



Avaliação do Desempenho Termodinâmico de Ciclos Rankine Orgânicos

Aluno: Guilherme Deus Vaz de Carvalho (RA 198314)

Orientador: Prof. Dr. José Vicente Hallak d'Angelo

Resumo

É proposta uma análise de dois ciclos de Rankine orgânicos, baseando-se em *Saleh et al. (2007)*, constrói-se um ciclo convencional, e um ciclo cascata, a partir de *P. Li. et al. (2016)*, onde o ciclo utiliza energia solar e gás natural liquefeito. Estudam-se 11 fluidos de trabalho entre alcenos e éteres, variando-se as condições de funcionamento do processo para atingir altos valores de eficiência. Utilizou-se o Aspen Hysys®, versão 10 como ferramenta computacional sendo possível alcançar no ciclo convencional, 24% de eficiência ao utilizar-se de R1550 como fluido de trabalho. Enquanto que no ciclo cascata, utilizando benzeno/propeno, foi-se possível alcançar 11,11% de eficiência equivalente, que é a medida de quanto mais de energia se obtém por utilizar coletores solares no aquecimento da fonte quente.

1 – Introdução

Nossa sociedade preocupa-se constantemente com a obtenção de energia, buscando formas de reduzir impactos ambientais, o uso de combustíveis fósseis e prezando por um processo eficiente. Com isso em mente uma tecnologia viável e eficiente para conversão de calor, de baixa e média temperatura, em potência é o Ciclo de Rankine Orgânico (ORC, do inglês, *organic Rankine cycle*), entre suas aplicações pode-se exemplificar o aproveitamento de calor residual de processo.

Em busca de obter informações sobre ORC propõem-se o desenvolvimentos de um ciclo convencional e um em cascata, para isso utilizou-se o software Aspen Hysys®, versão 10, e a equação de estado de Peng-Robinson-Stryek-Vera. Dessa forma garantindo uma ferramenta computacional habilitada para realizar análises termodinâmicas, um modelo matemático efetivo no cálculo da eficiência do ciclo e da interação de moléculas orgânicas.

Para este estudo selecionaram-se alcenos e éteres, baseando-se em critérios como: baixa temperatura de evaporação; baixo ODP (do inglês, *Ozone Depleting Potential*) e baixo GWP (do inglês, *Global Warming Potential*). Escolheram-se onze fluidos ao total, sendo nove diferentes entre si e dois semelhantes em termos de composição química, mas tratados de forma diferente no simulador.

Fluidos	T_c (°C)	P_c (Pa)	MM (g/mol)	Ponto de evaporação em 1kPa (°C)	ODP	GWP
R115	9,166	5040	28,05	103,7	0	<1
Etileno	9,209	5032	28,05	-103,8	0	<1

Propeno	91,85	4620	42,08	-47,75	0	<<1
R134a	101	4056	102	-26,07	0	1300
R152a	113,9	4444	66,05	-25	0	120
Isobuteno	144,7	4002	56,11	-6,851	0	<<1
Dietil éter	193,6	3620	74,12	34,45	-	-
Benzeno	288,9	4924	78,11	80,09	0	3,4
Tolueno	318,6	4100	92,14	110,6	-	-
N-propilbenzeno	365,2	3200	120,2	159,2	-	-
N-butilbenzeno	387,4	2887	134,2	183,3	-	-

Tabela 1 – Propriedades dos fluidos.

2 – Resultados e Discussões

2.1 – Ciclo convencional

Saleh et al. (2007), testa 31 fluidos puros em um ORC de baixa e média temperatura, obtendo-se resultados de η (eficiência) Equação 1. Partindo disso simulou-se um ORC baseando-se nas mesmas condições a fim de validar a ferramenta computacional, a equação de estado e o modelo matemático [1].

$$\eta = \frac{[(h_4 - h_3) - (h_2 - h_1)]}{(h_3 - h_2)} \quad (1)$$

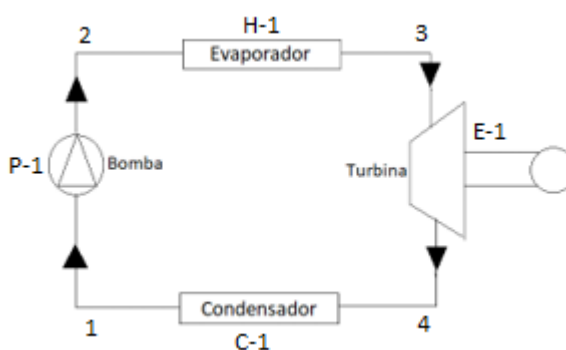
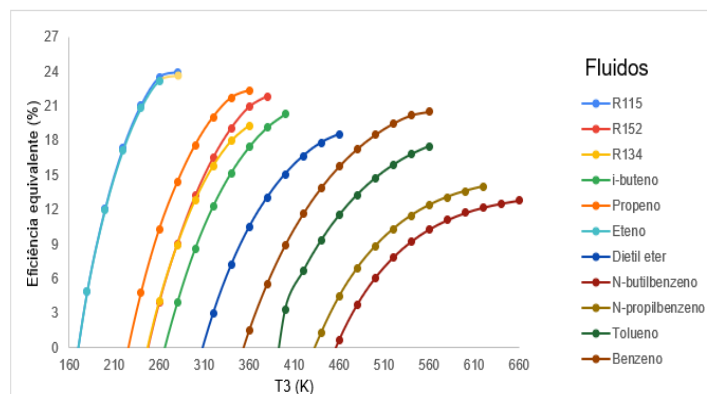


Figura 1 – Base teórica do Ciclo de Rankine [1].

Com resultados próximos e condizentes com os descritos por *Saleh et al. (2007)*, iniciaram-se as simulações com os fluidos determinados para a pesquisa, estabelecendo-se que o fluido saía a 100 kPa (P_4) da turbina 1 (E-1), variando-se a temperatura de saída (T_3) da caldeira (H-1).

Fluidos	T3(°C)	T4(°C)	P _{min} (kPa)	P _{max} (kPa)	Vazão (kg/s)	Eficiência (%)	Desvio absoluto (%)
Propane (R290)	57,14	29,7	1079	2000	42,94	5,84	1,23
Cyclopropane (RC270)	100	58,5	822,7	2000	22,38	8,58	3,21
N-Butane (R600)	100	50,36	285	1529	16,76	12,4	1,43
Dimetil éter (RE170)	75,1	29,62	673,3	2000	22,93	9,19	1,99
CF ₃ -O-CHF ₂ (RE125)	57,67	33,7	1011	2000	99,64	5,90	4,07
CCHF ₂ -O-CHF ₂ (R134)	100	40,96	250,1	1666	24,95	13,61	8,36

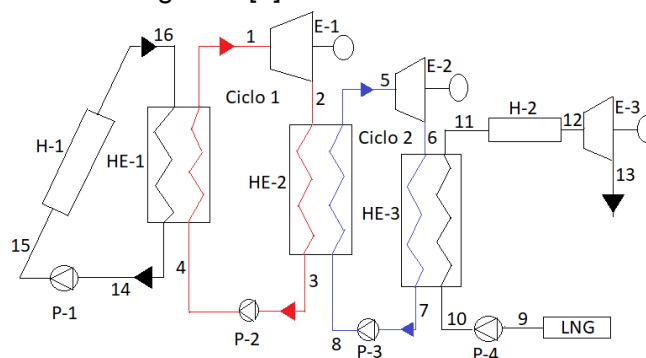
Tabela 2 – Dados obtidos para validação com *Saleh et al. (2007)*.**Figura 2** – Eficiência dos ciclos operando com os fluidos de estudo, variando-se a temperatura (T_3) até próximo da T_c .

A partir de análises, encontram-se valores de 15-24% de eficiência para a maioria dos fluidos, com N-propilbenzeno e o N-butilbenzeno abaixo disso, em torno de 13% de eficiência, provavelmente por serem os fluidos com as maiores temperaturas críticas entre os estudados, permitindo que sejam utilizados em faixas de temperatura mais elevadas, no entanto aquecê-los a tal ponto reduziria a eficiência geral do sistema.

Também é importante pontuar a extensa faixa de temperatura no estudo, permitindo aplicações em diversas situações de processo, tendo como limitante a magnitude da fonte quente, que atua sobre o fluido de trabalho e a pressão de saída da turbina (P_4).

2.2 – Ciclo cascata

P. Li. et al. (2016), exemplifica um ORC cascata onde energia solar é a fonte quente que aquece a água que passa pelo trocador de calor (HE-1) com o ciclo I. Este ciclo opera com um fluido orgânico, que percorre a turbina (E-1) e após isto troca calor com o fluido orgânico no ciclo II (HE-2), este fluido por sua vez também passará em uma turbina (E-2) e então trocará calor com LNG (Liquified Natural Gas), a fonte fria do sistema, no trocador de calor 3 (HE-3), como mostrado na Figura 3 [2].

**Figura 3** – Caso base para ORC cascata *P. Li. et al. (2016)*, [2].

Desenvolveu-se para esse ORC cascata um modelo matemático traduzido livremente como “Eficiência equivalente” em que calcula-se o quanto de trabalho a mais se obtém ao utilizar, coletores de energia solar na fonte quente, Equações (2) (3).

$$\eta_{eq} = \frac{W_{net} - W_{max}}{GA} \quad (2)$$

$$W_{net} = (W_{E-1} + W_{E-2} + W_{E-3}) * \varepsilon_g - (W_{P-1} + W_{P-2} + W_{P-3} + W_{P-4}) \quad (3)$$

Sendo W_{max} a potência vinda do sistema de LNG.

Baseando-se nos resultados para Amônia/Etano de *P. Li. et al. (2016)*, construiu-se um gráfico, com o mesmo perfil de eficiência equivalente. Então dividiram-se, em dois grupos, os 11 fluidos de pesquisa, aqueles com menores temperaturas de evaporação em 1kPa, seriam utilizados no ciclo II, os outros com maiores temperaturas seriam utilizados no ciclo I.

Foi-se possível criar gráficos comparativos da eficiência equivalente, variando-se os fluidos no ciclo II, para uma mesma condição de processo no ciclo I, os resultados obtidos são apresentados a seguir.

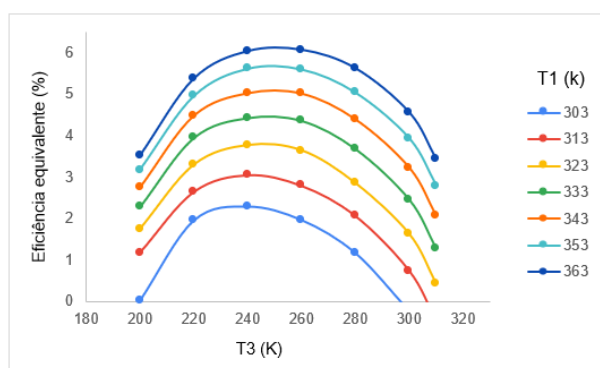


Figura 8 – Curvas de eficiência do ORC cascata utilizando amônia e etano, para validação *P. Li. et al. (2016)* [2].

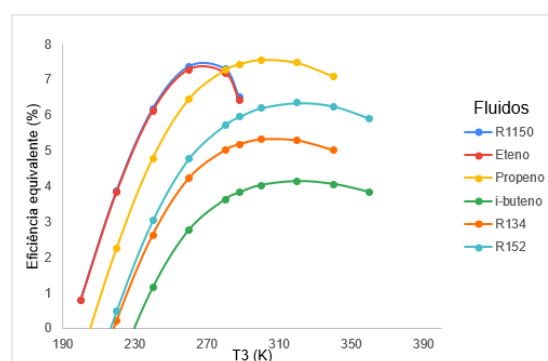


Figura 10 – Comparação da η_{eq} do ORC, variando-se os fluidos no ciclo II e dietil éter no ciclo I com T_1 igual a 460K.

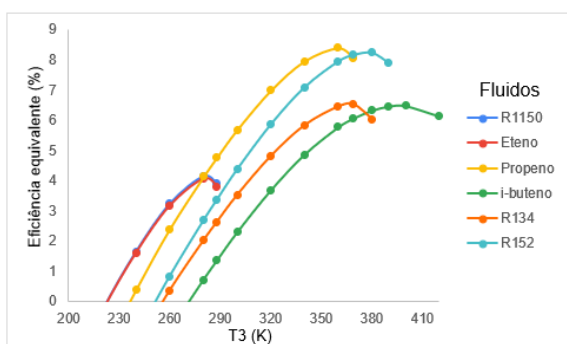


Figura 9 - Comparação da η_{eq} do ORC, variando-se os fluidos no ciclo II e N-butilbenzeno no ciclo I com T_1 igual a 640K.

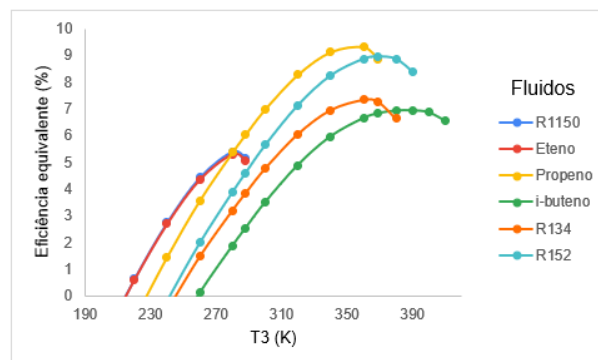


Figura 11 – Comparação da η_{eq} do ORC, variando-se os fluidos no ciclo II e N-propilbenzeno no ciclo I com T_1 igual a 635K.

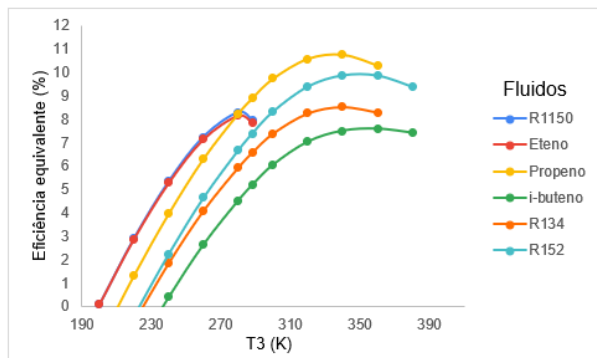


Figura 12 – Comparação da η_{eq} do ORC, variando-se os fluidos no ciclo II e tolueno no ciclo I com T_1 igual a 590K.

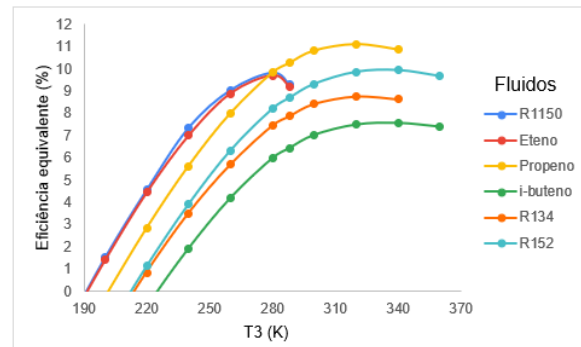


Figura 13 – Comparação da η_{eq} do ORC, variando-se os fluidos no ciclo II e benzeno no ciclo I com T_1 igual a 590K.

Percebe-se resultados com elevadas η_{eq} , indicando que a condição híbrida de processo ORC-LNG seria uma forma sucedida de geração de energia. Destaca-se o propeno como fluido para o ciclo II, onde em todas as combinações com o ciclo I, apresentou η_{eq} mais elevada, indicando que seria uma opção viável para o processo, ainda mais considerando a baixa ODP e GWP.

Nota-se diferenças entre o refrigerante R1150 e eteno, indicando que por mais que sejam quimicamente semelhantes, podem apresentar diferenças entre as simulações. Ressaltando a importância de se compreender as equações de estados e a ferramenta computacional utilizada.

3 – Conclusões

Conclui-se que ORC convencional é uma forma simples e eficiente de se obter energia limpa. Encontrou-se 24% de eficiência com o uso de R1150, podendo ser possível, com o estudo de outros fluidos de trabalho, encontrar eficiências ainda maiores. Entende-se ao se analisar o ORC-LNG que o uso de coletores solares na fonte quente do ciclo possibilita um aumento da eficiência. Encontrando-se valores de até 11,11% de eficiência equivalente no uso de benzeno/propeno, sendo que se pode alcançar outros valores em outras combinações de fluidos. Vê-se a importância de se estudar ORC, para obtenção de energia, ressaltando a versatilidade de fluidos de trabalho e condições para aplicações do ciclo.

4 - Bibliografia

- [1] Saleh, B., Koglbauer, G., Wendland, M., Fischer, J. Working fluids for low-temperature organic Rankine cycles. Energy, Institut fur Verfahrens- und Energietechnik, Universitat fur Bodenkultur, Muthgasse 107, A-1190 Wien, Austria, Volume 32, Issue 7, July 2007, Pages 1210-1221.
- [2] P. Li. et al. A cascade organic Rankine cycle power generation system using hybrid solar energy and liquefied natural gas. Solar Energy 127 (2016) 136–146.