

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.