

# AVALIAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE RECUPERAÇÃO DE CALOR PARA OPERAR EM CICLO RANKINE ORGÂNICO – ORC

Evaluation and sizing of heat recovery systems for operation in organic rankine cycle (ORC)

Marco Antonio Sampaio Ferraz de Souza<sup>1</sup>; Laura Sartori Beledelli<sup>2</sup>

1 Docente da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Erechim, RS, Brasil.  
*E-mail:* marco@uricer.edu.br

2 Acadêmica do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Erechim, RS, Brasil

Data do recebimento: 01/03/2024 - Data do aceite: 30/07/2024

**RESUMO:** O presente trabalho busca identificar os parâmetros de operação de sistemas de recuperação de calor para operar em Ciclos Rankine Orgânicos (*Organic Rankine Cycle* – ORC), buscando desenvolvimento de uma ferramenta computacional para análise térmica e fluido dinâmica do ciclo ORC, em função da disponibilidade de energia e para o dimensionamento básico dos principais componentes do mesmo. Foram definidas duas condições de trabalho para o projeto : uma de 50 kW e outra de 200 kW, sendo que o fluido de trabalho utilizado é o R245fa. Primeiramente foram identificados os componentes e processos presentes no ORC, sendo que os componentes básicos do ciclo são uma turbina, um condensador, uma bomba e um gerador de vapor. Os processos são uma expansão isentrópica, condensação à pressão constante, compressão isentrópica e, por fim, adição de calor à pressão constante. Com base nisso, foram definidos quatro pontos de importância no processo (1: entrada da turbina; 2: saída da turbina – entrada do condensador; 3: saída do condensador – entrada da bomba; 4: saída da bomba – entrada do gerador de vapor) que serviram de referência ao longo do projeto. Ao realizar um estudo sobre a eficiência de um sistema em ORC, verificou-se que os principais fatores que influenciam na mesma são o fluido de trabalho e o dimensionamento da

turbina. Sendo assim, realizou-se uma pesquisa e análise a respeito do fluido R245fa, determinando propriedades pertinentes para o projeto, além de avaliar a escolha deste fluido para esse sistema. Após, foi realizado o estudo das variáveis existentes em cada um dos processos existentes, e o levantamento do seu respectivo equacionamento. A partir desses valores de disponibilização de energia foram desenvolvidos cálculos para avaliar o ciclo e realizar o dimensionamento básico dos componentes. Para isso, foi desenvolvida uma ferramenta de análise para dimensionamento das plantas e seus respectivos componentes, por meio de planilha eletrônica.

**Palavras-chave:** Ciclo Rankine Orgânico, Dimensionamento, Parâmetros, Recuperação de Calor, R254fa.

**ABSTRACT:** The present work aims to identify the operating parameters of heat recovery systems to operate in Organic Rankine Cycles (ORC), seeking the development of a computational tool for thermal and fluid dynamic analysis of the ORC cycle based on energy availability and for the basic sizing of its main components. Two working conditions were defined for the project: one of 50 kW and another of 200 kW, using R245fa as the working fluid. First, the components and processes present in the ORC were identified, having as the basic components of the cycle, a condenser, a pump, and a steam generator. The processes are an isentropic expansion, constant pressure condensation, isentropic compression, and finally, heat addition at constant pressure. Based on this, four important points were defined in the process (1: turbine inlet; 2: turbine outlet - condenser inlet; 3: condenser outlet - pump inlet; 4: pump outlet – steam generator inlet) which served as reference throughout the project. When conducting a study on the efficiency of an ORC system, it was found that the main factors influencing it are the working fluid and turbine sizing. Therefore, research and analysis were carried out regarding the R245fa fluid, determining properties relevant to the project, in addition to evaluating the choice of this fluid for the system. Subsequently, the study of the variables in each of the existing processes was conducted, along with their respective equations. Based on these energy availability values, calculations were developed to evaluate the cycle and perform basic sizing of the components. For this purpose, an analysis tool was developed for sizing the plant and its respective components using a spreadsheet.

**Keywords:** Organic Rankine Cycle, Sizing, Parameters, Heat Recovery, R245fa.

## Introdução

Recentemente, as diversas preocupações relacionadas ao aquecimento global, assim

como outras mudanças climáticas, impulsionaram, extensivamente, a busca por métodos alternativos de geração de energia. Neste cenário, a recuperação de calor em baixas temperaturas de processos industriais para

converter eletricidade por meio de Ciclos Rankine Orgânicos (*Organic Rankine Cycle* - ORC), que já era amplamente utilizado pela indústria, tornou-se objeto de diversos estudos, passando por diversas evoluções e sendo ainda mais amplamente utilizado. Estes processos são uma alternativa muito promissora para a recuperação de calor industrial, e se assemelham muito aos processos operando em ciclo Rankine convencional, tendo como componentes básicos uma turbina, um condensador, uma bomba e uma caldeira. A principal diferença entre os ciclos é o fato de os ciclos ORC utilizarem fluidos orgânicos, que possuem ponto de ebulição mais baixo que outros fluidos como a água, o que permite gerar energia a partir de fontes de calor com temperaturas mais baixas.

Esse tipo de sistema apresenta diversas vantagens, por exemplo, conforme Quoilin e Lemort (2009), essa tecnologia permite a geração de energia descentralizada e em pequena escala, o que favorece a geração de energia térmica para aumentar a temperatura do fluido de trabalho a partir de fontes renováveis, que geralmente possuem disponibilidade mais localizada que combustíveis fósseis. Neste caso, a fonte energética é o calor de baixa temperatura gerado pelo desperdício industrial (calor residual de baixa temperatura), que, conforme Hung, Shai e Wang (1997), corresponde a, aproximadamente, 50% do calor desperdiçado gerado pela indústria.

O presente trabalho busca identificar os principais parâmetros de operação de sistemas de recuperação de calor para operar em Ciclo Rankine Orgânico. Busca-se determinar os equipamentos, processos e parâmetros de operação básicos de um ORC, obtendo uma metodologia para o dimensionamento dos principais componentes do ciclo, tendo como base estudos já presentes na literatura. Pretende-se com este trabalho fornecer informações pertinentes que possibilitaram

a nacionalização desta tecnologia e o suprimento de uma demanda regional por esse tipo de equipamento, a partir de trabalhos futuros.

Os objetivos do trabalho consistem no levantamento dos principais parâmetros de operação do ciclo ORC, operando com sistemas de recuperação de calor, e dimensionamento básico dos principais componentes do mesmo. Pretende-se desenvolver uma ferramenta computacional de análise térmica e fluido dinâmico do ciclo ORC, em função da disponibilidade de energia (fluido, temperatura, pressão, vazão) das plantas, para poder controlar os parâmetros de operação dos sistemas de recuperação de calor, bem como para o dimensionamento dos principais componentes do ciclo ORC.

## Resultados e Discussões

O levantamento dos parâmetros e posterior dimensionamento preliminar dos componentes básicos ocorreu a partir da avaliação do fluido de trabalho, eficiência do sistema operando em ORC, condições de trabalho, ciclos termodinâmicos. Em um primeiro momento foi realizada uma pesquisa de informações a respeito destes itens, para que então pudesse ser realizada a definição dos parâmetros pertinentes, adequadamente. Esta pesquisa foi realizada por meio da leitura de artigos e literatura básica.

Apresenta-se, aqui, um embasamento teórico desenvolvido com os dados e informações levantados a respeito do ciclo ORC, os processos que o compõe, as variáveis que estão presentes em cada processo do ciclo ORC e seu respectivo equacionamento, o fluido de trabalho selecionado e parâmetros relevantes no dimensionamento do sistema. Os cálculos relacionados à avaliação e dimensionamento do ciclo foram realizados em planilha eletrônica, a qual foi utilizada como ferramenta computacional. Os resul-

tados obtidos foram apresentados em forma de tabelas.

O ciclo ORC se assemelha muito ao ciclo Rankine convencional, possuindo o mesmo princípio de funcionamento. Ambos consistem na vaporização de um líquido a alta pressão, que é, sucessivamente, expandido para uma pressão mais baixa, produzindo assim trabalho mecânico. Apesar das semelhanças, há algumas vantagens notáveis oferecidas pelo ciclo ORC em relação ao ciclo Rankine convencional. Dentre elas destaca-se o fato de não haver necessidade de superaquecimento, pois os fluidos orgânicos permanecem superaquecidos ao final da expansão, o que reduz o risco de corrosão das pás da turbina e prolonga a vida útil da mesma. Além disso, o calor pode ser recuperado a uma temperatura mais baixa, a pressão do fluido de trabalho é menor, o sistema pode ser mais compacto devido à maior densidade do fluido, a caldeira utilizada (gerador de calor) pode ter passagem única, o que evita tambores de vapor e recirculação, e uma vez que a queda de entalpia é menor, pode-se empregar turbinas de um ou dois estágios, com custo menor.

Segundo Fiaschi, Manfrida e Maraschiello(2015), devido à sua simplicidade, maturidade tecnológica e confiabilidade, estes sistemas de Ciclo Rankine Orgânico são uma das tecnologias mais promissoras a serem implementadas para recuperar o calor desperdiçado em fontes de calor de média ou baixa qualidade.

No entanto, os ciclos ORC também apresentam desvantagens em relação a um ciclo Rankine convencional, como baixa eficiência, maior consumo da bomba, que é proporcional à vazão do volume do fluido e à diferença de pressão entre a saída e entrada da bomba, e o fato de os fluidos de trabalho orgânicos serem, frequentemente, inflamáveis, com baixa estabilidade química e de alto custo.

## Ciclos e processos termodinâmicos envolvidos em um Sistema ORC

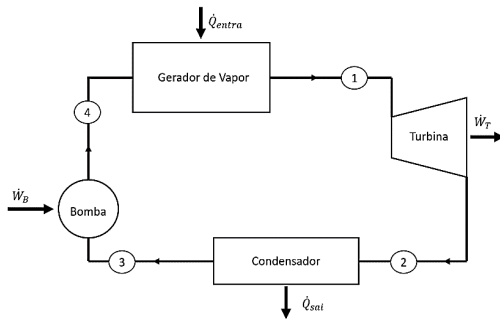
Para poder identificar os parâmetros de operação de sistemas de recuperação de calor para operar em ORC, primeiramente foi realizada uma análise dos ciclos e processos termodinâmicos existentes em um sistema ORC.

O ciclo ORC consiste em um ciclo fechado e seus componentes são uma bomba, um evaporador, uma turbina (sistema expensor) e um compressor, sendo a turbina o componente mais crítico do ORC. O fluido de trabalho é pressurizado na bomba e conduzido ao evaporador, onde, utilizando calor recuperado de processos industriais, é aquecido. Na turbina, o fluido é expandido, gerando trabalho e, finalmente, no condensador, calor é retirado do fluido, que volta ao seu estado inicial, antes de ser direcionado novamente para o evaporador.

Na Figura 1 pode-se observar o esquema simplificado de um ciclo de geração de energia ORC e os processos que ocorrem no mesmo. Conforme Çengel *et al.* (2013), os quatro processos ideais que compõem tanto um ciclo Rankine convencional, quanto um ciclo ORC, são: uma expansão isentrópica em uma turbina (sistema expensor), condensação à pressão constante, compressão isentrópica na bomba e, por fim, adição de calor à pressão constante no gerador de vapor.

Para a avaliação dos ciclos termodinâmicos foi considerado que o sistema funciona em regime permanente e perdas de calor para o ambiente foram negligenciadas, assim como quedas de pressão. Um ciclo ORC ideal em regime permanente possui quatro estágios, os quais podem ser observados na Tabela I.

Figura 1 – Definição dos pontos do ORC



### Condições de trabalho

Conforme Silva *et al.* (2021), plantas operando em ORC têm como característica a produção de eletricidade proveniente de baixas temperaturas, na faixa de 60 a 200°C.

Segundo Fiaschi, Manfrida e Maraschiello(2015), os sistemas ORC estão se tornando uma tecnologia líder para conversão de energia, com referência especial para aplicações de baixa potência (<100 kW) e baixa temperatura (<150 °C), onde o uso de vapor não é conveniente.

Para este projeto foram definidas duas condições de operação distintas. A primeira aplicação é de pequena escala, com 50 kW. A segunda aplicação analisada é de maior es-

cala, gerando 200 kW, de forma que se possa criar, a partir dos resultados, uma família de turbinas para operar nesse sistema.

O fluido de trabalho selecionado para a aplicação proposta é o R245fa, também conhecido como HFC-245FA, ou pelo seu nome químico 1,1,1,3,3-Pentafluoropropano.

### Eficiência do Sistema ORC

Um dos grandes desafios no dimensionamento de um sistema ORC é a eficiência, que costuma ser inferior que a de um ciclo Rankine convencional. De acordo com Quoilin e Lemort (2009), a eficiência dos Ciclos Rankine Orgânicos de alta temperatura não excede 24%, enquanto que os ciclos Rankine a vapor de água típicos apresentam uma eficiência térmica superior a 30%.

Em ciclos ORC, as melhores eficiências são alcançadas durante a utilização de fluidos secos e isentrópicos, devido a não mudança de fase durante a expansão da turbina, tornando-o superaquecimento desnecessário e, desta maneira, mais energia pode ser aproveitada de maneira útil da fonte quente (Sotomonte, 2015).

Segundo Rayegan e Tao (2010), o principal fator em um ciclo Rankine convencional

Quadro I – Processos Termodinâmicos presentes em um Ciclo Rankine Orgânico Ideal.

PROCESSOS		EQUIPAMENTOS
1-2	Expansão isentrópica adiabática e reversível	EXPANSOR
2-3	Desuperaquecimento isobárico	TROCADOR DE CALOR (CONDENSADOR)
3-4	Condensação isobárica	
4-5	Sub resfriamento isobárico	
5-6	Compressão	BOMBA
6-7	Pré-aquecimento isobárico	TROCADOR DE CALOR (EVAPORADOR)
7-8	Evaporação isobárica	
8-1	Superaquecimento isobárico	

Fonte: Adaptado de Quoilin e Lemort (2009).

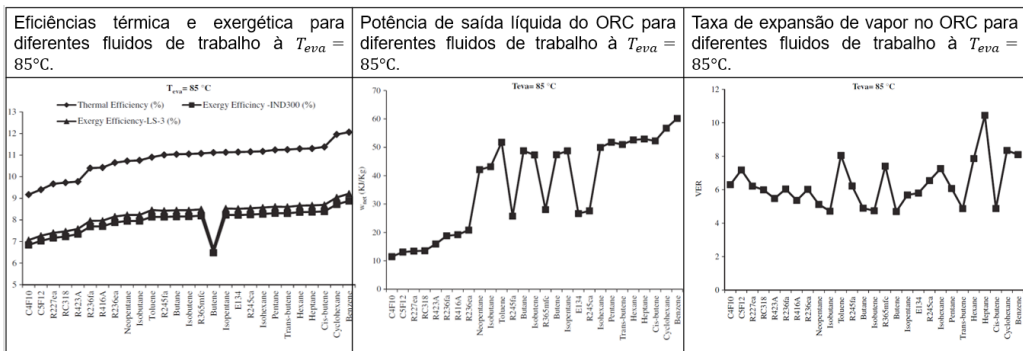
a água é a eficiência térmica. Para um fluido de trabalho específico e uma quantidade particular de taxa de transferência calor de entrada, a maior eficiência térmica leva a uma maior potência líquida de saída. Deste modo, a potência líquida deve ser considerada juntamente com a eficiência térmica.

Rayegan e Tao (2010) afirmam ainda que, a eficiência exergetica ou eficiência da segunda lei, que expressa a capacidade da energia realizar trabalho, é o fator que ajuda a escolher os fluidos de trabalho que recuperam uma maior parte da exergia de entrada do ciclo. Como consequência os autores alegam que, a eficiência térmica, a potência líquida de saída, a taxa de expansão de vapor através da turbina e a eficiência exergetica

do ciclo são os fatores mais importantes a serem considerados na melhoria do desempenho de um ORC. Nas Figuras 2 e 3 pode-se observar diversos fatores de desempenho de um sistema ORC, em duas temperaturas de evaporação (85°C e 130°C) para diferentes fluidos de trabalho.

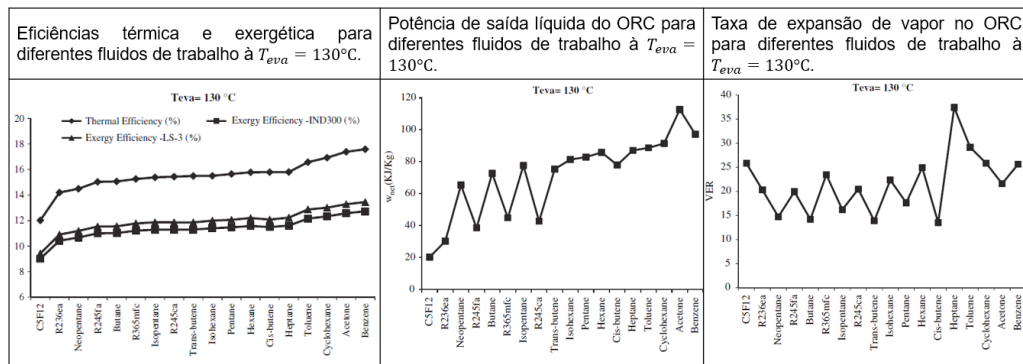
Em relação à Figura 2, Rayegan e Tao (2010) verificam que, para quase todos os fluidos, em ambas as temperaturas de evaporação, a eficiência térmica e a eficiência exergetica do ORC apresentam a mesma tendência em relação à mudança dos fluidos de trabalho. Deste modo, a eficiência térmica e a eficiência exergetica do ciclo possuem o mesmo papel na seleção do fluido de trabalho adequado.

Figura 2 – Fatores de desempenho de um sistema ORC (85°C).



Fonte: Rayegan e Tao (2010).

Figura 3 - Fatores de desempenho de um sistema ORC (130°C).



Fonte: Rayegan e Tao (2010).

## FLUIDO DE TRABALHO

O fluido de trabalho desempenha um papel de extrema importância no Ciclo Rankine Orgânico. Conforme Silva *et al.* (2021), é necessário que o fluido forneça as propriedades termodinâmicas necessárias para o sistema, além de possuir estabilidade química apropriada para a variação de temperatura desejada. Não obstante, a escolha do fluido de trabalho influencia na eficiência do sistema, nas condições de operação, no impacto ambiental e na viabilidade econômica.

Diversos artigos discorrem a respeito da seleção do fluido de trabalho mais adequado para um ORC. Silva *et al.* (2021) apontam diretrizes e indicadores que devem ser considerados para a escolha adequada do fluido de trabalho como: o desempenho termodinâmico, curva de vapor de saturação positiva ou isentrópica, alta densidade de vapor, baixa viscosidade, alto coeficiente de transferência de calor nos trocadores de calor, pressão de evaporação aceitável, pressão manométrica de condensação positiva, estabilidade de alta temperatura, alto nível de segurança, baixo Potencial de Destruição de Ozônio (ODP), baixo Potencial de Aquecimento de Efeito Estufa (PAG), boa disponibilidade e baixo custo, entre outros.

Deste modo, uma vez definidos os ciclos e processos termodinâmicos de um sistema ORC, foi realizada uma revisão literária a respeito do fluido R245fa, que foi selecionado para o projeto. Buscava-se avaliar se a escolha do mesmo para esta aplicação, bem como, fazer o levantamento de propriedades do fluido pertinentes para o projeto. Esta seção contempla os dados que foram obtidos a partir dessa pesquisa.

Sob pressão normal, o fluido R245fa é um líquido incolor, translúcido e fácil de fluir a 15°C, apresentando certa volatilidade.

É um gás incolor a 20°C. Insolúvel em água, miscível na maioria dos solventes orgânicos como etanol, éter, clorofórmio, óleos, hidrocarbonetos e assim por diante (Xiamen Juda Chemical & Equipment, 2020).

Rayegan e Tao (2010) compararam as capacidades dos fluidos de trabalho, quando usados em ciclos Rankine solares, em condições de trabalho semelhantes. Foram investigados cento e dezessete fluidos, dentre os quais o R245fa estava presente. Buscavam-se informações sobre efeitos das operações do sistema, eficiência energética e impacto no ambiente. Os autores afirmaram que fluidos de trabalho secos ou isentrópicos (com curva de temperatura-entropia infinitas ou positivas, respectivamente) são mais apropriados para sistemas ORC, uma vez que eles são superaquecidos após a expansão isentrópica, evitando a existência de gotículas de líquido na saída da turbina. As propriedades críticas apresentadas por Rayegan e Tao (2010), para o R245fa, podem ser observadas na Tabela I.

**Tabela I** – Propriedades críticas do fluido de trabalho R245fa

Desempenho do fluido sob parâmetros ideais	
(MPa)	0,87
(MPa)	0,16
(°C)	84
VER	5,85
(m³/kg)	0,0207
(°C)	88,5

Fonte: Adaptado de Rayegan e Tao (2010).

Shengjun, Huaixin e Tao (2011) investigaram a respeito de parâmetros otimizados e comparação de performance em alguns fluidos em ORC, em baixas temperaturas, em sistemas de energia geotermal (80 - 100°C). Os resultados para o fluido R245fa são exibidos na Tabela II. Os resultados encontra-

dos pelos autores para os fluidos estudados indicam que a escolha do fluido de trabalho varia em função objetivo.

**Tabela II** – Desempenho do fluido R245fa sob parâmetros ideais

Limite superior e inferior prático do ciclo	
máxima (MPa)	2,817
máxima (°C)	140
mínima (kPa)	149,4
mínima (°C)	25

Fonte: Adaptado de Shengjun, Huaixin e Tao (2011)

Quoilin e Lemort (2009) realizaram uma pesquisa tecnológica e econômica a respeito dos sistemas ORC. Eles constataram que o R245fa é um dos fluidos de trabalho mais utilizados em aplicações ORC e realizaram testes com quatro fluidos de trabalho diferentes. Eles afirmaram que o R245fa apresentou uma boa eficiência em relação aos outros fluidos testados.

**Tabela III** – Propriedades físicas do fluido de trabalho R245fa

Peso molecular	134
Ponto de ebulição (101,3 kPa)	58,8 °C
Ponto de congelamento	---
Temperatura crítica	256,9 °C
Pressão crítica	464,1 MPa
Densidade líquida saturada (30 °C)	82,7 kg/m <sup>3</sup>
Calor específico do líquido (30 °C)	0,33 kJ/kg.K
Calor específico de vapor isobárico (30°C e 101,3kPa)	0,22 kJ/kg.K
Densidade de vapor (25 °C)	4,6
Densidade do líquido (20 °C)	1,32 kg/cm <sup>3</sup>
Potencial de destruição do Ozônio (PDO)	0
Potencial de aquecimento global (PAG) – 100 anos	820

Fonte: Adaptado de Xiamen Juda Chemical & Equipment (2020)

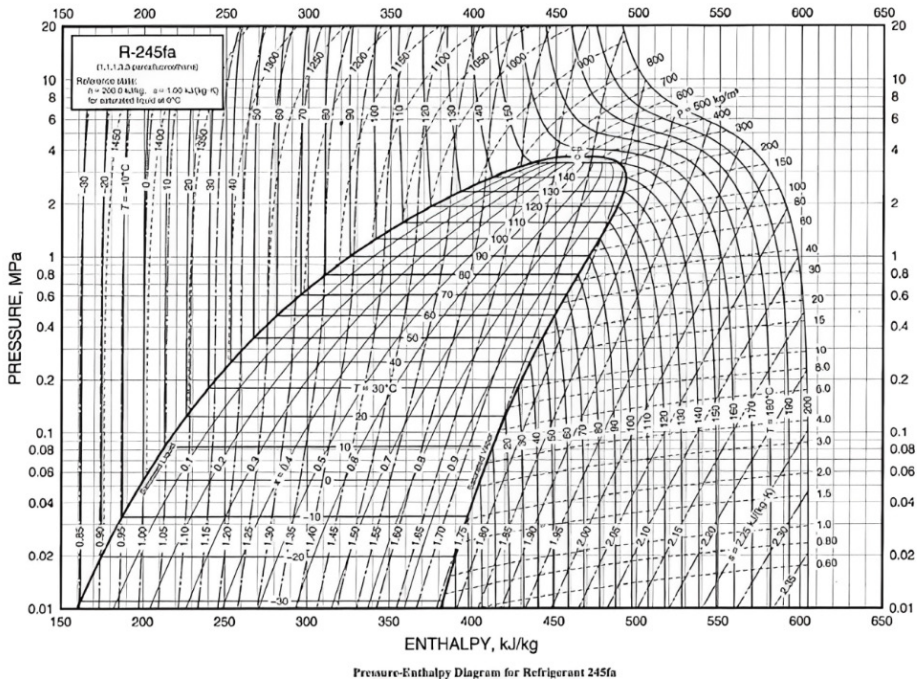
Do mesmo modo, Fiaschi, Manfrida e Maraschiello (2015) implementaram um modelo unidimensional para o projeto de turbo expansores radiais para ORC, para uma aplicação de pequena escala (50 kW). Os autores utilizaram seis fluidos de trabalho diferentes, incluindo o refrigerante R245fa, a fim de comparar os resultados obtidos com cada fluido. Eles obtiveram porcentagem de eficiência total de 1,5 a 2,5% e concluíram que os fluidos R236fa e R245fa tiveram melhor desempenho para essa aplicação.

Conforme Xiamen Juda Chemical & Equipment (2020), a utilização desse fluido de trabalho pode melhorar a eficiência do sistema ORC em 5% a 8%. Na tabela III, pode-se observar as propriedades físicas do fluido R245fa. Nota-se que pode haver divergências nos valores devido às temperaturas e pressões de trabalho adotadas por cada pesquisador.

Nas Figuras 4 e 5 observa-se a curva de pressão x entalpia do fluido R245fa bem como sua curva de vapor de saturação.

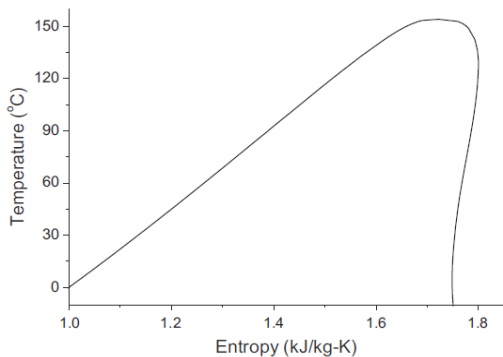


Figura 4 – Curva de pressão x entalpia do R245fa.



Fonte: Toro e Capata (2014).

Figura 5 – Curva de vapor de saturação positiva do R245fa.



Fonte: Kang (2012).

A partir da revisão literária e dos dados levantados, foi averiguado que diversos autores apontam o R245fa como fluido mais adequado para a aplicação proposta. Ademais, o fluido de trabalho R245fa possui

propriedades favoráveis para a aplicação em sistemas ORC operando nas condições propostas. Assim foi corroborado que este é, de fato, o fluido mais adequado para o projeto desenvolvido.

### Variáveis e equacionamento dos processos termodinâmicos do ORC

Após a análise do fluido de trabalho escolhido, iniciou-se o estudo das variáveis presentes em cada um dos quatro processos existentes no ciclo, conforme apresentado na Figura 1, que servirá de referência para esta parte do estudo, bem como o levantamento do equacionamento necessário para obter o valor de cada uma delas.

O ponto 1, presente na Figura 1, consiste na entrada da turbina. Aqui, o fluido é vapor

saturado, possuindo uma pressão  $p_1$ , uma entalpia específica  $h_1$ , e uma entropia específica  $s_1$ .

O ponto 2 corresponde à saída da turbina – entrada do condensador. Neste ponto há uma pressão  $p_2$ , e, uma vez que a expansão que ocorre na turbina é isentrópica, a entalpia é constante entre os pontos 1 e 2, sendo assim:

$$s_1 = s_2 \quad (1)$$

Esse ponto também possui um título  $x_2$ . Sendo assim, tem-se

$$x_2 = \frac{s_2 - s_f}{s_g - s_f} \quad (2)$$

onde corresponde à entropia específica da fase líquida e corresponde à entropia específica da fase gasosa. Desse modo, pode-se encontrar a entalpia específica do ponto 2, a partir de:

$$h_{2,s} = h_f + x_2(h_g - h_f) \quad (3)$$

No ponto 3 o fluido sai do condensador como líquido saturado, possuindo uma entalpia específica  $h_3$  e pressão equivalente à do ponto 2, assim:

$$p_2 = p_3 \quad (4)$$

Na bomba, localizada entre os pontos 3 e 4, ocorre compressão isentrópica, portanto, a entropia específica do ponto 3 e do ponto 4 são iguais:

$$s_4 = s_3 \quad (5)$$

Para encontrar a entalpia específica do ponto 4, , pode-se realizar interpolação nas tabelas de líquido comprimido ou pela Equação (6) caso o valor do volume específico do fluido de trabalho na fase líquida for conhecido:

$$h_{4,s} = h_3 + v_3(p_4 - p_3) \quad (6)$$

Uma vez determinadas as variáveis relacionadas com cada ponto do sistema, pode-se determinar o equacionamento para

os processos termodinâmicos que ocorrem ao longo do ciclo. Entre os pontos 1 e 2 (processo de expansão isentrópica na turbina), considerando um processo ideal, pode-se expressar o rendimento isentrópico resultante na turbina como:

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \quad (7)$$

sendo  $h_{2s}$  a entalpia específica de saturação no ponto 2.

A potência gerada pela turbina é descrita como:

$$\dot{W}_t = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (8)$$

No processo entre 2 e 3, ocorre rejeição isobárica de calor no condensador, o que pode ser expresso por:

$$\dot{Q}_c = \dot{m}(h_3 - h_2) \quad (9)$$

onde corresponde à vazão em massa do fluido de trabalho em [kg/s].

O processo de 3 para 4 corresponde a um processo de compressão isentrópico, no qual assumem-se as mesmas hipóteses de processo ideal descritos entre 1 e 2. A eficiência da bomba pode ser representada por:

$$\eta_b = \frac{h_{4s} - h_3}{h_4 - h_3} \quad (10)$$

onde é a entalpia específica de saturação no ponto 4.

A potência consumida pela bomba é dada por:

$$\dot{W}_b = \dot{m}(h_4 - h_3) \quad (11)$$

No processo de 4 para 1 calor é absorvido à pressão constante no evaporador de uma fonte de calor para o fluido, e pode-se calculá-lo por meio de:

$$\dot{Q}_e = \dot{m}(h_4 - h_1) \quad (12)$$

A potência útil refere-se à diferença entre as potências da turbina e da bomba, assim sendo:

$$\dot{W}_{\text{útil}} = \dot{W}_t - \dot{W}_b \tag{13}$$

O rendimento térmico do ciclo ORC é determinado com base na primeira lei da termodinâmica, e corresponde à relação entre a potência útil e o calor que é fornecido ao ciclo. Deste modo, tem-se:

$$\eta_T = \frac{\dot{W}_t - \dot{W}_b}{\dot{Q}_e} \tag{14}$$

A razão de trabalho reversa,  $BRW$ , que corresponde à relação entre o trabalho realizado por um sistema e o trabalho que seria realizado se o processo fosse reversível, é definida como:

$$BRW = \frac{\dot{W}_b}{\dot{W}_t} = \frac{(h_4 - h_3)}{(h_1 - h_2)} \tag{15}$$

Deste modo, determinaram-se as equações necessárias para avaliar o sistema.

## Dimensionamento dos processos termodinâmicos

Foram determinados para a primeira etapa do projeto o dimensionamento básico dos principais componentes do ciclo ORC e o desenvolvimento de uma ferramenta computacional de análise térmica e fluido dinâmica do ciclo ORC em função da disponibilidade de energia (fluido, temperatura, pressão, vazão) das plantas para poder controlar os parâmetros de operação dos sistemas de recuperação de calor, e dimensionar os principais componentes do ciclo ORC. Nesse sentido, foi utilizada uma planilha eletrônica como ferramenta computacional para realizar os cálculos necessários para a análise e dimensionamento do ciclo, obtendo resultados preliminares para os mesmos.

Foram utilizadas as equações que foram levantadas anteriormente para determinar os valores das propriedades em cada ponto do ciclo termodinâmico. Foram considerados os pontos previamente definidos na Figura 1,

numerados de 1 a 4, cada um representando uma posição no ciclo (entrada da turbina, saída da turbina, entrada da bomba e saída da bomba, respectivamente).

As propriedades termodinâmicas de cada um desses pontos podem ser observadas nas Tabelas IV, V, VI e VII, sendo os valores da Tabela IV (ponto 1 – entrada da turbina) utilizados como base para todo o estudo, conforme a metodologia desenvolvida por Lizeth (2016).

**Tabela IV** – Propriedades termodinâmicas no ponto 1

Temperatura (°C)	135
Pressão (MPa)	2,5773
Entalpia (kJ/kg)	488,566
Entropia (kJ/kg.K)	1,798
Estado	Vapor Saturado

**Tabela V** – Propriedades termodinâmicas no ponto 2

Temperatura (°C)	38,95
Pressão (MPa)	0,1227
Entalpia (kJ/kg)	436,851
Entropia (kJ/kg.K)	1,798
Estado	Vapor Superaquecido

**Tabela VI** – Propriedades termodinâmicas no ponto 3

Temperatura (°C)	20
Pressão (MPa)	0,1227
Entalpia (kJ/kg)	225,865
Entropia (kJ/kg.K)	1,091
Estado	Líquido Saturado

**Tabela VII** – Propriedades termodinâmicas no ponto 4

Temperatura (°C)	135
Pressão (MPa)	2,5773
Entalpia (kJ/kg)	225,866
Entropia (kJ/kg.K)	1,091
Estado	Vapor Saturado

Com as informações apresentadas nas Tabelas IV, V, VI e VII pode-se aplicar as equações que definem os parâmetros de operação do ciclo. Para isso, deve-se partir da energia disponível, ou seja, da potência do ciclo que foi definida no início do projeto (50 kW e 200 kW), e então encontrar os valores da vazão mássica. Com o valor da vazão mássica definido, pode-se determinar os calores de entrada e saída do ciclo, bem como o trabalho desenvolvido pela turbina e o trabalho consumido pela bomba. Os resultados para as duas plantas estão apresentados nas Tabelas VIII e IX.

**Tabela VIII** – Características do Ciclo para geração de 50 kW.

Potência do ciclo (kW)	50
Rendimento (%)	19,57965192
Vazão mássica (kg/s)	0,966837475
Calor de entrada (kW)	253,6536788
Calor de saída (kW)	203,9891714
Potência da turbina (kW)	49,66547423
Potência da bomba (kW)	0,000966837
Razão de trabalho reversa (%)	0,000019467

**Tabela IX** – Características do Ciclo para a geração de 200 kW.

Potência do ciclo (kW)	200
Rendimento (%)	22,22
Vazão mássica (kg/s)	3,8689
Calor de entrada (kW)	1016
Calor de saída (kW)	816
Potência da turbina (kW)	200,08
Potência da bomba (kW)	0,00387
Razão de trabalho reversa (%)	0,001934

Deste modo, foi obtido o dimensionamento básico do sistema ORC para as duas condições de operação definidas.

## Conclusões

Por meio deste trabalho realizou-se uma análise dos parâmetros básicos de operação de um sistema de recuperação de calor operando em Ciclo Rankine Orgânico. Foi também realizado o dimensionamento preliminar dos componentes básicos do sistema por meio de uma ferramenta computacional desenvolvida em planilha eletrônica, a qual também foi utilizada para realizar uma análise térmica e fluido dinâmica do ciclo ORC, em função da disponibilidade de energia.

Foi realizado um estudo a respeito dos sistemas operando em Ciclo Rankine Orgânico a partir da literatura existente. A partir disso, foram, inicialmente, identificados os ciclos e processos existentes em cada ponto do ciclo. Com base nisso, foram definidos quatro pontos de importância no processo, correspondendo à entrada da turbina, saída da turbina – entrada do condensador, saída do condensador – entrada da bomba e saída da bomba – entrada do gerador de vapor, os quais serviram de referência ao longo de todo o desenvolvimento do projeto.

Identificou-se que, geralmente, a eficiência do ORC é notavelmente baixa em comparação com os ciclos Rankine convencionais. Deste modo, averiguou-se que a eficiência do sistema depende, principalmente, do dimensionamento da turbina, o que não foi contemplado neste trabalho, e da escolha do fluido de trabalho.

Portanto, é de grande importância assegurar-se de que a escolha do fluido é adequada para as condições de operação desejadas. Nesse sentido, foi realizada uma revisão literária e levantamento das principais propriedades do fluido R245fa, que foi selecionado para este trabalho. Com base nisso, foi possível averiguar que este é, de fato, o fluido mais adequado para as condições de opera-

ção propostas, possuindo propriedades que correspondem às características necessárias para aplicação em ORC.

Foram, então, levantadas as variáveis presentes nos quatro processos que ocorrem no ORC, bem como suas respectivas equações. Constatou-se que as principais variáveis envolvidas no processo são a vazão mássica, potência consumida pela bomba, potência produzida pela turbina, transferência de calor para o gerador de vapor, transferência de calor do condensador, bem como as tem-

peraturas, pressões, entalpias e entropias na entrada e saída de cada componente do ciclo.

A partir disso, considerando como condição de trabalho duas plantas distintas, uma operando em pequena escala, com 50 kW e outra operando a 200 kW, foi possível realizar o dimensionamento básico dos componentes do ciclo. Para isso, foi utilizada uma planilha eletrônica como ferramenta computacional para realizar a análise e dimensionamento preliminares do ciclo e dos seus componentes, em função da disponibilidade energética.

## REFERÊNCIAS

- [Hot Item] **Agente de expansão de espuma de poliuretano R245FA**. Disponível em: [https://pt.made-in-china.com/co\\_ykguomao/product\\_Blowing-Agent-for-Polyurethane-Foam-R245fa\\_rsoihriyg.html](https://pt.made-in-china.com/co_ykguomao/product_Blowing-Agent-for-Polyurethane-Foam-R245fa_rsoihriyg.html). Acesso em: 26 set. 2023.
- AL JUBORI, A. M. *et al.* Design and manufacturing a small-scale radial-inflow turbine for clean organic Rankine power system. **Journal of Cleaner Production**, v. 257, p. 120488, 2020.
- ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 7. ed. [s.l.] Bookman Editora, 2013.
- EFSTATHIADIS, T. *et al.* Geometry Optimization of Power Production Turbine For A Low Enthalpy ( $\leq 100^\circ\text{C}$ ) ORC System. **Energy Procedia**, v. 75, p. 1624-1630, 2015.
- FIASCHI, D.; MANFRIDA, G.; MARASCHIELLO, F. Design and performance prediction of radial ORC turboexpanders. **Applied Energy**, v. 138, p. 517-532, 2015.
- HUNG, T. C.; SHAI, T. Y.; WANG, S. K. A review of organic rankine cycles (ORCs) for the recovery of low-grade waste heat. **Energy**, v. 22, n. 7, p. 661-667, 1997.
- INFORMATICS, N. O. OF D. AND. **Saturation Properties for 1,1,1,3,3-Pentafluoropropane (R245fa)**. Disponível em: <https://webbook.nist.gov/cgi/fluid.cgi?TLow=10&THigh=153&TInc=&Digits=5&ID=C460731&Action=Load&Type=SatP&TUnit=C&PUnit=MPa&DUnit=kg%2Fm3&HUnit=kJ%2Fkg&WUnit=m%2Fs&VisUnit=Pa>. Acesso em: 30 out. 2023.
- KANG, S. H. Design and experimental study of ORC (organic Rankine cycle) and radial turbine using R245fa working fluid. **Energy**, v. 41, n. 1, p. 514-524, 2012.
- LIZETH, A. Projeto de Turbinas Radiais Operando no Ciclo Rankine Orgânico Utilizando Metodologias de Otimização e CFD. 1 nov. 2016.
- O que é R245fa Pentafluoropropane ou Refrigerante R245fa ou Agente de Espuma R245fa - Notícias - Xiamen Juda Trading Co., Ltd.** Disponível em: <https://pt.fluorined-chemical.com/news/what-is-r245fa-pentafluoropropane-or-refrigera-36858513.html>. Acesso em: 24 set. 2023.
- RAYEGAN, R.; TAO, Y. X. A procedure to select working fluids for Solar Organic Rankine Cycles (ORCs). **Renewable Energy**, v. 36, n. 2, p. 659-670, 2010.

SILVA, E. R. *et al.* Preliminary design, optimization and CFD analysis of an organic rankine cycle radial turbine rotor. **Applied Thermal Engineering**, v. 195, p. 117103-117103, 2021.

SOTOMONTE, C. A. R. **Otimização Multiobjetivo para a seleção de fluidos de trabalho e parâmetros de projeto no Ciclo Rankine Orgânico**. 2015.

SYLVAIN QUOILIN; LEMORT, V. **Technological and Economical Survey of Organic Rankine Cycle Systems**. 1 abr. 2009.

TORO, C.; CAPATA, R. Small-Scale ORC Energy Recovery System for Wasted Heat: Thermodynamic Feasibility Analysis and Preliminary Expander Design. **Proceedings of 1st International e-Conference on Energies**. 14 mar. 2014.