



Elaboração de Projeto Piloto de Evaporador e Monitoramento da Formação e Modos de Limpeza das Incrustações decorrentes do Processo

Claudio Rodrigues & Luiz Henrique Schiavon

Unisanta – Universidade Santa Cecília – Departamento de Pós-Graduação

Programa de Mestrado em Engenharia Mecânica

Rua Oswaldo Cruz- Santos-SP, Brasil

E-mail: : engmecclaudio@gmail.com.br

Received July, 2014, revised september, 2014

Resumo: Este artigo apresenta diretrizes para desenvolver, construir e testar um evaporador capaz de minimizar incrustações, que são decorrentes em etapas dos processos de aumento de concentração de produtos como, por exemplo, açúcar e licor preto de celulose. O princípio construtivo será baseado na fixação de somente um dos lados do trocador de calor a fim de permitir sua dilatação, quando as incrustações serão removidas por choques térmicos durante alternância da operação. Sua construção será do tipo placa de troca de calor, fazendo-se fluir vapor no seu interior e o fluido a ser concentrado no lado externo da placa. Para sua correta operação, possuirá equipamentos periféricos para entrada de vapor e saída de condensado no lado de aquecimento e recirculação no lado do fluido em aumento de concentração. Também constarão no trabalho os parâmetros a serem avaliados para testes de performance e aplicações, bem como a análise da facilidade de remoção das incrustações.

Palavras chave: Evaporador, Incrustação, Licor Negro, Manutenção de Evaporadores.

Preparation of The Pilot Project for Monitoring Evaporator and Training Modes and cleaning of fouling resulting from process

Abstract: This article presents guidelines to design, build and test an evaporator capable of minimizing fouling, which arise in the process steps of increasing concentration of products such as sugar, cellulose, and black liquor. The constructive principle is based on the fixation of only one side of the heat exchanger to allow its expansion, when the scales are removed by thermal shock during the switching operation. Its construction will be of the plate type heat exchanger, making it flow steam therein and the fluid to be concentrated at the outer side of the plate. For proper operation, it will have peripheral devices for input and output of steam condensed on the heating side and the side of the recirculation fluid when increased in concentration. Work also appears in the parameters to be evaluated for performance and application testing as well as analysis of the ease of removal of fouling.

Keywords: Evaporator, Fouling, Black Liquor, Maintenance Evaporators.

1. Introdução

O termo evaporadores designa dois equipamentos de aplicações distintas: - Nos evaporadores utilizados nos sistemas de refrigeração temos uma superfície de transferência de calor na qual o líquido volátil é vaporizado com o objetivo de remover calor de um espaço ou produto refrigerado; - Nos evaporadores estudados na Engenharia Química como operação unitária temos a evaporação como a remoção de solvente a partir de uma solução na forma de vapor ou de suspensão. O solvente em questão, na grande maioria das situações é a água e o objetivo é, geralmente, concentrar a solução.

O trabalho trata a evaporação com o segundo enfoque supracitado, como uma operação de concentração empregada nos mais diversos campos da indústria química e de processamento químico. Alimentos, bebidas, pigmentos, fertilizantes, produtos farmacêuticos etc. Face à importância no cenário econômico-ambiental serão objetos de estudo especificamente o Licor Negro, decorrente do processo de fabricação da celulose e a Vinhaça, decorrente do processo de fabricação do etanol a partir da cana-de-açúcar.

O Brasil é o quarto maior produtor mundial de celulose, com 15,1 milhões de toneladas em 2013 e o oitavo maior produtor mundial de papel, com 10,4 milhões de toneladas em 2013. (IBA- Indústria Brasileira de Árvores, 2014). No setor sucroalcooleiro o Brasil é referência para os demais países produtores, a cana-de-açúcar é produzida em quase todo território nacional, o País é líder mundial e domina o ciclo completo da produção de etanol, segundo a UNICA- União da Indústria da Cana-de-açúcar, em 2013 o País produziu 653.519 mil toneladas de cana-de-açúcar e 27.543 mil m³ de etanol.

Apesar da importância dos processos de evaporação, e da significância que uma pequena melhoria na eficiência do processo possa ocasionar, uma pesquisa bibliográfica encontra poucas ferramentas para modelagem, simulação e otimização dos sistemas de evaporação dentro de um contexto global. Talvez pela aparente simplicidade matemática frente às outras operações, como a destilação por exemplo, ou ainda por serem enquadrados como estruturas “caixa preta” de domínio restrito dos fabricantes de equipamento (Westphalen, 1999).

O equipamento a ser desenvolvido e testado é um Evaporador de Placas.

2. Materiais e Métodos

A primeira parte do trabalho foi direcionada a encontrar argumentos que justifiquem o investimento em recursos e tempo para a pesquisa de um equipamento que não possui referências científicas disponíveis para verificação de sua aplicabilidade e eficiência. Avaliaram-se diversos

trabalhos recentes obtidos através de busca de artigos, dissertações e teses relacionados ao estudo, a pesquisa por fundamentos Teóricos da Evaporação.

O fluxo de calor transferido Q determina o desempenho de um evaporador é determinado. Este calor transferido depende do coeficiente de transferência global de calor U , da superfície de transferência A , e da diferença efetiva de temperatura ΔT .

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (1)$$

A diferença efetiva de temperatura ΔT corresponde à diferença entre a temperatura de saturação do vapor T_{vapor} e a Temperatura de saída do Licor T_{licor} diminuída a elevação do ponto de ebulição EPE.

$$\Delta T = T_{\text{vapor}} - T_{\text{licor}} - EPE \quad (2)$$

A elevação do ponto de ebulição é a diferença entre a temperatura de ebulição de uma solução e a temperatura de ebulição do solvente puro à mesma pressão, ou seja, neste caso a EPE é a diferença entre a temperatura de ebulição do licor negro e a da água pura à mesma pressão (Coulson, 2002).

Conforme lei de Raoult, a pressão de vapor de um solvente diminui proporcionalmente com a concentração molar do soluto, ou seja, a elevação do ponto de ebulição do licor aumenta com o teor de sólidos. A EPE pode atingir valores próximos de 30°C para licores concentrados, com cerca de 80% de matéria sólida (Sixta, 2006). A relação entre a EPE e o teor de sólidos está ilustrada graficamente na Figura 1 a seguir.

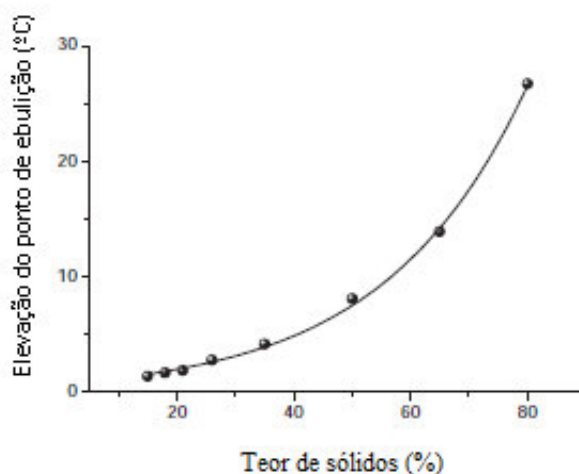


Figura 1. Relação entre a EPE e o teor de sólidos.

Elevação do ponto de ebulição, EPE, em função do teor de matéria sólida (adaptado de Sixta, 2006).

Costa (2000), utilizando dados empíricos de várias soluções de licor negro, desenvolveu uma equação que relaciona o valor de EPE do licor com a sua percentagem de matéria sólida, x . A equação (3) ilustra essa relação, conseguindo descrever 96,68% da variabilidade experimental estudada, sendo os valores preditos próximos dos valores experimentais, apresentando um erro médio de 0,06 K, com um desvio padrão de 1,52K.

$$EPE = 1.0099140e^{3.940961x} \quad (3)$$

O coeficiente de transferência de calor U , depende da configuração do evaporador, das propriedades do licor (especialmente do seu teor de sólidos e viscosidade), e do potencial de formação de incrustações na superfície dos trocadores. Coeficientes de transferência típicos para evaporadores de filme descendente, apresentam valores entre 700 e 2000 W/(m²K), estando os valores mais baixos relacionados com altas concentrações de sólidos (Sixta, 2006).

Em 2007, Bhargava et al. desenvolveram uma equação empírica que traduz o coeficiente de transferência de calor global em cada efeito de um evaporador com 7 efeitos e com alimentação em contra corrente. Observa-se na correlação proposta que U é função do gradiente de temperatura e dos valores médios de concentração e caudal de licor para cada efeito.

$$\frac{U}{2000} = a \left(\frac{\Delta T}{40} \right)^b \left(\frac{x \text{ médio}}{0,6} \right)^c \left(\frac{L \text{ médio}}{25} \right)^d \quad (4)$$

x médio e L médio são determinados pela média entre os valores de entrada e saída respectivos e a , b , c e d são constantes empíricas. Da avaliação cuidadosa dos dados, os autores, concluíram que o comportamento de U , no primeiro e segundo efeito, era totalmente diferente dos restantes.

Os valores de U , para estes dois efeitos eram substancialmente mais baixos devido à elevada concentração de sólidos nestes efeitos (43 a 53%). De fato, considera-se que, quando próximo a 48% de concentração de sólidos ocorre o início da formação de incrustações.

Deste modo, foi necessário criar duas correlações diferentes, uma para os dois primeiros efeitos, com concentrações mais elevadas, e outra para os restantes efeitos. O tratamento dos dados permitiu atribuir diferentes valores às constantes a, b, c , consoante o número do efeito.

Aplicando então a equação 4 teremos duas situações para evaporadores que concentram um teor de sólidos superior a 48%: - Quando de simples e duplo efeito aplica-se a equação (5); - Quando de três ou mais efeitos, aplica-se a equação (6). A tabela 1 a seguir mostra o resultado da aplicação das equações.

$$\frac{U}{2000} = 0.604 \left(\frac{\Delta T}{40} \right)^{-0.3717} \left(\frac{x \text{ médio}}{0,6} \right)^{-1.227} \left(\frac{L \text{ médio}}{25} \right)^{0.0748} \quad (5)$$

$$\frac{U}{2000} = 0.1396 \left(\frac{\Delta T}{40} \right)^{-0.7949} \left(\frac{L \text{ médio}}{25} \right)^{0.1673} \quad (6)$$

Tabela 1. Resultados.

Número efeito	A	b	c	d
1 e 2	0.604	-0.3717	-1.227	0.0748
3,4,5,6,7	0.1396	-0.7949	0.0	0.1673

3. Construção de um Evaporador piloto

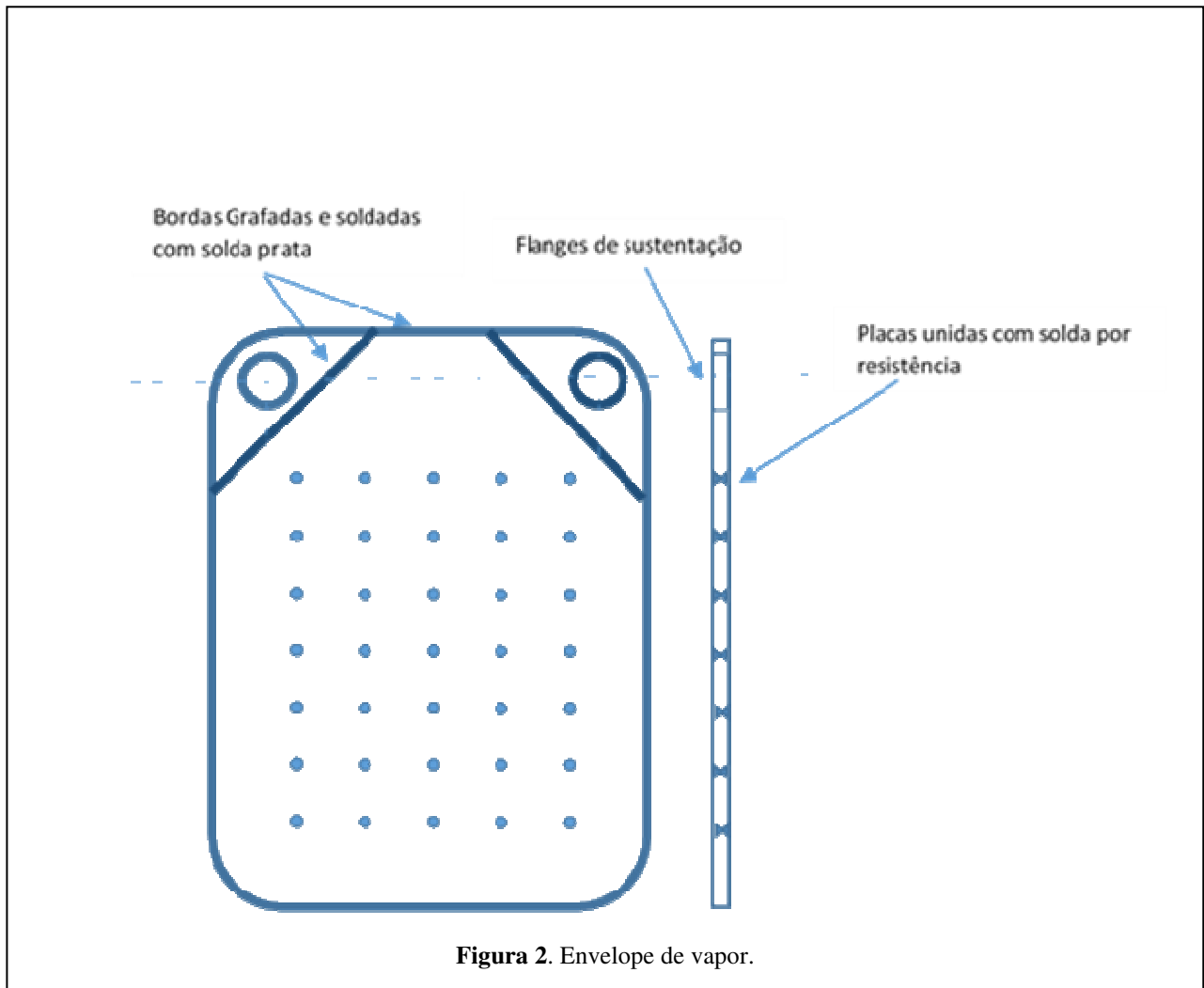
O Projeto consiste em duas partes, a unidade suspensa, chamada envelope de vapor, composta de duas placas de aço inoxidável faceadas e unidas por bordas grafadas e posteriormente abrasadas com solda prata, de forma que tenhamos um invólucro de vapor com uma bolsa de 10mm de espessura.

Este envelope de vapor deve possuir uma conexão soldada na borda inferior para retirada de condensado, bem como uma saída de vapor vegetal na parte superior, (veja figura 2). Na parte superior serão acrescentados flanges que servirão de sustentação para o envelope de vapor.

A segunda parte é a base, que dá a sustentação mecânica para o envelope de vapor e onde serão instalados o distribuidor de solução, a bomba de recirculação. Veja figura3.

O sistema deve prever o controle do produto concentrado e, em um segundo momento, o controle do vapor vegetal, uma vez que o objetivo da concentração da vinhaça é a recuperação da água diluída. Veja Figura 4 a vista geral.

A referência para as dimensões da placa suspensa será estimada a partir da simulação de cálculo para uma previsão produção de 8 Kg/h de vapor, com uma potência disponível de 5 KW.



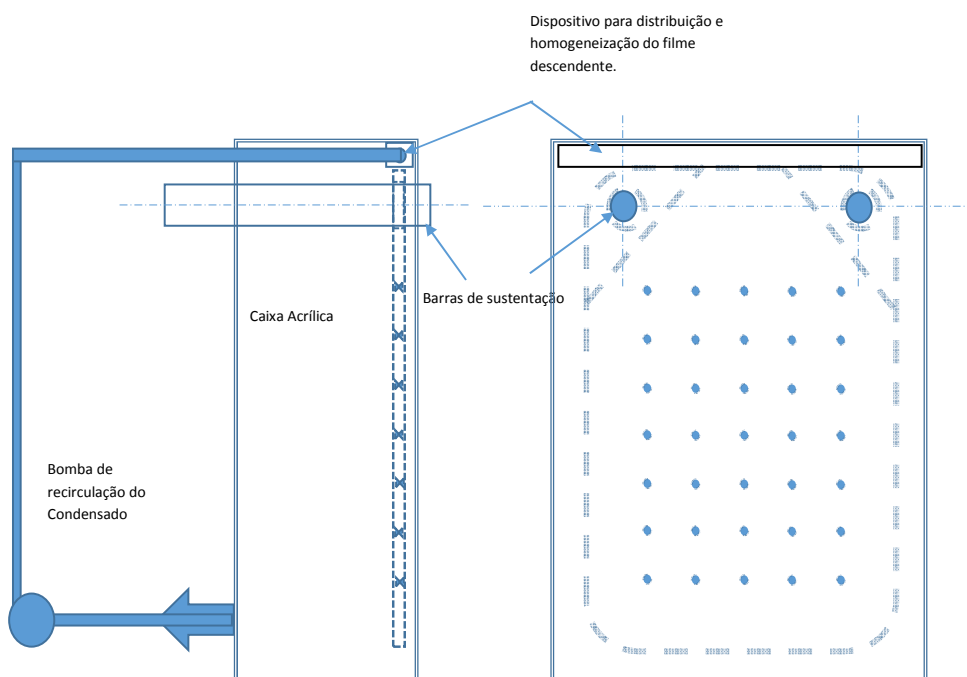


Figura 3. Sustentação mecânica para o envelope de vapor e bomba de recirculação.

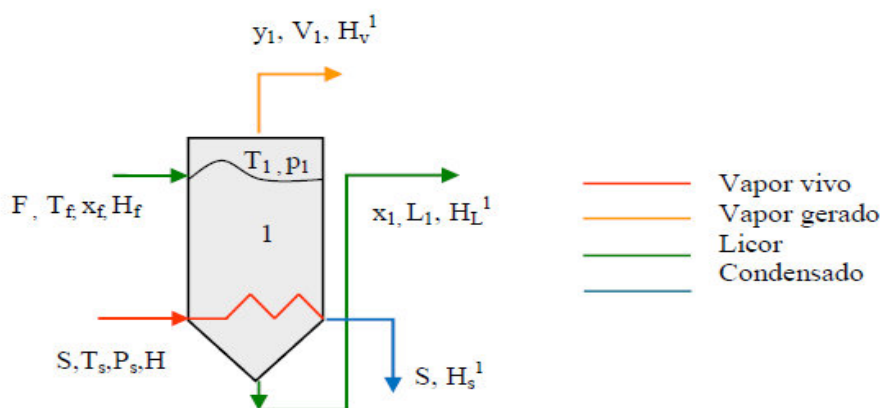


Figura 4. Vista geral.

Considerando o esquema do evaporador abaixo serão levantados:

- Balanços Mássicos
- Balanço mássico Global ao Evaporador;
- Balanço Mássico Global ao Solute.
- Diferença Total de Temperatura no Evaporador
- Balanço Energético ao Evaporador
- Entalpia do Licor Negro
- Entalpias do Vapor Saturado e Entalpia de Vaporização
- Verificação do Coeficiente de Transferência de Calor .

4. Conclusões

A proposta de avaliar o comportamento de um evaporador de placas em conjunto com a incrustação inerente ao processo é ousada, porém não intangível e sua realização propõe uma nova ferramenta de decisão e aprimoramento nos projetos de evaporadores. O equipamento servirá não somente aos objetivos aqui previstos, como também a novos desenvolvimentos na área de evaporação, contribuindo para uma melhor utilização de água e energia dispendidas no processo. O protótipo também servirá de testes a modelos matemáticos e simulações do processo.

5. Referências Bibliográficas

- WESTPHALEN, D. L. **Modelagem, simulação e otimização de sistemas de evaporação**. Originalmente apresentada como tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas, 1999.
- ANDREUCCETTI, M.T. **Caracterização do licor negro de eucalipto na etapa de evaporação e correlação de suas propriedades**. -Dissertação de Mestrado Faculdade de Engenharia Química da Unicamp Campinas, SP: [s.n.], 2010.
- CARVALHO, T.C.de. **Redução do Volume de Vinhaça Através da Evaporação** – Artigo apresentado no IV Seminário de pós graduação em Engenharia Mecânica – Unesp –Bauru.
- VITORINO, Carla A.V. **Modelação e Otimização de uma Unidade Industrial de Evaporação de Licor Negro** – Dissertação de Mestrado em Engenharia Química do Instituto Politécnico de Tomar- Portugal
- BHARGAVA, R., KHANAM, S., MOHANTY, B., RAY, A.K., **Selection of optimal feed flow sequence for a multiple effect evaporator system**, Computers & Chemical Engineering, 2007.
- COSTA, A. O. S., LIMA, E.L., **Modelling and Control of an Industrial Multiple-Effect Evaporator System**, The Canadian Journal of Chemical Engineering, Volume 81, [1032 – 1040], outubro 2003.
- COULSON, J.M., RICHARDSON, J.F., **Chemical Engineering-Particle Technology and Separation Processes**, 5ª Edição, Butterworth Heinemann, 2002.
- BRACELPA – Associação Brasileira dos Fabricantes de Celulose e Papel. **Estatísticas do setor 2013**. Disponível em: http://www.bracelpa.org.br/shared/iba_2014_pt.pdf, Acesso em: Set 2014.
- UNICA – União Nacional da Indústria da Cana-de-açúcar, **Apresentação da Estimativa de Safra 2013/2014**. Disponível em: <http://www.unica.com.br/download.php?idSecao=17&id=12655382> Acesso em Set 2014.
- EVAPORATOR HANDBOOK AVP. Disponível em: <http://www.p2pays.org/ref/15/14357.pdf>, Acesso em: Set 2014.
- MINTON, PAUL E.. Handbook of Evaporation Technology.: William Andrew., p 1 <http://site.ebrary.com/id/10265789>, Acesso em : Jan – Set 2014