

## ANÁLISE EXERGÉTICA DE EVAPORADORES DE MÚLTIPLOS EFEITOS INTEGRADOS COM SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO

Lucas Maximiano (PIBIC/FA/UEM), Márcio Higa (Orientador),  
e-mail: ra105535@uem.br.

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

**Área: Engenharias      Subárea do conhecimento: Engenharia Mecânica**

**Palavras-chave:** Evaporadores de múltiplos efeitos, sistema de refrigeração por absorção, exergia.

### Resumo:

Uma vez que os sistemas de evaporação de múltiplos efeitos na indústria sucroalcooleira demandam e dispõem de muita energia térmica, é imprescindível que se busque sistemas térmicos eficientes, o que pode ser obtido por diferentes tipos de integração térmica. Utilizando a análise exergética, neste projeto propôs-se a sua integração com sistemas de refrigeração por absorção. Isso é possível, pois ao invés da potência elétrica, a maior fonte motora de sistemas de absorção é o calor, que preferencialmente deve ser de fontes residuais ou outras disponíveis em baixas temperaturas, como o vapor vegetal extraído de evaporadores de múltiplos efeitos. Utilizando o software EES (*Engineering Equation Solver*) para as simulações, os resultados obtidos mostram que o ciclo de refrigeração por absorção é uma alternativa viável para aproveitamento desta energia disponível, devendo-se considerar o efeito e a quantidade de vapor vegetal utilizado para possibilitar a melhor eficiência exergética do sistema integrado.

### Introdução

A evaporação é uma operação unitária energo-intensiva e por isso a evaporador de múltiplos efeitos (EME) é muito utilizado para obter um processo com maior eficiência energética. Diferentes arranjos na forma de alimentação da solução e de fornecimento de utilidades no EME, além de alternativas como reevaporação do condensado, termocompressão, entre outras, têm sido aplicadas para melhorar o aproveitamento do vapor [1,2,3]. Neste contexto, a integração energética utilizando metodologias como análise *Pinch* e exergética têm sido aplicadas para se verificar as melhores oportunidades de recuperação térmica com outras operações, incluindo sistemas de refrigeração por absorção (SRA) [3,4]. Wang e Lior [5] propuseram um sistema combinado de SRA com a mistura Li-Br-H<sub>2</sub>O operando em alta pressão, enquanto o EME aplicado na dessalinização de

água aproveitava a dissipação de calor da absorção como força motriz, resultando em melhor eficiência energética e custo de operação do sistema. No presente estudo, a proposta foi integrar um EME e um SRA em que o sistema de evaporação consome utilidade externa, enquanto o sistema de refrigeração aproveita o vapor vegetal como energia motriz no gerador (desorber).

## Materiais e métodos

O sistema de refrigeração por absorção (SRA) é predominantemente térmico e a maioria dos seus componentes são trocadores de calor: condensador, evaporador, absorvedor, regenerador e desorber. Os processos realizados no ciclo de refrigeração por absorção pode ser observado no fluxograma da Figura 1, em que o fluido de trabalho é a mistura de água e brometo de lítio. O SRA considerado possui temperatura de condensação de 35º C e de evaporação em 6º C.

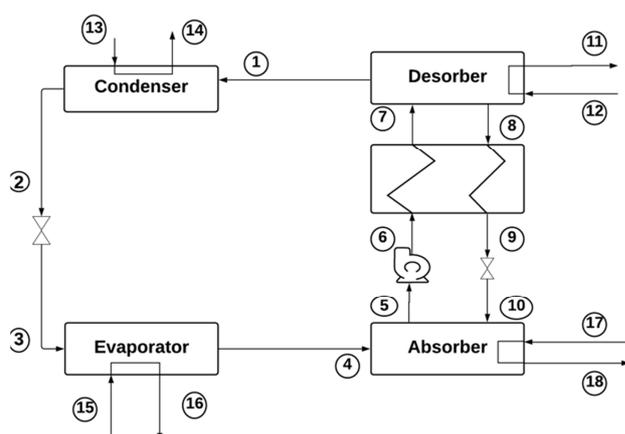


Figura 1 – Fluxograma do ciclo de refrigeração por absorção.

Visando melhorar a viabilidade energética e econômica da planta, o SRA apresentado recebe calor de evaporadores de múltiplos estágios (EME) por meio das extrações de vapor vegetal nos pontos 11 e 12. O objetivo do EME é aumentar a concentração de sólidos no caldo entrando mais diluído na condição Mc0 para sair mais concentrado com vazão Mc5. O vapor vegetal gerado na concentração deve ser utilizado para fornecer calor ao efeito seguinte (Mv), mas pode também ser extraído (Ms) para outros processos, saindo na forma de condensado. As extrações de vapor vegetal deste trabalho são destinadas ao ciclo de refrigeração por absorção.

O sistema de EME em estudo possui 5 efeitos e concentra 117 kg/s de caldo de 14,6 Brix (concentração de sólidos no caldo) até 60,0 Brix. O caldo entra no evaporador a 117°C e sai a 65°C. As extrações de vapor vegetal foram verificadas nos 4 primeiros efeitos do EME, ocorrendo em apenas um efeito em cada simulação.

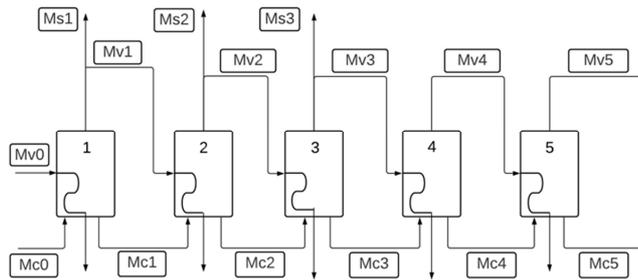


Figura 2 – Sistema de múltiplos evaporadores.

As simulações foram realizadas utilizando a análise exérgica e o *software Engineering Equation Solver (EES)*, verificando o impacto das extrações de vapor vegetal na produção de refrigeração.

## Resultados e Discussão

Realizando o balanço de massa, energia e exergia nos sistemas apresentados foram encontrados parâmetros termodinâmicos que evidenciam o estado do fluido, quantidade de calor transferido, eficiência dos sistemas e irreversibilidade dos mesmos.

Na primeira etapa foram verificadas as temperaturas de saída da solução rica do desorber ( $T_{des}$ ) no ponto 8 e da solução pobre do absorvedor ( $T_{abs}$ ) no ponto 5 que resultavam no melhor desempenho energético (COP), exérgico ( $\epsilon$ ) e além de baixa destruição de exergia ( $Ed$ ). Com a temperatura de  $T_{des}$  de  $80^\circ\text{C}$ , a fração de LiBr na solução pobre foi obtida considerando a condição de líquido saturado na saída do desorber, enquanto a fração de LiBr na solução rica foi obtida considerando a condição líquido saturado na saída do absorvedor em  $T_{des}$  igual a  $32^\circ\text{C}$  (Figura 3).

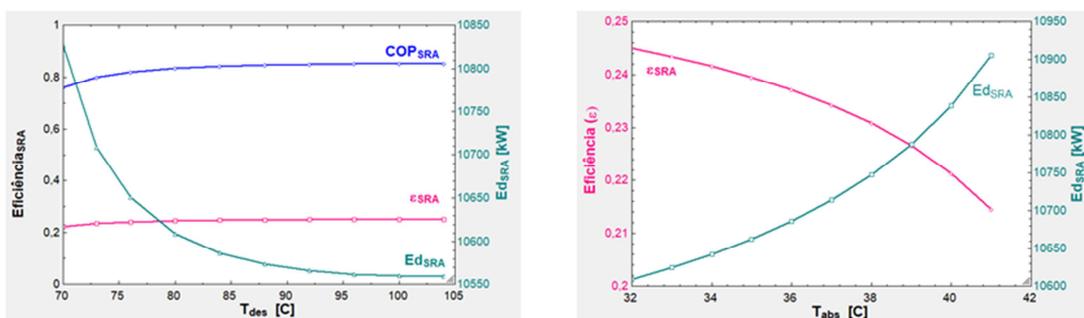
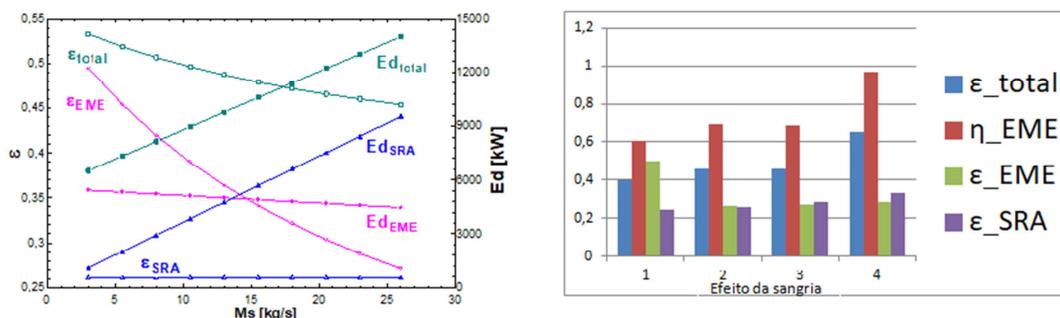


Figura 3 – Eficiência exérgica do e destruição de exergia do SRA em função de  $T_{des}$  e  $T_{abs}$

Na segunda etapa verificou-se que a eficiência exérgica do sistema tende a cair conforme se aumenta a extração de vapor vegetal utilizado para a refrigeração em um efeito do EME, entretanto a eficiência total do sistema integrado é maior do que o EME sem integração (Figura 4a). Quanto ao efeito da extração, verificou-se que nos últimos efeitos as extrações tiveram melhor desempenho exérgico do que nos primeiros efeitos (Figura 4b).



**Figura 4** – a) Eficiência exergética do e destruição de exergia de acordo com a extração de vapor vegetal; b) Eficiência exergética de acordo com o efeito de extração.

## Conclusões

Tendo em vista a necessidade atual da indústria de se tornar mais sustentável em relação às questões energéticas, ambientais e econômicas, o ciclo de refrigeração por absorção apresenta-se como uma boa alternativa de recuperação da energia do vapor vegetal que pode ser utilizada em outros processos dentro da própria planta industrial sucroalcooleiras, aumentando a eficiência exergética quando comparada com operação individualizada do EME.

## Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro da Fundação Araucária de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Estado do Paraná (FA).

## Referências

- [1] T. Chen, Q. Ruan, Modeling and energy reduction of multiple effect evaporator system with thermal vapor compression, *Computer and Chemical Engineering*. 92 (2016) 204-215.
- [2] H. Becker, A. Vuillermoz, F. Maréchal, Heat pump integration in a cheese factory, *Applied Thermal Engineering*. 43 (2012) 118-127.
- [3] P. Sharan, S. Bandyopadhyay, Energy integration of multiple effect evaporator, thermo-vapor compressor, and background process, *Journal of Cleaner Production*. 164 (2017) 1192-1204.
- [4] S. Yanniotis, P.A. Pilavachi, Energy consumption of absorption-driven multiple-effect evaporators, *Journal of Food Engineering*. 23 (1994) 543-554.
- [5] Y. Wang, N. Lior, Proposal and analysis of a high-efficiency combined desalination and refrigeration system based on the LiBr-H<sub>2</sub>O absorption cycle – Part 2: Thermal performance analysis and discussions, *Energy Conversion and Management*. 52 (2011) 228-235.