

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE CICLOS DE RANKINE ORGÂNICOS UTILIZANDO FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA

Palavras-Chave: CICLO RANKINE ORGÂNICO, FLUIDOS ORGÂNICOS, SIMULAÇÃO

Autores(as):

ISABELLY VITHÓRIA COUTINHO DOS SANTOS, E. E. PROF. CARLOS ALBERTO GALHIEGO

LIVIA ROZA RIBEIRO, E. E. PROFA. RITA DE CÁSSIA DA SILVA

YURE WESLEY GONÇALVES DE OLIVEIRA, E. E. PROF. ÁLVARO COTOMACCI

HELOISA MARTINS REIMBERG LIMA, FEQ – UNICAMP

GIULIA VITÓRIA SABACK DA CRUZ, FEQ – UNICAMP

LETÍCIA LIE HASHIMOTO, FEQ – UNICAMP

Prof. Dr. JOSÉ VICENTE HALLAK DANGELO (orientador) – FEQ/UNICAMP

INTRODUÇÃO:

O aquecimento global causado pelo efeito estufa é um dos grandes desafios ambientais da atualidade. Desde a Revolução Industrial, passaram-se a usar com frequência combustíveis fósseis que após sua combustão, liberam dióxido de carbono para a atmosfera, deixando a camada que retém o calor menos eficiente, intensificando o efeito estufa e causando o aquecimento global. Para combater esse fenômeno, torna-se essencial reduzir ou abandonar o uso de combustíveis fósseis (como carvão mineral, petróleo e gás natural), substituindo-os por fontes renováveis de energia (Bonfim, 2023).

O Ciclo de Rankine Orgânico é uma variação do Ciclo de Rankine tradicional, feito para gerar energia a partir de fontes de calor de baixa a média temperatura, usando fluidos orgânicos no lugar da água. Esses fluidos orgânicos têm propriedades que permitem uma operação em temperaturas mais baixas, tornando o ciclo uma forma eficiente de tecnologia para a produção de potência. A escolha desse fluido é importante e depende de vários fatores, como a temperatura da fonte de calor, as propriedades físico-químicas, e as considerações econômicas e ambientais (Çengel e Boles, 2013).

O principal objetivo desse projeto é avaliar o desempenho de Ciclos de Rankine Orgânicos utilizando diferentes fontes alternativas de energia (solar, eólica, geotérmica e residual) e operando com diferentes fluidos de trabalho previamente selecionados, visando identificar as melhores condições operacionais e os fluidos mais adequados para maximizar a eficiência energética e promover a sustentabilidade ambiental.

METODOLOGIA:

Inicialmente, para proporcionar uma compreensão melhor do projeto, foram realizadas quatro etapas de atividades distintas. Primeiramente, realizaram-se revisões de matemática básica, como Equações de Primeiro e Segundo Grau, regra de três, conversão de unidades e interpolação. Também foram abordados conceitos termodinâmicos: calor específico, entalpia (sensível e latente), calorimetria, manometria e Primeira Lei da Termodinâmica, com o intuito de formar uma base sólida de conhecimentos para a execução do projeto.

Em seguida, a segunda etapa consistiu em pesquisas bibliográficas relacionadas às fontes alternativas de energia e Ciclo de Rankine Orgânico, sendo realizadas apresentações orais sobre esses temas específicos para o grupo de pesquisa no qual o projeto estava inserido, como forma de aprimoramento da capacidade de comunicação e apresentação, visando o desenvolvimento de habilidades dos alunos do PIBIC-EM.

A terceira etapa consistiu na utilização do simulador Aspen HYSYS® para avaliar o desempenho termodinâmico do Ciclo de Rankine Orgânico, operando em diferentes condições e utilizando diferentes fluidos, avaliando a eficiência energética do ciclo. A Figura 1 mostra uma representação do ciclo de Rankine convencional com quatro elementos fundamentais: caldeira, turbina, condensador e bomba. Os conceitos teóricos abordados nas duas etapas anteriores foram utilizados em cálculos manuais envolvendo o ciclo estudado, os quais foram fundamentais para entender melhor o uso e funcionamento do simulador.

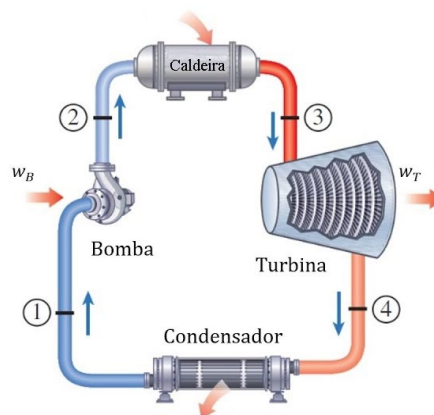


Figura 1 – Esquema de um ciclo de Rankine convencional (adaptado de Çengel e Boles, 2013).

O Aspen HYSYS® é um software de simulação de processos utilizado na indústria química para análise de processos químicos, otimização de produção, treinamento de operadores e a análise de riscos (Kamaruddin, 2013). Ele permite aos engenheiros e pesquisadores simular diferentes situações operacionais, prever o comportamento de processos em várias condições e identificar melhorias potenciais para aumentar a eficiência e reduzir custos. O simulador foi uma ferramenta fundamental em nossos estudos, proporcionando-nos uma compreensão mais profunda do ciclo de Rankine. Nas simulações realizadas durante o projeto, foram adotados os seguintes pacotes termodinâmicos: ASME Steam (para ciclos operando com água) e Equação de Estado de Peng-Robinson (para ciclos operando com demais fluidos estudados).

A quarta etapa de atividades realizadas consistiu na realização de experimentos práticos e visitas aos laboratórios da FEQ, as quais permitiram uma maior familiarização com técnicas experimentais e equipamentos, contribuindo assim para consolidação de conceitos teóricos.

As principais equações utilizadas nos cálculos realizados neste trabalho são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Principais equações utilizadas nas avaliações de desempenho dos ciclos.

Equação	Expressão	Variáveis
Primeira Lei da Termodinâmica	$\Delta H + \Delta E_C + \Delta E_P = Q + W_{\text{outros tipos}}$	ΔH = variação de entalpia ΔE_C = variação de energia cinética ΔE_P = variação de energia potencial Q = calor W_{outros} = trabalho (exceto de fluxo)
Trabalho Líquido do ciclo	$W_{\text{líquido}} = W_{\text{turbina}} - W_{\text{bomba}} = Q_{\text{fornecido}} - Q_{\text{rejeitado}}$	W_{turbina} = trabalho da turbina W_{bomba} = W bomba $Q_{\text{fornecido}}$ = calor fornecido na caldeira $Q_{\text{rejeitado}}$ = calor rejeitado no condensador
Eficiência do ciclo	$\eta = \frac{W_{\text{líquido}}}{Q_{\text{fornecido}}}$	Eficiência é dada pela relação entre o trabalho líquido obtido no ciclo e o calor fornecido na caldeira.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

A Figura 2 apresenta a tela do simulador Aspen HYSYS® versão 2.2 contendo a simulação de um ciclo de Rankine convencional. A partir da simulação implementada foram feitas diversas análises para avaliar a influência das variáveis operacionais do ciclo sobre sua eficiência, buscando assim determinar as melhores condições de operação, sendo testados também diferentes fluidos orgânicos de trabalho, os quais foram selecionados utilizando diferentes critérios baseados na literatura (Rezende, 2013; Wenzel, 2015).

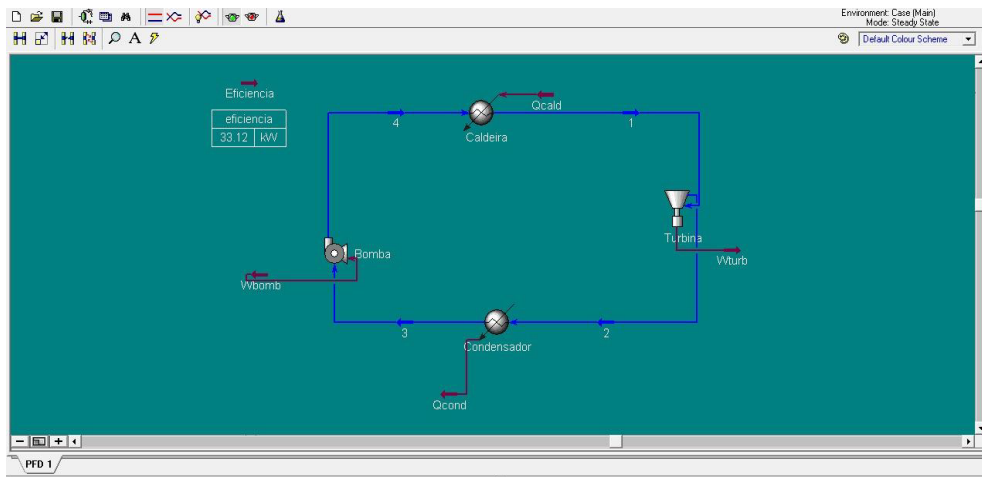
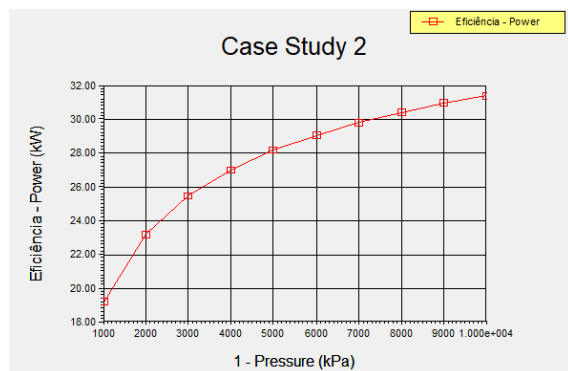
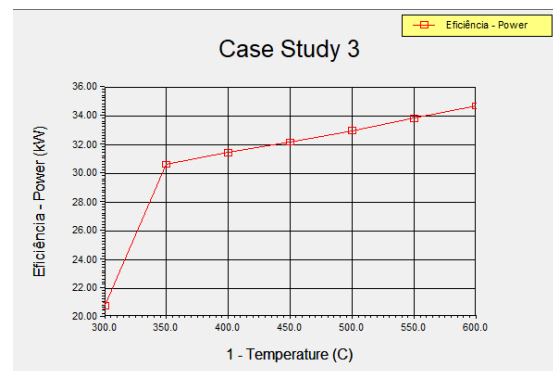


Figura 2 – Tela do simulador Aspen HYSYS® com o ciclo de potência de Rankine (autoria própria)

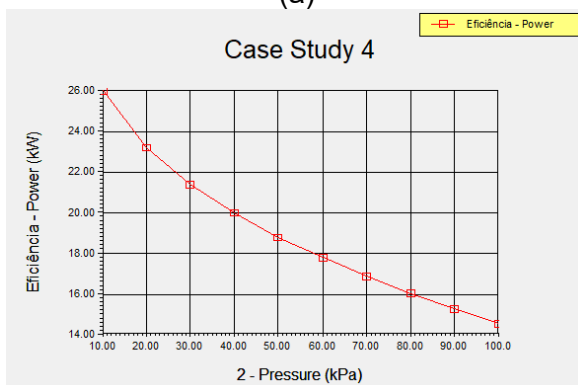
A Figura 3 mostra alguns resultados das simulações feitas para o caso base, que utilizou água como fluido de trabalho, o qual foi importante para aprender a usar o simulador e interpretar os resultados obtidos, antes de testar os fluidos orgânicos para avaliação da eficiência. Os ciclos operando com fluidos orgânicos apresentam menor eficiência que o ciclo convencional com a água, pois este permite operar a caldeira em maiores faixas de temperatura e pressão, que elevam a eficiência do ciclo, porém requerem o uso de combustíveis como fonte de calor, enquanto que os ciclos orgânicos são capazes de operar com as fontes alternativas de energia mencionadas anteriormente.



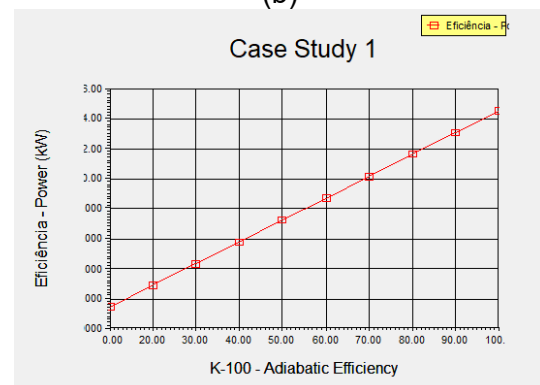
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3 – Variação da eficiência do ciclo de Rankine em função da: (a) pressão de operação da caldeira; (b) temperatura de saída do vapor da caldeira; (c) pressão de saída da turbina; (d) eficiência adiabática da turbina.

CONCLUSÕES:

O aquecimento global é um desafio ambiental sério, agravado pelo uso de combustíveis fósseis. Para enfrentar esse problema é fundamental fazer uma transição energética para fontes de energia alternativas que sejam mais sustentáveis. Nesse cenário, o Ciclo de Rankine Orgânico é uma tecnologia promissora para aproveitar fontes de calor de baixa temperatura a fim de gerar potência de forma mais sustentável. É importante que estes ciclos operem então de forma otimizada, maximizando sua eficiência energética, a qual depende não só das condições operacionais do ciclo, como também do tipo de fluido de trabalho utilizado. Nesse projeto foram realizadas simulações de um ciclo de Rankine tradicional (operando com água como fluido de trabalho) e ciclos de Rankine orgânicos (basicamente hidrocarbonetos e hidrocarbonetos halogenados). As simulações permitiram entender o comportamento da eficiência do ciclo em função de algumas variáveis operacionais, em especial a temperatura e pressão na saída da caldeira, pressão na saída da turbina e eficiência da turbina. Os resultados mostram que um aumento da pressão e temperatura na corrente de saída da caldeira favorecem o aumento da eficiência do ciclo e que pressão na saída da turbina é inversamente proporcional à eficiência do ciclo.

O processo de desenvolvimento do projeto incluiu um foco educacional amplo, que envolveu revisão teórica de diversas matérias, pesquisa, simulações e visitas a laboratórios, oferecendo aos estudantes um entendimento prático e teórico sobre o uso de fluidos orgânicos no ciclo e a relevância das energias renováveis.

BIBLIOGRAFIA

BONFIM, Valdiney B. O Potencial da Energia Renovável para a Transição Energética Global, *Revista Científica Multidisciplinar do Conhecimento*, v. 03, pp. 102-117, 2023.

ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. Termodinâmica. 7. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2013.

KAMARUDDIN, A. H. M.; Aspen Hysys: An Introduction to Chemical Engineering Simulation, 1. ed., Johor, Lambert Academic Publishing, 2013.

REZENDE, Gesué do Santos Valle. Metodologia para Pré-Seleção de Fluidos de Trabalho para Ciclos Rankine Orgânicos. 2021. Dissertação (Mestrado em Ciências) – UERJ, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro, 2021.

WENZEL, T. A. Análise termodinâmica e simulação de um Ciclo Rankine Orgânico (ORC). UFRGS, 2015. Acesso em: 20 de julho de 2024. <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/132691>