

CENTRO UNIVERSITÁRIO SAGRADO CORAÇÃO – UNISAGRADO

THARLES GABRIEL DE ALBUQUERQUE GALDINO

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO CICLO RANKINE ORGÂNICO COM DIFERENTES  
TIPOS DE FLUIDOS

BAURU

2023

THARLES GABRIEL DE ALBUQUERQUE GALDINO

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO CICLO RANKINE ORGÂNICO COM DIFERENTES  
TIPOS DE FLUIDOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
como parte dos requisitos para obtenção do  
título de bacharel em Engenharia Mecânica -  
Centro Universitário Sagrado Coração.

Orientador: Prof. M.e Guilherme Biazzi  
Gonçalves

BAURU

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo  
com ISBD

G149a	<p>Galdino, Tharles Gabriel de Albuquerque</p> <p>Análise da eficiência do ciclo Rankine orgânico com diferentes tipos de fluidos / Tharles Gabriel de Albuquerque Galdino. -- 2023. 27f. : il.</p> <p>Orientador: Prof. M.e Guilherme Biazzi Goncalves</p> <p>Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Centro Universitário Sagrado Coração - UNISAGRADO - Bauru - SP</p> <p>1. Termodinâmica. 2. Ciclo Rankine Orgânico. 3. Fluido Orgânico. 4. <i>CoolProp</i>. I. Goncalves, Guilherme Biazzi. II.</p>
-------	---

THARLES GABRIEL DE ALBUQUERQUE GALDINO

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO CICLO RANKINE ORGÂNICO COM DIFERENTES  
TIPOS DE FLUIDOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
como parte dos requisitos para obtenção do  
título de bacharel em Engenharia Mecânica -  
Centro Universitário Sagrado Coração.

Aprovado em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_.

Banca examinadora: Dr Jose Augusto de Carvalho Dias

---

Prof. M.e Guilherme Biazzi Gonçalves (Orientador)

Centro Universitário Sagrado Coração

---

Dr. Jose Augusto de Carvalho Dias

Centro Universitário Sagrado Coração

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer aos meus pais, Marlene Leite de Albuquerque e Genival Galdino, que sempre me apoiaram em meus estudos. Às minhas irmãs que sempre me auxiliaram com as atividades de extensão e estiveram muito presentes durante toda a minha formação acadêmica. Agradeço a todos os meus professores e amigos, que me ajudaram a crescer tanto como pessoa, como profissionalmente, mudando o meu modo de ver e analisar diversas situações do dia a dia, além de terem feito muita diferença e companhia durante o período da pandemia.

“A educação tem raízes amargas, mas os seus frutos são doces.” (Aristóteles).

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	10
1.1	JUSTIFICATIVA .....	13
2	OBJETIVOS .....	14
3	METODOLOGIA .....	15
3.1	Análise termodinâmica e parâmetros utilizados .....	15
3.2	Software CoolProp.....	18
3.3	Comparação dos fluidos utilizados .....	18
4	RESULTADOS.....	20
5	CONCLUSÃO .....	25
	REFERÊNCIAS .....	26

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ciclo Rankine Orgânico e Gráfico Temperatura x Entropia (T-s).....	11
Figura 2: Curvas de Saturação para fluidos orgânicos, de refrigeração e água.....	12
Figura 3: Esquema do Ciclo Rankine analisado.....	15
Figura 4: Exemplo do uso da função para encontrar a entalpia da água. ....	18
Figura 5: Comparação dos tipos de fluidos de trabalho .....	19

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fluidos selecionados.....	20
Tabela 2: Parâmetros estabelecidos do ciclo. ....	20
Tabela 3: Dados de entrada e dados obtidos para o Ponto 1. ....	21
Tabela 4 Dados de entrada e dados obtidos para o Ponto 2. ....	22
Tabela 5: Dados de entrada e dados obtidos para o Ponto 3. ....	23
Tabela 6: Dados de entrada e dados obtidos para o Ponto 4. ....	24
Tabela 7: Valores dos Trabalhos Específicos, Calores por unidade de massa e Eficiência Térmica do Ciclo para os Fluidos analisados. ....	24

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CHP	<i>Combined Heat and Power</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ORC	<i>Organic Rankine Cycle</i> ou Ciclo Rankine Orgânico
PNE	Plano Nacional de Energia

## LISTA DE SÍMBOLOS

$h$	Entalpia específica
$\dot{m}$	Vazão mássica
$\eta_t$	Eficiência térmica do ciclo
$P_c$	Pressão crítica
$T_c$	Temperatura crítica
$q_e$	Calor por unidade de massa que entra no ciclo
$q_s$	Calor por unidade de massa que sai do ciclo
$Q$	Energia transferida como calor
$s$	Entropia específica
$\theta$	Ângulo do diagrama T-s
$T_c$	Temperatura crítica
$w_e$	Trabalho específico recebido pelo ciclo
$w_s$	Trabalho gerado pelo ciclo
$W$	Trabalho realizado pelo sistema

# ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO CICLO RANKINE ORGÂNICO COM DIFERENTES TIPOS DE FLUIDOS

GALDINO, T. G. A.<sup>1</sup>; GONÇALVES, G. B.<sup>2</sup>

## RESUMO

O atual trabalho apresenta o estudo da Termodinâmica e dos ciclos termodinâmicos, através de uma comparação entre o ciclo Rankine convencional a vapor e um ciclo Rankine orgânico (ORC), destacando as diferenças entre ambos ciclos e a necessidade atual da cogeração de energia, que aumenta a eficácia térmica desses ciclos. O estudo avaliou diferentes tipos de fluidos orgânicos, através da utilização do software CoolProp e das equações da primeira lei da Termodinâmica, a fim de evidenciar a eficiência de cada fluido utilizado no ORC. Ao fim deste estudo foi visto que, por mais que a água seja um fluido de trabalho muito eficiente, os fluidos orgânicos também possuem boa eficiência, e que se analisado a longo prazo, podem ser a melhor escolha.

**Palavras-chave:** Termodinâmica; Ciclo Rankine orgânico; Fluido orgânico, CoolProp.

## ABSTRACT

The current work presents a study of Thermodynamics and thermodynamic cycles, through a comparison between the conventional steam Rankine cycle and an Organic Rankine Cycle (ORC), highlighting the differences between both cycles and the current need for energy cogeneration, which enhances the thermal efficiency of these cycles. The study assessed different types of organic fluids using the CoolProp software and the equations of the first law of Thermodynamics, aiming to demonstrate the efficiency of each fluid used in the ORC. At the end of this study, it was observed that, although water is a highly efficient working fluid, organic fluids also exhibit good efficiency, and in the long term, they may prove to be the better choice.

**Keywords:** Thermodynamics; Organic Rankine cycle; Organic fluid; CoolProp.

---

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia Mecânica pelo Centro Universitário Sagrado Coração (UNISAGRADO), e-mail para contato: tharles.1011784@alunos.unisagrado.edu.br

<sup>2</sup> Professor docente do curso de Engenharia Mecânica pelo Centro Universitário Sagrado Coração (UNISAGRADO), e-mail para contato: guilherme.goncalves@unisagrado.edu.br

## 1 INTRODUÇÃO

A Termodinâmica é um campo fundamental no estudo das relações entre calor, trabalho e energia. É uma ciência da qual fornece as ferramentas e os princípios para entender e descrever como a energia flui e se transforma em sistemas físicos. Os ambientes dos sistemas termodinâmicos são divididos entre sistema e vizinhança, sendo o sistema parte do universo estudado, enquanto a vizinhança é o ambiente circundado que interage com o sistema.

Os autores Aguiar e Costa (2017) citam que o estudo da Termodinâmica no início do século XIX, era realizado por meio de considerações sobre a força motriz do calor, ou seja, apenas a capacidade dos corpos quentes de produzir trabalho é que eram relevantes, entretanto, atualmente a finalidade desses estudos é mais abrangente, tratando essencialmente da energia e das relações entre as propriedades da matéria, ressaltando que a Termodinâmica é ao mesmo tempo um ramo da Física e das ciências da Engenharia.

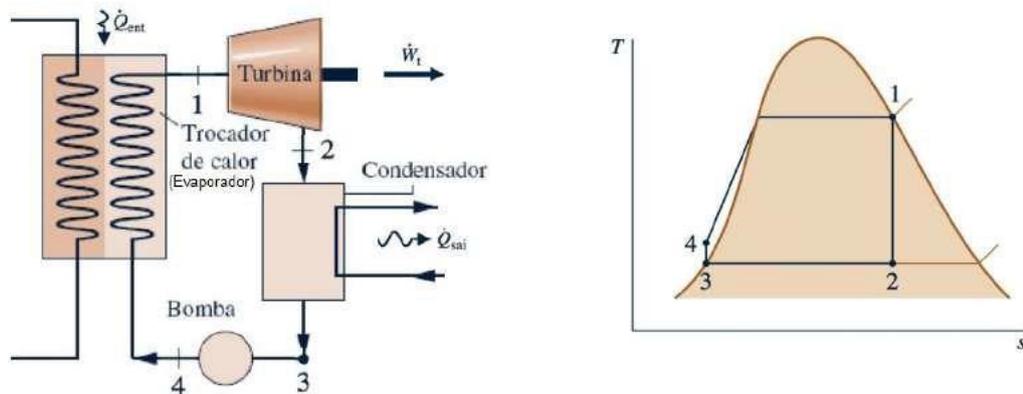
Os ciclos de potência são sistemas termodinâmicos que descrevem a conversão de calor em trabalho em máquinas que produzem energia mecânica, elétrica ou outras formas de energia útil. São fundamentais em aplicações que envolvem geração de energia, como usinas de energia elétrica, motores de combustão interna e turbinas.

Dentre os ciclos de potência, o ciclo Rankine é um dos mais fundamentais e amplamente aplicados na engenharia, desafiando as fronteiras da eficiência energética e contribuindo para a produção de eletricidade e o funcionamento de sistemas de energia em todo o mundo. O ciclo Rankine é muito utilizado em usinas de energia a vapor, sendo baseado na conversão de trabalho mecânico usando água como fluido de trabalho.

Entretanto, os ciclos termodinâmicos convencionais baseados a vapor sofrem um fator limitante quanto ao estado termodinâmico do vapor na saída da turbina. A água sendo utilizada como fluido de trabalho, ao final do ciclo, ao passar pelo redutor de pressão, tem uma parte de seu vapor voltando ao estado líquido, umedecendo as palhetas do condensador, diminuindo sua eficiência e, com o passar do tempo, criando erosões nas pás das turbinas.

Na figura 1, podemos ver como funciona o Ciclo Rankine Orgânico e como é o seu diagrama de temperatura e entropia.

Figura 1: Ciclo Rankine Orgânico e Gráfico Temperatura x Entropia (T-s)



Fonte: Avaliação térmica de um ciclo Rankine orgânico alimentado por energia solar.

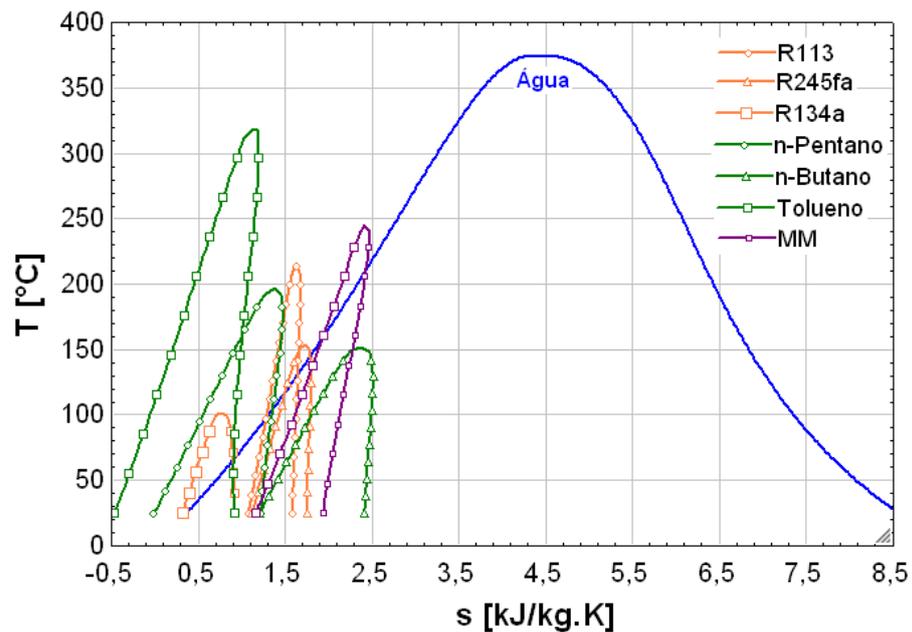
Neste trabalho o objeto de estudo será o Ciclo Rankine Orgânico (ORC – *Organic Rankine Cycle*), uma variação do ciclo Rankine, que utiliza fluidos orgânicos ao invés de água como fluido de trabalho. Esta alteração permite que o ciclo de potência tenha uma maior gama de aplicações, principalmente na recuperação de calor de baixa e média temperatura, onde o ciclo Rankine convencional não seria eficaz, além de conseguir produzir energia sustentável e limpa.

O sistema ORC é mais utilizado em situações em que ocorre a geração de energia a partir de calor de baixa temperatura, devido a esse sistema ser eficiente em converter calor em energia mesmo quando a diferença de temperatura entre a fonte quente e a fonte fria é relativamente baixa. O ORC pode ser aplicado em situações como:

- Energia Geotérmica, devido a temperatura das fontes geotérmicas muitas vezes não serem altas o suficiente para implementação de um ciclo Rankine convencional.
- Biomassa e resíduos sólidos, onde em instalações de biomassa e na queima de resíduos sólidos, o ORC pode converter o calor gerado durante o processo de combustão em eletricidade, tornando o processo mais eficiente e sustentável.
- Cogeração e CHP (*Combined Heat and Power*): o ORC é frequentemente usado em sistemas de cogeração (produção simultânea de eletricidade e calor) e sistemas de CHP, onde o calor residual do processo industrial ou da geração de eletricidade é aproveitado para fins térmicos, aumentando ainda mais a eficiência do sistema, utilizando do calor excedente do sistema para gerar ainda mais energia.

Os fluidos orgânicos neste ciclo desempenham um papel fundamental, uma vez em que eles são usados como meio de transferência de calor e atuam como intermediários entre a fonte de calor (por exemplo, calor geotérmico, solar ou de uma fonte excedente) e o ciclo termodinâmico. Esses fluidos orgânicos possuem propriedades diferentes das da água, com pontos de evaporação mais baixos e dificuldades de retornarem à forma líquida após o processo de queda de pressão.

Figura 2: Curvas de Saturação para fluidos orgânicos, de refrigeração e água.



Fonte: Análise Termodinâmica de sistemas de geração do tipo Rankine orgânico acoplados a concentradores solares.

Segundo a COGEN Portugal (2011), um fluido de trabalho adequado a um ORC deverá possuir algumas características, como: baixa toxicidade, boa estabilidade, pouco inflamável, pouco corrosível, compatibilidade com o material da tubagem e equipamento de expansão utilizado e não causar incrustações.

A escolha do tipo de fluido orgânico é de extrema importância, pois cada fluido orgânico possui uma característica termodinâmica específica (por exemplo, a entalpia, a vaporização, a capacidade calorífica e a condutividade térmica) que afetará diretamente na eficiência do ciclo, resultando em maior ou menor eficiência na geração de energia.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Atualmente, a geração de energia sustentável se tornou uma prioridade global, devido ao grande aumento da demanda energética das cidades e a preocupação com o futuro do planeta. À medida em que a sociedade se move em direção a fontes de energia mais limpas e tecnologias mais eficientes, o mundo todo estará obtendo um progresso econômico e sustentável.

Nos últimos anos, o governo brasileiro vem apoiando o incentivo ao aumento do uso de energia limpa e sustentável. Desde 2004, passou a ocorrer uma reestruturação no setor de energia com o aumento constante do uso da biomassa, diversificando a produção de energia (Tolmasquim, 2016). O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) destaca que em 2018 no Brasil, a produção de energia elétrica oriunda dos produtos energéticos da biomassa foi de 54,4 mil GWh, o que representou 9% de toda a energia elétrica produzida no Brasil.

Conforme o Plano Nacional de Energia (PNE) para 2030 no Brasil, grande parte das termelétricas a carvão mineral atualmente em operação usam o ciclo de Rankine e que entre 1902 e 1932, no mundo todo, a eficiência da transformação térmica dessas usinas saltou de 3,7% para 16,5%. O PNE ainda cita que por volta de 1965, essa tecnologia atingiu seu apogeu, com eficiência aproximada de 33% (dados provindos do Centro de eficiência energética e energia renovável da Universidade de Massachusetts).

Contudo, o ciclo Rankine tradicional possui alguns problemas com relação à sua operação, sendo o principal deles a formação de água no estado líquido nas lâminas da turbina, devido à redução de pressão e temperatura. O ciclo Rankine orgânico surge como uma alternativa, pois ao utilizar fluidos orgânicos como fluido de trabalho, este problema não é detectado, uma vez que os fluidos orgânicos não condensam tão facilmente com a redução de pressão e temperatura.

Outro ponto a se destacar dos fluidos orgânicos é o baixo ponto crítico que eles possuem, o que os tornam altamente voláteis, mesmo sendo fornecidas baixas quantidades de calor. Sendo assim, através dessas características é possível que os fluidos orgânicos sejam empregados em ciclos termodinâmicos que operam com baixas fontes de calor, como fontes de energia solar, biomassa e até mesmo fontes residuais de calor, como gases quentes provenientes de algum processo de combustão.

De acordo com Sotomonte (2015), a eficiência desses ciclos está entre 10 – 20%, o que faz as pesquisas sobre esses sistemas serem sobre uma cogeração, da qual além de gerar eletricidade, fornecem energia térmica utilizando equipamentos termicamente ativados e/ou trocadores de calor, aumentando a eficiência global do sistema e reduzindo os custos de

geração. Ele ainda cita que em trabalhos mais recentes, foram analisadas diferentes estratégias de operações de um sistema de cogeração baseado no ciclo ORC, mostrando que sob os inventivos atuais não é conveniente fazer o uso racional da energia primária, como biomassa, uma vez que economicamente é mais viável maximizar a produção de energia elétrica, com eficiência em torno de 15%, ao invés da cogeração com uma eficiência em torno de 80%.

Sotomonte (2015) ainda cita que de forma geral pode-se definir que diversos fatores, como incertezas nos custos de investimentos; discrepância nas eficiências das diferentes configurações do ciclo, custo da biomassa; venda de eletricidade; entre outros, conduzem a resultados e tomadas de decisão diferentes.

A justificativa da escrita deste trabalho se dá no ponto em que atualmente já se sabe o quão valoroso é o estudo do ORC e os impactos positivos que ele gera, principalmente no que se diz respeito à cogeração de energia. Desta forma, não se pode deixar de lado os estudos da utilização dos fluidos orgânicos e qual a eficiência dos mesmos neste ciclo.

## **2 OBJETIVOS**

Este trabalho tem como objetivo principal a determinação da eficiência energética de diferentes fluidos por meio de simulações realizadas com uma extensão do software CoolProp integrada ao ambiente do Excel. A análise comparativa dos resultados visa identificar qual fluido apresenta a maior eficiência com os parâmetros impostos ao ciclo termodinâmico.

Como objetivos secundários:

- O estudo da ferramenta CoolProp para obtenção de dados sobre fluidos orgânicos;
- A demonstração da primeira lei da Termodinâmica para volumes de controle em regime permanente;
- A comparação do ciclo Rankine orgânico ao ciclo Rankine convencional;

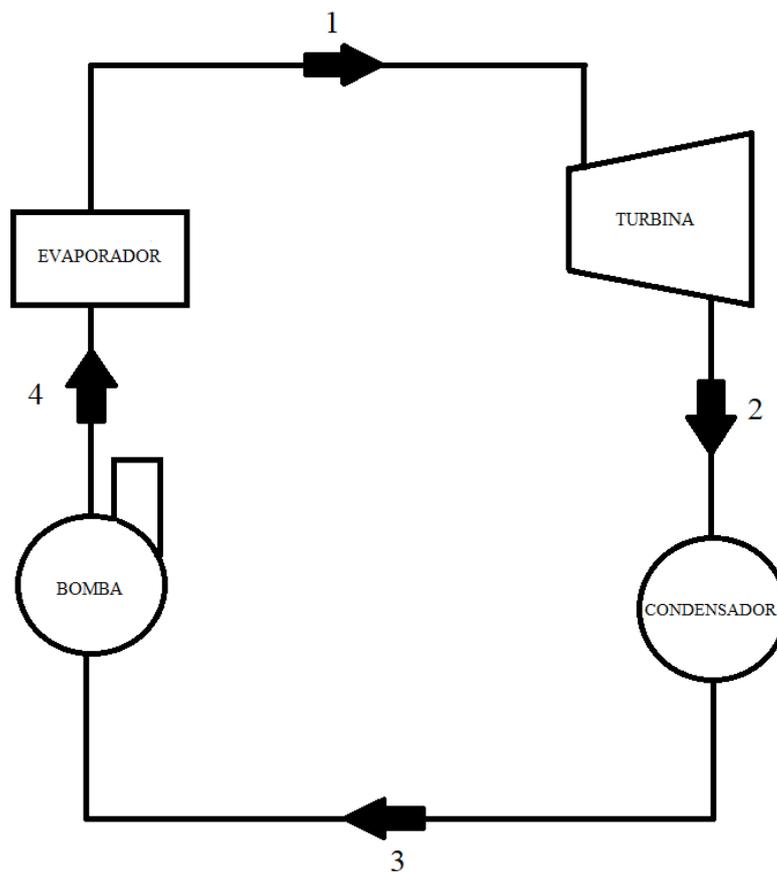
Assim, a presente pesquisa visa não apenas determinar o fluido mais eficiente em termos de eficiência energética, mas também oferecer uma compreensão aprofundada dos princípios termodinâmicos subjacentes, bem como contextualizar a importância do ciclo Rankine orgânico no cenário de sistemas de geração de energia.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Análise termodinâmica e parâmetros utilizados

O ciclo termodinâmico deste trabalho compõe-se em um evaporador, uma turbina, um condensador e uma bomba. O fluido de trabalho, em seu estado líquido e sob alta pressão, passa por um processo de aquecimento e vaporização no evaporador. Posteriormente, o fluido, já na fase de vapor, é direcionado para a turbina, onde passa por um processo de expansão. Nesta etapa, parte de sua energia térmica é convertida em trabalho. O vapor, agora à baixa pressão, deixa a turbina e escoo para o condensador, onde é resfriado até atingir sua temperatura de saturação. Neste dispositivo, o fluido passa por um processo de condensação, resultando na formação de líquido saturado. Por fim, a bomba eleva a pressão do líquido até a pressão máxima do ciclo e o direciona para o evaporador, reiniciando o ciclo.

Figura 3: Esquema do Ciclo Rankine analisado



Fonte: Próprio Autor.

Para a análise do ciclo, foi necessário estabelecer algumas simplificações para a simulação computacional, com o intuito de aperfeiçoar a comparação dos fluidos, e de avaliar qual fluido obteve a melhor eficiência no ciclo. As hipóteses consideradas foram as seguintes:

- O ciclo, e conseqüentemente seus dispositivos. operam em regime permanente;
- Não há perda de calor para o ambiente nas tubulações;
- A turbina e a bomba foram consideradas adiabáticas e isentrópicas;
- Não há perda de carga nos dutos e no escoamento entre dispositivos;
- Nos trocadores de calor, ocorre apenas troca de calor entre os fluidos;
- Não há variação da energia potencial e da energia cinética do fluido de trabalho ao longo do ciclo;
- O fluido de trabalho na saída do evaporador encontra-se como vapor saturado;
- Todos os dispositivos que compõem o ciclo possuem apenas uma seção de entrada e uma seção de saída.

Decidiu-se, por questão de simplicidade e tempo, por realizar uma análise de 1ª Lei da Termodinâmica nos dispositivos que compõem o Ciclo Rankine Orgânico. De modo geral, a 1ª Lei aplicada à volumes de controle operando em regime permanente é dada por:

$$\dot{Q}_{liq,e} - \dot{W}_{liq,s} = \sum_s \dot{m} \cdot \left( h + \frac{v^2}{2} + g \cdot z \right) - \sum_e \dot{m} \cdot \left( h + \frac{v^2}{2} + g \cdot z \right) \quad (1)$$

Como os ciclos possuem operação com vazão mássica constante é comum analisar as suas grandezas específicas, ou seja. por unidade de massa. Deste modo, a equação da 1ª Lei da Termodinâmica pode ser alterada para:

$$q_{liq,e} - q_{liq,s} = \sum_s \left( h + \frac{v^2}{2} + g \cdot z \right) - \sum_e \left( h + \frac{v^2}{2} + g \cdot z \right) \quad (2)$$

Aplicando a 1ª Lei nos dispositivos que compõem o Ciclo Rankine Orgânico, juntamente com as hipóteses simplificadoras, encontram-se as seguintes relações:

- Evaporador:

$$q_e = h_1 - h_4 \quad (3)$$

- Turbina:

$$w_s = h_1 - h_2 \quad (4)$$

- Condensador:

$$q_s = h_2 - h_3 \quad (5)$$

- Bomba:

$$w_e = h_4 - h_3 \quad (6)$$

Nota-se pelas equações anteriores que as quantidades de calores e trabalhos específicos do ciclo são funções das entalpias específicas do fluido de trabalho.

Outro parâmetro importante para a avaliação de um ciclo de potência, como é o caso do Ciclo Rankine Orgânico, é a sua eficiência térmica, o qual é definido por:

$$\eta_t = 1 - \frac{q_s}{q_e} \quad (7)$$

### 3.2 Software CoolProp

A metodologia utilizada foi a de análise de fluidos orgânicos através do software CoolProp. Esse software possui uma biblioteca com uma ampla gama de dados precisos e confiáveis relacionados às propriedades físicas de diversos fluidos, além de ser um software de código aberto, o que lhe possibilita ter atualizações e melhorias constantes pela comunidade de cientistas e desenvolvedores. Um aspecto desse software é que ele pode ser integrado em várias linguagens de programação, incluindo Python, C++, MATLAB, Excel, entre outras.

Em seu funcionamento, o CoolProp utiliza algoritmos termodinâmicos avançados e dados experimentais confiáveis para garantir alta precisão em seus cálculos, o que é fundamental para aplicações práticas, simulações industriais e designe de protótipos. Resumidamente, esse software desempenha um papel fundamental na Termodinâmica, fornecendo muitos parâmetros e resultados próximos dos que são vistos na prática, assim, justificando sua utilização neste trabalho, sendo utilizado como extensão para o *Excel*.

Esse software foi utilizado nesse trabalho com o objetivo de ter acesso aos valores de entalpia e entropia dos fluidos, assim como outros dados necessários para que os cálculos fossem realizados da maneira mais próxima da realidade. A função utilizada foi a “=PropSI”, função que permite acessar propriedades termodinâmicas dos fluidos de trabalho. Através dessa função foi possível calcular a entropia (s) e entalpia (h) dos fluidos selecionados.

Figura 4: Exemplo do uso da função para encontrar a entalpia da água.

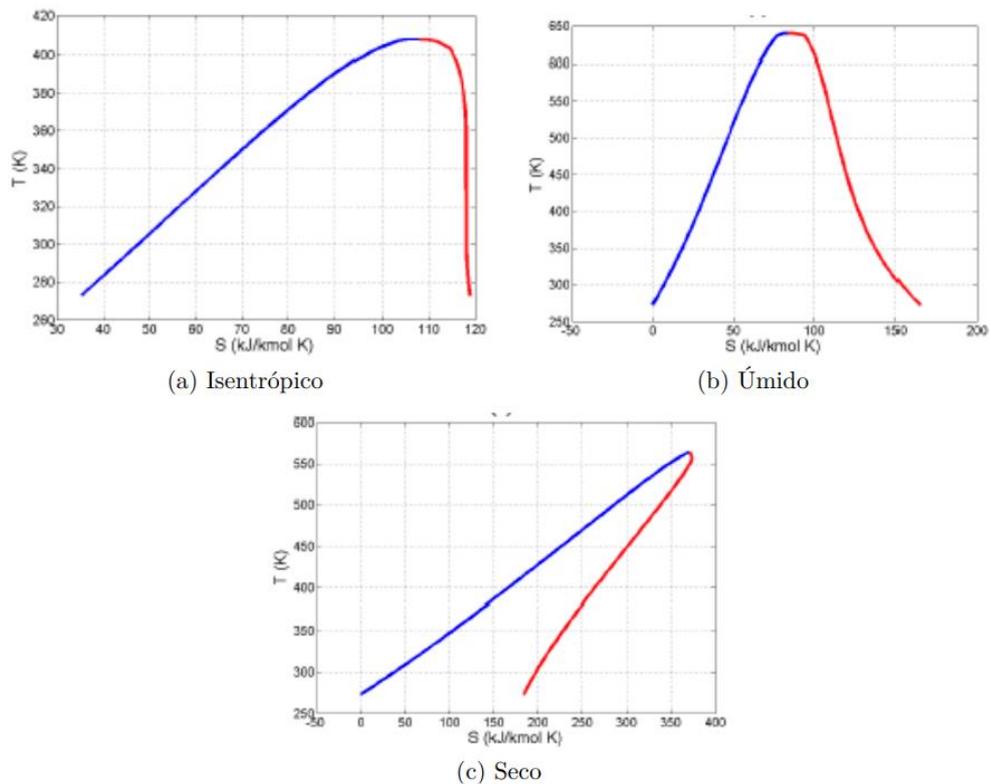
	A	B	C
1	=PropsSI("H"; "T"; 300; "P"; 101,325; "WATER")		

Fonte: Próprio Autor

### 3.3 Comparação dos fluidos utilizados

Em conformidade com o que Sotomonte (2015) descreve em seu trabalho, pode-se classificar os fluidos de trabalho utilizados nos ciclos de potência em função da curva de vapor saturado, sendo os fluidos denominados secos apresentando uma inclinação positiva na curva de saturação do vapor, os fluidos úmidos tendo uma inclinação negativa e os fluidos isentrópicos possuindo uma inclinação infinita ou quase infinita da curva.

Figura 5: Comparação dos tipos de fluidos de trabalho



Fonte: Sotomonte apud Santos (2018).

Sotomonte (2015) ainda complementa que os fluidos secos e isentrópicos apresentam melhores eficiências quando comparados com os fluidos úmidos, entretanto, a seleção do tipo de fluido deve ser estudada não somente com essas afirmações, mas também deve ser levado em consideração as restrições de suas escolhas, principalmente relacionadas com as propriedades termodinâmicas, influência na saúde, segurança e impacto social. Outras propriedades termofísicas, como pressão crítica, temperatura crítica, massa específica, calor latente de vaporização, calor específico, condutividade térmica, entre outras, também devem ser avaliadas no momento de selecionar o fluido de trabalho.

Alguns requisitos foram aplicados para que a seleção dos fluidos fosse a melhor possível para realizar a análise, sendo eles:

- Dar preferência para hidrocarbonetos, por serem de estrutura molecular mais simples e baixo custo;
- Utilizar um fluido não enquadrado em nenhum dos quesitos para fins comparativos;

Por conta destas características, os fluidos selecionados foram todos hidrocarbonetos, os quais possuem baixo custo, estabilidade química, menor impacto ambiental e maior segurança. Os fluidos de trabalho utilizados neste trabalho estão listados na Tabela 1.

Tabela 1: Fluidos selecionados

<b>Fluido</b>
Água
n-Butano
n-Hexano
n-Pentano

Fonte: Próprio Autor.

#### 4 RESULTADOS

A imposição de condições de temperatura e de pressão máxima e mínima do ciclo, são de extrema importância para o bom funcionamento do sistema. Estabelecer limites definidos para as variáveis termodinâmicas no ciclo é essencial para otimizar o desempenho global do sistema e garantir sua eficiência operacional. Neste trabalho, a temperatura e a pressão máxima e mínima, desempenharam papéis cruciais para determinar outras variáveis e assim, obter a eficiência de cada fluido de trabalho no ciclo.

A Tabela 2 apresenta os parâmetros utilizados como base para o Ciclo Rankine Orgânico analisado.

Tabela 2: Parâmetros estabelecidos do ciclo.

<b>Valores críticos</b>		<b>Fluidos</b>	<b><math>P_{sat}</math> (Pa) a 50°C (323 K)</b>
<b><math>T_{max}</math> (K)</b>	420	Água	12260,29936
<b><math>P_{max}</math> (Pa)</b>	1500000	Butano	493817,1068
<b><math>T_{min}</math> (K)</b>	323	Heptano	18762,82231
		Pentano	158546,7585

Fonte: Próprio Autor

Para aferir as propriedades físicas termodinâmicas de interesse em cada um dos pontos que compõem o Ciclo Rankine Orgânico, foi necessário alimentar o CoolProp com informações referentes à duas propriedades físicas já conhecidas sobre o ponto, estabelecendo assim o seu estado de equilíbrio termodinâmico.

No ponto 1, utilizou-se como parâmetros de entrada a temperatura e o título do fluido para determinar a entalpia e entropia de todos os fluidos, uma vez que essas duas grandezas medem, respectivamente, a quantidade de energia em um sistema e o grau de aleatoriedade do sistema, ou seja, através dela é possível verificar se o fluido de trabalho é seguro e se está ou não sendo eficaz dentro do sistema.

Mediante a isso, os valores apresentados na Tabela 3, representam os dados de entrada do CoolProp e os dados que foram obtidos através deles para o Ponto 1.

Tabela 3: Dados de entrada e dados obtidos para o Ponto 1.

Dados de Entrada no CoolProp		Dados Obtidos pelo CoolProp		
Temperatura ( $T_1$ ) [K]	Título ( $Q_1$ )	Fluidos	Entalpia ( $h_1$ ) [J/kg]	Entropia ( $s_1$ ) [J/(kg.K)]
420	1 (vapor saturado)	Água	2742094	6865,63
		n-Butano	739878	2476,13
		n-Heptano	407988	989,396
		n-Pentano	529386	1362,42

Fonte: Próprio Autor

Na análise do ponto 2, seria necessário que os fluidos estivessem à pressão de saturação com a temperatura mínima do sistema (323 K) por diversos fatores, por exemplo, se o fluido estiver abaixo dessa temperatura, ele pode ter uma condensação prematura no sistema, diminuindo a eficiência do ciclo, entretanto, se o fluido de trabalho ainda estiver em saturação na menor temperatura do sistema, o fluido maximiza a eficiência na troca de calor, e portanto, a eficiência do ciclo.

As propriedades físicas do ponto 2 estão dispostas na Tabela 4, na qual se observa que apenas a água está na região de saturação com a temperatura mínima do sistema, enquanto os demais fluidos encontram-se na região de vapor superaquecido.

Tabela 4 Dados de entrada e dados obtidos para o Ponto 2.

Dados de Entrada no CoolProp		Dados Obtidos pelo CoolProp			
Pressão ( $P_2 = P_{sat}$ ) [Pa]	Entropia ( $s_2 = s_1$ ) [J/(kg.K)]	Fluidos	Temperatura ( $T_2$ ) [K]	Título ( $Q_2$ ) Se houver	Entalpia ( $h_2$ ) [J/kg]
12260,29936	6865,628096	Água	323	0,83569951	2199609,212
493817,1068	2476,131424	n-Butano	328,6349922		667317,6534
18762,82231	989,3963098	n-Heptano	369,0027169		316923,0875
158546,7585	1362,422124	n-Pentano	356,2122423		442502,7867

Fonte: Próprio Autor

No Ponto 3, as propriedades físicas de entrada são a temperatura mínima do sistema e o Título igual a 0, que indica que o fluido no estado de líquido saturado.

Analisando a Tabela 5, pode-se ver os resultados obtidos para a pressão na saída do condensador, que é de extrema importância para saber como o fluido de trabalho chegará ao fim do ciclo, quanto mais próxima a pressão estiver na saída do condensador, da pressão da entrada da turbina, maior será a eficiência do ciclo.

Tabela 5: Dados de entrada e dados obtidos para o Ponto 3.

Dados de Entrada no CoolProp		Dados Obtidos pelo CoolProp			
Temperatura ( $T_3$ ) [K]	Título ( $Q_0$ )	Fluidos	Entalpia ( $h_3$ ) [J/kg]	Entropia ( $s_3$ ) [J/(kg.K)]	Pressão ( $P_3$ ) [Pa]
323	0 (líquido saturado)	Água	208714,4533	701,8672336	12260,29936
		n-Butano	322123,7925	1407,719217	493817,1068
		n-Heptano	-118788,3701	-341,8952505	18762,82231
		n-Pentano	33172,88963	104,6481834	158546,7585

Fonte: Próprio Autor

Já na Tabela 6, verifica-se com os valores de entrada, obtidos através da tabela 5, sendo eles a entropia ( $s_3$ ) e a pressão ( $P_4$ ), os resultados para a saída da bomba, sendo a entalpia e a temperatura os parâmetros analisados para eficiência do ciclo, a entalpia sendo de extrema importância para verificar o trabalho realizado pela bomba e a temperatura para evitar a cavitação, fenômeno que ocorre quando a pressão do fluido cai abaixo da pressão de vapor, resultando na formação de bolhas de vapor que podem danificar a bomba. Monitorar a temperatura ajuda a garantir que a pressão seja mantida suficientemente alta para evitar a cavitação.

Tabela 6: Dados de entrada e dados obtidos para o Ponto 4.

Dados de Entrada no CoolProp		Dados Obtidos pelo CoolProp		
Entropia ( $s_4=s_3$ ) [J/(kg.K)]	Pressão ( $P_4 = P_{max}$ ) [Pa]	Fluidos	Entalpia ( $h_4$ ) [J/kg]	Temperatura ( $T_4$ ) [K]
701,8672336	1500000	Água	210219,6894	323,0531438
1407,719217		n-Butano	323975,5146	323,5530648
-341,8952505		n-Heptano	-116540,3585	323,4075218
104,6481834		n-Pentano	35422,10771	323,5318919

Fonte: Próprio Autor

Após a obtenção dos resultados das entropias, entalpias, pressões, temperaturas e título dos fluidos durante os processos do ciclo, determinou-se por meio das equações de (3) a (7) os valores dos trabalhos específicos ( $w$ ) e de calores por unidade de massa ( $q$ ). Além disso, também foi aferida a eficiência energética do ( $\eta_i$ ).

Tabela 7: Valores dos Trabalhos Específicos, Calores por unidade de massa e Eficiência Térmica do Ciclo para os Fluidos analisados.

Fluido	$q_e$ [J/kg]	$w_s$ [J/kg]	$q_s$ [J/kg]	$w_e$ [J/kg]	$\eta_t$ [%]
Água	2531873,913	542484,3907	1990894,758	1505,236143	21,36674942
Butano	415902,796	72560,65711	345193,861	1851,722101	17,00131273
Heptano	524527,9496	91064,50346	435711,4576	2248,011507	16,93265193
Pentano	493963,8189	86883,13996	409329,897	2249,218074	17,13362774

Fonte: Próprio Autor

Observando os resultados obtidos na Tabela 7, a melhor alternativa de fluido, matematicamente, seria a água, entretanto, o único fluido que na seção de saída da turbina se encontra na região de saturação, é de extrema importância que as lâminas sejam frequentemente monitoradas para possíveis manutenções, devido aos problemas que ela causará a longo prazo, o que não acontece com os outros fluidos que se encontram ainda como vapores superaquecidos.

## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi explorado detalhadamente a utilização do ciclo Rankine orgânico, uma variante inovadora do ciclo Rankine tradicional. Este ciclo desempenha um papel crucial em sistemas de geração de energia e é fundamental para a busca de soluções mais eficientes e sustentáveis. Durante as simulações foi possível de se observar os diversos parâmetros que influenciam na eficiência do ciclo, atentando-se sempre para utiliza-los de maneira que nos ajudem a encontrar o melhor fluido de trabalho.

Os estudos de caso e análise dos fluidos nos levaram a resultados interessantes, vendo que nas condições impostas, a água, apesar de ser prejudicial às lâminas da bomba, foi o fluido de trabalho que obteve a maior taxa de eficiência energética nas simulações do CoolProp, entretanto, os fluidos orgânicos não necessitam de tanta energia para continuarem em seus estados de saturação e, em média, perderam apenas em 4% em eficiência térmica em relação a água, e que, a longo prazo, e com menores temperaturas, possam ser comparáveis ou até mesmo superiores a água, em relação a eficiência térmica, podendo também ser utilizados em sistemas de cogeração de energia, aumentando ainda mais suas vantagens de uso.

## REFERÊNCIAS

AGUIAR, Costa et al. **Termodinâmica aplicada**. 2017. Disponível em: <[http://livresaber.sead.ufscar.br:8080/jspui/bitstream/123456789/2762/1/TS\\_MonicaLopes\\_TermodinamicaAplicada.pdf](http://livresaber.sead.ufscar.br:8080/jspui/bitstream/123456789/2762/1/TS_MonicaLopes_TermodinamicaAplicada.pdf)>. Acesso em: 15/10/2023 às 16:00.

**Análise Termodinâmica de Sistemas de Geração do tipo Rankine Orgânico acoplados a Concentradores Solares** - Scientific Figure on ResearchGate. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/311678476\\_Analise\\_Termodinamica\\_de\\_Sistemas\\_de\\_Geracao\\_do\\_tipo\\_Rankine\\_Organico\\_acoplados\\_a\\_Concentradores\\_Solares](https://www.researchgate.net/publication/311678476_Analise_Termodinamica_de_Sistemas_de_Geracao_do_tipo_Rankine_Organico_acoplados_a_Concentradores_Solares)>. Acesso em: 22/10/2023 às 19:23.

**AVALIAÇÃO TÉRMICA DE UM CICLO RANKINE ORGÂNICO ALIMENTADO POR ENERGIA SOLAR** - Scientific Figure on ResearchGate. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/figure/Figura-8-Ciclo-Rankine-organico-e-sua-representacao-no-diagrama-T-s\\_fig3\\_363269114](https://www.researchgate.net/figure/Figura-8-Ciclo-Rankine-organico-e-sua-representacao-no-diagrama-T-s_fig3_363269114)>. Acesso em: 19/10/2023 às 18:47.

BELANDI, Caio. **PRODUTOS DA BIOMASSA REPRESENTARAM 9% DA ENERGIA ELÉTRICA DO PAÍS EM 2018**. Editora: Geociências. Disponível em: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/32507-produtos-da-biomassa-representaram-9-da-energia-eletrica-do-pais-em-2018>>. Acesso em: 18/10/2023 às 17:21.

**COGEN PORTUGAL. CICLOS ORGÂNICOS DE RANKINE**, 28p. 2011. Disponível em: <[https://www.cogenportugal.com/docs/v/128/1b4df4\\_brochura\\_cor.pdf](https://www.cogenportugal.com/docs/v/128/1b4df4_brochura_cor.pdf)>. Acesso em: 22/10/2023 às 19:21.

DOS SANTOS, Renata Maia Almeida. **CONFIGURAÇÃO DE UM CICLO RANKINE ORGÂNICO DE 5 KW E DIMENSIONAMENTO TÉRMICO DE SEU CONDENSADOR**. 2018. Disponível em: <<https://engenharias.macaue.ufrj.br/images/testetcc/2018/TCC-Renata-Engenharia-Mec%C3%A2nica-Corrigido.pdf>>. Acesso em: 04/11/2023 às 14:32.

IDE, EDUARDO MOREIRA. **ANÁLISE COMPARATIVA DE UM CICLO RANKINE ORGÂNICO DE ACORDO COM DIFERENTES FLUIDOS DE TRABALHO**. 2019. Disponível em: <[http://engenharias.macaue.ufrj.br/images/testetcc/2019/MEU-TCC\\_-\\_Eduardo\\_Ide\\_Versao\\_P%C3%B3s\\_Banca.pdf](http://engenharias.macaue.ufrj.br/images/testetcc/2019/MEU-TCC_-_Eduardo_Ide_Versao_P%C3%B3s_Banca.pdf)>. Acesso em: 04/11/2023 às 22:33.

### **PLANO NACIONAL DE ENERGIA 2030.**

Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-165/topico-173/PNE%202030%20-%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20Termel%C3%A9trica%20\(Carv%C3%A3o%20Mineral\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-165/topico-173/PNE%202030%20-%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20Termel%C3%A9trica%20(Carv%C3%A3o%20Mineral).pdf)>. Acesso em: 18/10/2023 às 18:26.

SOTOMONTE, César Adolfo Rodriguez. **Otimização Multiobjetivo para a seleção de fluidos de trabalho e parâmetros de projeto no Ciclo Rankine Orgânico**. 2015. 116 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015. Disponível em: <<https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/128>>. Acesso em: 19/10/2023 17:34.

TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno. **Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética (Epe), 2016. 417 p.  
Disponível em: <<https://observatoriodaenergia.wordpress.com/2020/11/12/energia-termelétrica-gas-natural-biomassa-carvao-nuclear/>>. Acesso em: 18/10/2023 às 13:23.