

ALTERNATIVAS NA RECUPERAÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA DE EVAPORADORES DE MÚLTIPLOS EFEITOS PARA A REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO ÁGUA-AMÔNIA E DE GERAÇÃO DE POTÊNCIA EM CICLO RANKINE ORGÂNICO

Beatriz Yohana Ito (PIBIC/CNPq/FA/Uem), Marcio Higa (Orientador), e-mail: mhiga@uem.br.

Universidade Estadual de Maringá / Centro de Tecnologia / Maringá, PR.

Área/subárea CNPq/Capes: Engenharia Mecânica/Térmica 3.05.02.00-4

Palavras-chave: evaporadores de múltiplos efeitos, recuperação de energia, refrigeração por absorção, ciclo rankine orgânico.

Resumo:

A possibilidade de recuperação de energia térmica do vapor vegetal do último efeito em evaporadores de múltiplos efeitos (EME) é praticamente inviável, pois este vapor encontra-se a temperaturas baixas que dificultam essa recuperação. Entretanto, neste trabalho foi integrado um ciclo de refrigeração por absorção (CRA) amônia-água aproveitando a energia disponível a 60° C do vapor vegetal de um EME de uma usina de açúcar e álcool. Além disso, foi verificado em paralelo, a recuperação desta energia para a geração de potência em um ciclo rankine orgânico (CRO). Utilizando o *software Engineering Equation Solver* (EES), os resultados demonstraram que ambas propostas são viáveis, e que a opção de utilização destas tecnologias deve ser feita de acordo com as demandas da unidade industrial.

Introdução

A função de um evaporador consiste em evaporar o solvente volátil de modo a concentrar o soluto não volátil. No caso do evaporador de múltiplos efeitos (EME) são vários evaporadores conectados em sequência denominados efeitos e assim o vapor vegetal gerado em um efeito é usado como fluido de aquecimento no próximo. Na indústria alimentícia, a evaporação de múltiplos efeitos é uma das operações térmicas com maior consumo de vapor, desta forma, diversos estudos são realizados para melhorar e otimizar a operação [1-3]. Como o vapor vegetal só pode ser utilizado como fonte de calor se estiver a uma temperatura superior a corrente a ser aquecida, a solução em cada efeito do EME tem a temperatura menor do que a anterior [1]. No último efeito, apesar de ainda ter energia a ser extraída em forma de vapor, isso é limitado devido a baixa temperatura.

Uma das propostas para se aproveitar o vapor vegetal do último efeito seria o uso do ciclo de refrigeração por absorção (CRA). Esse ciclo é semelhante

ao ciclo de compressão a vapor (CCV), a começar pelos componentes em comum como o evaporador, condensador e a válvula de expansão. Entretanto se difere quanto a presença de um absorvedor, bomba, gerador e válvula, para substituir o compressor do ciclo tradicional. Assim enquanto a fonte de energia para o funcionamento do CCV é a energia elétrica que aciona o compressor, o CRA aumenta a pressão por meio de uma bomba, e depois utiliza o calor como fonte de energia no gerador. Assim, a proposta deste projeto é verificar termodinamicamente um CRA para a recuperação de energia de vapor vegetal do último estágio do EME, que atualmente é considerada inviável.

No caso do ciclo rankine orgânico (CRO), ele possui basicamente o mesmo funcionamento do ciclo rankine tradicional utilizando o vapor d'água em seus quatro componentes principais: caldeira, turbina, condensador e bomba. Entretanto, ao invés de utilizar a água, o CRO utiliza um hidrocarboneto ou refrigerante como fluido trabalho. A vantagem é que estes fluidos apresentam pontos de ebulição mais baixos dos que os da água para uma mesma pressão, permitindo o aproveitamento do calor cedido pela fonte térmica em temperaturas mais baixas [4]. O sistema será analisado em regime permanente utilizando o software *Engineering Equation Solver* (EES). Os resultados serão apresentados por meio de estimativa da capacidade de refrigeração do sistema proposto.

Materiais e métodos

Fundamentação Teórica

O CRA consiste dos seguintes volumes de controle, condensador, duas válvulas de expansão, evaporador, absorvedor, bomba, gerador [5]. Inicialmente o vapor de amônia praticamente pura entra no condensador e na sua saída está no estado líquido saturado. A seguir passa por uma válvula de expansão que reduz a sua pressão, mas mantém a entalpia. No evaporador, a amônia em forma de mistura líquido-vapor é completamente evaporada e segue para o absorvedor. Neste ocorre a mistura da água com a amônia que é um processo exotérmico e fornece o calor para a água de arrefecimento. A mistura líquida amônia-água é encaminhada para a bomba, que irá aumentar sua pressão e depois conduzi-la para o gerador. O calor recuperado do vapor vegetal do último efeito do EME, irá volatilizar a amônia separando da água, que retorna para o condensador, enquanto a mistura menos concentrada de amônia reduz sua pressão em uma válvula para retornar ao absorvedor. No caso do CRO, as equações são as mesmas utilizadas tradicionalmente em um ciclo Rankine e são todas derivadas do balanço de energia.

Metodologia

Os equacionamentos de cada volume de controle serão obtidos pelo balanço de energia (1) em regime permanente.

$$0 = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{v_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{v_s^2}{2} + gz_s \right) \quad 1$$

As propriedades de entalpia são obtidas por meio EES, para isso são necessárias pelo menos 3 propriedades em cada ponto que no caso será usado a temperatura, pressão e concentração de amônia.

Resultados e Discussão

Inicialmente, foram utilizados dados de simulação de outra unidade de refrigeração por absorção usando o par amônia-água, para validação dos dados obtidos no EES. Deste modo foi modelado um CRA comum (Tabela 1), porém tendo como partida os dados desse trabalho [5].

Tabela 1 – Propriedades do ciclo obtidas pelo EES

pontos	T (°C)	P (bar)	Concentração (%)	h (kJ/kg)	Título
1	49.37	20	100	1292	1
2	33.95	20	100	161.2	-0.001
3	3.46	4.88	100	161.2	0.1166
4	3.45	4.88	100	16.02	0
5	29.95	4.88	100	-105.4	-0.001
6	35	20	50	-81.4	-0.001
7	49.37	20	30	24.49	-0.001
8	49.65	4.88	30	24.49	-0.001

Tabela 2 – Dados de comparação do CRA e CRO

Energia CRA (%)	Energia CRO (%)	Q _{C_CRA} (kW)	W _{líquido_CRO} (kW)
100	0	2680	0
90	10	2413	478
80	20	2145	956.5
70	30	1877	1435
60	40	1609	1913
50	50	1341	2391
40	60	1073	2870
30	70	804	3348
20	80	536	3826
10	90	268	4304
0	100	0	4780

Com base na energia disponível a 60° C no último efeito do EME (Q_{EME} = 45150 kW), variou-se o percentual desta energia utilizada no CRA ou no

CRO, obtendo-se a capacidade de refrigeração (Q_{C_CRA}) e o trabalho líquido ($W_{líquido_CRO}$). Os resultados estão apresentados na Tabela 2.

Conclusões

Por meio dos resultados percebe-se que o CRA apresenta possibilidade de recuperar energia térmica do EME, obtendo-se uma capacidade refrigeração variando entre aproximadamente 260 a 2680 kW, enquanto a capacidade de geração de potência no CRO varia entre aproximadamente 470 a 4780 kW. Estes resultados demonstram que ambas as possibilidades, tanto para a refrigeração, quanto para a geração de potência são viáveis, podendo-se optar por qualquer uma das duas tecnologias, conforme a demanda na unidade industrial.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus.

Agradeço também ao meu professor e orientador Márcio Higa, por me ajudar sempre que necessário e me apoiar.

Aos meus pais e minha irmã por todo o apoio para começar e finalizar este trabalho, além de toda a compreensão que tiveram comigo.

Aos meus amigos, que mesmo não participando diretamente no trabalho, me mantiveram estimulados para finalizá-lo.

A Fundação Araucária e à Universidade Estadual de Maringá (UEM).

Referências

- [1] LIMA, Dag M.; NOBRE, Joseane A. S.; e-book; **Tecnologia de Processamento de Alimentos**; São Paulo; Grupo Ibmec Educacional, 2011.
- [2] HIGA, M.; LUIZ, R. V. G. Alternativas na utilização de vapor vegetal oriundo da evaporação de caldo em usina de açúcar e álcool – Um estudo de caso. **Revista Engenharia e Tecnologia**, Vol. 2, No 3, pp. 90-101, 2010.
- [3] IBARRA, L. F.; MEDELLÍN, A. A. **Energy analysis of sugar production process using modern techniques of process integration**. Zuckerind 126 (9) 707- 713, 2001.
- [4] ENDLICH, B. M.; FALZIROLLI, A. **Análise de Reaproveitamento de Vapor em Indústria Sucroalcooleira**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Maringá, Maringá 2017. Apresentado em 28/07/2017.
- [5] ARAÚJO, Josegil J. P.; **Simulação de uma Unidade de Refrigeração por Absorção Usando o Par Água-Amônia nos Regimes Permanente e Transiente**. Tese de Doutorado. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2010.