



DIMENSIONAMENTO DE UM PRÉ-EVAPORADOR MODELO ROBERT'S PARA CONCENTRAR CALDO-DE-CANA

FERNANDO PERPETUO PANÇA CRIVELLARO, ALESSANDRE ALVES PEREIRA,
IRENE RODRIGUES FREITAS

UNORP, Centro Universitário do Norte Paulista
Curso de Engenharia Química
Rua Ipiranga, 3460 Jardim Alto Rio Preto
São José do Rio Preto/SP. CEP 15020-040 Brasil

(Recibido 16 de febrero de 2016, para publicación 5 de mayo de 2016)

Resumo – A evaporação é uma das operações unitárias mais utilizadas em processos industriais. Sua função é concentrar uma solução mediante a eliminação do solvente em forma de vapor. O evaporador tipo Robert's é o mais utilizado nas indústrias açucareiras devido a sua área de aquecimento. Este trabalho objetivou construir um pré-evaporador em escala piloto para concentração do caldo-de-cana e geração de vapor. Foram mencionados os processos aplicados industrialmente, onde foram abordados parâmetros técnicos e operacionais, para obter economia de vapor.

Palavras-chave – Evaporação, equipamento, indústria.

1. INTRODUÇÃO

A evaporação é uma das operações unitárias mais utilizadas em processos industriais. Sua função é concentrar uma solução mediante a eliminação do solvente em forma de vapor. É aplicada em diversos segmentos industriais, alimentos, papel e celulose, polímeros e fertilizantes, compostos orgânicos e inorgânicos [1].

Segundo Rogério *et al.* [2] o objetivo do processo de evaporação é a concentração de uma solução que consiste em um soluto não volátil e um solvente volátil. Na maioria dos processos o solvente é a própria água. Nos evaporadores o produto é líquido e às vezes até com viscosidade alta.

O evaporador tipo Robert é os mais utilizados nas indústrias açucareiras devido a sua área de aquecimento, diante desse aspecto, as indústrias não visam somente o produto final, e sim um subproduto, o bagaço [3].

A evaporação utilizada no processamento de alimentos em grandes volumes tem preferência por evaporador de passagem rápida devido ao tempo de exposição da solução, não prejudicando as características da solução [4].

A evaporação, não resume apenas na concentração de uma solução propriamente dita, mas abrange um leque maior nas indústrias, sendo responsável pelo balanço energético de uma indústria obtendo economia de energia através dos vapores, condensados gerados e transferência de calor envolvido neste processo [5].

Modelos e arranjos matemáticos de evaporadores existem em diversos segmentos industriais, e para cada tipo de segmento é levado em consideração o ponto de ebulição preservando o aroma, extrato e propriedades físico-químicas do fluido a ser concentrado [6]. Este trabalho teve por objetivo construir um pré-evaporador em escala piloto, utilizando materiais descartados em indústrias e tubos encontrados em ferro velho para concentrar o caldo-de-cana e gerar vapor.

2. ETAPA DE EVAPORAÇÃO

Para que a evaporação ocorra é necessário o fornecimento de calor latente, oriundo das turbinas na forma de vapor escape para efetuar a vaporização do solvente. O fluido a ser concentrado ocupa a parte interna dos tubos, trocando calor com o vapor. Na realização da troca de calor ocorre a condensação do vapor, sendo o mesmo utilizado posteriormente nas caldeiras. O fluido concentrado por diferença de pressão e temperatura segue para o próximo efeito [7].

Os sistemas de evaporação são a base para a economia de energia do processo, isso levando em consideração as condições de evaporador para evaporador. Na concentração do fluido ocorre a formação de espumas, devido à movimentação da solução em meio aos tubos do fluido. O volume do fluido não deve ultrapassar 1/3 do corpo do evaporador, para que essa espuma não seja arrastada para a calandra do próximo evaporador [8].

3. CONCENTRAÇÃO

Com a solução em concentração ocorre o aumento de algumas propriedades como densidade, viscosidade e o ponto de ebulição aumentam com isso o coeficiente global tendem a reduzir, onde a tendência a incrustações na tubulação ocorre, são casos onde ocorrem a cristalização da solução, a concentração em evaporação de múltiplos efeitos é uma curva crescente desde a entrada da solução até a saída da solução concentrada [7].

4. ELEVAÇÃO DO PONTO DE EBULIÇÃO

Na indústria açucareira as propriedades físicas das soluções de açúcar deverão ser concentradas, para a retirada da água e posteriormente a cristalização do açúcar. Dados como: densidade, calor específico, epe, condutividade térmica, tensão superficial, viscosidade, número de Prandtl e Reynolds. As equações empíricas para o coeficiente global foram elaboradas como mostra a equação (1). Do ponto de vista termodinâmico de um líquido puro, não apresenta problemas à temperatura do líquido em ebulição, e é fixada pela pressão exercida na solução pura [9].

$$\text{epe } (^{\circ}\text{C}) = 1,78x + 6,22x^2 \quad (1)$$

Onde: x é a fração mássica de soluto

5. SENSIBILIDADE À TEMPERATURA

Para evitar a decomposição de algumas substâncias da solução a ser concentrada no conjunto de evaporadores, este equipamento opera em baixa temperatura e sob vácuo, para a diminuição do tempo de residência da solução no evaporador [7].

Com o aumento da concentração o ponto de ebulição da solução decresce, ocorrendo uma diferença de temperatura e uma queda de velocidade na transmissão de calor entre o vapor e a solução a ser concentrada como é demonstrado na Fig. 1.

A elevação do ponto de ebulição do caldo depende de outras variáveis tais como: °Brix e pressão hidrostática. A troca de calor ocorre melhor nos tubos da lateral do evaporador, onde ocorre maior incrustação dos tubos [11].

6. MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais utilizados para construção do pré-evaporador foram: tubo de aço inox 8" SCH 40; tubo de aço inox de 1/2"; chapas de aço inox 3mm; eletrodo 48 2 mm, válvula esfera 1 1/2"; tubo de aço carbono 1 1/2"; registro de 1/2"; tinta de alta temperatura, cabos de energia 4 mm; união de 1 1/2" aço carbono.

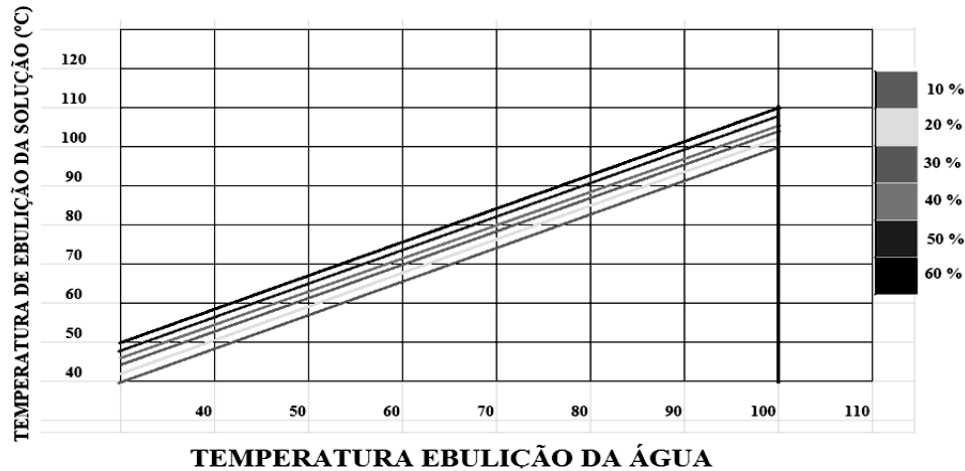


Fig. 1. Diagrama de Dühring da sacarose [10].

A construção do pré - evaporador modelo tipo Robert's teve como base as seguintes medidas: altura: 70 cm; corpo da calandra: 20 cm; diâmetro do evaporador: 20,3 cm (tubo de 8")

7. RESULTADOS

7.1. Cálculo do volume do pré-evaporador total

Para o desenvolvimento deste projeto foi necessário à confecção do pré-evaporador como demonstra Fig. 2. O dimensionamento do pré-evaporador foi realizado por partes, iniciando o cálculo do evaporador pelo volume total [12].

$$V = \left(\frac{\pi}{4} \cdot D^2\right) \cdot L$$

$$V = \frac{\pi}{4} \cdot 20,3^2 \cdot 70$$

$$V = 22,6 \text{ l}$$

Onde:

V = Volume total do pré – evaporador (l);

D = Diâmetro do pré – evaporador (cm);

L = Comprimento total do pré – evaporador (cm).

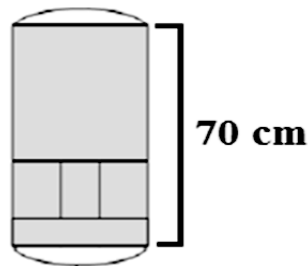


Fig. 2. Pré-evaporador.

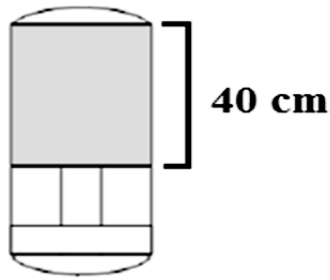


Fig. 3. Demonstração da parte superior do pré-evaporador.

7.2. Volume da parte superior da calandra do evaporador

Nesta etapa calculou-se conforme a Fig. 3 a parte superior do evaporador onde ocorrerá a evaporação da solução a concentrar [12].

$$V = \left(\frac{\pi}{4} \cdot D^2\right) \cdot L$$

$$V = \frac{\pi}{4} \cdot 20.3^2 \cdot 40$$

$$V = 12,9 \text{ l}$$

Onde:

V = Volume da parte superior do evaporador (l);

D = Diâmetro do evaporador (cm);

L = Comprimento da parte superior do evaporador (cm).

7.3. Volume da parte inferior da calandra do evaporador

A parte inferior é onde fica o caldo mais concentrado. O volume acondicionado nesta parte do evaporador é pequeno, é somente para ocorrer à circulação do caldo, conforme demonstra Fig. 4 [12].

$$V = \left(\frac{\pi}{4} \cdot D^2\right) \cdot L$$

$$V = \frac{\pi}{4} \cdot 20.3^2 \cdot 10$$

$$V = 3,2 \text{ l.}$$

Onde:

V = Volume da parte inferior da calandra do evaporador (l);

D = Diâmetro do evaporador (cm);

L = Comprimento da parte inferior da calandra do evaporador (cm).

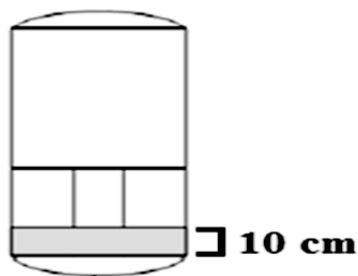


Fig. 4. Demonstração da parte inferior do pré-evaporador.

7.4. Volume da calandra do evaporador

A calandra do evaporador é a parte onde ocorre a troca térmica do vapor com o caldo a ser concentrado, por condução como por convecção.

$$V = \left(\frac{\pi}{4} \cdot D^2\right) \cdot L$$

$$V = \frac{\pi}{4} \cdot 20.3^2 \cdot 20$$

$$V = 6,5 \text{ l.}$$

Onde:

V = Volume da calandra do evaporador (l);

D = Diâmetro do evaporador (cm);

L = Comprimento da calandra do evaporador (cm).

7.5. Volume do tubo central da calandra de 2"

O diâmetro do tubo central da calandra é maior para que ocorra a movimentação do caldo, assim o caldo sobe pelos tubos de menor diâmetro e desce pelo tubo central (Fig. 5).

$$V = \left(\frac{\pi}{4} \cdot D^2\right) \cdot L$$

$$V = \frac{\pi}{4} \cdot 5.02^2 \cdot 20$$

$$V = 0,4 \text{ l}$$

Onde:

V = Volume do tubo central da calandra (l);

D = Diâmetro do tubo (cm);

L = Comprimento do tubo (cm).

7.6. Volume dos tubos de ½" da calandra

Os tubos soldados nos espelhos para a concentração do caldo não tiveram um formato definido, portanto, foram soldados de forma aleatória para a maior quantidade possível de tubos, obtendo uma área de evaporação suficiente para a concentração do caldo [13] conforme a Fig. 6.

$$V = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot L \cdot N$$

$$V = \frac{\pi}{4} \cdot 1.27^2 \cdot 20 \cdot 24$$

$$V = 0,6 \text{ l}$$

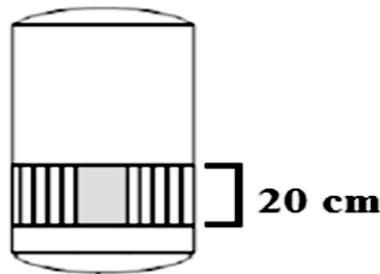


Fig. 5. Demonstração do tubo central do pré-evaporador.

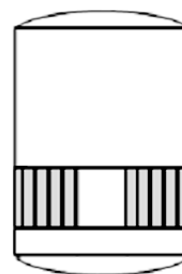


Fig. 6. Demonstração dos tubos de ½" na calandra do pré-evaporador.

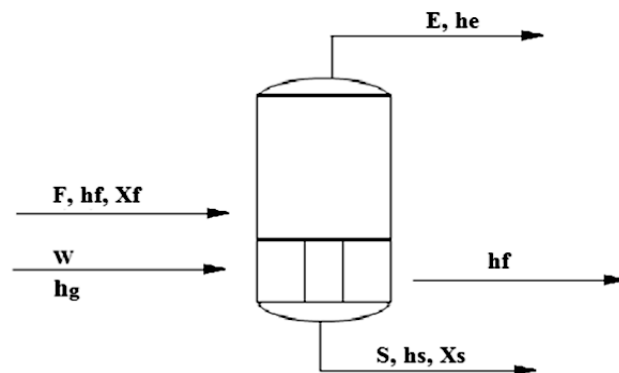


Fig. 7. Demonstração das entradas e saídas de vazões mássicas do pré-evaporador.

Onde:

- V = Volume dos tubos de $\frac{1}{2}$ " da calandra (l);
- D = Diâmetro do tubo de $\frac{1}{2}$ " (cm);
- L = Comprimento do tubo de $\frac{1}{2}$ " (cm);
- N = Números de tubos.

7.7. Cálculos do evaporador

O balanço de massa constitui basicamente na descrição de fluxo de massa entrada e saída de um processo, o fluxograma indica as correntes que intervêm ao processo [13], como observado na Fig. 7.

Onde:

- F, E, W, S = Vazões mássicas [kg/h];
- hf, he, hs = Entalpias [kcal/kg];
- hg = Entalpia de vapor saturado [kcal/kg];
- hf = Entalpia do líquido saturado [kcal/kg];

7.8. Balanço de massa do evaporador

O balanço de massa do evaporador foi realizado com base nos dados dos testes realizados no laboratório, desconsiderando possíveis perdas térmicas. Os valores encontrados são apenas de aproximação, dependendo da concentração inicial do caldo, os resultados serão alterados [14].

Para realização dos cálculos de balanço de massa foi realizado a correção da densidade do caldo clarificado e do caldo concentrado. A tabela 1 demonstra as concentrações do °Brix e o volume do caldo no evaporador projetado.

Tabela 1. Dados dos testes realizados com caldo-de-cana no evaporador experimental.

Caldos	°Brix	Volume (litros)
Caldo diluído	4,61	6
Após 30 min.	9,78	4
Após 60 min.	13,69	2,5

Tabela 2. Densidade do caldo.

Caldos	°Brix analisado	Densidade do caldo
Caldo diluído	4,61	1,0153
Após 30 Min.	9,78	1,0367
Após 60 Min.	13,69	1,0520

O cálculo para densidade do caldo foi realizado conforme descrito por Fernandes [15] conforme equação 2, cujos resultados estão apresentados na tabela 2.

$$\text{Brix} \cdot 0,004134 + 0,996241 \quad (2)$$

Utilizando as frações mássicas e concentrações de sólidos solúveis do caldo de entrada e caldo concentrado, foi determinada a quantidade de água evaporada do caldo, determinada pelas equações (3) e (4).

Balanço de massa

$$\begin{aligned} X_f \cdot F &= X_s \cdot S \\ 0,046 \cdot 6,0918 \text{ kg/h} &= 0,137 \cdot S \\ S &= 2,045 \text{ kg/h} \end{aligned} \quad (3)$$

Onde:

X_f = Concentração do °Brix inicial;
 F = Volume inicial corrigido pela densidade do caldo (kg/h);
 X_s = Concentração do °Brix final;
 S = Massa de água evaporada (kg/h).

$$\begin{aligned} F &= E + S \\ 6,0918 &= E + 2,045 \text{ kg/h} \\ E &= 4,0468 \text{ kg/h} \end{aligned} \quad (4)$$

F = Volume inicial corrigido pela densidade do caldo (kg/h);
 E = Massa de caldo evaporado (kg/h);
 S = Massa de água evaporada (kg/h).

7.9. Balanço entálpico

A entalpia é a quantidade de energia de uma determinada reação, sendo que o calor de uma reação corresponde ao calor liberado ou absorvido dessa reação [16].

$$Q_{\text{recebido}} = E \cdot h_e + S \cdot h_s + \text{perdas} - F \cdot h_f \quad (5)$$

O calor específico da água é igual a 1, e o da sacarose que está presente na solução em maior quantidade é igual a 0,301. Para o cálculo do C_p , Hugot [17] apresenta a seguinte equação.

$$C_p = 1 - (0,006 \cdot B) \quad (6)$$

Onde:

C_p = Calor específico em Cal/ °C
 B = °Brix da solução.

$$\begin{aligned} C_p &= 1 - (0,006 \cdot 4,61) \\ C_p &= 0,972 \text{ cal/ °C} \end{aligned}$$

Para alimentação do evaporador experimental à 25°C.

$$C_{p_f} = 0,972 \text{ kcal/kg°C}$$

Para cálculo da entalpia foi utilizado dados da equação 7.

$$\begin{aligned} h_f &= C_{p_f} \cdot \Delta T \\ h_f &= 0,972 (25 - 0) = 24,3 \text{ kcal/kg} \end{aligned} \quad (7)$$

O C_p da solução concentrada foi calculado utilizando dados da equação 8.

$$C_{p_s} = 1 - [1 - C_{p_f}] x / x_0$$

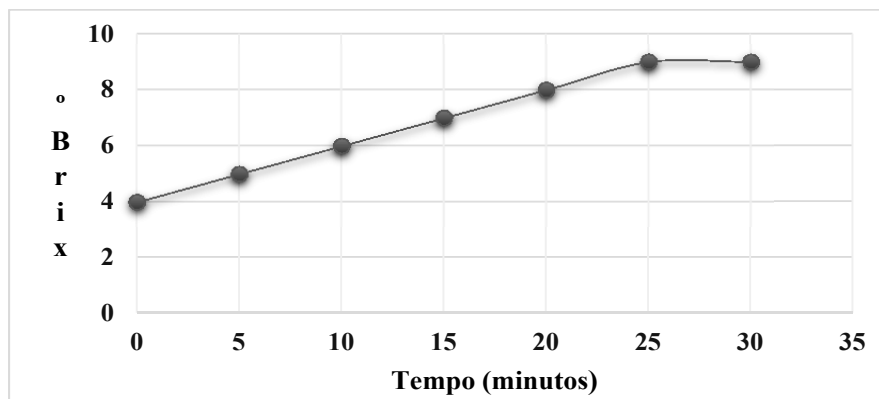


Fig. 8. Concentração do °Brix em relação ao tempo.

$$C_{p_s} = 1 - (1 - 0,972) 0,137 / 0,046 = 0,916 \text{ kcal/ kg}^\circ\text{C} \quad (8)$$

Entalpia da solução concentrada foi calculada utilizando dados da equação 9.

$$h_s = 0,916 \cdot (90 - 25) = 59,5 \text{ kcal/kg} \quad (9)$$

Balanco Entálpico.

$$Q_{\text{recebido}} = E \cdot h_e + S \cdot h_s + \text{perdas} - F \cdot h_f \quad (10)$$

$$4,0468 \cdot 934,8 + 2,045 \cdot 59,5 + 0 - 6,0918 \cdot 24,3$$

$$Q = 3756,6 \text{ kcal/h}$$

A Fig. 8 a seguir demonstra que os resultados teóricos ficaram próximos dos resultados obtidos, no evaporador dimensionado.

O evaporador concentrou um ponto de °Brix para cada 5 minutos estabilizando a concentração do °Brix a partir dos 25 minutos, devido ao fato de atingir o seu limite, nesse caso necessitaria de instalar outro evaporador para o mesmo continuar concentrando.

7.10. Perdas de calor no evaporador

O evaporador perde calor caso não esteja isolado com manta térmica e placa de alumínio, essa perda de calor para o ambiente externo do evaporador consiste em um consumo maior de vapor para manter o sistema em funcionamento. A condutividade térmica do material realiza uma barreira para o calor não expandir, e é necessária a cobertura com placas de alumínio para que em dias chuvosos o isolamento não



Fig. 9. (a) evaporador sem isolamento, (b) calandra.

absorva água e assim, resfriar o sistema. A Fig. 9 mostra o esquema do evaporador sem isolamento térmico [18].

8. CONCLUSÃO

Foi possível dimensionar um pré-evaporador em escala piloto utilizando materiais descartados. Os dados obtidos de vazão, °Brix, temperatura do caldo foram satisfatórios, pois se trata de um único evaporador. A água contida no caldo de cana foi evaporada em 42% sem a degradação da sacarose. O evaporador construído concentrou o caldo de cana 225% em relação ao valor do °Brix inicial em 30 minutos de operação.

Os coeficientes globais de transferência de calor encontrados foram coerentes com valores já conhecidos para evaporador utilizados para concentrar caldo – de – cana. A pressão de vapor da caldeira no evaporador manteve-se constante 0,5 kgf/cm². O condensado produzido foi descartado, no entanto, pode ser recuperado e utilizado na caldeira.

A perda de calor pelo evaporador não foi levada em consideração, e deixou-se como sugestão para trabalhos futuros isolar e instalar outro evaporador em paralelo para a utilização do vapor gerado obtendo economia de energia.

REFERENCIAS

- [1] Kumar, D., “To study the parametric effects on optimality of various feeding sequences of a multi effect evaporators in paper industry using mathematical modeling and simulation with MATLAB”, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, **4**(12), 742-749 (2010)
- [2] Rogério, H.A., Costa, A.O.S., Júnior Costa, E.F., “Aplicações industriais de evaporadores de múltiplo efeito”, *Centro Científico Conhecer*, **9**(16), 2815-2834 (2013)
- [3] Lehnberger, A., Brahim, F., Maliikarjum, S.S., “Falling-film evaporator plant for cane sugar factory presentation of the concept and operating results”, *International Sugar Journal*, 604-609 (2014)
- [4] Mannhani, T.M., Campos, M.V.M., “Sacarose, suas propriedades e novos edulcorantes”, *Revista Uniara*, **17**(1), 113-125 (2014)
- [5] Polovnikov, V.Y., Gubina, E.V., “Heat loss of heat pipelines in insulation moisture conditions with the evaporation”, *National Research Tomsk Polytechnic University*, p.1-6 (2014)
- [6] Zhao, G., Zhao, H., Song, L., Wang, Y., “Research on heat transfer coefficient of horizontal tube falling film evaporator”, *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, **6**(6), 2779-2785 (2014)
- [7] Araújo, E.C., *Evaporadores*, São Carlos, editora LTC (2012)
- [8] Ronkin, V.M., “Improvement in operating efficiency of falling film evaporators”, *Chemical and Petroleum Engineering*, **48** (9), 540-545 (2013)
- [9] Carvalho, P.I., Costa, A., “Modelagem matemática de evaporadores em múltiplo efeito”, Congresso Brasileiro de Engenharia Química, p.1-6, Uberlândia (2009)
- [10] Barbosa, S.D., Modelagem e simulação de evaporadores na indústria de alimentos, 70f, Trabalho de Conclusão de Curso, Curso de Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Rondônia- UFRO, Ariquemes (2014)
- [11] Wright, P.G., “Heat transfer coefficient correlations for robert juice evaporators”, *Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technology*, **30**, 547-558 (2008)
- [12] Macintyre, A.J., *Equipamentos industriais e de processos*, Rio de Janeiro Editora LTC (2012)
- [13] Shah, J.D., Bhagchandani, C.G., “Design modelling and simulation of multiple effect evaporators”, *International Journal of Scientific Engineering and Technology*, **1**(3), 1-5, (2012)
- [14] Hoffman, P., “Simplified calculation of sugar juice evaporator and examples of its optimization”, *Production Lines*, 1-14, (2002)
- [15] Fernandes, A.C., *Cálculos na agroindústria da cana de açúcar*, 3ª Edição, STAB (2011)
- [16] Blackadder, D.A., Nedderman, R.M., *Manual de operações unitárias*, Editora Hemus (2004)

- [17] Hugot, E., *Manual da engenharia açucareira*, São Paulo, Mestre Jou (1969)
- [18] Polovnikov, V.Y., Gubina, E.V., “Heat loss of heat pipelines in insulation moisture conditions with the evaporation”, National Research Tomsk Polytechnic University, 1-6 (2014)

SIZING OF A PRE-EVAPORATOR MODEL ROBERT'S TO CONCENTRATE SUGARCANE JUICE

Abstract – Evaporation is one of unit operations commonly used in industrial processes. Its function is to concentrate a solution by removing the solvent in vapor form. The evaporator type Robert's is the most widely used in the sugar industry due to its heating area. This study aimed to build a pre-evaporator on a pilot scale for concentration of sugarcane juice and steam generation. industrially applied processes are mentioned, which were discussed technical and operational parameters for steam economy.

Keywords – Evaporation equipment, Industry.