

ANÁLISE ENERGÉTICA, EXERGÉTICA E ECONÔMICA DE SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO HÍBRIDO COMPRESSÃO-ABSORÇÃO

Arthur Roberto de Sousa (PIBIC/CNPq/FA/UEM), Marcio Higa (Orientador). E-mail: mhiga@uem.br.

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

Engenharias, Engenharia Mecânica/Engenharia Térmica.

Palavras-chave: Ciclo híbrido de refrigeração; Análise exergética; Análise econômica.

RESUMO

Este trabalho propõe melhorias em um ciclo de refrigeração por absorção de amônia-água, integrando elementos de compressão para reduzir o consumo de vapor necessário ao suprimento de calor. A metodologia envolveu simulação dos ciclos no *software* EES, com análises energética, exergética e econômica baseada em Valor Presente Líquido (VPL). O estudo se baseou na simulação de propostas de ciclos híbridos de compressão e absorção integrados para identificar o correto direcionamento das implementações. Concluiu-se que a utilização dos compressores promoveu ganhos adicionais nos parâmetros termodinâmicos e elevou o lucro anual, mas o alto custo de investimento inicial tornou seu uso economicamente inviável. A análise econômica indicou que a estratégia mais viável é aumentar a pressão do gerador de amônia, incrementando o lucro anual com baixo acréscimo de investimento, superando alternativas com compressão.

INTRODUÇÃO

Considerando o alto consumo energético e a importância da refrigeração na indústria alimentícia, a aplicação do ciclo de refrigeração por absorção amônia-água tem sido investigada, incluindo a integração de elementos de compressão mecânica em ciclos híbridos (Chen *et al.*, 2019). Neste contexto, e com o objetivo de reduzir o consumo de vapor necessário ao suprimento de calor, neste trabalho foi avaliada a proposta de modificação do sistema existente em uma indústria alimentícia, por meio da integração de ciclo de compressão em um sistema de absorção. Os modelos termodinâmicos visando quantificar o desempenho técnico das alternativas foram fundamentados por meio de análises energética e exergética (Moran *et al.*, 2018). Já as estimativas de custos e sua rentabilidade em longo prazo e econômica seguiram avaliações conforme descritas em Turton *et al.* (2009).

MATERIAIS E MÉTODOS

Os cálculos foram realizados no *software Engineering Equation Solver (EES)*, que fornece uma base integrada de propriedades termodinâmicas e ferramentas de modelagem adequadas aos ciclos estudados. O estudo partiu inicialmente de um ciclo de absorção de amônia-água aplicado à indústria de café (P0), conforme apresentado por Yamamoto *et al.* (2022), com COP de 0,259, eficiência exergética (ϵ) de 0,204, consumo de vapor de 2,49 kg/s e potência requerida de 20 kW (Figura 1). Além da remoção do *by-pass* e da válvula redutora do gerador de vapor da proposta (P1), já implementadas em por Yamamoto *et al.* (2022), foi avaliada a substituição parcial de um absorvedor por um compressor, ajustando a pressão do segundo absorvedor (P2). Essas etapas permitiram identificar parâmetros sensíveis e orientar o desenvolvimento do ciclo híbrido (Figura 2), que incorpora linhas paralelas de compressão associadas aos absorvedores. A configuração foi comparada considerando COP, eficiência exergética e Valor Presente Líquido (VPL).

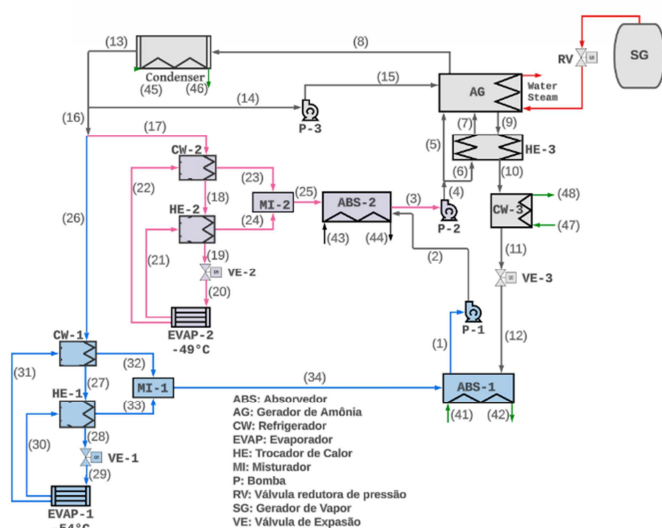


Figura 1 – Ciclo de análise original.

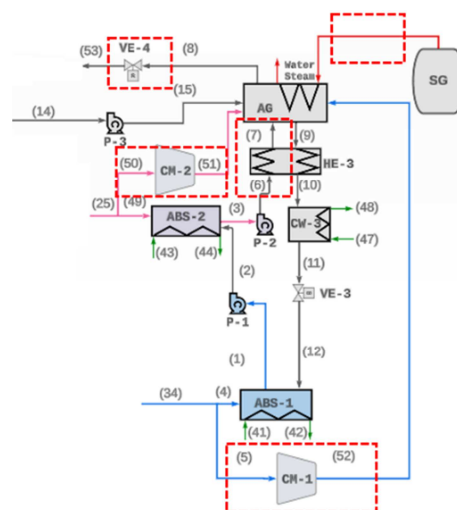


Figura 2 – Ciclo final de análise, com implementações destacadas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As modificações iniciais de remoção de *by-pass* e válvula redutora reduziram o consumo de vapor em 28%, elevando o COP em 43% e a eficiência exergética em 80%. Já a substituição parcial de um absorvedor por um compressor permitiu redução adicional de 7% no consumo de vapor, totalizando aproximadamente 35%, com COP de 0,412, aumento de 59%, e eficiência exergética de 0,39, um aumento de 91% da planta inicial. Nos testes paramétricos do ciclo híbrido, observou-se que a elevação da pressão do gerador de amônia reduz a energia térmica necessária para produzir o vapor, favorecendo o desempenho do ciclo e tornando essa estratégia

interessante. Pressões superiores à operação base de 13,7 bar aumentaram a eficiência exergética e o COP em cerca de 0,5% por bar adicional. Verificou-se que menores pressões nos absorvedores favorecem a absorção de amônia, mas os valores originais já estavam adequados, dispensando ajustes.

Simulações com integração parcial de compressores mostraram melhoria significativa nos parâmetros termodinâmicos e, no caso crítico de substituição total de absorvedores por compressores (P3), permitiram atingir redução completa do uso de vapor, com COP de 1,38 e eficiência exergética de 0,44. Entretanto, a potência elétrica requerida aumentou substancialmente, de 20 kW até um máximo de 938 kW, elevando o investimento inicial de forma significativa. A comparação dos resultados está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Índices de desempenho térmico comparativos

	P0	P1	P2	P3
COP	0,259	0,370	0,412	1,38
ε	0,204	0,367	0,390	0,44

A análise econômica considerou, conforme estimativas de caldeiras industriais a biomassa, o custo do vapor a R\$ 0,07/kg, energia elétrica a R\$ 0,42/kWh, eficiência elétrica de 95%, operação anual de 7.500 h e taxa de desconto de 12% a.a. (Turton *et al.*, 2009). O VPL foi maximizado com o gerador operando a pressões acima de 13,7 bar, resultando em lucro anual de R\$ 1,325 milhão e acréscimo de aproximadamente 1% no lucro para cada bar adicional. A integração de compressores apresentou lucro anual até 30% superior e desempenho termodinâmico significativamente melhor, mas mesmo assim, seu retorno econômico foi inferior, devido ao alto custo de implementação, que ofuscou os ganhos obtidos. As Figuras 3 e 4 apresentam a análise de viabilidade das estratégias, evidenciando a menor lucratividade da integração de compressores.

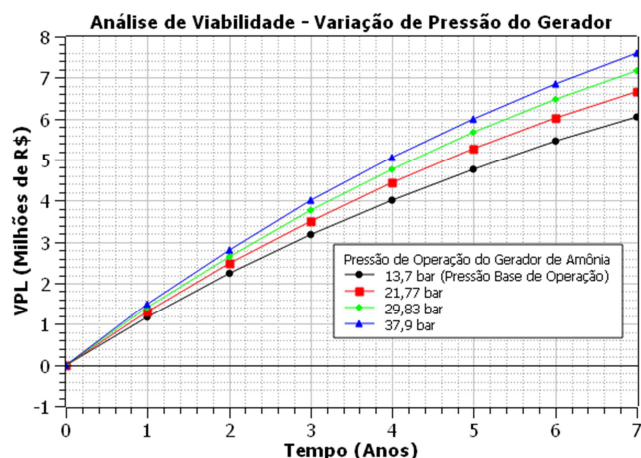


Figura 3 – Análise de viabilidade para a estratégia de aumento de pressão do gerador de amônia.

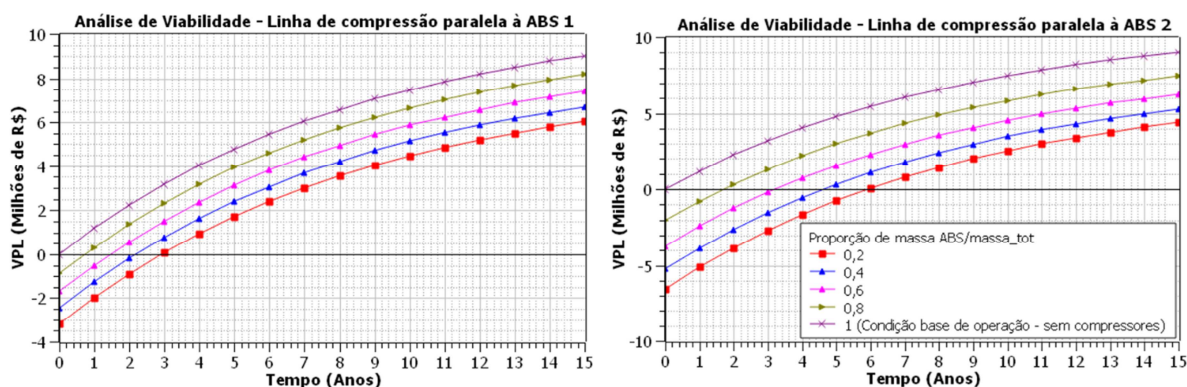


Figura 4 – Análise de viabilidade para a estratégia de integração de compressores.

CONCLUSÕES

O estudo demonstrou que ajustes no ciclo de absorção por elevação da pressão do gerador de amônia proporcionam melhorias técnicas e econômicas significativas. A introdução de compressores aumenta o desempenho termodinâmico, mas apresenta alto custo inicial, limitando sua viabilidade. Portanto, a estratégia mais eficiente e rentável é elevar a pressão do gerador, otimizando COP, eficiência exergética e consumo de vapor, oferecendo bom lucro anual com baixo investimento adicional.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual de Maringá, à Fundação Araucária (FA) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro ao projeto.

REFERÊNCIAS

- CHEN, W., LI, Z., SUN, Q., ZHANG, B. Energy and exergy analysis of proposed compression-absorption refrigeration assisted by a heat-driven turbine at low evaporating temperature, **Energy Conversion and Management**, v. 191, p. 55-70, 2019. Disponível em: <https://doi-org.ez79.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.enconman.2019.04.024>. Acesso em: 08 set. 2025.
- MORAN, Michael J.; SHAPIRO, Howard N.; BOETTNER, Daisie D.; BAILEY, Margaret B. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. 8. ed. Rio de Janeiro: GEN, 2018.
- TURTON, Richard; BAILIE, Richard C.; WHITING, Wallace B.; SHAEIWITZ, Joseph A. **Analysis, synthesis, and design of chemical processes**. 3. ed. Upper Saddle River: Pearson Education, 2009.
- YAMAMOTO, Eduardo Yassuji; SILVA, Robson Leal da; HIGA, Márcio. **Performance improvements on energy and exergy basis for an ammonia-water absorption refrigeration system in a coffee industry**. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, [S.l.], v. 52, p. 102284, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102284>. Acesso em: 19 ago. 2025.