



Análise da Eficiência de Ciclos de Rankine Orgânicos para Diferentes Configurações e Fluidos de Trabalho

Aluno: Gabriel Mathews Viana Pinheiro

Orientador: Prof. Dr. José Vicente Hallak D'angelo (FEQ/Unicamp)

1. Objetivos

O objetivo do trabalho foi analisar, em um simulador de processos, o impacto de diferentes fluidos de trabalho, diferentes condições de operação e diferentes configurações na eficiência do ciclo de Rankine orgânico, e encontrar condições ótimas de operação.

Mais especificamente, estudou-se o impacto da utilização do butano, isobutano, pentano, isopentano, benzeno e tolueno como fluidos de trabalho na eficiência do ciclo. O impacto de diferentes configurações do Ciclo de Rankine (convencional, com reaquecimento e regenerativa) também foi avaliado. Além disso, o impacto das seguintes condições operacionais do ciclo termodinâmico foi estudado: temperatura de saída da caldeira, pressão de saída na turbina, pressão de saída da bomba, pressão de saída do primeiro estágio da turbina (no ciclo com reaquecimento) e fração de separação no *splitter* (no ciclo regenerativo).

2. Metodologia

O simulador de processos COCO v.3.4 (*Cape Open to Cape Open simulation environment*) foi adotado no presente estudo. A equação de estado de Peng-Robinson foi adotada como modelo termodinâmico para todas as simulações realizadas.

Para cada simulação, a temperatura de saída do condensador foi fixada como sendo de 27 °C (300 K). Isso permite com que água de processo seja utilizada para a refrigeração do fluido de trabalho no condensador. A eficiência isentrópica na bomba e na turbina foi considerada igual a 75%. A temperatura de saída do aquecedor, por outro lado, foi estudada dentro da faixa de 100 a 150 °C, enquanto o fluxo mássico total foi considerado igual a 3,0 kg/s para todas as simulações. Finalmente, as perdas de carga nas tubulações e nos equipamentos, bem como variações de energia cinética e potencial, foram desprezadas em todas as simulações.

Inicialmente, estudou-se a influência da pressão de saída da bomba e da temperatura de saída da caldeira na eficiência do Ciclo de Rankine, para cada fluido de trabalho e considerando-se uma configuração convencional.



Em seguida, levando-se em consideração o(s) fluido(s) de trabalho que apresentou(aram) melhor(es) eficiência(s) para a configuração convencional, foram feitas simulações para esses componentes nas configurações com reaquecimento e regenerativa.

Considerando os fluidos de trabalho estudados, as configurações estudadas, e o impacto das diferentes condições de operação na eficiência do ciclo de Rankine orgânico, uma configuração otimizada em termos de eficiência do ciclo foi proposta.

3. Resultados e Discussões

3.1. Ciclo de Rankine em configuração convencional

A Figura 1 apresenta o efeito da temperatura de saída do aquecedor na eficiência do ciclo de Rankine convencional, para diferentes valores de pressão de saída da bomba.

Com relação ao impacto da temperatura de saída do evaporador na eficiência do ciclo de Rankine, nota-se que o impacto é quase nulo para todos os fluidos de trabalho. Por outro lado, o aumento da pressão de saída da bomba aumenta a eficiência do ciclo de Rankine.

Além disso, é notório que o fluido de trabalho utilizado impacta na eficiência do ciclo de Rankine. Isso porque cada fluido de trabalho tem uma curva de pressão de vapor que lhe é característica, e, deste modo, as condições de operação mudam. Da Figura 1, percebe-se que o benzeno apresenta valores de eficiência mais altos (em torno de 17%) que os demais fluidos.

3.2. Ciclo de Rankine com reaquecimento

A Figura 2 apresenta os resultados de eficiência obtida nas simulações em função da pressão de saída do primeiro estágio da turbina, para duas condições de temperatura de saída do aquecedor: 140 e 150 °C.

Nota-se que, para baixos valores de pressão de saída do primeiro estágio da turbina, a eficiência do ciclo é baixa. À medida que a pressão de saída do primeiro estágio da turbina aumenta, a eficiência do ciclo também aumenta, até assumir um valor aproximadamente constante em torno de 17% (semelhante à eficiência do ciclo convencional, para as mesmas condições de operação).

3.3. Ciclo de Rankine regenerativo

Com relação ao ciclo de Rankine regenerativo, a Figura 3, por sua vez, apresenta os resultados de eficiência obtida nas simulações em função da pressão de saída do primeiro estágio da turbina, para duas condições de temperatura de saída do aquecedor: 140 e 150 °C.

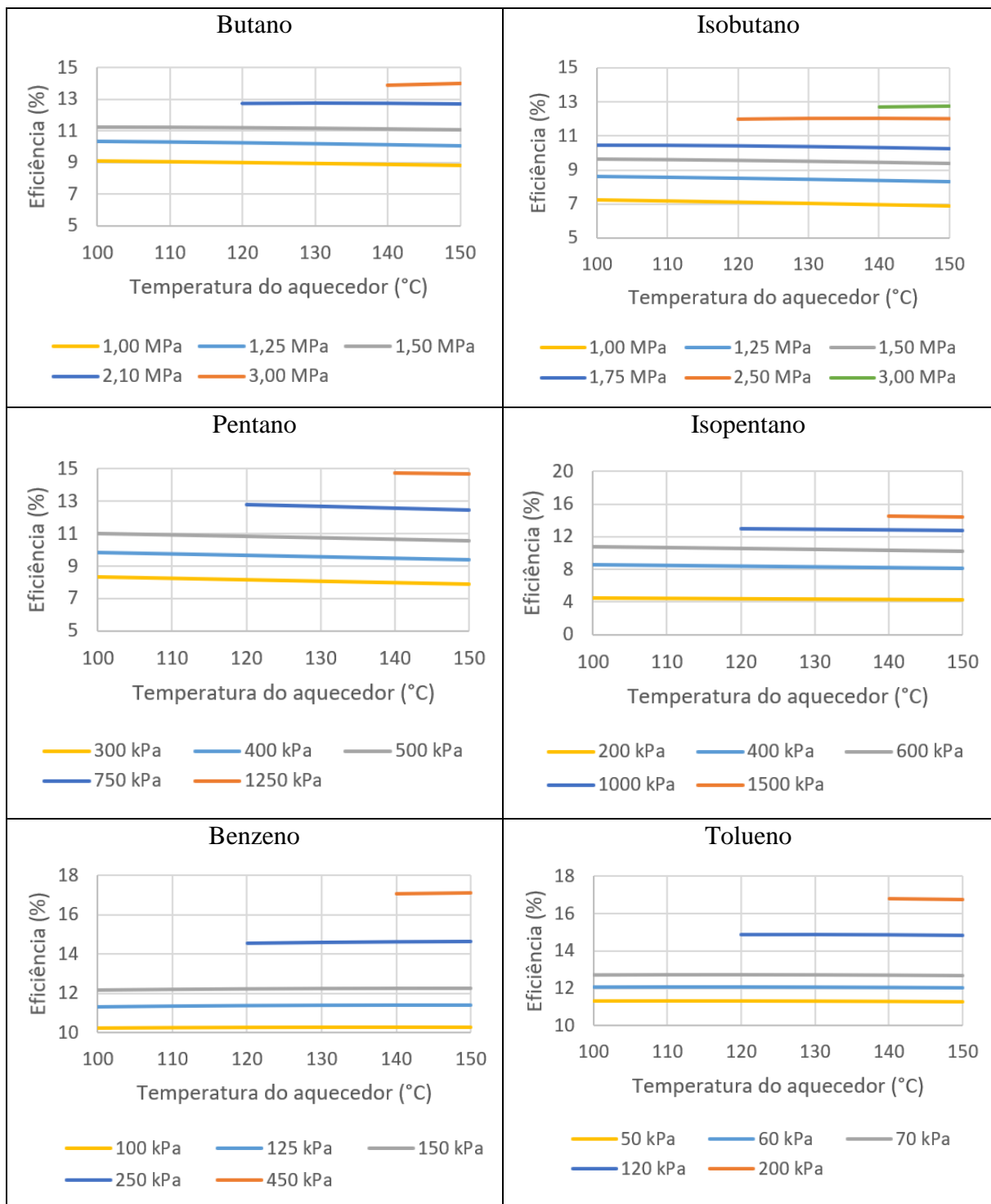


Figura 1 – Efeito da temperatura na eficiência dos ciclos de Rankine convencionais, para os diferentes fluidos de trabalho estudados, em diferentes pressões de saída da bomba.

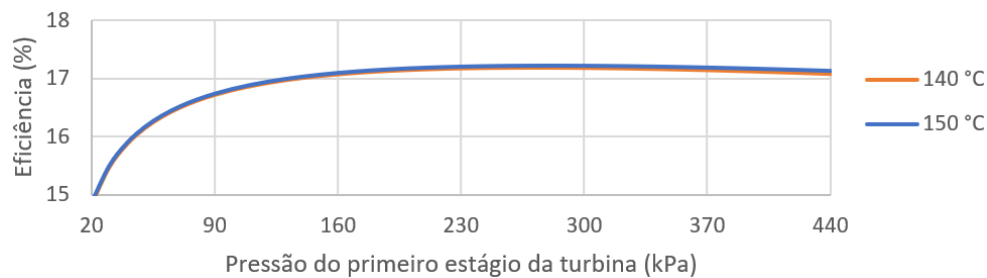


Figura 2 – Eficiência do ciclo de Rankine regenerativo em função da pressão de saída do primeiro estágio da turbina.

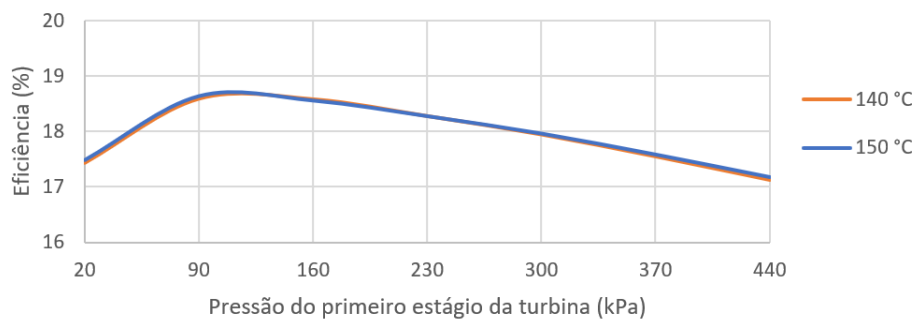


Figura 3 – Eficiência do ciclo de Rankine regenerativo em função da pressão do primeiro estágio da turbina.

Da Figura 3, observa-se que a eficiência do ciclo cresce com o aumento da pressão de saída da turbina, alcançando um valor máximo. Em seguida, com o aumento da pressão de saída da turbina, a eficiência volta a cair. Observando a Figura 3, percebe-se que a eficiência do ciclo atinge um pico de 18,7% a uma pressão de saída do primeiro estágio da turbina a 110 kPa.

3.4. Configuração ótima do ciclo de Rankine

A Figura 4 apresenta uma representação esquemática do ciclo de Rankine em sua configuração ótima (regenerativa) e condições de operação ótimas.

4. Conclusões

Conclui-se que o fluido de trabalho utilizado impacta na eficiência do ciclo (para os compostos estudados nesse trabalho). O benzeno apresentou eficiência de ciclo de 17% para a uma temperatura de saída do aquecedor de 150 °C e pressão de saída da bomba de 450 kPa.

Por fim, a configuração escolhida também impacta na eficiência do ciclo. Para o benzeno, observou-se que a configuração regenerativa apresentava eficiência superior (18,7%)



à eficiência obtida na configuração convencional (em torno de 17%), para as mesmas condições de operação.

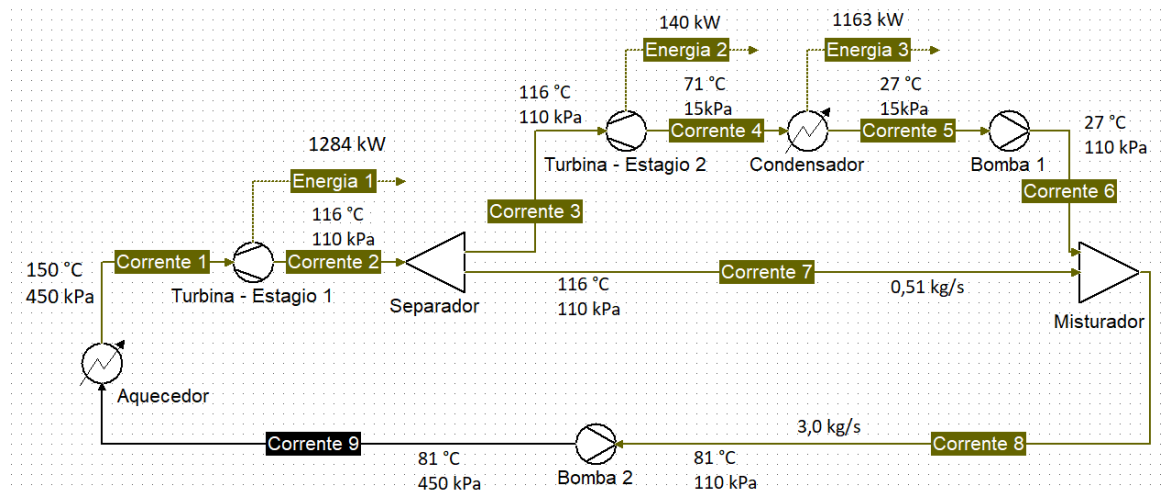


Figura 4 – Ciclo de Rankine em condições ótimas de operação para o benzeno.

5. Referências Bibliográficas

Koretsky, Milo D. 2012. "Engineering and Chemical Thermodynamics", Wiley, 2nd edition, 710 páginas.

CETESB. Disponível em:

https://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha_completa1.asp?consulta=BUTANO

https://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha_completa1.asp?consulta=ISOBUTANO

https://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha_completa1.asp?consulta=PENTANO

https://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha_completa1.asp?consulta=ISOPENTANO

https://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha_completa1.asp?consulta=BENZENO

https://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha_completa1.asp?consulta=TOLUENO Acesso em 29/09/2020, às 17h34

LindeGas

https://www.linde-gas.com/en/products_and_supply/refrigerants/natural_refrigerants/r290_propane/index.html Acesso em 23/09/2020

Inventec

<http://www.smtworldwide.com/wp-content/uploads/2019/02/NovaSpray%E2%84%A2-n-butane.pdf> Acesso em 23/09/2020

Calm JM, Hourahan GC 2011. Physical, safety, and environmental data for current and alternative refrigerants. In: Conference physical, safety, and environmental data for current and alternative refrigerants, Prague, Czech Republic. p. 21e6.

Pinto, Raphael Guimaraes Duarte, 2018. Aplicação de Ciclos de Rankine Orgânicos para Geração de Eletricidade a partir de calor de Processo industrial no Brasil. Tese de Doutorado. COPPE, UFRJ, 333 p.

Bao, J. and Zhao, L. (2013) 'A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier, 24, pp. 325–342. doi: 10.1016/j.rser.2013.03.040.

Hung, T. C., Shai, T. Y. and Wang, S. K. (1996) '98/01752 A review of organic Rankine cycles (ORCs) for the recovery of low-grade waste heat', *Fuel and Energy Abstracts*, 39(2), p. 151. doi: 10.1016/s0140-6701(98)97894-8.

Mahmoudi, A., Fazli, M. and Morad, M. R. (2018) 'A recent review of waste heat recovery by Organic Rankine Cycle', *Applied Thermal Engineering*. Elsevier, 143(July), pp. 660–675. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.07.136.

Pethurajan, V., Sivan, S. and Joy, G. C. (2018) 'Issues, comparisons, turbine selections and applications – An overview in organic Rankine cycle', *Energy Conversion and Management*. Elsevier, 166(October 2017), pp. 474–488. doi: 10.1016/j.enconman.2018.04.058.

Quoilin, S. et al. (2011) 'Thermo-economic optimization of waste heat recovery Organic Rankine Cycles', *Applied Thermal Engineering*. Elsevier Ltd, 31(14–15), pp. 2885–2893. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2011.05.014.

Wei, L. et al. (2019) 'Experimental investigation and performance analysis of an Organic Rankine Cycle for low-temperature heat to electricity generation', *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 14(4), pp. 500–507. doi: 10.1093/ijlct/ctz037.