



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA  
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE BOM JESUS DA LAPA  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANDRESSA DE SOUZA GOMES**

**ANÁLISE COMPARATIVA DE CICLOS RANKINE ORGÂNICO  
REGENERATIVO E BÁSICO**

**BOM JESUS DA LAPA**

**2023**

ANDRESSA DE SOUZA GOMES

**ANÁLISE COMPARATIVA DE CICLOS RANKINE ORGÂNICO  
REGENERATIVO E BÁSICO**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao curso de Engenharia Mecânica, do Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa, da Universidade Federal do Oeste da Bahia, para obtenção do título de graduada em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Me. Anderson Breno Souza

**BOM JESUS DA LAPA**

**2023**

## FICHA CATALOGRÁFICA

---

G633

Gomes, Andressa de Souza

Análise comparativa de Ciclos Rankine Orgânico Regenerativo e Básico.  
/ Andressa de Souza Gomes. – 2023.

49f.: il.

Orientador: Prof. Me. Anderson Breno Souza

TCC - Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Oeste da Bahia. Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa - BA, 2023.

1. Engenharia Mecânica. I. Souza, Anderson Breno. II. Universidade Federal do Oeste da Bahia – Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa - BA. III. Título.

CDD 620.1

---

**Biblioteca Universitária de Bom Jesus da Lapa – UFOB**

**ANDRESSA DE SOUZA GOMES**

**ANÁLISE COMPARATIVA DE CICLOS RANKINE ORGÂNICO  
REGENERATIVO E BÁSICO**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao curso de Engenharia Mecânica, do Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa, da Universidade Federal do Oeste da Bahia, para obtenção do título de graduada em Engenharia Mecânica.

Bom Jesus da Lapa, 18 de julho de 2023.

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo:

---

**Prof. Me. Anderson Breno Souza, Presidente**

**Universidade Federal do Oeste da Bahia**

---

**Prof. Dr. André Issao Sato**

**Universidade Federal do Oeste da Bahia**

---

**Prof. Me. Iuri Benedito da Silva Santos**

**Universidade Federal do Oeste da Bahia**

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus avós, Melquíades, Alziro (in memoria) e minhas duas avós Marias (uma in memoria), dedico essa vitória a vocês.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me guiado e me sustentado até aqui.

Aos meus pais, Edeilton e Maria Cecília, minha eterna gratidão. Agradeço pelo apoio durante todo esse período de graduação, por serem meus maiores incentivadores e por nunca medirem esforços para a realização deste sonho. Muito obrigada por todo cuidado e amor dispensados a mim.

A minha irmã Vanessa, agradeço por todo conselho, ajuda e palavra de incentivo durante esses anos e ao meu irmão André, obrigada pelo apoio e carinho de sempre. Vocês foram fundamentais neste processo. Amo vocês!

A meu namorado, Mateus, obrigada por todo apoio, carinho e pela compreensão nos momentos em que estive ausente (que não foram poucos). Agradeço por todo amor e por ser minha calma nos momentos mais difíceis. Amo você!

As minhas amigas, Milena, Érica e Gêssica agradeço pelo tempo que compartilharam comigo ao longo dessa jornada e por torna-la mais leve. As minhas primas, amigas do Campo Seco, da Vila Presidente Vargas e de Brumado, obrigada por torcerem e vibrarem com essa conquista.

Aos meus avós agradeço por todo carinho e pelas orações. E aos meus familiares que testemunharam essa caminhada agradeço por toda ajuda e por torcerem por mim.

Aos meus professores da Engenharia Mecânica, por compartilharem seus conhecimentos, experiências e conselhos ao longo das aulas e nos corredores da UFOB contribuindo assim, para minha formação profissional e pessoal. Em especial ao meu orientador, prof. Me. Anderson Breno Souza, pelos conhecimentos compartilhados, paciência e por acreditar em mim. E aos membros dessa banca, meu muito obrigada!

A minha querida Power Jr., pela experiência e pelos amigos que fiz nestes anos e que levarei para vida.

A Universidade Federal do Oeste da Bahia, pelos momentos vividos e pelos amigos aqui conquistados.

Enfim, a todos aqueles que sempre me apoiaram, oraram e estiveram ao meu lado durante todos esses anos. Muito obrigada!

## RESUMO

GOMES, Andressa de Souza. Análise comparativa de Ciclos Rankine Orgânico Regenerativo e Básico. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Oeste da Bahia, Bom Jesus da Lapa, 18 de julho de 2023.

Diante do contexto energético atual vemos a necessidade da utilização de fontes de energia renováveis visto que, ainda hoje, a maior parte da geração de energia é proveniente de energias não renováveis e causa danos como a emissão de gases do efeito estufa (GEE). O Ciclo Rankine Orgânico (CRO) é uma ótima alternativa para a geração de energia a partir de fontes renováveis. O CRO é um ciclo de potência que consiste em transformar calor em energia mecânica para gerar energia elétrica utilizando um fluido de trabalho orgânico. Neste trabalho, foi desenvolvida uma modelagem de dois ciclos Rankines um ciclo básico e um com regeneração e a partir da primeira Lei da Termodinâmica foram realizadas as modelagens de cada componente do ciclo. Para a modelagem foi utilizado o software Engineering Equation Solver (EES). Os fluidos utilizados na modelagem foram fluidos orgânicos escolhidos a partir da literatura. Após a análise comparativa dos dois ciclos foi constatado que o ciclo com regeneração possui maiores eficiências em relação ao ciclo básico. E que os fluidos com temperatura crítica acima de 300°C apresentam maiores eficiências, porém baixa pressão de condensação o que não os tornam viáveis. Os fluidos que apresentaram maiores eficiência no ciclo com regeneração foram o tolueno e o ciclopentano com 31,14% e 24,44% respectivamente.

**Palavras-chave:** Ciclo Rankine Orgânico Regenerativo. Fluido de Trabalho. Modelagem Termodinâmica.

## ABSTRACT

Given the current energy context, we see the need to use renewable energy sources since, even today, most of the energy generation comes from non-renewable energies and causes damage such as the emission of greenhouse gases (GHG). The Organic Rankine Cycle (ORC) is a great alternative for generating energy from renewable sources. The ORC is a power cycle that consists of transforming heat into mechanical energy to generate electric energy using an organic working fluid. In this work, a modeling of the two Rankine cycles: one basic cycle and one with regeneration, and the Thermodynamics Law First were realized for the modeling of each cycle component. For modeling, the software Engineering Equation Solver (EES) was used. The fluids used in the modeling were organic fluids chosen from the literature. After the comparative analysis of the two cycles, it was found that the regeneration cycle has higher efficiencies in relation to the basic cycle. And that fluids with a critical temperature above 300° C have higher efficiencies but low condensation pressure which does not make them viable. The fluids that presented greater efficiency in the regeneration cycle were toluene and cyclopentane with 31,14% and 24,44%, respectively.

**Keywords:** Regenerative Organic Rankine Cycle. Working fluid. Thermodynamic Modeling.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Ilustração do CROR com os principais componentes do sistema.	16
Figura 2. Comparação da matriz energética brasileira entre os anos 2020 e 2021.	18
Figura 3. Participação de renováveis na matriz energética do Brasil e do mundo.	19
Figura 4. Visualização esquemática do CRO.	20
Figura 5. Diagrama T-s do fluido de trabalho (a) Isentrópico, (b) Seco, (c)Úmido.	22
Figura 6. Parâmetros adotados para o sistema.	25
Figura 7. Visualização esquemática do CRO.	26
Figura 8. T-s de um Ciclo Rankine Orgânico Básico.	27
Figura 9. Esquema do CRO regenerativo.	29
Figura 10. Diagrama Temperatura- entropia (T-s) do CROR.	30
Figura 11. Pressão x eficiência do CROB.	35
Figura 12. Pressão x eficiência do CROR.	36
Figura 13. Pressão x trabalho líquido do CROB.	37

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros adotados para o sistema.	25
Tabela 2. Fluidos pré-selecionados.	32
Tabela 3. Comparação dos dados da modelagem desenvolvida.	34
Tabela 4. Pressão de trabalho dos ciclos modelados.	34
Tabela 5. Eficiência para o CROB.	37
Tabela 6. Eficiência para o CROR.	38

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BEN	Balanço Energético Nacional
CRO	Ciclo Rankine Orgânico
CROB	Ciclo Rankine Orgânico Básico
CROR	Ciclo Rankine Orgânico Regenerativo
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ESS	Engineering Equation Solver
GEE	Gases de Efeito Estufa
GWP	Potencial de Aquecimento Global
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MME	Ministério de Minas e Energia
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
ODP	Destruição da Camada de Ozônio
T-s	Temperatura- entropia

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\dot{Q}$	Taxa de Transferência de Calor	[W. s <sup>-1</sup> ]
$\dot{m}$	Vazão mássica	[kg/s]
$h$	Entalpia	[kJ.kg <sup>-1</sup> ]
$\frac{v^2}{2}$	Energia Cinética	[J]
$gz$	Energia Potencial	[J]
$\dot{W}$	Potência	[kW]
$\frac{dE}{dt}$	Taxa de Variação da Energia.	[W]
$T$	Temperatura	[°C]
$s$	Entropia	[kJ.K <sup>-1</sup> ]
$\eta$	Eficiência	-
$W$	Trabalho	[kJ]

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Justificativa .....	15
1.2	Objetivo geral .....	15
1.2.1	Objetivos específicos.....	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1	Estado da arte.....	16
2.2	Referencial teórico .....	17
2.2.1	Contexto Energético .....	17
2.2.2	Ciclo Rankine Orgânico .....	19
2.2.3	Ciclo Rankine Orgânico Regenerativo.....	21
2.2.4	Fluido de trabalho.....	21
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	24
3.1	Hipóteses do modelo.....	24
3.2	Arranjos Ciclo Rankine Orgânico.....	25
3.2.1	Ciclo Rankine Orgânico Básico (CROB).....	26
3.2.1.1	Modelagem termodinâmica.....	26
3.2.2	Ciclo Rankine Orgânico Regenerativo (CROR) .....	28
3.2.2.1	Modelagem termodinâmica.....	29
3.3	Seleção do Fluido de Trabalho .....	31
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	34
4.2	Pressões do procedimento.....	34
4.3	Análise dos ciclos com variação da Pressão .....	35
4.4	Máximas eficiências .....	37
5	CONCLUSÃO .....	39
	REFERÊNCIAS .....	40
	APÊNDICE A .....	45

## 1 INTRODUÇÃO

Um dos desafios da sociedade nos dias atuais é a redução da emissão dos gases causadores do efeito estufa (GEE), tendo em vista, que o aumento do consumo de energia elétrica resultante do crescimento populacional e industrial influencia nas emissões desses gases. (VARGA; CSABA, 2018). A maior parte da energia produzida no mundo é proveniente de recursos não renováveis, sendo em sua maioria gerada a partir dos combustíveis fósseis, um dos grandes causadores dos problemas para o aquecimento global e para as mudanças climáticas (CHEN; LI; LE, 2016).

Estudos na área energética estão cada vez mais constantes devido ao crescimento econômico e a necessidade da substituição de energias não renováveis por energias renováveis cujos sistemas sejam mais eficientes energeticamente, além de ecologicamente mais sustentáveis na conversão de calor. Para a substituição dos combustíveis fósseis existem as fontes de energia renováveis como solar, eólica e biomassa (HOJJAT MOHAMMADI; AMERI, 2014, SARKAR, 2016, LIU; SHAO; LI, 2011).

No Brasil, a geração de energia elétrica em centrais de serviço público e autoprodutor cresceu 3,9% em 2021 com relação a 2020. Sua maior fonte de geração de energia vem das hidrelétricas que representa 53,4% da matriz energética, no entanto, existem outras fontes renováveis que vem crescendo e ganhando força no país como as energias vindo da biomassa, da eólica e da solar. Juntas, no ano de 2021, elas representaram 21,3% da matriz energética brasileira. Nos últimos 18 anos, a participação das renováveis na matriz energética brasileira manteve-se crescente, com valores superiores a 40%, o que já é um grande desafio para o Brasil que possui um dos maiores percentuais de energias renováveis do mundo (EPE, 2022).

A biomassa é uma das alternativas de energia renovável que tem sido cada vez mais usada para produzir energia elétrica. No Brasil, a sua participação na produção de energia elétrica representa 8,2% da matriz energética brasileira. Sua maior produção está relacionada à biomassa agrícola, tendo em vista que ela evita a emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Além disso, o uso da biomassa é viável devido a sua elevada disponibilidade, pois ela pode ser oriunda do cultivo de várias culturas, de resíduos das plantas, resíduos industriais orgânicos, resíduos domésticos orgânicos, pela silvicultura, entre outros (EPE, 2022; CHUAH, 2006; DRESCHER, BRUGGEMANN, 2007; MCKENDRV, 2002).

Neste contexto de produção com fontes de energias renováveis surgem também sistemas que acompanham essa nova tecnologia e são capazes de converter essas fontes em eletricidade, a exemplo de alguns ciclos termodinâmicos. O Ciclo Rankine Orgânico (CRO) tem essa característica, ele é um ciclo termodinâmico para geração de potência que pode ser movido por fontes de calor renováveis como a radiação solar, queima da biomassa, energia geotérmica ou calor residual de processos (QUOILIN, 2013).

Nos últimos anos o CRO vem se tornando uma tecnologia promissora para a transformação de energia elétrica devido a sua simplicidade, confiabilidade, adaptabilidade a várias fontes de calor e baixo custo (YU *et al.*, 2016; SARKAR, 2016). O princípio de funcionamento de um CRO é bem semelhante à de um Ciclo Rankine Convencional, a diferença entre eles consiste na fonte de calor e no fluido de trabalho, que para o CRO é fluido orgânico. Os equipamentos para o funcionamento são os mesmos para ambos os ciclos, basicamente, bomba, o evaporador (ou caldeira), turbina e o condensador. A bomba pressuriza o fluido líquido até o evaporador (ou caldeira) que produz vapor e se expande na turbina normalmente conectada a um gerador e por fim o vapor de saída é condensado, iniciando um novo ciclo (VARGA; CSABA, 2018).

A seleção ideal do fluido de trabalho para um CRO depende principalmente das duas propriedades termofísicas: temperatura e pressão. Também deve ser analisado no fluido a inflamabilidade e toxicidade, seu potencial para a destruição da camada de ozônio e para o aquecimento global e a sua vida útil na atmosfera. Além disso, é importante selecionar o fluido que não venha apresentar perigo aos componentes do ciclo de trabalho como corrosão e formação de gotículas nas turbinas (VARGA; CSABA, 2018).

Com o intuito de melhorar a eficiência do Ciclo Rankine Básico (CROB) é possível realizar algumas alterações em sua estrutura como acrescentar um aquecedor de alimentação, superaquecer o fluido de trabalho, aumentar a pressão, tornar o fluido de trabalho subcrítico, subcrítico superaquecido e regenerativo transcrito entre outras soluções, com isso, existem inúmeras possibilidades de alterar um CRO (MAGO *et al.*, 2008).

Dentre as opções mais comumente investigadas uma das mais utilizadas é a adição de um recuperador que é utilizado para pré-aquecer o fluido antes da entrada no evaporador sendo aquecido com o calor do vapor na saída do expensor (BRAIMAKIS; KARELLAS, 2018).

## **1.1 Justificativa**

O Ciclo Rankine Orgânicos é uma ótima alternativa para transformar energia elétrica a partir de fontes de energia renováveis. Dessa forma, o presente trabalho visa comparar dois arranjos de CRO's um ciclo básico e um com regeneração, utilizando fluidos de trabalhos adequados para aplicações em fontes térmicas de alta temperatura como, a biomassa. Para isso, é necessário aplicar a Primeira Lei da Termodinâmica e assim, encontrar parâmetros ideais para obtenção de melhores condições de funcionamento.

## **1.2 Objetivo geral**

Realizar simulação de dois Ciclos Rankine Orgânicos um básico e um regenerativo utilizando fluidos de trabalho de alta temperatura de evaporação e assim, comparar os resultados utilizando a Primeira Lei da Termodinâmica entre os arranjos.

### **1.2.1 Objetivos específicos**

- Definir o arranjo do Ciclos Rankine Orgânico Regenerativo a ser utilizado;
- Modelar termodinamicamente, todos os dispositivos do sistema dos ciclos determinados;
- Analisar os arranjos para diversos fluidos de trabalho;
- Verificar o melhor arranjo de acordo com a eficiência e o trabalho líquido do ciclo.

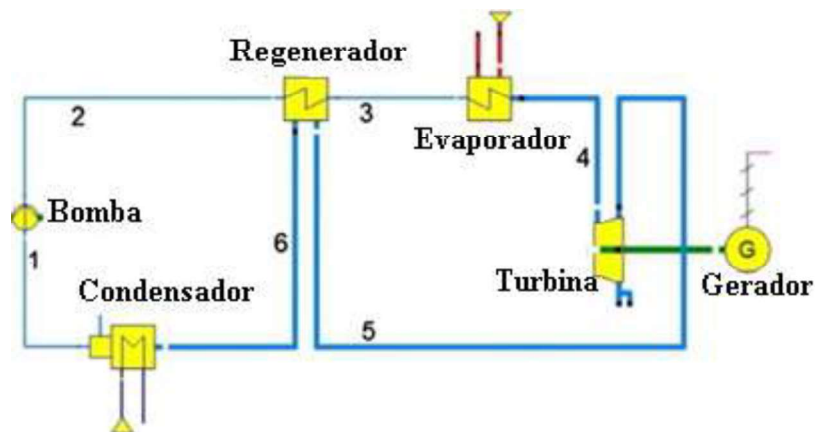
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é abordado o estado da arte e o referencial teórico em que, são apresentados estudos na área do Ciclo Rankine Orgânicos seu funcionamento e os fluidos a serem trabalhados.

### 2.1 Estado da arte

Javanshir, Sarunac e Razzaghpanah (2017), estudaram um CROR com cinco processos termodinâmicos apresentados na Figura 1, sendo eles: o aumento de pressão na entrada do evaporador, evaporação, expansão na turbina (expansor) condensação e pré-aquecimento da saída da bomba pela saída da turbina (regeneração). No estudo foram analisados CRO regenerativo subcrítico com e sem superaquecimento e concluíram que quando há um aumento da eficiência térmica do ciclo há também um aumento da temperatura máxima quando deixado a temperatura mínima constante. Foram utilizados apenas fluidos secos.

Figura 1. Ilustração do CROR com os principais componentes do sistema.



Fonte: Adaptado de Javanshir, Sarunac, Razzaghpanah (2017).

Feng *et al.* (2020) desenvolveram um protótipo de um CROB e outro regenerativo para comparação entre ambos e concluíram que ao implementar um Ciclo Rankine Orgânico Regenerativo (CROR) há uma maior eficiência térmica, mas um desempenho econômico pior, no entanto, adicionar um regenerador pode não melhorar o desempenho do CRO visto que, o regenerador aumenta a pressão de saída do expansor resultando na diminuição de potência do eixo do expansor.

Li *et al.* (2013) realizam o estudo para um sistema de 10 kW utilizando o R123 como fluido de trabalho. Os autores concluíram com os dados experimentais que a eficiência do CROR é de 7,98%, cerca de 1,83% superior à de um CROB. Drescher e

Bruggemann (2007) também realizaram um estudo comparativo de CROR e CROB e constataram que a eficiência térmica do CROR é máxima quando o valor da pressão do regenerador é menor do que a pressão mais baixa do ciclo.

Braimakis e Karellas (2018) realizaram um estudo comparativo com três arranjos diferentes de CROR e notaram que os arranjos regenerativos funcionam de forma significativa melhor com fluidos mais seco e que eles não são recomendados quando há uma limitação na temperatura de saída do evaporador da fonte de calor.

Outro estudo comparativo com arranjos de CROB e CROR foi realizado por Zang *et al.* (2019) ao fazerem análises entre os dois ciclos os autores concluem que a eficiência térmica aumenta com o aumento da temperatura de ebulição (TE) para ambos os sistemas. No entanto, a eficiência térmica do CROR ultrapassa gradativamente a do CROB com o aumento do TE. Dessa forma, os autores concluem que o CROB é recomendado para fontes de calor de baixa temperatura, enquanto para fontes de calor de alta temperatura, CROR é recomendado por sua maior eficiência térmica.

Com os estudos realizados observa-se que tornar um CRO básico um ciclo com regeneração pode ser uma boa alternativa para aumentar a eficiência do ciclo principalmente para ciclos com alta temperatura que é o caso de ciclos que utilizam a biomassa como fonte de calor.

## **2.2 Referencial teórico**

Nesta seção é apresentado o contexto energético, princípio de funcionamento de um Ciclo Rankine Orgânico Básico e com Regeneração e os tipos de fluidos de trabalho a serem selecionados.

### **2.2.1 Contexto Energético**

Uma das grandes preocupações do século são as mudanças climáticas (BONDARIK; PILATTI; HORST, 2018). No atual cenário ambiental vemos as inúmeras consequências causadas pelo aquecimento global e com as emissões dos Gases de Efeito Estufa (GEE), essa última, tendo como seu maior agravamento o uso de combustíveis fósseis como fonte de energia (BORGES, 2017).

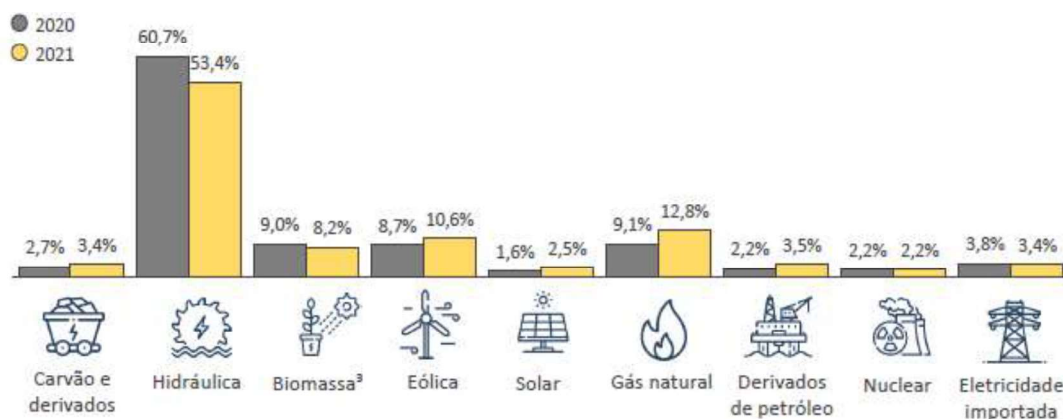
O avanço da tecnologia e novos hábitos implementados na sociedade demanda cada vez mais um maior consumo de energia elétrica. (DUPONT; GRASSI; ROMITTI 2015). Com o aumento mundial do consumo de energia, aumenta-se também a busca por energias renováveis, visando diminuir os efeitos causados pela emissão dos Gases de

Efeito Estufa, sendo necessário a busca por fontes alternativas para geração de energia elétrica (SANTOS; NASCIMENTO; ALVES, 2017).

Segundo Dupont, Grassi e Romitti (2015), o interesse comum da sociedade em buscar novas fontes de energias vem sendo impulsionado com a comunidade científica que realiza pesquisas e desenvolve estratégias para o aproveitamento de fontes alternativas de energias, menos poluentes e que reduzem o impacto causado ao meio ambiente.

Essa tendência vem sendo verificada na prática por meio de uma maior contribuição de energias renováveis na matriz energética mundial e brasileira. Na Figura 2 observa-se a matriz energética brasileira.

Figura 2. Comparação da matriz energética brasileira entre os anos 2020 e 2021.



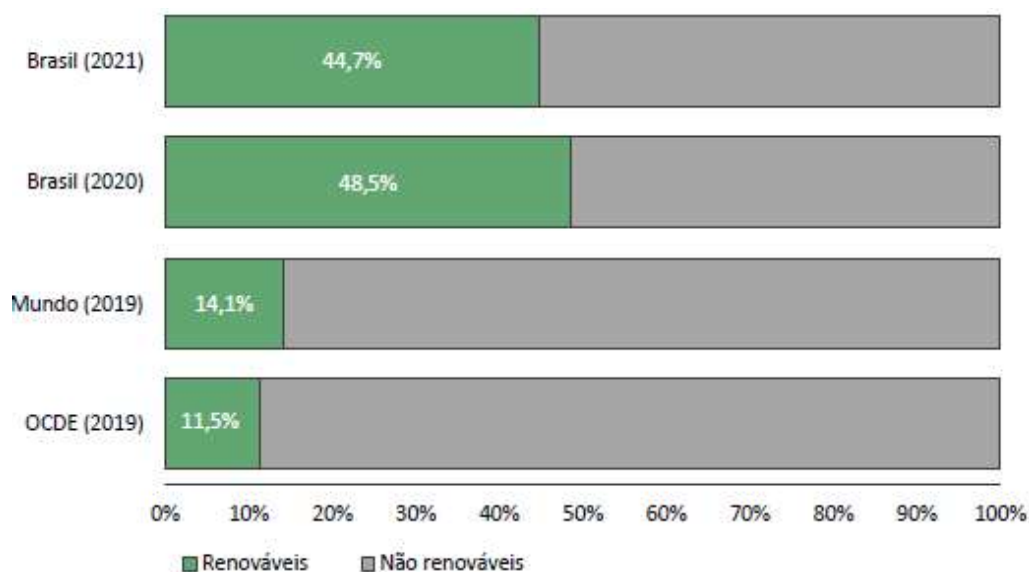
Fonte: EPE (2022).

De acordo com os dados levantados pelo Balanço Energético Nacional (BEN), relatório fornecido anualmente pelo Ministério de Minas e Energia, em 2021 houve um aumento na oferta interna de energia elétrica em relação ao ano anterior, 2020. Na participação das energias renováveis na matriz energética houve uma queda na produção da energia hidráulica no país em relação ao ano anterior devido as fortes secas, por outro lado, verificou-se um aumento das fontes eólica, solar e gás natural contribuindo assim para que o Brasil mantivesse um patamar de 44,7% de energias renováveis muito superior ao observado no restante do mundo, os dados estão apresentados na Figura 3.

Dessa forma, o setor elétrico brasileiro emitiu em média 118,5 kg CO<sub>2</sub> para produzir 1 MWh valor abaixo quando se comparado aos valores da China, Estados Unidos e União Europeia, este valor corresponde a 15% do que é emitido pelo setor elétrico

chinês e corresponde a 27% e 37% dos valores emitidos pelo Estados Unidos e União Europeia, respectivamente (EPE, 2022).

Figura 3. Participação de renováveis na matriz energética do Brasil e do mundo.



Apesar do crescimento da energia eólica ter tido um percentual maior em relação ao crescimento da energia proveniente da biomassa, ainda assim, a biomassa é uma boa alternativa para substituir os combustíveis fósseis uma vez que ela é menos agressiva ao meio ambiente, visto que, possui menos carbono, mais oxigênio e evita a emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Além disso, ela é a única fonte de energia renovável que pode ser convertida diretamente em produtos de alto valor (bioenergia e biocombustíveis) em qualquer forma (sólida, líquida ou gasosa) usando a tecnologia de conversão termoquímica (CHUAH *et al.*, 2006; DEMIRBAS, 2001).

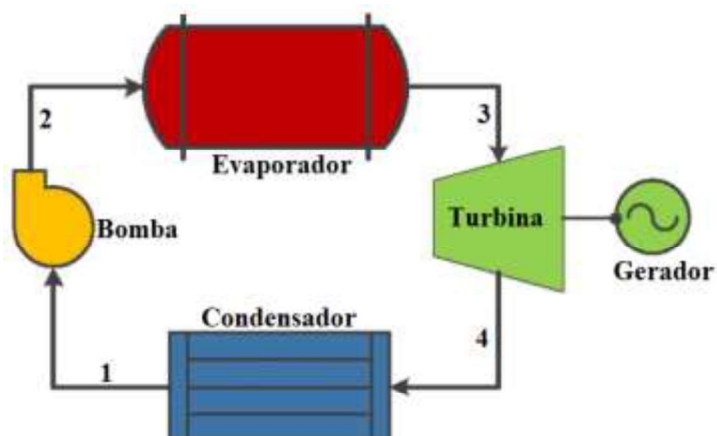
### 2.2.2 Ciclo Rankine Orgânico

O Ciclo Rankine Orgânico (CRO) é um ciclo termodinâmico que converte calor em energia mecânica para gerar energia elétrica e utiliza como fluido de trabalho um fluido orgânico (MIFTAH, 2022).

Um CRO básico é composto por quatro equipamentos: bomba, caldeira, turbina e condensador e existem quatro processos diferentes, a compressão isentrópica, o fornecimento de calor à pressão constante, expansão isentrópica e rejeição de calor (ÇENGEL; BOLES, 2013).

O método de utilização do CRO é bem similar do Ciclo Rankine convencional, pois são comuns seus processos (vaporização de um líquido a alta pressão, expansão para uma menor pressão, condensação do vapor a baixa pressão). Por possuir os mesmos processos, o CRO possui os mesmos equipamentos de um Ciclo Rankine convencional sendo, de maneira básica, um evaporador conhecido também como trocador de calor, dispositivo de expansão ou turbina, condensador e bomba, o modelo esquemático de um CRO é apresentado na Figura 4 (QUOILIN, 2013).

Figura 4. Visualização esquemática do CRO.



Fonte: Adaptado de Rahbar *et al.* (2017).

O que difere um ciclo do outro é o fluido de trabalho. O CRO utiliza como fluido de trabalho um fluido orgânico, ao invés da água como é utilizado no Ciclo Rankine convencional. Os fluidos orgânicos possuem menores temperaturas evaporação que a da água, isso faz com que ele eleve a eficiência do ciclo, além, de permitir a geração de energia a partir de fontes térmicas de baixas temperaturas (DRESCHER, BRUGGEMANN, 2007).

Devido a utilização dos fluidos orgânicos, o CRO torna-se mais adequado em relação ao Ciclo Rankine convencional devido a disponibilidade de energias renováveis utilizadas como fontes de calor além, de serem menos prejudicial ao meio ambiente. Outras vantagens para a instalação do CRO são: o baixo custo com a manutenção devido aos seus equipamentos não estarem expostos a altas temperaturas. Alta versatilidade em termos de fontes de calor como a solar, geotérmica, biomassa e também possui a capacidade de recuperar o calor residual de processos (calor que de outra forma é desperdiçado). Uma vez que ajuda na conversão do desperdício de calor em eletricidade sendo proveitoso para um melhor uso de energia primária. Tendo a biomassa como o

quarto maior recurso energético do mundo ela se torna bastante atrativa para ser usado como fonte de calor de um CRO (QUOILIN, 2013; RAHBAR *et al.*, 2017; MEKHILEF *et al.*, 2011).

### 2.2.3 Ciclo Rankine Orgânico Regenerativo

Com a Primeira e Segunda Lei da Termodinâmica é possível avaliar o desempenho de um CRO sob diversas condições de trabalho para diversos fluidos orgânicos. Existem diferentes formas de mudar um CRO básico em busca de uma maior eficiência. É possível superaquecer o fluido de trabalho, aumentar a pressão, reaquecer o fluido, acrescentar um aquecedor de alimentação, o fluido pode tornar-se subcrítico, superaquecido, saturado entre outras soluções, existem inúmeras possibilidades de alterar um CRO (MAGO *et al.*, 2008).

Segundo Fernández, Prieto e Suárez (2011), os ciclos superaquecidos possuem maior eficiência térmica do que os ciclos saturados e os ciclos supercríticos apresentam menores eficiências em relação aos ciclos regenerativos saturados para o mesmo fluido. Para qualquer uma que seja as configurações do ciclo para a análise é necessário levar em consideração as condições de estado estacionário, condensador, queda de pressão na caldeira, eficiências isentrópicas para a turbina e bombas (MAGO *et al.*, 2008).

De acordo com Pei, Li e Ji (2010) e Mago *et al.* (2008) o CRO com regeneração produz maior eficiência em relação ao CRO básico, ao mesmo tempo que reduz a quantidade de calor residual necessária para produzir a mesma energia com irreversibilidade. Para Goodarzi e Soltani (2015) incluir um processo de reaquecimento no CRO regenerativo convencional melhora o desempenho térmico do ciclo. Um arranjo de CROR bastante utilizado em pesquisas nos últimos anos é apresentado na Figura 1.

### 2.2.4 Fluido de trabalho

A seleção do fluido de trabalho é de grande importância para o desempenho do CRO uma vez que, ele influencia nos resultados e na eficiência do sistema sendo que, uma má escolha poderá resultar em prejuízos. (CHATZOPOULO; MARKIDES, 2018).

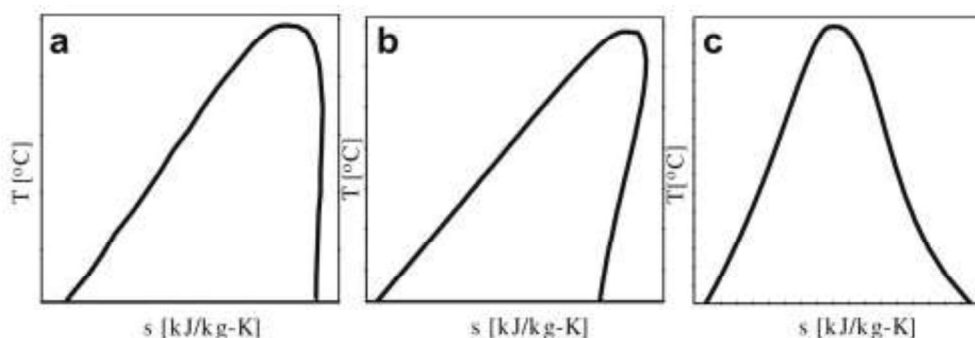
Para selecionar o fluido de trabalho orgânico deve-se levar em consideração vários parâmetros a serem analisados como: propriedades termodinâmicas, uma vez que o CRO regenerativo é significativamente afetado pelas propriedades termo físicas do fluido de trabalho, além, da compatibilidade com os materiais utilizados, aspectos de segurança,

saúde e meio ambiente, disponibilidade e bom custo (JAVANSHIR; SARUNAC; RAZZAGHPANAH, 2017).

Outros dois parâmetros que devem ser analisados para a seleção do fluido e para o cálculo da eficiência térmica são as temperaturas máximas e mínimas do processo (DRESCHER, BRUGGEMANN, 2007). De acordo com Hung (2001) boas propriedades termodinâmicas resultariam em sistemas de alta eficiência e baixa custo.

Uma das primeiras análises a ser realizada para a seleção do fluido de trabalho é o diagrama de temperatura- entropia (T-s), os fluidos podem ser caracterizados em fluidos secos, isentrópicos e úmidos. Os fluidos secos possuem inclinação da curva de vapor saturado positiva, os isentrópicos possuem a inclinação da curva de vapor saturado igual a zero, e os fluidos úmidos possuem a curva de vapor saturado negativa, como mostrado na Figura 5. Sendo que, os fluidos secos e isentrópicos são mais indicados em relação aos fluidos úmidos, pois, os fluidos úmidos ao serem aquecidos podem deixar partículas líquidas nos componentes dos ciclos e causar danos (RAHBAR *et al.*, 2017).

Figura 5. Diagrama T-s do fluido de trabalho (a) Isentrópico, (b) Seco, (c) Úmido.



Fonte: Adaptado de Kuo et al., 2011.

Além disso, outras propriedades termo físicas a serem analisadas e discutidas são:

- Temperatura Crítica: uma vantagem é possuir a temperatura crítica próximo da temperatura máxima da fonte de calor (INVERNIZZI; IORA; SILVA, 2007).
- Estabilidade térmica: Manter estabilidade térmica sob temperaturas elevadas é importante para que não haja a decomposição dos fluidos orgânicos e assim não cause corrosão nem danos nos equipamentos (RAHBAR *et al.*, 2017).
- Impactos ambientais: Um dos empecilhos de se usar compostos orgânicos é o impacto que eles causam a camada de ozônio. Dessa forma a seleção do fluido de

trabalho deve seguir padrões de proteção ambiental que não degradem a camada de ozônio e nem afete o aquecimento global (RAHBAR *et al.*, 2017).

- Segurança: Deve-se avaliar aspectos de segurança e saúde dando preferências a fluidos orgânicos não tóxico, não inflamáveis, não corrosivos e que não seja perigosos, para assim, garantir a segurança não apenas de quem opera o ciclo, mas de todos que estão ao redor (RAHBAR *et al.*, 2017).
- Compatibilidade do material: Os fluidos devem apresentar características compatíveis com a dos materiais usados nos componentes do CRO dessa forma não podem apresentar características corrosivas (RAHBAR *et al.*, 2017).
- Viscosidade: É vantajoso terem fluidos com baixa viscosidade, porque assim irão ajudar a reduzir as perdas por atritos nos equipamentos e tubos do ciclo (RAHBAR *et al.*, 2017).
- Custo e disponibilidade: É recomendável também selecionar fluidos disponíveis no mercado além disso analisar o seu custo em que deve ser compatível com o orçamento do projeto (RAHBAR *et al.*, 2017).

Diante dos parâmetros citados para a seleção do fluido de trabalho orgânico não deve ser considerado apenas um critério. Para ciclos que utilizam a biomassa como fonte de calor é recomendados fluidos com altas temperaturas críticas (QUOILIN, 2013).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão abordados os procedimentos a serem adotados para a realização da modelagem nos arranjos dos CRO's. Para as análises neste trabalho serão utilizados dois arranjos de Ciclo Rankine Orgânico Regenerativo e um Ciclo Rankine Orgânico Básico. Para cada componente do ciclo será aplicado a Primeira Lei afim, de encontrar o calor adicionado ou rejeitado do ciclo e a eficiência do sistema.

#### 3.1 Hipóteses do modelo

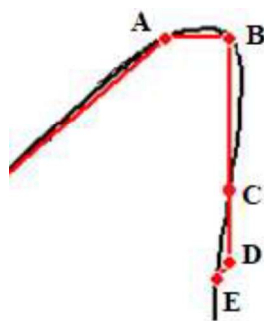
Para o desenvolvimento deste trabalho foi realizado a modelagem termodinâmica dos Ciclos Rankine Orgânico utilizando o *Software Engineering Equation Solver* (EES) versão estudante.

Para as configurações dos ciclos foram adotadas as seguintes condições: sem queda de pressão no evaporador e no condensador como adotado por Mago *et al.* (2008) e eficiências isentrópicas para a turbinas e bombas de 85% (GAO *et al.*, 2018).

Foi adotado um limite superior da pressão de evaporação definido como  $0,9 \cdot \text{Pressão crítica do fluido}$  para evitar que o fluido de trabalho não ultrapasse a pressão crítica (LI *et al.*, 2018) e também foi aplicado um procedimento na modelagem utilizando o EES de forma, que o título na entrada na turbina seja igual a um, de forma a evitar líquidos na expansão deixando o fluido como saturado na entrada da tubina. Então, ao realizar a modelagem a pressão máxima é travada em  $0,9 \cdot \text{Pressão crítica}$  porém, nem todos os fluidos terá essa pressão visto que, ao adotar o título igual a um na entrada da turbina a pressão de alguns fluidos poderá ser menor.

Na Figura 6 temos a ilustração do processo em um recorte do diagrama temperatura- entropia (T-s) caso o fluido tenha um comportamento traçados entre os pontos B-D é calculado uma nova pressão máxima limitada a  $0,9 \cdot \text{Pressão crítica}$  de forma que o título da turbina seja um, dessa forma, o fluido terá uma nova pressão máxima representada no ponto C da figura de modo que na entrada da turbina seja vapor saturado.

Figura 6. Parâmetros adotados para o sistema.



Fonte: Autora (2023).

Papadopoulos, Stijepovic e Linke (2010) adotaram uma temperatura mínima de 35° C para o fluido de trabalho e disseram que a temperatura de condensação deve ser próxima a temperatura ambiente. Neste trabalho também foi adotado a temperatura de condensação de 35° C e a pressão do condensador é a mesma pressão do estado inicial da bomba.

Na Tabela 1 são apresentados alguns parâmetros que foram adotados para este trabalho com base nas literaturas citadas.

Tabela 1. Parâmetros adotados para o sistema.

Parâmetros	Valor	Unidade
Temperatura de condensação	35 <sup>1</sup>	° C
Pressão de evaporação	0,9P <sub>crítica</sub> <sup>2</sup> / procedimento	kPa
Eficiência isentrópica da bomba e turbina	85 <sup>3</sup>	%
Efetividade do regenerador	80 <sup>4</sup>	%

Fonte: <sup>1</sup>Papadopoulos, Stijepovic e Linke (2010); <sup>2</sup>Li *et al.* (2018); <sup>3</sup>Gao *et al.* (2018); <sup>4</sup>Douartzides *et al.* (2022).

Foi realizado a modelagem do Ciclo Rankine Básico e do Ciclo Rankine com Regeneração afim de realizar um comparativo do trabalho líquido gerado, do calor gerado e da eficiência do sistema.

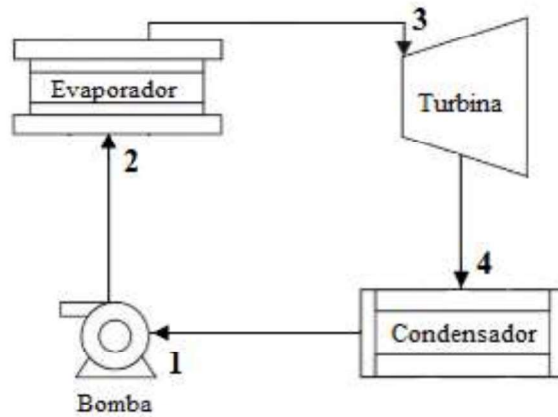
### 3.2 Arranjos Ciclo Rankine Orgânico

Foi realizado a modelagem em dois arranjos de Ciclo Rankine Orgânico.

### 3.2.1 Ciclo Rankine Orgânico Básico (CROB)

O CROB modelado é apresentado na Figura 7 e é composto por quatro equipamentos: bomba, evaporador, turbina e condensador.

Figura 7. Visualização esquemática do CRO.



Fonte: Adaptado de Rahbar *et al.* (2017).

Os processos que compõem o ciclo do CROB da Figura 7 são:

Processo 1-2: Compressão isentrópica em uma bomba para elevação da pressão;

Processo 2-3: Fornecimento de calor a pressão constante em um trocador de calor;

Processo 3-4: Expansão isentrópica na turbina;

Processo 4-1: Rejeição de calor a pressão constante.

#### 3.2.1.1 Modelagem termodinâmica

Para a modelagem termodinâmica do CROB foi aplicado a primeira Lei da Termodinâmica em todos os componentes dos ciclos, conforme apresentada na Equação 1 (ÇENGEL; BOLES, 2013):

$$\dot{Q} + \sum \dot{m}_e \left( h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) = \sum \dot{m}_s \left( h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) + \dot{W} + \frac{dE}{dt} \quad (1)$$

Sendo:

$\dot{Q}$  é a taxa de transferência de calor;

$\dot{m}_e$  e  $\dot{m}_s$  são as vazões mássicas que entram e saem do volume de controle;

$h_e$  e  $h_s$  são entalpias respectivas as massas;

$\frac{v_e^2}{2}$  e  $\frac{v_s^2}{2}$  são as energias cinéticas do sistema;

$gz_e$  e  $gz_s$  são as energias potenciais do sistema;

$\dot{W}$  é a potência relacionada ao trabalho sobre ou realizado pelo volume de controle;

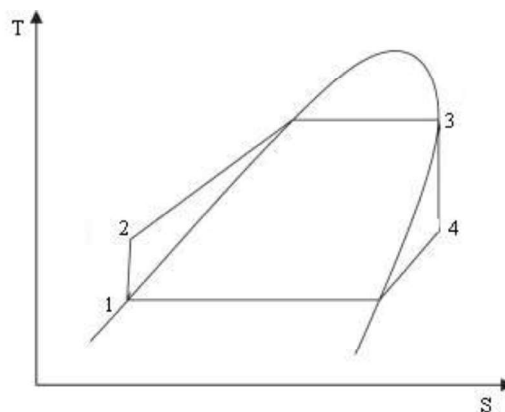
$\frac{dE}{dt}$  é a taxa de variação da energia.

Considerando que é um processo permanente em estado estacionário e que as variações de energia cinética, energia potencial e a taxa de variação da energia do sistema são desprezíveis a primeira Lei para um volume de controle é expressa da seguinte maneira:

$$\dot{Q} + \sum \dot{m}_e h_e = \sum \dot{m}_s h_s + \dot{W} \quad (2)$$

A Figura 8 representa o diagrama de temperatura- entropia (T-s) de um CROB genérico.

Figura 8. T-s de um Ciclo Rankine Orgânico Básico.



Fonte: Adaptado de Rayegan e Tao, 2011.

Aplicando a Primeira Lei nos dispositivos empregados no ciclo para calcular a quantidade de calor e trabalho em cada dispositivo. A transferência de calor e o trabalho do ciclo são expressões em função da diferença de entalpia.

O processo do ciclo realizado na bomba é um processo isentrópico 1-2. No entanto na realidade essa eficiência não atinge os 100% visto que acontece algumas irreversibilidades nos componentes como o atrito do fluido e a perda de calor. Seguindo Gao *et al.*, 2018 considera-se que a bomba e a turbina operam a 85% de sua capacidade. Com isso, o trabalho necessário para aumentar o nível de pressão no ciclo com a bomba é determinado pela seguinte equação:

$$w_b = \left( \frac{h_2 - h_1}{\eta_{bomba}} \right) \quad (3)$$

O calor recebido no evaporador pode ser calculado da seguinte maneira:

$$q_{eva} = (h_3 - h_2) \quad (4)$$

A turbina converte calor em trabalho, idealmente este seria um processo isentrópico, no entanto, como já mencionada anteriormente a energia da turbina assim como a bomba não atinge os 100% e por conta das irreversibilidades que existem a eficiência isentrópica da turbina será assumida como 85%. Portanto, o trabalho realizado pela turbina pode ser descrito da seguinte forma:

$$w_t = (h_3 - h_4) * \eta_{turbina} \quad (5)$$

O calor rejeitado para o ambiente pelo condensador é calculado pela equação seguinte:

$$q_{con} = (h_4 - h_1) \quad (6)$$

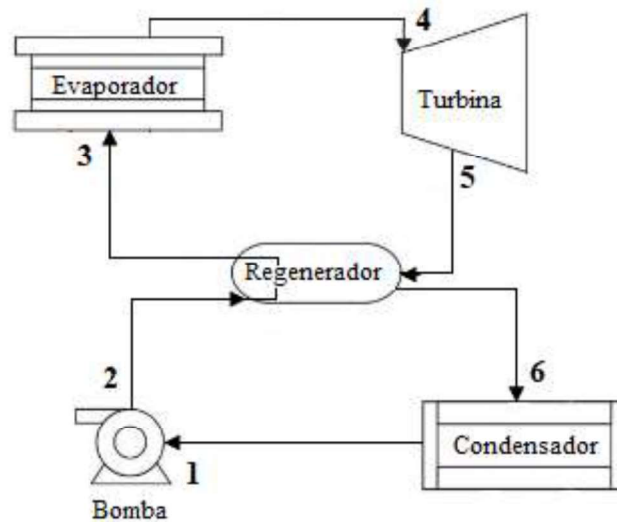
A eficiência térmica do ciclo é determinada a partir do trabalho líquido:

$$\eta = \frac{w_{liq}}{q_{eva}} = \frac{w_t - w_b}{q_{eva}} \quad (7)$$

### 3.2.2 Ciclo Rankine Orgânico Regenerativo (CROR)

O CROR modelado é apresentado na Figura 9 e é composto pela bomba, regenerador, evaporador, turbina e condensador (BRAIMAKIS; KARELLAS, 2018).

Figura 9. Esquema do CRO regenerativo.



Fonte: Adaptado de Braimakis e Karellas (2018).

Os processos que compõem o ciclo do CROR da Figura 9 são:

Processo 1-2: Compressão do fluido orgânico em uma bomba;

Processo 2-3: Pré-aquecimento isobárico do fluido orgânico em um trocador de calor;

Processo 3-4: Adição de calor isobárica e evaporação do fluido orgânico em um trocador de calor;

Processo 4-5: Expansão do fluido orgânico em uma turbina;

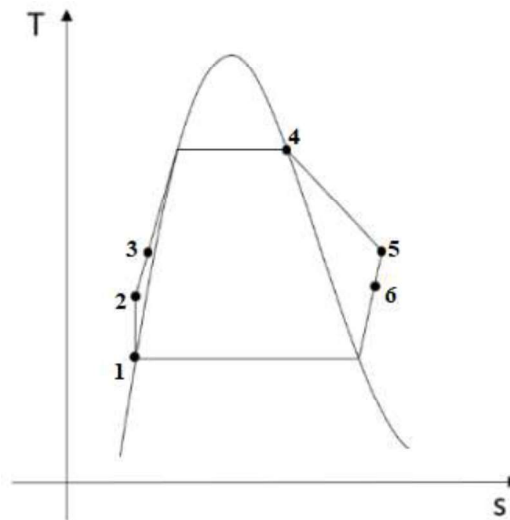
Processo 5-6: Resfriamento isobárico do fluido orgânico no regenerador;

Processo 6-1: Condensação no estado de líquido saturado.

### 3.2.2.1 Modelagem termodinâmica

O mesmo processo para aplicação da Primeira Lei da Termodinâmica foi aplicado para o CROR. A Figura 10 apresenta um diagrama T-s. O fluido deixa o condensador como líquido saturado (estado 1) e entra na bomba de forma isentrópica na qual é comprimida até a pressão do regenerador (estado 2) onde se mistura com o vapor extraído da turbina. A pressão do fluido é elevada até a pressão do evaporador (estado 3). O vapor entra na turbina à pressão do evaporador (estado 4) e se expande de forma isentrópica (estado 5), onde parte do vapor é expandido de forma isentrópica até a pressão do condensador (estado 6).

Figura 10. Diagrama Temperatura- entropia (T-s) do CROR.



Fonte: Adaptado de Souza *et al.*, 2022.

O trabalho necessário para aumentar o nível de pressão no ciclo com a bomba de alimentação é determinado pela equação:

$$w_b = \frac{(h_2 - h_1)}{\eta_{bomba}} \quad (8)$$

O fluido é então aquecido por meio do regenerador utilizando o calor da exaustão da turbina. O fluido de trabalho após o bombeamento no estado 2 é aquecido até o estado 3 tirando o calor da exaustão da turbina que é resfriado do ponto do estado 5 até o estado 6 após liberar calor sob este processo. Quando o calor é recuperado do fluxo de exaustão da turbina dentro do regenerador isobárico, isso resulta no pré-aquecimento do fluido de trabalho antes do evaporador melhorando a eficiência. A efetividade do regenerador foi tomada como 0,8 (DOUVARTZIDES *et al.*, 2022).

$$\eta_{reg} = \frac{(T_5 - T_6)}{(T_5 - T_2)} \quad (9)$$

No evaporador o fluido de trabalho é aquecido a pressão constante e está em condição de superaquecimento na entrada da turbina. O calor transferido da fonte térmica para o fluido de trabalho é:

$$q_{eva} = (h_4 - h_3) \quad (10)$$

O trabalho realizado pela turbina pode ser da seguinte forma:

$$w_t = (h_4 - h_5) * \eta_{turbina} \quad (11)$$

O calor rejeitado para o ambiente pelo condensador é calculado pela Equação 12.

$$q_{con} = (h_6 - h_1) \quad (12)$$

A eficiência térmica do sistema é determinada a partir do trabalho líquido é dado pela equação 13:

$$\eta = \frac{w_{liq}}{q_{eva}} = \frac{w_t - w_b}{q_{eva}} \quad (13)$$

### 3.3 Seleção do Fluido de Trabalho

Foram realizados estudos a partir da literatura disponível para selecionar os melhores fluidos de trabalho afim de se obter bons resultados na modelagem. As propriedades dos fluidos de trabalho afetam o ciclo tanto na sua eficiência quanto no seu custo de operação. (HUNG, 2001).

Uma das primeiras análises realizadas nos fluidos envolveram os aspectos ambientais quanto à Destruição da Camada de Ozônio (ODP) e o Potencial de Aquecimento Global (GWP). Esses índices representam o quanto um fluido pode contribuir para a degradação da camada de ozônio e para o aquecimento global, respectivamente. Segundo Chen, Goswami e Stefanhos (2010) alguns fluidos de trabalhos já foram descartados para uso devido a questões ambientais, como R-113, R-114 e outros já estão prestes a serem eliminados com previsão entre 2020 e 2030, como o R-123.

Neste trabalho, não foram selecionados fluidos que contém GWP maior que 2500 devido ao regulamento de número 517/2014 do parlamento Europeu que proíbe a comercialização de refrigerantes com esse GWP visto que, existem outras alternativas de fluidos melhores (MOTA-BABILONI *et al.*, 2015).

Outro fator que influencia na seleção do fluido de trabalho para um CROR de alta temperatura é a sua temperatura de trabalho, é necessário fluidos com altas temperaturas.

Os fluidos podem ser classificados em três categorias com base na temperatura crítica, são elas (SHU *et al.*, 2014):

- Fluidos de alta temperatura com a temperatura crítica acima dos 250 °C;
- Fluidos de média temperatura com temperatura crítica entre 150° e 205 °C;
- Fluidos de baixa temperatura com temperatura crítica abaixo de 150 °C.

Para a operação do CROR neste trabalho foram descartados os fluidos com temperatura crítica abaixo de 150 °C pois, de acordo com Quoilin (2013) para ciclos com fontes de calor como a biomassa é recomendado fluidos com altas temperaturas críticas.

Após estudo e análise dos fluidos disponíveis na literatura foram pré-selecionados 11 fluidos orgânicos para o presente trabalho, os mesmos estão apresentados na Tabela 2 com suas propriedades básicas.

Tabela 2. Fluidos pré-selecionados.

Fluido de trabalho	Nome alternativo	Propriedades				Índices ambientais e de segurança	
		*T <sub>cr</sub> (°C)	*P <sub>cr</sub> (MPa)	Peso molecular (kg/kmol)	Tipo de fluido	*ODP	*GWP
Butano	R600	152,0	4,00	58,12	Fluido seco	0	~20
Ciclopentano	--	239	4,57	70,1	Fluido seco	0	--
N-Decano	--	344,55	2,10	142,28	Fluido seco	0	--
Hexametildisiloxano/ HMDS	MM	245,60	1,94	162,38	Fluido seco	--	--
Octametiltrissiloxano/ OMTS	MDM	290,94	1,44	236,53	Fluido seco	--	--
Octametilciclotetrassiloxano/ OMCTS	D4	313,35	1,33	296,62	Fluido seco	--	--
Decametilciclopentasiloxano/ DMCPS	D5	346,00	1,16	370,77	Fluido seco	--	--
N-Nonano	--	321,45	2,28	128,26	Fluido seco	0	--
N-Octano	--	296,17	2,49	114,23	Fluido seco	0	--
Tolueno	--	318,65	4,13	92,14	Fluido seco	0	3,3
1,1,1,3,3-Pentafluoropropano HFC	R245fa	154,0	3,65	134,05	Fluido isentrópico	0	1030

Fonte: Adaptado de Drescher, Bruggemann (2007), Fernández, Prieto e Suárez (2011), Javanshir, Sarunac, Razzaghpanah, (2017), Shu *et al.* (2014), Song, Song e Gu (2015).

\*Sendo que:

$T_{cr}$ , é a temperatura crítica do fluido;

$P_{cr}$ , é a pressão crítica;

ODP (do inglês, *Ozone Depletion Potential*), representa o Potencial de Destruição da Camada de Ozônio, etse índice varia de 0 a 1 quanto mais próximo de zero menor é o impacto causado;

GWP (do inglês, *Global Warming Potential*), representa o Potencial de Aquecimento Global, quanto maior o índice mais danoso é o impacto causado ao aquecimento global (esses dados são avaliados referentes a um período de 100 anos).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As modelagens dos dois ciclos foram realizadas com 11 fluidos orgânicos a fim de identificar qual modelo e qual fluido apresenta um melhor desempenho trazendo uma melhor eficiência para o ciclo.

### 4.1 Validação do modelo

O modelo de validação da modelagem utilizada neste trabalho foi simulado com os dados propostos nos trabalhos de Khaljani, Saray, Bahlouli, (2015) e Souza et al., (2022). Para simulação foi utilizado o fluido R-123 e os dados de entrada do modelo foram a pressão de condensação e evaporação sendo 30° C e 137° C, respectivamente. Foi adotado como eficiência da bomba e da turbina 85% e 80%, respectivamente e a efetividade do regenerador 90%. Os dados de comparação dos modelos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Comparação dos dados da modelagem desenvolvida.

Estado termodinâmico	T (°C)		P (kPa)		h (kJ/kg)		s (kJ/kg.k)	
	Simulado	*Ref	Simulado	*Ref	Simulado	*Ref	Simulado	*Ref
1	30	30	109,72	109,7	231,38	231,4	1,109	1,109
2	30,74	30,74	1666	1666	232,64	232,6	1,109	1,109
3	49,17	49,17	1666	1666	252,06	252,1	1,171	1,171
4	137	137	1666	1666	460,76	460,8	1,708	1,708
5	60,09	60,09	109,72	109,7	423,08	423,1	1,737	1,737
6	33,67	33,67	109,72	109,7	403,66	403,7	1,677	1,677

Fonte: Autora (2023).

\*Ref = Khaljani, Saray, Bahlouli, (2015).

### 4.2 Pressões do procedimento

As pressões máximas e mínimas dos fluidos são fundamentais pois estão diretamente ligadas a eficiência do ciclo e à escolha de materiais. Na tabela 4 é apresentada as pressões críticas, as pressões 0,9\*Pressão crítica, a pressão máxima e a pressão mínima utilizada por cada fluido, para os dois modelos utilizados as pressões máximas e mínimas permaneceram as mesmas.

Tabela 4. Pressão de trabalho dos ciclos modelados.

Fluido	P. crítica (kPa)	0,9*P. crítica (kPa)	Pressão de Evaporação (kPa)	Pressão de Condensação (kPa)
R600	4005	3605	2465,33	328,97
Ciclopentano	4571	4114	3190,00	61,83
N-Decano	2103	1893	1875,29	0,355
MM	1939	1745	1675,11	9,37

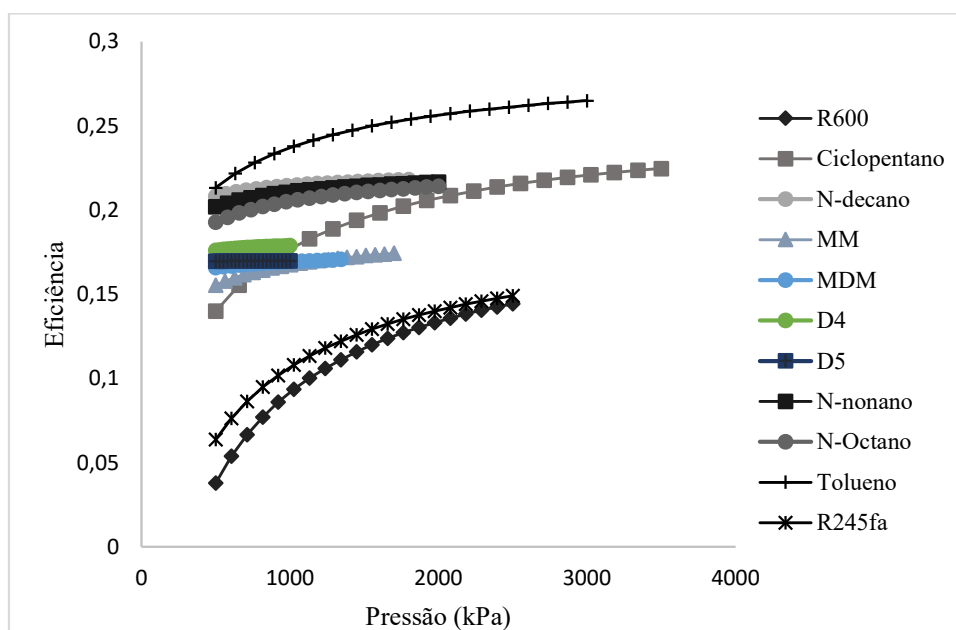
MDM	1438	1294	1294,00	0,935
D <sub>4</sub>	1332	1199	1199,00	0,265
D <sub>5</sub>	1160	1044	1044,00	0,051
N-Nonano	2281	2053	2053,00	1,07
N-Octano	2497	2247	2247,00	3,18
Tolueno	4126	3714	3136,15	6,24
R245fa	3651	3286	2302,99	210,96

Fonte: Autora (2023).

### 4.3 Análise dos ciclos com variação da Pressão

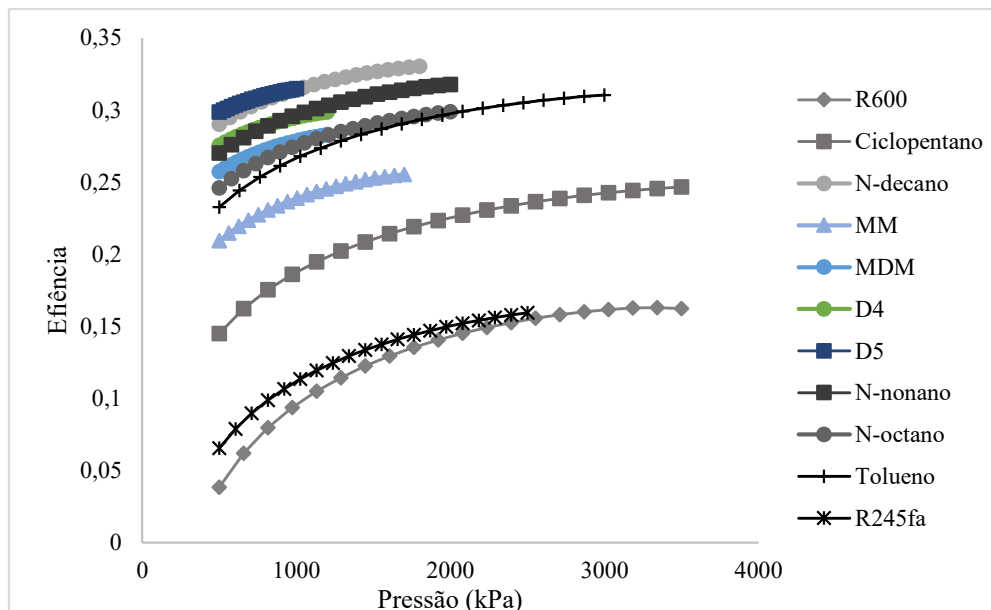
As Figuras 11 e 12 apresentam o gráfico da pressão de evaporação versus e eficiência dos fluidos de trabalho.

Figura 11. Pressão x eficiência do CROB.



Fonte: Autora (2023).

Figura 12. Pressão x eficiência do CROR.



Fonte: Autora (2023).

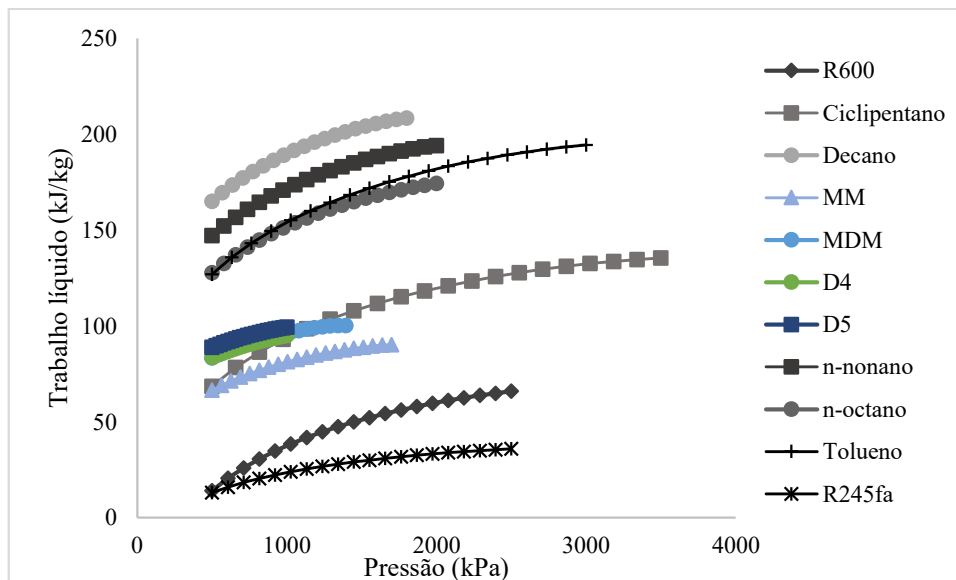
Analisando as figuras 11 e 12, no geral todos os fluidos de trabalho se comportam de maneira semelhante no que se refere ao comportamento da eficiência, a qual tende a ser maior com o aumento da pressão de evaporação. Os maiores valores da eficiência para o CROB foram o tolueno, ciclopentano e n-decano com 26,56%, 22,23% e 21,84%, respectivamente. Os maiores valores da eficiência para o CROR são o n-decano, n-nonano de D<sub>5</sub> com 33,09%, 31,80% e 31,55%, respectivamente.

É notável que alguns fluidos apresentam um aumento considerável quando incrementamos o regenerador no ciclo. Os fluidos MDM, D<sub>4</sub>, D<sub>5</sub> e n-nonano apresentaram um aumento na eficiência acima de 10% comparando o ciclo com regeneração ao ciclo básico, percebe-se que, esses fluidos apresentam temperaturas críticas acima ou bem próxima dos 300° C. Dessa forma, concluímos que, quanto maior a temperatura crítica maior será o aumento da eficiência ao colocar um regenerador no ciclo.

Bao e Zhao (2013) afirmam que a pressão do condensador não deve ser inferior e 5 kPa e recomendam que essa pressão seja maior do que a pressão da atmosfera, de forma a evitar vazamento de ar frio no sistema o que reduziria a eficiência térmica do ciclo. Segundo Douvartzides *et al.*, pressões de condensação baixas causam infiltração de ar no condensador. Dessa forma, fluidos como n-decano, MM, MDM, D<sub>4</sub>, D<sub>5</sub>, n-nonano e n-octano não são recomendados.

A Figura 13 apresenta o gráfico de pressão de evaporação versus trabalho líquido para os dois ciclos modelados, foi notado que não houve alteração do trabalho líquido quando incrementado o regenerador no ciclo.

Figura 13. Pressão x trabalho líquido do CROB.



Fonte: Autora (2023).

O trabalho líquido gerado pelos fluidos se comporta novamente de maneira semelhante entre eles no que se refere ao comportamento dos dados, tendo em vista que, o trabalho vai aumentando com a pressão, até chegar em um trabalho limite de cada fluido.

#### 4.4 Máximas eficiências

A Tabela 5 e 6 apresenta os dados de forma resumida dos fluidos utilizados em cada modelagem.

Tabela 5. Eficiência para o CROB.

Fluido	Pressão de Evaporação (kPa)	Pressão de Condensação (kPa)	Eficiência (%)	Trabalho líquido (kJ/kg)
R600	2465,33	328,97	14,37	65,63
Ciclopentano	3190,00	61,83	22,23	133,80
N-Decano	1875,29	0,355	21,84	209,00
MM	1675,11	9,37	17,41	90,18
MDM	1294,00	0,935	17,02	100,00
D <sub>4</sub>	1199,00	0,265	17,94	97,35
D <sub>5</sub>	1044,00	0,051	16,99	99,92
N-Nonano	2053,00	1,07	21,68	194,50
N-Octano	2247,00	3,18	21,51	176,60
Tolueno	3136,15	6,24	26,56	195,50
R245fa	2302,99	210,96	14,61	35,06

Fonte: Autora (2023).

Tabela 6. Eficiência para o CROR.

<b>Fluido</b>	<b>Pressão de Evaporação (kPa)</b>	<b>Pressão de Condensação (kPa)</b>	<b>Eficiência (%)</b>	<b>Trabalho líquido (kJ/kg)</b>
R600	2465,33	328,97	15,40	65,63
Ciclopentano	3190,00	61,83	24,44	133,80
N-Decano	1875,29	0,355	33,09	209,00
MM	1675,11	9,37	25,51	90,18
MDM	1294,00	0,935	28,43	100,00
D <sub>4</sub>	1199,00	0,265	29,87	97,35
D <sub>5</sub>	1044,00	0,051	31,55	99,92
N-Nonano	2053,00	1,07	31,80	194,50
N-Octano	2247,00	3,18	30,12	176,60
Tolueno	3136,15	6,24	31,14	195,50
R245fa	2302,99	210,96	15,63	35,06

Fonte: Autora (2023).

Comparando o CROB e CROR notamos que há um aumento de eficiência no ciclo com regeneração em todas as modelagens realizadas. Algieri e Marrone (2014) diz que adotar a regeneração interna e superaquecimento na entrada da turbina são de grande interesse pois podem levar a maiores eficiências e menores custos principalmente em aplicações que biomassa, que exigem temperaturas mais elevadas.

## 5 CONCLUSÃO

Uma análise comparativa foi apresentada entre um CROB e um CROR, nota-se que, os ciclos com regeneração apresentam maiores eficiências em relação ao ciclo básico considerando assim, uma boa opção para melhorar a eficiências de ciclos com biomassa. Foi observado que fluidos com maiores temperaturas críticas apresentam maiores eficiências quando incrementamos o regenerador, esses fluidos possuía temperatura crítica próxima ao acima dos 300° C foram o MDM, D<sub>4</sub>, D<sub>5</sub> e n-nonano Também foi constatado que, esses mesmos ciclos que apresentaram maiores eficiências, apresentam menores pressão de condensação, com pressões abaixo de 5kPa e por isso, não são recomendados para trabalharem em ciclos Rankines, pois, podem causar infiltração de ar no condensador e danificar o equipamentos. Diante dos critérios, os fluidos que apresentaram maiores desempenhos foram o tolueno e o ciclopentano com 31,14% e 24,44% respectivamente no ciclo com regeneração.

## REFERÊNCIAS

ALGIERI, Angelo; MORRONE, Pietropaolo. Energetic analysis of biomass-fired ORC systems for micro-scale combined heat and power (CHP) generation. A possible application to the Italian residential sector. **Applied Thermal Engineering**, v. 71, n. 2, p. 751-759, 2014.

Balanço Energético Nacional 2022: Ano base 2021. **Empresa de Pesquisa Energética**. Rio de Janeiro: EPE, 2022.

BAO, Junjiang; ZHAO, Li. **A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle**. [S. l.: s. n.], 2013.

BINA, Saeid Mohammadzadeh; JALILINASRABADY, Saeid; FUJII, Hikari. Thermo-economic evaluation of various bottoming ORCs for geothermal power plant, determination of optimum cycle for Sabalan power plant exhaust. **Geothermics**, v. 70, p. 181-191, 2017.

BONDARIK, Roberto; PILATTI, Luiz Alberto; HORST, Diogo José. UMA VISÃO GERAL SOBRE O POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS NO BRASIL. [s. l.], v. 43, p. 10, 2018.

BORGES, Ane Caroline Pereira et al. Energias Renováveis: Uma Contextualização Da Biomassa Como Fonte De Energia. **REDE - Revista Eletrônica do PRODEMA**, Fortaleza, v. 10, n. 2, mar. 2017. ISSN 1982-5528. Disponível em: <<http://www.revistarede.ufc.br/rede/article/view/239>>. Acesso em: 16 set. 2022.

BRAIMAKIS, Konstantinos; KARELLAS, Sotirios. Energetic optimization of regenerative Organic Rankine Cycle (ORC) configurations. **Energy Conversion and Management**, v. 159, p. 353-370, 2018.

CHATZOPOULOU, Maria Anna; MARKIDES, Christos N. Thermodynamic optimisation of a high-electrical efficiency integrated internal combustion engine – Organic Rankine cycle combined heat and power system. **Applied Energy**, [s. l.], v. 226, p. 1229–1251, 2018.

CHEN, Cheng-Liang; LI, Po-Yi; LE, Si Nguyen Tien. Organic Rankine Cycle for Waste Heat Recovery in a Refinery. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, [S. l.], v. 55, n. 12, p. 3262–3275, 2016. Disponível em:

<https://doi.org/10.1021/ACS.IECR.5B03381>. Acesso em: 21 out. 2021.

ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A.. **TERMODINÂMICA**. 7ª ed. Porto Alegre: Amgh Editora Ltda, 2013.

DOUVARTZIDES, Savvas L. et al. Seleção baseada em energia e exergia de vários refrigerantes, hidrocarbonetos e siloxanos para a otimização de caldeiras de biomassa – ciclo orgânico Rankine (BB-ORC) de calor e usinas de cogeração de energia. **Energias**, v. 15, n. 15, pág. 5513, 2022.

DRESCHER, Ulli., BRUGGEMANN, Dieter. Fluid selection for the Organic Rankine Cycle (ORC) in biomass power and heat plants. **Applied Thermal Engineering**. Vol. 27, p. 223-228. Janeiro, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.04.024>

DUPONT, Fabrício Hoff; GRASSI, Fernando; ROMITTI, Leonardo. ENERGIAS RENOVÁVEIS: BUSCANDO POR UMA MATRIZ ENERGÉTICA SUSTENTÁVEL. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, [s. l.], v. 19, n. 4, p. 70–81, 2015.

FENG, Yong qiang *et al.* Experimental comparison of the performance of basic and regenerative organic Rankine cycles. **Energy Conversion and Management**, [S. l.], v. 223, p. 113459, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113459>.

FERNÁNDEZ, F. J.; PRIETO, M. M.; SUÁREZ, I. Thermodynamic analysis of high-temperature regenerative organic Rankine cycles using siloxanes as working fluids. **Energy**, [s. l.], v. 36, n. 8, p. 5239–5249, 2011.

GAO, Zhenjuan *et al.* Comprehensive economic analysis and multi-objective optimization of an integrated gasification power generation cycle. **Process Safety and Environmental Protection**, [s. l.], v. 155, p. 61–79, 2021.

GOODARZI, M.; SOLTANI, H. Dehghani. Thermal performance analysis of a reheating-regenerative organic Rankine cycle using different working fluids. **Mechanika**, [s. l.], v. 21, n. 1, p. 28–33, 2015. Disponível em: <https://go-gale.ez428.periodicos.capes.gov.br/ps/i.do?p=AONE&sw=w&issn=13921207&v=2.1&it=r&id=GALE%7CA406518057&sid=googleScholar&linkaccess=fulltext>. Acesso em: 11 dez. 2021.

HOJJAT MOHAMMADI, S. M.; AMERI, Mehran. Energy and exergy comparison of a cascade air conditioning system using different cooling strategies. **International Journal of Refrigeration**, [s. l.], v. 41, p. 14–26, 2014.

HUNG, Tzu Chen. Waste heat recovery of organic Rankine cycle using dry fluids. **Energy Conversion and Management**, [s. l.], v. 42, n. 5, p. 539–553, 2001.

INVERNIZZI, Costante; IORA, Paolo; SILVA, Paolo. Bottoming micro-Rankine cycles for micro-gas turbines. **Applied Thermal Engineering**, [s. l.], v. 27, n. 1, 2007.

JAVANSHIR, Alireza; SARUNAC, Nenad; RAZZAGHPANAH, Zahra. Thermodynamic analysis of a regenerative organic Rankine cycle using dry fluids. **Applied Thermal Engineering**, [s. l.], v. 123, p. 852–864, 2017.

KHALJANI, Mansoureh; SARAY, R. Khoshbakhti; BAHLOULI, Keyvan. Comprehensive analysis of energy, exergy and exergo-economic of cogeneration of heat and power in a combined gas turbine and organic Rankine cycle. **Energy Conversion and Management**, v. 97, p. 154-165, 2015.

LI, Jian *et al.* Parametric optimization and thermodynamic performance comparison of single-pressure and dual-pressure evaporation organic Rankine cycles. **Applied Energy**, [S. l.], v. 217, p. 409–421, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.096>

LI, Maoqing *et al.* Construction and preliminary test of a low-temperature regenerative Organic Rankine Cycle (ORC) using R123. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 57, p. 216–222, 2013.

LIU, Hao; SHAO, Yingjuan; LI, Jinxing. A biomass-fired micro-scale CHP system with organic Rankine cycle (ORC) – Thermodynamic modelling studies. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 35, n. 9, p. 3985–3994, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2011.06.025>

MAGO, Pedro J. *et al.* An examination of regenerative organic Rankine cycles using dry fluids. **Applied Thermal Engineering**, [s. l.], v. 28, n. 8–9, p. 998–1007, 2008.

MEKHILEF, S. *et al.* **Biomass energy in Malaysia: Current state and prospects**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2011.

MIFTAH, Hijriawan *et al.* ORGANIC RANKINE CYCLE ( ORC ) SYSTEM IN

RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY DEVELOPMENT : A REVIEW OF THE UTILIZATION AND CURRENT CONDITIONS FOR SMALL-SCALE. **Journal of Applied Engineering Science**, [s. l.], v. 20, p. 957–970, 2022.

MOTA-BABILONI, Adrián *et al.* **Analysis based on EU Regulation No 517/2014 of new HFC/HFO mixtures as alternatives of high GWP refrigerants in refrigeration and HVAC systems**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2015.

PAPADOPOULOS, Athanasios I.; STIJEPOVIC, Mirko; LINKE, Patrick. On the systematic design and selection of optimal working fluids for Organic Rankine Cycles. **Applied Thermal Engineering**, [S. l.], v. 30, n. 6–7, p. 760–769, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.12.006>

PEI, Gang; LI, Jing; JI, Jie. Analysis of low temperature solar thermal electric generation using regenerative Organic Rankine Cycle. **Applied Thermal Engineering**, [s. l.], v. 30, n. 8–9, p. 998–1004, 2010.

QUOILIN, S. Techno- economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, junho, 2013.

RAHBAR, Kiyarash *et al.* **Review of organic Rankine cycle for small-scale applications**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.12.023>

RAYEGAN, R.; TAO, Y. X. A procedure to select working fluids for Solar Organic Rankine Cycles (CROs). **Renewable Energy**, [S. l.], v. 36, n. 2, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.07.010>

SANTOS, Guilherme Henrique Fávero; NASCIMENTO, Raphael Santos do; ALVES, Geziele Mucio. BIOMASSA COMO ENERGIA RENOVÁVEL NO BRASIL. **Uningá Review**, [s. l.], v. 29, n. 2, p. 6–13, 2017. Disponível em: <https://revista.uninga.br/uningareviews/article/view/1966>. Acesso em: 16 set. 2022.

SARKAR, Jahar. Property-based selection criteria of low GWP working fluids for organic Rankine cycle. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering** 2016 39:4, [S. l.], v. 39, n. 4, p. 1419–1428, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/S40430-016-0605-8>. Acesso em: 21 out. 2021.

SHU, Gequn *et al.* Alkanes as working fluids for high-temperature exhaust heat recovery of diesel engine using organic Rankine cycle. **Applied Energy**, [s. l.], v. 119, p. 204–217, 2014.

SONG, Jian; SONG, Yin; GU, Chun wei. Thermodynamic analysis and performance optimization of an Organic Rankine Cycle (ORC) waste heat recovery system for marine diesel engines. **Energy**, [s. l.], v. 82, p. 976–985, 2015.

SOUZA, Anderson Breno *et al.* Selection of the working fluid for a high-temperature ORC hot-source to be applied in the Brazilian semi-arid. **Thermal Science**, n. 00, p. 201–201, 2022.

VARGA, Z.; CSABA, T. Techno-economic evaluation of waste heat recovery by organic Rankine cycle using pure light hydrocarbons and their mixtures as working fluid in a crude oil refinery. **Energy Conversion and Management**, [S. l.], v. 174, p. 793–801, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2018.08.031>

YU, Haoshui *et al.* A systematic method to customize an efficient organic Rankine cycle (ORC) to recover waste heat in refineries. **Applied Energy**, [s. l.], v. 179, p. 302–315, 2016.

## APÊNDICE A

Modelagem termodinâmica desenvolvida no EES dos CROB e CROR.

Modelagem do Ciclo Rankine Orgânico Básico:

*"Procedimento realizado para obtenção da maior pressão na entrada da turbina com título igual a 1"*

**Procedure** *pressão*(f\$ : s)

w:=**(p\_crit**(f\$))\*0,9

j:=0

**Repeat**

j:=j+1

P[j]:= 500+j

s[j]:= **Entropy**(f\$;x=1;P=P[j])

**Until** (j>w-500)

s:=**max**(s[10..(w-500)])

**End**

**Call** *pressão*(f\$ : sa)

"P1= **pressure**(f\$;x=1;s=s1)"

sa=**entropy**(f\$;x=1;P=P1)

Pconst=P1

*"Fluidos a serem modelados"*

{Fluid\$ = 'R600'

Fluid\$ = 'cyclopentane'

Fluid\$ = 'n-decane'

Fluid\$ = 'MM'

Fluid\$ = 'MDM'

Fluid\$ = 'D4'

Fluid\$ = 'D5'

Fluid\$ = 'n-nonane'

Fluid\$ = 'n-octane'

Fluid\$ = 'toluene'

Fluid\$ = 'R245fa' }

f\$ = 'r245fa'

*"Estado inicial do ciclo"*

*"Temperatura definida nas hipóteses do modelo"*

T[0]=35 [C]

x[0]=0

P[0]= **pressure**(f\$;T=T[0];x=x[0])

h[0]= **enthalpy**(f\$;P=P[0];x=x[0])

s[0]= **entropy**(f\$;P=P[0];x=x[0])

v[0]= **volume**(f\$;P=P[0];x=x[0])

*"Estado 2"*

"Estado 2\_ideal"

" $P[2] = P_{const}$ "

$h[0] - h_{2\_s} = -v[0] * (P[2] - P[0])$

$T_{2\_s} = \text{temperature}(f\$; P=P[2]; h=h_{2\_s})$

"Estado 2\_real"

$\eta_{\text{bomba}} = (h[0] - h_{2\_s}) / (h[0] - h[2])$

$T[2] = \text{temperature}(f\$; P=P[2]; h=h[2])$

"Estado 3"

$x[3] = 1$

$P[3] = P[2]$

$T[3] = \text{temperature}(f\$; P=P[3]; x=x[3])$

$h[3] = \text{enthalpy}(f\$; T=T[3]; x=x[3])$

$s[3] = \text{entropy}(f\$; T=T[3]; x=x[3])$

"Estado 4"

"Estado 4\_ideal"

$P[4] = P[0]$

$s_{4\_s} = s[3]$

$T_{4\_s} = \text{temperature}(f\$; P=P[4]; s=s_{4\_s})$

$h_{4\_s} = \text{enthalpy}(f\$; P=P[4]; s=s_{4\_s})$

"Estado 4\_real"

$\eta_{\text{turbina}} = (h[3] - h[4]) / (h[3] - h_{4\_s})$

$T[4] = \text{temperature}(f\$; P=P[4]; h=h[4])$

"Eficiência da bomba e da turbina definida nas hipóteses do modelo"

$\eta_{\text{bomba}} = 0,85$

$\eta_{\text{turbina}} = 0,85$

"Calor trocado no evaporador"

$q_{\text{eva}} = h[3] - h[2]$

"Trabalho da turbina"

$w_{\text{turbina}} = (h[3] - h[4])$

"Trabalho da bomba"

$w_{\text{bomba}} = (h[2] - h[0])$

"Eficiência"

$\eta = (w_{\text{turbina}} - w_{\text{bomba}}) / q_{\text{eva}}$

"Trabalho líquido"

$w_{\text{liq}} = w_{\text{turbina}} - w_{\text{bomba}}$

"Q Condensador"

$Q_{\text{con}} = h[4] - h[0]$

"Q Evaporador"  
 $Q_{eva} = (h[3] - h[2])$

### Modelagem do Ciclo Rankine Orgânico Regenerativo:

"Procedimento realizado para obtenção da maior pressão na entrada da turbina com título igual a 1"

```

Procedure pressão(f$ : s)
w:=(p_crit(f$))*0,9
j:=0
Repeat
j:=j+1
P[j]:= 500+j
s[j]:=Entropy(f$;x=1;P=P[j])
Until (j>w-500)
s:=max(s[10..(w-500)])
End

```

```

Call pressão(f$ : sa)
"P1 = pressure(f$;x=1;s=s1)"
sa=entropy(f$;x=1;P=P1)
Pconst=P1

```

"Fluidos a serem modelados"

```

{Fluid$ = 'R600'
Fluid$ = 'cyclopentane'
Fluid$ = 'n-decane'
Fluid$ = 'MM'
Fluid$ = 'MDM'
Fluid$ = 'D4'
Fluid$ = 'D5'
Fluid$ = 'n-nonane'
Fluid$ = 'n-octane'
Fluid$ = 'toluene'
Fluid$ = 'R245fa' }

```

f\$ = 'r245fa'

"Estado inicial do ciclo"  
"Temperatura definida nas hipóteses do modelo"

T[0]=35[C]

```

x[0]=0
P[0]= pressure(f$;T=T[0];x=x[0])
h[0]= enthalpy(f$;P=P[0];x=x[0])
s[0]= entropy(f$;P=P[0];x=x[0])
v[0]= volume(f$;P=P[0];x=x[0])

```

"Estado 2"

"Estado 2\_ideal"

$\{P[2] = P_{const}\}$   
 $h[0] - h_{2\_s} = -v[0] * (P[2] - P[0])$   
 $T_{2\_s} = \text{temperature}(f\$, P=P[2], h=h_{2\_s})$

"Estado 2\_real"

$\eta_{bomba} = (h[0] - h_{2\_s}) / (h[0] - h[2])$   
 $T[2] = \text{temperature}(f\$, P=P[2], h=h[2])$   
 $s[2] = \text{entropy}(f\$, P=P[2], h=h[2])$

"Estado 3"

$P[3] = P[2]$   
 $s[3] = \text{entropy}(f\$, P=P[3], h=h[3])$   
 $T[3] = \text{temperature}(f\$, P=P[3], h=h[3])$

"Estado 4"

$x[4] = 1$   
 $P[4] = P[2]$   
 $T[4] = \text{temperature}(f\$, P=P[4], x=x[4])$   
 $h[4] = \text{enthalpy}(f\$, T=T[4], x=x[4])$   
 $s[4] = \text{entropy}(f\$, T=T[4], x=x[4])$

"Estado 5"

"Estado 5\_ideal"

$P[5] = P[0]$   
 $s_{5\_s} = s[4]$   
 $T_{5\_s} = \text{temperature}(f\$, P=P[5], s=s_{5\_s})$   
 $h_{5\_s} = \text{enthalpy}(f\$, P=P[5], s=s_{5\_s})$

"Estado 5\_real"

$\eta_{turbina} = (h[4] - h[5]) / (h[4] - h_{5\_s})$   
 $T[5] = \text{temperature}(f\$, P=P[5], h=h[5])$

"Estado 6"

$P[6] = P[5]$   
 $h[6] = \text{enthalpy}(f\$, T=T[6], P=P[6])$   
 $h[3] - h[2] = h[5] - h[6]$   
 $s[6] = \text{entropy}(f\$, P=P[6], h=h[6])$

"Eficiência da bomba e da turbina definida nas hipóteses do modelo"

"Efetividade do regenerador definida nas hipóteses do modelo"

$\eta_{bomba} = 0,85$   
 $\eta_{turbina} = 0,85$   
 $e_{fativ\_regen} = 0,8$

"Efetividade do regenerador"

$e_{fativ\_regen} = (T[5] - T[6]) / (T[5] - T[2])$

"Calor trocado no evaporador"

$q_{eva} = h[4] - h[3]$

*"trabalho da turbina"*  
 $w_{turbina} = (h[4] - h[5])$

*"Trabalho da bomba"*  
 $w_{bomba} = (h[2] - h[0])$

*"Eficiência"*  
 $\eta = (w_{turbina} - w_{bomba}) / q_{eva}$

*"Trabalho liquido"*  
 $w_{liq} = w_{turbina} - w_{bomba}$

*"Q Condensador"*  
 $Q_{con} = (h[6] - h[0])$

*"Q Evaporador"*  
 $Q_{eva} = (h[4] - h[3])$