivas, o aumento do número de efeito leva a uma diminuição da capacidade do sistema, cabendo à análise econômica a determinação do número ótimo de corpos.

3.2. Otimização das Formas de Alimentação nos Evaporadores de Múltiplo Efeito

Nos EME, a alimentação da solução a ser concentrada pode ser de diferentes tipos: alimentação direta; contra-corrente; mistra; paralela.

Na alimentação direta a solução a ser concentrada é introduzida no primeiro efeito e vai passando para os efeitos seguintes paralelamente ao fluxo de vapor. A solução concentrada é retirada no último efeito. Esta forma de alimentação apresenta o sistema mais simples de bombeamento, já que o escoamento da solução se dá no sentido das pressões de crescentes, sendo necessário apenas o bombeamento da alimentação para o primeiro efeito. A alimentação direta é interessante quando a solução a ser concentrada se encontra numa temperatura elevada, ou quando apresenta problemas de degradação térmica, sendo desaconselhável quando a solução apresenta aumento considerável da viscosidade com a concentração, já que a concentração máxima é atingida no último efeito, onde a menor temperatura agrava os problemas decorrentes do aumento de viscosidade.

Na alimentação em contra-corrente a solução a ser concentrada é introduzida no último efeito, sendo a extração do condensado feita no primeiro efeito. Esta forma de alimentação exige uma bomba entre cada par de efeitos consecutivos. Como a solução mais concentrada se encontra no efeito de maior temperatura, o problema de aumento de viscosidade é menos crítico do que no caso da alimentação direta. Esta configuração é recomendada quando a alimentação se encontra a baixa temperatura, já que se a temperatura fosse elevada haveria "flasheamento" da solução, que além de não provocar vaporização adicional em efeitos posteriores implicaria em sobrecargas dos sistemas de condensação e vácuo.

Na alimentação mista a solução a ser concentrada é alimentada num efeito intermediário e entre este e o último

efeito o sistema se comporta como na alimentação direta. A extração do último efeito é bombeada para o efeito anterior ao da alimentação e, deste até o primeiro, o comportamento corresponde ao da alimentação em contra-corrente. Este sistema evita problema da elevação excessiva da viscosidade no último efeito da alimentação direta e também problemas tais como excessivo "flasheamento" no último efeito da alimentação em contra-corrente.

Na alimentação paralela a solução a ser concentrada é introduzida em paralelo em todos os efeitos e a solução concentrada final é uma mistura de todas as extrações. A alimentação paralela é utilizada em alguns casos particulares, geralmente quando a alimentação já está saturada e o produto final é um sólido, como por exemplo na obtenção de sal comum (NaCl).

Finalmente, deve-se assinalar que não existe nenhuma fórmula que permita, a priori, prever qual a solução ótima da forma de alimentação. Na prática, as análises para determinação do sistema ótimo devem atender ao conceito de mínimo custo global.

3.3. Recuperação de Calor do Condensado e da Solução Concentrada

Existem diversas possibilidades que tem que ser analisadas em cada caso. Uma possibilidade é a instalação de um tanque de "flash" do condensado do primeiro efeito com aproveitamento do vapor de "flash" num efeito posterior. O mesmo critério é válido para a solução concentrada.

No entanto, estas medidas tem que ser analisadas cuidadosamente. Por exemplo, a utilização da recuperação do condensado para preaquecimento da solução a ser concentrada pode implicar uma diminuição da temperatura da água de alimentação das caldeiras ou um aumento de consumo de vapor no desalerador que antecede as mesmas, e o balanço energético global precisa ser estudado.

3.4. Outras Possíveis Melhorias

Além das medidas anteriormente assinaladas, existem ou

tras possíveis melhorias, algumas específicas para casos particulares de sistemas de evaporação, outras gerais como termocompressão, compressão mecânica de vapor, melhoria no sistema de vácuo, preaquecimento da solução a ser concentrada e recuperação de calor no sistema de condensação.

Dentre as medidas específicas, pode-se pensar no aproveitamento de fluidos efluentes a altas temperaturas nos sistemas de evaporação; esta situação é frequente nas fábricas de suco concentrado de laranja, onde os gases efluentes dos secadores de bagaço de laranja são utilizados no sistema de evaporação para concentração do suco.

Outro exemplo de melhoria específica se tem no setor de celulose, com a instalação de sistemas de concentração ou preconcentração através da coluna Lockman.

4. DESCRIÇÃO DO PROGRAMA

O programa desenvolvido permite analisar um sistema composto de EME com N efeitos, qualquer percurso da solução a concentrar, e diversos equipamentos periféricos. Permite ainda a retirada ou introdução de vapor em pontos intermediários do sistema, entre dois efeitos sucessivos. É prevista a inserção futura de subrotinas para simulação com os seguintes periféricos: termocompressão, compressão mecânica de vapor e trocadores de calor.

O programa pode ser utilizado nas seguintes formas:

- para avaliação dos coeficientes globais reais de troca térmica de cada corpo do EME;
- para determinação da concentração final da solução;
- para avaliação da capacidade do EME;
- para avaliação do salto térmico global; nesse caso é fixada a temperatura de condensação do vapor do último efeito, e supõe-se que o vapor "vivo" seja disponível no estado saturado seco a uma pressão conhecida, sofrendo uma expansão isoentálpica na válvula de controle; o programa determina a pressão do vapor necessária a jusante dessa válvula.

Os parâmetros de entrada e saída não são sempre os mesmos variando em função da opção desejada. A relação de parâmetros para cada opção é apresentada na tabela 1 anexa.

No programa atual, nas opções em que os coeficientes

TABELA 1: Relação de parâmetros de entrada e saída do programa

OPÇÃO PARÂMETRO	Avaliação do U		Avaliação da con- centração final		Avaliação da capacidade do ENE		Avaliação do salto termico global	
	Parâmetro de entrada	Parâmetro de saída	Parâmetro de entrada	Parâmetro de saída	Parâmetro de entrada	Parâmetro de saída	Parâmetro de entrada	Parâmetro de saída
Numero de efeitos existentes	X		X		X		X	
Area de troca termica de cada efeito	X		X		X		X	
Coefficiente global de troca termica de cada efeito		X	X		X		X	
Trajeto da solução	X		X		X		X	
Vazões de retiradas/entradas laterais de vapor	X		X		X		X	
Origem e destino dos fluxos dos tanques de flash e de produto	X		X		X		X	
Pressão na cabeça de cada efeito	X			X		X		X
Pressão do vapor vivo	X				X			X
Temperatura do vapor vivo	X				X			
Pressão na cabeça do ultimo efeito	X				X			
Vazão inicial da solução a concentrar	X					X		
Concentração inicial da solução	X							
Temperatura inicial da solução	X							
Concentração final da solução	X							
Concentrações intermediarias da solução		X		X		X		X
Vazão de vapor gerado em cada efeito e em cada tanque de flash		X		X		X		X
Vazão de vapor vivo requerida		X		X		X		X

globais de troca térmica dos efeitos são parâmetros de entrada, os mesmos são mantidos constantes nas iterações executadas durante a simulação. É previsto um desenvolvimento futuro onde a dependência desses coeficientes com a temperatura, concentração e velocidade da solução no interior dos tubos seja observada.

As subrotinas existentes para o cálculo das propriedades termodinâmicas do vapor d'água se utilizam das correlações apresentadas por Steltz [10].

5. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DO PROGRAMA

A seguir são apresentados dois casos típicos de concentradores de licor negro, onde são propostas algumas modificações visando a otimização de sua operação. A simulação é utilizada em cada uma das situações, permitindo uma avaliação mais completa do comportamento do EME.

O EME analisado é de seis efeitos, e a solução percorre, pela ordem, os efeitos 5-6-4-3-2-1, conforme mostrado na figura 1.

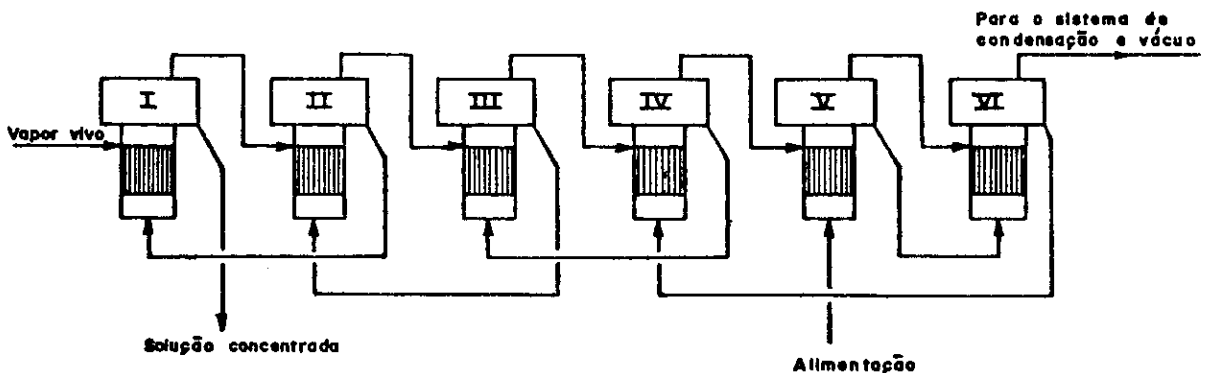


Figura 1 - Desenho esquemático do EME analisado, salientando a sequência de percurso da solução.

Além dessas características, existem outros parâmetros que são mantidos inalterados para todas as simulações. São eles (*):

- concentração inicial da solução: 14,0%
- perda de calor em cada corpo: 2% da carga térmica disponível pelo vapor condensante no corpo;
- temperatura do vapor "vivo" à montante da válvula 147,2 °C (correspondente a uma pressão absoluta de saturação de 4,5 kgf/cm²)
- outros parâmetros:

Efeito	Área de troca térmica (m ²)	Coefficiente global de troca térmica (kcal/hm ² °C)
1	840	1130
2	840	1250
3	840	1430
4	840	1270
5	840	1030
6	840	910

Um dos parâmetros a ser evidenciado nas análises seguintes é a eficiência de operação corrigida do EME. Esse parâmetro resulta de uma correção de eficiência comumente definida, que é a relação entre a taxa total de água evaporada e a taxa real de vapor "vivo" consumido. Na eficiência corrigida, a taxa real de vapor "vivo" consumido é substituída por outra, que seria aquela verificada caso o vapor consumido estivesse numa assim definida condição de referência, a qual deve ser previamente fixada. Dessa forma, a eficiência

(*) Neste trabalho, os parâmetros serão expressos nas unidades comumente utilizadas no estudo de evaporadores. A seguir são apresentados os fatores de conversão para o Sistema Internacional de Unidades:

[Entalpia específica] = kcal/kg (4,1868 kJ/kg)

[Pressão absoluta] = kgf/cm² (9,80665.10⁴Pa)

[Potência] = kcal/h (1,163W)

A concentração da solução é expressa na base de teor mássico percentual de sólidos e a pressão, sempre na escala absoluta.

corrigida pode ser calculada por:

$$E_f \text{ corrigida} = \frac{\Delta \dot{m}_a}{\Delta \dot{m}_v \frac{(h_v - h_c)_{\text{real}}}{(h_v - h_c)_{\text{referência}}}}$$

onde, $\Delta \dot{m}_a$: taxa total de água evaporada (kg/h),

$\Delta \dot{m}_v$: taxa real de vapor vivo consumido (kg/h),

$(h_v - h_c)_{\text{real}}$: variação da entalpia específica do vapor "vivo" ao ser condensado nas condições reais de operação (kcal/kg),

$(h_v - h_c)_{\text{referência}}$: idem, idem, nas condições de referência.

Para os casos analisados, será admitido como referência o vapor condensante a 3kgf/cm² absolutos, onde $(h_v - h_c)_{\text{ref.}} = 516,8$ kcal/kg.

Caso típico 1

Trata-se de um sistema básico simples, onde não existem periféricos, operando a plena capacidade, e a simulação é executada na opção de avaliação da concentração final, tendo sido encontrado o valor de 48,0%. Os resultados das simulações, mostrando os principais parâmetros de cada caso analisado, são apresentados em anexo.

Modificação A

Visando um aumento de capacidade do EME é proposto um aumento do vácuo no último efeito, elevando em 10^oC o salto térmico global.

A simulação permite prever um aumento de 15,4% na capacidade, sem qualquer modificação significativa na eficiência corrigida, muito embora deva haver um aumento de consumo no sistema de vácuo.

Modificação B

Supondo a disponibilidade de uma fonte de energia residual que permita a elevação da temperatura inicial da solu

SIMULAÇÃO DE EVAPORADORES

CASO TÍPICO NÚMERO 1

Opção: Avaliação da concentração final

Parâmetros de entrada

-Temperatura de saturação do vapor no último efeito..... 60.0 oC
 -Temperatura inicial da solução a concentrar..... 75.0 oC
 -Pressão do vapor vivo a jusante da válvula..... 3.685 kgf/cm2
 -Vazão inicial de solução..... 155000 kg/h

Parâmetros de saída

-Eficiência..... 4.005 kg água/kg vapor
 -Eficiência corrigida..... 4.026 kg água/kg vapor
 -Vazão de vapor vivo..... 27407 kg/h

Outros parâmetros:

```
*****
* Efeito * Pressão na * Temper. * Temper. * Diferença * Vazão de * Concentração * Carga *
* * cabeça * sat. vapor * real vapor * de temper. * vapor * massa de * termica *
* * (kgf/cm2) * efluente * efluente * (oC) * efluente * solidos na * total *
* * * (oC) * (oC) * * (kg/h) * saída(%) * (kcal/h) *
*****
* 1 * 1.96 * 119.0 * 125.1 * 14.7 * 24465 * 48.0 * 13940 E3 *
* 2 * 1.19 * 104.0 * 107.0 * 12.0 * 21747 * 31.1 * 12613 E3 *
* 3 * .79 * 92.5 * 94.5 * 9.5 * 18992 * 23.7 * 11424 E3 *
* 4 * .51 * 81.4 * 83.0 * 9.5 * 14045 * 19.7 * 10121 E3 *
* 5 * .34 * 71.4 * 72.6 * 8.7 * 14212 * 15.4 * 7560 E3 *
* 6 * .20 * 59.9 * 61.3 * 10.2 * 16307 * 17.4 * 7778 E3 *
*****
```

CASO: MODIFICAÇÃO A - AUMENTO DO VÁCUO NO ÚLTIMO EFEITO

Opção: Avaliação da capacidade

Parâmetros de entrada

-Temperatura de saturação do vapor no último efeito..... 50.0 oC
 -Concentração final da solução a concentrar..... 48.0 %
 -Temperatura inicial da solução a concentrar..... 75.0 oC
 -Pressão do vapor vivo a jusante da válvula..... 3.685 kgf/cm2

Parâmetros de saída

-Eficiência..... 3.989 kg água/kg vapor
 -Eficiência corrigida..... 4.010 kg água/kg vapor
 -Vazão inicial de solução..... 179000 kg/h
 -Vazão de vapor vivo..... 31847 kg/h

Outros parâmetros:

```
*****
* Efeito * Pressão na * Temper. * Temper. * Diferença * Vazão de * Concentração * Carga *
* * cabeça * sat. vapor * real vapor * de temper. * vapor * massa de * termica *
* * (kgf/cm2) * efluente * efluente * (oC) * efluente * solidos na * total *
* * * (oC) * (oC) * * (kg/h) * saída(%) * (kcal/h) *
*****
* 1 * 1.83 * 116.8 * 123.0 * 17.0 * 28138 * 48.2 * 16100 E3 *
* 2 * 1.03 * 100.0 * 103.0 * 13.9 * 24747 * 31.3 * 14547 E3 *
* 3 * .64 * 87.0 * 89.1 * 10.9 * 21340 * 23.9 * 13085 E3 *
* 4 * .39 * 74.7 * 76.3 * 10.7 * 15059 * 19.9 * 11416 E3 *
* 5 * .24 * 64.0 * 65.2 * 9.5 * 17424 * 15.5 * 8209 E3 *
* 6 * .13 * 50.1 * 51.5 * 12.5 * 20320 * 17.7 * 9560 E3 *
*****
```

SIMULAÇÃO DE EVAPORADORES

CASO: MODIFICAÇÃO B - ELEVACÃO DA TEMPERATURA INICIAL DA SOLUÇÃO
 Opção: Avaliação do salto termico global

Parametros de entrada

-Temperatura de saturação do vapor no ultimo efeito..... 60.0 oC
 -Concentração final da solução a concentrar..... 48.0 %
 -Temperatura inicial da solução a concentrar..... 85.0 oC
 -Vazão inicial de solução..... 155000 kg/h

Parametros de saída

-Eficiencia..... 4.188 kg agua/kg vapor
 -Eficiencia corrigida..... 4.201 kg agua/kg vapor
 -Pressão do vapor vivo a jusante da valvula... 3.55 kgf/cm2
 -Vazão de vapor vivo..... 26157 kg/h

Outros parametros:

```

*****
* Efeito * Pressão na * Temper. * Temper. * Diferença * Vazão de * Concentração * Carga *
* * cabeça * sat. vapor * real vapor * de temper. * vapor * massica de * termica *
* * (kgf/cm2) * efluente * efluente * (oC) * efluente * solidos na * total *
* * * (oC) * (oC) * * (kg/h) * saída(%) * (kcal/h) *
*****
* 1 * 1.93 * 118.5 * 124.5 * 14.0 * 23411 * 47.7 * 13240 E3 *
* 2 * 1.19 * 104.0 * 107.0 * 11.5 * 20834 * 31.5 * 12089 E3 *
* 3 * .79 * 92.7 * 94.9 * 9.1 * 18227 * 24.2 * 10956 E3 *
* 4 * .52 * 82.0 * 83.6 * 9.1 * 13308 * 20.1 * 9707 E3 *
* 5 * .35 * 72.5 * 73.7 * 8.3 * 15766 * 15.6 * 7185 E3 *
* 6 * .20 * 59.8 * 61.3 * 11.2 * 17994 * 17.9 * 8566 E3 *
*****
  
```

ção para 85°C , ao invés de 75°C do caso básico, a simulação mostra que a eficiência corrigida se eleva para $4,201\text{kg}$ água evaporada/kg vapor, contra $4,026\text{kg}$ água evaporada/kg vapor do caso básico, representando uma redução de consumo de vapor "vivo" de cerca de $4,4\%$. Essa medida, contudo, deve ser analisada com cuidado, pois a carga térmica necessária no trocador de calor de preaquecimento adicional da solução seria cerca de $2,2$ vezes a carga térmica correspondente ao vapor economizado, significando investimentos maiores, e podendo inviabilizar economicamente a medida. A viabilidade dessa medida é tanto maior quanto mais próximo do primeiro efeito seja a alim^{en}tacão da solução a concentrar.

Deve-se ressaltar que a simulação dessa modificação foi efetuada na opção de avaliação do salto térmico global, uma vez que, para a manutenção da capacidade, a pressão do vapor vivo deve decrescer, o que de fato é verificado.

Caso típico 2

É um caso semelhante ao caso típico 1, mas considera-se agora uma unidade operando em carga parcial. Foram adotados os mesmos parâmetros de entrada daquele caso, diminuindo-se apenas a pressão vapor "vivo", de forma a produzir a diminuição de capacidade desejada. O objetivo desse caso típico é analisar uma outra medida de otimização, modificação C mostrada a seguir.

Modificação C

É suposta a disponibilidade na unidade industrial de 6.000kg/h de vapor residual de baixa pressão, praticamente na pressão atmosférica, o qual pode ser introduzido no terceiro efeito, conforme figura 2.

Para manutenção da capacidade, a pressão do vapor "vivo" à jusante da válvula deve ser elevada para $2,1\text{kgf/cm}^2$. Em relação à diferença de temperatura, e correspondente para a carga térmica, verifica-se uma diminuição de valores, respectivamente, no primeiro e no segundo efeitos e uma elevação nos demais, resultando uma redução de consumo de 4.070kg/h de vapor "vivo", ou seja, $24,0\%$.

SIMULAÇÃO DE EVAPORADORES

CASO TIPICO NUMERO 2

Opção: Avaliação da capacidade

Parametros de entrada

-Temperatura de saturação do vapor no ultimo efeito..... 60.0 oC
 -Concentração final da solução a concentrar..... 48.0 %
 -Temperatura inicial da solução a concentrar..... 75.0 oC
 -Pressão do vapor vivo a jusante da valvula..... 2.0 kgf/cm2

Parametros de saída

-Eficiencia..... 4.485 kg agua/kg vapor
 -Eficiencia corrigida..... 4.334 kg agua/kg vapor
 -Vazão inicial de solução..... 107000 kg/h
 -Vazão de vapor vivo..... 16947 kg/h

Outros parametros:

```

*****
* Efeito * Pressão na * Temper. * Temper. * Diferença * Vazão de * Concentração * Carga *
* * * cabeça * sat. vapor * real vapor * de temper. * vapor * massica de * termica *
* * * (kgf/cm2) * efluente * efluente * (oC) * efluente * solidos na * total *
* * * * (oC) * (oC) * * (kg/h) * saída(%) * (kcal/h) *
*****
* 1 * 1.20 * 104.2 * 110.4 * 9.5 * 15760 * 48.3 * 9000 E3 *
* 2 * .81 * 93.2 * 96.3 * 7.9 * 14355 * 32.0 * 8274 E3 *
* 3 * .58 * 84.7 * 86.8 * 6.4 * 12920 * 24.5 * 7667 E3 *
* 4 * .42 * 76.5 * 78.1 * 6.5 * 10242 * 20.2 * 6979 E3 *
* 5 * .30 * 68.9 * 70.1 * 6.4 * 10031 * 15.6 * 5519 E3 *
* 6 * .20 * 59.7 * 61.1 * 7.0 * 11086 * 17.8 * 5945 E3 *
*****
    
```

CASO: MODIFICAÇÃO C - INTRODUÇÃO DE VAPOR RESIDUAL NO TERCEIRO EFEITO

Opção: Avaliação do salto termico global

Parametros de entrada

-Entrada/retirada lateral de vapor..... 6000 kg/h no terceiro efeito
 -Temperatura de saturação do vapor no ultimo efeito..... 60.0 oC
 -Concentração final da solução a concentrar..... 48.0 %
 -Temperatura inicial da solução a concentrar..... 75.0 oC
 -Vazão inicial de solução..... 107000 kg/h

Parametros de saída

-Eficiencia..... 4.025 kg agua/kg vapor
 -Eficiencia corrigida..... 3.885 kg agua/kg vapor
 -Pressão do vapor vivo a jusante da valvula... 2.1 kgf/cm2
 -Vazão de vapor vivo..... 12677 kg/h

Outros parametros:

```

*****
* Efeito * Pressão na * Temper. * Temper. * Diferença * Vazão de * Concentração * Carga *
* * * cabeça * sat. vapor * real vapor * de temper. * vapor * massica de * termica *
* * * (kgf/cm2) * efluente * efluente * (oC) * efluente * solidos na * total *
* * * * (oC) * (oC) * * (kg/h) * saída(%) * (kcal/h) *
*****
* 1 * 1.35 * 107.7 * 113.9 * 7.1 * 11979 * 48.3 * 6769 E3 *
* 2 * .97 * 98.2 * 101.7 * 6.0 * 10726 * 34.8 * 6277 E3 *
* 3 * .67 * 88.3 * 90.8 * 7.4 * 15111 * 27.9 * 8860 E3 *
* 4 * .46 * 78.8 * 80.7 * 7.6 * 12145 * 21.8 * 8131 E3 *
* 5 * .32 * 70.0 * 71.2 * 7.6 * 13447 * 15.8 * 6575 E3 *
* 6 * .20 * 59.4 * 61.1 * 8.9 * 13500 * 18.5 * 6776 E3 *
*****
    
```

ção para 85°C , ao invés de 75°C do caso básico, a simulação mostra que a eficiência corrigida se eleva para $4,201\text{kg}$ água evaporada/kg vapor, contra $4,026\text{ kg}$ água evaporada/kg vapor do caso básico, representando uma redução de consumo de vapor "vivo" de cerca de $4,4\%$. Essa medida, contudo, deve ser analisada com cuidado, pois a carga térmica necessária no trocador de calor de preaquecimento adicional da solução seria cerca de $2,2$ vezes a carga térmica correspondente ao vapor economizado, significando investimentos maiores, e podendo inviabilizar economicamente a medida. A viabilidade dessa medida é tanto maior quanto mais próximo do primeiro efeito seja a alimentação da solução a concentrar.

Deve-se ressaltar que a simulação dessa modificação foi efetuada na opção de avaliação do salto térmico global, uma vez que, para a manutenção da capacidade, a pressão do vapor vivo deve decrescer, o que de fato é verificado.

Caso típico 2

É um caso semelhante ao caso típico 1, mas considera-se agora uma unidade operando em carga parcial. Foram adotados os mesmos parâmetros de entrada daquele caso, diminuindo-se apenas a pressão vapor "vivo", de forma a produzir a diminuição de capacidade desejada. O objetivo desse caso típico é analisar uma outra medida de otimização, modificação C mostrada a seguir.

Modificação C

É suposta a disponibilidade na unidade industrial de 6.000 kg/h de vapor residual de baixa pressão, praticamente na pressão atmosférica, o qual pode ser introduzido no terceiro efeito, conforme figura 2.

Para manutenção da capacidade, a pressão do vapor "vivo" à jusante da válvula deve ser elevada para $2,1\text{ kgf/cm}^2$. Em relação à diferença de temperatura, e correspondente para a carga térmica, verifica-se uma diminuição de valores, respectivamente, no primeiro e no segundo efeitos e uma elevação nos demais, resultando uma redução de consumo de 4.070kg/h de vapor "vivo", ou seja, $24,0\%$.

SIMULAÇÃO DE EVAPORADORES

CASO TÍPICO NÚMERO 2
Opção: Avaliação da capacidade

Parametros de entrada

-Temperatura de saturação do vapor no ultimo efeito..... 60.0 oC
 -Concentração final da solução a concentrar..... 48.0 Z
 -Temperatura inicial da solução a concentrar..... 75.0 oC
 -Pressão do vapor vivo a jusante da valvula..... 2.0 kgf/cm2

Parametros de saída

-Eficiencia..... 4.485 kg agua/kg vapor
 -Eficiencia corrigida..... 4.334 kg agua/kg vapor
 -Vazão inicial de solução..... 107000 kg/h
 -Vazão de vapor vivo..... 16947 kg/h

Outros parametros:

```

*****
* Efeito * Pressão na * Temper. * Temper. * Diferença * Vazão de * Concentração * Carga *
* * * cabeça * sat. vapor * real vapor * de temper. * vapor * massica de * termica *
* * * (kgf/cm2) * efluente * efluente * (oC) * efluente * solidos na * total *
* * * * (oC) * (oC) * * (kg/h) * saída(Z) * (kcal/h) *
*****
* 1 * 1.20 * 104.2 * 110.4 * 9.5 * 15760 * 48.3 * 9000 E3 *
* 2 * .81 * 93.2 * 96.3 * 7.9 * 14355 * 32.0 * 8274 E3 *
* 3 * .58 * 84.7 * 86.8 * 6.4 * 12920 * 24.5 * 7667 E3 *
* 4 * .42 * 76.5 * 78.1 * 6.5 * 10242 * 20.2 * 6979 E3 *
* 5 * .30 * 68.9 * 70.1 * 6.4 * 10031 * 15.6 * 5519 E3 *
* 6 * .20 * 59.7 * 61.1 * 7.0 * 11086 * 17.8 * 5945 E3 *
*****
    
```

CASO: MODIFICAÇÃO C - INTRODUÇÃO DE VAPOR RESIDUAL NO TERCEIRO EFEITO
Opção: Avaliação do salto termico global

Parametros de entrada

-Entrada/retirada lateral de vapor..... 6000 kg/h no terceiro efeito
 -Temperatura de saturação do vapor no ultimo efeito..... 60.0 oC
 -Concentração final da solução a concentrar..... 48.0 Z
 -Temperatura inicial da solução a concentrar..... 75.0 oC
 -Vazão inicial de solução..... 107000 kg/h

Parametros de saída

-Eficiencia..... 4.025 kg agua/kg vapor
 -Eficiencia corrigida..... 3.885 kg agua/kg vapor
 -Pressão do vapor vivo a jusante da valvula... 2.1 kgf/cm2
 -Vazão de vapor vivo..... 12677 kg/h

Outros parametros:

```

*****
* Efeito * Pressão na * Temper. * Temper. * Diferença * Vazão de * Concentração * Carga *
* * * cabeça * sat. vapor * real vapor * de temper. * vapor * massica de * termica *
* * * (kgf/cm2) * efluente * efluente * (oC) * efluente * solidos na * total *
* * * * (oC) * (oC) * * (kg/h) * saída(Z) * (kcal/h) *
*****
* 1 * 1.35 * 107.7 * 113.9 * 7.1 * 11979 * 48.3 * 6769 E3 *
* 2 * .97 * 98.2 * 101.7 * 6.0 * 10726 * 34.8 * 6277 E3 *
* 3 * .67 * 88.3 * 90.8 * 7.4 * 15111 * 27.9 * 8860 E3 *
* 4 * .46 * 78.8 * 80.7 * 7.6 * 12145 * 21.8 * 8131 E3 *
* 5 * .32 * 70.0 * 71.2 * 7.6 * 13447 * 15.8 * 6575 E3 *
* 6 * .20 * 59.6 * 61.1 * 8.9 * 13580 * 18.5 * 6776 E3 *
*****
    
```

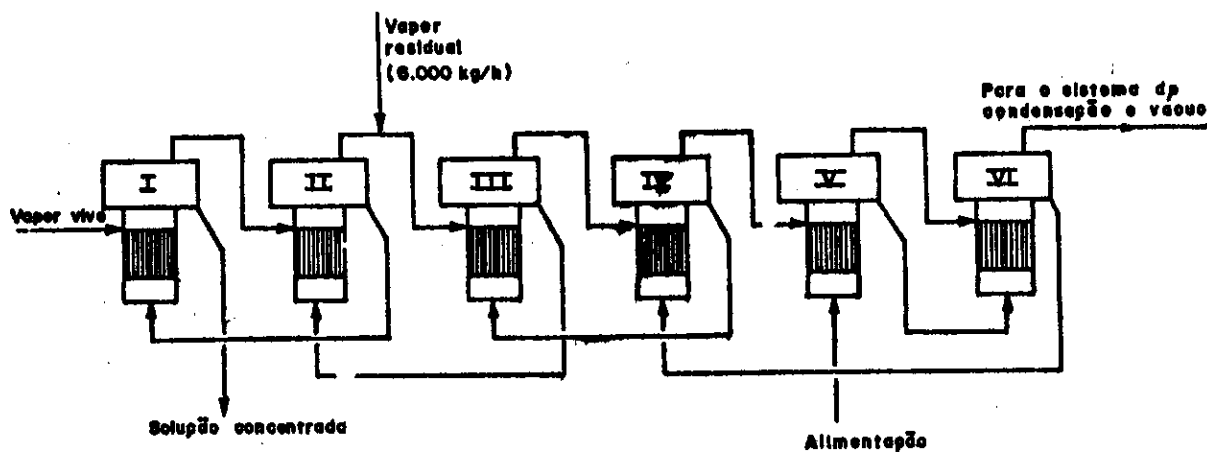


Figura 2 - Desenho esquemático do EME, mostrando a utilização de vapor residual

6. CONCLUSÕES

O trabalho mostrou que são inúmeras as medidas potenciais para a otimização dos EME, e a aplicação de cada uma delas depende das características particulares de cada unidade industrial. Na análise dessas medidas, o enfoque não deve se restringir apenas ao consumo energético do próprio EME, mas deve observar também as alterações provocadas em toda a planta.

Evidenciou-se também que um programa de microcomputador para simulação matemática pode-se mostrar muito útil, quer para a avaliação das condições reais de operação do EME, quer para a análise das medidas acima mencionadas. Nesse sentido, foram apresentados alguns casos exemplificando a utilização de um programa desse tipo, onde foi possível quantificar o aumento de capacidade e a redução de consumo de vapor "vivo" de correntes de algumas possíveis melhorias efetuadas em um EME típico.

Referências Bibliográficas

1. ASSUMPÇÃO, R.M.V. et alii. Propriedades de engenharia do licor negro sulfato de eucalyptus. In: III Congresso Latino-Americano de Celulose e Papel. São Paulo, 1983, 17p.

2. BALDUS, R.F., EDWARDS, L.L. Multiple-effect evaporation systems for kraft black liquor - Evaluation and design. TAPPI, 61 (3): 75-78, Mar, 1978.
3. BATSTONE, D.B., PRINCE, R.G.H. Planning Evaporator Stations by Computer Simulation. Proc. of QSSCT, 36: 367-375, 1969.
4. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. Manual de recomendações para um programa de redução de consumo de energia na indústria de celulose e papel. São Paulo, 1978, 3v.
5. KERN, D.Q. Processos de transmissão de calor (Process Heat Transfer). Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1980. 671p.
6. KREITH, F. Princípios de transmissão de calor (Principles of heat transfer). São Paulo, E.Blücher, 1977. 550p.
7. LEITES, J.M.M. Simulação de sistemas de evaporação visando a racionalização energética de evaporadores de múltiplo efeito. In: IV Congresso de Utilidades. Rio de Janeiro, 1985. 15p.
8. MILLAN, P.I. Sistemas convencional e indireto de compressão mecânica de vapor; aplicações nos conjuntos de evaporação para concentração de licor negro. São Paulo, EPUSP. Dissertação de Mestrado. 1985.
9. NECATI OZISIK, M. Basic heat transfer. Tokio, Macgraw-Hill, 1977. 572p.
10. STELTZ, W.G. The formulation of steam properties for digital application. Transactions of ASME, 1958.
11. TORLONI, M. Evaporadores. São Paulo, Depto. Engª Química, EPUSP, 1976.
12. WETHERHORN, D. The calculation of Evaporator heat balances from operating data. TAPPI, 47 (2): 168A - 171A, Feb, 1964.
13. WETHERHORN, D. Analysis and optimization of multiple-effect evaporators. TAPPI, 56 (6): 88-90, Jun, 1973.