

Seleção de variáveis e análise de dados industriais a serem usados na proposta de descrição matemática empírica para o coeficiente global de troca térmica em evaporador Kraft

Jacinto, L. O.^{1*}; Pinheiro, O. S.², Costa Jr, E. F. C.¹, Costa, A. O. S.¹

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Curso de Graduação em Engenharia Química, UFES (Universidade Federal do Espírito Santo), Campus de Alegre, ES, Brasil.
² CENIBRA - Celulose Nipo-Brasileira S.A., Belo Oriente, MG, Brasil.

* e-mail: luca.ornelas@gmail.com

Resumo

Na etapa de concentração do licor preto Kraft, a necessidade de energia (vapor vivo) está diretamente ligada à troca térmica no interior do evaporador de múltiplo efeito. Portanto, a maior eficiência do processo se dá para uma menor resistência à transferência de calor, ou ainda, um maior coeficiente global de troca térmica (UA). O licor preto é queimado em caldeiras de recuperação e o vapor gerado é empregado na geração de energia elétrica para a própria indústria. Este fluido possui uma tendência à precipitação nas superfícies de troca térmica do evaporador especialmente quando este fluido atinge concentrações acima de 40% de sólidos. Rotineiramente observa-se na fábrica que é justamente a queda desta eficiência, diagnosticada na redução da concentração do produto, que motiva a retirada do evaporador do sistema para que o mesmo sofra o processo de limpeza. Neste estudo é analisada originalmente uma matriz de dados operacionais com 40 variáveis tomadas para 37440 tempos de amostragem distintos. O objetivo deste estudo consiste em realizar o tratamento dos dados operacionais disponíveis, preparando-os para que posteriormente tais informações sejam empregadas na proposta de uma metodologia empírica para a descrição do coeficiente global de troca térmica do evaporador Kraft.

Abstract

The steam demand to the Kraft black liquor concentration is directly related to heat transfer process in the multiple effect evaporator. So, the major efficiency of the process is observed to a lower resistance to heat transfer, or a major overall heat transfer coefficient (UA). The black liquor is burned in recovery boilers and the steam generated is used to generate electric energy for the industry. This fluid has a tendency to precipitation on the heat transfer surfaces of the evaporator especially when this fluid reaches over 40% solids concentrations. Typically is observed in the industry that is this efficiency loss, diagnosed by reducing the black liquor concentration, causes the cleaning process of the evaporator. In this study a set of operational data with 40 variables taken to 37440 different sampling time are originally analyzed. The objective of this study is to treat this industrial data set, preparing them for later this information to be used in the proposal for an empirical methodology for the description of the global heat transfer coefficient of Kraft evaporator.

Keywords (Palavras chaves): modelagem empírica, evaporador Kraft, tratamento de dados industriais.

1. Introdução

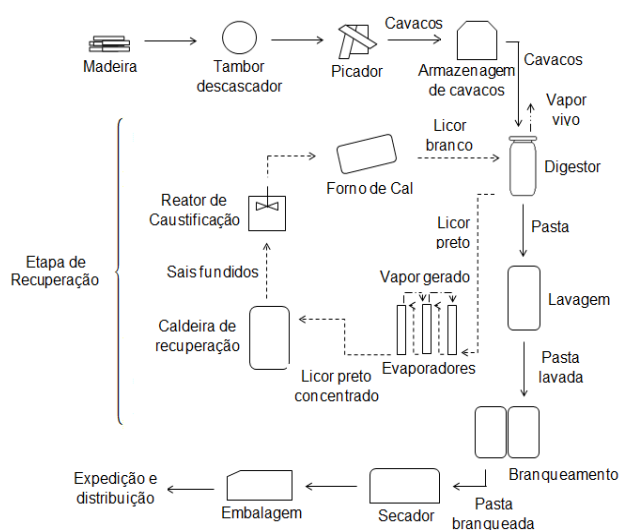
Na indústria de celulose e papel é predominantemente utilizado o processo Kraft [1]. Esta rota produtiva

consiste em extrair a celulose da madeira, realizando os seguintes procedimentos (Figura 1): (i) A madeira é transportada para o picador, onde se transformará em cavacos. (ii) Os cavacos são encaminhados para o

tanque de cozimento (digestor) onde será adicionado o licor branco (Na_2S e NaOH). Durante o processo de cozimento as fibras da celulose são separadas da lignina e da resina. (iii) A pasta celulósica produzida no digestor é lavada aos processos de lavagem, pré-branqueamento e branqueamento. Posteriormente a pasta é seca e preparada para expedição. (iv) O licor preto produzido no digestor segue para a etapa de recuperação.

Na etapa de recuperação, o licor preto, que contém produtos da reação de solubilização da lignina, é encaminhado para o sistema de evaporadores de múltiplo efeito com o objetivo de elevar a concentração de sólidos. Posteriormente, o licor preto concentrado é encaminhado para a caldeira de recuperação onde é queimado. O vapor gerado na caldeira de recuperação é utilizado na geração de energia elétrica. Plantas industriais modernas frequentemente são auto suficientes em relação à energia elétrica. Os sais inorgânicos resultantes da queima do licor são tratados e retornam à rota produtiva como licor branco. A possibilidade de recuperação dos sais inorgânicos é a principal vantagem do processo Kraft de obtenção de celulose [2].

Figura 1: Representação esquemática da rota Kraft



O objetivo deste estudo consiste em apresentar a metodologia empregada na seleção e no tratamento dos dados industriais fornecidos pela indústria. Tais dados serão posteriormente empregados na proposta de uma modelagem empírica para o coeficiente global de troca térmica em evaporador Kraft.

2. Materiais e Métodos

Para o desenvolvimento deste estudo foram empregados dados industriais que descrevem a rotina operacional da planta. Nas informações reportadas pela fábrica constam as telas do sistema de monitoramento, onde estão explicitados os sensores

existentes na planta, seus códigos de identificação e a localização de cada sensor. Os dados industriais fornecidos originalmente apresentam os valores operacionais de 40 variáveis (Tabela 1) tomados para 37440 tempos de amostragem distintos. Ou ainda, a matriz original que contém os dados operacionais possui a dimensão de 37440x40.

Ressalta-se neste ponto que nem sempre as variáveis operacionais coletadas são aquelas que idealmente deveriam ser conhecidas para se propor a modelagem matemática do processo. Isto porque o sistema de aquisição de dados da empresa funciona como um suporte no acompanhamento do processo e raramente está projetado com o objetivo fornecer informações que descrevam os fenômenos físicos envolvidos. Além disso, muitas vezes alguns pontos físicos da planta são de difícil acesso o que faz com a que instalação de sensores seja inviável. Ou ainda, algumas variáveis de processo são de difícil medição, o que também limita a disponibilidade de informações.

Sabe-se que é no primeiro efeito que são verificadas as maiores dificuldades operacionais, portanto os estudos se concentram nessa parte do sistema. Além disso, por haver um maior número de informações, foi escolhido o evaporador 1D para a proposta do modelo empírico. Essencialmente, é do evaporador 1D que o licor segue para ser queimado na caldeira e que portanto é neste equipamento que o licor atinge a sua maior concentração.

3. Resultados

Uma vez que durante da coleta dos dados industriais havia momentos em que o evaporador estava em processo de limpeza, tal situação teve que ser analisada durante o estudo. Assim sendo, viu-se necessário a exclusão das informações nestes períodos. Para isso foi feita a análise na vazão de vapor vivo de alimentação. É sabido que para efetuar a limpeza, o evaporador deve estar desligado e, como a vazão de alimentação de vapor é, em média, 15,3 Ton/h os valores abaixo de 9,0 Ton/h foram descartados da matriz de dados.

O tratamento da matriz de dados operacionais consiste principalmente na seleção das variáveis operacionais que são necessárias para o desenvolvimento do modelo matemático a ser proposto para a descrição do processo. A seguir, são explicitadas as informações consideradas na escolha destas variáveis.

Optou-se por considerar na modelagem a variável AI02 devido à tendência de incrustação de sólidos nas paredes do evaporador, que aumenta com a elevação da concentração de sólidos do licor preto, diminuindo assim o rendimento do evaporador [3]. Por esta mesma razão considerou-se ainda a variável AI05.

Tabela 1: Variáveis Operacionais disponíveis

Variável	Descrição (unidade)
Ordem	Instante no qual os dados foram medidos e registrados na matriz de dados operacionais (-)
AI02	Concentração da corrente de alimentação do 1º Efeito (%)
AI03	Concentração da corrente de alimentação do evaporador 1D (%)
AI05	Concentração da corrente de licor na saída do vaso flash do evaporador 1D (%)
FC12	Vazão de alimentação de vapor vivo no evaporador 1D (ton/h)
FI01	Vazão de alimentação de vapor vivo no 1º Efeito (ton/h)
FI19	Vazão da corrente de licor na saída do vaso flash do evaporador 1D (m³/h)
FI25	Vazão da corrente de alimentação de licor no 1º Efeito (m³/h)
LC01	Nível no evaporador 1A (%)
LC02	Nível no evaporador 1B (%)
LC03	Nível no evaporador 1C (%)
LC51	Nível no evaporador 1D (%)
PC01	Pressão do vapor vivo alimentado no evaporador 1A (Kg/cm²)
PC02	Pressão do vapor vivo alimentado no evaporador 1B (Kg/cm²)
PC03	Pressão do vapor vivo alimentado no evaporador 1C (Kg/cm²)
PC27	Pressão no vaso flash após o evaporador 1D (Kg/cm²)
PI04	Pressão da corrente de saída de vapor do evaporador 1A (Kg/cm²)
PI05	Pressão da corrente de saída de vapor do evaporador 1B (Kg/cm²)
PI06	Pressão da corrente de saída de vapor do evaporador 1C (Kg/cm²)
PI07	Pressão da corrente de saída de vapor do evaporador 2 (mmHg)
PI08	Pressão da corrente de saída de vapor do evaporador 3 (mmHg)
PI09	Pressão da corrente de saída de vapor do evaporador 4 (mmHg)
PI10	Pressão da corrente de saída de vapor do evaporador 5 (mmHg)
PI11	Pressão da corrente de saída de vapor do evaporador 6 (mmHg)
PI25	Pressão da corrente de alimentação de vapor vivo no evaporador 1D (Kg/cm²)
PI26	Pressão de vapor vivo alimentado no 1º Efeito (Kg/cm²)
TC26	Temperatura do vapor vivo alimentado no 1º Efeito (°C)
TI01	Temperatura da corrente de saída de vapor do evaporador 1A (°C)
TI02	Temperatura da corrente de saída de vapor do evaporador 1B (°C)
TI03	Temperatura da corrente de saída de vapor do evaporador 1C (°C)
TI04	Temperatura da corrente de saída de vapor do evaporador 2 (°C)
TI05	Temperatura da corrente de saída de vapor do evaporador 3 (°C)
TI06	Temperatura da corrente de saída de vapor do evaporador 4 (°C)
TI07	Temperatura da corrente de saída de vapor do evaporador 5 (°C)
TI08	Temperatura da corrente de saída de vapor do evaporador 6 (°C)
TI09	Temperatura da corrente de saída do licor do evaporador 1A (°C)
TI10	Temperatura da corrente de saída do licor do evaporador 1B (°C)
TI11	Temperatura da corrente de saída do licor do evaporador 1C (°C)
TI25	Temperatura do vapor vivo alimentado no evaporador 1D (°C)
TI54	Temperatura da corrente de licor na saída do vaso flash do evaporador 1D (°C)

As variáveis que mais afetam a concentração da corrente de saída do licor preto são: o calor fornecido ao sistema, a concentração inicial e a vazão de alimentação do licor [4], portanto julgou-se necessária também a consideração da variável FI25.

Um dos objetivos é a predição da vazão de vapor vivo alimentado, portanto optou-se pela não utilização da variável FC12.

Além disso, acredita-se ser importante considerar as temperaturas de trabalho dos três evaporadores que estão em funcionamento no primeiro efeito do sistema. Mais além, sabe-se que estão instalados no primeiro efeito quatro evaporadores, sendo que um deles sempre está em processo de limpeza (fora de funcionamento). Como mencionado anteriormente, foram considerados os instantes de tempo em que o evaporador 1D estava em pleno funcionamento. Assim, a variável que descreve a temperatura no interior de 1D foi considerada na modelagem (TI11). Para que fossem considerados sempre os evaporadores em pleno funcionamento, foram apreciadas as duas maiores temperaturas das correntes de alimentação de licor dos outros três evaporadores que compõem o primeiro efeito (T1 e T2). Ou ainda, a menor temperatura foi desconsiderada uma vez que tal variável representa a temperatura da corrente de alimentação do evaporador que sofria o processo de limpeza.

A quantidade de energia envolvida no processo de vaporização da água (entalpia de vaporização), durante a troca térmica no interior do evaporador, está associada à pressão da corrente de vapor vivo no interior do mesmo. Sendo assim considerou-se a necessidade da utilização da variável PI25.

A função do vaso flash é essencial para o desempenho dos evaporadores, uma vez que ocorre um aumento significativo da concentração de sólidos na corrente de licor preto [5]. Deste modo, avaliou-se pertinente a utilização das variáveis referentes às informações reportadas após o vaso flash, PC27 e FI19.

O coeficiente global de troca térmica está diretamente relacionado à diferença das temperaturas globais em um processo de transferência de calor através de uma parede [6]. Portanto, se fez necessária o uso das variáveis TI54 e TI25.

Finalmente, foi mantida ainda a variável que relaciona o dado operacional com o tempo no qual o mesmo foi coletado (variável ordem).

Finalizada a seleção das variáveis, é possível contar com um conjunto de 12 variáveis que serão consideradas durante o processo de obtenção do modelo. São elas (Tabela 1): Ordem, AI02, FI25, TI11, T1, T2, PC27, TI54, FI19, AI05, PI25 e TI25.

Assim sendo, a matriz 37440x40 original foi reduzida para 30630x12, ou seja, valores operacionais das 12 variáveis citadas anteriormente tomados para 30630 tempos de amostragem distintos. As informações da Tabela 2 reportam os valores mínimo, médios, máximos e os desvios padrões para estas variáveis.

Tabela 2: dispersão dos dados

Variável	Valor mínimo	Valor médio	Valor máximo	Desvio padrão
AI02 (%)	34,151	42,498	51,947	1,384
FI25 (m³/h)	-0,034	182,790	295,450	13,394
TI11 (°C)	117,053	135,475	142,786	4,396
T1 (°C)	126,624	139,399	142,786	1,468
T2 (°C)	122,839	136,590	141,577	1,420
PC27 (Kg/cm²)	-0,303	-0,062	0,490	0,072
TI54 (°C)	92,285	109,987	118,600	2,564
FI19 (m³/h)	-0,108	95,408	210,052	22,534
AI05 (%)	50,010	69,573	76,646	2,162
PI25 (Kg/cm²)	0,878	3,373	3,657	0,193
TI25 (°C)	144,308	151,420	183,517	6,598

3.1. Manipulação dos dados

Quanto maior a concentração de sólidos do licor preto, maior a tendência à deposição nas paredes do evaporador, diminuindo assim seu rendimento [3]. Diminuir o rendimento do trocador de calor significa que diminui a capacidade de transferência térmica, implicando num menor fluxo de energia térmica (calor). Este efeito pode ser observado ao se analisar o coeficiente global de transferência de calor (UA), que está relacionado à resistência térmica à transferência de calor e envolve conjuntamente os efeitos de troca térmica por condução, convecção e radiação [6].

A forma mais comum de se estabelecer uma relação matemática para o coeficiente global de transferência de calor (UA) é apresentada na Equação 1.

$$q_x \equiv UA \Delta T \quad (1)$$

Onde ΔT é a diferença de temperaturas globais e q_x é a taxa de transferência de calor unidimensional.

Para a taxa de transferência de calor unidimensional, q_x , com base na variável de pressão de vapor vivo de alimentação, foi efetuado o cálculo da entalpia de vaporização associado a cada instante. Para o devido fim, foram empregados dados termodinâmicos obtidos na literatura [7].

O cálculo foi feito utilizando a regressão não linear com o modelo $H = a + b.P + c.P^2$. Sendo obtidos os seguintes valores para os parâmetros: $a = 336,925$, $b = -0,855589$ e $c = 0,000890$.

Com a vazão de vapor alimentada, entalpia de vaporização, temperatura da corrente de alimentação de vapor e a temperatura da corrente de saída de licor foi calculado o UA real para cada instante de tempo no qual os dados operacionais foram registrados. Os resultados obtidos indicam que o UA (kW/K) possui um valor mínimo igual a 44,30, valor máximo igual a 422,73, valor médio de 225,23 e desvio padrão 39,36.

A Figura 2 apresenta alguns valores obtidos para UA em função da ordem de coleta dos dados.

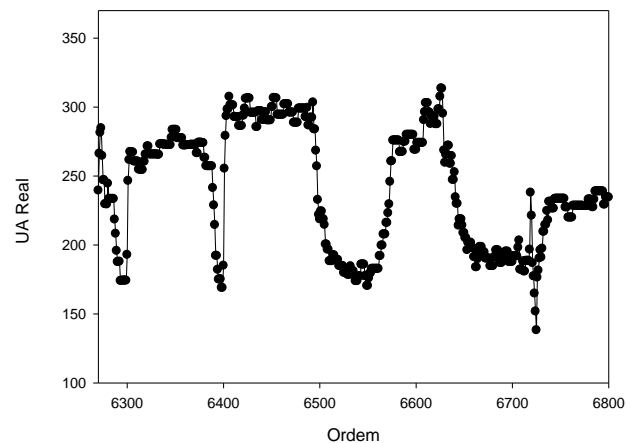


Figura 2: Comportamento do UA Real com a Ordem

4. Conclusão

Nem sempre é trivial realizar a seleção de quais variáveis serão realmente consideradas para descrever matematicamente um determinado sistema. Na utilização de dados industriais, muitas vezes é necessário que se trabalhe com as informações disponíveis e adaptar a metodologia em função destas informações. Além disso, para que a seleção das variáveis seja eficiente, é importante conhecer os fenômenos envolvidos no processo.

Resultados iniciais apontam que devido à não linearidade do processo, uma metodologia empírica não linear deverá ser aplicada na modelagem do coeficiente global de troca térmica do evaporador Kraft. Assim, os autores propõem a utilização de redes neurais artificiais para a descrição do sistema.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq (Edital MCTI/CNPq/SPM-PR/Petrobras 18/2013 - Processo: 409956/2013-9; Bolsa de produtividade DTI) e à Fapes pelo apoio financeiro (Bolsa Pesquisador Capixaba).

6. Referências Bibliográficas

[1] BHARGAVA, R.; KHANAM, S.; MOHANTY, B.; RAY, A. K. Simulation of flat falling film evaporator system for concentration of black liquor. *Computers & Chemical Engineering*. v. 32, p. 3213 – 3223, 2008.

[2] FIGUEIRÊDO, Leonardo Soares. Modelagem matemática do estado estacionário de um real sistema de caustificação de uma fábrica de celulose. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial). Centro Universitário do Leste de Minas Gerais, Coronel Fabriciano, 2009.

[3] CAMPOS, Solange Gonçalves Silva. Modelagem matemática e análise do coeficiente global de transferência de calor para o processo de concentração do licor negro do eucalipto em sistema de evaporadores de múltiplo efeito. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial). Centro Universitário Leste de Minas Gerais, Coronel Fabriciano, 2009.

[4] COSTA, Andréa Oliveira Souza da. Alternativas para o controle de um sistema de evaporadores de múltiplo efeito. 2000. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Química) – Programa de Pós Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

[5] Silveira, J. C.; Pinheiro, O. S.; Costa, A. O. S.; Costa Jr., E. F.; "Modelagem fenomenológica de tanque flash de fábrica de celulose", p. 71-72 . In: Anais do V Encontro Científico de Física Aplicada [= Blucher Physics Proceedings, n.1, v.1]. São Paulo: Blucher, 2014.

[6] INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. Condução Unidimensional em Regime Estacionário. In: . Fundamentos de Transferência de Calor e Massa. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. v. 1, p. 63-65.

[7] SMITH, J. M.; VAN NESS, C. H.; ABBOTT, M.M. Apêndice F. Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. v. 1, p. 541-545.