

COMPARAÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE EVAPORADORES DE SIMPLES E MÚLTIPLOS EFEITOS EM USINAS SUCROALCOOLEIRAS

Vinícius Sanches¹
Maurielen G. Dalcin²
Denise Gomes Alves³
Flávio A. D. de Oliveira⁴

Uso eficiente de energia em usinas de açúcar e álcool

Resumo

A cana-de-açúcar é uma das matérias-primas mais utilizadas mundialmente para a produção de açúcar e etanol. O bagaço de cana-de-açúcar, que antigamente era acumulado em grandes quantidades nas usinas, hoje é usado como combustível nas caldeiras para produção de vapor que abastece as demandas energéticas de todo o processo. Na evaporação, foco do presente trabalho, a solução de açúcar é concentrada de 15 °Brix a 60 °Brix em equipamentos evaporadores. Os sistemas de evaporação podem ser de simples e múltiplos efeitos e, em ambos, a premissa é a mesma: a solução de açúcar é aquecida através de uma área de troca térmica pelo fornecimento de calor por um fluido quente. O presente trabalho analisou matematicamente a performance destes dois sistemas (para um efeito e quatro efeitos), comparando principalmente a demanda de vapor de escape saturado, área de troca térmica e economia de vapor. Dentre os resultados obtidos, as demandas de vapor determinadas pelo método matemático foram 77,4 e 35,45 ton/h para simples e quádruplo efeito, respectivamente. Para as áreas de troca térmica, o simples efeito resultou em 728,32 m², enquanto as áreas do quádruplo efeito variaram entre 532,06 e 1303,4 m². E quanto à economia de vapor, foram obtidos os valores de 0,968 para simples efeito e 2,115 para o quádruplo efeito; justificando o amplo uso dos equipamentos em série nas usinas sucroalcooleiras, tornando o processo produtivo mais econômico e sustentável.

Palavras-chave: Evaporação; Cana-de-açúcar; Processos; Açúcar; Etanol.

¹Aluno do Curso de graduação em Engenharia Química, UNIFAL – Campus Poços de Caldas, vinicius.sanches@souunifal-mg.edu.br.

²Orientação: Universidade Federal de Alfenas; Núcleo de Engenharia Química – Instituto de Ciência e Tecnologia; maurieleem.dalcin@unifal-mg.edu.br.

³Prof. Dr. Denise Gomes Alves, da UNIFAL – Campus Poços de Caldas, Núcleo de Engenharia Química – Instituto de Ciência e Tecnologia, denise.alves@unifal-mg.edu.br.

⁴Prof. Dr. Flávio Augusto Dias de Oliveira, da UNIFAL – Campus Poços de Caldas, Núcleo de Engenharia Química – Instituto de Ciência e Tecnologia, flavio.dias@unifal-mg.edu.br.

INTRODUÇÃO

A produção de açúcar é uma das mais importantes manufaturas do Brasil, sendo uma das culturas predominantes no país desde o século XVI. Com o viés de um mundo industrializado e cada vez mais globalizado, o Brasil tornou-se um dos principais produtores mundiais de açúcar, exportando o produto para diversos países.

Na produção de açúcar, uma das operações unitárias de destaque para o bom funcionamento do processo é a evaporação, essa etapa é responsável em concentrar o caldo de cana tratado, por meio da ebulição da solução açucarada e remoção de água em forma de vapor. O caldo alimentado no primeiro evaporador tem aproximadamente 15 °Brix, ou seja, 15% de sólidos em massa. O papel do sistema de evaporação numa indústria de produção de açúcar é elevar esta concentração para um valor próximo a 60 °Brix, concentração desejada para seguir o processo nos cozedores, responsáveis pelo processo de cristalização.

A evaporação é uma operação unitária que consiste na concentração de uma solução que contém um soluto não volátil e um solvente volátil, a partir da ebulição causada pelo fornecimento de calor ao meio. É amplamente utilizado na indústria em setores como produção de açúcar, produção de suco de frutas e concentração do licor negro (papel e celulose). O processo de evaporação demanda elevada quantidade de energia e, devido a isto, é crucial a escolha correta do tipo de evaporador e sistema, que pode ser de simples e múltiplos efeitos (ROGERIO et al., 2013).

Quanto aos sistemas de evaporação, podem ser constituídos de um único evaporador, chamado de simples efeito, ou de dois ou mais evaporadores, conhecidos como múltiplo efeito. A premissa é a mesma, no entanto, no sistema de evaporadores de múltiplos efeitos os evaporadores são conectados em série, onde o solvente evaporado do primeiro efeito serve como vapor de aquecimento para o segundo efeito e, desta forma, sucessivamente, a fim de promover maior economia de energia. Ao término do sistema, o vapor gerado segue para um condensador (DANTAS, 2022).

O vapor de aquecimento que é usado para trocar calor com o fluido frio nos evaporadores é proveniente de caldeiras de alta pressão que usam o bagaço da cana-de-açúcar como combustível. Esta biomassa era acumulada em grande quantidade, pois após o processo de moagem da cana, ela ficava obsoleta. Quando as usinas começaram a queimar o bagaço, utilizando-o como combustível para geração de energia, possibilitou não só reduzir drasticamente a quantidade de resíduo gerado como

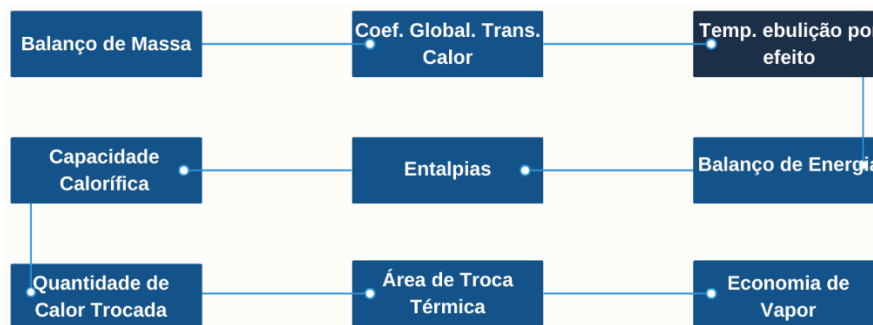
tornar as usinas sucroalcooleiras autosuficientes em energia elétrica, chegando a comercializar o excedente.

Objetiva-se com esse trabalho analisar comparativamente um evaporador de simples efeito com quatro evaporadores dispostos em série quanto às demandas de vapor de aquecimento, área de troca térmica necessária para cada disposição e economia de vapor seguindo o método de Geankoplis (2003) e, para complementar, conceitos de Araujo (2015).

METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho, consideraram-se as metodologias de cálculo definidas pela literatura, assim como conceitos de Elevação do Ponto de Ebulição (EPE), o coeficiente global de troca térmica (U), área de troca térmica (A), economia de vapor (E), além das características dos fluidos envolvidos neste processo. A metodologia de cálculos é apresentada na Figura 1, onde a etapa de cálculo da temperatura de ebulição por efeito aplica-se apenas ao sistema de múltiplos efeitos.

Figura 1 – Sequência da metodologia utilizada



Com base na literatura estudada neste trabalho, foram estipulados os valores baseados em dados de operação de Geankoplis (2003), Araújo (2015) e Dantas (2022) (Tabela 1).

Tabela 1 – Valores adotados para as variáveis utilizadas

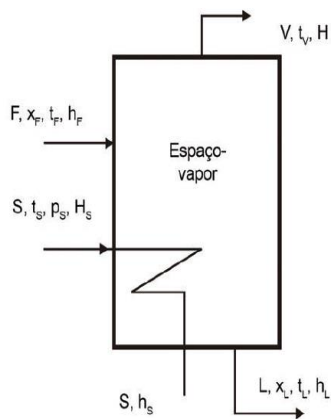
Variável	Valores
F	100.000 kg/h
x_F	0,15
t_F	40 °C
x_Lfinal	0,6
t_s	120 °C
p_s	2 bar = 200 kPa
h (vácuo)	13,32 kPa = 100 mmHg

Fonte: Autor (2024)

Evaporador de simples efeito

Para a determinação do consumo de energia num sistema de simples ou múltiplos efeitos, é necessária a realização dos balanços de massa e energia, conforme Araujo (2015). Considerou-se que o fluido de aquecimento é vapor de água saturado, e que o sistema será composto por um efeito.

Figura 2 – Representação de um evaporador de simples efeito e suas correntes



Fonte: Araujo (2015, p.72)

Na figura, são representadas as vazões mássicas de alimentação de solução diluída F , vazão mássica de solução concentrada no evaporador L , vazão mássica de vapor de aquecimento S e vazão mássica de vapor produzido no evaporador V ; fração mássica de sólidos na alimentação x_F , fração mássica de sólidos na solução concentrada x_L , fração mássica de sólidos no vapor produzido (sendo desejável fração 0); temperatura da solução diluída t_F , temperatura da solução concentrada no evaporador t_L , temperatura de saturação do vapor de aquecimento t_s , temperatura do vapor produzido no evaporador t_v ; e entalpia da solução diluída h_F , entalpia da solução concentrada produzida h_L , entalpia do vapor saturado alimentado no evaporador H_s , entalpia do condensado que sai da câmara de

vapor de aquecimento h_s , entalpia do vapor produzido no evaporador (saturado ou superaquecido) H_v .

Araújo (2015) define que caso o vapor de aquecimento (S) forneça energia necessária para a concentração do fluido frio (F), produzindo, assim, uma solução concentrada (L), tem-se:

$$t_s > t_L \quad (1)$$

Se t for a temperatura de saturação do evaporado:

$$t_L = t + EPE \quad (2)$$

Quanto ao balanço de massa do soluto (açúcar), num evaporador contínuo em estado estacionário:

$$F x_F = L x_L \quad (3)$$

Para o balanço de massa global:

$$F = L + V \quad (4)$$

Para definir o coeficiente de transferência global (U), dá-se a equação, conforme Araújo (2015):

$$U = \frac{5,23 \times 10^6}{x_L^2 + x_F^2 + 800} \quad (5)$$

Conforme Araujo (2015) define, a Elevação do Ponto de Ebulição (EPE) da solução é a diferença entre o ponto de ebulição da solução t_e e o ponto de ebulição do solvente puro t_{solv} , num sistema com ambos na mesma pressão p :

$$EPE = t_e - t_{solv} \quad (6)$$

Especificamente para soluções de caldo açucarado, há equações empíricas na literatura que fornecem diretamente a EPE em função do Brix - concentração massa/massa -, pureza, pressão ou vácuo (ARAÚJO, 2015). Uma relação empírica para EPE do caldo de cana, para um evaporador de simples efeito, pode ser expressa como:

$$EPE = 0,025B \frac{30+B}{103,6-B} \left(1 - \frac{0,54h}{229-h} \right) \quad (7)$$

Onde B é o Brix da solução, h o vácuo (cmHg) e EPE a Elevação do Ponto de Ebulição, em (°C).

De acordo com Geankoplis (2003), os calores específicos (c_p) das soluções açucaradas podem ser calculados por:

$$c_{pF} \left(\frac{kJ}{kg.K} \right) = 4,19 - 2,35x_F \quad (8)$$

$$c_{pL} \left(\frac{kJ}{kg.K} \right) = 4,19 - 2,35x_L \quad (9)$$

Para o cálculo das entalpias das soluções, foram aplicadas:

$$h_F = c_{pF}(t_F - t_1) \quad (10)$$

$$h_L = c_{pL}(t_L - t_1) \quad (11)$$

Onde t_1 é a temperatura inicial do fluido.

Tendo as condições de espaço-vapor no equipamento, é possível obter entalpia de vapor produzido:

$$H_v = H_{vsat} = c_{pv}(t_L - t_{sat}) = H_{vsat} + c_{pv}EPE \quad (12)$$

Para definir o valor da corrente de vapor (S), foi aplicado balanço de energia conforme equação abaixo:

$$Fh_F + S\lambda_S = VH_v + Lh_L \quad (13)$$

Em que λ_S :

$$\lambda_S = H_S - h_S \quad (14)$$

A quantidade de calor trocada q é expressa pela Equação (15), como em todo trocador de calor.

$$q = UA\Delta t = S\lambda_S \quad (15)$$

sendo q a quantidade de calor trocada por tempo, U o coeficiente global de troca de calor, A a área de troca térmica, Δt a diferença de temperatura no evaporador, S a corrente de alimentação de vapor e λ_S a diferença entre entalpia de vapor e líquido para o fluido quente.

A denominada área de troca térmica é a região de troca de calor onde os fluidos têm contato com as faces da parede dos tubos do evaporador, que também pode ser obtida a partir da equação (ARAUJO, 2015).

$$A = \frac{q}{U\Delta t} \quad (16)$$

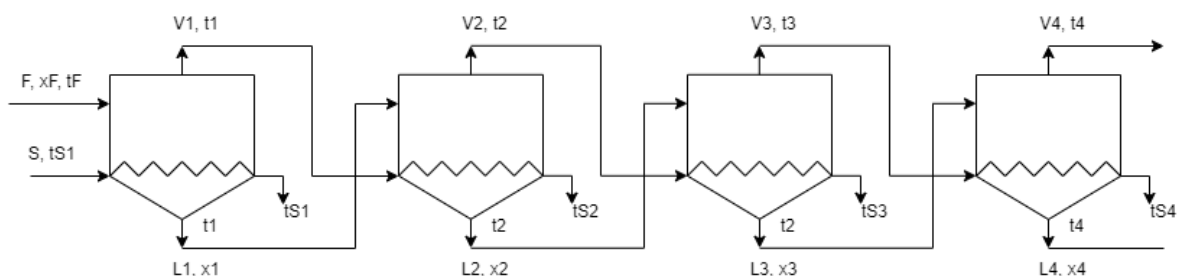
Por fim, a economia de vapor é definida pela Equação (17):

$$E = \frac{V}{S} \quad (17)$$

Evaporadores de múltiplos efeitos

Para a evaporação de múltiplos efeitos, foi calculado um sistema de quatro efeitos, visando melhor aproveitamento dos vapores gerados em cada efeito e, assim, conseguir boa economia de vapor. O sistema é representado pela Figura 3.

Figura 3 - Sistema de evaporação de múltiplos efeitos



Sendo as variáveis de alimentação de solução F , fração mássica de sólidos na alimentação x_F , temperatura da alimentação t_F , alimentação de vapor de escape no primeiro efeito S , temperatura do vapor de escape e temperatura de água saturada t_{SI} , corrente de solução concentrada do primeiro efeito L_1 , fração mássica de sólidos após primeiro efeito x_1 , temperatura dos fluidos após primeiro efeito t_1 e vapor gerado no primeiro efeito V_1 . Nos efeitos posteriores é seguida esta mesma lógica, tendo a alimentação feita pela corrente L e o aquecimento pela corrente V do efeito anterior.

Em linha com o desenvolvimento inicial do evaporador de simples efeito, será necessário fazer balanços de massa para determinar as correntes e suas concentrações, com x_F com 15 °Brix e x_{L4} com 60 °Brix. Para iniciar os balanços, encontra-se primeiro a corrente de saída do último efeito:

$$F x_F = L_4 x_4 \quad (18)$$

Para o balanço de massa global, utiliza-se novamente a Equação 4. Para seguir com os demais cálculos, estipula-se que a quantidade de vapor gerada é igual entre os efeitos, sendo $V_1 = V_2 = V_3 = V_4$. Desta forma:

$$F = L + \sum V \quad (19)$$

O balanço de massa global e por componente, possibilitando determinar as saídas do concentrado e as concentrações por efeito, são os seguintes:

Efeito 1

$$F = V_1 + L_1 \quad (20)$$

$$F x_F = L_1 x_{L1} \quad (21)$$

Efeito 2

$$L_1 = V_2 + L_2 \quad (22)$$

$$L_1 x_{L1} = L_2 x_{L2} \quad (23)$$

E usa-se a mesma lógica para o terceiro e quarto efeitos, respectivamente.

Aplica-se a Equação (5) para determinar U para cada efeito do sistema de evaporação.

Para o cálculo das EPEs de um sistema de múltiplos efeitos, Geankoplis (2003) cita a Equação (24) como uma das mais utilizadas para solução açucarada. Assim, consegue-se estimar a EPE do caldo açucarado para cada efeito utilizando a seguinte equação:

$$EPE(^{\circ}C) = 1,78x + 6,22x^2 \quad (24)$$

Para seguir com os cálculos, será necessário determinar as temperaturas de ebulição para cada efeito. Por conta do evaporado servir como fluido de aquecimento para o efeito seguinte, esta temperatura é a mesma de aquecimento do efeito seguinte. Com isso:



$$\sum \Delta T_{disponível} = t_s - t_4 - (EPE_1 + EPE_2 + EPE_3 + EPE_4) \quad (25)$$

Efeito 1

$$\Delta t_1 = \sum \Delta t * \frac{\frac{1}{u_1}}{\frac{1}{u_1} + \frac{1}{u_2} + \frac{1}{u_3} + \frac{1}{u_4}} \quad (26)$$

$$t_{V1} = t_s - \Delta t_1 \quad (27)$$

Efeito 2

$$\Delta t_2 = \sum \Delta t * \frac{\frac{1}{u_2}}{\frac{1}{u_1} + \frac{1}{u_2} + \frac{1}{u_3} + \frac{1}{u_4}} \quad (28)$$

$$t_{V2} = t_{V1} - EPE_1 - \Delta t_2 \quad (29)$$

E assim foi calculado para os efeitos 3 e 4.

A capacidade calorífica do líquido em cada efeito é calculada com a Equação (8), anteriormente utilizada.

Conforme Geankoplis (2003), para as entalpias de vapor, tomou-se como referência a água a 0 °C nas tabelas de vapor disponíveis na literatura com apoio das equações de (30) à (37). Na Equação (36) H_{S5} refere-se à saturação em relação ao vácuo do último efeito.

Efeito 1

$$H_1 = H_{S2} \quad (30)$$

$$\lambda_{S1} = H_{S1} - h_{S1} \quad (31)$$

Efeito 2

$$H_2 = H_{S3} \quad (32)$$

$$\lambda_{S2} = H_1 - h_{S2} \quad (33)$$

Efeito 3

$$H_3 = H_{S4} \quad (34)$$

$$\lambda_{S3} = H_3 - h_{S3} \quad (35)$$

Efeito 4

$$H_4 = H_{S5} \quad (36)$$

$$\lambda_4 = H_4 - h_{S4} \quad (37)$$

Aplicando o balanço de energia para cada efeito com as variáveis percorridas até então:

Efeito 1

$$Fh_F + S\lambda_s = V_1H_{V1} + L_1h_{L1} \quad (38)$$

Efeito 2

$$V_1\lambda_{V1} + L_1h_{L1} = V_2H_{V2} + L_2h_{L2} \quad (39)$$

Efeito 3



$$V_2\lambda_{V2} + L_2h_{L2} = V_3H_{V3} + L_3h_{L3} \quad (40)$$

Efeito 4

$$V_3\lambda_{V3} + L_3h_{L3} = V_4H_{V4} + L_4h_{L4} \quad (41)$$

Com estes balanços, encontrou-se a corrente de vapor de aquecimento, bem como identificou-se as informações das demais correntes. Sendo um sistema de 4 equações e 4 variáveis, usou-se os Teoremas de Laplace e Cramer para determinar cada variável.

Tendo vazão do vapor de aquecimento e calor latente de saturação (λ), seguiu-se para o cálculo da área de troca térmica para cada efeito, de acordo com as Equações (15) e (16) usadas anteriormente.

Aplicando para cada efeito:

Efeito 1

$$q_1 = U_1A_1\Delta t_1 = S\lambda_s \quad (42)$$

$$A_1 = q_1U_1\Delta t_1$$

(43)

E da mesma maneira, calculadas para o 2º, 3º e 4º efeitos.

Por fim, foi determinada a economia de vapor a partir da equação disponibilizada por Geankoplis (2003):

$$E = \frac{V_1+V_2+V_3+V_4}{S} \quad (44)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apesar de terem metodologias de cálculo muito similares, a configuração do sistema de evaporação é o grande diferencial entre os dois sistemas. Para o cálculo do simples efeito, baseou-se puramente nos dados estipulados neste trabalho, onde todas as demais variáveis provinham de relações com estes dados, por exemplo, a temperatura de ebulição que está diretamente ligada com o vácuo no interior do equipamento.

No sistema de múltiplos efeitos, todas as variáveis se relacionam com os dados iniciais, entretanto, foi necessário maiores tratativas. Para dar início ao procedimento iterativo, usando a metodologia de Geankoplis (2003), conhecendo-se a concentração de saída do caldo e a pressão no quarto efeito, determina-se o ponto de ebulição neste efeito. A seguir, foi estipulada uma taxa de evaporação numericamente igual para todos os evaporadores (já que a quantidade total de vapor já era conhecida através do balanço de massa). As demais etapas envolvem balanços de massa global e por componente para determinar L_1 , L_2 , L_3 , L_4 e x_1 , x_2 , x_3 (x_4 já conhecido). Calculados também as EPES, ΔT , ponto de ebulição real, c_p da alimentação e calores latentes de condensação para os 4 efeitos, bem

como $\Sigma\Delta T$ disponível. Utilizando os balanços de energia em cada efeito determina-se os valores mais próximos dos reais para as correntes de vapor gerado (V_1, V_2, V_3 e V_4) e líquido concentrado (L_1, L_2, L_3 e L_4), além de determinar a corrente de vapor de escape saturado (S), a partir de um sistema com 4 equações e 4 variáveis, resolvidos pelos teoremas de Laplace e Cramer. Assim, calcula-se q_1, q_2, q_3 e q_4 e A_1, A_2, A_3 e A_4 . O resultado da primeira iteração serviu como base para uma segunda iteração (como os valores de área de troca térmica encontrados divergiram de um valor médio em mais de 10%, sugere-se uma segunda iteração), onde todos os cálculos retomam a partir do balanço de massa com os novos valores das correntes de líquido e vapor, seguindo até a próxima iteração no balanço de energia. No total, neste estudo foram realizadas duas iterações (Tabela 2).

Tabela 2- Resultado das iterações segundo as variáveis, sendo S: vazão de alimentação de vapor saturado, correntes L: vazões de alimentação do caldo em cada efeito, correntes V: vazões de vapor gerado em cada efeito

Variável	1ª Iteração	2ª Iteração
S (kg/h)	36427,018	35453,79
L₁ (kg/h)	76415,05	76814,29
V₁ (kg/h)	23584,95	23185,71
L₂ (kg/h)	51931,22	52018,84
V₂ (kg/h)	24483,83	24795,45
L₃ (kg/h)	26578,394	39118,71
V₃ (kg/h)	25352,826	12900,13
L₄ (kg/h)	25000	25000
V₄ (kg/h)	1578,394	14118,71

Fonte: Autor 2024

Foi possível calcular os coeficientes globais (U), os valores de q , as áreas de troca térmica e as correntes de V para cada efeito usando os valores obtidos da segunda iteração, bem como o valor de alimentação do vapor de escape saturado, conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3 – Valores calculados para as variáveis de interesse no sistema de simples efeito e múltiplos efeitos

		U (W/m ² .°C)	q (W)	A (m ²)	V (kg/h)	S (kg/h)	E
	Simples Efeito	1130,81	51032176,5	728,32	75000	77473,8	0,968
Múltiplo Efeito	Efeito 1	3708,37	21691712,0	532,06	23185,7	35453,8	2,115
	Efeito 2	2589,58	14786846,5	786,34	24795,5		
	Efeito 3	1085,19	15665366,5	1303,43	12900,1		
	Efeito 4	689,50	16903855,9	968,69	14118,7		

Fonte: Autor (2024)

A começar pelo coeficiente global de transferência de calor (U), quando a alimentação líquida é relativamente diluída (viscosidade baixa, similar a da água), altos valores de U são obtidos. À medida que se avança nos efeitos seguintes, a solução tende a ficar mais concentrada (mais viscosa), causando a queda significativa do valor de U .

Determinou-se a quantidade de calor trocado em cada evaporador a partir da alimentação de escape saturado para cada sistema. E como já era previsto, o somatório de calor trocado nos quatro efeitos (69047780,9 W) é maior do que o valor em um único efeito, o que também justifica o uso dos equipamentos em série.

Tendo os valores de U e q calculados para cada evaporador, calculou-se as áreas de troca térmica. Os resultados obtidos mostraram a necessidade da continuidade no processo iterativo, pois conforme define Geankoplis (2003), o valor entre a área de troca térmica média e as áreas de cada evaporador devem diferenciar em até 10%. O processo iterativo foi realizado manualmente utilizando os teoremas de Laplace e Cramer e, durante a aplicação das iterações, observou-se uma expressiva mudança nos valores individuais das áreas do múltiplo efeito e, como o processo iterativo deve ser seguido até que o valor das áreas sejam os mais próximos possível, faz-se necessário o uso de *softwares* matemáticos para a resolução do sistema 4x4 até que haja a convergência dos resultados.

Por fim, a economia de vapor seguiu conforme o esperado por estar diretamente ligada à alimentação de vapor de escape saturado. A performance do modelo matemático para o simples efeito resultou em uma economia de vapor de 0,968, ou seja, a cada 1kg de vapor de escape saturado é gerado 0,968 kg de vapor por meio da ebulição no equipamento. Quanto ao múltiplo efeito, vale ressaltar que este utiliza o fluido vaporizado da solução como aquecedor para o estágio seguinte, ou seja, apenas o primeiro efeito recebe vapor de escape vindo da caldeira, o restante do vapor saturado é gerado dentro do próprio sistema. Com isso, sua operação foi calculada com economia de vapor de 2,115, ou seja, a cada 1 kg de vapor de escape saturado é gerado 2,115 kg de vapor em seus efeitos. Desta maneira, a demanda de vapor do simples efeito provou ser 2,18 vezes maior que a demanda do múltiplo efeito, o que já era esperado devido a configuração e operação do sistema de quatro evaporadores.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A demanda de vapor de aquecimento (S) para um sistema de simples efeito encontrada é de 77473,8 kg/h, enquanto para um sistema de quatro efeitos (após 2 iterações) é de 35453,8 kg/h (a



demanda de vapor do simples efeito é 2,18 vezes maior que a do múltiplo efeito). Um dos motivos que justificam um maior investimento na compra de vários evaporadores é este, pois o próprio sistema se retroalimenta.

Quando se compara as áreas de troca térmica dos dois sistemas (simples e múltiplo efeito), evidencia-se que seria necessário um maior número de iterações para se chegar em valores de área para cada efeito que divergissem em, no máximo, 10% da média. Os valores das áreas ainda são relativamente altos após duas iterações, estes valores tendem a cair para um maior número de iterações. E como a área de troca está diretamente ligada ao custo do material dos tubos, este é um parâmetro essencial na estimativa da viabilidade econômica do projeto.

A economia de vapor do simples efeito (0,968) é menor quando comparada à economia de vapor do múltiplo efeito (2,115), que é a relação de água evaporada por vapor de aquecimento utilizado. Com o exposto pode-se concluir que os evaporadores de múltiplo efeito usam uma menor quantidade de vapor de aquecimento proveniente das caldeiras, utilizando a energia de uma maneira mais eficiente e sustentável. Sugere-se aumentar a temperatura de alimentação previamente para usar o calor latente da corrente S apenas para evaporar o caldo, tendo um ganho no aproveitamento energético.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, E. C. da C. **Operações Unitárias envolvendo transmissão de calor**. 2015. São Carlos: Coleção Uas-Ufscar. 161 p.

DANTAS, R. P. de A. **Uso de evaporadores para a economia de vapor na indústria açucareira**. 2022. João Pessoa: Editora Licuri. Disponível em:
<https://editoralicuri.com.br/index.php/ojs/article/view/21>. Acesso em: 05 nov. 2023.

GEANKOPLIS, C. J.. **Transport Processes and Separation Process Principles**. 4. ed. EUA: Prentice Hall, 2003.

ROGÉRIO, H.; COSTA, A. ; COSTA JUNIOR, E. 2013. **Aplicações Industriais de Evaporadores de Múltiplo Efeito**. ENCICLOPEDIA BIOSFERA, 9(16). Recuperado de <https://conhecer.org.br/ojs/index.php/biosfera/article/view/3543>. Acesso em: 26 nov. 2023.