

ANÁLISE DE CENÁRIOS OPERACIONAIS EM UMA PLANTA DE EVAPORAÇÃO DE UMA FÁBRICA DE CELULOSE KRAFT NO BRASIL

Marcus V. G. Veloso¹, Leonardo S. de Caux¹, Daniel S. Costa¹, Paula C. M. G. G. Botrel¹, Danielle L. A. Almeida², Kaio A. M. O. Zeferino², Percy O. A. Manu², Márcio R. V. Neto², Brenno S. Leite³, Marcelo Cardoso², Gustavo M. Almeida²

¹ CENIBRA – Celulose Nipo-Brasileira S/A, Rod. BR 381, Km 172, Distrito Perpétuo Socorro, 35196-972, Belo Oriente-MG, Brasil

² Departamento de Engenharia Química, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, 31.270-901, Belo Horizonte-MG, Brasil

³ Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas (IEF), Campus Florestal, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Rod. LMG 818, Km 06, 35690-000, Florestal, MG, Brasil

RESUMO

O presente trabalho refere-se ao estudo de análise de cenários operacionais em uma planta de evaporação de uma fábrica de celulose kraft no Brasil. Este tipo de estudo consiste em obter o comportamento do processo frente a perturbações em variáveis e parâmetros. Primeiro, com base em dados de projeto e operação, construiu-se um modelo computacional para o sistema de evaporação. Após a sua validação, utilizou-se esse modelo para investigar três cenários comuns: variações na concentração do licor fraco alimentado; reduções na área de troca térmica no concentrador, responsável pela concentração final do licor; e variações na temperatura do licor de entrada no terceiro efeito. Analisou-se o comportamento do processo a partir de indicadores-chave, como a capacidade de água evaporada e a economia de vapor vivo. O uso de modelos computacionais é útil por permitir a investigação de condições operacionais de forma rápida, segura e econômica. Com a avaliação de especialistas, é possível selecionar os cenários com maior potencial de retorno, de forma a alcançar uma operação mais eficiente, segura, econômica e/ou limpa. Dessa forma, a análise de cenários constitui-se em uma ferramenta estratégica para a melhoria dos processos industriais. Este tipo de análise ganhou ainda mais relevância com as aplicações de sistemas de gêmeos digitais (*digital twin systems*) no atual contexto de Transformação Digital.

Palavras-chave: Sistema de evaporação, Simulação de processos, Análise de cenários operacionais, Dados industriais.

INTRODUÇÃO

Um fator que sempre esteve presente ao longo da história do setor industrial é a busca constante pela melhoria dos processos. No mundo contemporâneo, com o avanço das regulamentações no setor público, no mercado e na sociedade em geral, essa

questão é ainda mais relevante (Schwab, 2017). O aumento da segurança operacional, a garantia da qualidade dos produtos e a redução da poluição ambiental são exemplos de melhorias alcançadas nos processos industriais em geral e, em particular, no setor de papel e celulose.

Uma ferramenta para investigar oportunidades de melhorias em processos industriais é a análise de cenários operacionais. Com este procedimento, é possível obter o comportamento de indicadores-chave do processo frente a perturbações em variáveis e parâmetros (Perlingeiro, 2005). Um exemplo de ganho refere-se ao melhor entendimento da robustez do processo em relação, por exemplo, a aspectos de segurança operacional e capacidade de produção.

Para um estudo de análise de cenários, é necessário um modelo do processo. Neste trabalho, utilizou-se um *software* de simulação de processos para construir e validar um modelo computacional do processo e simular os cenários. Um primeiro benefício com a utilização de modelos computacionais diz respeito à obtenção de valores para variáveis e parâmetros intermediários no processo. Por exemplo, o coeficiente global de transferência de calor, comumente utilizado para monitorar a eficiência térmica dos sistemas de evaporação, geralmente está disponível apenas para os corpos de evaporação do primeiro efeito. Um modelo computacional pode ser utilizado para diversas finalidades no setor industrial (Klatt e Marquardt, 2009; Costa *et al.*, 2007a). Uma aplicação comum é o treinamento por meio de Sistemas de Treinamento de Operadores (*Operator Training System*, OTS). Um exemplo do uso potencial de modelos computacionais refere-se aos sistemas de gêmeos digitais (*Digital Twin systems*), considerando as aplicações de sistemas ciber-físicos (*Cyber-Physical System*, CPS) no contexto atual de *Digital Transformation* (DT) – *O Papel*, 2021. Especificamente em relação à análise de cenários,

o uso de modelos computacionais é útil porque permite a simulação segura de uma infinidade de eventos operacionais, antes de intervenções no processo (Perlingeiro, 2005).

Neste trabalho, realizou-se um estudo de análise de cenários operacionais em um sistema de evaporação múltiplo efeito de uma fábrica de celulose kraft. Investigaram-se três cenários comuns em plantas de evaporação e seus efeitos em indicadores-chave, como a capacidade de água evaporada e a economia de vapor vivo. Como exemplo, um dos cenários refere-se à redução da área de troca térmica em um corpo de evaporação do primeiro efeito, devido ao problema de incrustação (Area e Felissia, 2015). O estudo de caso refere-se a uma fábrica de celulose kraft no Brasil.

Organizou-se o texto conforme a seguir. A seção 2 refere-se a uma breve descrição do sistema de evaporação múltiplo efeito, a seção 3, à metodologia, a seção 4, à apresentação e discussão dos resultados, e a seção 5, às considerações finais.

Sistema De Evaporação Múltiplo Efeito

Descreve-se, de modo sucinto, o sistema de evaporação múltiplo efeito de fábricas de celulose kraft. A evaporação (McCabe *et al.*, 2004) é a primeira operação da unidade de recuperação química das fábricas de celulose kraft. A solução nesse caso é o licor residual oriundo da etapa de polpação dos cavacos de madeira, que é composto por água, matéria orgânica e compostos inorgânicos. Com composição mássica entre 15% e 20% (com isso, a denominação de licor fraco), o objetivo é concentrá-lo acima de 60% (licor forte) de sólidos totais, de forma a garantir a sua queima na caldeira de recuperação química. A evaporação de parte da água contida no licor é realizada em um sistema de evaporação múltiplo efeito. Este termo refere-se à utilização do calor latente do vapor (evaporado) gerado pela evaporação da água em um efeito (composto por um ou mais corpos de evaporação), como meio de aquecimento no efeito subsequente. Tal

aproveitamento de energia reduz significativamente o consumo de vapor de fonte externa (vapor vivo). Em geral, emprega-se um sistema de evaporação com seis efeitos, com licor alimentado no quarto e/ou quinto efeito. Assim, as correntes de licor e vapor são em co-corrente nos últimos efeitos e em contracorrente nos primeiros efeitos (Holmlund e Parviainen, 2008; Venkatesh e Nguyen, 1985).

Um desafio operacional diz respeito à incrustação dos corpos de evaporação por sais de sódio, como burqueíta e dicarbonato, o que reduz a área de troca térmica disponível e, conseqüentemente, a transferência de calor (Area e Felissia, 2015; Costa *et al.*, 2007b). Esse problema impacta significativamente a operação no primeiro efeito, dada a maior concentração de licor. Com isso, o primeiro efeito é geralmente composto por três ou quatro corpos de evaporação. Enquanto um deles é limpo (fora de linha), geralmente após um período pré-estabelecido, os demais estão em operação. De modo resumido, o que se busca na operação desses sistemas de evaporação é: garantir a taxa de transferência de calor, aumentar a economia de vapor vivo e afiançar a concentração final do licor. Uma maneira de investigar essas questões é por meio de um estudo de análise de cenários.

A Figura 1 é um esquema do sistema de evaporação múltiplo efeito do estudo de caso deste trabalho, composto por seis efeitos, 11 corpos de evaporação, e pré-aquecedores de licor (*liquor preheater*, LPH). Há dois corpos no segundo efeito (2A e 2B) e no terceiro efeito (3A e 3B), e quatro corpos no primeiro efeito (1A, 1B, 1C e 1D). Os corpos do segundo, terceiro e sexto efeitos, além do corpo 1D (denominado concentrador), são do tipo tubular de filme descendente (*tube falling film*); os corpos 1A, 1B e 1C, placa de filme descendente (*plate falling film*); e os corpos do quarto e quinto efeitos, tubular de filme ascendente (*tube rising film*). A alimentação do licor ocorre no quarto efeito (Fonte: Fábrica). A alimentação de vapor vivo e a saída do licor concentrado ocorrem no primeiro efeito.

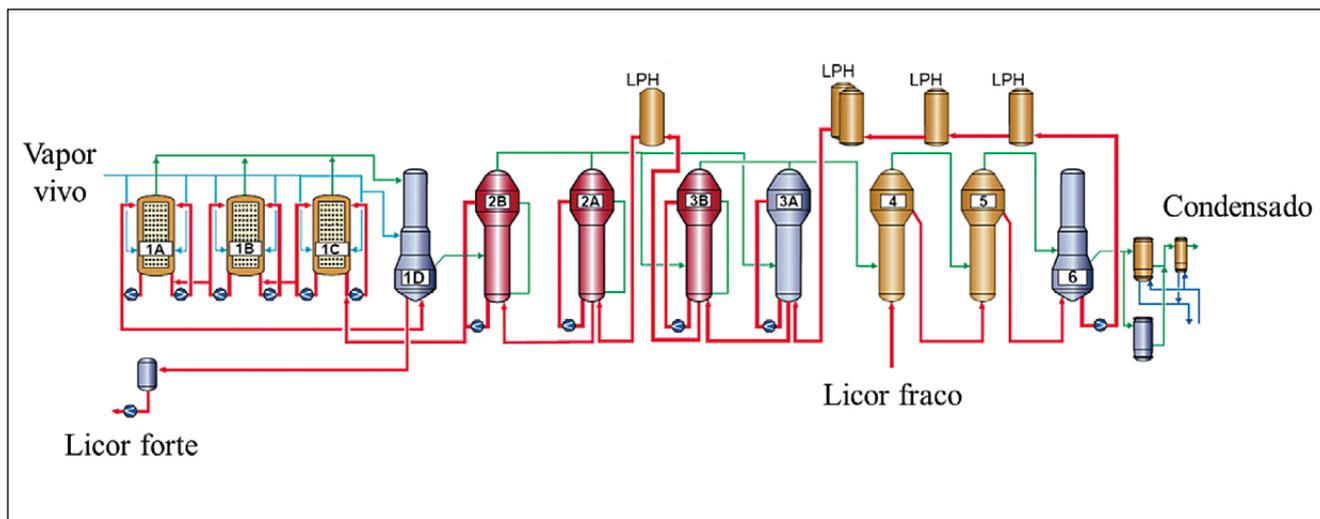


Figura 1. Esquema do sistema de evaporação múltiplo efeito do estudo de caso (Fonte: Fábrica)

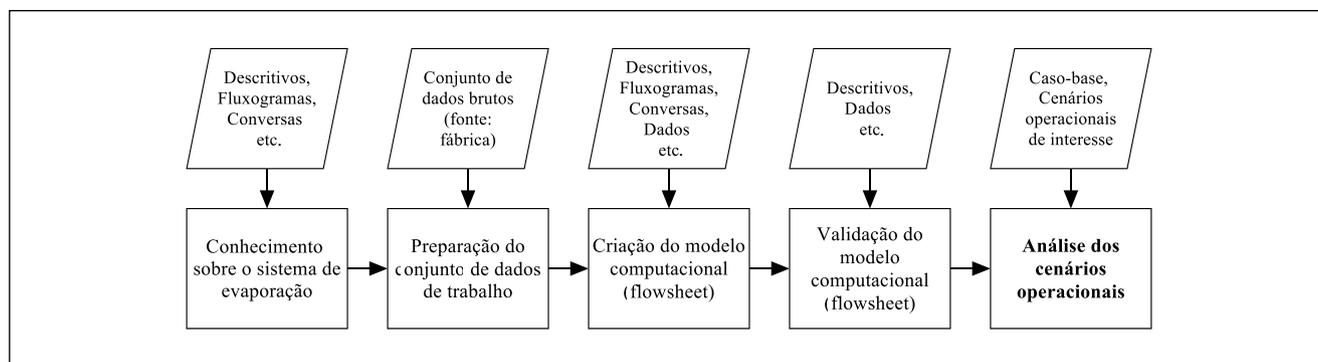


Figura 2. Metodologia

METODOLOGIA

A Figura 2 apresenta a metodologia adotada neste trabalho. Descreve-se, a seguir, cada uma das etapas.

Conhecimento sobre o sistema de evaporação: Essa etapa inicial refere-se à coleta de informações, sendo essencial para o entendimento do processo. Neste trabalho, coletaram-se informações sobre o projeto e a operação da planta de evaporação. **Preparação do conjunto de dados de trabalho:** O conjunto de dados coletado é composto por variáveis e parâmetros do processo. Para conhecê-lo, é adequado realizar uma análise exploratória dos dados (*Exploratory Data Analysis*, EDA). A análise visual (uso de gráfico temporal, gráfico de dispersão, entre outros) e o cálculo de estatísticas (por exemplo, média e variância) são procedimentos comuns nesse caso (Unwin *et al.*, 2010). A partir desse diagnóstico, o próximo passo refere-se à criação de um conjunto de dados de trabalho (com base em dados brutos), que será usado como informação de entrada para o modelo computacional (próxima etapa). A seleção de variáveis e parâmetros, a remoção de registros com dados faltantes (*missing values*) e anômalos, e o cálculo de variáveis não disponíveis diretamente, são procedimentos comuns nesse caso (Xu *et al.*, 2015). Um dos exemplos neste trabalho refere-se ao cálculo da distribuição de vapor vivo para cada corpo de evaporação do primeiro efeito, com base em seu valor total e outros parâmetros. Em sistemas de evaporação múltiplo efeito de fábricas de celulose kraft, é importante conhecer a sequência operacional de limpeza dos corpos de evaporação do primeiro efeito, devido ao problema de incrustação. Deve-se atentar para o período de transiência entre a ação de limpeza e a operação em linha do evaporador. Baseou-se tal cálculo na temperatura do evaporado e na vazão de vapor. **Criação do modelo computacional (flowsheet):** O objetivo dessa etapa é construir o fluxograma (*flowsheet*) do sistema de evaporação no simulador de processos. Com o objetivo de automatizar e organizar o fluxo de dados e informações em geral, desenvolveu-se uma interface de comunicação entre o simulador de processos e o *software* Excel. Assim, os dados das variáveis e parâmetros de entrada no

conjunto de dados de trabalho são enviados para o simulador de processos que, após a execução, envia as informações de saída calculadas para a planilha eletrônica. **Validação do modelo computacional (flowsheet):** O objetivo dessa etapa é validar o modelo computacional anterior. Inicialmente, validou-se com dados de projeto, a partir de informações sobre o licor, vapor e indicadores-chave, como a capacidade e a economia. Em seguida, utilizou-se o conjunto de dados de operação coletado na fábrica, como, por exemplo, a concentração do licor de saída do segundo efeito. Para ambos os casos, calculou-se o erro relativo (e ; em %) entre os valores estimados pelo modelo (\hat{y}) e aqueles coletados na fábrica (y) (Equação 1). **Análise dos cenários operacionais:** Após as etapas de coleta e exploração dos dados e informações em geral, e de criação e validação do modelo computacional, simularam-se os cenários operacionais e avaliaram-se os efeitos sobre indicadores-chave do processo (Gasparoni *et al.*, 2019; Perlingeiro, 2005). Além do caso-base, definiram-se, neste trabalho, três cenários operacionais comuns em sistemas de evaporação de fábricas de celulose kraft. O caso-base é a condição operacional de referência, a partir do qual realizam-se as perturbações nas variáveis ou parâmetros.

$$e(\%) = (|y - \hat{y}|/y) \cdot 100 \quad (1)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conhecimento sobre o sistema de evaporação: Buscou-se entender a configuração e o funcionamento do sistema de evaporação do estudo de caso a partir de descritivos de projeto e operação.

Preparação do conjunto de dados de trabalho: Considerou-se o período de coleta dos dados de 01/04/2021 00:00:00 até 30/04/2021 00:00:00, com um intervalo de amostragem de quinze minutos. Primeiro, identificaram-se dados faltantes e anômalos. Em seguida, identificou-se a sequência operacional dos corpos de evaporação do primeiro efeito. Encontraram-se seis arranjos a partir dos dados de operação; por exemplo, 1B 1A 1D (Figura 1),

ou seja, o corpo 1B recebe o licor do segundo efeito, que segue para o corpo 1A, e o corpo 1D é responsável por sua concentração final, enquanto o corpo 1C (fora de linha) é limpo. Validaram-se esses arranjos com os dados de projeto. Por fim, identificaram-se os registros relativos aos períodos de transiência entre a ação de limpeza e a operação dos evaporadores do primeiro efeito. Do total inicial de 2881 registros, após a eliminação de 257 (8,9%), o conjunto de dados de trabalho foi composto por 2624 registros. Trabalhou-se com um total de 23 variáveis e parâmetros como informação de entrada para o modelo computacional. São informações sobre o licor, vapor vivo e evaporado, além das áreas dos corpos de evaporação.

Construção do modelo computacional (flowsheet): Com base principalmente nos dados de projeto, construiu-se o fluxograma (flowsheet) da planta de evaporação no simulador de processos.

Validação do modelo computacional (flowsheet): Inicialmente, validou-se o modelo computacional com as informações de projeto. Como exemplo, o erro relativo referente ao consumo de vapor vivo, à capacidade de água evaporada e à economia de vapor vivo, foi pequeno, igual a 2,4%, 1,4% e 3,7%, respectivamente. Observou-se um comportamento similar em relação às demais variáveis de projeto utilizadas para fins de comparação. A Figura 3 apresenta gráficos comparativos entre os dados estimados pelo modelo (linha laranja) e aqueles coletados na fábrica (linha azul) (eixo y), em função dos registros (eixo x). Plotou-se também o erro relativo (linha cinza; Equação 1). Mostra-se somente a escala do eixo y (lado direito) para o erro.

[em (a)], o erro é geralmente menor que 15% (cerca de 95,3% de 2624 registros), com média e desvio-padrão iguais a $(9,6 \pm 3,4)\%$, respectivamente. Pode-se observar que o erro também é consideravelmente pequeno para a concentração do licor na saída do segundo efeito [em (b)], a pressão do evaporado no evaporador do primeiro efeito que recebe o licor do segundo efeito [em (c)], e a temperatura de entrada do licor no evaporador A do terceiro efeito [em (d)]. As estatísticas do erro relativo para essas variáveis são, respectivamente, iguais a $(4,5 \pm 2,6)\%$, $(3,1 \pm 2,4)\%$ e $(5,8 \pm 0,9)\%$. Observou-se um comportamento análogo para as demais variáveis de processo utilizadas para fins de comparação.

Análise dos cenários operacionais: Após a validação do modelo, pode-se utilizá-lo para diversas finalidades. De acordo com o objetivo proposto neste trabalho, o foco foi a análise de cenários operacionais. O primeiro passo diz respeito à definição de um caso-base, dado por uma condição de operação estável da unidade fabril. Definiu-se esse ponto nominal em conjunto com a equipe da fábrica. Em seguida, da mesma forma, definiram-se três cenários operacionais (Tabela 1). No primeiro cenário, por exemplo, variou-se a concentração do licor fraco alimentado no quarto efeito a partir de uma redução (aumento) gradual de 10% em relação ao seu ponto nominal, até uma variação mínima de -50% (máxima de +50%). Considerou-se um valor fixo para a concentração final do licor. O intervalo de variação é maior em relação à faixa de operação do processo, com o único objetivo de visualizar a tendência de seu comportamento. Por fim, analisaram-se os efeitos dessas variações em indicadores-chave do processo.

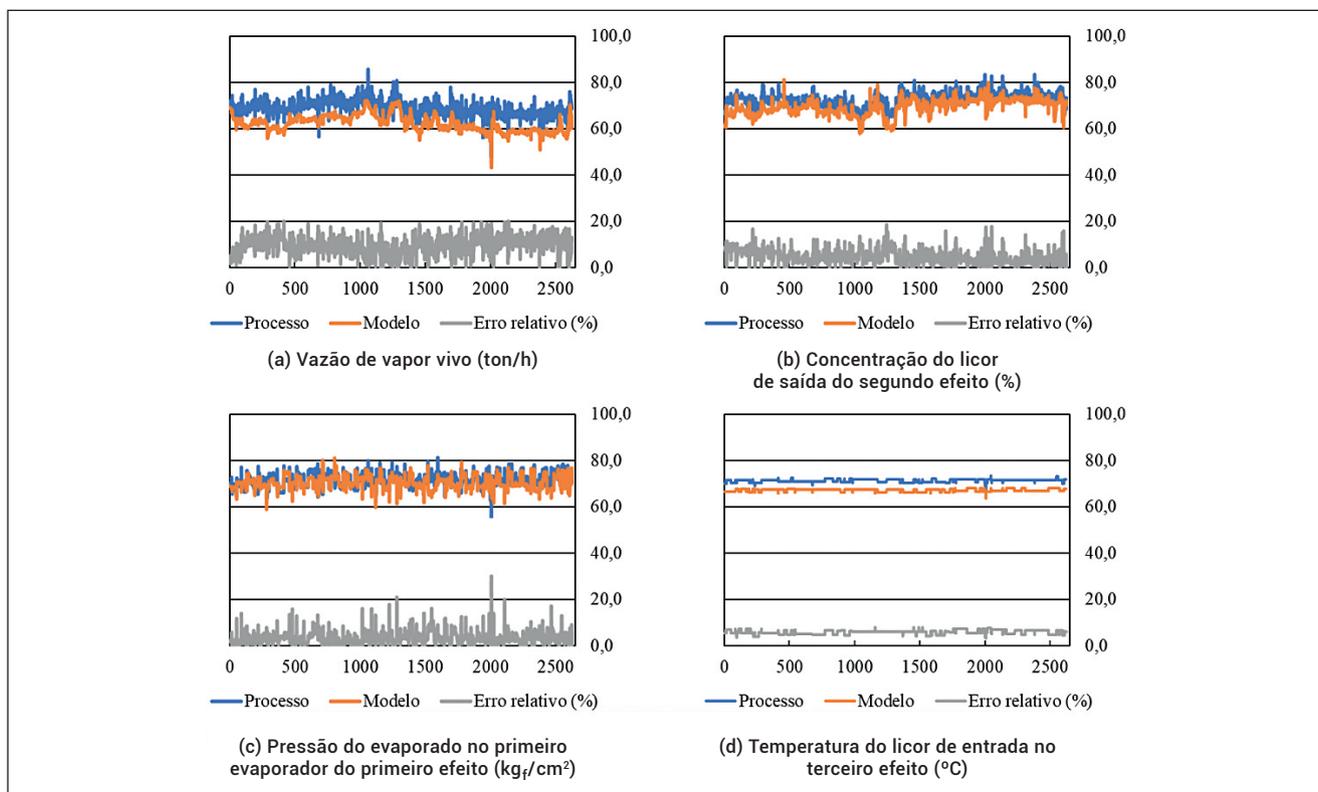


Figura 3. Comparação entre o modelo computacional (linha laranja) e os dados da planta de evaporação (linha azul), com o erro relativo entre ambos (linha cinza, com eixo y do lado direito; Equação 1)

A Figura 4 apresenta o resultado para os três cenários operacionais (Tabela 1). Cada gráfico refere-se a um indicador-chave específico. O primeiro ponto (♦) é o valor calculado pelo modelo para o caso-base, e os demais conjuntos de pontos (•) são os valores calculados a partir das variações em cada um dos cenários (①, ②, ③). Normalizou-se a escala do eixo y em [0, 1]. Mostram-se os efeitos para quatro indicadores de interesse em sistemas de evaporação de fábricas de celulose kraft: (a) capacidade; (b) economia; (c) coeficiente global de transferência de calor (U) no corpo de evaporação do primeiro efeito responsável pela concentração final do licor; e (d) elevação do ponto de ebulição (EPE) no corpo de evaporação do primeiro efeito responsável pela concentração inicial do licor, ou seja, que recebe o licor do segundo efeito. A capacidade da planta de evaporação refere-se à quantidade de água evaporada por unidade de tempo (ton água evaporada/h) e, a economia, ao volume de água evaporada em relação ao consumo de vapor vivo (ton água evaporada/ton vapor vivo). O EPE (°C) é a diferença entre os pontos de ebulição da solução de licor e da água pura à mesma pressão, e o U é o inverso da resistência térmica global à transferência de calor (U ; $W/(m^2 \times ^\circ C)$) (McCabe *et al.*, 2004). Quanto maior a concentração do licor, menor a pressão de vapor da solução e, portanto, maior o EPE.

No primeiro cenário, com a menor concentração do licor fraco, ocorre um aumento no volume de água evaporada, ou seja, na capacidade [Figura 4(a)]. Para atingir a concentração final do licor, é necessário evaporar uma quantidade maior de água, o que aumenta proporcionalmente o consumo de vapor vivo. A relação entre ambos se mantém, com relativamente pouca variação na economia [Figura 4(b)]. Há um pequeno aumento no coeficiente global de transferência de calor [Figura 4(c)]. Com a temperatura de ebulição mais baixa do licor diluído, espera-se a evaporação de uma quantidade de água relativamente maior. Na prática, para condensar totalmente esse volume de água, é possível ocorrer a pressurização do sistema de vácuo ou de um efeito intermediário, o que aumenta a pressão nos demais evaporadores. Observou-se esse comportamento através do modelo. Porém, a maior dependência do EPE é em relação ao teor de sólidos no licor (Holmlund e Parviainen, 2008; Venkatesh e Nguyen, 1985). Assim, observa-se a sua redução no evaporador responsável por receber o licor do segundo efeito [Figura 4(d)].

No segundo cenário, a capacidade é constante [Figura 4(a)], assim como o consumo de vapor vivo e, portanto, a economia [Figura 4(b)], considerando o valor fixo para a concentração final do licor. Com a redução da área de troca térmica no evaporador do primeiro efeito responsável

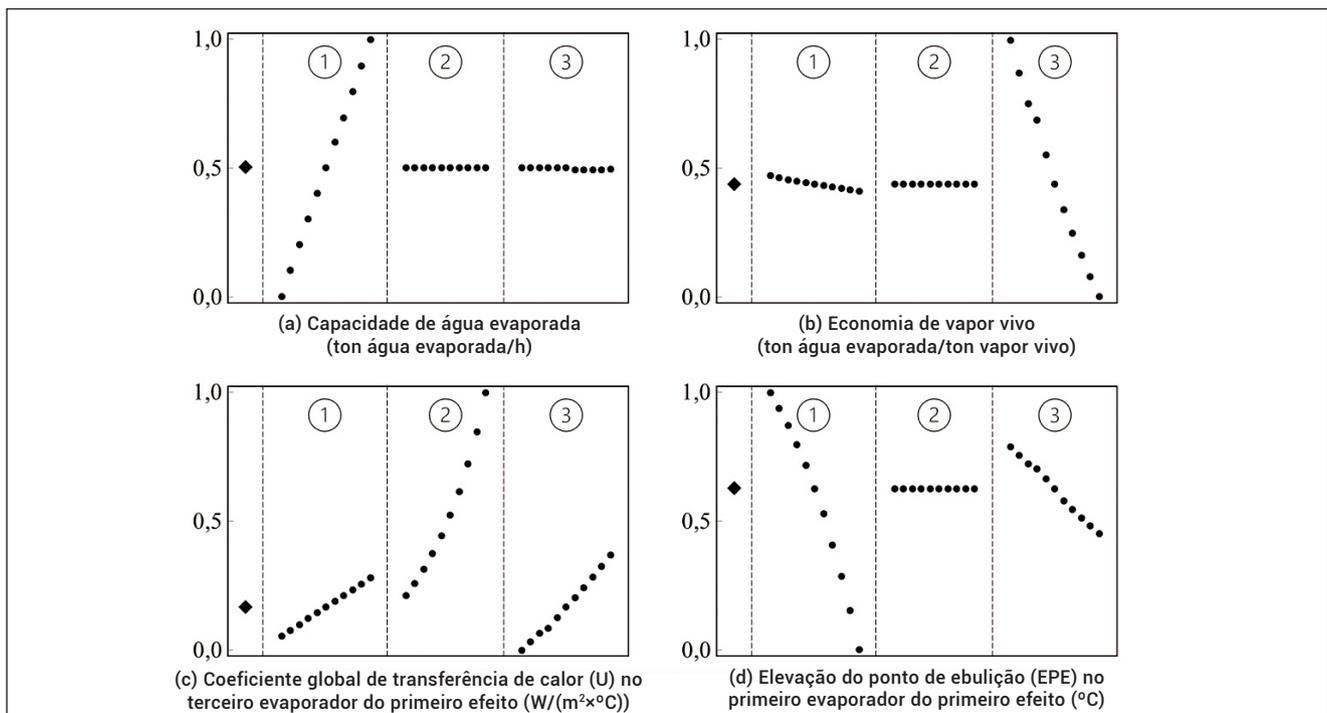


Figura 4. Comportamento de indicadores-chave da planta de evaporação a partir dos três cenários operacionais (♦; ①, ②, ③; Tabela 1) em relação ao caso-base (♦)

Tabela 1. Cenários operacionais

Cenário operacional	Variável / Parâmetro	Intervalo de variação (em %)
1	Concentração do licor fraco (alimentado no quarto efeito)	[-50; 10; +50]
2	Área de troca térmica do corpo de evaporação do primeiro efeito responsável pela concentração final do licor (em geral, o corpo 1D)	[-50; 5; -5]
3	Temperatura do licor de entrada no terceiro efeito (em 3A)	[-50; 10; +50]

pela concentração final do licor, observa-se um aumento significativo no seu coeficiente global de transferência de calor [Figura 4(c)]. Na prática, a menor disponibilidade de área reduz a troca térmica e, portanto, a concentração final do licor. Isso ocorre devido ao processo de incrustação do evaporador (Area e Felissia, 2015; Costa *et al.*, 2007b). Nessa condição, há redução na capacidade de evaporação e no fornecimento de vapor vivo. Como esperado, não houve alteração do EPE no corpo de evaporação responsável por receber o licor do segundo efeito [Figura 4(d)].

No terceiro cenário, observa-se uma capacidade praticamente constante [Figura 4(a)]. A redução gradual da temperatura do licor de entrada no terceiro efeito reduz sua concentração na saída do segundo efeito. Com isso, há um aumento no consumo de vapor vivo para compensar essa perda de calor sensível. Para efeito de comparação, o aumento do consumo de vapor vivo no primeiro cenário é para suprir uma demanda de calor latente, dada a necessidade de evaporar um volume relativamente maior de água. Na prática, devido a restrições de projeto e operação, o fornecimento máximo de vapor é menor, o que reduz a concentração final do licor. Lembra-se que a faixa de variação adotada em cada cenário é maior que a faixa operacional do processo, para observar sua tendência de forma mais ampla. Dando sequência à análise do terceiro cenário, como o volume de água evaporada é o mesmo, observa-se uma queda considerável na economia [Figura 4(b)]. Essa dinâmica gera um aumento relativamente menor, em relação ao segundo cenário, do coeficiente global de transferência de calor no evaporador responsável pela concentração final do licor [Figura 4(c)]. Com o licor menos concentrado, o EPE é menor [Figura 4(d)]; no entanto, de forma menos significativa em comparação com o primeiro cenário.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a construção e validação de um modelo computacional para o sistema de evaporação múltiplo efeito de uma fábrica de celulose kraft no Brasil, investigou-se o seu comportamento a partir da simulação de cenários operacionais. Investigou-se a concentração do licor fraco alimentado, a área de troca térmica disponível no concentrador e a temperatura do licor de entrada no terceiro efeito. Nessa primeira fase do projeto, adotou-se um valor pré-estabelecido para a concentração final do licor. Com isso, foi possível analisar o que seria necessário para alcançá-la, o que geralmente não é viável na prática devido a restrições de projeto e operação. Este tipo de análise contribui para um melhor entendimento da capacidade do processo. Exemplos de sugestões para a continuidade deste trabalho são: considerar limites operacionais para as variáveis-chave do processo, como, por exemplo, o fornecimento de vapor vivo, e simular a abordagem de não adoção de um valor fixo para a concentração final do licor.

A utilização de modelos computacionais permite estudos de análise de cenários de forma rápida, segura e econômica, sem a necessidade de perturbar diretamente os processos. Ao ser capaz de apoiar a decisão de especialistas na seleção de cenários com potencial retorno efetivo, constitui-se em uma ferramenta estratégica para a melhoria dos processos industriais. A implementação de novas condições pode resultar em operações mais eficientes, seguras, econômicas e/ou limpas. A análise de cenários ganhou ainda mais relevância com o potencial de aplicações envolvendo sistemas de gêmeos digitais (*digital twin systems*) no atual contexto de Transformação Digital.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a parceria universidade-empresa, que possibilitou a realização desse projeto. ■

REFERÊNCIAS

- ABTCP. Indústria do futuro já vem se desenhando nos parques fabris do setor. *O Papel*, LXXXII, 12, 60-70, 2021.
- Area, M. C., Felissia, F. E. Scaling in alkaline spent pulping liquor evaporators, ch. 21, In: *Mineral Scales and Deposits – Scientific and Technological Approaches*, 557-571, 2015.
- Costa, G. A. A., Oliveira, E. D., Park, S. W., Cardoso, M. Overall heat transfer coefficients in a kraft black liquor industrial evaporation unit. Part I: Simulation of multiple effect evaporation system. *Appita Journal*, 60, 321-326, 2007a.
- Costa, G. A. A., Oliveira, E. D., Park, S. W., Cardoso, M. Overall heat transfer coefficients in a kraft black liquor industrial evaporation unit. Part II: Predictive correlations. *Appita Journal*, 60, 327-333, 2007b.
- Gasparoni, J. M., Almeida, C. R. S. N., Almeida, G. M. Engenharia de processos: dimensionamento, simulação e análise de sensibilidade de sistemas de evaporação múltiplo efeito de indústrias de celulose kraft. In: *Impactos das Tecnologias na Engenharia Química*, v.1, Voigt, C. L. (eds), Atena, Capítulo 10, 80-95, 2019.
- Holmlund, K., Parviainen, K. Evaporation of black liquor, ch. 2, 36-84. In: *Chemical pulping: Recovery of chemicals and energy*, Vol. 6, Part 2, 2nd ed., Tikka, P. (ed), Paper Engineers' Association/Paperi ja Puu Oy, 2008.
- Klatt, K. U.; Marquardt, W. Perspectives for process systems engineering: Personal views from academia and industry, *Computers and Chemical Engineering*, 33(3), 536-550, 2009.
- McCabe, W. L., Smith, J., Harriott, P. *Unit operations of chemical engineering*, 7th ed., McGraw-Hill, 2004.
- Perlingeiro, C. A. G. *Engenharia de processos: Análise, simulação, otimização e síntese de processos químicos*. 1.ª ed., São Paulo: Edgard Blücher, 2005.
- Schwab, K. *The fourth industrial revolution*. Currency, 2017.
- Unwin, A. Exploratory data analysis. In: *International Encyclopedia of Education*, Peterson, P., Baker, E., McGaw, B. (eds.), 3.ª ed., 7, 156-161, Elsevier, 2010.
- Venkatesh, V., Nguyen, X. N. Evaporation and Concentration of Black Liquor, ch. 3, 15-85. In: *Chemical Recovery in the Alkaline Pulping Processes*, Hough, G. (ed.), TAPPI Pres, 1985.
- Xu, S., Lu, B., Baldea, M., Edgar, T. F., Wojsznis, W., Blevins, T., Nixon, M. *Data cleaning in the process industries. Reviews in Chemical Engineering*, 31(5), 453-490, 2015.