

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

ANÁLISE EXERGÉTICA DE UM CICLO RANKINE ORGÂNICO OPERANDO COM TOLUENO PARA RECUPERAÇÃO DE CALOR EM UMA USINA TERMELÉTRICA

Diego Luís Izidoro Silva, diegolisilva@live.com¹
Victor Andrés Patiño Mantilla, victor_pama@hotmail.com¹
Júlian Camilo Restrepo Lozano, jcrestrepol@hotmail.com¹
Osvaldo José Venturini, osvaldo@unifei.edu.br¹
José Carlos Escobar Palacio, jocesobar@unifei.edu.br¹

¹Universidade Federal de Itajubá, Avenida BPS, 1303, Pinheirinho, Itajubá-Minas Gerais, Brasil

Resumo: Devido à mudança climática atual produzida em parte pelas altas emissões de monóxido e dióxido de carbono, produtos da combustão de combustíveis fósseis, tem-se adotado diferentes estratégias as quais procuram aumentar a eficiência dos sistemas de conversão de energia. Um dos exemplos disto são as usinas térmicas de ciclo combinado, baseadas em turbinas a gás e a vapor. Operando separadamente, as turbinas a gás e os ciclos a vapor alcançam eficiências médias em torno de 35 a 40%. No entanto, a combinação destes dois sistemas para a geração de eletricidade a partir da queima de um único combustível pode alcançar eficiências de até 60%. Apesar do elevado valor de eficiência comparado com outros sistemas, as usinas termelétricas de ciclo combinado possuem pontos de dissipação de calor em todo o processo os quais diminuem a eficiência geral do ciclo e que se localizam principalmente em trocadores de calor que compõem o sistema e também nos gases de escape. A maneira mais eficiente de se converter esse calor em eletricidade é por meio do uso de fluidos orgânicos em um ciclo rankine (ORC). Entre as vantagens no uso de sistemas ORC estão: melhor aproveitamento dos recursos energéticos, redução do porte dos sistemas, redução das emissões de poluentes e a possibilidade de redução do custo da energia gerada. Neste trabalho, um ciclo Rankine orgânico utilizando tolueno é utilizado. Para avaliar o sistema é realizada uma análise exergética a fim de caracterizar as irreversibilidades presentes nos processos do ciclo. Os resultados mostram que a eficiência exergética máxima é alcançada para a maior pressão de evaporação admitida e vale 43,92%. Ao avaliar a quantidade de exergia perdida por equipamento em relação a perda total do ciclo, observa-se que mais de 60% das perdas acontecem no evaporador e outros 25% na turbina.

Palavras-chave: análise exergética, ciclo Rankine orgânico, conversão de energia, eficiência.

1. INTRODUÇÃO

Apesar do elevado valor de eficiência comparado com outros sistemas, as usinas termelétricas de ciclo combinado possuem pontos de dissipação de calor em todo o processo, principalmente em trocadores de calor que compõem o sistema e também nos gases de escape. O calor desses pontos pode ser aproveitado para incrementar ainda mais a eficiência global das plantas.

A tecnologia de referência para converter o calor em eletricidade é o ciclo Rankine convencional. No entanto, o calor dissipado na maioria dos processos industriais e de geração de energia elétrica (incluindo as plantas de ciclo combinado) é de baixa qualidade. Isto significa que os fluxos mássicos que contém este calor estão a temperaturas e pressões não muito elevadas. Para esse tipo de situação, o ciclo Rankine convencional não é adequado.

A maneira mais eficiente de se converter o calor de baixa qualidade em eletricidade é por meio do uso de fluidos orgânicos ao invés do vapor de água, principalmente, devido à diferença entre o calor latente de evaporação do fluido orgânico e o da água (Schuster, Karellas, and Aumann 2010). Assim, a tecnologia a ser empregada neste caso é o ciclo Rankine orgânico (ORC).

Entre as vantagens no uso de sistemas ORC estão: melhor aproveitamento dos recursos energéticos, redução do porte dos sistemas, redução das emissões de poluentes e a possibilidade de redução do custo da energia gerada (Desai and Bandyopadhyay 2009).

Por meio do ORC é possível recuperar uma parcela considerável do calor residual nas usinas termelétricas e aproveitá-lo para geração de energia elétrica adicional. Para analisar quantitativamente o sistema e identificar os valores de potência gerada e eficiência alcançada é necessária uma análise de energia.

A análise de energia é o método mais comumente usada para avaliação dos processos de conversão de energia. No entanto, existem algumas limitações inerentes, como a não caracterização da qualidade da energia e das irreversibilidades dos processos. Em contraste, a análise de exergia é capaz de avaliar esses aspectos e caracterizar o potencial de geração trabalho dos sistemas (Safarian and Aramoun 2015). A análise exergetica se mostra como uma ferramenta mais poderosa para os ciclos do que a análise de energia devido ao fato de que ela ajuda a determinar a verdadeira magnitude das perdas, suas causas e as localizações no ciclo (Kaşka 2014).

Assim, neste trabalho uma análise exergetica de um ciclo Rankine orgânico é realizada. O ciclo em questão opera com tolueno como fluido de trabalho e foi proposto para recuperar o calor residual de uma das extrações de uma turbina a gás Siemens-Westinghouse W501F em funcionamento na termelétrica Uruguaiana, no estado do Rio Grande do Sul, Brasil.

2. CICLO RANKINE ORGÂNICO

O ciclo de potência a vapor de Rankine é um dos vários ciclos que foram desenvolvidos para geração de energia. William John Macquorn Rankine foi um engenheiro escocês que, juntamente com Rudolph Clausius e William Thomson desenvolveram a base científica deste ciclo (Tchanche, Pétrissans, and Papadakis 2014).

O ciclo Rankine orgânico (ORC) possui a mesma configuração do ciclo Rankine convencional, mas ao invés de água, usa substâncias orgânicas com baixos pontos de ebulição como fluidos de trabalho (Bao and Zhao 2013).

A configuração básica do ORC consiste de quatro equipamentos principais: bomba, evaporador (ou gerador de vapor), turbina (ou expansor) e condensador. A figura 1 mostra um esquema com os principais componentes do ciclo.

O seu princípio de funcionamento consiste na captura da energia térmica de uma fonte de calor através da evaporação do fluido de trabalho e a redução de entalpia deste fluido em um expansor onde se produz trabalho mecânico, que é transformado em eletricidade por um gerador elétrico (Peris *et al.* 2015).

Similarmente ao ciclo Rankine convencional, no ORC o fluido de trabalho passa por quatro processos (Desai and Bandyopadhyay 2009):

- (a) Processo 1-2: aumento da pressão do fluido de trabalho por uma bomba;
- (b) Processo 2-3: adição de calor pressão constante e a alta temperatura no evaporador;
- (c) Processo 3-4: expansão a alta temperatura e alta pressão na turbina (expansor);
- (d) Processo 4-1: rejeição de calor a pressão constante a baixa temperatura no condensador.

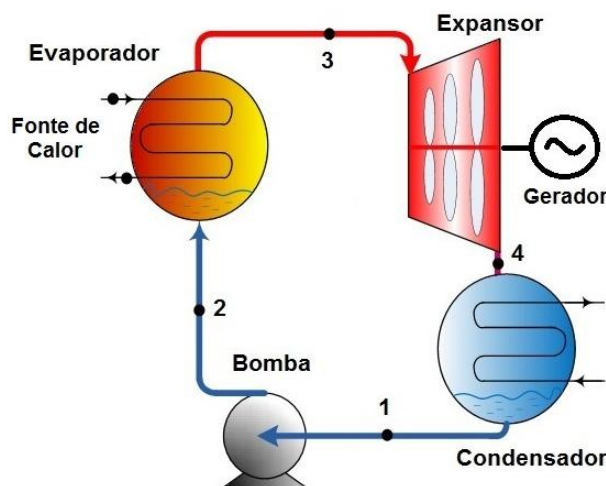


Figura 1. Ciclo Rankine orgânico

Fonte: (Xi *et al.* 2015)

Os ciclos Rankine orgânicos podem utilizar diferentes fluidos de trabalho, a fim de explorar as fontes de calor para produzir trabalho útil (Vaja and Gambarotta 2010). A seleção de fluido de trabalho é muito importante para o desempenho do ORC, uma vez que influencia diretamente a eficiência do sistema, o tamanho e concepção dos componentes, a estabilidade, a segurança, os impactos ambientais (Schuster *et al.* 2009), as condições gerais de funcionamento e a viabilidade econômica (Chen, Goswami, and Stefanakos 2010). A eficiência térmica geralmente é adotada como critério principal (Long *et al.* 2014).

Além da configuração básica de ORC (fig.1), várias outras configurações para a utilização de baixas e médias fontes de temperatura são discutidas na literatura (Meinel, Wieland, and Spliethoff 2014). O ORC com recuperação é uma configuração muito utilizada devido à melhor eficiência térmica em comparação com o ORC básico (Feng *et al.* 2015). Basicamente, este tipo de ciclo é benéfico para fluidos secos, devido à grande quantidade de calor que pode ser recuperada

(Meinel, Wieland, and Spliethoff 2014). A figura 2 mostra uma comparação entre os modelos esquemáticos e dos ciclos básico e com recuperação.

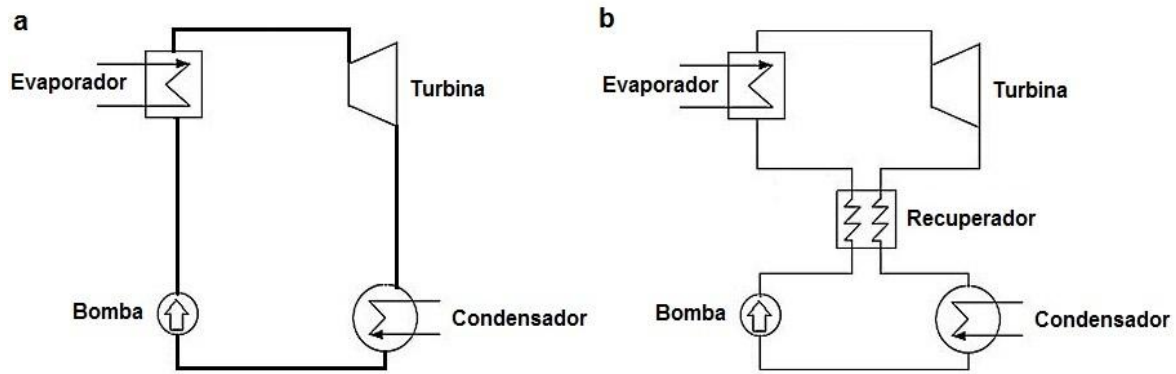


Figura 2. Modelos do ORC (a) básico e (b) com recuperação
Fonte: (Vivian, Manente, and Lazzaretto 2015)

3. METODOLOGIA

O ponto analisado para recuperação de calor no ciclo combinado trata-se de um fluxo de ar quente das extrações dos compressores destinado ao resfriamento dos rotores das turbinas a gás. A seguir são mostrados os principais parâmetros termodinâmicos deste fluxo:

- a) Vazão mássica: 38,165 kg/s
- b) Temperatura: 411 °C
- c) Pressão: 1657,22 kPa

Para a simulação do ORC, o fluido tolueno foi selecionado devido às suas características termodinâmicas e maiores valores de eficiência obtidos em trabalhos anteriores. Quanto a configuração do ORC, decidiu-se analisar a configuração com recuperação (fig. 2b). Foram assumidos os seguintes pressupostos gerais e condições de contorno:

- O sistema foi considerado com fluxo constante em regime permanente;
- As quedas de pressão nos trocadores de calor e tubulações foram desprezadas (as variações de pressão são admitidas apenas na turbina e na bomba);
- As variações de energia cinética e potencial foram desprezadas;
- As eficiências isentrópicas da bomba e da turbina foram assumidas como 90% e 70%, respectivamente;
- As efetividades dos trocadores de calor (evaporador, condensador e recuperador), foram assumidas como 80%;
- A temperatura de condensação (T_{con}) mínima foi definida como 35°C;
- A pressão de condensação (P_{con}) mínima para os fluidos foi definida como 5 kPa;
- O *pinch point* (ΔT_{pp}) mínimo admitido para o evaporador foi de 10°C, para o recuperador, 10°C e para o condensador, 5°C;
- Água é utilizada com fluido de resfriamento no condensador.
- A temperatura de entrada no condensador foi admitida em 25°C;
- A temperatura máxima de evaporação do tolueno foi definida em 300°C;
- A temperatura de referência para o cálculo da exergia foi definida em 298 K.
- O fluido deixa o condensador no estado de líquido saturado, o fluido sai do evaporador no estado de vapor saturado.

Para a análise exérgica, as eficiências exérgicas em cada equipamento foram calculadas através das equações 1 a 8. Primeiramente se calcula a exergia específica (e) para cada ponto do ciclo e em seguida se calcula as eficiências exérgicas (ε) para cada equipamento (evaporador, condensador, recuperador, bomba e turbina). Para a bomba e a turbina, calcula-se também a potência líquida (W). Por fim, calcula-se a eficiência exérgica total do ciclo.

$$e = h - T_0 s \quad (1)$$

$$\varepsilon_{evap} = \frac{\dot{m}_{tolueno}(e_{sai} - e_{ent})}{\dot{m}_{ar}(e_{ent} - e_{sai})} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{cond} = \frac{\dot{m}_{\text{agua}}(e_{sai} - e_{ent})}{\dot{m}_{\text{tolueno}}(e_{ent} - e_{sai})} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{recup} = \frac{(e_{sai,1} - e_{ent,1})}{(e_{ent,2} - e_{sai,2})}$$

$$\varepsilon_{bomb} = \frac{\dot{m}_{\text{tolueno}}(e_{sai} - e_{ent})}{\dot{W}_{bomb}} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{turb} = \frac{\dot{W}_{turb}}{\dot{m}_{\text{tolueno}}(e_{ent} - e_{sai})} \quad (5)$$

$$\dot{W}_{bomb} = \dot{m}_{ft}(h_{ent} - h_{sai}) \quad (6)$$

$$\dot{W}_{turb} = \dot{m}_{ft}(h_{ent} - h_{sai}) \quad (7)$$

$$\varepsilon_{total} = \frac{\dot{W}_{turb} - \dot{W}_{bomb}}{\dot{m}_{ar}(e_{ent} - e_{sai})} \quad (8)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As simulações do ORC com tolueno foram realizadas para diferentes pressões de evaporação. A figura 3 mostra a variação das eficiências exergéticas de cada equipamento para as diferentes pressões utilizadas.

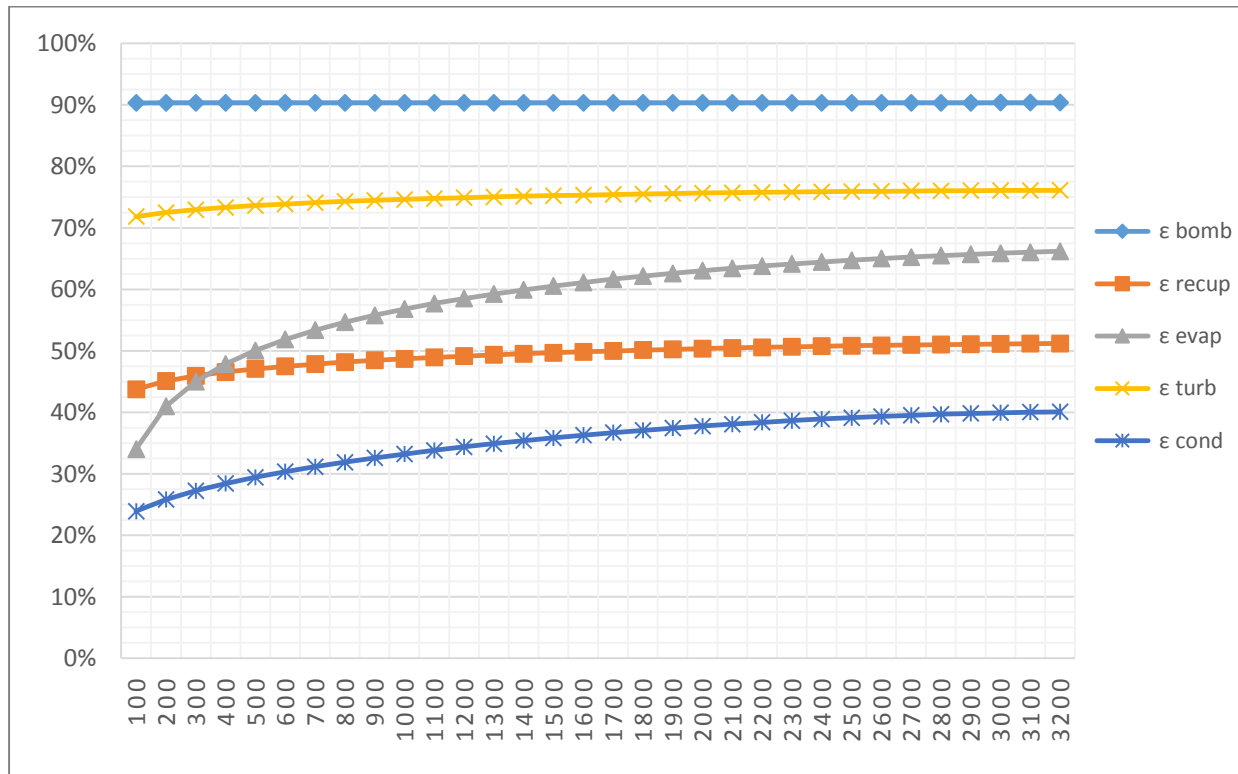


Figura 3. Eficiências exergéticas para cada equipamento em função da pressão de evaporação (kPa)

A figura 4 mostra a eficiência exergética total do ciclo para as diferentes pressões de evaporação analisadas.

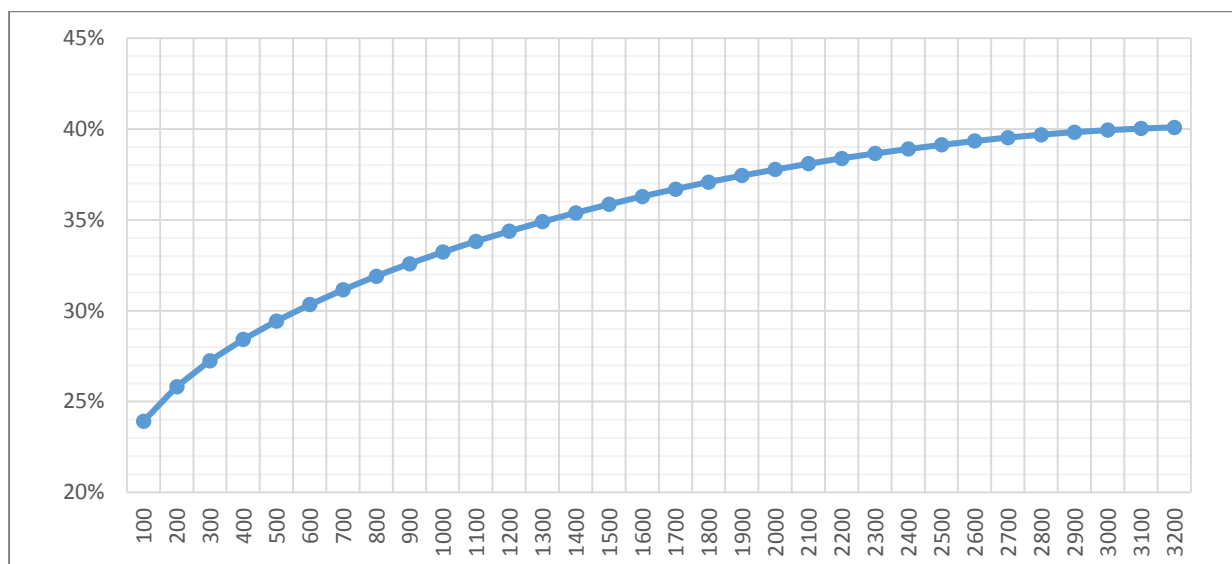


Figura 4. Eficiência exergética total do ciclo em função da pressão de evaporação (kPa)

Nas figuras 3 e 4, observa-se que a bomba é o equipamento do ciclo com maior eficiência exergética. Em seguida, aparece a turbina. Os trocadores de calor, portanto, são os equipamentos onde se encontram as maiores irreversibilidades do sistema. É possível perceber que a eficiência exergética é crescente conforme a pressão de evaporação é aumentada. O ponto com melhores resultados é aquele decorrente da maior temperatura de evaporação (300°C). Os resultados para esse ponto são mostrados na tabela 1.

Tabela 1. Resultados ótimos de eficiência exergética para o ORC com tolueno

Pressão de evaporação	3268 kPa
Temperatura de evaporação	300 °C
Eficiência bomba	90,36 %
Eficiência turbina	76,10 %
Eficiência evaporador	66,27 %
Eficiência recuperador	51,21 %
Eficiência condensador	40,11 %
Eficiência Total	43,92 %

Os resultados da Tab. 1 são importantes para identificar os equipamentos mais eficientes. No entanto, é necessário analisar qual a importância da destruição de exergia de cada equipamento na eficiência total do ciclo. A figura 5 mostra o percentual de exergia destruída em cada equipamento para o ponto apresentado na Tab. 1.

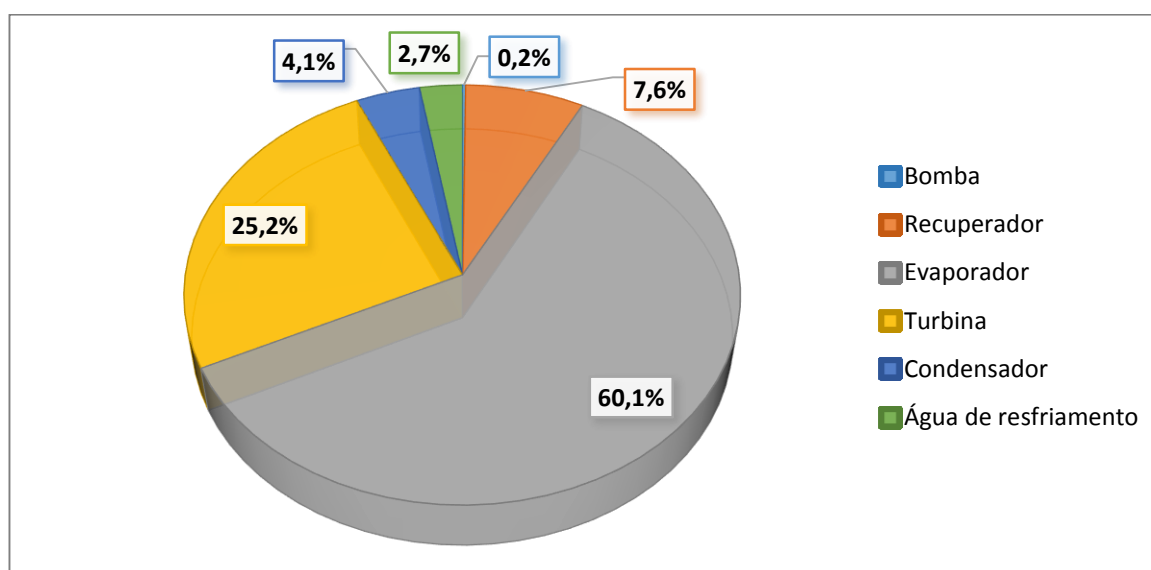


Figura 5. Percentual de exergia destruída por equipamento

Na figura 5, observa-se que mais da metade (60,1%) da exergia perdida no ciclo é devido às irreversibilidades no evaporador. Portanto, este é o equipamento mais crítico do sistema e que deve receber uma atenção especial. Essas irreversibilidades são causadas principalmente pela transferência de calor do fluido quente para o ambiente. Em segundo lugar, aparece a turbina, com 25,2 % de participação na destruição de exergia do ciclo. No caso a turbina, além da perda de calor para o ambiente, pode ocorrer a expansão não resistida do fluido, ou seja, expansão sem geração de trabalho. No recuperador a perda responde por 7,6% e na bomba, a perda de exergia equivale a apenas 0,8% do total. No condensador, a exergia destruída equivale a 4,1% do total. No entanto, há uma parcela de exergia que é transferida para a água de resfriamento e que deve ser levada em conta, pois essa exergia não retorna ao sistema e não é utilizada. No entanto, essa parcela é pequena em relação a perda de exergia total, representado apenas 2,7% do total.

Portanto, para melhoria do sistema e consequente aumento da eficiência de conversão de energia e aumento na potência líquida gerada, é necessário focar em melhorias no evaporador e na turbina, que são responsáveis juntos por mais de 85% das perdas exergéticas do sistema. Essas melhorias devem ser focadas principalmente na redução de transferência de calor para o ambiente, ou seja, otimizando a área de troca de calor do evaporador e utilizando isolamento térmico nos equipamentos. Além disso, melhorias no design da turbina são essenciais para aproveitar todo o potencial de geração de trabalho.

5. CONCLUSÕES

Neste artigo, uma análise exergética para um ciclo Rankine orgânico foi realizada com o intuito de identificar os equipamentos responsáveis pelas irreversibilidades do sistema. O ORC em questão foi proposto para recuperar o calor residual de uma das extrações de ar quente do compressor de uma turbina a gás utilizada em uma termelétrica brasileira. Os resultados mostraram que a eficiência exergética máxima é alcançada para a maior pressão de evaporação admitida e vale 43,92%. Isso significa que 66,08 % da exergia disponível na fonte de calor é perdida nos componentes do ciclo. Analisando equipamento por equipamento, as eficiências exergéticas variam entre 40% e 90% para cada um, sendo maiores na bomba e menores nos trocadores de calor. Ao avaliar a quantidade de exergia perdida por equipamento em relação a perda total do ciclo, observa-se que mais de 60% das perdas acontecem no evaporador e outros 25% na turbina. As perdas do evaporador, assim como nos trocadores de calor em geral, ocorrem principalmente devido às perdas de calor para o ambiente. Na turbina, além da transferência de calor para o ambiente, ocorre também a expansão do fluido sem geração de trabalho, ou seja, parte da energia é perdida devido à não conversão total em potência útil na turbina. Portanto, estes dois equipamentos, principalmente o evaporador, merecem atenção especial para uma avaliação criteriosa para minimização das irreversibilidades do sistema.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o CNPQ, a CAPES e a FAPEMIG pelo apoio financeiro.

7. REFERÊNCIAS

- Bao, Junjiang, and Li Zhao. 2013. "A Review of Working Fluid and Expander Selections for Organic Rankine Cycle." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 24 (August). Elsevier: 325–42. doi:10.1016/j.rser.2013.03.040.
- Chen, Huijuan, D. Yogi Goswami, and Elias K. Stefanakos. 2010. "A Review of Thermodynamic Cycles and Working Fluids for the Conversion of Low-Grade Heat." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (9). Elsevier Ltd: 3059–67. doi:10.1016/j.rser.2010.07.006.
- Desai, Nishith B., and Santanu Bandyopadhyay. 2009. "Process Integration of Organic Rankine Cycle." *Energy* 34 (10). Elsevier Ltd: 1674–86. doi:10.1016/j.energy.2009.04.037.
- Feng, Yongqiang, Yaning Zhang, Bingxi Li, Jinfu Yang, and Yang Shi. 2015. "Comparison between Regenerative Organic Rankine Cycle (RORC) and Basic Organic Rankine Cycle (BORC) Based on Thermoeconomic Multi-Objective Optimization Considering Exergy Efficiency and Levelized Energy Cost (LEC)." *Energy Conversion and Management* 96 (May). Elsevier Ltd: 58–71. doi:10.1016/j.enconman.2015.02.045.
- Kaşka, Önder. 2014. "Energy and Exergy Analysis of an Organic Rankine for Power Generation from Waste Heat Recovery in Steel Industry." *Energy Conversion and Management* 77 (January): 108–17. doi:10.1016/j.enconman.2013.09.026.
- Long, R., Y.J. Bao, X.M. Huang, and W. Liu. 2014. "Exergy Analysis and Working Fluid Selection of Organic Rankine Cycle for Low Grade Waste Heat Recovery." *Energy* 73 (August). Elsevier Ltd: 475–83. doi:10.1016/j.energy.2014.06.040.
- Meinel, Dominik, Christoph Wieland, and Hartmut Spliethoff. 2014. "Economic Comparison of ORC (Organic Rankine Cycle) Processes at Different Scales." *Energy* 74 (September). Elsevier Ltd: 694–706. doi:10.1016/j.energy.2014.07.036.
- Peris, Bernardo, Joaquín Navarro-Esbrí, Francisco Molés, Roberto Collado, and Adrián Mota-Babiloni. 2015. "Performance Evaluation of an Organic Rankine Cycle (ORC) for Power Applications from Low Grade Heat

- Sources.” *Applied Thermal Engineering* 75 (January): 763–69. doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.10.034.
- Safarian, Sahar, and Fereshteh Aramoun. 2015. “Energy and Exergy Assessments of Modified Organic Rankine Cycles (ORCs).” *Energy Reports* 1 (November). Elsevier Ltd: 1–7. doi:10.1016/j.egyr.2014.10.003.
- Schuster, a., S. Karellas, and R. Aumann. 2010. “Efficiency Optimization Potential in Supercritical Organic Rankine Cycles.” *Energy* 35 (2). Elsevier Ltd: 1033–39. doi:10.1016/j.energy.2009.06.019.
- Schuster, a., S. Karellas, E. Kakaras, and H. Spliethoff. 2009. “Energetic and Economic Investigation of Organic Rankine Cycle Applications.” *Applied Thermal Engineering* 29 (8-9). Elsevier Ltd: 1809–17. doi:10.1016/j.applthermaleng.2008.08.016.
- Tchanche, Bertrand F., M. Pétrissans, and G. Papadakis. 2014. “Heat Resources and Organic Rankine Cycle Machines.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 39 (November). Elsevier: 1185–99. doi:10.1016/j.rser.2014.07.139.
- Vaja, Iacopo, and Agostino Gambarotta. 2010. “Internal Combustion Engine (ICE) Bottoming with Organic Rankine Cycles (ORCs).” *Energy* 35 (2). Elsevier Ltd: 1084–93. doi:10.1016/j.energy.2009.06.001.
- Vivian, Iacopo, Giovanni Manente, and Andrea Lazzaretto. 2015. “A General Framework to Select Working Fluid and Configuration of ORCs for Low-to-Medium Temperature Heat Sources.” *Applied Energy* 156 (October). Elsevier Ltd: 727–46. doi:10.1016/j.apenergy.2015.07.005.
- Xi, Huan, Ming-Jia Li, Ya-Ling He, and Wen-Quan Tao. 2015. “A Graphical Criterion for Working Fluid Selection and Thermodynamic System Comparison in Waste Heat Recovery.” *Applied Thermal Engineering* 89 (October). Elsevier Ltd: 772–82. doi:10.1016/j.applthermaleng.2015.06.050.

8. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

EXERGY ANALYSIS OF AN ORGANIC RANKINE CYCLE OPERATING WITH TOLUENE FOR HEAT RECOVERY IN A THERMAL POWER PLANT

Diego Luís Izidoro Silva, diegolisilva@live.com¹

Victor Andrés Patiño Mantilla, victor_pama@hotmail.com¹

Júlian Camilo Restrepo Lozano, jcrestrepol@hotmail.com¹

Osvaldo José Venturini, osvaldo@unifei.edu.br¹

José Carlos Escobar Palacio, jocesobar@unifei.edu.br¹

¹Universidade Federal de Itajubá, Avenicda BPS, 1303, Pinheirinho, Itajubá-Minas Gerais, Brasil

Abstract: Due to the climate change produced in part by high emissions of carbon monoxide, carbon dioxide, from the combustion of fossil fuel products, has adopted different strategies which seek to increase the efficiency of energy conversion systems. One example of this are the thermal power plants of combined cycle, based on gas and steam turbines. Separately operating the gas turbines and steam cycles reach efficiency rates around 35 to 40%. However, the combination of these two systems to generate electricity from fuel burning one can achieve efficiencies up to 60%. Despite the high value of efficiency compared to other systems, the power plants of combined cycle have heat dissipation points throughout the process which decreases the overall efficiency of the cycle and are located mainly in heat exchangers that make up the system and also in the exhaust gas. The most efficient way to convert this heat into electricity is through the use of organic fluids in a Rankine cycle (ORC). Among the advantages of using ORC systems are: better use of energy resources, system size reduction, reduction of pollutant emissions and the possibility of reducing the cost of energy generated. In this work, an organic Rankine cycle using toluene is used. To evaluate the system at one exergetic analysis to characterize the irreversibilities in the process of the present ciclo. Os results show that the maximum exergetic efficiency is achieved for the largest admissible evaporation pressure and valley 43.92%. When assessing the amount of exergy lost by equipment relative to total cycle loss, it is observed that more than 60% of the losses occur in the evaporator and another 25% in the turbine.

Keywords: exergy analysis, organic Rankine cycle, energy conversion, efficiency.