



**ANÁLISE DE DADOS E PARÂMETROS OPERACIONAIS PARA
AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE EVAPORAÇÃO MÚLTIPLO
EFEITO DO PROCESSO KRAFT**

**Evaluation of multiple effect kraft evaporation process through
experimental data and operational parameter analysis**

George Alberto Avelar Costa, Marcelo Cardoso (Universidade Federal de Minas Gerais); Song Won Park (Escola Politécnica da Universidade de São Paulo); Hamilton Saulo Moreira Brandão (Celulose Nipo Brasileira S/A – Cenibra)



ABTCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL
Rua Zequinha de Abreu, 27 - Pacaembu
São Paulo - SP - Brasil - CEP 01250-050
Fone: 11 3874-2700 - Fax: 11 3874-2730
e.mail: abtcp@abtcp.org.br
www.abtcp.org.br

Análise de dados e parâmetros operacionais para avaliação de um sistema de evaporação múltiplo efeito do processo Kraft

Evaluation of multiple effect Kraft evaporation process through experimental data and operational parameter analysis

George Alberto Avelar Costa¹, Marcelo Cardoso¹, Song Won Park²,
Hamilton Saulo Moreira Brandão³

1- Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) – Belo Horizonte - MG

2- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP) – São Paulo - SP

3- Celulose Nipo Brasileira S.A. – Belo Oriente - MG

Resumo

Com o objetivo de se avaliar futuramente a influência da viscosidade do licor negro no sistema de evaporação, mais especificamente no fenômeno de transferência de calor, foi efetuado um levantamento de dados e parâmetros de processo da Unidade de Evaporação II da Cenibra. Durante um período de quatro meses, entre Maio e Setembro de 2003, informações tais como, consumo de vapor, taxa de alimentação e produção de licor do sistema, temperaturas e pressões a cada corpo de evaporação, entre outros, foram coletados de hora em hora. De posse desses dados foi elaborada uma análise da performance de operação com o auxílio do simulador comercial WinGEMS 5.3 onde os parâmetros não mensurados diretamente, como por exemplo o consumo de vapor, a concentração de sólidos secos e o próprio coeficiente global de transferência de calor (U) para cada corpo de evaporação, puderam ser determinados e analisados. Os modelos de avaliação do simulador WinGEMS, propostos, mostraram-se satisfatórios, uma vez que forneceram um erro relativo médio de 2,4% para os cálculos do consumo de vapor vivo e de 2,5% para a economia de vapor. A partir do conhecimento do comportamento do coeficiente U em cada corpo de evaporação, um modelo matemático poderá ser desenvolvido e equacionado, como função da viscosidade e demais propriedades do licor, bem como os dados de projeto dos equipamentos e das condições de operação da unidade, por meio de modificações nas equações propostas por Collier e Steinhagen.

Abstract

In order to evaluate futurally the influence of the viscosity of the black liquor in the evaporation, more specifically in the phenomenon of heat transference, it was effected a data- and process parameters collecting of the Unit of Evaporation II of the Cenibra. During a period of four months, between May and September of 2003, information such as, vapor consumption, tax of feeding and production of liquor, temperatures and pressures to each effect, among others, had been collected hourly. Of ownership of these data an analysis of the performance of operation was elaborated with assists it of the commercial simulator WinGEMS 5,3 where the parameters not evaluated directly, as for example the vapor consumption, the concentration of solid dry and the global coefficient of transference of heat (U) for each body of evaporation, could have been determined and have been analyzed. The models of evaluation of the WinGEMS simulator considered had revealed feasible, a time that had supplied to an average relative error of 2,4% the calculations of the consumption of alive vapor and 2,5% for the vapor economy A to leave of the knowledge of the behavior of coefficient U in each body of evaporation, a mathematical model could be developed and be equated, as function of viscosity and the properties of the liquor, as well as the data of project of the equipment and the readinesses of the unit, by means of modifications in the equations proposals for Collier and Steinhagen.

Palavras-chave: Evaporação, Licor Negro, Coeficiente Global de Transferência de Calor, Simulação

Keywords: Evaporation, Black Liquor, Heat Transfer Coefficient, Simulation

Introdução

Atualmente um dos problemas enfrentados pelas unidades de recuperação do processo "Kraft" relaciona-se à viscosidade do licor negro e seu comportamento durante a sua concentração nos evaporadores de múltiplo efeito. O acréscimo no teor de sólidos secos, ocorrido com a evaporação da água, altera as características do licor tornando-o mais viscoso e pegajoso afetando diretamente a transferência de calor e a taxa de evaporação no sistema de concentração (Soderhjelm, 1986). Um licor menos concentrado, por sua vez, acarreta em uma redução na eficiência energética da caldeira de recuperação, com redução na produção de vapor e da eficiência de conversão do sulfato de sódio a sulfeto de sódio, bem como um aumento das emissões de SO_2 e H_2S (Adams et al. 1997).

Uma das alternativas para se contornar o problema imposto pelo acréscimo da viscosidade é a adoção de técnicas de redução de viscosidade (tratamento térmico ou adição de sais) que conduzam a ganhos reais na concentração final do licor negro. Todavia, para se precisar esses ganhos, torna-se necessário o conhecimento do impacto da redução da viscosidade no desempenho da unidade de evaporação. Entretanto, a complexidade dos balanços envolvendo um sistema de evaporadores de múltiplo efeito inibem avaliações quantitativas. A presença de corpos paralelos, tanques de evaporação "flash", pré e pós-aquecedores, recírculos, entre outros, torna os cálculos manuais muito difíceis. A determinação do coeficiente global de transferência de calor, assim como a capacidade de evaporação são dados de vital importância na avaliação de um sistema de evaporação.

Avaliação do sistema de evaporação

A primeira etapa na avaliação da unidade correspondeu ao levantamento do fluxograma de engenharia da planta de evaporação II da CENIBRA S.A. - Celulose Nipo-Brasileira S.A., localizada a 230km de Belo Horizonte, no município de Belo Oriente - MG. De posse do fluxograma e acompanhando a operação na planta industrial, estabeleceu-se as conexões e interligações entre os equipamentos da unidade, entre eles, os corpos de evaporação, os tanques de evaporação "flash", as bombas de recirculação e transporte de licor, bem como todas as tubulações de licor, condensado e vapor. Com a seqüência estabelecida, foi elaborado um fluxograma no

simulador WinGEMS versão 5.3 (Pacific Simulation, 1994) uma vez que a complexidade dos cálculos envolvendo sistemas de evaporação múltiplo efeito inibe qualquer avaliação quantitativa manual (Edwards e Baldus, 1978).

Conforme esquematizado na Figura 1, a unidade II de evaporação da planta industrial da Cenibra é constituída de seis efeitos, contendo um total de oito corpos de evaporação, do tipo filme descendente de placas, sendo o primeiro efeito constituído por 03 corpos. No primeiro efeito a operação de lavagem contínua é conduzida em um dos corpos enquanto os outros dois operam normalmente. Ao fim de um determinado período de tempo, a lavagem é alternada de modo a proporcionar uma limpeza adequada em todos os 03 equipamentos. Salienta-se que a lavagem é efetuada normalmente com licor negro fraco (aproximadamente $20\text{m}^3\text{h}^{-1}$) e o produto da lavagem é enviado para concentração diretamente no 3º efeito, onde a corrente se une ao produto do 4º efeito, seguindo o fluxo normal contra-corrente com o vapor.

Seguindo o fluxograma da Figura 1, tem-se que o licor negro fraco, isto é, com concentração de aproximadamente 18% de sólidos, é alimentado no sexto, quinto e quarto efeitos, nas proporções aproximadas de 43, 50 e 7%, respectivamente. Segue em fluxo contra-corrente ao fluxo do vapor e ao sair do primeiro efeito, é expandido em um tanque flash, onde ocorre a última etapa de concentração antes de ser enviado aos tanques de estocagem de licor concentrado.

Quanto às adições de vapor nos evaporadores de múltiplo efeito, elas ocorrem em três entradas independentes localizadas no primeiro efeito, sendo uma entrada para cada corpo de evaporação. O vapor gerado neste efeito segue para os 05 efeitos restantes. O condensado obtido em cada efeito é por sua vez encaminhado para tanques de expansão "flash" e o vapor obtido é reaproveitado juntamente com os evaporado, como meio de aquecimento do efeito seguinte.

Uma outra importante adição de calor ao sistema ocorre com a adição de vapor na coluna de lavagem do condensado contaminado com gases não condensáveis (GNC). Essa coluna ("stripper" - coluna de recheio) recebe todo o condensado de cada

corpo de evaporação e efetua a separação dos gases através da lavagem sob contato direto com vapor de baixa pressão. A mistura vapor-GNC contendo uma grande quantidade de energia, passível de aproveitamento, é encaminhada para um conjunto de placas exclusivo no 3º efeito onde ocorre uma troca de calor com o licor do próprio efeito. Ali ocorre a condensação do vapor que retorna para a coluna de separação e o GNC obtido é enviado para queima na caldeira de biomassa.

A Tabela 1 apresenta os dados de operação do sistema de evaporação da unidade II da Cenibra.

Tabela 1- Dados de operação do sistema de evaporação da unidade II da Cenibra.

	Vapor vivo	Licor alimentado
Vazão	74600 kg.h ⁻¹	483.600 m ³ .h ⁻¹
Temperatura	151,7 °C	86,1 °C
Pressão	3,6 kgf.cm ⁻²	-
Teor de sólidos dis.	-	15,4 %
Perdas Térmicas Estimadas		
1º e 2º efeitos		1,0%
3º ao 6º efeito		0,5%

Simulação do sistema de evaporação

A partir do fluxograma levantado foi criado no simulador um modelo envolvendo blocos pré-definidos pertencentes à biblioteca do programa WinGEMS, semelhante à abordagem de Edwards e Baldus (1978) e Cardoso et. al. (1998). As simplificações tomadas envolveram a eliminação das linhas de baixa vazão que não interferem no fechamento dos balanços de massa e energia e a eliminação do ciclo de lavagem e do corpo sob lavagem no primeiro efeito. Na seqüência de lavagem do 1º efeito, como os três corpos A, B e C são iguais, não se justifica pela complexidade da operação a adoção dessa alternância no simulador. Assim, o fluxograma foi adotado com apenas dois corpos no 1º efeito, um concentrando o produto do 2º efeito e o outro enviando o licor concentrado aos tanques de estocagem.

Assim, com o fluxograma do processo e com os dados de entrada do sistema obteve-se um balanço de massa e energia da evaporação. A Figura 2 apresenta o fluxograma da unidade de evaporação criado no simulador WinGEMS.

Foram especificados os dados das correntes de entradas de licor (Temperatura, Vazão e Concentração), as temperaturas do evaporado de cada efeito e a concentração do licor negro final, obtendo-se como resposta as concentrações, vazões, pressões e coeficientes globais de transferência de calor de cada corpo de evaporação, além do consumo total de vapor e a economia do sistema. As especificações foram conduzidas compartilhando os dados previamente formatados numa planilha eletrônica do Excel com o WinGEMS através de um programa escrito em linguagem Visual Basic. O procedimento consiste no envio das informações da planilha ao WinGEMS, após o fornecimento de todos os dados necessários, inicia a iteração para convergência do cálculo. O critério de convergência é o alcance da concentração de sólidos secos no licor concentrado final com o valor fornecido durante a entrada de dados. Antes de finalizar, o programa gerenciador testa a convergência do WinGEMS e se alcançada, retorna os valores calculados a uma outra planilha do Excel. Esse procedimento é repetido várias vezes até que todos os conjuntos de dados sejam calculados e analisados.

Validação dos modelos de análise

Para a validação dos modelos contidos no simulador WinGEMS foram coletados os dados horários de operação da unidade de evaporação II da Cenibra, incluindo as temperaturas, pressões e vazões de vapor e licor, bem como as informações de concentração de sólidos secos do licor na saída do 2º efeito e do licor negro concentrado final, fornecidas pelos refratômetros da unidade. O período dos registros analisado foi de Maio à Setembro de 2003 com um volume de dados em torno de 2800 pontos. Cada ponto corresponde a um conjunto de dados (médias horárias) registrados para cada equipamento somando um total de 38 variáveis, conforme listado na Tabela 2:

Os dados foram obtidos a partir dos relatórios impressos (cerca de 115mil dados). Em seguida foram tabulados em uma planilha eletrônica do Excel e preparados para a utilização pelo programa WinGEMS. Os dados relativos a ações de início de operação bem como os de interrupções do processo, por estarem ligados a períodos transientes, foram selecionados e eliminados do conjunto de dados com o intuito de evitar fechamentos incorretos dos balanços simultâneos de massa e energia.

Tabela 2 : Variáveis contidas em um conjunto de dados de entrada do simulador WinGEMS

	Variáveis
- temperatura, pressão e vazão do vapor vivo no 1º efeito	03
- temperatura e concentração do licor fraco	02
- distribuição do licor fraco entre 4º, 5º e 6º efeitos	03
- temperatura, concentração e vazão de licor concentrado	03
- temperatura do licor, temperatura do vapor e pressão em cada corpo de evaporação	21
- vazão de vapor de baixa pressão, vazão de condensado e pressão na coluna de "stripper"	03
- temperatura e vazão da água do condensador de superfície	02
- concentração do licor na saída do 2º efeito	01
	38

Resultados

O erro relativo médio, dado pela equação 1, foi calculado a partir da diferença do valor de uma variável obtida na planta industrial com o valor da mesma variável predito pelo simulador WinGEMS. Para o consumo de vapor vivo no 1º efeito o ERM foi de 2.4%. A Figura 3 (a) e (b) apresenta uma comparação entre os valores da planta industrial (reais) e os preditos pelo simulador para o consumo de vapor. Já a Figura 4 exhibe uma comparação entre os valores de economia da planta industrial e os preditos pelo simulador WinGEMS. Analisando a Figura 4 percebe-se que de uma forma geral, a economia de evaporação predita permaneceu aproximadamente constante, com média de 5,3 e desvio padrão de 0,8, relativamente insensível ao comportamento real do processo. Todavia, essa insensibilidade não chega a ser deletéria porque a faixa de variação foi pequena assim como o erro obtido para essa variável, que foi de 2,5% (ERM).

$$ERM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_{real} - y_{calculado}|}{y_{real}} \quad (1)$$

Os ERMs para a economia e consumo de vapor foram satisfatórios uma vez que os dados utilizados foram obtidos a partir de médias horárias das leituras dos instrumentos. Nesse período de tempo podem ocorrer perturbações bruscas do processo que levam ao registro de médias que não correspondem a uma realidade estacionária de estabilidade operacional. Preventivamente, a fim de se verificar a eficácia da convergência do programa, plotou-se na Figura 5 a concentração de sólidos secos do licor negro concentrado obtido na planta industrial com o teor de sólidos obtido pelo WinGEMS. O

critério de convergência adotado foi o alcance da concentração de sólidos da planta industrial dentro de uma tolerância fixada em $\pm 0,5\%$. A distribuição dos pontos segundo uma linha reta na Figura 5 indica que todos os pontos analisados convergiram adequadamente. Isso é importante porque reforça a eficácia do balanço de massa global do sistema.

Verificado a eficácia do balanço global do sistema de evaporação, determinou-se as pressões, concentrações de sólidos, as elevações dos pontos de ebulição, as diferenças de temperatura ΔT e os coeficientes globais de transferência de calor de cada corpo de evaporação. A partir dos dados obteve-se os perfis dessas variáveis para o sistema de evaporação.

A Figura 6 apresenta a comparação dos perfis de pressão real e predito ao longo do sistema de evaporação. A Figura 7 apresenta a comparação entre os valores reais e estimados para a pressão do evaporado nos corpos do primeiro efeito. Já a Figura 8 apresenta a mesma comparação para o corpo de evaporação do 2º efeito.

Os valores de EPE preditos pelo programa simulador estão de concordância com os valores calculados pela correlação citada por Nguyen e Venkatesh (1992). Essa correlação avalia o EPE em função do teor de sólidos secos presentes no licor, segundo a equação 2, e pela análise da Figura 9 percebe-se novamente uma resposta satisfatória da simulação desenvolvida.

$$EPE = EPE|_{50\%} \frac{S}{100 - S} \quad (2)$$

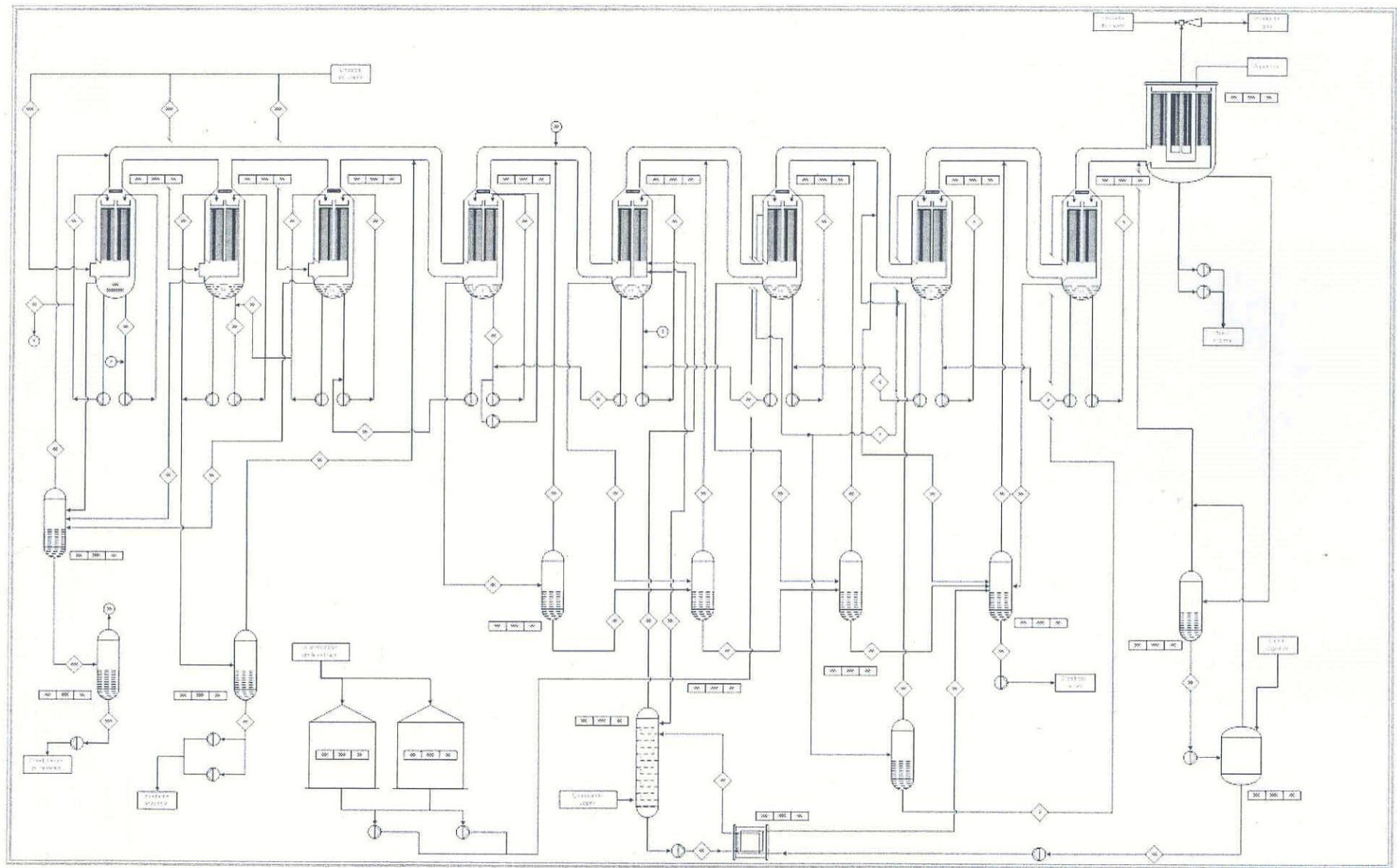


Figura 1 : Fluxograma da planta de evaporação da unidade II da Cenibra

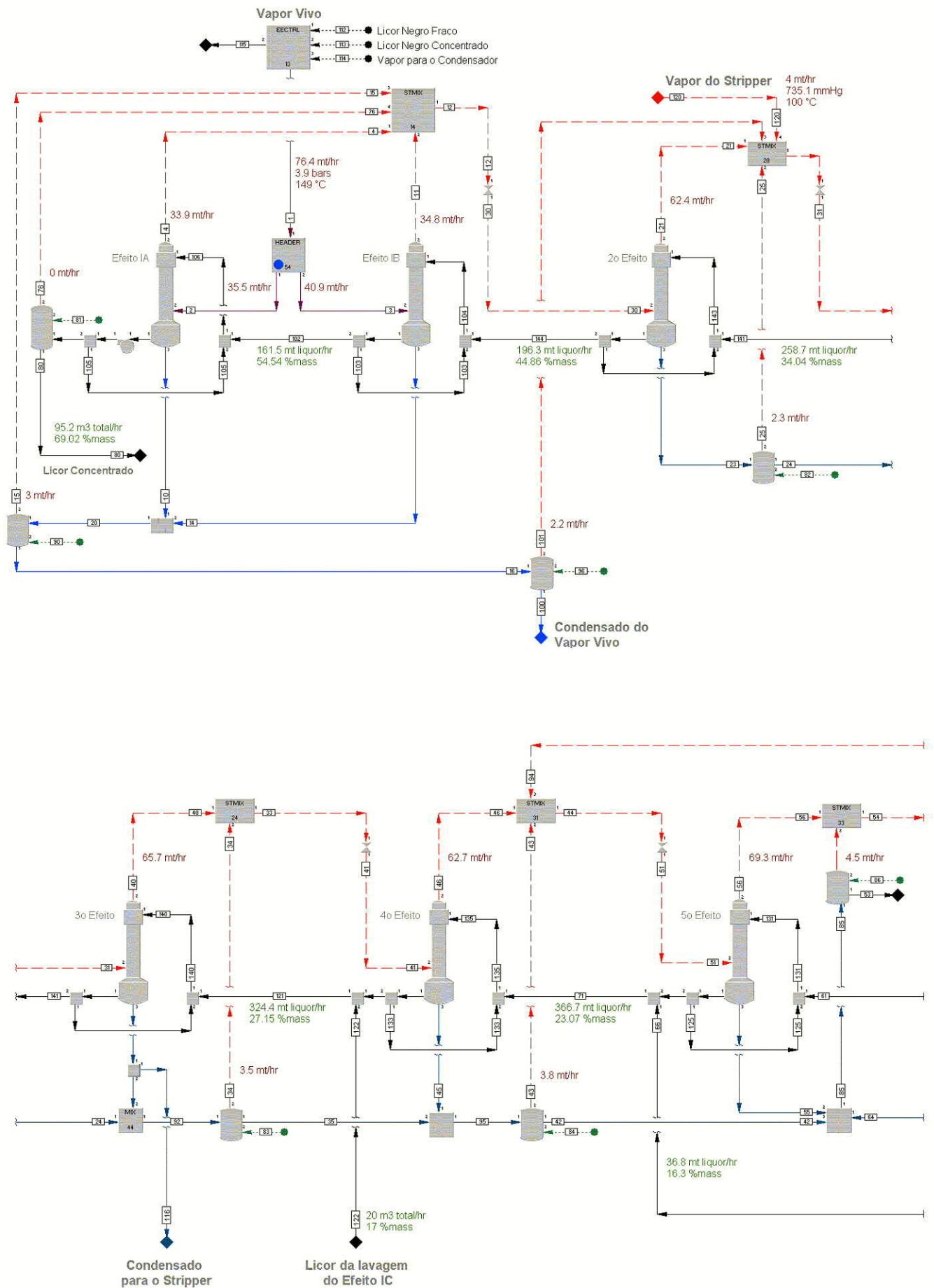


Figura 2 (a) : Fluxograma do 1º ao 5º efeitos da planta de evaporação da unidade II da Cenibra, representado no simulador WinGEMS

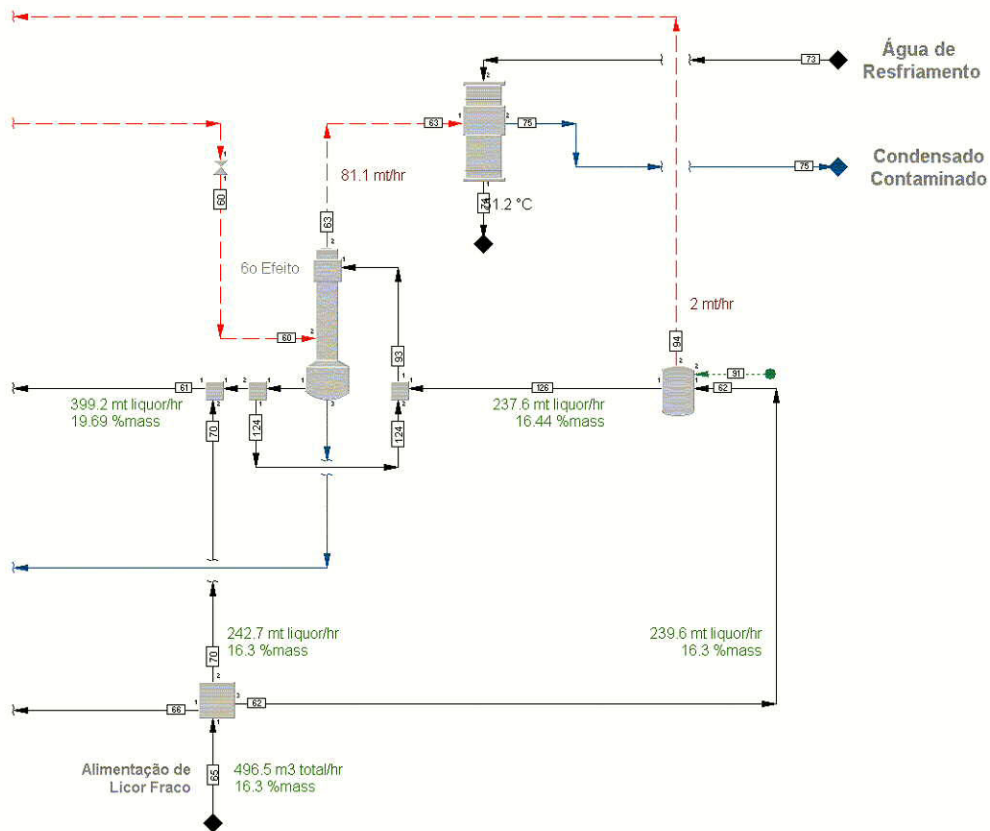


Figura 2 (b) : Fluxograma do 6º efeito da planta de evaporação da unidade II da Cenibra, representado no simulador WinGEMS

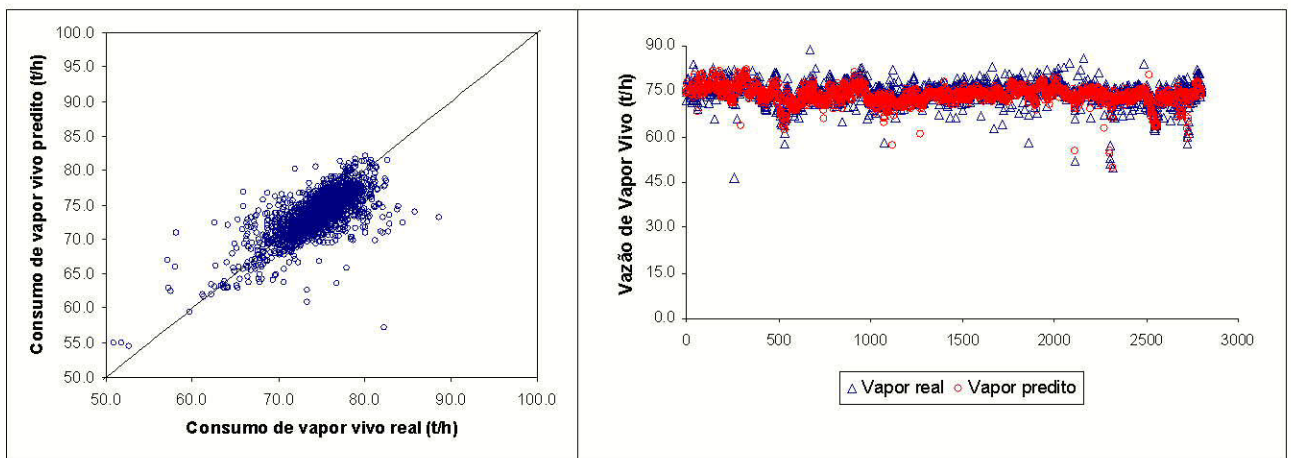


Figura 3 - Comparação entre os valores reais e previstos pelo simulador WinGEMS para o consumo de vapor vivo

Para as pressões dos evaporados dos corpos A e B do primeiro efeito, os erros foram de 7.8% e 4.9% , respectivamente, e para o 2º efeito, o ERM foi de 2.1%. Isso mostra que o balanço efetuado pelo WinGEMS foi apropriado pois conseguiu reproduzir adequadamente os resultados esperados com erros satisfatórios.

É importante ressaltar a diferença entre o aspecto dos gráficos de pressão dos corpos do 1º efeito A e B da Figura 7 com o do 2º efeito da Figura 8. No primeiro, os pontos parecem discretos enquanto que nos demais,

a distribuição parece mais uniforme. O aspecto discreto surge da qualidade da informação obtida pelos transmissores de pressão do 1º efeito que enviam ao sistema supervisor da unidade um sinal que é lido em kgf.cm⁻² com divisão de escala de 0.1 kgf.cm⁻². Os demais efeitos têm o sinal registrado em mmHg, com menor escala igual a 1 mmHg. Como cada variação de 0.1kgf.cm⁻² equivalem a 73.6 mmHg e como para a faixa de operação do equipamento a sensibilidade é na casa das unidades de mmHg, a forma discreta dos dados no primeiro efeito fica explicada.

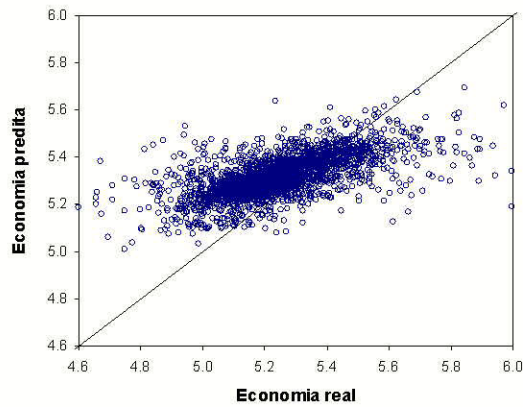


Figura 4- Comparação entre os valores reais e estimados para a economia de vapor do sistema de evaporação

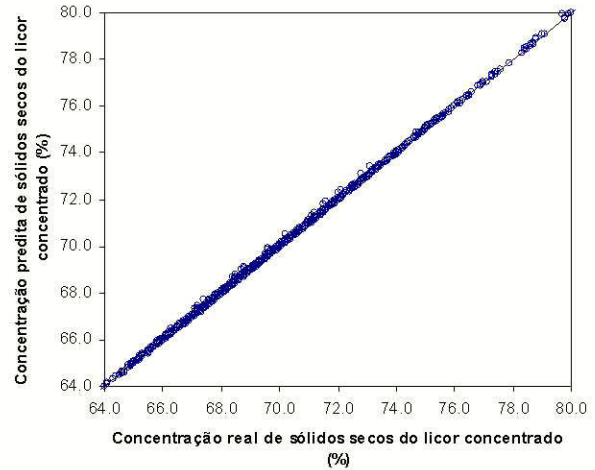


Figura 5 - Comparação entre os valores reais e estimados para o teor de sólidos secos no licor negro concentrado

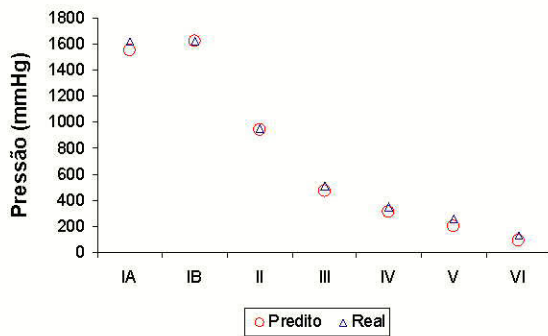
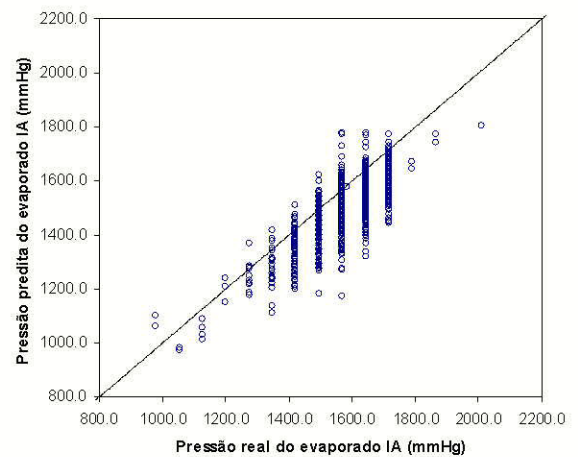


Figura 6 - Perfis de pressão do evaporado real e calculado ao longo da unidade de evaporação

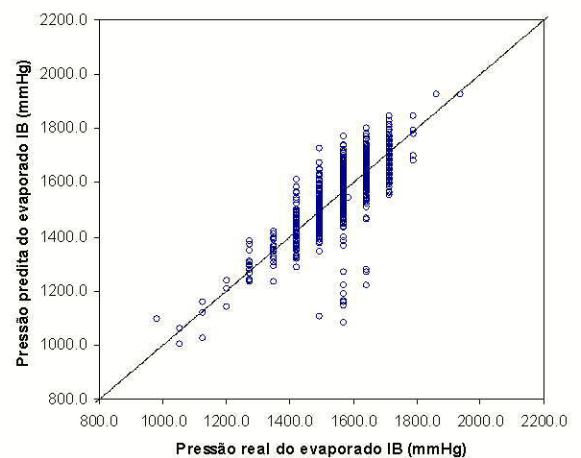
A Figura 10 apresenta o perfil de concentração de sólidos secos no licor negro ao longo do sistema de evaporação. Pode-se observar nessa Figura que os valores medidos pelos refratômetros na unidade industrial coincidem com os valores calculados.

A Figura 11 apresenta os dados do coeficiente global de transferência de calor (U) preditos pelo simulador WinGEMS para cada corpo de evaporação. Nela foram traçados os gráficos de U ao longo do tempo, desde o início da operação em Maio até a interrupção em Setembro de 2003. A primeira observação é que os valores de U obtidos para os evaporadores de filme descendente de placas concordam com os descritos na literatura segundo Nguyen e Venkatesh (1992) e Foust (1982) dentro de uma faixa de 3400 a $10000 \text{ kcal}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$. A segunda é que a dispersão dos pontos aumenta com o acréscimo do teor de sólidos dissolvidos. O acréscimo de sólidos modifica o comportamento reológico do fluido e aumenta a incidência de deposição que por sua vez afeta o processo provocando oscilações periódicas no U . A própria

sistemática de lavagens periódicas no 1º efeito também é uma fonte periódica de oscilações e a ela é creditada a causa da larga dispersão observada para os corpos A e B do 1º efeito.



(a)



(b)

Figura 7: Comparação entre os valores reais e estimados para a pressão do evaporado nos corpos do 1º efeito, (a) corpo IA e (b) corpo IB.

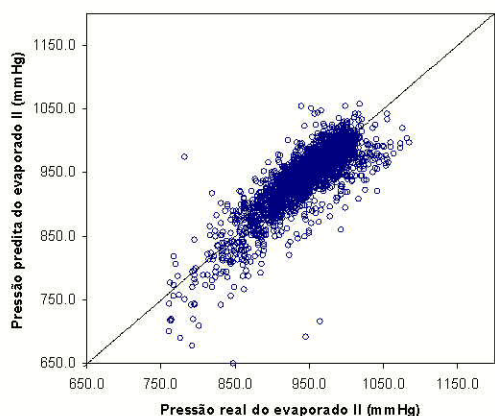


Figura 8 - Comparação entre os valores reais e estimados para a pressão do evaporado no 2º efeito

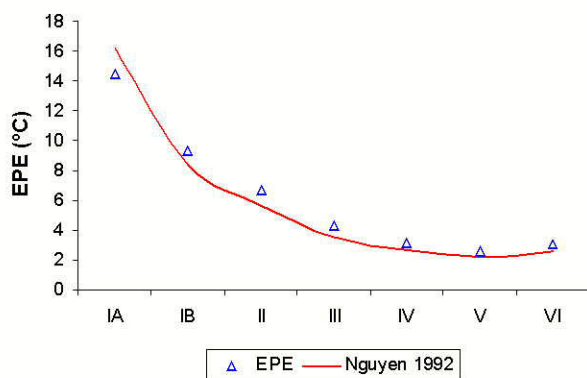


Figura 9 : Perfil do EPE no sistema de evaporação

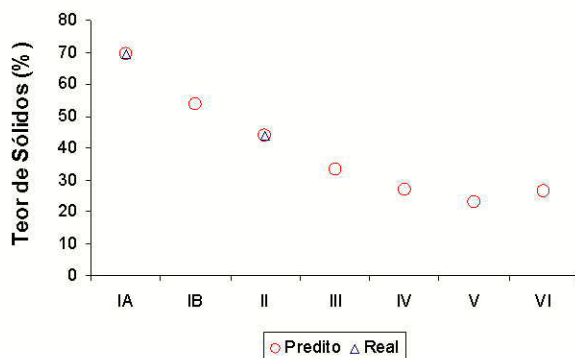


Figura 10 : Perfil de concentração de sólidos secos presentes no licor na unidade industrial (real) e calculado (predito) no sistema de evaporação

Quanto as oscilações verificadas para cada corpo ao longo do tempo, estas são alvo de um estudo mais detalhado e por isso fogem ao escopo deste trabalho.

Correlações para a determinação do coeficiente global de transferência de calor

A simulação efetuada com o programa WinGEMS permitiu o levantamento dos valores dos coeficientes globais de transferência de calor para cada corpo de evaporação. A partir desses dados, pode-se desenvolver um equacionamento que descreva seu comportamento frente as variáveis de processo, assim como sua dependência em relação ao licor processado e às características dos equipamentos.

A determinação das relações dos coeficientes globais de transferência de calor em função de números adimensionais tais como Reynolds e Prandtl serão de grande importância para trabalhos futuros. Através dessas relações o problema de transferência de calor poderá ser equacionado em função de variáveis do sistema tais como viscosidade do licor, temperaturas, pressões e vazões. Com isto, a partir das proposições citadas por Collier e Thome (1994) e Müller-Steinhagen e Jamialahmadi (1995), um modelo para a ebulição sob convecção forçada nos evaporadores de filme descendente será obtido.

Sendo U , o coeficiente global de transferência de calor, que para um equipamento operado sem a presença de deposições e incrustações, é dado pelo somatório das contribuições das resistências oferecidas i - pela convecção no lado do vapor condensante, ii - pela parede metálica da superfície de aquecimento e iii - pela convecção no lado do licor em aquecimento, o equacionamento do problema somente é possível com o conhecimento da contribuição de cada termo.

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_{\text{ladodolico}}} + \frac{l}{\lambda} + \frac{1}{h_{\text{ladodovapor}}} \right)} \quad (3)$$

O coeficiente convectivo do lado do licor pode ser obtido, pela definição do nº de Nusselt, dado pela razão $h.D / \lambda$.

$$Nu = \frac{\left(\frac{f_f}{8} \right) (Re - a_6) Pr}{a_1 + a_2 \left(\frac{f_f}{8} \right)^{a_3} (Pr^{a_4} - a_5)} \quad (4)$$

Conclusão

O modelo de avaliação do simulador WinGEMS proposto mostrou-se satisfatório, uma vez que forneceu erros relativos médios

de 2,4% para os cálculos do consumo de vapor vivo e de 2,5% para a economia de vapor, economia essa com média de 5,3 e desvio padrão igual a 0,08.

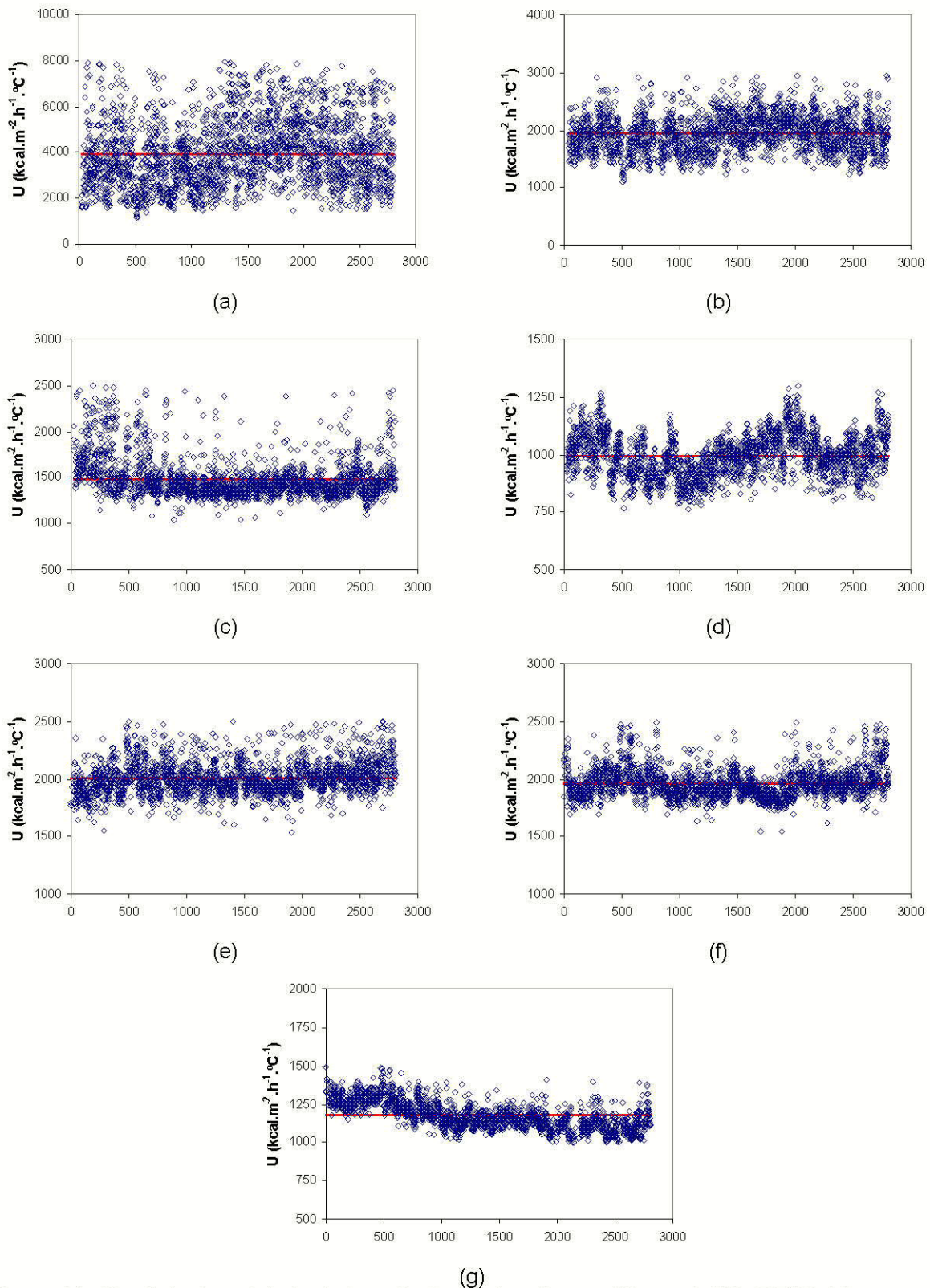


Figura 11 : Coeficientes globais de transferência de calor preditos pelo WinGEMS:(a) - corpo IA do 1º efeito, (b) - corpo IB do 1º efeito, (c) - 2º efeito, (d) - 3º efeito, (e) - 4º efeito, (f) - 5º efeito, (g) - 6º efeito

A partir do conhecimento do comportamento do coeficiente U em cada corpo de evaporação, um modelo matemático será desenvolvido e equacionado, como função da viscosidade e demais propriedades do licor, bem como os dados de projeto e das condições operacionais da unidade, por meio de modificações nas equações propostas por Collier e Thome (1994) e Müller-Steinhagen e Jamialahmadi (1995).

Quanto às correlações de U, de posse dessas equações será possível uma avaliação dos impactos e conseqüências de alterações na viscosidade do licor negro ou mesmo na configuração do processo.

O modelo proposto permitiu uma análise detalhada de toda a unidade de evaporação e os valores dos coeficientes globais de transferência de calor de cada corpo de evaporação puderam ser obtidos.

Nomenclatura

$a_1...a_6$	constantes específicas
A	área de troca térmica (m^2)
D	diâmetro hidráulico do escoamento
EPE	elevação do ponto de ebulição ($^{\circ}C$)
$EPE _{50\%}$	elevação do ponto de ebulição para um licor com 50% de sólidos secos dissolvidos ($^{\circ}C$)
f_f	fator de atrito do escoamento
$h_{ladolior}$	coeficiente convectivo no lado do licor
$h_{ladovapor}$	coeficiente convectivo no lado do vapor
n -	número de dados operacionais
S	teor de sólidos secos dissolvidos no licor negro
U	coeficiente global de transferência de calor ($kcal.kg^{-1}.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}$)
$Y_{calculado}$	dado de processo obtido pelo programa WinGEMS
Y_{real}	dados de processo obtido na unidade industrial
Re	nº de Reynolds ($(\dot{m} \cdot D) / \mu$)
Pr	nº de Prandtl ($(c_p \cdot \mu) / \lambda$)
λ	condutividade térmica do licor ($kcal.m^{-1}.h^{-1}.^{\circ}C^{-1}$)
μ	viscosidade dinâmica do licor ($N.s.m^{-2}$)

Literatura Citada

ADAMS, T.N.; FREDERICK, Wm.J.; GRACE, T.M.; HUPA, M.; LISA, K.; JONES, A.K.;

TRAN, H.; "Kraft Recovery Boilers", 1ª ed., Tappi Press, New York, 1997.

CARDOSO, M., PASSOS, M. L. A., CARAZZA, F., SANTOS, S. M., "Avaliação preliminar do processo de recuperação do licor de eucalipto para sua otimização", O Papel, 10, pp 80-84, 1998.

COLLIER, J. G., THOME, J. R., "Convective boiling and condensation", 3ª ed., Clarendon, New York, 596p, 1994.

EDWARDS, L. L., BALDUS, R. F., "Multiple-effect evaporation systems for kraft black liquor - Evaluation and design", Tappi, 61, (3), pp 75-78, 1978.

FOUST, A. S., "Princípios das Operações Unitárias", 2ª. ed, Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 670p, 1982.

Pacific Simulation, Inc. (1999-2004). WinGEMS (programa de simulação para industriais de papel e celulose), versão 5.3, www.pacsim.com.

MÜLLER-STEINHAGEN, H., JAMIALAHMADI, M., "Subcooled flow boiling heat transfer to solutions and mixtures", Engineering Foundation Conf. on Flow Boiling, Banff, Canada, 1995.

NGUYEN, X. N., VENKATESH, V., "Evaporation and concentration of black liquor" em "Chemical recovery in the alkaline pulping process", 3a. ed., Tappi Press, Atlanta, pp 5-35, 1992.

SÖDERHJELM, L., "Viscosity of Strong Black Liquor", Paperi ja Puu – Paper och Trä, 9, pp 642-652, 1986