

# MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA DE EVAPORAÇÃO MÚLTIPLO EFEITO

M. C. A. OLIVEIRA<sup>1</sup>, L. A. F. OLIVEIRA<sup>1</sup>, M. O. AGUIAR<sup>2</sup>, C. R. S. N. ALMEIDA<sup>3</sup>, G. M. ALMEIDA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de São João del-Rei, Departamento de Engenharia Química e Estatística

<sup>2</sup> Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Química

<sup>3</sup> Universidade Federal de São João del-Rei, Departamento de Engenharias de Telecomunicações e Mecatrônica, e Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Elétrica  
E-mail para contato: galmeida@deq.ufmg.br

**RESUMO** – Em qualquer parte do mundo, o papel da engenharia de processos é cada vez mais relevante para a própria manutenção dos negócios das indústrias químicas, dado um ambiente cada vez mais competitivo. Nesse trabalho, implementou-se um modelo do sistema de evaporação múltiplo efeito da indústria de celulose Kraft. Após validação, empregou-se o modelo para a simulação e análise de cenários operacionais usuais, quando é possível observar e comparar os efeitos sobre variáveis, intermediárias e de saída, a partir de perturbações, de magnitudes variadas, em diferentes variáveis de entrada. Ao final, observou-se a maior influência da temperatura do vapor vivo em relação à concentração inicial do licor sobre a demanda de vapor vivo, a temperatura do licor de saída do terceiro efeito, e a capacidade de transferência de calor no primeiro efeito.

## 1. INTRODUÇÃO

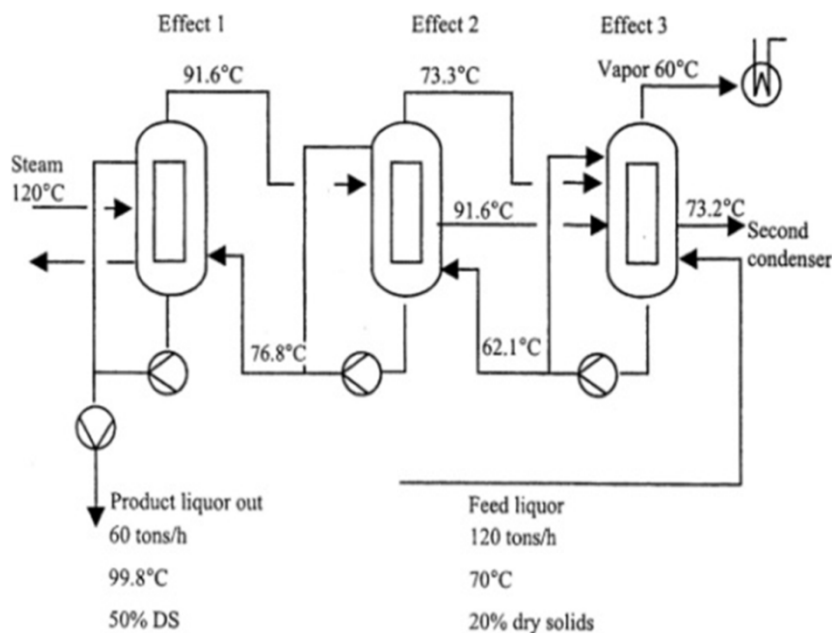
A simulação de cenários operacionais em processos químicos sempre foi uma etapa importante em análise de processos (Perlingeiro, 2005). Em função de sua crescente complexidade, maior integração entre unidades de processamento e outros fatores, a execução de perturbações *in loco* é uma atividade cada vez mais difícil, principalmente devido à questão de segurança operacional. Pelos mesmos fatores, com regulações mais restritas, seja da sociedade, de governos e de associações, a necessidade pela simulação de cenários operacionais é crescente. Alguns dos objetivos são, a verificação de robustez do processo, a identificação de gargalos nas operações, e a realização de testes de alterações em matérias-primas ou condições operacionais. Atualmente, a aquisição de informações até então desconhecidas, a favor de ganhos econômicos e produção mais limpa, é um fator essencial para a própria manutenção do negócio.

O presente trabalho utiliza um sistema de evaporação múltiplo efeito da indústria de celulose Kraft com o foco em simulação de cenários operacionais. O setor de celulose é responsável pela produção de papel, a partir do processo de separação das fibras de celulose da madeira, conhecida como polpação. O principal meio de obtenção de polpa celulósica em

todo o mundo é o processo Kraft, que faz uso de uma solução rica em hidróxido de sódio e sulfeto de sódio, denominada licor de cozimento (Assumpção *et al.*, 1988). O processo de obtenção de pasta celulósica é composto por duas unidades principais: a linha de fibras, cuja principal etapa é a polpação da madeira, e a unidade de recuperação química, responsável por tratar o licor negro, subproduto da polpação. Esse licor, com percentual mássico entre 15 e 20%, é concentrado em um sistema de evaporação múltiplo efeito antes de sua combustão em uma caldeira para recuperação do licor de cozimento e geração de vapor (Vakkilainen, 1999).

A Figura 1 é um esquema de um sistema de evaporação múltiplo, composto por três efeitos (em série), sendo que seis é a quantidade usual. Um efeito é composto por um ou mais corpos de evaporação. A concentração do licor de saída é superior a 60% em massa, sendo que fábricas modernas operam com concentrações entre 80 e 85%. A motivação em sistemas múltiplo efeito é a economia de energia, ao aproveitar o calor latente do vapor gerado em um efeito como meio de aquecimento para efeito subsequente. A pressão de operação é decrescente entre os efeitos, sendo maior no primeiro e negativa no último. Em um sistema de seis efeitos, a alimentação de vapor vivo é no primeiro efeito, e a de licor, em geral, a partir do quarto efeito. Desse modo, há um sistema misto entre as correntes de vapor e de licor, inicialmente co-corrente, e posteriormente, contracorrente. As principais métricas de operação de sistemas múltiplo efeito são, a capacidade de evaporação, dada em número de toneladas de água evaporada por hora, e a economia de vapor, dada pela razão entre número de toneladas de água evaporada por tonelada de vapor vivo (Venkatesh e Nguyen, 1992). A simulação de cenários operacionais em plantas de evaporação é importante em estudos de alterações de condições operacionais e de otimização, com o propósito de melhoria de desempenho. Um cenário extensivamente estudado atualmente é quanto a retirada de parte da matéria orgânica do licor (lignina) para outros fins e o efeito potencial no processo subsequente de combustão do licor na caldeira (não abordado nesse trabalho). Nesse trabalho, simularam-se perturbações positivas e negativas, com magnitudes variadas, em duas variáveis de entrada e observou-se os efeitos em três variáveis calculadas do primeiro efeito.

Figura 1 – Sistema de evaporação múltiplo efeito (Holmlund e Parviainen, 1999)



## 2. OBJETIVO GERAL

Implementar o modelo de Holmlund e Parviainen (1999), de um sistema de evaporação múltiplo efeito do processo Kraft, composto por três efeitos, e empregá-lo para a simulação de cenários operacionais.

## 3. METODOLOGIA

### 3.1. Implementação do modelo de Holmlund e Parviainen (1999)

Holmlund e Parviainen (1999) apresentaram um modelo simplificado de um sistema de evaporação múltiplo efeito para o licor negro do processo Kraft, composto por três corpos de evaporação (efeitos) (Figura 1). O licor, com entrada no terceiro efeito e saída no primeiro efeito, é concentrado de 20% para 50% em massa. As correlações empíricas para o calor específico do licor ( $C_p$ , em kJ/(kg·K); entrada e efeitos 1 a 3) e a Elevação do Ponto de Ebulição (EPE, em K; efeitos 1, 2 e 3) são conforme as Equações 1 (Masse et al., 1986) e 2, em que  $X$  e  $T$  são, respectivamente, a concentração em massa (em %) e a temperatura do licor (°C), e  $T_p$  é a temperatura de ebulição da água a pressão  $p$  (em K). O EPE é a diferença entre a temperatura de ebulição da solução de licor e aquela da água pura à mesma pressão. Quanto maior a concentração do licor, maior a diferença. A entalpia do vapor e do condensado, ou seja, o calor latente, é calculado a partir da tabela de vapor. Para aproveitamento de calor, considera-se um tanque *flash* para o condensado de saída do segundo e terceiro efeitos. Entre outras considerações, estão a ausência de perda de carga entre os efeitos e a ausência de perda de energia com gases não condensáveis a partir dos efeitos. A Tabela 1 contém o conjunto de variáveis de entrada, com os respectivos valores. Validou-se o modelo com o cálculo do erro relativo percentual ( $= (x - x^*)/x^* \cdot 100$ ).

$$C_p = 4,216(1 - X) + \left(1,675 + \frac{3,31T}{1000}\right)X + \left(4,87 - \frac{20T}{1000}\right)(1 - X)X^3 \quad (1)$$

$$EPE = (6,173X - 7,48X^{1,5} + 32,747X^2)(1 + 0,6(T_p - 3,7316)/100) \quad (2)$$

Tabela 1 – Conjunto de variáveis de entrada

Variável	Valor
Concentração do licor (entrada)	0,20
Concentração do licor (saída)	0,50
Temperatura do licor (entrada-efeito 3; °C)	70
Capacidade evaporação (kg/s)	30
Temperatura (de saturação) do vapor vivo (entrada-efeito 1; °C)	120
Temperatura (de saturação) do vapor (saída-efeito 3; °C)	60
Vazão mássica de sólidos secos (saída-efeito 1; kg/s)	10
Coefficiente global de transferência de calor (efeito 1; kW/(m <sup>2</sup> ·°C))	1,2
Coefficiente global de transferência de calor (efeito 2; kW/(m <sup>2</sup> ·°C))	1,6
Coefficiente global de transferência de calor (efeito 3; kW/(m <sup>2</sup> ·°C))	2,0
Área de transferência de calor (efeitos 1, 2 e 3; m <sup>2</sup> )	1040

### 3.2. Simulação de cenários operacionais

Após implementação e validação do modelo de Holmlund e Parviainen (1999), simulou-se um conjunto de cenários operacionais, a partir de perturbações de  $\pm 1$ , 5, 10 e 15% (em relação ao ponto nominal de operação) em um conjunto de variáveis de entrada (Tabela 1).

## 4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A Tabela 2 mostra o resultado e a comparação para um conjunto de variáveis calculadas. Pode-se observar, por completo, a baixa magnitude do erro relativo percentual. Portanto, validou-se a implementação do modelo de Holmlund e Parviainen (1999).

Tabela 2 – Resultado e comparação entre modelos para variáveis calculadas

Variável	Presente trabalho	Holmlund e Parviainen (1999)	Erro relativo (em %)
Concentração do licor (saída-efeito 3)	0,25	0,25	0,000
Elevação do ponto de ebulição (efeito 3; °C)	2,15	2,1	2,381
Temperatura do licor (saída-efeito 1; °C)	100,85	99,8	1,052
Temperatura (de saturação) do vapor (saída-efeito 1; °C)	92,62	91,6	1,114
Calor específico do licor (efeito 1; kJ/(kg·°C))	3,04	3,0	1,333
Demanda de energia (efeito 1; kJ/s)	24820	24819	0,004
Produção (demanda) de vapor (efeito 1; kg/s)	11,30	11,3	0,000
Condensado (tanque <i>flash</i> do efeito 1 para o efeito 2; kg/s)	0,62	0,6	3,333
Capacidade de transferência de calor (efeito 1; kJ/s)	23899	25240	-5,313

Em seguida, utilizou-se o modelo para a simulação de cenários, com perturbações em variáveis de entrada (seção 3.2). A Tabela 3 é um quadro-resumo com os resultados para perturbações (em relação ao ponto nominal; Tabela 1) positivas (+1%, +5% e +10%) e negativas (-1%, -5% e -10%) na concentração do licor de entrada e na temperatura (de saturação) do vapor vivo. Analisaram-se os efeitos sobre um conjunto de variáveis de saída do primeiro efeito. O estudo da demanda de vapor é importante pela relação direta com o consumo de energia; já a análise da temperatura do licor de saída é importante por questões de eficiência operacional e de bombeamento, por causa da viscosidade do licor; e a investigação sobre a capacidade de transferência de calor também é importante pela relação direta com a eficiência operacional. A Figura 2 mostra os resultados através de gráficos. Pode-se observar, em geral, a maior influência da temperatura do vapor vivo em relação à concentração do licor de entrada, cujo maior efeito é sobre a demanda de vapor. Ainda, as mudanças significativas sobre a capacidade de transferência de calor.

Tabela 3 – Resultado das perturbações, positivas e negativas, na concentração do licor de entrada, com ponto nominal de 0,20 (Tabela 1)

Variável	Ponto nominal	Perturbação			
		<b>Concentração do licor de entrada (ponto nominal: 0,20)</b>			
		<b>+1%</b>	<b>+5%</b>	<b>+10%</b>	<b>+15%</b>
Produção (demanda) de vapor (efeito 1; kg/s)	11,3	11,31	11,37	11,43	11,50
Temperatura do licor (saída-efeito 1; °C)	99,8	100,88	101,01	101,16	101,32
Capacidade de transferência de calor (efeito 1; kJ/s)	23899	23860	23704	23510	23316
		<b>-1%</b>	<b>-5%</b>	<b>-10%</b>	<b>-15%</b>
Produção (demanda) de vapor (efeito 1; kg/s)	11,3	11,29	11,23	11,16	11,09
Temperatura do licor (saída-efeito 1; °C)	99,8	100,82	100,69	100,54	100,38
Capacidade de transferência de calor (efeito 1; kJ/s)	23899	23938	24095	24291	24487
		<b>Temperatura (de saturação) do vapor vivo (ponto nominal: 120 °C)</b>			
		<b>+1%</b>	<b>+5%</b>	<b>+10%</b>	<b>+15%</b>
Produção (demanda) de vapor (efeito 1; kg/s)	11,3	11,33	11,44	11,59	11,74
Temperatura do licor (saída-efeito 1; °C)	99,8	101,55	104,35	107,85	111,35
Capacidade de transferência de calor (efeito 1; kJ/s)	23899	24593	27019	30139	33259
		<b>-1%</b>	<b>-5%</b>	<b>-10%</b>	<b>-15%</b>
Produção (demanda) de vapor (efeito 1; kg/s)	11,3	11,27	11,16	11,02	10,89
Temperatura do licor (saída-efeito 1; °C)	99,8	100,15	97,35	93,85	90,35
Capacidade de transferência de calor (efeito 1; kJ/s)	23899	23275	20779	17659	14539

Figura 2 – Resultado das perturbações na concentração do licor de entrada e na temperatura (de saturação) do vapor vivo (pontos nominais: 0,20 e 120 °C, respectivamente; Tabela 1)

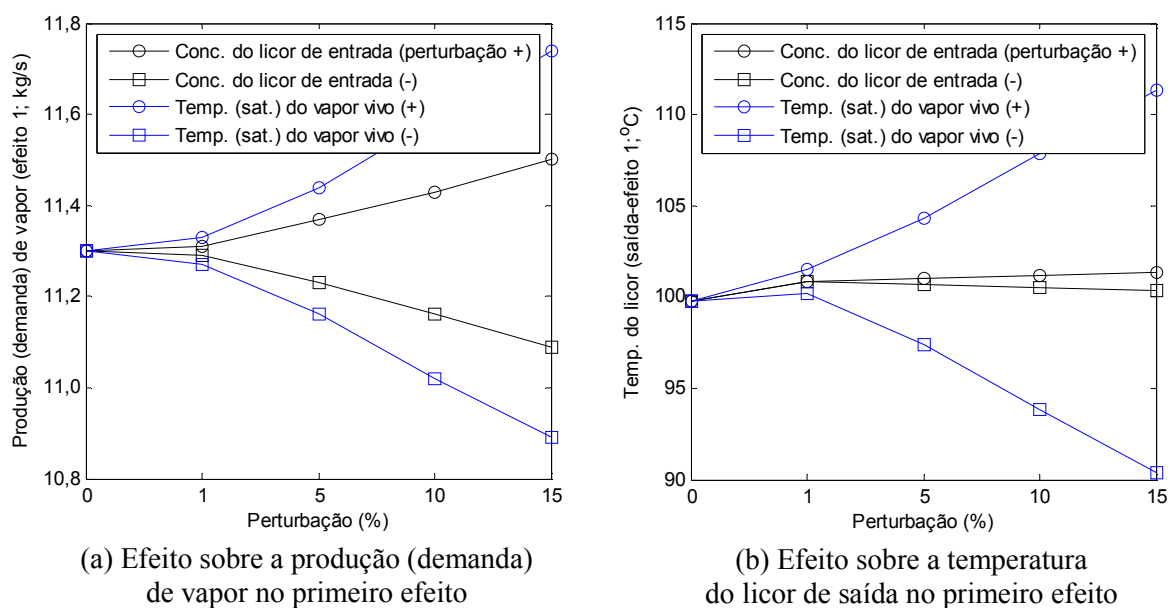
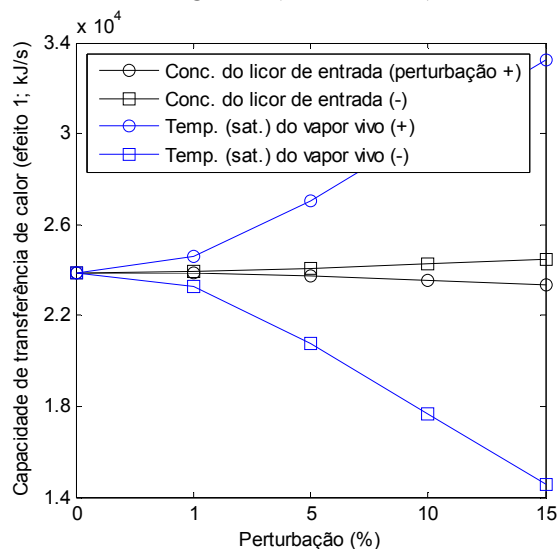


Figura 2 (continuação)



(c) Efeito sobre a capacidade de transferência de calor no primeiro efeito

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Empregou o modelo de Holmlund e Parviainen (1999), de um sistema de evaporação múltiplo efeito, para um estudo de simulação de cenários operacionais. Após a sua implementação e validação, simularam-se perturbações positivas e negativas, com magnitudes variadas, em duas variáveis de entrada e observaram-se os efeitos em três variáveis calculadas do primeiro efeito. Em geral, esse tipo de análise é importante para verificar o comportamento do processo em torno do ponto nominal de operação; entender melhor os relacionamentos entre variáveis de entrada, intermediárias e de saída; identificar gargalos e pontos de melhoria; e construir modelos mais complexos.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- ASSUMPÇÃO, R. M. V.; CAHEN, R.; PHILIPP, P. *Celulose e Papel: Tecnologia de Fabricação da Pasta Celulósica*, v. 1, 2a ed., São Paulo: IPT e SENAI, 1988. Cap. VI, p. 169-319.
- HOLMLUND, K.; PARVIAINEN, K. Evaporation of Black Liquor. In: Gulichsen, J. e Fogelholm, C.-J. (eds.), *Chemical pulping (Book 6B)*. Atlanta: TAPPI Press, 1999, p. 396-417.
- MASSE, M.A.; KIRAN, E.; FRICKE, A.L. Freezing and Glass Transition Phenomena in Polymer-Diluent Mixtures, *Polymer*, v. 27, p. 619-622, 1986.
- PERLINGEIRO, C. A. G. *Engenharia de Processos: Análise, Simulação, Otimização e Síntese de Processos Químicos*, Brasil: Blucher, 2005.
- VAKKILAINEN, E. Chemical Recovery. In: Gulichsen, J. e Fogelholm, C.-J. (eds.), *Chemical pulping (Book 6B)*. Atlanta: TAPPI Press, 1999, p. 396-417.
- VENKATESH, V.; NGUYEN, X. N., Evaporation and Concentration of Black Liquor. In: Green, R. P., Hough, G. (eds), *Chemical Recovery in The Alkaline Pulping Processes*, 3a ed. Atlanta: TAPPI Press, 1992.