



Avaliação do Potencial do Processo de Regaseificação do GNL para Produção de Potência em Ciclos de Potência Utilizando Misturas como Fluido de Trabalho

Palavras-Chave: gás natural, ciclos de potência, misturas, simulação

Autores:

MARIA VITÓRIA SOUZA GONÇALVES, FEQ - UNICAMP

Prof. Dr. JOSÉ VICENTE HALLAK DANIELO (orientador), DESQ/FEQ - UNICAMP

INTRODUÇÃO:

O gás natural é um combustível de alta relevância no cenário mundial, uma vez que se apresenta como o combustível fóssil da transição energética devido ao menor potencial poluidor quando comparado ao óleo e carvão minerais. No entanto, este recurso está distribuído pelo mundo todo de forma desigual, o que torna necessário seu transporte em longas distâncias para comercialização em escala global, o que só é viável em sua forma liquefeita uma vez que este processo possibilita uma redução da ordem de 600 vezes no volume em relação à sua forma natural. Ao chegar em seu destino, este gás liquefeito passa pelo processo de regaseificação para atender as demandas dos consumidores finais e estima-se que sejam necessários 200 a 230 kWh por tonelada de GNL para regaseificação, o que representa um alto gasto energético e dispêndio do potencial exergético do GNL em condições criogênicas (Atienza-Marquez *et al.*, 2018).

Para recuperar este potencial de geração de trabalho é possível aplicá-lo a ciclos de potência, sendo o ciclo Rankine o mais utilizado, no qual um fluido de trabalho é bombeado para um evaporador em que será vaporizado por uma fonte quente, posteriormente expandido em uma turbina produzindo potência e por fim, condensado em um trocador de calor que utiliza o GNL como fonte fria, o qual passa então por um processo de regaseificação (Badami *et al.*, 2018).

Na literatura encontram-se diversas configurações do ciclo Rankine (RC), que buscam uma maior eficiência energética, exergética, rentabilidade econômica e redução dos impactos ao meio-ambiente. Algumas dessas soluções envolvem: ciclos Rankine transcíticos, simples ou em cascata; RC em cascata e combinado com expansão direta, seja simples ou multi estágio; associação em série de ciclos Brayton (BC) fechados e RC, ou ainda BC aberto, RC e expansão direta (Atienza-Marquez *et al.*, 2018).

Além de diferentes configurações também é possível buscar melhores eficiências desses ciclos avaliando-se diferentes fluidos de trabalho considerando aspectos técnicos, econômicos e ambientais como: corrosividade, inflamabilidade, explosividade, acidez, potencial de destruição da camada de ozônio e emissão de gases estufa. A pressão e temperatura críticas, calor de vaporização, temperatura de ebulição, calor específico e complexidade molecular influenciam diretamente no desempenho do ciclo e tamanho de seus componentes (Bahrami *et al.*, 2021).

Também é possível considerar a influência da composição de misturas de fluidos de trabalho distintos, sobre o desempenho dos ciclos. Na literatura, as misturas azeotrópicas apresentam melhorias na recuperação de calor e no desempenho da evaporação e condensação, gerando uma redução das irreversibilidades e conseqüentemente melhores eficiências energética e exergética. Isto se dá devido à

variação de temperatura que estas misturas apresentam em sua mudança de fase, cujo perfil de variação aproximadamente linear pode ser combinado (“match”) com a variação de temperatura do fluido com o qual se está trocando calor. No entanto, ainda há alguns problemas na utilização de misturas no que diz respeito à determinação das propriedades termodinâmicas de misturas, importantes para o desempenho do ciclo, tamanho dos trocadores de calor empregados devido a menores coeficientes de transferência de calor, bem como métodos de determinação destes e a limitação imposta por esta combinação de temperaturas com as fontes fria e quente ocasionando perdas de trabalho (Abadi e Kim, 2017) .

O objetivo deste trabalho consiste em avaliar o desempenho de fluidos de trabalho constituídos por misturas em ciclos Rankine Orgânico, avaliando configurações distintas de ciclo combinados e aplicação de misturas de fluidos de trabalho comumente utilizados, a fim de concluir acerca do efeito das misturas binárias na produção de potência líquida, eficiências energética e exergética e nas condições de operação do ciclo, avaliando a viabilidade da regaseificação do gás natural liquefeito para este tipo de aplicação.

METODOLOGIA:

O presente trabalho apresenta-se como uma continuação da pesquisa realizada anteriormente com fluidos puros, na qual o software *Aspen Hysys®* v. 10, foi validado pela reprodução de simulações da literatura (Bao *et al.*, 2017). Nesta etapa do trabalho, após a simulação com fluidos puros, foram realizadas simulações com misturas de propano e dimetil-éter em proporções de fração molar de 1:1, 1:4 e 2:3 bem como os cenários de fluido puro para ambos os componentes, para fins de comparação.

A escolha do dimetil-éter se deu por sua densidade, pressão e temperatura críticas serem superiores às do propano o que poderia proporcionar uma maior eficiência energética simultaneamente a uma maior potência líquida, sem ocasionar maiores impactos ambientais, uma vez que ambos possuem o mesmo potencial de destruição da camada de ozônio e de emissão de gases estufa, classificação de inflamabilidade e toxicidade (Bahrami *et al.*, 2021). Ademais, o dimetil-éter pertence a um grupo funcional distinto do propano e é interessante avaliar os impactos no comportamento do ciclo.

O ciclo avaliado para a mistura binária foi baseado em uma reprodução da configuração do ciclo de Rankine orgânico com dois estágios de condensação apresentado por Bao *et al.* (2017), conforme apresentado na Figura 1.

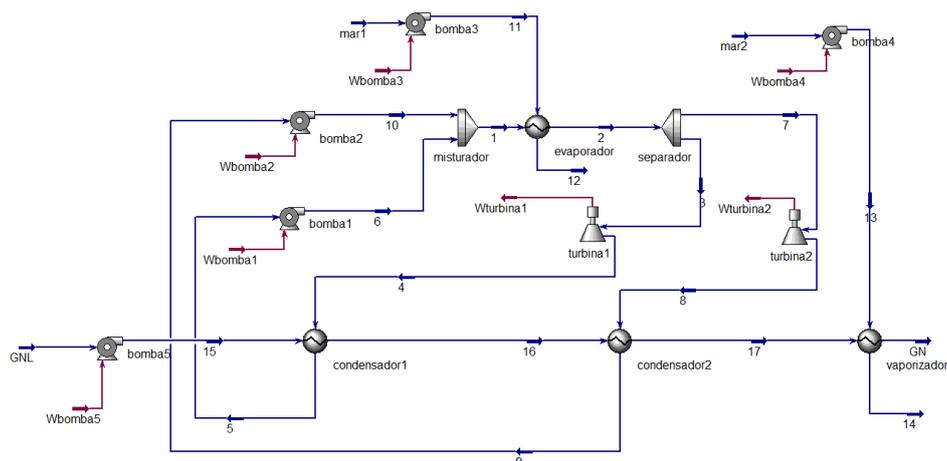


Figura 1 – Simulação de ciclo Rankine orgânico com dois estágios de condensação (Autor, 2023).

Para que pudesse ser realizada uma comparação do desempenho das misturas propostas nas mesmas condições de operação, foram escolhidos alguns parâmetros de inserção na simulação para serem fixados como referência, definidos com base nas simulações anteriores com fluidos puros. Uma vez que o dimetil-éter apresentou uma limitação de pressão de vaporização (corrente #1) inferior à do

propano, esta foi delimitada a fim de evitar cruzamento de temperaturas no evaporador. Por sua vez, as temperaturas foram definidas como valores intermediários às temperaturas obtidas na simulação otimizada com fluido puro, respeitando os limites de cruzamento de temperatura nos condensadores e de operação nas turbinas. O pacote termodinâmico utilizado foi o PRSV. A Tabela 1 resume os valores definidos.

Tabela 1 – Parâmetros fixados à simulação.

Parâmetros	
T₅ (°C)	-88,99
T₉ (°C)	-27,88
P₁ (bar)	6,04

A potência líquida foi calculada pela diferença entre a soma das potências geradas (turbinas) e potências consumidas (bombas) no ciclo, conforme a Equação (1) a seguir.

$$\dot{W}_{líq} = \dot{W}_{turbina1} + \dot{W}_{turbina2} - \dot{W}_{bomba1} - \dot{W}_{bomba2} - \dot{W}_{bomba3} - \dot{W}_{bomba4} - \dot{W}_{bomba5} \quad (1)$$

Por sua vez, a taxa de calor total necessária para a operação do ciclo foi obtida das equações de balanço de energia, considerando as vazões de água do mar utilizadas no evaporador e no vaporizador e as entalpias das correntes de entrada e saída desses equipamentos.

$$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_{evaporador} + \dot{Q}_{vaporizador} \quad (2)$$

$$\dot{Q}_{evaporador} = \dot{m}_{mar1}(h_{12} - h_{11}) \quad (3)$$

$$\dot{Q}_{vaporizador} = \dot{m}_{mar2}(h_{14} - h_{13}) \quad (4)$$

Deste modo, foi possível obter a eficiência energética do ciclo por meio da Equação (5):

$$\eta_{(\%)} = \frac{\dot{W}_{líq}}{\dot{Q}_{total}} \times 100 \quad (5)$$

O cálculo da eficiência exérgica foi realizado pela fração de exergia total do sistema calculada pelo balanço de exergia das correntes de entrada e saída do volume de controle global:

$$\eta_{ex(\%)} = \frac{\dot{W}_{líq}}{\dot{E}x_{total}} \times 100 \quad (6)$$

$$\dot{E}x_{total} = \dot{E}x_{mar1} + \dot{E}x_{mar2} + \dot{E}x_{GNL} \quad (7)$$

$$\dot{E}x_i = \dot{m}_i(ex_{i,entrada} - ex_{i,saida}) \quad (8)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

A simulação e cálculos realizados permitiram observar que houve um crescimento contínuo de potência líquida e eficiências energética e exérgica à medida que o dimetil-éter foi adicionado ao sistema. No entanto, este crescimento foi limitado pelo valor máximo encontrado para o dimetil-éter puro, que já nos estudos preliminares com fluidos puros apresentou melhores resultados. Deste modo, todas as simulações realizadas com misturas geraram resultados inferiores aos fluidos puros.

Tabela 2 – Resultados de potência líquida, eficiência energética e exérgica em função da fração molar de dimetil-éter na mistura do fluido de trabalho (Autor, 2023).

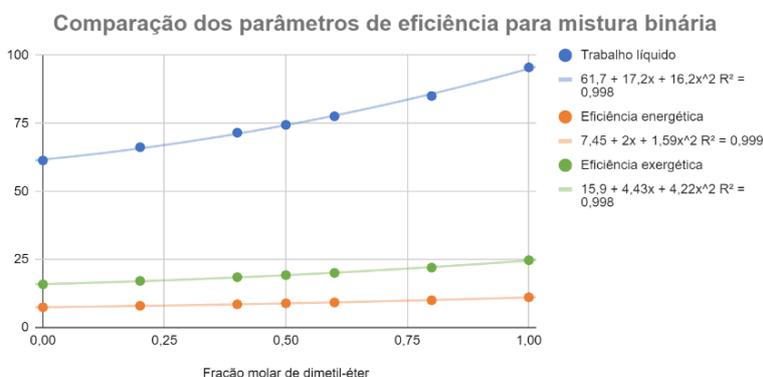
Fração molar de dimetil-éter	0,0	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0
Potência líquida (kW)	61,36	66,24	71,57	74,45	77,60	85,07	95,57
Eficiência energética (%)	7,42	7,96	8,52	8,89	9,20	10,00	11,09
Eficiência exérgica (%)	15,85	17,11	18,49	19,24	20,06	22,00	24,73

Tabela 3 – Variação percentual de potência líquida, eficiência energética e exergética para cada incremento de fração molar de dimetil-éter adicionado ao sistema (Autor, 2023).

Fração molar de dimetil-éter	Variações (%)					
	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0
Potência líquida (kW)	7,95	8,05	4,03	4,23	9,63	12,34
Eficiência energética (%)	7,31	6,99	4,39	3,48	8,66	10,98
Eficiência exergética (%)	7,96	8,07	4,04	4,24	9,67	12,40

Ao avaliar a variação percentual dos parâmetros de desempenho em relação a cada incremento de dimetil-éter na composição da mistura, foi possível constatar que as variações de potência líquida e eficiência exergética foram bastante próximas e ainda superiores às variações de eficiência energética, o que nos permite inferir que os dois primeiros parâmetros são mais sensíveis à variação de composição da mistura binária. A Figura 2 compara os valores encontrados e apresenta as respectivas equações da linha de tendência dos dados. Apesar do comportamento aparentemente linear, a equação que melhor se ajustou aos resultados foi a polinomial de segundo grau.

Figura 2 – Comparação do trabalho líquido, eficiência energética e exergética em função da fração molar de dimetil-éter (Autor, 2023).



A partir da avaliação do comportamento do desempenho da simulação em que a adição de dimetil-éter ocasionou um aumento dos parâmetros que se aproximaram dos valores encontrados para a simulação em fluido puro foi possível levantar a hipótese de que isso se deu devido a uma combinação das condições de operação mais favoráveis à utilização de dimetil-éter, principalmente no que diz respeito à pressão no evaporador, uma vez que a pressão “ótima” encontrada para o propano era superior à encontrada para o dimetil-éter e adotada para a simulação, como é possível observar nas Figuras 3a e 3b, que representam o perfil de variação da potência líquida em função da pressão no evaporador e o valor obtido para ambos no ponto operacional da simulação, aproximadamente 6 bar.

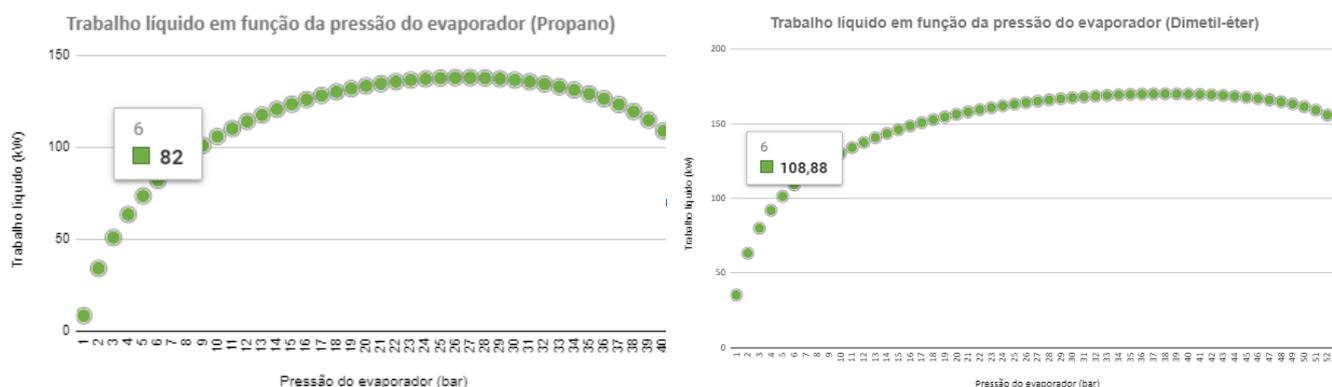


Figura 3 – Potência líquida em função da pressão no evaporador para o propano (a) e dimetil-éter (b).

CONCLUSÕES:

A análise dos resultados obtidos, juntamente com a revisão bibliográfica realizada, permitiu concluir que o perfil de potência líquida e eficiências energética e exergética para a mistura binária de propano e dimetil-éter não satisfaz o esperado na literatura para outras misturas binárias que apresentavam melhorias de eficiência em relação aos respectivos fluidos puros e possibilitavam obter uma composição ótima para o ciclo. Neste caso, o desempenho de todas as composições de mistura avaliadas foi inferior ao obtido para a simulação com fluido puro e os resultados mostraram que os parâmetros de potência líquida e eficiência exergética são mais sensíveis às variações de composição.

Deste modo, para o futuro desenvolvimento do trabalho propõe-se avaliar as misturas simultaneamente a uma otimização das condições de operação, como pressão no evaporador e condensador, como apresentado por Chys *et al.* (2012), para que a comparação seja realizada em condições operacionais que não favoreçam um dos fluidos puros avaliados, possibilitando concluir acerca das melhorias que podem ser proporcionadas pelas misturas, bem como analisar as condições necessárias para estas melhorias do ponto de vista de viabilidade de aplicação para o gás natural liquefeito.

AGRADECIMENTOS:

À Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis pelo fomento ao Programa de Recursos Humanos e à Financiadora de Estudos e Projetos - Finep responsável pela bolsa de Iniciação Científica com a qual foi possível desenvolver todos os trabalhos associados a este projeto. Gostaria de agradecer também à Coordenadora do PRH 29.1 Prof^a Mariana Conceição da Costa – FEQ/UNICAMP e ao meu orientador Prof. José Vicente Hallak Dangelo – FEQ/UNICAMP, sem o apoio do qual não seria possível executar o projeto.

BIBLIOGRAFIA

- ABADI, G. B.; KIM, K. C. **Investigation of organic Rankine cycles with zeotropic mixtures as a working fluid: Advantages and issues.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, n. 73, p. 1000-1013, 09 fev. 2017.
- ATIENZA-MÁRQUEZ, A.; BRUNO, J. C.; CORONAS, A. **Cold recovery from LNG-regasification for polygeneration applications.** Applied Thermal Engineering, n. 132, p. 463-478, 24 dez. 2017.
- BADAMI, M.; BRUNO, J. C.; CORONAS, A.; FAMBRI, G. **Analysis of different combined cycles and working fluids for LNG exergy recovery during regasification.** Energy, n. 159, p. 373-384, 18 jun. 2018.
- BAHRAMI, M.; POURFAYAZ, F.; KASAEIAN, A. **Low global warming potential (GWP) working fluids (WFs) for Organic Rankine Cycle (ORC) applications.** Energy Reports, n. 8, p. 2352-4847, 29 jan. 2022.
- BAO, J.; LIN, Y.; ZHANG, R.; ZHANG, N.; GAOHONG, H. **Strengthening power generation efficiency utilizing liquefied natural gas cold energy by a novel two-stage condensation Rankine cycle (TCRC) system.** Energy Conversion and Management, n. 143, p. 312-325, 12 abr. 2017.
- CHYS M.; VAN DEN BROEK, M.; VANSLAMBROUCK B. **Potential of zeotropic mixtures as working fluids in organic Rankine cycles.** Energy, n. 44, p. 623-632, 26 jun. 2012.