



# Análise Comparativa do Desempenho Termodinâmico de Ciclos Rankine Orgânico e Kalina

**Palavras-Chave:** Ciclo Rankine Orgânico, Ciclo Kalina, Eficiência, Potência, Calor Residual

**Autores(as):**

**GABRIELA EGIDIO MELLO, FEQ – UNICAMP**

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

---

## INTRODUÇÃO:

A conversão de calor em potência é feita por meio de ciclos termodinâmicos, sendo os ciclos Rankine Orgânico e Kalina as principais tecnologias utilizadas para a recuperação de calor residual com o intuito de gerar potência. Nas indústrias químicas existem diversas fontes de calor que podem ser utilizadas, de modo a reduzir de forma efetiva as emissões de gases de efeito estufa e melhorar significativamente a eficiência energética de sistemas térmicos, o que é possível graças ao uso eficiente da energia. Com isso, o presente estudo mostra-se relevante no cenário atual em que questões referentes à utilização de tecnologias limpas e redução do consumo de combustíveis fósseis possuem crescente destaque (Tchanche *et al.*, 2014).

O calor residual de processos químicos pode ser convertido em potência, e por normalmente se tratar de uma fonte de calor de baixa temperatura, a eficiência do processo torna-se o maior foco de preocupação na implementação desses sistemas, fazendo com que seja necessário um estudo criterioso de seus parâmetros. A eficiência térmica dos ciclos termodinâmicos depende das propriedades termodinâmicas dos fluidos de trabalho, proporções mássicas em caso de misturas, além das condições da fonte de calor e das variáveis operacionais do ciclo. Fez-se necessária a investigação de cada uma destas variáveis, de modo a encontrar os fatores que mais influenciam na eficiência dos ciclos, além de adequá-los à fonte de calor residual pré-determinada.

Este projeto de pesquisa em iniciação científica teve por objetivo principal simular ciclos Rankine orgânico e Kalina com diferentes configurações e operando com diferentes fluidos de trabalho, a fim de realizar uma análise comparativa do desempenho termodinâmico dos ciclos em diferentes cenários, utilizando como principal critério de desempenho a sua eficiência energética (Eficiência de Primeira Lei), a fim de determinar as melhores condições de operação desses ciclos.

## METODOLOGIA:

O ciclo Rankine convencional utiliza água como fluido de trabalho. Porém, por ser a água um fluido que demanda alta carga energética para sua evaporação e requer uma fonte quente a alta

temperatura, a alternativa então é adotar ciclos que utilizam fluidos orgânicos, pois estes possuem temperatura de ebulição bem mais baixa que a da água. Com isso, os ciclos termodinâmicos progressivamente utilizados na indústria são o Ciclo Rankine Orgânico (ORC), com mesmo funcionamento do ciclo Rankine tradicional, mas com fluidos orgânicos, e o Ciclo Kalina (KC), cujo fluido de trabalho é uma mistura de água e amônia, no qual há a presença de um separador, onde uma parcela do líquido rico em amônia é separado para posteriormente ser misturado com o líquido pobre em amônia que deixa a turbina. A mistura resultante é resfriada e comprimida, para por fim ser enviada à caldeira através de um aquecedor de água regenerativo (WALL; CHUANG; ISHIDA, 1989). Ambos os ciclos se encontram esquematizados nas Figura 1a e 1b.

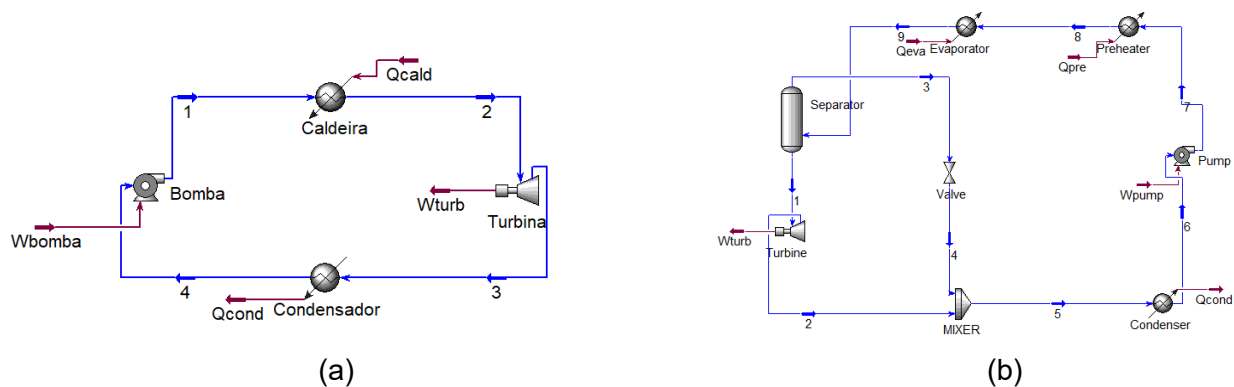


Figura 1 - Ciclo Rankine Orgânico (a) e Ciclo Kalina (b).

Para investigar a influência de cada um dos parâmetros do ciclo sobre sua eficiência, foram feitas simulações utilizando o Aspen Hysys® v.10, sendo que para os ORCs foi utilizado o pacote termodinâmico de Peng-Robinson e para o KC o pacote PRSV. Para facilitar a comparação dos ciclos, adotou-se um valor fixo para a potência gerada. Com isso é possível estabelecer um comparativo entre os ciclos, juntamente com outros critérios como dimensões e quantidades de equipamentos, além das condições de operação, serão fundamentais para a determinação do ciclo termodinâmico mais eficaz.

Além da delimitação de uma potência requerida, também com foco na padronização das simulações, fez-se necessária a definição de uma fonte de calor residual para que os resultados sejam ainda mais assertivos e confiáveis. Para a potência desejada, foi considerado o valor necessário para suprir cerca de 40% a 60% da energia utilizada no processo produtivo, por entender que a implementação desses ciclos termodinâmicos não é capaz de gerar a quantidade de energia necessária para atender a demanda de todo o processo. Mesmo não atingindo toda a potência necessária, a adoção deste sistema de reaproveitamento de calor residual garante às empresas uma certa autonomia energética.

Para a determinação da temperatura da fonte de calor residual, além da potência necessária, utilizou-se como alvo a indústria do aço EAF<sup>1</sup>, que gera calor residual de cerca de 150 °C e consome em média 430 kWh/ton de aço produzidas, este levando em consideração, além da eficiência e das

<sup>1</sup> O processo EAF utiliza sucata de aço como seu material básico de matéria-prima.

tecnologias de recuperação aplicadas aos processos, a rota empregada na produção de aço (CARVALHO *et al.*, 2015). Utilizando-se como meta os 40%-60% do gasto energético pré-determinado, obtém-se o valor de 172-258 kWh/ton de aço produzido, valor esperado para os ciclos estudados.

Durante a construção e simulação dos diferentes ciclos termodinâmicos, fez-se necessária a variação de alguns parâmetros de processo dos ciclos Rankine Orgânico e Kalina mostrados na Figura 1. Para o KC, foram variadas as configurações do ciclo, como por exemplo, a adição de mais estágios na turbina, e a adição de um regenerador para reduzir a perda de calor, além disso variou-se a proporção de amônia e água, visto que este ciclo trabalha apenas com a mistura destes dois fluidos. Já para o ORC, além das variações em sua configuração, variaram-se também os fluidos adotados, podendo estes ser puros ou misturas entre dois ou mais fluidos de trabalho. Para a escolha do fluido/mistura ideal, além da eficiência, são considerados outros fatores, como: questões ambientais, toxicológicas e físicas, como o fluxo mássico necessário para atingir a potência necessária.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO:

A princípio foram investigados os ciclos Rankine Orgânico, visto que estes possuem mais variáveis no caso da escolha dos fluidos de trabalho, podendo se tratar de fluidos puros ou misturas. Nesta pesquisa, optou-se pela utilização apenas de misturas zeotrópicas<sup>2</sup> ou substâncias orgânicas puras para o fluido de trabalho, por entender a partir da revisão da literatura, que estas seriam as escolhas que maximizam a geração de potência. Assim, com as simulações, descobriu-se que geralmente as substâncias puras possuem maior eficiência e melhor desempenho que misturas binárias, que por sua vez possuem melhor desempenho que misturas ternárias, com isso, para aumentar-se as eficiências dos ciclos cujo fluido tratava-se de uma mistura zeotrópica, um dos componentes necessariamente deve ser preponderante (>80%). Faz-se importante ressaltar que estas análises foram feitas apenas com fluidos disponíveis na base de dados do simulador.

Além disso, constatou-se que os compostos com melhor desempenho nos ORCs estudados foram aqueles que possuem menor temperatura crítica, possuindo geralmente pressões críticas mais elevadas, deste modo o fluido de trabalho seria convertido em vapor superaquecido com maior facilidade, além de garantir que gotículas do fluido não serão arrastadas para a turbina, danificando o equipamento. Alguns estudiosos afirmam que para alcançar maiores valores de eficiência no ORC, deve-se utilizar fluidos cuja temperatura crítica é 30-50 K menor que a temperatura da fonte de calor, enquanto outros defendem a teoria de que o ideal é utilizar fluidos com temperatura crítica 0,8 vezes a temperatura da fonte (MIAO *et al.*, 2018). Na Figura 2 é possível verificar a influência da temperatura crítica dos diferentes fluidos investigados em seus respectivos valores de eficiência.

---

<sup>2</sup> Uma mistura zeotrópica, também chamada de não-azeotrópica, caracteriza-se por apresentar variação de temperatura durante o processo de mudança de fase, à pressão constante (MARTIN, F. et al, 2005)

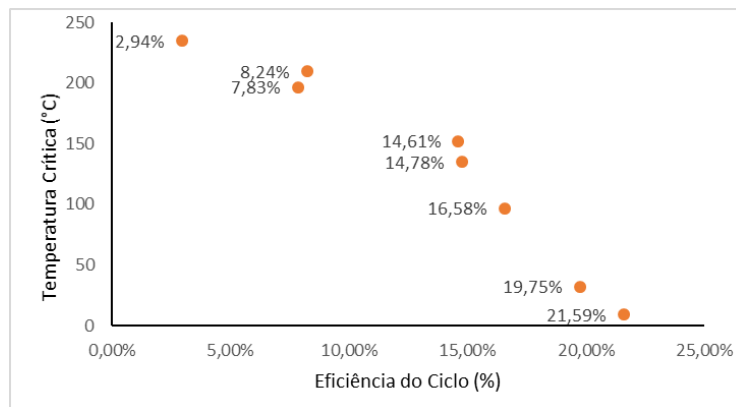


Figura 2 - Eficiência dos ciclos de acordo com temperatura crítica do fluido de trabalho.

Ao partir para a análise dos ciclos Kalina, notou-se que a proporção de amônia na mistura é um dos fatores que mais influencia na eficiência do ciclo, visto que as configurações testadas não causaram mudanças tão significativas no desempenho do ciclo como foi o caso da fração de  $NH_3$ . Assim, concluiu-se que quanto maior a concentração da mistura, mais eficiente será o ciclo, o que se deve principalmente à menor energia necessária para a geração de vapor superaquecido por conta da presença predominante da amônia.

Avançando-se nas simulações dos processos, foi possível observar que o KC possui maior eficiência quando comparado ao ORC em uma ampla faixa de temperatura. Além disso, notou-se que os ciclos Kalina possuem melhor desempenho a menores temperaturas e esta tendência é confirmada ao detectar uma diminuição contínua em sua eficiência com o aumento da temperatura da fonte de calor. Na Tabela 1 encontram-se valores de eficiência ao comparar-se o ORC e o KC nas mesmas condições de operação, ambos com sua configuração simples como a mostrada na Figura 1.

| Ciclo Termodinâmico               | Eficiência 1ª Lei |
|-----------------------------------|-------------------|
| ORC (Fluido puro)                 | 13,00 %           |
| ORC (WF: Mistura 90/10 % mássica) | 12,97 %           |
| KC (95 % em massa)                | 18,81%            |

Tabela 1 - Comparativo de eficiências entre ORC e KC (resultados obtidos até o momento e sujeitos a melhorias).

Uma vez concluídas as simulações dos ciclos, partiu-se para a análise paramétrica dos sistemas, de modo a identificar os parâmetros com maior influência sobre sua eficiência, sendo observado que um dos principais é a razão de expansão na turbina, por isso uma das principais mudanças feitas nos sistemas para melhoria de seu desempenho foi o aumento da quantidade de estágios na turbina (consequentemente seu tamanho). A temperatura da fonte de calor também mostrou grande interferência nos resultados de eficiência alcançados, mas por delimitar-se uma fonte de calor fixa, este parâmetro foi desconsiderado da análise. Um outro fator relevante é a presença de regeneradores no sistema, que melhoram o desempenho do processo pela diminuição da demanda de calor. Na Tabela 2 encontram-se os valores de eficiência dos ciclos após mudanças em suas configurações.

| Ciclo Termodinâmico  | Eficiência 1ª Lei |
|--|-------------------|
| BORC   | 13,00%            |
| ORC com regenerador  | 16,16%            |
| ORC com regenerador e turbina com 3 estágios               | 16,55%            |
| DRORC  | 13,10%            |
| KC (95% em massa)  | 18,81%            |
| KC com regenerador (95% em massa)                          | 18,70%            |
| KC com regenerador e turbina com 3 estágios (95% em massa) | 19,12%            |

*Tabela 2 - Diferentes configurações dos ciclos termodinâmicos estudados e suas respectivas eficiências.*

Faz-se importante ressaltar que as simulações das diferentes configurações do ORC foram feitas com diversos fluidos de trabalho diferentes, selecionando-se ao final o n-Butano e o i-Butano pelos seus resultados, que apesar de apresentar valores mais baixos para a eficiência quando comparados a outros fluidos como o R-1150 e R-170, requeriam temperaturas aceitáveis de resfriamento, enquanto os fluidos refrigerantes exigiam fontes criogênicas, o que se torna inviável em um projeto de reaproveitamento de calor residual, sendo este focado na economia e simplicidade do sistema.

## CONCLUSÕES:

Depreende-se então que, para o reaproveitamento de calor residual para o caso estudado indústria do aço, o KC possui vantagem sobre o ORC, sendo o sistema mais adequado para a geração de potência a partir de calor residual de baixa temperatura até 350 °C. Na comparação realizada, também foram considerados os equipamentos utilizados em cada processo, visto que o KC exige mais equipamentos e maior complexidade nas operações unitárias envolvidas, gerando assim um maior investimento necessário para sua implementação, por outro lado os ORCs apesar de mais simples e menos custosos, possuem maior necessidade de customização e adequação para que obtenha o mesmo desempenho do KC básico, praticamente igualando os custos de implementação dos sistemas.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] DADOS DO SETOR DADOS DO SETOR BRASILEIRO DO AÇO. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.acobrasil.org.br/relatoriodesustentabilidade/assets/pdf/PDF-2020-Relatorio-Aco-Brasil-Dados.pdf>>. Acesso em: 01 jul. 2023.
- [2] MARTIN, F. et al. ILHA SOLTEIRA XII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica -22 a 26 de agosto de 2005 -Ilha Solteira -SP Paper CRE05-TC19 EBULIÇÃO NUCLEADA DE MISTURAS BINÁRIAS ZEOTRÓPICAS. [s.l: s.n.]. Disponível em: <[https://www.abcm.org.br/anais/creem/2005/pdf/trabalhos\\_completos/tc19.pdf](https://www.abcm.org.br/anais/creem/2005/pdf/trabalhos_completos/tc19.pdf)>. Acesso em: 02 jul. 2023.
- [3] MIAO, Z. et al. Thermodynamic selection criteria of zeotropic mixtures for subcritical organic Rankine cycle. v. 167, p. 484–497, 15 jan. 2019.
- [4] SÉRGIO, P. et al. Sustentabilidade da siderurgia brasileira: eficiência energética, emissões e competitividade. BNDES Setorial, v. 41, p. 181–236, [s.d.].