

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ESTRATÉGIA DE MODELAGEM NA PREDIÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DO LICOR PRETO KRAFT QUEIMADO EM CALDEIRAS DE RECUPERAÇÃO

Jeniffer Cristina Silveira¹
Andréa Oliveira Souza da Costa²
Esly Ferreira da Costa Junior²

¹*Universidade Federal de Uberlândia*

²*Universidade Federal de Minas Gerais*

DOI: <https://doi.org/10.47168/rbe.v25i1.399>

RESUMO

Plantas modernas de obtenção de celulose possuem como principal combustível para a geração de energia térmica e elétrica o licor preto. Este necessita passar por um sistema de evaporadores de múltiplo efeito para que seu teor de sólidos aumente até cerca de 80%. Possíveis alterações no processo de evaporação que vise aumentar a eficiência dos mesmos são de grande interesse industrial. Neste trabalho foram comparadas duas estratégias de modelagem empregadas na descrição dos evaporadores de múltiplo efeito de uma fábrica de celulose, com o intuito de identificar a estratégia mais apropriada sob o ponto de vista energético. Numa abordagem, considerou-se que a massa de licor preto se mantém constante no interior do evaporador, enquanto na outra admitiu-se que o volume de licor preto permanece inalterado. As abordagens apresentaram resultados claramente distintos, quando faixas amplas de variação de concentração de licor preto ($\geq 31\%$) foram empregadas em num mesmo evaporador. Para faixas mais restritas ($\leq 10\%$) as abordagens apresentaram perfis semelhantes de concentração. Portanto, para uma variação de concentração de licor preto no evaporador menor ou igual a 10% ambas as abordagens podem ser empregadas sem perda energética para o processo.

Palavras-chave: Produção de celulose, Licor preto, Evaporadores de múltiplo efeito, Modelo fenomenológico.

ABSTRACT

Modern plants for obtaining cellulose have as main fuel for generation of thermal and electric energy the black liquor. This needs to pass for a system of multiple effect evaporators to increase their solids content even about 80%. Possible changes in the evaporation process that aim to increase their efficiency are of great industrial interest. In this work was compared distinct modeling strategies employed in describing of multiple effect evaporators of a cellulose mill, in order to identify the most appropriate strategy from the energy point of view. In one approach, the mass of the black liquor was held constant inside the evaporator, while another admitted that the volume of black liquor remains unchanged. The approaches presented clearly different results, when a wide range of black liquor concentration ($\geq 31\%$) was employed in the same evaporator. For a more restricted range ($\leq 10\%$) the approaches presented similar profiles of black liquor concentration. However, for a concentration variation of black liquor in the evaporator less than or equal to 10% both approaches can be used without energy loss for the process.

Key words: Production of cellulose, Black liquor, Multiple effect evaporators, Phenomenological model.

1. INTRODUÇÃO

Para manter o crescimento econômico o setor industrial constantemente enfrenta desafios na geração de energia em todo o mundo. Como uma possibilidade de descentralização da geração energética, os biocombustíveis têm se mostrado uma alternativa sustentável e lucrativa, sendo aplicados em diferentes segmentos industriais (VIANA et. al., 2017; RIBEIRO E SEABRA, 2017).

Indiretamente envolvidas no comércio energético, as indústrias de papel e celulose dependem dos biocombustíveis para serem mais competitivas. As fábricas de celulose combinam a produção de energia e calor útil por meio da disponibilidade de combustíveis residuais processados (COSTA et. al., 2016). O setor utiliza quase que exclusivamente os subprodutos licor preto e biomassa.

A indústria de papel e celulose é responsável por gerar a maior parte da energia consumida em seus processos produtivos. Segundo Martin (2017) plantas industriais mais modernas são capazes de produzir toda a energia necessária ao processo fabril com sobra. O excedente dessa energia verde vem sendo comercializado e se fortalecendo como frente adicional de negócios do setor.

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética Nacional 75% da energia consumida pelo setor em 2018 foi proveniente de fontes renováveis. Destaca-se a participação de 67% de energia térmica e elétrica geradas a partir de biomassa e licor preto.

No balanço energético setorial de 2018 (IBÁ, 2019) o licor preto e a biomassa representaram 64,3% e 18,1%, respectivamente, de toda energia produzida pelo seguimento industrial. Houve um aumento de 2,3% na produção de energia elétrica em relação ao ano anterior. Foram gerados 73,0 milhões de gigajoules (GJ), ou seja, 73% dos 99,8 milhões de GJ foram consumidos pelo setor. Cerca de 18,3 milhões de GJ foram vendidos para a rede pública.

Subproduto da rota kraft, o licor preto é caracterizado como uma mistura complexa, constituído de substâncias orgânicas dissolvidas da madeira e reagentes inorgânicos utilizados no digestor para o cozimento dos cavacos de madeira (ALVES et. al., 2015). Por razões econômicas e ambientais a recuperação dos produtos químicos formados durante o processo é de fundamental importância para a viabilidade de uma planta fabril. A unidade de recuperação de químicos é constituída de um sistema de evaporadores de múltiplo efeito, de caldeiras de recuperação e de caustificadores (MARTIN, 2017).

A solução a ser concentrada passa por todos os evaporadores dispostos em série. Por meio da evaporação a biomassa contida no licor preto é concentrada e seu teor de sólidos varia de 15% para cerca de 80% (ARAUJO et. al., 2016). A principal vantagem na utilização dos evaporadores de múltiplo efeito consiste na economia de energia, verificada ao utilizar o evaporado de um equipamento como fonte de energia de outro equipamento (PERRY E GREEN, 2008). No primeiro efeito o licor preto sofre sua maior alteração de concentração e é neste efeito que se define a concentração final do licor a ser queimado na caldeira.

O licor mais concentrado é o combustível das caldeiras de recuperação. A alimentação de licor com concentração próxima a 80% permite aumentar a eficiência e estabilidade da caldeira (CARDOSO et. al., 2009). O vapor superaquecido gerado nas caldeiras supre a demanda de energia térmica necessária, sendo também empregado na obtenção de grande parte da energia elétrica utilizada pela fábrica. Para garantir condições satisfatórias de funcionamento da caldeira o licor preto deve ser alimentado com umidade controlada, de modo a favorecer sua queima sem prejudicar a estabilidade do sistema. A taxa de alimentação de licor preto à caldeira pode variar em função de sua concentração. As características deste fluido podem afetar fortemente sua queima em caldeiras de recuperação. Suas propriedades físico-químicas podem variar em função da procedência dos mesmos e do processo empregado (CARDOSO, OLIVEIRA E PASSOS, 2009; COSTA et. al., 2016).

Parte significativa da energia demandada pela indústria é consumida no processo de evaporação. Possíveis alterações nesse processo que possibilitem aumentar a eficiência do mesmo são de grande interesse industrial (KHANAM e MOHANTY, 2011). Estudos da

literatura (DARMAWAN et. al., 2017; VERMA et. al., 2018a; CAO et. al., 2018; VERMA et. al., 2018b; DARMAWAN et. al., 2019; MOREIRA et. al., 2019; DARMAWAN et. al., 2020) tem avaliado o efeito de mudanças operacionais e de projeto no sistema de evaporadores de múltiplo efeito, visando a máxima eficiência energética e exergetica. Tais estudos consideraram a integração de outros equipamentos ao sistema de evaporadores, alternativas de economia de vapor para redução de custos, atuação de controladores de melhor desempenho nas alterações transitórias da concentração do produto e a recuperação de exergia. Os estudos citados têm por objetivo comum o máximo aproveitamento do poder energético advindo da evaporação do licor preto.

A simulação computacional deste processo possibilita testar melhores condições de operação dos equipamentos de forma rápida e eficiente. É possível prever a concentração máxima de licor preto para alimentação adequada à caldeira e o consumo mínimo de energia no processo de evaporação (CAMPOS, 2009). Diante da importância do sistema de evaporadores de múltiplo efeito no contexto energético da fábrica, estudos que visam aprimorar a representação matemática do processo são de grande valia, visto que constituem ferramentas úteis a tomada de decisões. Sendo assim, este trabalho tem por objetivo comparar distintas abordagens na modelagem de um sistema de evaporadores de múltiplo efeito de uma fábrica de celulose. Uma das abordagens considerou que a massa de licor preto permanece constante no interior do evaporador, enquanto a outra admitiu que o volume de licor preto se mantém invariável. Ressalta-se que a segunda abordagem se mostra fisicamente mais realista, uma vez que o volume de licor dentro dos evaporadores é controlado. Mesmo com o controle do volume, a massa dentro do evaporar não permanece constante. Isso devido às variações de densidade do licor preto, causadas pelas alterações na concentração de sólidos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O modelo matemático proposto originalmente por Holland (1983) foi adaptado ao processo de concentração de licor preto de uma fábrica de celulose. Segundo Holland (1983), as considerações do modelo são: (i) mistura perfeita para o líquido retido no evaporador; (ii) retenção de vapor desprezível quando comparada à de líquido; (iii) retenção nula de energia nas paredes do equipamento; (iv) perdas para o ambiente desprezíveis. Além destas, outras considerações foram adotadas no decorrer do trabalho: (v) equilíbrio termodinâmico entre a mistura líquida em evaporação e os seus vapores e (vi) concentração do licor no interior dos evaporadores uniforme e igual ao valor de saída.

Admitiu-se um volume de controle representativo para todos os evaporadores do primeiro efeito, em função das correntes de entrada e saída, conforme apresentado na Figura 1.

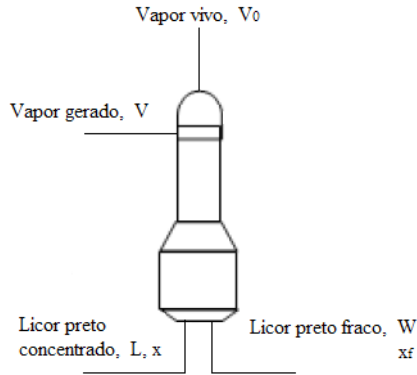


Figura 1 - Representação do evaporador estudado

As equações que compõem o modelo de Holland (1983) ad-vêm do balanço de massa global, balanço de massa de sólidos e balanço de energia, respectivamente, Equação (1), (2) e (3):

$$\frac{d(\mu \cdot x)}{dt} = W \cdot x_f - L \cdot x \quad (1)$$

$$\frac{d(\mu \cdot x)}{dt} = W \cdot x_f - L \cdot x \quad (2)$$

$$\frac{d(\mu \cdot h(\tau, x))}{dt} = W \cdot h(T_f, x_f) + V_0 \cdot Q - V \cdot H(\tau) - L \cdot h(\tau, x) \quad (3)$$

sendo W , L , V e V_0 as vazões mássicas de licor na entrada, licor na saída, vapor gerado e de vapor vivo, respectivamente, μ a massa de licor preto no evaporador, x a concentração de licor preto na saída, x_f a concentração de licor preto na entrada, τ a temperatura de ebulição do licor preto, $h(\tau, x)$ a entalpia do licor preto dentro do evaporador, $h(T_f, x_f)$ a entalpia do licor preto na entrada do evaporador, Q o calor latente de condensação da água e $H(\tau)$ a entalpia do vapor gerado.

Dois abordagens distintas (Modelagem A e Modelagem B) foram empregadas na modelagem fenomenológica dos evaporadores.

As expressões algébricas para o cômputo de L e V foram determinadas para ambas as abordagens.

2.1 Modelagem A

Esta abordagem foi desenvolvida segundo Costa (2000); Costa e Lima (2003) e Campos (2009). A consideração admitida foi que a massa de licor preto e a pressão dentro do evaporador permanecem constantes ao longo do tempo. A partir desta consideração o balanço de massa (Equação 1) foi reescrito da seguinte forma:

$$L = W - V \quad (4)$$

Derivando pela regra do produto o lado esquerdo da Equação (2) e de acordo com a consideração de massa de licor preto constante tem-se:

$$\mu \cdot \frac{dx}{dt} = W \cdot x_f - L \cdot x \quad (5)$$

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{\mu} (W \cdot x_f - L \cdot x) \quad (6)$$

Realizando o mesmo procedimento descrito anteriormente para o balanço de energia (Equação 3) tem-se:

$$\mu \cdot \frac{d[h(\tau, x)]}{dt} = W \cdot h(T_f, x_f) + V_0 \cdot Q - V \cdot H(\tau) - L \cdot h(\tau, x) \quad (7)$$

Considerando pressão (P) constante:

$$\mu \cdot \frac{d[h(\tau, x)]}{dt} = \frac{\partial[h(\tau, x)]}{\partial \tau} \cdot \frac{d\tau}{dt} + \frac{\partial[h(\tau, x)]}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} \quad (8)$$

Sabe-se que a temperatura de ebulição do licor preto (τ) é função da pressão e da concentração. Entretanto, durante a operação do evaporador, a pressão em cada efeito é constante e assim:

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{d\tau}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} \quad (9)$$

Substituindo a Equação (9) na Equação (8) e rearranjando tem-se:

$$D_A = \frac{\partial[h(\tau, x)]}{\partial\tau} \cdot \frac{d\tau}{dx} + \frac{\partial[h(\tau, x)]}{\partial x} \quad (10)$$

Sendo D_A a variação da entalpia com a concentração:

$$\frac{\partial[h(\tau, x)]}{\partial\tau} = \frac{dx}{dt} \cdot D_A \quad (11)$$

Substituindo a Equação (11) na Equação (8) obtém-se:

$$\mu \cdot \frac{dx}{dt} \cdot D_A = \frac{\partial[h(\tau, x)]}{\partial\tau} \cdot \frac{d\tau}{dt} + \frac{\partial[h(\tau, x)]}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} \quad (12)$$

Substituindo a Equação (6) e a Equação (4) na Equação (12) é possível obter:

$$V = \frac{W \cdot [h(T_f, x_f) - h(\tau, x) + D_A \cdot (x - x_f)] + Q}{D_A \cdot x + H(\tau) - h(\tau, x)} \quad (13)$$

O sistema de equações a ser resolvido, considerando a massa de licor preto no evaporador constante, é composto pelas Equações (4), (6) e (13).

2.2 Modelagem B

Nesta abordagem a consideração admitida foi que o volume de licor preto e a pressão dentro do evaporador permanecem constantes ao longo do tempo. A modelagem B é apresentada segundo os trabalhos de Schuina, Costa e Costa Jr. (2009) e Carvalho, Costa e Costa Jr. (2009).

Derivando pela regra do produto, no lado esquerdo da Equação (2) tem-se:

$$x \cdot \frac{d\mu}{dt} + \mu \cdot \frac{dx}{dt} = W \cdot x_f - L \cdot x \quad (14)$$

Substituindo a Equação (14) na Equação (1) obtém-se:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{W}{\mu} (x_f - x) + \frac{V}{\mu} \cdot x \quad (15)$$

A relação matemática para determinar o vapor gerado no evaporador (V) é representada pela Equação (13). A mesma relação para V é utilizada nas duas abordagens. Esta relação foi obtida por meio do balanço de energia, o qual não sofre influência das considerações massa de licor preto constante (Modelagem A) e volume de licor preto constante (Modelagem B).

Para determinar a equação que computa a vazão mássica de licor preto na saída do evaporador (L), foi aplicada a consideração de volume constante:

$$\frac{\mu}{\rho(\tau, x)} = Vol \quad (16)$$

onde Vol corresponde ao volume de licor preto dentro do evaporador e ρ a densidade do licor preto. Derivando a Equação (16) em relação ao tempo tem-se:

$$\frac{d\left[\frac{\mu}{\rho(\tau, x)}\right]}{dt} = \frac{d[Vol]}{dt} = 0 \quad (17)$$

Aplicando a derivada do quociente no lado esquerdo da Equação (17) encontra-se:

$$\rho(\tau, x) \cdot \frac{d\mu}{dt} - \mu \cdot \frac{d\rho(\tau, x)}{dt} = 0 \quad (18)$$

Após substituir a Equação (1) na Equação (18) e aplicar a regra da cadeia para a derivada da densidade com o tempo, obteve-se:

$$\rho(\tau, x) \cdot (W - V - L) - \mu \cdot \left(\frac{d\rho}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{d\rho}{d\tau} \cdot \frac{d\tau}{dt} \right) = 0 \quad (19)$$

Substituindo a Equação (9) na Equação (19) obtém-se:

$$\rho(\tau, x) \cdot (W - V - L) - \mu \cdot \left(\frac{d\rho}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{d\rho}{d\tau} \cdot \frac{d\tau}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} \right) = 0 \quad (20)$$

Substituindo a Equação (15) na Equação (20) e rearranjando, obteve-se:

$$L = \frac{[-(W \cdot (x - x_f) + V \cdot x) \cdot \left(\frac{d\rho}{dx} + \frac{d\rho}{d\tau} \cdot \frac{d\tau}{dx} \right) + \rho(\tau, x) \cdot (W - V)]}{\rho(\tau, x)} \quad (21)$$

As Equações (1), (13), (15) e (21) compõem o sistema de equações matemáticas a serem resolvidas para a modelagem B, que considerou volume de licor preto no evaporador constante.

2.3 Relações adicionais

Relações empíricas foram utilizadas para descrever a entalpia, a elevação do ponto de ebulição (EPE) e a densidade do licor preto, como também a entalpia do vapor gerado no evaporador.

Segundo Costa, Passos e Cardoso (1999), que estudaram a densidade do licor preto proveniente da CENIBRA (Celulose Nipo-Brasileira), a Equação (22) descreve a densidade do licor preto em função da concentração de sólidos.

$$\rho(x) = \left[\left(\frac{x}{1829,2} \right) + \left(\frac{(1-x)}{997,3} \right) \right]^{-1} \quad (22)$$

Para determinar a elevação do ponto de ebulição do licor preto utilizou-se a Equação (23), obtida por Costa (2000) a partir de um conjunto de dados experimentais. Segundo a pesquisadora, esta relação foi capaz de descrever 96,68% da variabilidade experimental.

$$\text{EPE}(x) = 1,0099140 \cdot e^{3,940961 \cdot x} \quad (23)$$

A temperatura do licor preto foi obtida por meio da soma entre a temperatura de saturação da água, na mesma pressão do licor preto no evaporador, com a elevação do ponto de ebulição do licor preto. De acordo com Costa (2000) essa relação é dada por:

$$\tau(x, P) = T_{\text{saturação}}(P) + \text{EPE}(x) \quad (24)$$

A entalpia do licor preto foi obtida segundo Costa (2000) que integrou a Equação (25), correspondente ao calor específico do licor $C_p(\tau, x)$, de modo a obter a Equação (26).

$$C_p(\tau, x) = 4053,7372 + 0,3349 \cdot \tau - 3312,3550 \cdot x + 2,6808 \cdot x \cdot \tau \quad (25)$$

$$h(\tau, x) = 3963,6 \cdot \tau - 1094968,28 + 0,165 \cdot \tau^2 - 4044,40 \cdot x \cdot \tau + 1004749,77 \cdot x + 1,34 \cdot x \cdot \tau^2 \quad (26)$$

A equação apresentada anteriormente foi utilizada para descrever a entalpia do licor na temperatura de entrada e na temperatura de saída do fluido. A expressão que descreve a entalpia do vapor gerado no evaporador é apresentada segundo Costa (2000):

$$H(\tau) = 1174,6 \cdot \tau + 2 \cdot 10^6 \quad (27)$$

As condições operacionais necessárias para a simulação do comportamento dinâmico do evaporador estudado são apresentadas na Tabela 1. Esses valores foram obtidos por meio de dados industriais de uma fábrica de celulose.

Tabela 1 - Condições operacionais

Variáveis	Valores
x	0,649
W	1.10 ⁵ kg/h
T _{sat}	396,4 K
T _f	400,9 K
T ₀	420,5 K
P	220 kPa
V ₀	15 ton./h

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, a quantidade de calor disponível no evaporador foi determinada por meio da vazão de vapor vivo alimentado ao evaporador (V_0) e o calor latente de condensação ($H_{\text{condensação}}$) da respectiva corrente. Foi considerado somente o calor latente de condensação, visto que, a perda de energia atribuída à mudança de fase é consideravelmente superior à energia perdida durante o resfriamento da corrente de vapor. De posse da pressão no evaporador (220 kPa), e com o auxílio de tabelas termodinâmicas (SMITH, ABBOTT E VAN NESS, 2007), obteve-se a entalpia da corrente de vapor de alimentação, correspondente a 2194,07 kJ/kg. O cálculo realizado é apresentado a seguir:

$$Q = H_{\text{condensação}} \cdot V_0 \quad (28)$$

$$Q = 2194,07 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \cdot 15 \left(\frac{\text{ton}}{\text{h}} \right) \cdot 1000 \left(\frac{\text{kg}}{\text{ton}} \right) = 3,2911 \cdot 10^{10} \text{J/h} \quad (29)$$

Os modelos matemáticos resultantes da aplicação da modelagem A e da modelagem B foram implementados no software MATLAB®. Para a resolução das equações diferenciais empregou-se a rotina de

integração ode45, a qual utiliza o método numérico Runge-Kutta.

A massa de licor preto retida no evaporador ao longo do tempo de operação, obtida por meio das modelagens A e B, é mostrada na Figura 2(a) e qual apresenta 98% do estado estacionário.

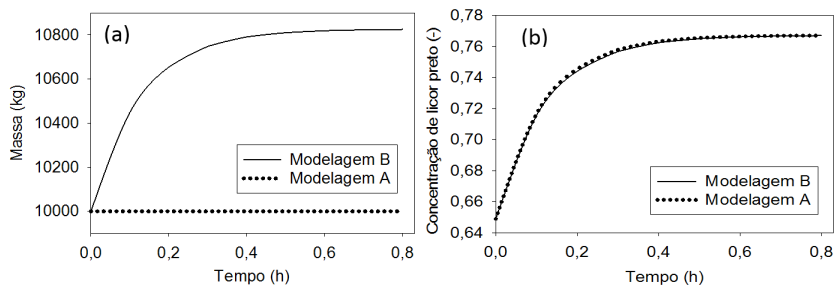


Figura 2 - Perfil dinâmico da massa (a) e da concentração (b) de licor preto retido no evaporador

Analisando-se a Figura 2(a) observa-se que a massa permaneceu constante para a modelagem que utiliza tal consideração (Modelagem A). Entretanto, para a modelagem assumindo volume constante (Modelagem B), percebeu-se um aumento da massa de licor preto no interior do evaporador, sendo o estado estacionário atingido com 10823,2 kg.

A Figura 2(b) ilustra o perfil de concentração de licor preto dentro do evaporador no decorrer da operação, obtido por meio da modelagem A e B. Nota-se que as duas modelagens apresentaram o mesmo perfil de concentração de sólidos. O estado estacionário foi alcançado com $x = 0,767$.

Era esperado que a concentração de licor preto atingisse o estado estacionário de forma distinta para as diferentes modelagens empregadas, entretanto, isso não foi observado. Para a concentração inicial de licor preto utilizada ($x = 0,649$), a consideração de volume constante, embora mais correta do ponto de vista físico, do ponto de vista prático não exerce efeito sobre a concentração final de licor preto.

Para verificar se as modelagens estudadas não possuem comportamentos diferentes em outras condições operacionais, foram testadas diferentes faixas de operação. A concentração de licor preto alimentado ao evaporador foi modificada e, conseqüentemente, a quantidade de calor transferida ao sistema. Para cada situação abordada, manteve-se constante a concentração final do licor preto ($x_f = 0,767$). As condições empregadas nas simulações são apresentadas na Tabela 2, considerando o tempo de operação de 2h. Os perfis dinâmicos obtidos são apresentados na Figura 3.

Tabela 2 - Condições iniciais

Condições	Variáveis	Valores
1	x Q	0,15 15,9.10 ¹⁰ J/h
2	x Q	0,45 8,24.10 ¹⁰ J/h
3	x Q	0,65 3,15.10 ¹⁰ J/h

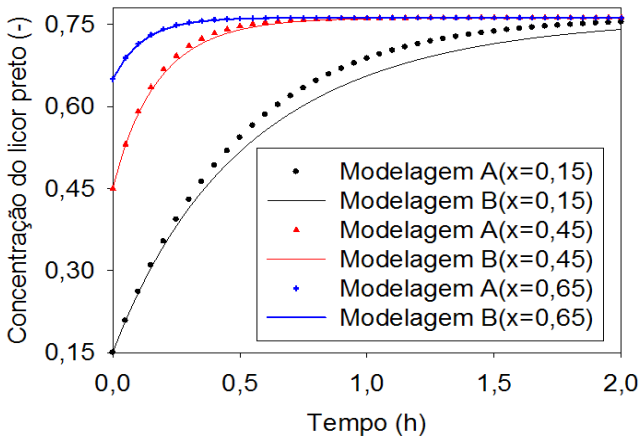


Figura 3 - Variação da concentração de licor preto dentro do evaporador em diferentes condições operacionais, para 2h de operação

De acordo com a Figura 3, tem-se uma diferenciação dos perfis de concentração do licor preto para as modelagens abordadas. Quanto menor a concentração inicial de licor preto na alimentação, maior a diferença entre os modelos. Nota-se que no tempo de operação de 2h não foi possível atingir o estado estacionário para a primeira situação testada ($x = 0,15$). Com isso optou-se por prolongar a operação até que o estado estacionário fosse alcançado, conforme apresentado na Figura 4. Após 3h de operação todas as situações testadas atingiram o estado estacionário. Os perfis de concentração de licor preto em um único evaporador, apresentados nas Figuras 3 e 4, foram semelhantes aos dados industriais reportados por Bahargava et. al. (2007) e Moreira et. al. (2019) para um sistema de evaporadores de múltiplo efeito, operando com uma variação de concentração de sólidos de 39% e 60%, respectivamente.

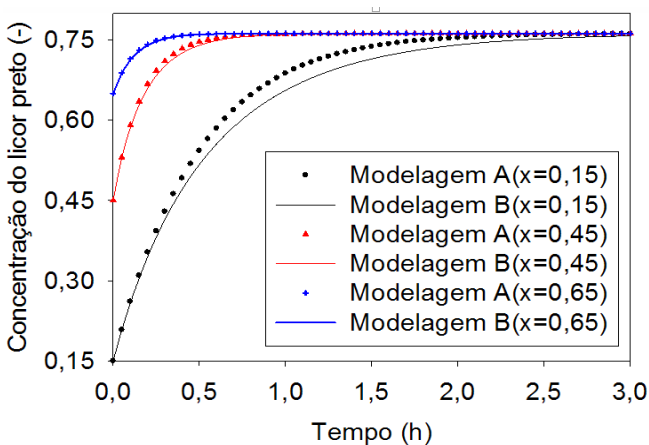


Figura 4 - Variação da concentração de licor preto dentro do evaporador em diferentes condições operacionais, para 3h de operação

Um perfil dinâmico da diferença de concentração de licor preto entre as duas modelagens analisadas é apresentado na Figura 5. Esta diferença foi computada ao longo do tempo de operação do evaporador, em cada uma das três condições iniciais estudadas.

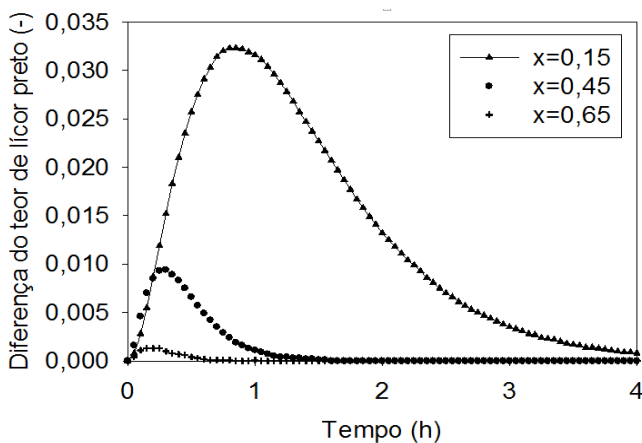


Figura 5 - Perfis dinâmicos da diferença de concentração de licor preto entre as duas modelagens analisadas

Ao analisar a Figura 5 é possível perceber o quão significativa é a diferença entre as duas abordagens, para faixas maiores de operação do evaporador. Ao alimentar licor preto com $x = 0,15$, a diferença atinge seu ápice no tempo de 1h de operação. Sendo assim, quanto maior a faixa de operação do evaporador, maior é a diferença entre as modelagens testadas, sendo esta diferença localizada próxima ao início da operação.

Como a maior faixa de operação do evaporador apresentou diferença significativa entre as modelagens testadas, optou-se por implementar ambas as modelagens na faixa de operação industrial. Segundo Campos (2009), este evaporador recebe licor preto com a concentração de aproximadamente 15% e tem como saída licor concentrado com teor de sólidos equivalente a 25%. O perfil obtido para esta situação é apresentado na Figura 6.

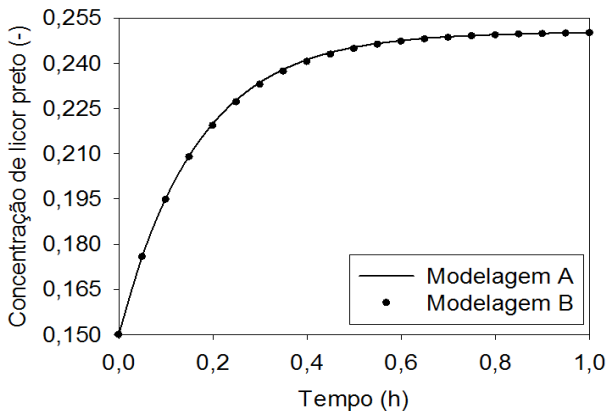


Figura 6 - Variação da concentração de licor preto no evaporador para faixa de operação industrial

De acordo com a Figura 6, após 1h de operação o estado estacionário foi atingido. Observa-se que, ao contrário do comportamento obtido na Figura 4 (a qual apresentou diferença entre as modelagens para uma faixa mais ampla de operação), na Figura 6 não ocorreu diferença significativa entre as modelagens testadas. Pode-se dizer que para a faixa de operação industrial dos evaporados (cuja alimentação consiste em licor com baixo teor de sólidos) as duas modelagens não apresentaram diferenças quanto ao aspecto prático. Ressalta-se que os evaporadores de múltiplo efeito industriais operam em pequenas faixas de concentração ($\leq 10\%$) para garantir a eficiência energética e exérgica dos mesmos, conforme verificado por DARMAWAN et. al. (2017) e CAO et. al. (2018).

4. CONCLUSÕES

No presente trabalho foram testadas distintas abordagens baseadas no balanço de massa e energia para a descrição de evaporadores de múltiplo efeito de uma fábrica de celulose. Uma modelagem considerou massa constante de licor preto no interior do evaporador, enquanto na outra admitiu-se volume constante.

As modelagens apresentaram resultados distintos para faixas amplas de variação de concentração de licor preto ($\geq 31\%$) em um mesmo evaporador. Conforme ampliação da faixa de operação do evaporador, maior foi a diferença entre as modelagens testadas, impactando tanto a concentração de licor preto no evaporador, quanto o tempo necessário para alcançar o estado estacionário.

Para faixas reduzidas de operação do evaporador ($\leq 10\%$) as modelagens apresentaram perfis de concentração de licor preto semelhantes. Em aplicações industriais a faixa, geralmente considerada, é inferior a 10%. Neste caso não há diferença significativa entre as estratégias de modelagem e ambas podem ser empregadas na descrição do processo.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da FAPEMIG por meio do Edital FAPEMIG 01/2016 - Demanda Universal, Processo TEC APQ 00914-16.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, E. D.; PINHEIRO, O. S.; COSTA, A. O. S.; COSTA Jr., E. F. Estudo do processo de obtenção celulose Kraft com ênfase no forno de cal. *Revista Liberato*, v. 16, n. 26, p. 101-220, 2015.

ARAUJO, M. N.; PINHEIRO, O. S.; COSTA Jr., E. F.; COSTA, A. O. S. Modelagem fenomenológica do comportamento dinâmico de evaporadores de múltiplo efeito. *O PAPEL*, v. 77, n. 6, p. 77-81, 2016.

BHARGAVA, R.; KHANAMB, S.; MOHANTY, B.; RAY, A. K. Selection of optimal feed flow sequence for a multiple effect evaporator system. *Computers & Chemical Engineering*, v.32, p. 2203-2216, 2007.

CAMPOS, S. G. S. Modelagem Matemática e Análise do Coeficiente Global de Transferência de Calor para o Processo de Concentração do Licor Negro de Eucalipto em Sistema de Evaporadores de Múltiplo Efeito. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Unileste, MG, Coronel Fabriciano, 110 p., 2009.

CAO, C.; HE, Y.; CHEN, J.; CAO, W.; JIN, H. Evaluation of effect of evaporation on supercritical water gasification of black liquor by energy and exergy analysis. *Hydrogen Energy*, v.43, p.13788-13797, 2018.

CARDOSO, M.; OLIVEIRA, E.D.; PASSOS, M.G. Chemical composition and physical properties of black liquors and their effects on liquor recovery operation in Brazilian pulp mills. *Fuel*, n. 88, p.756–763, 2009.

CARDOSO, M.; OLIVEIRA, K. D.; COSTA, G. A. A.; PASSOS, M. L. Chemical process simulation for minimizing energy consumption in pulp mills. *Applied Energy*, v.86, p. 45-51, 2009.

CARVALHO, P. I. N.; COSTA, A. O. S.; COSTA Jr, E. F. Modelagem Matemática de Evaporadores de Múltiplo Efeito Empregados no Aumento do Teor de Sólidos do Leite. In: VIII COBEQ IC - VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica: Anais, v.1, p. 1-6, Uberlândia, 2009.

COSTA, A. O. Alternativas para o Controle de um Sistema de Evaporadores de Múltiplo Efeito. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

COSTA, A. O. S.; LIMA, E. L. Modelling and Control of an Industrial Multiple-Effect Evaporator System. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 81, n. 5, p. 1032-1040, 2003.

COSTA, A. O. S.; PASSOS M. L.; CARDOSO M. Comportamento Reológico do Licor Negro de Eucalipto. In: 6ª Jornada de Engenharia Química UFU/UFMG: Anais, p. 57-60, Uberlândia, 1999.

COSTA, A. O. S.; SILVA, A. C.; BARAÑANO, A. G.; COSTA Jr., E. F. Empirical analysis of the boiling point elevation of eucalyptus Kraft black liquor. *O PAPEL*, v. 77, n. 10, p. 88-92, 2016.

DARMAWANN, A.; AJIWIBOWO, M. W.; AZIZ, M.; TOKIMATSU, K. Efficient black liquor conversion to power and H₂ by adopting negative emission technology. *Energy Procedia*, v.158, p. 266-271, 2019.

DARMAWANN, A.; AJIWIBOWO, M. W.; TOKIMATSU, K. AZIZ, M. Efficient co-production of power and ammonia from black liquor. *Hydrogen Energy*, 2020.

DARMAWANN, A.; HARDI, F.; YOSHIKAWA, K.; AZIZ, M.; TOKIMATSU, K. Enhanced process integration of black liquor evaporation, gasification, and combined cycle. *Applied Energy*, v.204, p. 1035-1042, 2017.

HOLLAND, C. D. *Computer Methods for Solving Dynamic Separation Problems*. New York: McGraw, 1983.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. Relatório 2019.

KHANAM, S.; MOHANTY, B. Development of a new model for multiple effect evaporator system. *Computers & Chemical Engineering*, v.35, p.1983–1993, 2011.

MARTIN, C. Indústria de celulose e papel aposta no potencial da cogeração de energia. *O PAPEL*, v. 78, p. 54-63, 2017.

MOREIRA, J.; CAMPOS, B. L. O.; COSTA Jr, E. F.; COSTA, A. O. S. EXERGY AND SENSIBILITY ANALYSIS OF EACH INDIVIDUAL EFFECT IN A KRAFT MULTIPLE EFFECT EVAPORATOR. *Recovery Cycle*, v. 18, n.10, p. 607-619, 2019.

PERRY, H. R.; GREEN, D. W. *Perry's Chemical Engineering Handbook*, 8ª ed. New York: Editora McGraw-Hill, 2008.

RIBEIRO, C. H.; SEABRA, J. E. A. Proposta de uma metodologia de precificação da cana levando em consideração a contribuição do bagaço e da palha na produção de eletricidade e de etanol de segunda geração. *Revista Brasileira de Energia*, v. 23, n. 2, p. 72-88, 2017.

SCHUINA, G. L. ; COSTA, A. O. S. ; COSTA Jr, E. F. Modelagem Matemática de Evaporadores de Múltiplo Efeito Empregados na Concentração do Extrato de Café. In: VIII COBEQ IC - VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica: Anais, v.1, p. 1-6, Uberlândia, 2009.

SMITH, J. M.; ABBOTT, M. M.; VAN NESS, H. C. *Introdução à termodinâmica da engenharia química*. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

VERMA, O. P.; MANIK, G.; JAIN, V. K. Simulation and control of a complex nonlinear dynamic behavior of multi-stage evaporator using PID and Fuzzy-PID controllers. *Journal of Computation Science*, v. 25, p.238-251, 2018b.

VERMA, O. P.; MANIK, G.; SURYAKANT; JAIN, V. K.; JAIN, D. K.; WANG, H. Minimization of energy consumption in multiple stage evaporator using Genetic Algorithm. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, v. 20, p.130-140, 2018a.

VIANA, N. A.; GUIMARÃES, M. G.; BRASIL, A. C. M.; VALE, A. T.; MACEDO, J. L.; GHESTI, G. F. Gaseificação da casca do jatobá-do-cerrado: caracterização e comparação entre simulação e ensaios laboratoriais. *Revista Brasileira de Energia*, v. 23, n. 3, p. 82-104, 2017.