

DESEMPENHO TERMODINÂMICO DE UM CICLO DE RANKINE ORGÂNICO OPERANDO COM PENTANO: EFEITO DA PRESSÃO DO CONDENSADOR E DO EVAPORADOR

Luciana Yumi Akisawa Silva¹

¹Universidade Federal de São Paulo, Diadema, Brasil (luciana.akisawa@unifesp.br)

Resumo: O ciclo de Rankine orgânico (CRO) é um ciclo de geração de potência, em que o fluido de trabalho é um composto orgânico que possui menor ponto de ebulição do que a água, permitindo assim, a geração de energia a partir de fontes de calor de baixa e média temperatura, como a energia solar. Neste trabalho realizou-se a simulação computacional e analisou-se a influência das pressões do condensador e do evaporador no desempenho termodinâmico de um CRO que usa pentano como fluido de trabalho.

Palavras-chave: Ciclo de Rankine orgânico; pentano; pressão do condensador; pressão do evaporador; desempenho termodinâmico.

INTRODUÇÃO

A demanda por energia vem crescendo ano a ano, e a energia é um parâmetro importante para a economia global e é considerada essencial para os processos industriais (Rahbar et al., 2017). Grande parte da energia elétrica gerada no mundo provém de fontes não-renováveis como o carvão, óleo e gás. O uso dessas fontes não-renováveis de energia tem contribuído para o agravamento de problemas ambientais, como o aquecimento global (Shengjun et al. 2011). O ciclo de Rankine orgânico (CRO) é uma tecnologia promissora para a conversão de calor de fontes de baixa e média temperatura em energia elétrica e que tem despertado a atenção nas últimas duas décadas (Park et al., 2018 e Arjunan et al., 2022). Como exemplo de fontes de calor de baixa e média temperatura, tem-se a energia solar, a energia geotérmica, o calor proveniente da combustão de biomassa (que são de origem renovável), e o calor residual de máquinas de combustão interna e de processos industriais (Park et al., 2018 e Li et al., 2021).

O CRO é semelhante ao ciclo de Rankine a vapor d'água, e é composto por condensador, bomba, evaporador e turbina. No entanto, o CRO utiliza compostos orgânicos como fluido de trabalho, ao invés de água (Rahbar et al., 2017 e Mahmoudi et al., 2018). As substâncias orgânicas usadas como fluido de trabalho no CRO apresentam temperatura de ebulição menor do que a da água, o que permite a geração de potência a partir de fontes de calor de baixa e média temperatura (Quoilin et al., 2013). Conforme relatado por Tchanche et al. (2011), apesar do CRO gerar menor quantidade de energia do que o ciclo de Rankine a vapor d'água, ele apresenta algumas vantagens:

- Menor quantidade de calor é necessária durante o processo de evaporação.
- O processo de evaporação ocorre a temperatura e pressão mais baixas.
- Existe menor diferença de temperatura entre o evaporador e o condensador, que implica em menor redução de pressão no processo de expansão e a turbina de simples estágio pode ser utilizada.

A Figura 1 representa o esquema de um CRO. O fluido de trabalho é aquecido sob pressão no evaporador e é convertido em vapor de alta pressão (1), o vapor de alta pressão passa através da turbina que converte a energia mecânica do fluido em energia elétrica (2). O vapor de baixa pressão é encaminhado para o condensador, onde é transformado em líquido (3). O líquido de baixa pressão, é então bombeado para o evaporador pela ação da bomba (4) para completar o ciclo (Lecompte et al., 2015 e Park et al., 2018).

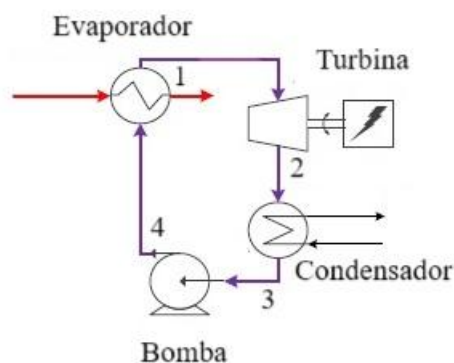


Figura 1. Esquema do Ciclo Rankine Orgânico.
Adaptado de Lecompte et al., 2015.



O fluido de trabalho utilizado no CRO tem um efeito significativo na eficiência do ciclo, na dimensão dos equipamentos e no desempenho econômico (Feng et al., 2015). Conforme relatado por Vélez et al. (2012), Hung et al. (2010) e Tchanche et al. (2011), na seleção de fluidos de trabalho as seguintes propriedades devem ser levadas em consideração:

- Calor latente e peso molecular: quanto maior o peso molecular e o calor latente do fluido, maior a quantidade calor a ser fornecida no evaporador.
- Baixo ponto de congelamento: o ponto de congelamento deve ser menor do que a temperatura de operação do condensador.
- Curva de saturação: de acordo com o diagrama temperatura versus entropia, os fluidos podem apresentar três diferentes tipos de inclinação na curva do vapor saturado e podem ser classificados como – (1) fluidos secos, que possuem inclinação positiva; (2) fluidos úmidos, que apresentam inclinação negativa e (3) fluidos isentrópicos em que a inclinação é nula. Os fluidos secos apresentam melhores eficiências térmicas, pois eles não sofrem condensação ao sofrer a redução de pressão na turbina, ao contrário dos fluidos úmidos que se condensam após a expansão (Aljundi, 2011).
- Estabilidade: a estabilidade química do fluido pode limitar a temperatura da fonte quente, pois ele pode sofrer degradação térmica, produzindo substâncias que podem modificar a maneira pelo qual o ciclo trabalha. Além disso, a degradação pode gerar compostos tóxicos e irritantes.
- Compatibilidade com os materiais: os fluidos de trabalho não devem ser corrosivos aos materiais usados na construção dos equipamentos que compõem o ciclo.
- Segurança os fluidos de trabalho devem ser não-tóxicos e não-inflamáveis.
- Impactos ambientais: os fluidos de trabalho devem obedecer às regulações e normas ambientais vigentes e devem apresentar ODP (“Ozone Depletion Potential” – Potencial para Destruição da Camada de Ozônio) nulo e GWP (“Global Warming Potential” – Potencial para o Aquecimento Global) baixo.
- Disponibilidade e baixo custo: um fluido de baixa disponibilidade e/ou de custo elevado inviabiliza seu uso no CRO.

Os clorofluorcarbonos (CFCs) e os hidroclorofluorcarbonos (HCFCs), foram muito utilizados no passado como fluidos de trabalho no CRO, porém seu uso foi proibido pelo Protocolo de Montreal, uma vez que essas substâncias possuem elevado ODP. Os substituintes para os CFCs e HCFCs, como os hidrofluorcarbonos (HFCs) e os perfluorocarbonos (PFCs), apesar de possuírem ODP nulo, apresentam GWP elevado, e a sua utilização

deve ser reduzida, de acordo com o Protocolo de Kioto (Aljundi et al., 2011). Uma alternativa é utilizar hidrocarbonetos como fluido de trabalho, pois apresentam ponto de ebulição baixos, e a condensação pode ser realizada em pressões próximas da atmosférica. Do ponto de vista ambiental, os hidrocarbonetos apresentam ODP nulo e GWP baixo (Shu et al., 2014). Este trabalho avaliou o desempenho termodinâmico de um CRO que utiliza o pentano como fluido de trabalho, bem como a influência das pressões de operação do condensador e do evaporador no desempenho do ciclo, por meio da simulação computacional.

MATERIAL E MÉTODOS

A simulação computacional do CRO foi realizada por meio do simulador livre DWSIM versão 7.5.5 (Classic UI, 64 bits).

O modelo termodinâmico utilizado nas simulações foi a equação de estado de Peng-Robinson, que é adequada para estimar a massa específica das fases gasosa e líquida de hidrocarbonetos com 5 carbonos ou mais na cadeia (Lopez-Echevery et al., 2017). O cálculo da pressão de vapor do pentano, por meio da equação de Peng-Robinson, foi realizado com auxílio do simulador DWSIM, utilizando uma corrente de massa, em que se especificou a temperatura e a fração de vapor igual a 1 (indicando que a corrente está no estado de vapor saturado e o simulador forneceu o valor da pressão de saturação).

Para determinar o diagrama temperatura (T) versus Entropia (S), utilizou-se a ferramenta “Sensitivity Study” do DWSIM. Na análise de sensibilidade a temperatura da corrente de massa foi considerada a variável independente e a entropia molar do vapor e do líquido saturado foram especificados como variáveis dependentes, o limite inferior da temperatura foi de 208 K e o limite superior foi de 470 K, que está compreendido entre a temperatura de fusão e a temperatura crítica do pentano, e definiu-se 30 pontos nesse intervalo de temperatura. Para cada valor de temperatura compreendido no intervalo de temperatura avaliado, calculou-se o valor da entropia molar do vapor e do líquido saturado com a equação de Peng-Robinson, e com estes valores construiu-se o diagrama T x S.

O CRO foi composto por: turbina, condensador, bomba e evaporador, conforme esquema representado na Figura 2. A vazão mássica de pentano no CRO foi definida como 1 kg/s.

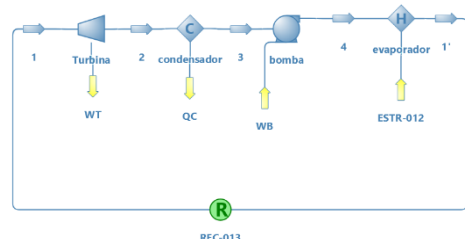


Figura 2. Esquema do CRO no simulador DWSIM.

As especificações de cada um dos equipamentos do CRO são apresentadas a seguir:

Turbina: foi utilizado o bloco “Expander (Turbine)”. A corrente de massa na entrada da turbina foi definida no estado de vapor saturado e na pressão de operação do evaporador. A turbina foi considerada adiabática e especificou-se a eficiência isentrópica igual a 85% e a pressão de descarga igual à pressão de operação do condensador.

Condensador: o bloco “Cooler” foi usado para simular o condensador e especificou-se que a corrente de massa que sai dele encontra-se no estado de líquido saturado. As pressões do condensador usadas neste estudo foram: 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200, 225 e 250 kPa.

Bomba: na simulação foi representada pelo bloco “Pump”. A eficiência isentrópica da bomba foi considerada igual a 85% e a pressão de saída da bomba foi definida igual à pressão de operação do condensador.

Evaporador: o bloco “Heater” foi usado para simular o evaporador, e definiu-se que a corrente de massa na saída do evaporador estava no estado de vapor saturado. As pressões do evaporador utilizadas foram: 500, 750, 1000, 1250, 1750, 2000, 2250, 2750 e 3000 kPa.

Para garantir que as condições das correntes de saída do evaporador e da corrente de entrada da turbina sejam iguais e fechar o ciclo, foi utilizado o bloco “Recycle Block”.

A influência da pressão do condensador e do evaporador no desempenho do CRO foi avaliada por meio da análise paramétrica. A análise paramétrica consistiu em realizar as simulações computacionais, fixando-se o valor da pressão do evaporador e variando-se a pressão do condensador.

O desempenho do CRO foi avaliado por meio eficiência térmica (η), que está representada na Equação (1):

$$\% \eta = \frac{|\dot{W}_T - \dot{W}_B|}{\dot{Q}_{evap}} \cdot 100 \quad (1)$$

Em que:

η é a eficiência térmica;

$\dot{W}_T$ é a taxa de trabalho gerada pela turbina;

$\dot{W}_B$ é a taxa de trabalho consumido pela bomba;

$\dot{Q}_{evap}$ é a taxa de calor fornecido ao evaporador.

Outro parâmetro usado para avaliar o desempenho do CRO é a razão de trabalho (BWR – “Back Work Ratio”), que é dada por:

$$BWR = \frac{\dot{W}_B}{|\dot{W}_T|} \quad (2)$$

Neste trabalho, a convenção de sinais utilizada nos balanços de energia, foi a convenção de sinais recomendada pela IUPAC (Choen et al., 2008). Se a vizinhança realiza trabalho no sistema (como no caso da bomba), o trabalho é considerado positivo. Quando o sistema realiza trabalho na vizinhança (como no caso da turbina), o trabalho é negativo. O módulo das Equações (1) e (2) são necessários para garantir que η e o BWR tenham valores positivos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A curva da pressão de vapor do pentano foi determinada por meio da equação de Peng-Robinson e comparada com dados experimentais reportados na literatura. De acordo com a Tabela 1, os desvios relativos médios foram menores do que 3,5%, o que comprova que a equação de Peng-Robinson é adequada para representar as propriedades termodinâmicas do pentano. A Figura 3 mostra a curva de pressão de vapor do pentano, com os dados calculados por Peng-Robinson e com os dados experimentais da literatura.

Tabela 1. % desvio relativo entre Peng-Robinson e dados experimentais.

Dados experimentais	% desvio relativo
Messerly et al. (1940)	3,06
Beattie et al. (1951)	0,99
Ida et al. (1972)	0,42

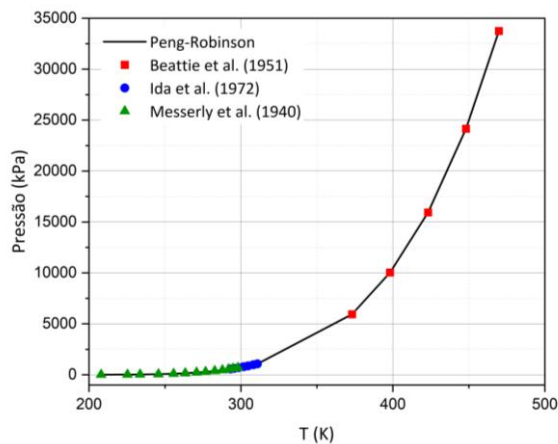


Figura 3. Curva de pressão de vapor do pentano. Dados experimentais e calculados por Peng-Robinson.

A equação de Peng-Robinson também foi utilizada para construir o diagrama temperatura (T) versus entropia (S), que está representada na Figura 4. Analisando a Figura 4, observa-se que a tangente à curva T x S do vapor saturado possui inclinação positiva, portanto o pentano é um fluido seco, e é adequado para ser utilizado como fluido de trabalho no CRO, pois não haverá formação de líquido no interior da turbina.

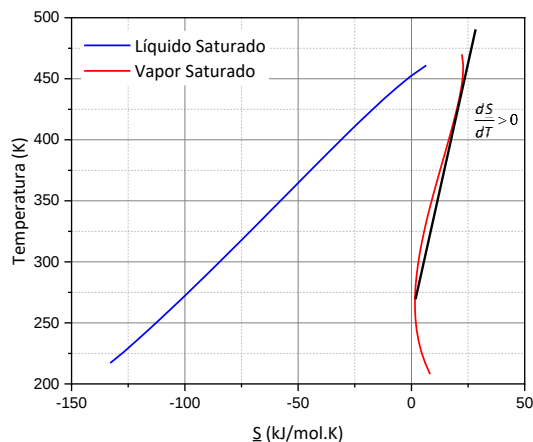


Figura 4. Diagrama T x S para o pentano.

Para validar a metodologia adotada neste trabalho, simulou-se o CRO utilizando o pentano como fluido de trabalho, nas mesmas condições descritas no trabalho de Shu et al. (2014). Shu et al. (2014) realizaram a simulação do CRO por meio de modelos das unidades de processos que foram implementados em linguagem MATLAB e as propriedades termodinâmicas do pentano foram calculadas por meio do software REFPROP 8.0. Definiu-se que a pressão do evaporador é igual 2581,4 kPa, e que a corrente de saída do evaporador se encontra no estado de vapor saturado. A pressão do condensador foi igual a 214,54 kPa e as eficiências isentrópicas da

turbina e da bomba foram iguais a 0,8. Com os resultados da simulação, calculou-se a eficiência térmica do CRO com a Equação (1) e comparou-se com o valor encontrado por Shu et al. (2014).

A Tabela 2 mostra que a % desvio relativo entre a eficiência térmica obtida neste trabalho e o valor determinado por Shu et al. (2014) foi de apenas 0,78%, indicando que a metodologia adotada é adequada para avaliar o desempenho do CRO.

Tabela 2. Eficiência térmica.

	Este trabalho	Shu et al. (2014)	%desvio relativo
η	13,97%	14,08%	0,78

A Figura 4, mostra a superfície de resposta do BWR em função das pressões do condensador e do evaporador. O BWR representa a fração de energia gerada pela turbina que é consumida pela bomba, e quanto menor o BWR, menor o consumo de energia pela bomba. De acordo com a Figura 3, os menores valores de BWR são obtidos para as menores pressões do evaporador e do condensador. Quanto menor a pressão do condensador e do evaporador, menor é a quantidade de trabalho consumida pela bomba, pois menor é a diferença de pressão entre a entrada e a saída da bomba. Os resultados mostram que para as condições estudadas, o BWR está compreendido entre 1 e 8%.

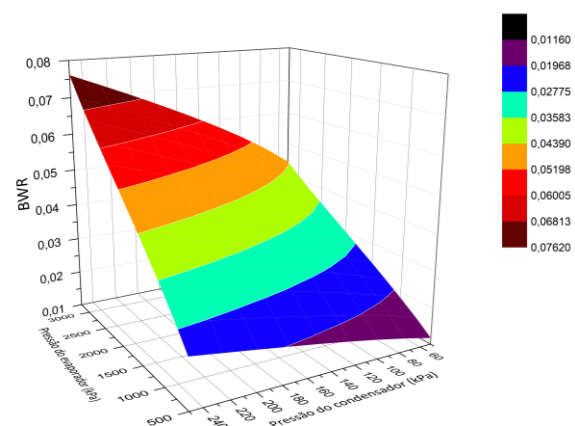


Figura 4. Superfície de resposta. Relação entre o BWR e as pressões do evaporador e do condensador.

A Figura 5 apresenta a superfície de resposta que relaciona a eficiência térmica (η) com as pressões do condensador e do evaporador. Pode-se observar que os maiores valores de eficiência térmica são obtidos para as maiores pressões de operação do evaporador e para as menores pressões de operação do condensador. Isto ocorre, pois quanto maior a pressão do evaporador, maior é a entalpia do vapor gerado e maior é a quantidade de trabalho que pode ser gerada na turbina. Quanto maior a pressão no condensador,

maior é a pressão na saída da turbina, e menor é a taxa de trabalho gerada por ela.

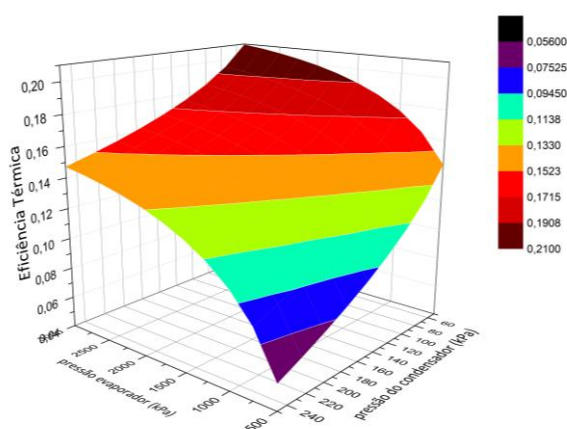


Figura 5. Superfície de resposta. Relação entre eficiência térmica e as pressões do evaporador e do condensador.

O maior valor da eficiência térmica obtido, foi para a condição em que a pressão do evaporador foi de 3250 kPa, a pressão do condensador de 50 kPa, e foi igual a 21,09 %. Este valor é superior ao obtido por Shu et al. (2014). Nessas mesmas condições o BWR foi de 4,44%, ou seja 4,44% da potência produzida pela turbina é gasta para o funcionamento da bomba.

CONCLUSÃO

As simulações realizadas mostraram que é viável a utilização do pentano como fluido de trabalho no CRO.

A análise da influência das pressões do evaporador e do condensador, mostraram que quanto maior a pressão no evaporador e quanto menor a pressão do condensador, maior é a eficiência térmica do ciclo. O maior valor de eficiência térmica foi de 21,09 %, valor obtido para a condição em que a pressão do evaporador é de 3250 kPa e do condensador de 50 kPa.

REFERÊNCIAS

- Aljundi, I. H. Effect of dry hidrocarbons and critical point temperature on the efficiencies of organic Rankine cycle. *Renewable Energy*, 36, 1196-1202, 2011.
- Arjunan, P.; Muthu, J. H. G.; Radha, S. L. S.; Suryan, A. Selection of working fluids for solar organic Rankine cycle – A review. *International Journal of Energy Research*, 46, 20573-20599, 2022.
- Beattie, J. A.; Levine, S. W.; Douslin, D. R. The vapor pressure and critical constants of normal pentane. *Jornal of the American Society*, 73, 4431-4432, 1951.
- Choen, E. R.; Cvittas, T.; Frey, J. G.; Holmström, B.; Kuchitsu, K.; Marquardt, R.; Mills, I.; Pavese, F.; Stohner, J.; Strauss, H. L.; Takami, M.; Thor, A. J. Quantities, Units and Symbols in Physical, Chemistry, IUPAC, Green Book, 3rd edition, IUPAC & RSC Publishing, Cambridge, 2008.
- Feng, Y.; Hung, T.; Li, B.; Yang, J.; Shy, Y. Performance comparison of low-grade ORCs (organic Rankine cycles) using R245fa, pentane and their mixtures based on thermoecanomic multi-objective optimization and decision makings. *Energy*, 93, 2018-2029, 2015.
- Hung, T. S.; Wang, S. K.; Kuo, C. H.; Tsai, K. F. A study of organic working fluids on system efficiency of na ORC using low-grade energy sources. *Energy*, 35, 1403-1411, 2010.
- Ida, P. C. L.; Wong, Y. W.; Chang, S. D.; Lu, B. C. Y. Vapor-liquid equilibria in systems n-hexane – benzene and n-pentane – toluene. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 17, 492-498, 1972.
- Lecompte, S.; Huisseune, H.; Van den Broek, M.; Vanslambrouck, B.; De Paepe, M. Review of organic Rankine cycle (ORC) architectures for waste heat recovery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 448-461, 2015.
- Li, J. F.; Guo, H.; Lei, B.; Wu, Y. T.; Ye, F.; Ma, C. F. An overview on subcritical organic Rankine cycle configurations with pure organic fluids. *International Journal of Energy Research*, 45, 12536-12563, 2021.
- Lopez-Echeverry, J. S.; Reif-Achermam, S.; Araujo-Lopez, E. Peng-Robinson equation of state: 40 years through cubics. *Fluid Phase Equilibria*, 447, 39-71, 2017.
- Mahmoudi, A. Fazli, MM; Morad, M. R. A recent review of waste heat recovery by organic Rankine Cycle. *Applied Thermal Engineering*, 143, 660-675, 2018.
- Messerly, G. H.; Kennedy, M. The heat capacity and entropy, heats of fusion and vaporization and the vapor pressure of n-pentane. *Journal of the American Chemical Society*, 62, 2988-2991, 1940.
- Park, B. S.; Usman, M.; Imran, M.; Pesyridis, A. Review of Organic Rankine Cycle experimental data trends. *Energy Conversion and Management*, 173, 679-691, 2018.
- Quoilin, S.; Van den Broeck, M.; Declaye, S.; Dewallef, P.; Lemort, V. Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 168-186, 2013.



- Rahbar, K.; Mahmoud, S.; Al-Dadah, R. K.; Moazami, N.; Mihadizadeh, S. A. Review organic Rankine cycle for small scale applications. *Energy Conversion and Management*, 134, 135-155, 2017
- Shengjun, Z.; Huaixin, W.; Tao, G. Performance comparison and parametric optimization of subcritical Organic Rankine Cycle (ORC) and transcritical power cycle system for low-temperature geothermal power Generation. *Applied Energy*, 88, 2740-2754, 2011.
- Tchanche, B. F.; Lambrinos, G.; Frangoudakis, A.; Papadakis, G. Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles – A review of various applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 3963-3979, 2011.
- Shu, G.; Li, X.; Tian, H.; Liang, X.; Wei, H.; Wang, X. Alkanes as working fluids for high-temperature exhaust heat recovery of diesel engine using organic Rankine cycle. *Applied Energy*, 119, 204-217, 2014.
- Vélez, F.; Segovia, J. J.; Martín, M. C.; Chejne, F.; Quijano, A. A technical, economical, and market review of organic Rankine cycles for the conversion of low-grade heat for power Generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 4175-4189, 2012.