

## AVALIAÇÃO DA INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA ENTRE UM CICLO RANKINE ORGÂNICO E UMA REDE DE TROCADORES DE CALOR

Marceley Pestana da Silva (PIBIC/CNPq/FA/Uem), Caliane Bastos Borba Costa (Orientador), e-mail: cbbcosta@uem.br.

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

**Área e subárea do conhecimento: Engenharia Química/Processos Industriais de Engenharia Química.**

**Palavras-chave:** ciclo Rankine orgânico, integração energética, simulação

### Resumo:

O ciclo Rankine orgânico possui a capacidade de aproveitar energia de baixa qualidade para gerar trabalho útil, podendo ser integrado a uma rede de trocadores de calor. Dessa forma, através de estudos de caso, é possível realizar sua otimização, baseado em uma função objetivo com fins econômicos e ambientais. O presente trabalho teve como objetivo analisar o desempenho de diferentes fluidos de trabalho, por meio de uma otimização simultaneamente termoeconômica e ambiental, que considera o máximo valor da função objetivo obtido, analisada em unidade monetária por ano, e indicadores de performance ambiental para avaliação dos impactos ambientais causados por fluidos orgânicos. Os resultados mostraram o n-butano como o fluido mais indicado a ser trabalhado, pois possui zero impacto ambiental e melhor desempenho no ciclo termodinâmico.

### Introdução

O estudo da troca de calor entre correntes de processo organizada em redes com o intuito de diminuir o consumo energético de processos industriais iniciou-se na década de 1970. À vista disso, pesquisas foram desenvolvidas baseadas nas Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica, levando em conta regras heurísticas, com a Análise *Pinch*, e Programação matemática, a fim de que fosse possível obter resultados ótimos tanto em aspectos econômicos, quanto ambientais, minimizando a emissão de efluentes poluentes.

O ciclo Rankine orgânico (CRO) possui um fluido orgânico como fluido de trabalho, o qual possui ponto de ebulição menor que o da água, e dispõe da capacidade de gerar potência a partir de baixas e moderadas pressões de evaporação. Entretanto, a seleção dos fluidos de trabalho deve ser feita com cautela, pois eles apresentam índices de toxicidade, inflamabilidade, potencial de depleção da camada de ozônio (ou *ozone depletion potential*, ODP) e potencial de aquecimento global (ou *global warming potential*, GWP).

Este trabalho visou a integração energética ótima entre um CRO e uma rede de trocadores de calor para diferentes fluidos, primeiro considerando apenas aspectos econômicos e, em seguida, foram adicionados à função objetivo indicadores de

performance ambiental baseada no impacto de aquecimento equivalente total, isto é, *total equivalent warming impact* (TEWI), conforme proposto por Sun *et al.* (2020), para uma análise econômica e ambiental.

## Materiais e métodos

Para a integração deste ciclo termodinâmico com a rede, adaptou-se o código de programação desenvolvido por Santos (2020) na linguagem C++, utilizando a plataforma Code Blocks, vinculado com a biblioteca de dados do CoolProp. O trabalho baseia-se no estudo de caso referenciado em Yu *et al.* (2017), o qual apresenta um CRO considerando sangramento na turbina, sendo as correntes do ciclo termodinâmico decompostas em subcorrentes para que sejam integradas às correntes de processo do estudo. O modelo ainda apresenta turbina e bomba não ideais de eficiência isentrópica igual a 0,8 e 0,65 respectivamente. Além disso, os balanços de energia das bombas são elaborados em função das pressões de operação do ciclo e da turbina antes e depois do sangramento em função da entalpia específica.

Os cálculos do método *Pinch* são baseados no modelo de otimização proposto por Duran e Grossmann (1986). A rede de trocadores de calor é integrada com o CRO simultaneamente, sendo  $\Delta T_{min}$  igual a 20 °C. No modelo de otimização proposto por Yu *et al.* (2017) o objetivo é maximizar a produção de energia líquida, porém, limitando-o e diminuindo deste valor os custos de utilidade quente. Portanto, o modelo assume que o preço da eletricidade seja de 800 \$/(ano kW) e o custo de utilidades quentes seja 100 \$/(ano kW).

No entanto, para analisar os impactos ambientais do CRO, utilizou-se o índice de TEWI, que avalia os parâmetros de ODP e GWP através do cálculo do CO<sub>2</sub> equivalente total emitido. Esse cálculo é expresso pela emissão direta e indireta de CO<sub>2</sub>, na qual a primeira representa o vazamento do fluido de trabalho no meio ambiente, enquanto que a segunda é devido ao consumo de energia elétrica, que em seu processo de produção libera CO<sub>2</sub>. Como o CRO gera energia, então o TEWI é calculado pela emissão direta menos a emissão indireta. Com isso, a maximização da função objetivo com aspectos econômicos e ambientais foi feita somando-se o objetivo econômico com o TEWI multiplicado por um peso igual a 50, a fim de manter a mesma grandeza dos termos da equação. As otimizações foram resolvidas com o método PSO (*particle swarm optimization*). É importante resaltar que o procedimento foi realizado para cada um dos cinco fluidos selecionados (R245fa, n-butano, isobutano, isohexano e tolueno), que têm ODP e GWP iguais a zero, exceto o fluido R245fa que apresenta GWP igual a 1020 (ALJUNDI, 2011), e repetido por dez vezes, obtendo-se a cada vez os valores das pressões de operação do ciclo e as vazões mássicas total e de sangramento da turbina (variáveis de decisão), e o valor da função objetivo. O melhor resultado para cada fluido foi selecionado para ser reportado.

## Resultados e Discussão

A Tabela 1 apresenta, para os fluidos estudados, as características do ciclo termodinâmico otimizado tanto para a função objetivo apenas econômica, quanto para a função econômica e ambiental.

**Tabela 1** – Características e melhor resultado obtido para cada um dos fluidos de trabalho estudados.

Fluido orgânico	Características da otimização					
	Econômica			Econômica e ambiental		
	Pressões de operação do ciclo (Pa)	Vazões mássicas (total e sangramento) (kg/s)	Função objetivo (\$/ano)	Pressões de operação do ciclo (Pa)	Vazões mássicas (total e sangramento) (kg/s)	Função objetivo (\$/ano)
R245fa	3.641.710	1,000	2.896,4	3.640.220	1,000	8.405,0
	518.020	0,251		516.884	0,254	
	344.209			344.209		
n-Butano	3.789.460	1,000	19.756,3	3.788.180	1,000	32.150,1
	1.214.010	0,395		1.238.480	0,392	
	495.755			495.755		
Isobutano	3.622.660	1,000	11.101,9	3.623.020	1,000	21.293,2
	1.397.170	0,322		1.396.520	0,321	
	684.898			684.898		
Isohexano	1.555.220	0,660	15.938,3	1.486.300	0,687	27.677,2
	196.823	0,326		211.365	0,341	
	72.328			72.328		
Tolueno	411.659	0,596	14.818,0	461.843	0,543	25.414,3
	50.394	0,296		43.723	0,255	
	12.288			12.288		

Ao avaliar os resultados constatou-se que as condições operacionais do CRO não são significativamente alteradas para as duas funções objetivo e que o fluido mais indicado para uso é o n-butano, já que este apresenta melhores resultados tanto para a função objetivo apenas econômica, quanto a que considera aspectos econômicos e ambientais. Nota-se também que o fluido que possui o parâmetro GWP diferente de zero (R245fa) obteve o pior resultado.

## Conclusões

O trabalho realizado permitiu avaliar um estudo de caso, o qual exhibe um processo otimizado de um ciclo Rankine orgânico integrado a correntes de processo, para diferentes fluidos de trabalho, selecionando aquele com melhor desempenho nos aspectos econômico e ambiental. Portanto, obteve-se o n-butano como fluido que melhor satisfaz os objetivos do estudo, pois possui zero ODP e zero GWP e o maior valor da função objetivo em ambas as análises.

## Agradecimentos

As autoras agradecem o CNPq e a UEM pelo apoio e por tornarem possível a existência e desenvolvimento do projeto em que este trabalho está inserido.

## Referências

ALJUNDI I. H. Effect of dry hydrocarbons and critical point temperature on the efficiencies of organic Rankine cycle. **Renew. Energy**, v. 36, p.1196-1202, 2011.

DURAN M. A., GROSSMANN I. E. Simultaneous optimization and heat integration of chemical processes. **AIChE J.**, v. 32, p.123-138, 1986.

SANTOS, M. N. P. **Otimização e síntese de redes de trocadores de calor integradas ao ciclo Rankine orgânico**. 2020. 81 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2020.

SUN, Z., ZHANG, H., ZHANG, T., LIN, L., LIN, K. Optimizations and comparison of three two-stage Rankine cycles under different heat source temperatures and NG distribution pressures. **Energy Convers. Manag.**, v. 209, 112655, 2020.

YU H., EASON J., BIEGLER L.T., FENG X. Process integration and superstructure optimization of Organic Rankine Cycles (ORCs) with heat exchanger network synthesis. **Computers and Chemical Engineering**, v.107, p.257 – 270, 2017.