

ESTUDO EXPERIMENTAL E SIMULAÇÃO DE CICLO DE RANKINE ORGÂNICO USANDO R134A

Richardson Leandro Nunes, eng.richard.nunes@gmail.com¹

Juliana Silva Brasil, julianasbra@gmail.com²

Thalles Coimbra Borba Roldão, thallescbr@gmail.com³

Luben Cabezas Gómez, lubencg@sc.usp.br⁴

Cristiano Bigonha Tibiriçá, bigonha@sc.usp.br⁵

^{1 2 3 4 5}Universidade de São Paulo – Câmpus de São Carlos. Av. Trabalhador São-carlense, 400, Arnold Schmidt. São Carlos – São Paulo – Brasil – CEP 13.566-590

Resumo: O consumo a partir de todas fontes de energia nos últimos 55 anos aumentou 275% no mundo, 494% na América do Sul e Central e 1150% no Brasil. Desta energia consumida, 80% é de origem fóssil (petróleo, gás natural e carvão). Já no Brasil, 80% da energia consumida é renovável, sendo 61% hidrelétrica, 9% eólica, 9% da biomassa e biogás e 1% solar centralizada. O uso majoritário de combustíveis fósseis a nível mundial está diretamente relacionado com as emissões de dióxido de carbono. E este é o principal gás causador do efeito estufa, que gradualmente está aumentando a temperatura média do planeta, uma vez que impede a rejeição do calor acumulado na terra oriundo da radiação solar incidente no planeta. A diminuição do uso de fontes de energia fósseis, o aumento do uso de fontes renováveis de energia e aumento de eficiência energética, desde a geração até o consumo, contribui para a diminuição de emissões de CO₂ e seus efeitos indesejáveis. Sistemas que operam segundo o ciclo de Rankine permitem produzir energia elétrica a partir de fontes térmicas. Tradicionalmente utiliza-se água como fluido de trabalho e fontes de energia de altas temperaturas, acima de 370°C, principalmente caldeiras a vapor de água. O Ciclo de Rankine Orgânico utiliza fluidos orgânicos que possuem temperaturas e pressões de evaporação mais baixas que as da água, permitindo aproveitar o calor de fontes com temperaturas mais baixas (entre 60 e 250 °C) para geração de energia elétrica. No ciclo, o fluido é pressurizado pela bomba para o evaporador, onde aquece a pressão quase constante e se transforma em vapor saturado ou superaquecido. O vapor expande no expansor (turbina, scroll, etc.) produzindo trabalho de eixo e diminuindo a entalpia. Por fim, é condensa no condensador a pressão praticamente constante, retornando à bomba. O objetivo principal deste trabalho é a modelagem termodinâmica e a realização de medições experimentais de um sistema operando segundo um ciclo Rankine orgânico (ORC) com R134a. O comportamento termodinâmico do ciclo foi simulado computacionalmente através do modelo do Ciclo de Rankine Ideal, registrando os pontos entre cada processo do ciclo. Obteve-se resultados para pressões de operação de 14 a 19 bar, temperaturas do vapor de 55°C a 77°C e vazões mássicas de 30 a 71kg/h. Os resultados experimentais mostram que a bancada tem capacidade de simular uma boa faixa de operação.

Palavras-chave: ciclo de Rankine Orgânico, Energia Renovável, Combustíveis alternativos, R134a, Experimental.

1. INTRODUÇÃO

A população mundial e a produção mundial de bens está crescendo e vai continuar pelas próximas décadas (International Energy Agency, 2016). Isto levará a uma maior necessidade de energia e produzirá maiores emissões de CO₂ na atmosfera, esta que é considerada a maior causa do aquecimento global. Diante dessa situação, é desejável o desenvolvimento de tecnologias e ações que possam minimizar a utilização de combustíveis fósseis e aumentar a participação de fontes renováveis na matriz de energia mundial.

O Ciclo de Rankine Orgânico é uma tecnologia promissora neste cenário. O Ciclo de Rankine utiliza comumente água como fluido de trabalho em caldeiras a vapor em temperaturas de 370°C ou mais. O caso particular de Ciclo de Rankine Orgânico utiliza fluidos orgânicos, que possui temperaturas de evaporação mais baixas do que a água, possibilitando gerar eletricidade a partir de fontes de energia térmicas com temperaturas de 60°C até 250°C (Viklund e Johansson, 2014), sendo a geotérmica e a solar algumas delas. O Ciclo de Rankine funciona produzindo trabalho a partir do calor transferido entre uma fonte de calor mais quente e outra mais fria, utilizando quatro componentes principais: a bomba, o condensador, o evaporador e o expansor, que influem diretamente no desempenho do ciclo na geração de energia. A primeira definição no ciclo é a o tipo da fonte de calor e a temperatura, que determina a máxima temperatura de evaporação do ciclo. A segunda definição é o fluido de trabalho que melhor vai se adaptar a faixa de temperatura do ciclo. A escolha do fluido vai interferir em algumas variáveis do ciclo, tais como pressão de evaporação, pressão de condensação, dimensões dos equipamentos que dependem do volume específico, etc.

A performance do ciclo também depende dos equipamentos, sendo o expensor o mais significativo. O expensor pode ser de vários tipos: scroll, turbina, vários de tipos de compressores conectados de forma invertida. A turbina geralmente é o tipo mais comum.

Dependendo da aplicação do ciclo, o objetivo pode ser a otimização térmica, ou a eficiência exergética (Maraver *et al*, 2014), ou até mesmo a potência líquida produzida. Os parâmetros do ciclo podem ser simulados numericamente (Wang *et al*, 2012) e analiticamente (Li *et al*, 2016) para atingir estes objetivos, assim como também experimentalmente (Hijriawan *et al*, 2021).

Geralmente os métodos de simulação numérica são relacionados à solução numérica de conservação da massa e da energia termodinamicamente a partir dos volumes de controle. Neste método são utilizados volumes de controle para representar os vários componentes do ciclo e assume-se uniformidade nas propriedades termodinâmicas e regime permanente. O objetivo desta abordagem é calcular as propriedades nos estados termodinâmicos nos vários pontos de entrada e saída dos componentes do ciclo e calcular, a partir destas propriedades, os parâmetros de performance (taxas de troca de calor, potência consumida e gerada, eficiências dos componentes). Esta abordagem foi muito utilizada nas pesquisas de ORC nas aplicações de recuperação de energia térmica (Zhou *et al*, 2013), de energia solar (Wang *et al*, 2010) e de cogeração (Anvari *et al*, 2016).

Os modelos analíticos buscam calcular vários parâmetros como eficiência térmica, taxas de transferência de calor e potências consumida e gerada de uma maneira direta e simplificada evitando códigos complexos de simulação e calculando curvas de performance. Estes modelos utilizam volumes de controle mas assumem algumas condições para simplificar os cálculos. Tais simplificações geralmente são considerar propriedades termodinâmicas constantes, ou processos ideais, ou até mesmo combinação de processos ideais, utilizando dados obtidos em ciclos reais (Li *et al*, 2016). Mesmo sendo mais simples do que modelos numéricos, os modelos analíticos são excelente métodos para prever o desempenho dos ciclos.

Esta pesquisa consiste em operar uma bancada experimental completa construída para simular várias condições de trabalho do ciclo de Rankine variando as temperaturas, pressões, vazões, nos vários pontos de medição e calcular os parâmetros de performance.

2. MODELAGEM DO CICLO

As equações de modelagem do ciclo são utilizadas essencialmente nos processos que ocorrem nos equipamentos utilizados, como indicado a seguir.

Na bomba calcula-se o trabalho introduzido no ciclo:

$$\dot{W} = \dot{m} \cdot (i_2 - i_1) = \frac{\dot{m} \cdot (i_{2s} - i_1)}{\eta_b} \quad (1)$$

Calcula-se a troca de calor que ocorre no evaporador:

$$\dot{Q}_e = \dot{m} \cdot (i_3 - i_2) \quad (2)$$

No expensor, calcula-se o trabalho mecânico produzido:

$$\dot{W}_t = \dot{m} \cdot (i_3 - i_{4s}) \cdot \eta_t \quad (3)$$

No condensador ocorre a troca de calor do fluido com o sumidouro.

$$\dot{Q}_c = \dot{m} \cdot (i_4 - i_1) \quad (4)$$

Para cálculo do desempenho do ciclo utiliza-se principalmente a eficiência térmica do ciclo pela primeira lei da termodinâmica e a eficiência térmica do ciclo pela segunda lei da termodinâmica (pela exergia). (BRAIMAKIS *et al*, 2015).

A razão entre a potência líquida gerada e a potência fornecida para o ciclo, define a eficiência pela primeira lei da termodinâmica.

$$\eta_{térmica} = (\dot{W}_{turbina} - \dot{W}_{bomba}) / \dot{Q}_e \quad (5)$$

A eficiência de Carnot para um ciclo que funciona entre dois reservatórios térmicos, sendo um de alta temperatura T_{quente} e outro de baixa temperatura T_{frio} é dada pela equação.

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_{frio}}{T_{quente}} \quad (6)$$

LECOMPTE *et al.*, 2015, afirma que a equação anterior não é representativa para o cálculo da eficiência no caso de uma fonte térmica de capacidade finita, mostrada na Figura 1, de modo que a eficiência do ciclo de Carnot acoplado a esta fonte, recupera uma fração de calor, dada por

$$\eta_{frac,Carnot} = \frac{T_{quente} - T_2}{T_{quente} - T_{frio}} \quad (7)$$

Assim, a eficiência deste ciclo de Carnot reversível é

$$\eta_{Carnot}^* = \eta_{frac,Carnot} \cdot \eta_{Carnot} = \frac{T_{quente} - T_2}{T_{quente} - T_{frio}} \cdot \left(1 - \frac{T_{frio}}{T_2}\right) \quad (8)$$

A máxima eficiência teórica do ciclo pode ser obtida derivando a equação anterior em relação à T_2 e igualando a zero.

$$\eta_{Carnot,max}^* = 1 - \sqrt{\frac{T_{frio}}{T_{quente}}} \quad (9)$$

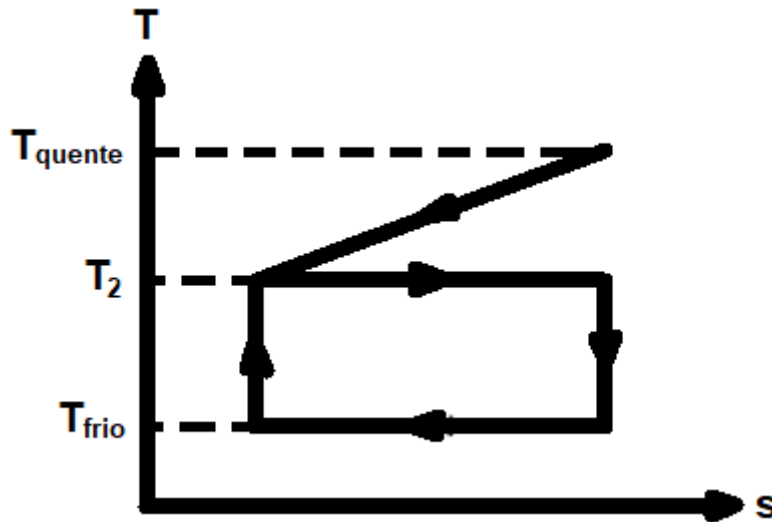


Figura 1. Ciclo de Carnot com fonte de capacidade finita.

Contudo, a eficiência térmica considera somente a primeira lei da termodinâmica. Considerando o balanço de energia e não considerando a qualidade da energia e o potencial desta para gerar trabalho. Assim, pode-se adotar a eficiência baseada na segunda lei da termodinâmica. A eficiência exergética é o parâmetro mais adequado para comparar a performance termodinâmica de sistemas térmicos de potência.

A eficiência térmica do ciclo fica então

$$\epsilon_{exergia} = \frac{\text{energia recuperada}}{\text{energia fornecida}} = \frac{\dot{W}_{turbina} - \dot{W}_{bomba}}{\dot{E}_s} \quad (10)$$

$$\dot{E}_s = \left(1 - \frac{T_0}{T_s}\right) \cdot \dot{Q}_e \quad (11)$$

A equação 2.12 combina as equações 2.10 e 2.11 e mostra que a eficiência exergética pode ser entendida como uma medida proporcional à eficiência de Carnot. Ou seja, uma eficiência exergética de 100% aconteceria se a eficiência térmica fosse igual à eficiência de Carnot.

$$\epsilon_{exergia} = \frac{W_{turbina} - W_{bomba}}{\left(1 - \frac{T_0}{T_s}\right) \cdot \dot{Q}_e} = \frac{\eta_{térmica}}{\eta_{Carnot}} \quad (12)$$

Da mesma forma, a equação 2.09 mostra uma eficiência de Carnot modificada, de modo que a medida de quão perto a eficiência do ciclo fica da eficiência modificada de Carnot, é

$$\epsilon_{exergia}^* = \frac{\eta_{térmica}}{\eta_{Carnot,max}^*} \quad (13)$$

3. APARATO EXPERIMENTAL

Atualmente a bancada encontra-se completa e em condições de operação para simulação experimental de pontos do fluxograma de processo. Pode-se determinar a temperatura de entrada, pressão de entrada e vazão, e obter valores de saída para estas variáveis. Na Figura 2 é apresentada uma foto do aparato experimental e na Figura 3 o fluxograma de processo. O sistema da bancada possui os equipamentos descritos a seguir.

- Tanque pulmão: reservatório de fluido saturado que minimiza efeitos de variação de volume e pressão.
- Condensador: garante que o fluido que retorna do expensor seja resfriado para o estado saturado líquido/vapor.
- Sub-resfriador: garante que o fluido está completamente no estado líquido ao entrar na bomba.
- Medidor de vazão: mede a vazão mássica do fluido e registra as condições de entrada.
- Bomba de fluido: controla a vazão mássica e a pressão do fluido.
- Pré-aquecedor: recurso opcional para aumento de eficiência térmica do ciclo devido ao aproveitamento de energia da troca térmica do próprio fluido que retorna do expensor.
- Evaporador: transmite a energia térmica proveniente da fonte quente para o sistema, com capacidade para gerar vapor saturado ou vapor superaquecido.
- Expensor: permite obter dados de eficiência e desempenho através das condições de saída do fluido.
- Tanque de água fria: tanque com conexões para ser conectado ao sub-resfriador e ao condensador, possui controle de temperatura.
- Tanque de água quente: tanque com conexões para ser conectado ao evaporador, possuindo controle de temperatura.
- Bomba de água fria: circula a água fria do tanque para o condensador e para o sub-resfriador.
- Bomba de água quente: circula a água quente do tanque para o evaporador.
- Válvulas: utilizadas para operação e manutenção do sistema.
- Instrumentos conectados em vários pontos, monitorados e controlados via um computador para operação do sistema.



Figura 2. Aparato experimental.

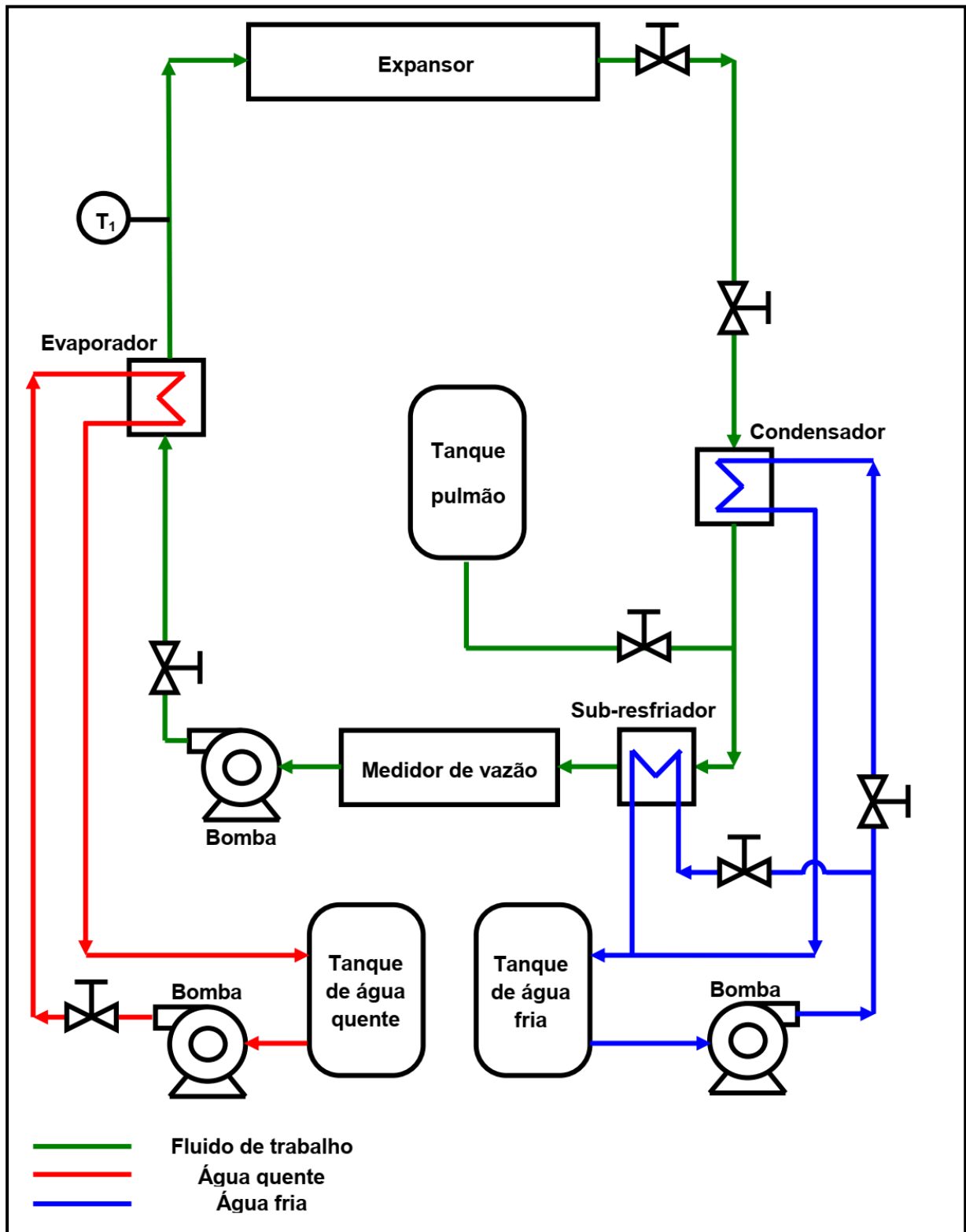


Figura 3. Fluxograma de processo da bancada experimental.

4. RESULTADOS

Os resultados obtidos na bancada experimental estão resumidos na Tabela 1. As figuras 4,5,6 e 7 exibem os resultados experimentais em um diagrama de temperatura por entropia.

Tabela 1. Resultados dos testes.

Informações	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7	Teste 8
T_4 [°C]	55	57	68	63	68	73	77	77
P_4 [Bar]	13	15	19	12	12	13	19	13
$\dot{m}$ [kg/h]	71	34	30	30	40	40	40	40
T_{quente} [°C]	60	62	75	70	73	78	82	82
T_{frio} [°C]	15	15	15	15	15	15	15	15
Eficiência térmica $\eta_{térmica}$	5,7%	7,0%	10,4%	6,1%	5,1%	5,4%	9,0%	5,6%
Eficiência Exergética $\epsilon_{exergia}^*$	57,73%	66,2%	76,3%	48,8%	37,8%	41,3%	59,7%	37,0%

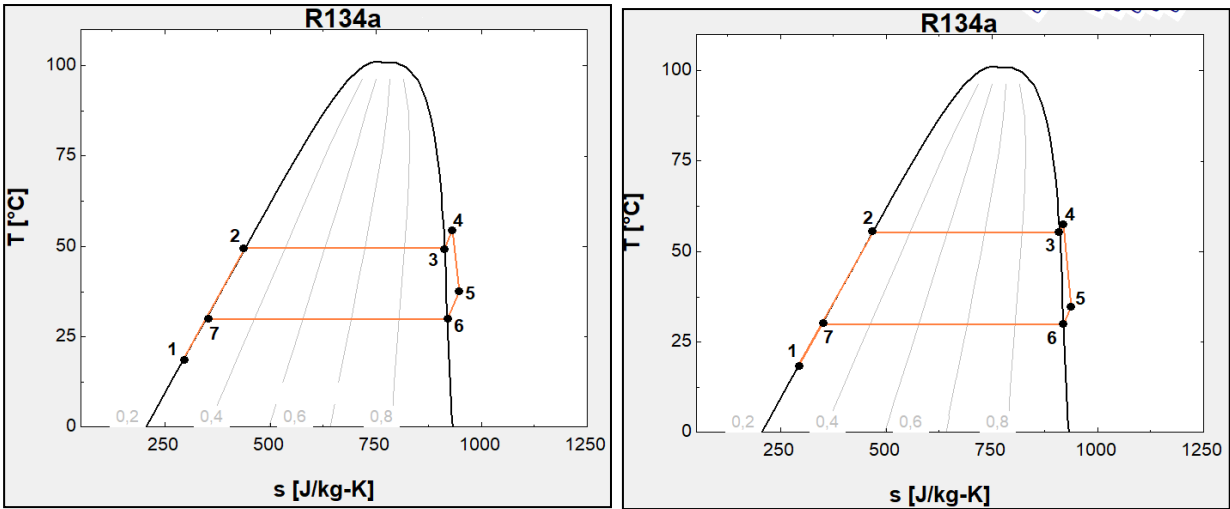


Figura 4. Resultados dos testes 1 (esquerda) e 2 (direita).

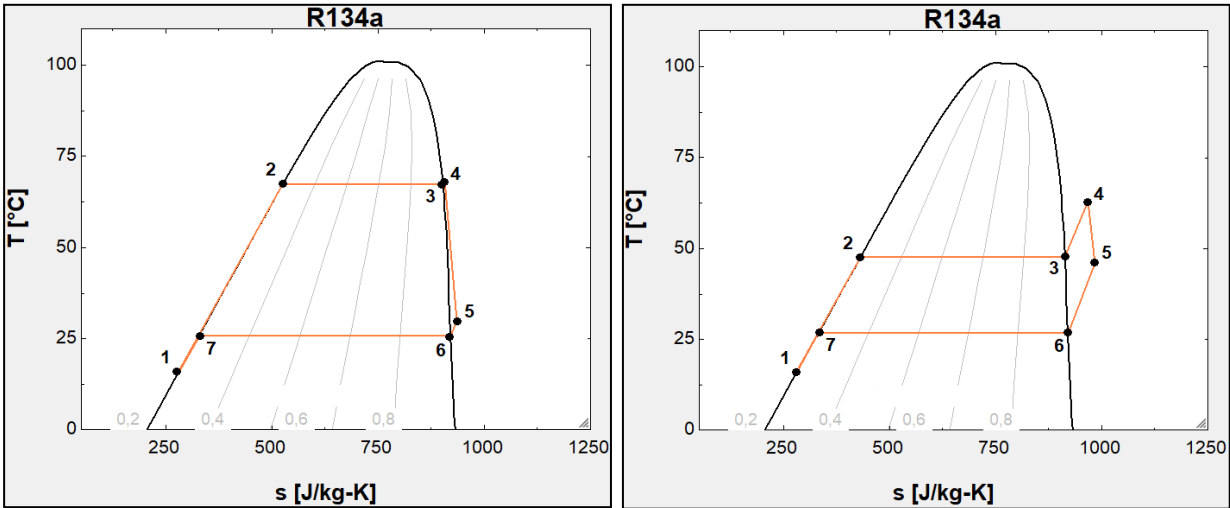


Figura 5. Resultados dos testes 3 (esquerda) e 4 (direita).

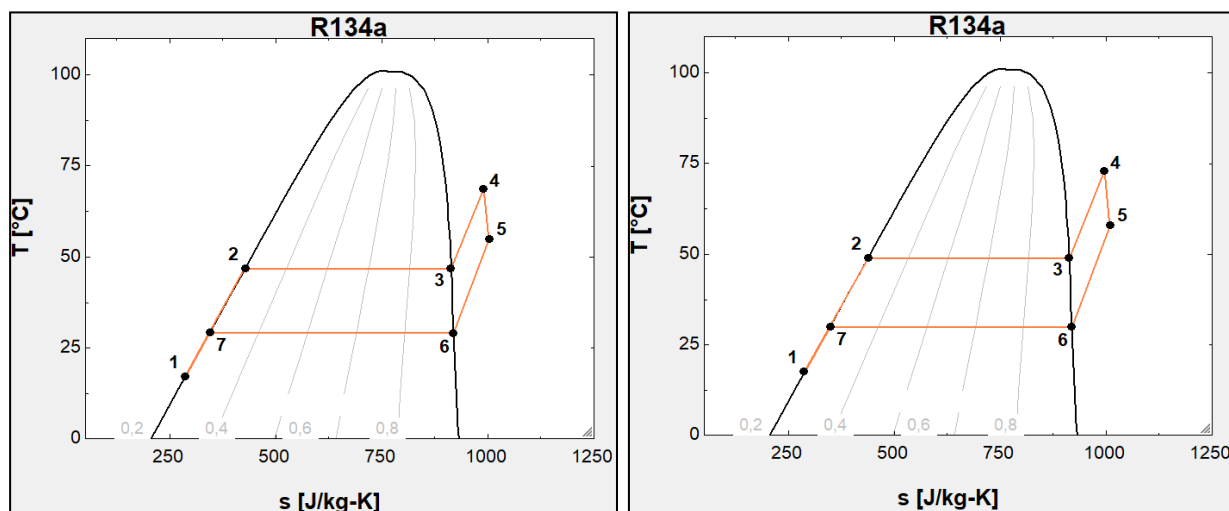


Figura 6. Resultados dos testes 5 (esquerda) e 6 (direita).

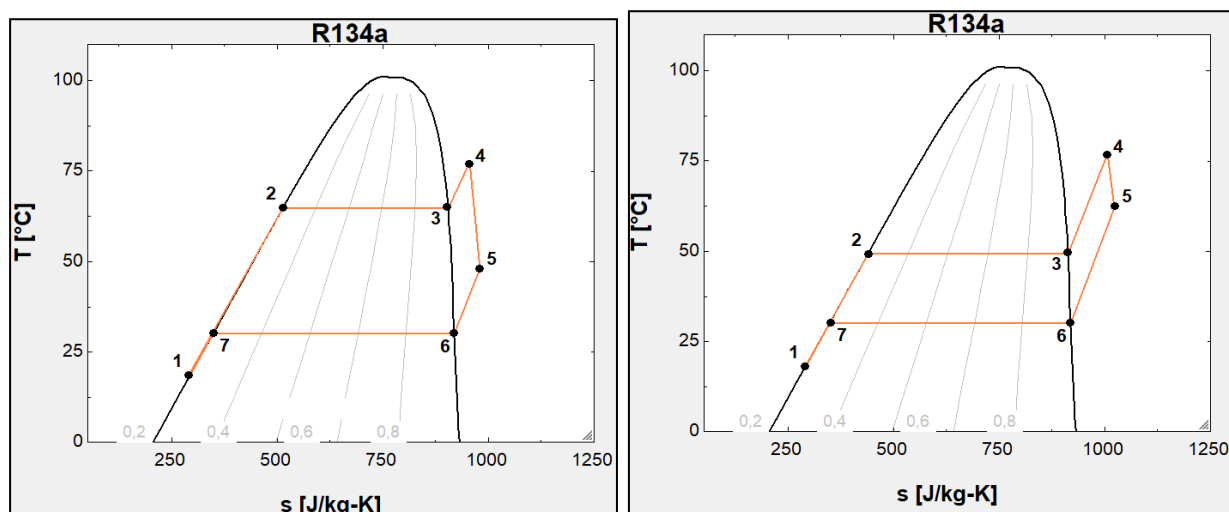


Figura 7. Resultados dos testes 7 (esquerda) e 8 (direita).

5. DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Foram obtidos resultados para pressões de operação de 12 a 19 bar, temperaturas do vapor de 55°C a 77°C e vazões mássicas de 30 a 71kg/h. As eficiências térmicas do ciclo foram obtidas de 5,1% a 10,4%. As eficiências exergéticas obtidas foram de 37,0% a 76,3%. Os resultados experimentais mostram que a bancada tem capacidade de simular uma boa faixa de operação. Também se percebe que, ao analisar as eficiências através da exergia, que o ciclo do teste 5 possui a menor eficiência térmica de 5,1%, porém é o teste 8 que tem a menor eficiência exergética. Isso demonstra a importância de fazer esta análise que explora o resultado do ciclo em relação ao seu potencial máximo ao invés de simplesmente calcular sua eficiência térmica.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos para a CAPES e FAPESP pela concessão de bolsas e pelo financiamento da construção da bancada experimental.

7. REFERÊNCIAS

- Anvari S, Jafarmadar S, Khalilarya S. Proposal of a combined heat and power plant hybridized with regeneration organic Rankine cycle: energy-Exergy evaluation. *Energy Convers Manage* 2016;122:357–65. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.06.002>
- Bao, J., Zhao, L., A review of working fluids and expander selections for organic Rankine cycles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 24, p. 325-342, 2013.
- Churchill SW. Friction-factor equation spans all fluid-flow regimes. *Chem Eng* 1977;84:91–2.
- Chen, H., Goswami, D. Y., Stefanakos, E. K., A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion low-grade heat. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 14, p. 3059-3067, 2010.
- Clemente S, Micheli D, Reini M, Taccani R. Bottoming organic rankine cycle for a small scale gas turbine: a comparison of different solutions. *Applied Energy* 2013;106:355–64
- Hettiarachchi HDM, Golubovic M, Worek WM, Ikegami Y. Optimum design criteria for an organic rankine cycle using low-temperature geothermal heat sources. *Energy* 2007;32:1698–706.
- International Energy Agency. *Energy, climate change & environment*. 2016. Paris, France, 2016.
- Lecompte, S., Huisseune, H., van den Broek, M., Vanslambrouck, B., De Paepe, M., 2015. “Review of organic Rankine cycle (ORC) architectures for waste heat recovery”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 47, p. 448-461. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.089>
- Li M, Zhao B. Analytical thermal efficiency of medium-low temperatures organic Rankine cycles derived from entropy-generation analysis. *Energy* 2016;106: 121–30. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.054>
- Maraver D, Royo J, Lemort V, Quoilin S. Systematic optimization of subcritical and transcritical organic Rankine cycles (ORCs) constrained by technical parameters in multiple applications. *Appl Energy* 2014;117:11–29. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.11.076>
- Hijriawan M., Pambudi N. A., Wijayanto D. S., Biddinika M. K., Saw L. H.. Experimental Analysis of R134a working fluid on Organic Rankine Cycle (ORC) systems with scroll expander. *Engineering Science and Technology, an International Journal* 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.16.016>.
- Moustapha H, Zelesky MF, Baines NC, Japikse D. *Axial and radial turbines*. 1st ed. White River Junction: Concepts NREC; 2003.
- Rahbar, K., Mahmoud, S., Al-Dadah, R. K., Moazami, N. modelling and optimization of Rankine Cycle based on a small-scale radial inflow turbine. *Energy conversion and management*, v. 91, p. 186-198, 2014.
- Viklund SB, Johansson MT. Technologies for utilization of industrial excess heat: Potentials for energy recovery and CO2 emission reduction. *Energy Convers Manage* 2014;77:369–79. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.09.052>
- Wang E, Zhang H, Fan B, Wu Y. Optimized performances comparison of organic Rankine cycles for low grade waste heat recovery. *J Mech Sci Technol* 2012;26 (8):2301–12. <https://doi.org/10.1007/s12206-012-0603-4>
- Whitfield A, Baines NC. *Design of radial turbomachines*. 1st ed. New York: Longman; 1990.
- Zhou N., Wang X., Chen Z., Wang Z., Experimental study on organic Rankine cycle for waste heat recovery from low-temperature Fl Ue gas, *Energy* 55 (2013) 216–225, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.03.047>.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

EXPERIMENTAL STUDY AND SIMULATION OF ORGANICA RANKINE CICLE USING R134A

Richardson Leandro Nunes, eng.richard.nunes@gmail.com¹

Juliana Silva Brasil, julianasbra@gmail.com²

Thalles Coimbra Borba Roldão, thallescbr@gmail.com³

Luben Cabezas Gómez, lubencg@sc.usp.br⁴

Cristiano Bigonha Tibiriçá, bigonha@sc.usp.br⁵

^{1 2 3 4 5} Universidade de São Paulo – Campus de São Carlos. Av. Trabalhador São-carlense, 400, Arnold Schmidt. São Carlos – São Paulo – Brasil – CEP 13.566-590

Abstract: Consumption from all energy sources in the last 55 years has increased by 275% worldwide, 494% in South and Central America and 1150% in Brazil. 80% of this energy is fossil (oil, natural gas and coal). In Brazil, 80% of the energy consumed is renewable, being 61% hydroelectric, 9% wind, 9% biomass and biogas and 1% centralized solar. The use of fossil fuels worldwide is directly related to carbon dioxide, which is the main cause of greenhouse effect. This is gradually increasing the temperature of the planet by retaining more heat accumulated in the earth from the solar radiation incident on the planet. The decrease in the use of fossil energy sources, the increase in the use of renewable energy sources and increase in energy efficiency, from generation to consumption, contributes to the reduction of carbon dioxide emissions and its undesirable effects. Systems that operate according to the Rankine cycle allow the production of electrical energy from thermal sources. Traditionally, water is used as a working fluid and high temperature energy sources, above 370°C, mainly steam boilers. The Organic Rankine Cycle (ORC) uses organic fluids that have temperatures and evaporation pressures between 60° and 250°C, allowing the use of heat from sources with lower temperatures to generate electricity. In the cycle, the fluid is pressurized by the pump to the evaporator, where it heats at almost constant pressure and turns into saturated or superheated vapor. The vapor expands in the expander (turbine, scroll, etc.) producing shaft work and decreasing enthalpy. Finally, it condenses in the condenser at practically constant pressure, returning to the pump. The main objective of this work is the thermodynamic modeling and the accomplishment of experimental measurements of a system operating according to an organic Rankine cycle (ORC) with R134a. The thermodynamic behavior of the cycle was computationally simulated through the Ideal Rankine Cycle model, "calculating the thermodynamic states" between each process of the cycle "and the resulting performance characteristics". "Simulation and experimental ????" results were obtained for operating pressures from 14 to 19 bar, vapor temperatures from 55°C to 77°C and mass flow rates from 30 to 71kg/h. The "results" show that the experimental "workbench" "is working properly in a wide operating conditions range

Keywords: Organic Rankine Cycle, renewable energy, alternative fuel