

UFRJ - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

EDUARDO MOREIRA IDE

**ANÁLISE COMPARATIVA DE UM CICLO RANKINE ORGÂNICO DE ACORDO COM
DIFERENTES FLUIDOS DE TRABALHO**

MACAÉ

Agosto, 2019

EDUARDO MOREIRA IDE

**ANÁLISE COMPARATIVA DE UM CICLO RANKINE ORGÂNICO DE ACORDO COM
DIFERENTES FLUIDOS DE TRABALHO**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao departamento de Engenharia
Mecânica como requisito parcial para obtenção
do grau de Graduado em Engenharia Mecânica da
Universidade Federal do Rio de Janeiro.

ORIENTADOR: DIEGO CUNHA MALAGUETA

MACAÉ
Agosto, 2019

ANÁLISE COMPARATIVA DE UM CICLO RANKINE ORGÂNICO DE ACORDO COM
DIFERENTES FLUIDOS DE TRABALHO

EDUARDO MOREIRA IDE

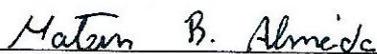
Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao departamento de Engenharia
Mecânica como requisito parcial para obtenção
do grau de Graduado em Engenharia Mecânica da
Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Examinado por:



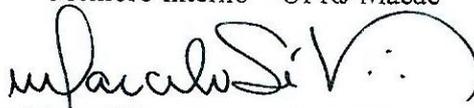
Prof. Diego Cunha Malagueta, D.Sc.

Orientador – UFRJ Macaé



Prof. Mateus Barros de Almeida, Eng.

Membro Interno – UFRJ Macaé



Prof. Marcelo Silva, D.Sc.

Membro Interno – UFRJ Macaé

MACAÉ

Agosto, 2019

Dedico esta monografia aos profissionais ligados a educação, que ousaram em interiorizar a UFRJ, culminando na fundação do Campus UFRJ-Macaé. E a todos que abraçaram essa ideia, trazendo o melhor ensino deste país para a cidade de Macaé.

AGRADECIMENTOS

A todos os cidadãos brasileiros que custearam meus estudos através dos seus impostos. Aos meus pais que me levaram ao caminho do conhecimento. Ao Professor Diego Malagueta que me forneceu os conhecimentos em termodinâmica, e me orientou, propiciando a elaboração deste trabalho. Aos Professores desta instituição que me deram a oportunidade de realizar uma antiga aspiração: o curso de Engenharia Mecânica. Agradeço aos meus colegas e amigos que estiveram comigo nesta jornada para graduação. Em particular: À Kathleen Torres e ao Mateus Almeida que estiveram também no curso técnico; Ao Gabriel Ayres, Mateus Muti, Guilherme Maia e à Maíra Duarte que me acompanharam de perto nesta graduação; À Maristela Rocha que me deu a motivação final para concluir este trabalho.

RESUMO

O presente trabalho objetiva a seleção dos principais fluidos orgânicos para trabalhar no ciclo Rankine orgânico entre as temperaturas de 100 a 300 °C, avaliando suas características físico-químicas e termodinâmicas. Os resultados discutidos aqui foram obtidos através de simulações computacionais em diferentes patamares de temperatura e pressão. Dados estes resultados, os fluidos foram comparados em relação à eficiência, vazão e valores de pressão e temperatura. Uma metodologia de trabalho com fluidos secos e fluidos isentrópicos é proposta a fim de compará-los. A utilização do software CoolProp é satisfatória para os cálculos das propriedades termodinâmicas. Conclui-se que a seleção de um fluido dependerá das características de necessidades do projeto, Os hidrocarbonetos se mostraram como uma boa opção como fluidos secos para utilização no ORC.

Palavras Chave: Ciclo Rankine orgânico, fluido orgânico, seleção de fluidos, *CoolProp*.

ABSTRACT

The present work aims at the selection of the main organic fluids to work in the organic Rankine cycle between the temperatures of 100 and 300 ° C, evaluating their physico-chemical and thermodynamic characteristics. The results discussed here were obtained through computational simulations at different temperature and pressure levels. Given these results, the fluids were compared in relation to their efficiency, flow rate and pressure and temperature values. A methodology of work with dry fluids and isentropic fluids is proposed in order to compare them. The use of CoolProp software is satisfactory for the thermodynamic properties calculations. It is concluded that the selection of a fluid will depend on the needs characteristics of the project. Hydrocarbons have proved to be a good choice as dry fluids for use in ORC.

Keywords: Organic Rankine Cycle, Organic Fluid, Fluid Selection, *CoolProp*.

SUMÁRIO

RESUMO.....	VI
ABSTRACT.....	VII
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS.....	XII
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	XIII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIV
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO TEÓRICA.....	1
1.2 MOTIVAÇÕES E JUSTIFICATIVAS	2
1.3 OBJETIVOS GERAIS.....	2
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
2. REFERENCIAL TEÓRICO	3
2.1 CICLO RANKINE ORGÂNICO (ORC)	3
2.1.1 Conceito.....	3
2.1.2 Aplicações, Vantagens e Desvantagens.	4
2.2 FLUIDO DE TRABALHO	7
2.2.1 Propriedades Termofísicas.....	8
2.2.2 Seleção de fluidos orgânicos mais utilizados	10
2.2.3 Comparação entre fluido orgânico e a água	12
2.2.4 Critérios de seleção dos fluidos orgânicos	12
3. METODOLOGIA	18
3.1 SELEÇÕES DOS FLUIDOS ANALISADOS	18
3.2 MODELAGEM DO CICLO RANKINE ORGÂNICO.....	18
3.2.1 Equacionamento do <i>CoolProp</i>	18
3.2.2 Modelagem Termodinâmica do ciclo Rankine orgânico	20
3.2.3 Premissas do ciclo	21

3.2.4	Evaporador.....	21
3.2.4	Turbina.....	22
3.2.5	Condensador.....	23
3.2.6	Bomba	23
3.2.7	Eficiência térmica do ciclo	23
4.	ANÁLISE DE RESULTADOS	24
4.1	FLUIDOS SELECIONADOS	24
4.2	CICLOS RANKINE ORGÂNICOS	26
4.2.1	ORC n-Butano	26
4.2.2	ORC n-Pentano.....	29
4.2.3	ORC Hexametildisiloxano (MM)	32
4.2.4	ORC n-Heptano	35
4.2.5	ORC Tolueno	38
4.2.6	ORC R141b	40
4.3	COMPARAÇÃO DOS FLUIDOS	44
4.3.1	Pressão x Temperatura	44
4.3.2	Temperatura x Eficiência	46
4.3.3	Vazão x Temperatura	48
4.3.4	Comparação do Tolueno com a água.....	50
4.4	CLASSIFICAÇÃO DOS FLUIDOS EM RELAÇÃO AOS PARÂMETROS ESTUDADOS	52
5.	CONCLUSÃO.....	54
	BIBLIOGRAFIA	55
	APÊNDECE A – TABELAS DAS PROPRIEDADES DOS FLUIDOS ANALIZADO ...	58
A.1	N-BUTANO.....	58
A.2	N-PENTANO	59
A.3	HEXAMETILDISILOXANO MM	60
A.4	N-HEPTANO	61
A.5	TOLUENO	63
A.6	R141B.....	65
A.7	CICLO-PENTANO	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo de Rankine e diagrama T-S.....	4
Figura 2 - Diagrama T-S típico do Ciclo Rankine Orgânico.....	6
Figura 3 - Eficiência de Diferentes Ciclos.....	6
Figura 4 - Ilustração de diagrama temperatura por entropia	8
Figura 5 - Tipos de diagrama T-s	9
Figura 6 - Curvas de Saturação para fluidos orgânicos, de refrigeração e água.	12
Figura 7 - Imagem do <i>Exel</i> usando a formula do <i>CoolProp</i>	20
Figura 8 - Eficiência do n-Butano em função da Pressão	27
Figura 9 - Diagrama de Vazão em função de Razão de compressão para o n-Butano ($T_a > 100^\circ\text{C}$).....	28
Figura 10 - Calor latente por potencia líquida para o n-Butano.....	29
Figura 11 - Eficiência do n-Pentano em função da Pressão	30
Figura 12 - Gráfico de Vazão por Razão de compressão do n-Pentano ($T_a > 100^\circ\text{C}$).....	31
Figura 13 - Calor latente por potencia líquida para o n-Pentano.....	32
Figura 14 - Eficiência do Hexametildisiloxano em função da Pressão	33
Figura 15 - Gráfico de Vazão por Razão de compressão do Hexametildisiloxano ($T_a > 100^\circ\text{C}$)	34
Figura 16 - Calor latente por potencia líquida para o Hexametildisiloxano	34
Figura 17 - Detalhamento das propriedades termodinâmicas do heptano no ciclo ORC.....	35
Figura 18 - Eficiência do n-Heptano em função da Pressão.....	36
Figura 19 - Gráfico de Vazão por Razão de compressão do n-Heptano ($T_a > 100^\circ\text{C}$)	37
Figura 20 - Calor latente por potencia líquida para o Heptano	37
Figura 21 - Eficiência do Tolueno em função da Pressão.....	39
Figura 22 - Gráfico de Vazão por Razão de compressão do Tolueno ($T_a > 100^\circ\text{C}$).....	39
Figura 23 - Calor latente por potencia líquida para o Tolueno	40
Figura 24 - Diagrama T-s ilustrativo das simulações do R-141b.....	41
Figura 25 - Ganho de Eficiência pelo superaquecimento	42
Figura 26 - Eficiência do R141b em função da Pressão	43
Figura 27 - Gráfico de Vazão por Razão de compressão do R141b ($T_a > 100^\circ\text{C}$).....	43
Figura 28 - Calor latente por potencia líquida para o R141b	44
Figura 29 - Gráficos Comparativo de Pressão x Temperatura.....	45
Figura 30 - Gráfico de Pressão x Temperatura do Butano e Pentano	46

Figura 31 - Gráfico de Eficiência x Temperatura (100-150°C)	47
Figura 32 - Gráfico de Eficiência x Temperatura (150-200°C)	47
Figura 33 - Gráfico de Eficiência x Temperatura (200-250°C)	47
Figura 34 - Gráfico de Vazão x Temperatura (100-150°C)	48
Figura 35- Gráfico de Vazão x Temperatura (150-200°C)	49
Figura 36- Gráfico de Vazão x Temperatura (200-250°C)	49
Figura 37 - Comparação de eficiências: Água e Tolueno	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos fluidos Orgânicos do ORC.....	7
Tabela 2 - Fluidos orgânicos selecionados e suas propriedades termodinâmicas.....	11
Tabela 3 - Relação de alguns Fluidos e suas temperaturas máximas de estabilidade	14
Tabela 4 - Representação de trabalhos anteriores sobre seleção de fluidos e seus resultados .	16
Tabela 5 - Patamares de seleção dos fluidos.....	24
Tabela 6 - Pré-seleção de fluidos	24
Tabela 7 - Características do n-Butano	26
Tabela 8 - Características do n-Pentano	30
Tabela 9 - Características do Hexametildisiloxano.....	33
Tabela 10 - Características do Hexametildisiloxano	36
Tabela 11 - Características do Tolueno.....	38
Tabela 12 - Características do R141b	42
Tabela 13 - Classificação Qualitativa das propriedades dos Fluidos.....	52
Tabela 14 - Classificação Qualitativa dos Fluidos no Ciclo ORC	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ORC	<i>Organic Rankine Cycle</i> ou Ciclo Rankine Orgânico.
ODP	<i>Ozone Depletion Potential</i> ou Baixo potencial de destruição da camada de ozônio.
GWP	<i>Global Warming Potential</i> ou Potencial de aquecimento global.
ALT	<i>Atmospheric Lifetime</i> ou tempo de degradação na atmosfera.
CFC	Cloro-Fluor-Carbono.
HCFC	Hidro-Cloro-Fluor-Carbono.
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.</i>
EoS	Equação Cúbica de Estado.
GHS	Globally Harmonized System of Classification and Labeling of Chemicals ou Sistema Globalmente Harmonizado de Classificação e Rotulagem de Produtos Químicos.
MM	Hexametildisiloxano.

LISTA DE SÍMBOLOS

- $W_{\text{entr.}}$ – Energia de entrada da bomba
 $q_{\text{entr.}}$ – Calor de entrada na fonte quente
 $W_{\text{saída}}$ – Energia de saída na turbina
 $q_{\text{saída}}$ – Calor de saída na fonte fria
 T – Temperatura
 T_c – Temperatura crítica
 T_b – Temperatura na saída do condensador
 T_a – Temperatura na saída do evaporador
 P – Pressão
 P_c – Pressão crítica
 P_a – Pressão no evaporador
 P_b – Pressão no condensador
 P_{sat} – Pressão de saturação
 R – Constante universal dos gases
 S ou s – Entropia
 h – Entalpia
 x ou Q – Título na turbina
 θ – Ângulo do Diagrama T-s
 \dot{Q}_h – Fluxo de calor da fonte quente
 \dot{Q}_l – Fluxo de calor da fonte fria
 \dot{W}_t – Taxa de energia da turbina
 \dot{W}_b – Taxa de energia da bomba
 \dot{W}_{liq} – Taxa de energia líquida
 η – Eficiência térmica
 w – Fator acêntrico
 k_1 – Fator de correção de Stryjek-Vera
 δ – Termo adimensional de densidade
 τ – Termo adimensional de Temperatura
 α – Termo adimensional de Helmholtz
 \dot{m} – Vazão mássica

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO TEÓRICA

Considerando a microeconomia de processos industriais ou mesmo domésticos, a fatia do custo com energia em geral é a maior. A energia é um recurso inerente a quase tudo. Dessa forma o ganho com sua economia será sempre claramente vantajoso (REIS, 2018).

Dados da Agência Internacional de Energia preveem que a demanda de energia em 2030 será de 30364 TWh contra um consumo de 16700 TWh em 2010, o que significa uma projeção de que o consumo quase dobrará em 20 anos (CARLÃO, 2010). Pereira (2017) aponta que essa demanda, se não planejada, poderá causar um aumento no consumo de combustíveis fósseis, aumentando a liberação de CO₂ e contribuindo com o efeito estufa.

Dentre as fontes de energia conhecidas estão as fontes térmicas, as quais o presente trabalho discute. Existem diversas fontes de energia térmica, dentre as mais importantes se destacam: queima de combustíveis fósseis ou biomassa, geotérmicas, concentradores solares, entre outras. Todas estas podem usar para conversão de energia os ciclos térmicos tradicionais, Brayton e Rankine.

Sobre o ciclo Rankine, normalmente, o fluido de trabalho utilizado é a água. Todavia, sistemas de pequeno porte, usualmente, não possuem capacidade térmica de trabalhar com a água, estes sistemas só são possíveis com o uso de fluidos orgânicos e são chamados de “ciclos Rankine Orgânicos”. Estes são adequados para fontes de baixa (<150°C) ou moderada (150-300°C) temperatura, onde a água falha por razões econômicas e técnicas (TCHANCHE, 2010).

Carlão (2010) aborda sobre o aumento da demanda mundial de energia dizendo que: *“A pressão económico-social tem levado a um incremento da chamada produção de energia eléctrica descentralizada. Esta produção assenta em pequenas unidades, de reduzida potência instalada, distribuídas em função dos recursos existentes”*. Essas fontes em sua maioria são: mini-hídrica, eólica, solar, geotérmica, biomassa, calor residual. As quatro últimas, dentro do caso citado por Carlão (2010), são consideradas fontes de baixa e média capacidade térmica, adequadas para os ciclos Rankine orgânicos.

Após constatar a necessidade do uso deste ciclo de potência, surge a seguinte dúvida: Qual fluido utilizar? Pois não há um fluido padrão para o ciclo Rankine orgânico, podendo ser utilizados diversos fluidos, dentre eles hidrocarbonetos e refrigerantes, cabendo determinar o fluido que melhor se adequa às temperaturas e características do sistema no qual se trabalhará. Deste modo, gera-se uma nova linha de estudo, em que primeiramente, identificam-se as

necessidades do sistema, e em seguida, identificam-se as características de cada fluido com a finalidade de buscar o mais adequado.

1.2 MOTIVAÇÕES E JUSTIFICATIVAS

A partir do trabalho de conclusão de curso realizado por Santos (SANTOS, 2018), cujo intuito foi dimensionar um condensador usando o heptano como fluido de trabalho, sugeriu-se a análise da utilização de outros fluidos orgânicos no ciclo Rankine Orgânico (ORC), avaliando suas respectivas eficiências, sendo essa a principal motivação para o estudo realizado no presente trabalho.

Devido ao fato de não haver fluido padrão para o ciclo Rankine, surge a necessidade de avaliação de características de fluidos distintos para verificar sua aplicabilidade de acordo com as necessidades do sistema a ser empregado.

1.3 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo desse trabalho é avaliar a atuação de diferentes fluidos orgânicos em um ORC funcionando entre os patamares de temperatura de 100 e 300 °C e suas características físico-químicas e termodinâmicas.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comparar as características físico-químicas e termodinâmicas dos principais fluidos selecionados.
- Definir uma metodologia para que seja possível comparar fluido isentrópico com fluido seco.
- Comparar o ciclo Rankine orgânico com o ciclo Rankine a vapor.
- Reunir os principais fluidos de trabalho para ORC.
- Avaliar os principais critérios de seleção de um fluido orgânico para ORC.
- Estudar o uso do programa *CoolProp* para ciclos termodinâmicos.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CICLO RANKINE ORGÂNICO (ORC)

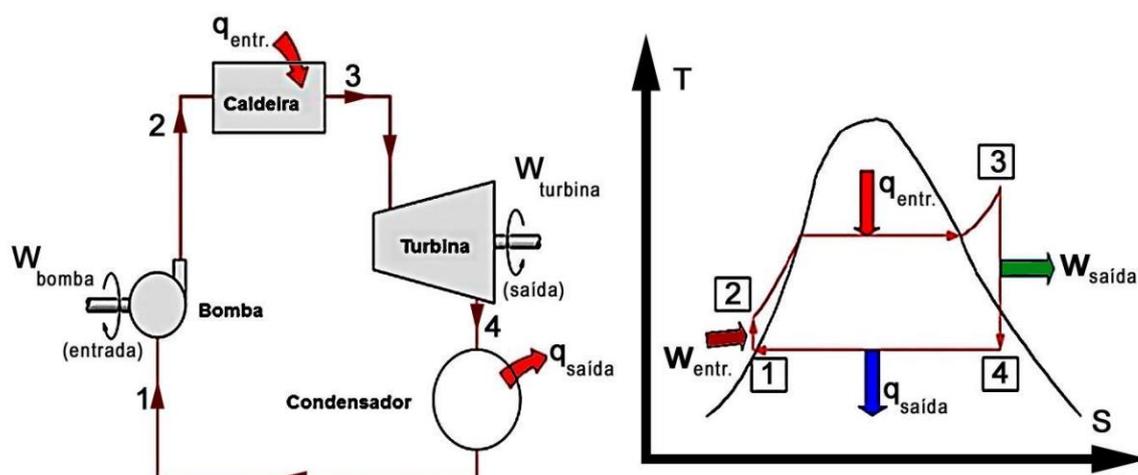
2.1.1 Conceito

O ciclo Rankine é um ciclo térmico a vapor criado por Wiliam John Macquom Rankine, geralmente utilizado na geração de energia elétrica. Foi a principal fonte de geração de energia no século XX, porém ainda hoje, é responsável por cerca de 90% da eletricidade no mundo (CORREIA, 2014).

O Ciclo Rankine Orgânico é baseado em aquecer um fluido líquido a uma alta pressão para que passe ao estado de vapor e, posteriormente, através de uma expansão isentrópica gerar trabalho mecânico. Para que esse ciclo seja fechado é necessário que o fluido, após a expansão, volte ao estado líquido, e então, pressurizado. Desta forma se observa que, as etapas do ciclo Rankine orgânico são as mesmas do Ciclo Rankine convencional, havendo apenas uma diferença, seus fluidos de operação (QUOILIN, BROEK, *et al.*, 2013).

Na Figura 1, mostra-se o esquema de um ciclo Rankine genérico. A bomba entre os pontos 1 e 2 é responsável por elevar a pressão do patamar inferior ao superior, e representa uma entrada de energia mecânica $W_{entr.}$ no sistema. Isso é feito com o fluido de trabalho na fase líquida, de modo a não se fazer necessário uma grande quantidade de trabalho neste processo. Entre os pontos 2 e 3 é inserido o calor $q_{entr.}$ para levar o fluido do estado de líquido até o de vapor. Desta forma acontece a expansão na turbina, entre os pontos 3 e 4, de modo a gerar o trabalho $W_{saída}$ retornando ao patamar inicial de pressão. Logo após ocorre a condensação do fluido de trabalho, a pressão constante, entre os pontos 4 e 1, onde é liberado calor $q_{saída}$ pelo sistema, que volta ao seu estado inicial, caracterizando assim um ciclo (SONNTAG, BORGNAKKE e VAN WYLEN, 2002)..

Figura 1 - Ciclo de Rankine e diagrama T-S



Fonte: Adaptado de (SILVA e MORAIS, 2017)

No ciclo Rankine convencional o fluido empregado é a água, que para trabalhos onde a fonte de calor possui temperatura elevada, é o fluido mais indicado pela alta eficiência e baixo custo. Contudo em baixas temperaturas, a eficiência da água como fluido em um ciclo Rankine torna-se muito reduzida, inviabilizando o seu uso, mesmo com o baixo custo. O ciclo Rankine orgânico surgiu para preencher essa lacuna, pois se permite o uso de outros fluidos. Sendo estes compostos químicos orgânicos, em sua maioria, hidrocarbonetos e refrigerantes (QUOILIN, BROEK, *et al.*, 2013).

2.1.2 Aplicações, Vantagens e Desvantagens.

As maiores aplicações para o ORC estão em fontes de energia como geotérmicas, biomassa e calor residual rejeitado por outros processos térmicos. Na atual demanda mundial por eletricidade, esse método, se apresenta muitas vezes, como solução para redução de queima de combustíveis fósseis e redução de emissão de gases de efeito estufa. Uma característica entre essas fontes térmicas é o fato de estarem disponíveis a uma temperatura moderada, o que dificulta a extração de energia mecânica e elétrica (SOTOMONTE, 2015).

Atualmente, têm surgido muitas pesquisas na área de produção de energia através da energia solar térmica, que é o processo de obtenção de energia térmica através de radiação solar. Esses equipamentos podem ser classificados como ciclos de baixa, média e alta temperatura. Para os dois primeiros o ORC é mais recomendado (CARLÃO, 2010).

Segundo Correia (2014), o uso de Ciclo Rankine Orgânico em navios de grande porte pode ser bastante compensatório. O autor destaca que a maior parte desses navios possui caldeiras para usos diversos, motores a combustão interna de grande porte para locomoção e

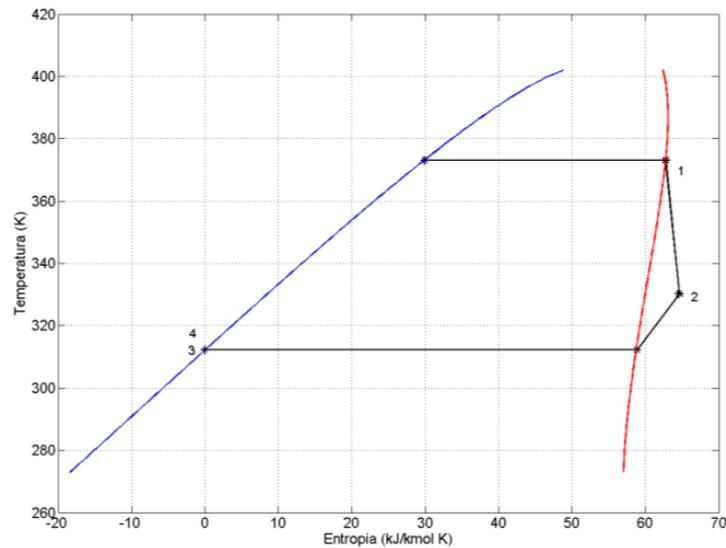
geração de energia. Todos esses sistemas possuem fontes de calor residual de baixa e média qualidade. Em seu trabalho, o autor conclui que, facilmente, podem-se encontrar navios que permitam a instalação de um ciclo Rankine orgânico de cerca de 100kw de forma viável.

O Ciclo Rankine Orgânico possui algumas vantagens e desvantagens em relação ao ciclo convencional a vapor d'água. Moraes (MORAES, 2017) cita como vantagens:

- a) temperatura de evaporação, indicando que, pelo fato dos fluidos orgânicos terem uma temperatura de ebulição menos elevada, pode ser usado em fontes de calor mais frias;
- b) Superaquecimento no ciclo Rankine com vapor d'água, o superaquecimento do vapor geralmente é necessário, pois na expansão do fluido a quantidade de líquido na turbina tem que ser minimizada, esse procedimento pode ser observado na Figura 1 entre os pontos 3 e 4 que cruza a linha de saturação. Os compostos orgânicos possuem uma curva de vapor saturado com um ângulo fechado como é visto na Figura 2, os pontos 1 e 2 representam a expansão na turbina que não cruza a linha da saturação mesmo sem superaquecimento;
- c) Temperatura e pressão na entrada da turbina mais baixa o que, por consequência, exige menos, mecanicamente, das pás da turbina e reduz custos de instalação e manutenção;
- d) Menos estágios na turbina, nos ciclos a vapor a razão de expansão e a entalpia é muito alta, necessitando de múltiplos estágios na turbina e rotações mais elevadas, porém no ORC as diferenças de entalpia são baixas, não necessitando de mais de dois estágios, às vezes apenas um;
- e) E, por último, como a pressão de trabalho dos fluidos orgânicos é menor não é necessário tanta robustez em suas caldeiras.

Sotomonte (2015) aponta algumas outras vantagens, como a elevada eficiência isentrópica dos fluidos orgânicos, a baixa velocidade de trabalho da turbina, o que traz baixo desgaste e a possibilidade de acoplamento direto com o gerador e a conservação da turbina devido à ausência de umidade.

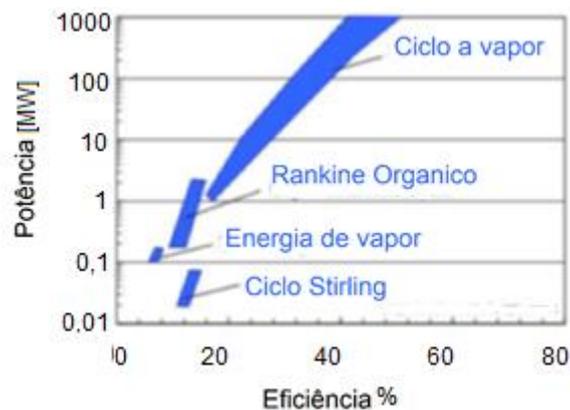
Figura 2 - Diagrama T-S típico do Ciclo Rankine Orgânico



Fonte: Adaptado de Sotomonte, 2015.

Como desvantagens do ciclo orgânico em relação ao ciclo a vapor, Sotomonte (2015) e Moraes (2017) apontam a baixa eficiência dos fluidos orgânicos em relação à água. Esses ciclos, geralmente, possuem eficiência próxima a 24% enquanto os Rankines a vapor facilmente ultrapassam 30% de acordo com Moraes (MORAES, 2017). Na Figura 3 é mostrada a área de atuação, dada a potência requerida em relação à eficiência do ciclo. Outra desvantagem, apontada pelos mesmos autores, é o fato da água ser muito mais abundante, barata, mais estável, um fluido que não é tóxico e não é prejudicial ao meio ambiente. E, por outro lado, os fluidos orgânicos são em sua maioria de reposição cara, menos estáveis, inflamáveis, podem ser prejudiciais ao meio ambiente e tóxicos.

Figura 3 - Eficiência de Diferentes Ciclos



Fonte: Adaptado de Moraes, 2017.

Pode-se observar que o ORC possui algumas vantagens sobre o ciclo a vapor, porém essas vantagens compensam apenas para fontes de calor de baixa e média qualidade. O ORC

mostra-se superior apenas para sistemas de potência até 3MW. No caso de projetos com potencial maior o ciclo a vapor se torna mais adequado (MORAES, 2017).

2.2 FLUIDO DE TRABALHO

A busca pelo uso do ciclo a vapor em faixas de temperatura diferentes das utilizadas convencionalmente motivou, no século XIX, a pesquisa na utilização de outros fluidos. Durante esse período testaram-se diversos tipos de substâncias orgânicas e inorgânicas. Entretanto, até meados do século XX esses ciclos eram pouco usuais, pois a baixa eficiência não compensava o custo. Apenas na década de 70 iniciou-se, de forma efetiva, a utilização e a pesquisa de ciclos Rankine orgânicos (CORREIA, 2014).

Segundo Dicio (2019) a definição de fluido é: “*Diz-se dos corpos (gases e líquidos) que, não tendo forma própria, se deformam facilmente*”. Substâncias orgânicas são substâncias químicas que têm em sua composição como principal elemento o carbono, que é comumente encontrado nos seres vivos (FOGAÇA, 2018). Esta denominação abrange uma grande quantidade de compostos com características físico-químicas diversas.

Tabela 1 - Classificação dos fluidos Orgânicos do ORC

Álcoois	Metanol e etanol.
Fluidos inorgânicos	Água, dióxido de carbono e amônia.
Hidrocarbonetos:	Propano, n-butano, benzeno etc.
Clorofluorcarbonos (CFCs):	R12 e R13 (átomos de hidrogênio na molécula de hidrocarboneto são substituídos com cloro, flúor ou bromo);
Hidro-fluo-carbonos (HFCs):	R134a (hidrocarboneto parcialmente halogêneo e sem cloro)
Hidro-cloro-fluo-carbonos (HCFCs):	R22 (hidrocarboneto parcialmente halogêneo);
Perfluorcarbono (PFCs):	PP50 (hidrocarbonetos completamente fluorizados);
Ésteres e Hidrofluoreteres (HFEs)	HFE7000, RE134, HFE7100.
Siloxanos	Octametiltrisiloxano (MDM), Hexametildisiloxano (MM).
Misturas:	Azeotrópicas, Zeotrópicas.

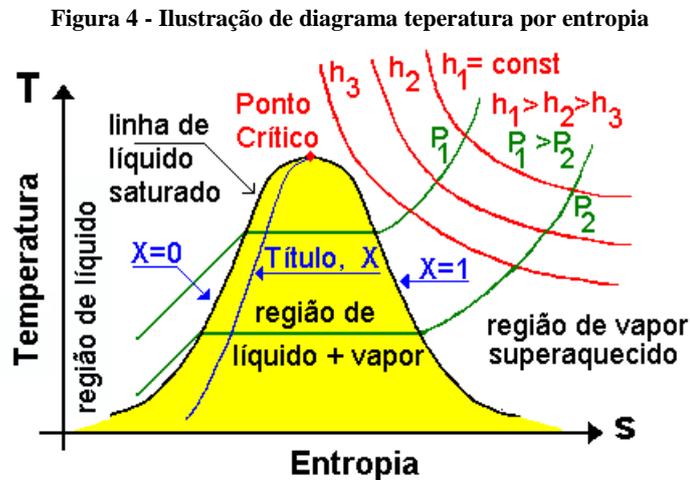
Fonte: Adaptado de Pinto (2018).

O desempenho do ciclo Rankine está totalmente relacionado com o fluido que trabalha. A Tabela 1 mostra uma compilação de fluidos que já foram e/ou são utilizados nesses ciclos, com suas classificações.

2.2.1 Propriedades Termofísicas

O principal fator na escolha dos fluidos orgânicos está nas suas características termofísicas e suas diversas variações do diagrama T-s (temperatura por entropia), diretamente relacionadas ao rendimento do ciclo (MORAES, 2017).

Antes de observar as peculiaridades desses diagramas é necessário entender alguns conceitos importantes. O diagrama T-s é sempre representado com a temperatura no eixo vertical e a entropia no eixo horizontal. As linhas do diagrama representam a saturação do fluido, ou seja, os pontos de transição entre totalmente líquido e uma mistura de líquido mais vapor (curva a esquerda do diagrama) ou o limiar entre totalmente vapor e a mistura (curva a direita do diagrama). O ponto crítico é representado pelo ponto mais alto da curva de saturação, desta forma, surge o conceito de temperatura crítica, que é a temperatura do ponto crítico, e pressão crítica, pressão do ponto crítico. Essas propriedades estão ilustradas da Figura 4. Nessa mesma figura pode-se observar o comportamento de uma isobárica (representadas em verde na Figura 4) com o aumento de temperatura e o conceito de título que é a proporção de vapor no líquido.



Fonte: Adaptado de Santoro, 200-?

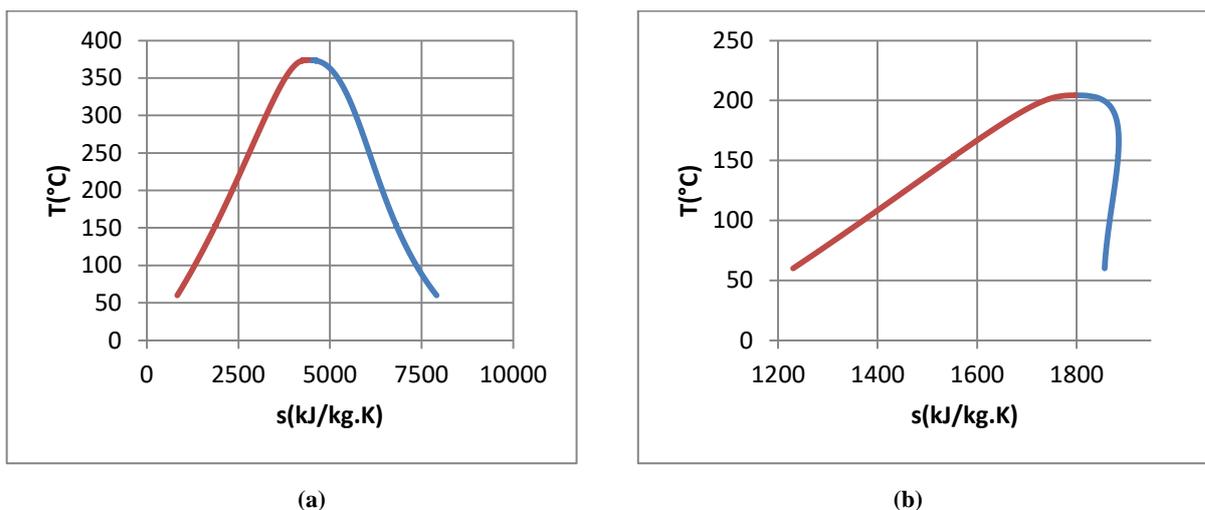
Observando a Figura 5 e seus diagramas (a), (b) e (c), verifica-se três curvas distintas:

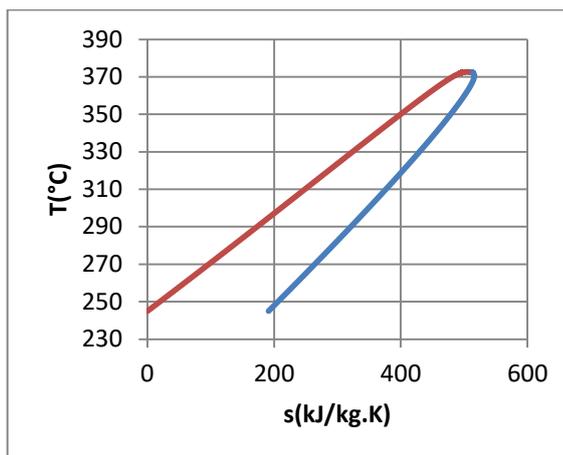
- Fluido isentrópico: representado pelo diagrama (b), na parte mais decrescente da linha azul. Observa-se uma variação mínima da entropia quando há uma grande variação de temperatura, ou seja, similar a uma linha traçada a 90° do eixo S. Isso influencia na expansão da turbina do ciclo, (linha 1-2 da Figura 2) que tende a estar sempre próxima de vapor saturado em todo seu caminho (MORAES, 2017).

- Fluido úmido: representado pelo diagrama (a). Na parte mais decrescente da linha azul observa-se um aumento da entropia com a variação da temperatura. Traçando uma linha tangente a curva azul, verifica-se a formação de um ângulo $>90^\circ$ com o eixo S. Na expansão da turbina, se o ponto 3 da Figura 2 estiver na linha de saturação o título tenderá a aumentar muito, tornando a expansão inviável. E a solução, como é mostrada no diagrama da Figura 1, é levar o ponto 3 ao superaquecimento (MORAES, 2017).
- Fluido seco: representado pelo diagrama (c). Na parte mais decrescente da linha azul observa-se um decréscimo da entropia com a variação da temperatura. Traçando uma linha tangente a curva azul verificasse que forma um ângulo $<90^\circ$ com o eixo S. Na expansão da turbina, o ponto 3 da Figura 2 poderá estar na linha de saturação, já que na expansão isentrópica o ponto tende a se afastar da região de mistura líquido mais vapor, o que impossibilita a presença de líquido na turbina (MORAES, 2017).

Sotomonte (2015) apontou algumas formas de classificar os fluidos nos parâmetros descritos acima. Ele aponta o uso de uma variável θ de ângulo, e indica que a melhor forma de a calcular é através da derivada da curva de saturação em relação à entropia em um ponto intermediário da curva onde a segunda derivada esteja próxima de zero. Isso usando alguma parametrização da curva ou tabela de dados.

Figura 5 - Tipos de diagrama T-s





(c)

Fonte: Autor

2.2.2 Seleção de fluidos orgânicos mais utilizados

Sotomonte (2015) fez uma seleção dos principais fluidos utilizados comercialmente em Ciclos Rankine Orgânico no mundo, descritos na Tabela 2, que descreve os fluidos juntamente com suas propriedades, como suas temperaturas e pressões críticas, fator crucial na seleção do fluido como será descrito na página 12. Classifica, também, o valor de θ , que é o ângulo da curva de saturação de vapor descrito na seção anterior. Sotomonte (2015) propõe, nesta tabela, uma nova classificação de fluidos isentrópicos. Sua definição passa a ser “Fluidos úmidos $\theta > 93$; fluidos isentrópicos $\theta \approx 90$ e fluidos secos $\theta < 87$, avaliado na temperatura de saturação para 80% da pressão crítica” (SOTOMONTE, 2015). As propriedades w e k_1 são intrínsecas do fluido e necessárias às equações para cálculo de suas propriedades termodinâmicas, e são obtidas experimentalmente.

Tabela 2 - Fluidos orgânicos selecionados e suas propriedades termodinâmicas

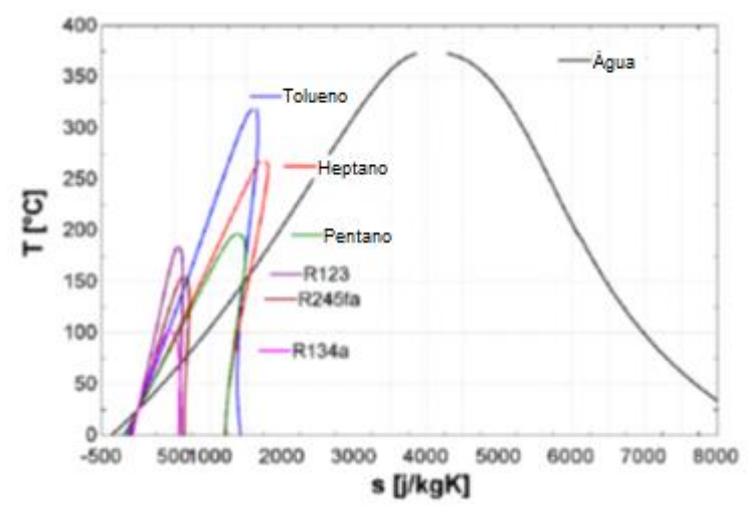
<i>Fluido</i>	<i>T_c (K)</i>	<i>P_c (kPa)</i>	<i>w</i>	<i>k_l</i>	<i>θ</i>
Água	647,2	22090	0,3438	-0,06635	98,5
Dodecametilciclohexasiloxano (D6)	645,78	961	0,7361	0,09627	35,8
Propilbenzeno (C ₉ H ₁₂)	638,32	3200	0,34513	0,02715	75,2
Dodecametilpentasiloxano (MD3M)	628,36	945	0,7218	0,16431	39
Decametiltetrasiloxano (D5)	619,15	1160,46	0,6658	0,0388	46
Etilbenzeno (C ₈ H ₁₀)	617,2	3606	0,3027	0,03994	76,2
Dimetilbenzeno (C ₈ H ₁₀)	616,23	3511	0,32141	0,01277	76,6
Decametiltetrasiloxano (MD2M)	599,4	1227	0,668	0,03079	46,7
Tolueno (C ₇ H ₈)	591,8	4106	0,26323	0,03849	80,1
Octametiltetrasiloxano (D4)	586,5	1332	0,589	0,1568	53,9
n-octano	568,55	2497	0,4018	0,07233	70,2
Octametiltrisiloxano (MDM)	564,09	1415	0,5297	0,12634	54,2
n-Heptano	540,15	2737	0,3498	0,07222	74
Hexametildisiloxano (MM)	518,75	1939,39	0,419	0,0528	65,2
n-Hexano	507,85	3032	0,3007	0,06998	77,6
R141b	478,85	4340	0,2211	0,05949	87,8
R11	471,11	4408	0,191	0,02574	92,7
n-Pentano	464,78	3529	0,23329	0,03521	81,1
i-Pentano	460,43	3381	0,22802	0,0284	81,6
R216ca	449,05	2570	0,3286	0,10833	78,1
n-Butano	419,53	4023	0,19409	0,02222	85,9
R114	418,55	3300	0,2533	0,02818	84,3
R-40	416,25	6700	0,153	0,0304	97,2
R-142b	410,25	4120	0,2816	0,00689	91,8
i-Butano	408,05	3648	0,1848	0,03781	85,9
R152a	386,41	4444	0,2557	0,1459	95,9
R12	385,12	4124	0,176	0,02752	95
R134a	374,21	4059	0,3261	0,0103	92
R290	369,82	4242	0,268	0,19724	92,2
R22	369,2	4975	0,215	0,02623	97,8
R1270	365,59	4664	0,21974	0,24609	94

Fonte: Adaptado de Sotomonte (2015)

2.2.3 Comparação entre fluido orgânico e a água

A Figura 6 mostra a curva de saturação de alguns fluidos, dentre eles, fluidos orgânicos e a água. Visualmente já se percebe que a água é um fluido úmido, e que, fluidos como tolueno, heptano e pentano são secos, sendo essa a principal diferença. Vê-se também que a água possui um ponto crítico muito maior que os dos hidrocarbonetos citados.

Figura 6 - Curvas de Saturação para fluidos orgânicos, de refrigeração e água.



Fonte: Adaptado de QUOILIN, BROEK, *et al.*, 2013.

2.2.4 Critérios de seleção dos fluidos orgânicos

A seleção dos fluidos orgânicos é parte crucial do projeto do ORC, que irá influenciar diretamente o desempenho do ciclo (SOTOMONTE, 2015). Mesmo havendo diversas opções de fluido, a quantidade de considerações na escolha é grande e por vezes complexa. Leva-se em consideração tanto as propriedades termofísicas dos fluidos, quanto à segurança, os danos à saúde e ambientais.

Considerando as orientações de Sotomonte (2015) e Pinto (2018) para seleção de fluidos, e complementando seus argumentos com as de outros autores, chega-se a seguinte lista de importantes propriedades dos fluidos para essa decisão.

Pressão: O uso de pressão de trabalho compatível deve ser levado em consideração, espera-se que essa pressão não seja muito elevada, o que traria um custo maior de material e robustez dos equipamentos empregados (PINTO, 2018). Outro parâmetro importante relacionado à pressão, é a pressão do condensador que, preferencialmente, deve ser superior à pressão atmosférica, caso contrário, a blindagem deve ser maior e torna-se necessário a

instalação de desaeradores (MACAGNAN, 2017). Pinto (2018) cita que é recomendável no condensador pressões acima de 1 bar e no evaporador pressões abaixo de 25 bar.

Diagrama de Saturação (T-s): Como dito anteriormente, através desse tipo de gráfico, os fluidos podem ser classificados como úmidos, secos ou isentrópicos. Na seleção do fluido é preferível a escolha de fluidos secos ou, em alguns casos, isentrópicos, para sistemas de baixa temperatura, evitando a necessidade de superaquecimento.

Ponto Crítico: Este ponto se relaciona com a temperatura e pressão crítica. Indica a temperatura ou pressão limite para que haja um patamar de mudança de fase (PINTO, 2018). Existem ciclos de trabalho com fluidos acima deste patamar, chamados de supercríticos, porém, não é o caso do Ciclo Rankine Orgânico simples. Dessa forma, na seleção do fluido, se a temperatura de trabalho desejada for maior que a temperatura crítica deve se considerar o descarte deste fluido na seleção. Todavia trabalhar com fluidos de mais alta temperatura crítica, não é necessariamente a melhor escolha. Segundo Liu *et al.* (2004), a influência da temperatura crítica na eficiência é baixa.

Propriedades de transferência de calor: Segundo Pinto (2018), é preferível buscar o fluido com menor viscosidade, tensão superficial e calor específico, e maior condutividade térmica e calor latente de vaporização. Maizza e Maizza; Badr (MAIZZA e MAIZZA, 1996; BADR *et al.*, 1990 *apud.* SOTOMONTE, 2015) afirmam que o alto calor latente favorece a recuperação de calor da fonte quente. Todavia, Yamamoto afirma (YAMAMOTO *et al.*, 2001 *apud.* SOTOMONTE, 2015) que um menor calor latente aumenta a vazão na turbina, favorecendo o aumento na potência do ciclo termodinâmico.

Massa Molar: Em suma, recomenda-se, para ciclos de alta potencia com o uso de vários estagios na turbina, fluidos com menor massa molar (<90g/mol). Para uso em turbinas com apenas um estagio é mais recomendado fluidos de maior massa molar (>90g/mol) (PINTO, 2018). Isso acontece, porque fluidos com maior massa molar possuem maior eficiência energética na turbina, porém esse efeito se torna mais discrepante quando se usa uma menor potência de trabalho.

Estabilidade térmica e compatibilidade com materiais: A estabilidade termica e a compatibilidade com os materias dos equipamentos de operação é um fator crucial na seleção do fluido. A substância deve ter boa estabilidade dentro das temperaturas de operação a fim de garantir a durabilidade desejada do ciclo. Deve haver uma atenção ao uso de lubrificantes nas linhas do ciclo, garantindo a compatibilidade com o fluido selecionado, esses óleos podem ser misíveis ou não misíveis (TCHANICHE, 2010). Segundo Tchanche (2010), a decomposição do fluido pode ser prejudicial não só pela perda das propriedades

termodinâmicas, assim como, por possibilitar a produção de gases não condensáveis, que tem um efeito corrosivo nas linhas dos equipamentos.

Tabela 3 - Relação de alguns Fluidos e suas temperaturas máximas de estabilidade

Fluido	Máxima temperatura estável
R23	400 °C
R245fa	300 °C
Metanol	230 °C
Tolueno	425 °C
R141b	90 °C

Fonte: Adaptado de Pinto, 2018

Segurança: Existem normas regulamentadoras que garantem a segurança no uso de fluidos refrigerantes e os classificam conforme seus perigos, como toxicidade e inflamabilidade. No Brasil, o órgão que regulamenta e fiscaliza o uso destes fluidos é a ABRAVA (Associação Brasileira de Refrigeração, Ar condicionado, ventilação e Aquecimento). Este órgão expediu, em 2016, um guia de uso e aplicação para fluidos refrigerantes, onde mostra as normas a serem seguidas no uso destes fluidos, dentre as normas internacionais o documento cita (ABRAVA, 2006):

ASHRAE - Standard 15-2013: Descreve os procedimentos de para a operação de equipamentos e sistemas de refrigeração e de ar condicionado usando os fluidos frigoríficos.

ASHRAE - Standard 34-2013: Descreve o procedimento de nomear os fluidos frigoríficos e a sua classificação de segurança, baseado nos dados da sua toxicidade e inflamabilidade.

HRI - 700-2015: Estabelece as especificações de composição e de pureza (contaminação) para verificar a composição, bem como os procedimentos de análise de aceitação dos fluidos frigoríficos.

EN-378:2008: Esta norma Europeia apresenta os requerimentos de segurança e de meio ambiente necessários para o projeto, fabricação, construção, instalação, operação, manutenção, reparos e reciclagem dos equipamentos e sistemas de refrigeração em respeito ao meio ambiente local e global.

Sobre a norma ASHRAE - Standard 34-2013, Tchanche (2010) explica que esta propõe ao uso de dois classificadores, um nível de toxicidade (A ou B) e outro nível de inflamabilidade (1, 2 ou 3). A classe A é usada para fluidos que não apresentaram toxicidade em concentrações de 400 ppm, já a classe B é usada para fluidos tóxicos abaixo de 400 ppm. O grupo de fluidos de número 1 (Pouco inflamáveis) são os que não propagam chamas nas

condições normais de temperatura e pressão, os de número 2 (inflamáveis) são os fluidos que tem calor de combustão menor que 19kJ/kg e limite de concentração inflamável maior que 0.10kg/m³. O grupo 3 (Muito inflamáveis) são os fluidos com calor de combustão maior e limite de concentração inflamável menor que o do grupo 2.

Meio ambiente: Existem três principais indicadores numéricos que apontam os danos ambientais de fluidos orgânicos, ODP, GWP, ALT. O primeiro indica o potencial de dano à camada de ozônio, usando como referência o R11 que é 1 nessa escala. O segundo indica o nível de contribuição ao aquecimento global, usando como referência o dióxido de carbono. O terceiro indica o tempo de degradação na atmosfera. O quanto menor forem esses três parâmetros melhor será o fluido para o fator ambiental (TCHANCHE, 2010).

Fator econômico: Crucial em qualquer projeto, deve se levar em consideração o valor do fluido e a periodicidade de troca, comparado o rendimento que o fluido oferece (MORAES, 2017).

Desempenho do ciclo: Tchanche (2010) e Sotomonte (2015) apontam esse fator como principal linha de estudo para seleção de fluidos. O desempenho do ciclo verifica como se comporta, termodinamicamente, o fluido dentro do sistema em condições mais próximas das reais. A melhor forma de fazer isso é através de simulações de computador, usando equações de parametrização das propriedades termodinâmicas, comparando esses comportamentos (TCHANCHE, 2010).

Tchanche pesquisou diversos trabalhos que abordavam seleção de fluidos orgânicos para Ciclos Rankine Orgânicos reunindo várias informações: Quais eram os fluidos iniciais, qual era a sua aplicação, as temperaturas de trabalho, qual o principal fator para seleção e quais foram os fluidos selecionados. A Tabela 4 reúne esses dados, mostrando os fluidos selecionados para faixas de temperaturas. Algo interessante de se observar nessa tabela é que para faixas de temperaturas muito parecidas houve seleções de fluidos totalmente diferentes.

Tabela 4 - Representação de trabalhos anteriores sobre seleção de fluidos e seus resultados

Fluido	Aplicação	T Cond.(°C)	T Evap. (°C)	Critério	Fluidos Seleccionados	Referencias (<i>apud</i> <i>TCHANCHE, 2010</i>)
Água, Etanol, R11, R123, HFE7100, n-Pentano, iso-Pentano, Benzeno, Tolueno, p-Xileno	Calor residual	30	200-300	Desempenho	Benzeno, Tolueno, R123	Liu et al., 2004
Benzeno, Tolueno, p-Xileno, R113 e R123	Calor residual	5-45	225-325	Desempenho	p-Xileno (AT), R113, R123(BT)	Hung, 2001
31 fluidos puros	Geotérmica	30	100	Desempenho	R236ea, R600, R245fa, R600a, R245ca, RE143	Saleh et al., 2007
Propeno, R227ea, RC318, R236fa, iso-Butano, R245fa, mistura azeotrópica (Propano, Etano)	Geotérmica	25	80-115	Desempenho	Propeno, R227ea, R245fa	Borsukiwicz-Gozdur & Nowak, 2007
Amônia, n-Pentano, R123, PF5050	Geotérmica	30	70-90	Segurança, Desempenho	Amônia	Hetterachchi et al., 2007
n-Pentano, 2-Metilbutano, 2,2-Dimetilpentano, benzeno, tolueno	Solar Térmico	-	-	Térmico, Estabilidade	n-Pentano	Andersen & Bruno, 2005
Mistura azeotrópica (R245fa/R152a)	Solar Térmico	25	85	Desempenho	90/10 (%)	Wang & Zhao 2009
R123, água	Rankine Orgânico	-	-	Desempenho	R123	Yamamoto et al., 2001
Fluidos Orgânicos, Fluidos Inorgânicos	Calor residual	35	157	Propriedade, Desempenho	R123	Lee et al., 1993
Fluidos não convencionais: Refrigerantes, misturas azeotrópicas	Calor residual	35-60	80-110	Propriedade, Desempenho	R123, R124	Maizza & Maizza, 2001
20 fluidos: Hidrocarbonetos, Refrigerantes, Fluidos naturais	Solar Térmico	25	60-100	Propriedade, Desempenho	R134a, R152a, R290, R600, R600a	Tchancha et al., 2009
Água, Amônia, Butano, R11, R123, R141b, R236ea, R245ca, R113	Calor residual	25	145	Desempenho	R236ea	Dai et al., 2009

n-Butano, n-Pentano, Hexafluorbenzeno, MM, Tolueno, Benzeno, p-Xileno, MM/MDM/MD2M	Calor residual	15	457	Desempenho	Mistura Siloxano	Angelino & Colonna di Paliano, 1998
Água, R142b, R123, R245fa, R113, R114	Rankine Orgânico	-	98	Desempenho	R245fa	Gu et al.,2007
R113, R245fa, iso-Butano, iso-Pentano, Tolueno, ciclohexane	Calor residual	-	-	Desempenho	Tolueno, Ciclohexano	Chacartegui et al., 2009
Propano, R134a, R227ea, R152a, Amonia, iso-Butano, butano, R245fa, pentano	Solar Térmico	25	-	Area do coletor	iso-Butano, iso-Pentano, R245fa	Deldado Torres & Garcia-Rodriguez,2010
Hidrocarbonetos, Refrigerantes	Solar Térmico	15	Diferentes patamares	Desempenho	R218/R245/iso-Pentano/n-Propilbenzeno	Brono et al.,2008
R227ea, R245fa, iso-Butano, iso-Pentano	Geotérmica	15	<176,85	Desempenho	iso-Pentano, R227ea	Heberle & Bruggman, 2010

Fonte: Adaptado e traduzido de Tchanche (2010)

3. METODOLOGIA

3.1 SELEÇÕES DOS FLUIDOS ANALISADOS

Existem, como observado, inúmeras opções de fluidos orgânicos para uso em ORC. Desta forma, alguns critérios de seleção foram estabelecidos antes de serem submetidos à simulação computacional, visando o descarte/eliminação dos fluidos que não se adequavam aos parâmetros deste trabalho.

Essa seleção foi feita a partir da Tabela 2, cujos primeiros critérios foram:

- Temperatura crítica superior a temperatura mínima do estudo.
- Fluido seco, ou seja, $\theta < 87^\circ$ (Posteriormente foi selecionado apenas um fluido isentrópico, para comparação, usando outros critérios).
- Fluidos com θ maiores, pois quanto mais agudos os ângulos, menor o decaimento na turbina e, por consequência, menor a eficiência.
- Pressão crítica inferior a pressão máxima de estudo.
- Ser categoria A de toxicidade pela ASHRAE.
- Os níveis de ODP, GWP, ALT estarem dentro das normais ambientais.

Após a aplicação desses critérios de descarte foi feita uma seleção usando novos critérios:

- Dar preferência para hidrocarbonetos, por serem de estrutura molecular mais simples e baixo custo.
- Buscar fluidos de propriedades termodinâmicas distintas, a fim de enriquecer as comparações.
- Fazer uma comparação entre os fluidos avaliados e os fluidos utilizados na literatura (Tabela 2 e Tabela 4), com o objetivo de utilizar fluidos que já foram selecionados para esse fim, em outros trabalhos.
- Encontrar um fluido isentrópico que tenha propriedades termodinâmicas parecidas com algum fluido seco já selecionado, para compará-los.

3.2 MODELAGEM DO CICLO RANKINE ORGÂNICO

3.2.1 Equacionamento do *CoolProp*

Este programa tem como base de cálculo das propriedades termodinâmicas, a equação de energia de Helmholtz. Esta relação é conveniente, pois as propriedades podem ser obtidas

de suas derivadas parciais. Ela é classificada com uma equação cúbica de estado (*EoS*) e é válida para toda a faixa do fluido (BELL, WRONSKI, *et al.*, 2014).

Esse tipo de equação, geralmente, utiliza termos adimensionais, neste caso δ e τ , dados por:

$$\delta = \frac{\rho}{\rho_c} \quad (3.1)$$

$$\tau = \frac{T_c}{T} \quad (3.2)$$

A equação de Helmholtz adimensional é dada por:

$$\alpha = \alpha^0 + \alpha^r \quad (3.3)$$

Nesta equação α^0 é a parcela do gás ideal na energia, e α^r é a parcela residual. As fórmulas exatas dos termos depende do fluido. Estas são encontradas na literatura, e o programa *CoolProp* já as possui para uma grande gama de fluidos (BELL, WRONSKI, *et al.*, 2014).

Através das derivadas parciais da Equação de Energia de Helmholtz (3.3) é possível encontrar os principais parâmetros termodinâmicos (pressão, temperatura, entropia, entalpia).

As equações a serem solucionadas para determinar os parâmetros termodinâmicos desejados, dado a temperatura e densidade do ponto, são:

$$p = \rho RT \left[1 + \left(\frac{\partial \alpha^r}{\partial \delta} \right)_\tau \right] \quad (3.4)$$

$$\frac{u}{RT} = \tau \left(\frac{\partial \alpha}{\partial \tau} \right)_\delta \quad (3.5)$$

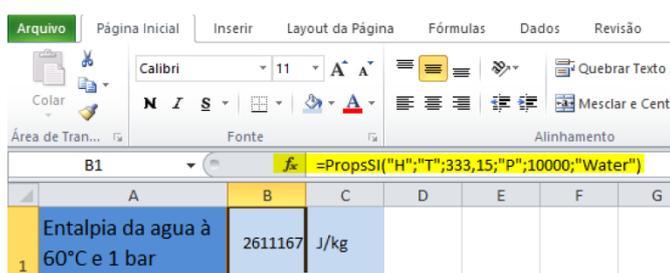
$$\frac{h}{RT} = \tau \left(\frac{\partial \alpha}{\partial \tau} \right)_\delta + \delta \left(\frac{\partial \alpha^r}{\partial \delta} \right) + 1 \quad (3.6)$$

$$\frac{S}{R} = RTu - \alpha \quad (3.7)$$

O programa calcula as derivadas dessas equações através de métodos numéricos. As equações são configuradas com os parâmetros de temperatura e densidade. Para cada propriedade desejada o programa pede um par de parâmetros conhecido. Quando esses não são temperatura e densidade usa métodos iterativos.

Neste trabalho foi utilizada a extensão para *Office Excel* do *CoolProp* que habilita funções que permitem os cálculos de parâmetros termodinâmicos para diferentes fluidos. A principal função usada é mostrada na Figura 7. A função é denominada *PropsSI* e o primeiro parâmetro é o código do que se deseja obter (“H” para entalpia), o segundo é o código da primeira propriedade conhecida seguida de seu valor (“T” para temperatura), o código da segunda propriedade conhecida, seguido do seu valor (“P” para pressão), o último parâmetro é o tipo de fluido que se deseja trabalhar.

Figura 7 - Imagem do Excel usando a formula do CoolProp



Fonte: Autor

3.2.2 Modelagem Termodinâmica do ciclo Rankine orgânico

Essa seção tem o intuito de mostrar o modelo matemático que descreve um ciclo Rankine orgânico, com objetivo de avaliar e comparar seu desempenho com diferentes fluidos. Para cada componente do sistema térmico foram integradas suas equações de balanço de energia e massa em um modelo computacional.

Sotomonte (2015), descreve em seu trabalho, uma lista de simplificações na simulação computacional, que também foram seguidas no presente trabalho. E tem o intuito de aperfeiçoar a comparação dos fluidos assumindo as seguintes premissas:

- Não há variação da energia potencial e da energia cinética do fluido de trabalho ao longo do ciclo;

- Não há perda de calor para o ambiente nas tubulações, na turbina, na bomba e nos trocadores de calor;
- O fluido de trabalho na saída do condensador encontra-se como líquido saturado.
- Cálculos detalhados de perdas de pressão e transferência de calor no evaporador e condensador são ignorados, uma vez que dependem fortemente de materiais e detalhes de projeto dos trocadores de calor;
- A operação do ciclo ocorre em regime permanente;

3.2.3 Premissas do ciclo

Para todos os ciclos simulados houve três premissas, duas fixas e uma variável. A primeira foi o fluido orgânico. A segunda foi à temperatura de saturação no condensador, sendo igual para todos os fluidos selecionados. A terceira foi a temperatura de saída do evaporador. Essa última seria um parâmetro variável para cada fluido, de temperaturas próximas à crítica até próximas às do condensador.

No caso de fluidos secos, a temperatura de saída do evaporador (terceira premissa), seria sempre uma temperatura de saturação. Por consequência, os patamares de pressão baixa e alta estariam fixados. No caso de fluido isentrópico, um estudo prévio se tornaria necessário. Inicialmente a simulação seria feita com a temperatura e pressão de saturação como no caso anterior. Mas também, para cada ponto, novas simulações seriam feitas, fixando a temperatura e abaixando a pressão em uma faixa de 88 a 99%.

3.2.4 Evaporador

Neste equipamento, o valor de interesse é a energia térmica de entrada, que é denominada \dot{Q}_h . Essa característica é verificada através da diferença entre as entalpias dos pontos 4 e 1 na Figura 2, como mostra a Equação 3.8.

$$\dot{Q}_h = \dot{m} \times (h_1 - h_4) \quad (3.8)$$

Onde \dot{m} é a vazão mássica. Para descobrir h_4 , primeiro é necessário descobrir a entropia do ponto 4 (que é a mesma do ponto 3), $S_{4,3}$. A Equação 3.9 e Equação 3.10 mostram como isso é aplicado no *CoolProp*.

$$S_{4,3} = PropsSI("Smass"; "T"; [Tb]; "Q"; 0; "[Fluido]") \quad (3.9)$$

$$h_4 = PropsSI("H"; "Smass"; [S_{4,3}]; "P"; [Pa]; "[Fluido]") \quad (3.10)$$

Onde Tb é a temperatura de saturação no evaporador, "Q" representa o título e Pa a pressão alta do ciclo.

Para achar h_1 basta aplicar a Equação 3.11.

$$h_1 = PropsSI("H"; "T"; [Ta]; "Q"; 1; "[Fluido]") \quad (3.11)$$

Onde Ta é a temperatura de saturação na pressão alta. Para os fluidos isentrópicos essa equação não é válida. Neste caso os parâmetros passariam a serem temperatura e pressão no ponto.

3.2.4 Turbina

Neste equipamento o valor de interesse é o trabalho mecânico gerado na turbina, denominado \dot{W}_t . A Equação 3.12 mostra como é calculado essa grandeza.

$$\dot{W}_t = \dot{m} \times (h_1 - h_2) \quad (3.12)$$

Onde h_1 e h_2 são, respectivamente, as entalpias dos pontos 1 e 2 da Figura 2. Assim como na seção anterior, é necessário determinar a entropia dos pontos 1 e 2 (que são iguais). Pode-se usar a Equação 3.12 substituindo o parâmetro H por $Smass$. Como mostra a Equação 3.13.

$$S_{1,2} = PropsSI("Smass"; "T"; [Ta]; "Q"; 1; "[Fluido]") \quad (3.13)$$

Com h_1 já calculado, para obter h_2 usa-se a Equação 3.14, onde Pb é a pressão baixa.

$$h_2 = PropsSI("H"; "Smass"; [S_{1,2}]; "P"; [Pb]; "[Fluido]") \quad (3.14)$$

3.2.5 Condensador

Neste equipamento o valor de interesse é a energia térmica de saída, denominada \dot{Q}_l . Essa grandeza é verificada através da diferença entre as entalpias dos pontos 2 e 3 na Figura 2, como mostra a Equação 3.15.

$$\dot{Q}_l = \dot{m} \times (h_3 - h_2) \quad (3.15)$$

O valor de h_2 já foi discutido, só restando à descoberta de h_3 , cuja formula é semelhante a Equação 3.9. Alterando apenas a variável de interesse como é mostrado na Equação 3.16.

$$h_3 = PropsSI("H"; "T"; [Tb]; "Q"; 0; "[Fluido]") \quad (3.16)$$

3.2.6 Bomba

Neste equipamento o valor de interesse é a energia mecânica de entrada pela bomba, denominada \dot{W}_b . É calculada através das diferenças de entalpia entre os pontos 3 e 4. Como mostra a Equação 3.17.

$$\dot{W}_b = \dot{m} \times (h_4 - h_3) \quad (3.17)$$

3.2.7 Eficiência térmica do ciclo

É a grandeza definida como a razão entre a energia mecânica líquida pelo calor de entrada no evaporador, Equação 3.19. A energia mecânica líquida é a diferença entre a energia gerada pela turbina e a energia fornecida à bomba, Equação 3.18.

$$\dot{W}_{liq} = \dot{W}_t - \dot{W}_b \quad (3.18)$$

$$\eta = \frac{\dot{W}_{liq}}{\dot{Q}_h} \quad (3.19)$$

Essa foi a principal grandeza usada como comparação dos fluidos, já que mensura o aproveitamento da energia fornecida ao fluido.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 FLUIDOS SELECIONADOS

Neste momento foram definidos patamares para os critérios de descarte descritos na seção 3.1, listados na Tabela 5.

Tabela 5 - Patamares de seleção dos fluidos

Critério de seleção	Parâmetros
Temperatura Crítica	$419\text{K} < T_c < 592\text{K}$
Pressão Crítica	$P_c > 4,2\text{MPa}$
Ângulo θ	$87^\circ > \theta > 55^\circ$

Fonte: Autor

Aplicando esses critérios na Tabela 2, chegou-se a uma pré-seleção de 8 fluidos potenciais para estudo. Os mesmos foram reunidos na Tabela 6 a seguir:

Tabela 6 - Pré-seleção de fluidos

Fluido	T_c (K)	P_c (kPa)	θ
Tolueno (C ₇ H ₈)	591,8	4106	80,1
n-octano	568,55	2497	70,2
n-Heptano	540,15	2737	74
Hexametildisiloxano (MM)	518,75	1939,39	65,2
n-Hexano	507,85	3032	77,6
n-Pentano	464,78	3529	81,1
i-Pentano	460,43	3381	81,6
R216ca	449,05	2570	78,1
n-Butano	419,53	4023	85,9

Fonte: Autor

A partir dessa tabela, pôde-se iniciar a seleção dos fluidos a serem estudados no presente trabalho. O R216ca e o n-octano não foram selecionados, dentre outros motivos, por não estarem no acervo de fluidos do *CoolProp*. Pelo fato de se buscar fluidos distintos, o isômero i-Pentano foi também descartado, em prol do n-Pentano.

A preferência por hidrocarbonetos e a maior frequência de uso desses fluidos nos sistemas ORC's, levou a escolha dos quatro fluidos seguintes: Tolueno; n-Heptano; n-

Pentano; n-butano. Foi selecionado um quinto fluido, não hidrocarboneto, o Hexametildisiloxano.

A escolha do n-hexano ao invés do Hexametildisiloxano era mais evidente, por se tratar de um hidrocarboneto (de estrutura molecular mais simples), possuir ângulo θ mais aberto (que favorece a eficiência, quando se trata de fluidos secos) e por que, em simulações preliminares, o hexano apresentou eficiências melhores. Entretanto, o hexano não possui classificação pela ASHRAE 34 e o site da empresa *Merck* (2019) indica a categoria de perigo como: “*Altamente inflamável, irritante, nocivo, tóxico para reprodução, perigoso para o ambiente*” (MERCK KGAA, 2019).

Após a seleção dos fluidos secos, foi feita uma nova seleção para um fluido isentrópico, dentro da Tabela 2, para validar a possibilidade do uso deste tipo de fluido em sistemas ORC.

Apenas dois fluidos isentrópicos na Tabela 2 estão dentro da faixa de temperatura e pressão estabelecida, o R-11 e o R-141b. O R-11 trata-se de um CFC, que tem uma alta capacidade de degradação da camada de ozônio. Este tipo de fluido foi banido por meio da Portaria ANVISA nº. 534, de 19 de setembro de 1988 (MINISTERIO DO MEIO AMBIENTE, 2019). Já o R-141b, trata-se de um HCFC, é um fluido alternativo para o CFC, mas ainda é capaz de degradar a camada de ozônio (com menos intensidade). Apesar das restrições de uso, atualmente ainda é permitido.

Pelas informações descritas no parágrafo anterior, decidiu-se estudar os comportamentos térmicos do R-141b. Assim, a Tabela 7 lista os fluidos selecionados para este estudo.

Tabela 7 - Fluidos selecionados

<i>Fluido</i>	<i>T_c (K)</i>	<i>P_c (kPa)</i>	<i>θ</i>
Tolueno (C ₇ H ₈)	591,8	4106	80,1
n-Heptano	540,15	2737	74
Hexametildisiloxano (MM)	518,75	1939,39	65,2
n-Pentano	464,78	3529	81,1
n-Butano	419,53	4023	85,9
R141b	478,85	4340	87,8

Fonte: Autor

4.2 CICLOS RANKINE ORGÂNICOS

4.2.1 ORC n-Butano

É um composto orgânico formado por quatro carbonos e dez hidrogênios. Trata-se também de um hidrocarboneto da família dos alcanos (ou seja, possuem apenas ligações simples) (RODRIGUES, 2015). É, comumente, usado em residências como fonte de calor através da sua queima. Pela norma ASHRAE, possui nível A de toxicidade, ou seja, não é muito tóxico ao ser humano. Porém, segundo Rodrigues (2015), sua inalação pode causar, dentre outros sintomas, euforia, tonturas, narcose e asfixia. Pela ASHRAE, é nível 3 em inflamabilidade, dessa forma, é altamente inflamável.

Este é um fluido que se encontra no estado gasoso nas condições normais de temperatura e pressão. A Tabela 8 mostra algumas características de interesse do n-Butano.

Tabela 8 - Características do n-Butano

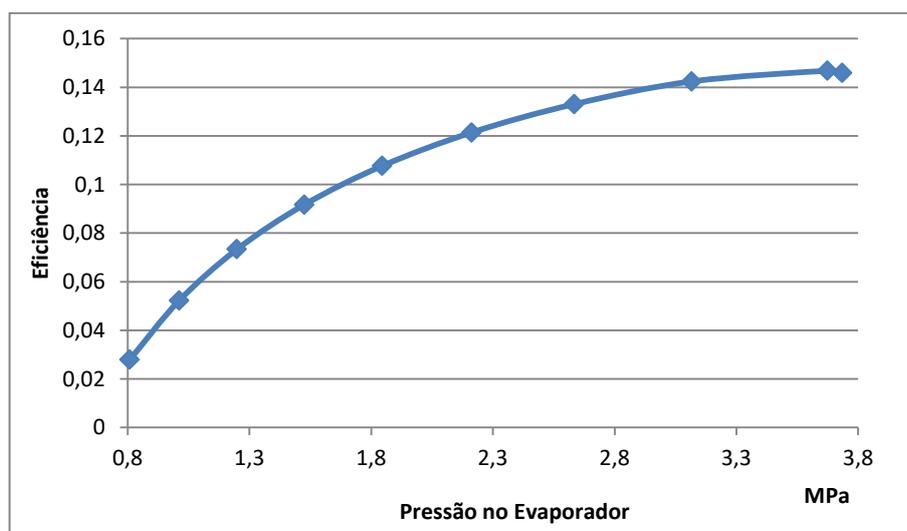
Característica	Valor
Temperatura Crítica	151 °C
Pressão Crítica	3796 kPa
Pressão de saturação a 60°C	6,29 atm
Massa Molar	58,122 g/mol
Calor Latente a 150 °C	72,73 kJ/kg

Fonte: *CoolProp*

Sua pressão no condensador será acima da atmosférica, como é recomendado por Macagnam (2017). Sua massa molar, todavia, está abaixo do recomendado por Pinto (2018).

Através da simulação do ciclo orgânico, utilizando o n-Butano, foram obtidos dez pontos. A Figura 8 mostra as eficiências dos ciclos em função da pressão no evaporador (lembrando que a pressão do condensador foi mantida fixa para todos os pontos).

Figura 8 - Eficiência do n-Butano em função da Pressão



Fonte: Autor

As pressões de trabalho variaram na faixa de 0,81MPa até 3,74MPa, a eficiência no último ponto chegou a 14,6%. Nas condições do projeto não é interessante cogitar o uso deste fluido em pressões abaixo de 1,8MPa (temperatura alta aproximadamente 109°C), pois as eficiências ainda não estariam próximas das ótimas.

Sotomonte (2015) ressaltou em sua tese que se deve tomar cuidado ao usar fluidos próximos à temperatura crítica, pois estariam instáveis nesses pontos, e fluidos, mesmo secos, podem passar por regiões de estado bifásico. Na Figura 8 o último ponto foi simulado em pressão crítica e é perceptível uma ligeira queda na eficiência, o que reforça a recomendação desse autor.

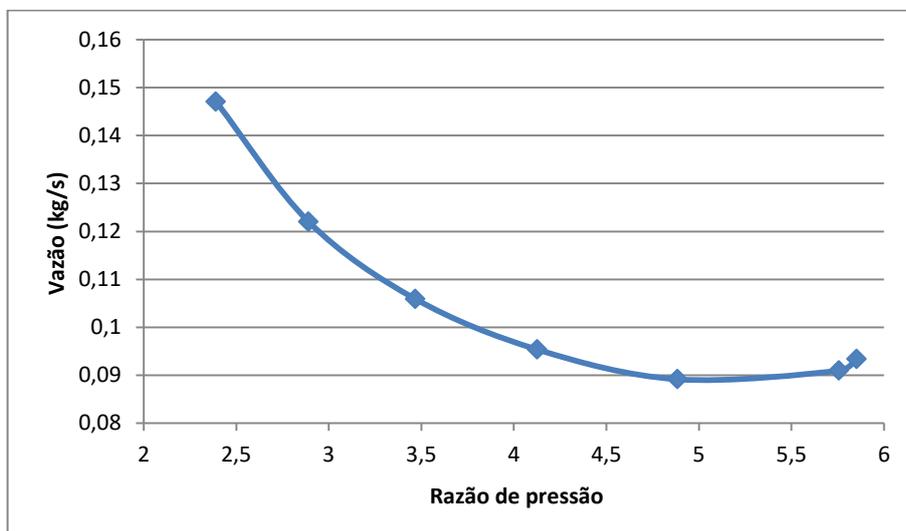
Usando apenas a eficiência como parâmetro, a melhor região para esse fluido, observando o gráfico, é entre 3MPa a 3,5MPa. O que, em termos de temperatura alta, estaria entre 138°C à 148°C (aproximado). Esses pontos dariam uma eficiência acima de 14% e ainda assim distante da pressão crítica.

Santos (2018) dimensiona um condensador para um ciclo ORC que deve gerar uma potência de 5kW. A fim de comparar o comportamento das vazões para diferentes fluidos, o presente trabalho buscou a mesma potência nas simulações.

A Figura 9 mostra um diagrama da vazão em função da razão de compressão na bomba para que o ciclo gere 5kW de potência líquida. Os dois parâmetros são cruciais no dimensionamento da bomba e da turbina. Em geral busca-se a menor vazão, que permite uma diminuição no diâmetro da tubulação, e por consequência, uma diminuição no tamanho dos equipamentos. Contudo, maiores razões de compressão necessitam de maior robustez dos

equipamentos. Vale lembrar que esses pontos, nesta figura e nos outros gráficos mostrados, representam as simulações em função das temperaturas a partir de 70°C, aumentando dez em dez graus.

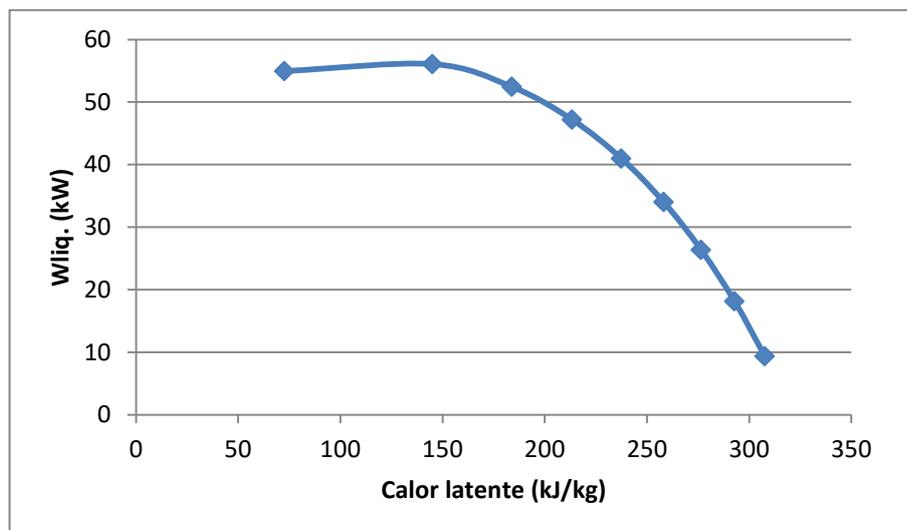
Figura 9 - Diagrama de Vazão em função de Razão de compressão para o n-Butano ($T_a > 100^\circ\text{C}$)



Fonte: Autor

O n-Butano possui uma pressão de saturação relativamente alta a 60°C (como mostrado na Tabela 8). Dessa forma, deve-se atentar a sua razão de compressão, pois à pressão alta pode chegar a valores inviáveis. A Figura 9 mostra a faixa de vazões que o n-Butano trabalharia, entre 0,148 a 0,089 kg/s. Mediante uma razão de compressão de aproximadamente 5 vezes, o digrama mostra um aumento da vazão, tornando essa região pouco interessante. Dessa forma a faixa de razão de compressão com maior potencial para o ciclo estudado seria entre 3 a 5 vezes.

Figura 10 - Calor latente por potência líquida para o n-Butano



Fonte: Autor

Observando o diagrama de temperatura por entropia (Figura 1) percebe-se que o calor latente é inversamente proporcional à temperatura. Fluidos com maior calor latente favorecem a recuperação da energia da fonte de calor (TCHANCHE, 2010). Uma comparação desta propriedade foi feita para verificar se este parâmetro realmente influencia no rendimento do ciclo.

A Figura 10 mostra o comportamento do calor latente para os pontos simulados. Algo interessante neste gráfico é o fato de haver um patamar aproximadamente linear nos dois primeiros pontos, onde há uma variação grande de calor latente e uma variação pequena de potência gerada. Esses dois pontos citados representam os valores de temperatura alta de 150°C e 140°C respectivamente, ou seja, uma variação de 10°C (o ponto de 151°C não foi representado neste gráfico).

4.2.2 ORC n-Pentano

É um composto orgânico formado por cinco carbonos e doze hidrogênios. Assim como o n-Butano, é um hidrocarboneto da família dos alcanos (RODRIGUES, 2015). Seus pontos de fusão e ebulição, a pressão atmosférica, são -129,8°C e 36,1°C, respectivamente. Possui ponto de fulgor em -49°C e massa molar de 72,15 g/mol (MERCK KGAA, 2019).

Possui classificação A3 pela norma ASHRAE, é altamente inflamável e apesar de ter classificação A, assim como o Butano, pode causar danos ao ser humano. É também um fluido perigoso ao meio ambiente, tóxico para os organismos aquáticos. Por esses fatores deve-se ter atenção ao seu uso (PEREIRA, 2017). Comentando sobre as classificações de

risco e segurança do pentano, o autor supracitado afirma: “*Por conta dessa classificação [...] o pentano normalmente não se mostra a escolha mais adequada como fluido de trabalho para as aplicações da tecnologia ORC, apesar de suas vantagens termofísicas*”. Todavia, o pentano é um fluido térmico muito utilizado, diversos trabalhos na bibliografia o selecionaram para um processo, como pôde ser observado na Tabela 4.

A Tabela 9 mostra algumas características de interesse do pentano, para as simulações e comparações.

Tabela 9 - Características do n-Pentano

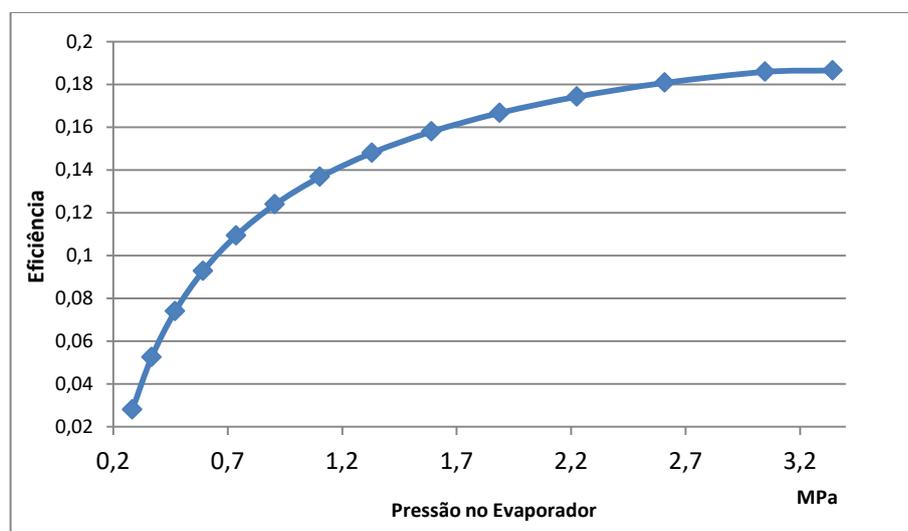
Característica	Valor
Temperatura Crítica	196 °C
Pressão Crítica	3370 kPa
Pressão de saturação a 60°C	2,1 atm
Massa Molar	72,15 g/mol
Calor Latente a 150 °C	22,28 kJ/kg

Fonte: *CoolProp*

A exemplo do butano, a pressão no condensador será acima da atmosférica, como é recomendado por Macagnam (2017), e sua massa molar está abaixo do recomendado por Pinto (2018).

Quatorze pontos foram obtidos através da simulação do ciclo orgânico utilizando o n-Pentano. A Figura 11 mostra as eficiências dos ciclos em função da pressão no evaporador, (lembrando que a pressão do condensador foi mantida fixa para todos os pontos).

Figura 11 - Eficiência do n-Pentano em função da Pressão



Fonte: Autor

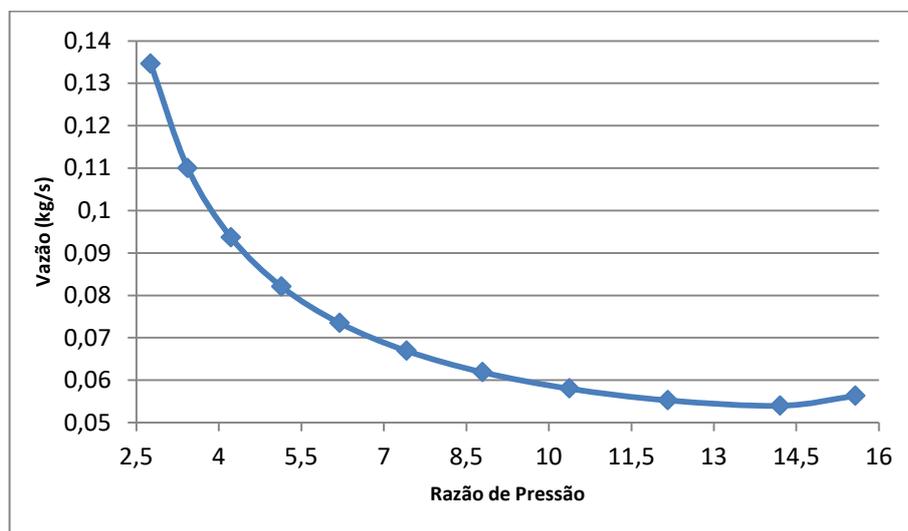
As pressões de trabalho variaram na faixa de 0,28MPa até 3,34MPa e a eficiência no ponto mais elevado chegou a 18,65%. Para o n-butano, como colocado na seção anterior, nas condições do projeto, não é interessante cogitar o seu uso em pressões abaixo de 1,8MPa (temperatura alta aproximadamente 109°C), por conta da eficiência. O pentano nesta mesma temperatura mostrou eficiência similar, porém com uma significativa vantagem sobre o anterior: A pressão alta neste ciclo seria de 0,72MPa, menos da metade do outro fluido.

Pela Figura 11, percebe-se que o pentano pode trabalhar em uma faixa bem grande de pressões. Seu acréscimo de eficiência com o aumento da pressão é menos acentuado a partir de 1MPa. A partir de 2MPa, pode-se considerar um patamar da eficiência. Dessa forma, esta seria a faixa de pressão mais interessante nas condições de projeto. As temperaturas altas estariam entre 125°C a 165°C, e as eficiências entre 13% a 17%.

A Figura 12 mostra a vazão em função da razão de compressão para o pentano. Foi calculada para gerar uma potência líquida padrão de 5kW.

Comparando os dados das Tabela 8 e Tabela 9 verifica-se que a pressão de saturação a 60°C do pentano é menos de um terço da pressão de saturação do butano. Por consequência, os equipamentos de baixa pressão do pentano podem ser menos robustos e maiores razões de compressão podem ser usadas.

Figura 12 - Gráfico de Vazão por Razão de compressão do n-Pentano ($T_a > 100^\circ\text{C}$)

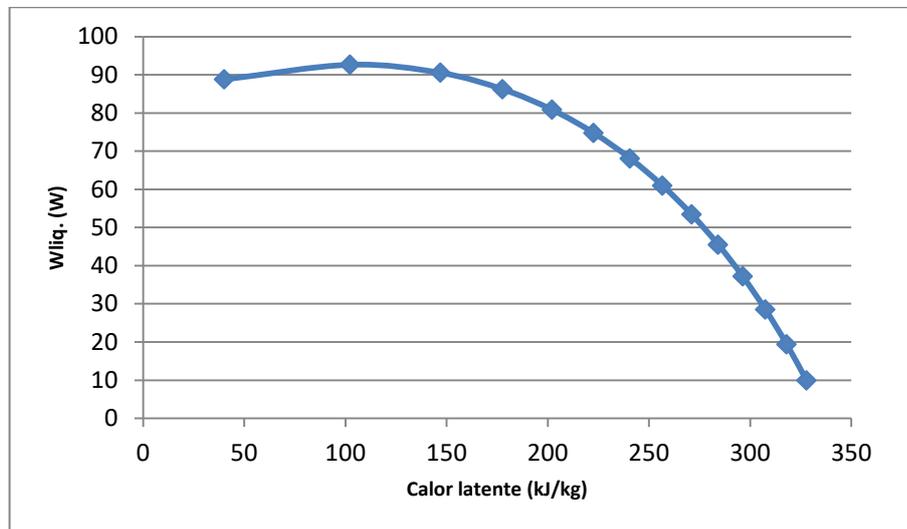


Fonte: Autor

A Figura 12 mostra a faixa de vazões que o n-Pentano trabalharia, entre 0,134 a 0,054 kg/s. Após uma razão de compressão de 14 vezes aproximadamente, o digrama mostra um aumento da vazão. Com isso, essa região se torna pouco interessante, ainda que próximo desta região a razão de compressão já esteja alta e a diferença de vazão é baixa a partir de uma

compressão de 9 vezes. Dessa forma a faixa de razão de compressão com maior potencial para o ciclo estudado seria entre 4 a 9 vezes.

Figura 13 - Calor latente por potência líquida para o n-Pentano



Fonte: Autor

A Figura 13 mostra o comportamento do calor latente do pentano. Ao se comparar o gráfico da Figura 13 com o da Figura 10 é possível observar que o pentano tem um calor latente maior para a mesma potência líquida que o butano.

4.2.3 ORC Hexametildisiloxano (MM)

É um composto orgânico de silício formado por seis carbonos, dezoito hidrogênios, dois silícios e um oxigênio. Sua fórmula molecular é $((\text{CH}_3)_3\text{Si})_2\text{O}$. Usado, geralmente, como solvente e reagente na síntese orgânica. Seus pontos de fusão e ebulição, a pressão atmosférica, são -64°C e 100°C , respectivamente. Possui ponto de fulgor em 4°C e massa molar de 162,32 g/mol (MERCK KGAA, 2019).

Não possui classificação ASHRAE 34, todavia o site da empresa *Merck* (2019) indica a categoria de perigo como: “*Altamente inflamável, perigoso para o ambiente*” (MERCK KGAA, 2019). De acordo com a mesma fonte, este fluido possui menor restrição de uso em relação aos compostos já citados, o que o torna o menos nocivo até o momento.

Esse fluido se encontra no estado líquido nas condições normais de temperatura e pressão. A Tabela 10 mostra algumas características de interesse do Hexametildisiloxano.

Tabela 10 - Características do Hexametildisiloxano

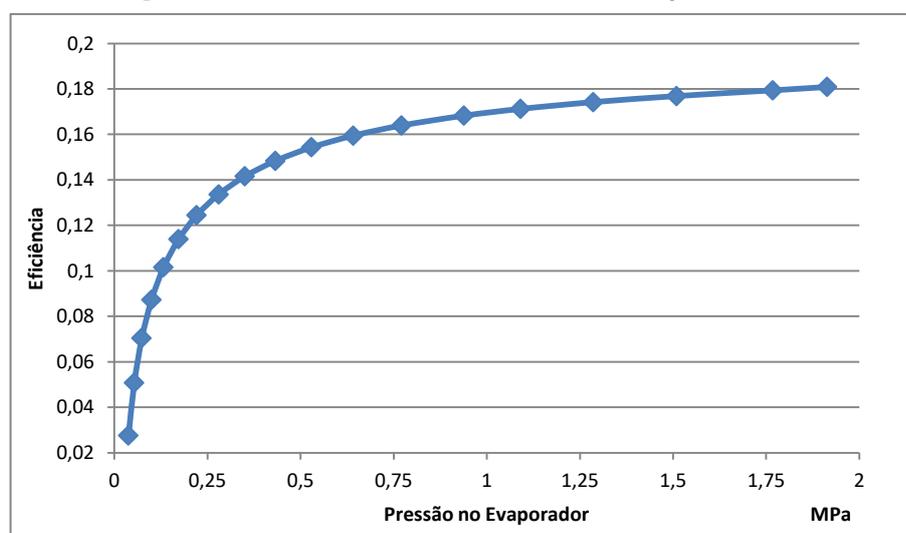
Característica	Valor
Temperatura Crítica	245,6 °C
Pressão Crítica	1939 kPa
Pressão de saturação a 60°C	0,26 atm
Massa Molar	162,32 g/mol
Calor Latente a 150 °C	16,35 kJ/kg

Fonte: CoolProp

Sua pressão no condensador será muito abaixo da atmosférica, contrariando as recomendações de Macagnam (2017). Todavia sua massa molar está a acima de 90 g/mol como recomenda Pinto (2018).

Através da simulação do ciclo orgânico utilizando o Hexametildisiloxano, foram obtidos dezenove pontos simulados. A Figura 14 mostra as eficiências dos ciclos em função da pressão no evaporador.

Figura 14 - Eficiência do Hexametildisiloxano em função da Pressão



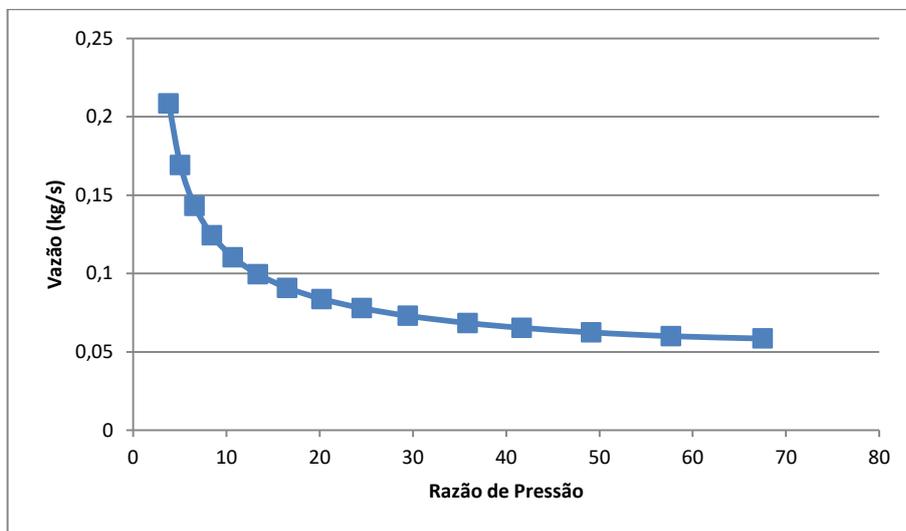
Fonte: Autor

As pressões de trabalho variaram na faixa de 0,04MPa até 1,9MPa, a eficiência no ponto mais elevado chegou a 18,08%. Esse fluido trabalha a baixíssimas pressões. Até 10% de eficiência, o ciclo inteiro está subatmosférico, o que inviabilizaria totalmente o seu uso nesta região. Em função da pressão alta este fluido se mostra mais eficiente do que o n-butano.

Observando a Figura 14, o Hexametildisiloxano seria mais recomendável a pressões acima de 1MPa. Nesse gráfico não é observado o mesmo efeito que nos anteriores, quanto a

uma queda de eficiência próxima ao ponto crítico. Isso ocorre por ter um ângulo de saída mais fechado, esse efeito é retardado para bem mais próximo do ponto crítico do diagrama.

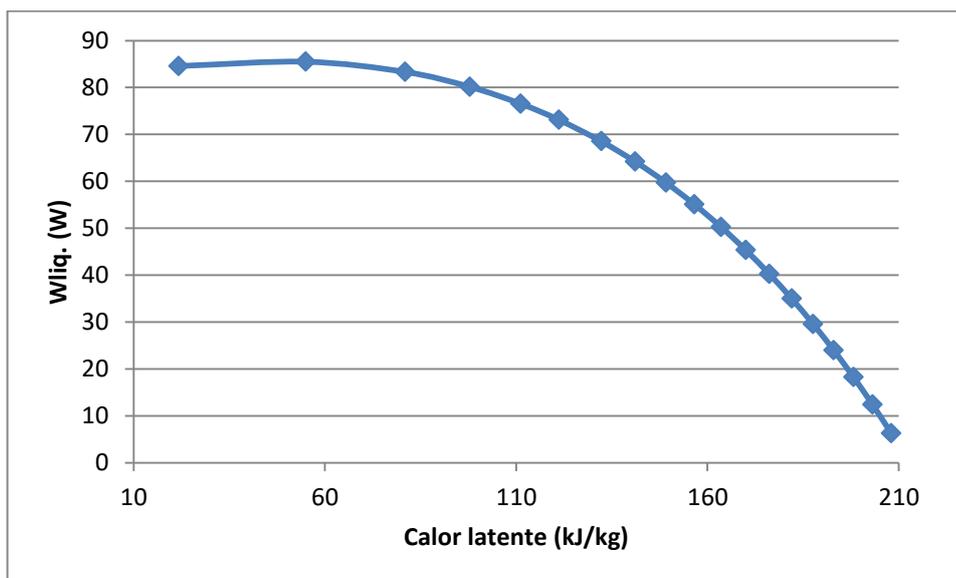
Figura 15 - Gráfico de Vazão por Razão de compressão do Hexametildisiloxano ($T_a > 100^\circ\text{C}$)



Fonte: Autor

A Figura 15 mostra a vazão do Hexametildisiloxano em relação à razão de compressão. É observado que a razão de compressão é muito alta para este fluido, sendo uma das desvantagens deste fluido. Suas vazões são mais altas quando comparadas as do pentano na maioria dos casos, o que indica uma menor capacidade de absorção de calor.

Figura 16 - Calor latente por potência líquida para o Hexametildisiloxano



Fonte: Autor

A Figura 16 mostra o comportamento do calor latente em função da potência líquida do Hexametildisiloxano. Verifica-se através do gráfico acima que o Hexametildisiloxano tem os menores calores latentes deste estudo. Este comportamento era esperado pelo seu ângulo θ ser também o menor.

4.2.4 ORC n-Heptano

É um composto orgânico formado por sete carbonos e dezesseis hidrogênios. Trata-se também de um hidrocarboneto da família dos alcanos assim como o butano e o pentano (RODRIGUES, 2015). É comumente usado como solvente ou combustível em motores de combustão interna (presente na gasolina). Não possui classificação pela ASHRAE. É, no entanto, perigoso dentro da Classificação GHS, a qual expressa: *“Líquido e vapor facilmente inflamáveis; Pode ser mortal por ingestão e penetração nas vias respiratórias; Muito tóxico para os organismos aquáticos com efeitos duradouros; Evitar a liberação para o ambiente”* (QUIMICA MODERNA IND. E COM LTDA, 2015).

Seus pontos de fusão e ebulição à pressão atmosférica são, respectivamente, $-90,6^{\circ}\text{C}$ e $98,4^{\circ}\text{C}$. Possui ponto de fulgor em -4°C e massa molar de $100,21\text{ g/mol}$.

Este foi o fluido selecionado por Santos (2018), para o dimensionamento de um condensador. A Figura 17 mostra o ciclo dimensionado pela autora, para utilização do heptano.

Figura 17 - Detalhamento das propriedades termodinâmicas do heptano no ciclo ORC

Ponto	Descrição	T($^{\circ}\text{C}$)	P (kPa)	h (kJ/kg)
1	Saída do trocador - Entrada na turbina	201,15	1000	510,51
2	Saída da turbina - Entrada no condensador	132,20	28,039	391,12
3	Saída do condensador - Entrada na Bomba	60,00	28,039	-94,82
4	Saída da bomba - Entrada no trocador	60,28	1000	-93,33

Fonte: Santos (2018)

Este é um fluido que se encontra no estado líquido nas condições normais de temperatura e pressão. A Tabela 11 mostra algumas características de interesse do n-Heptano.

Tabela 11 - Características do n-Heptano

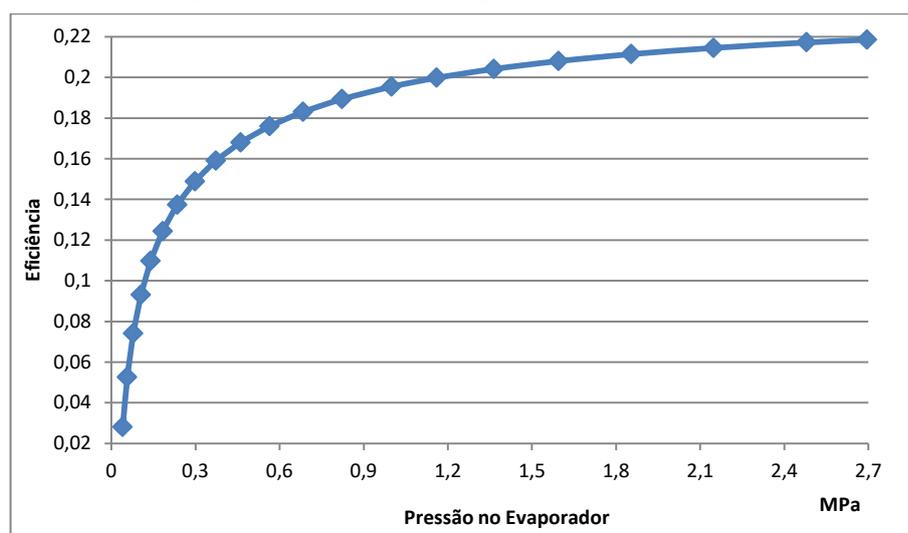
Característica	Valor
Temperatura Crítica	267 °C
Pressão Crítica	2736 kPa
Pressão de saturação a 60°C	0,28 atm
Massa Molar	100,21 g/mol
Calor Latente a 150 °C	275.01 kJ/kg

Fonte: *CoolProp*

Sua pressão no condensador é muito abaixo da atmosférica, contrariando as recomendações de Macagnam (2017). Porém sua massa molar está acima de 90 g/mol como recomenda Pinto (2018).

Através da simulação do ciclo orgânico utilizando o heptano, foram obtidos vinte e um pontos. A Figura 18 mostra as eficiências do ciclo em função da pressão no evaporador.

Figura 18 - Eficiência do n-Heptano em função da Pressão

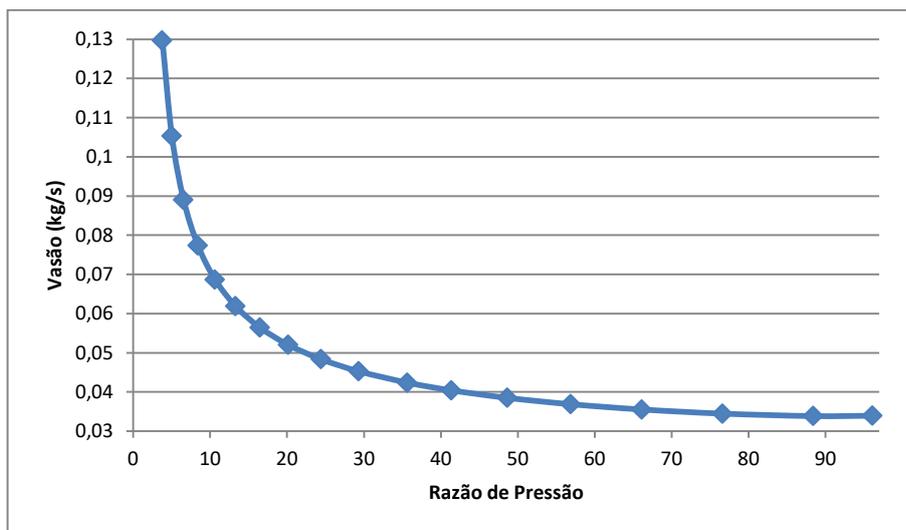


Fonte: Autor

As eficiências obtidas com o heptano são maiores que as dos fluidos anteriormente analisados. No ponto de maior eficiência, próximo à temperatura crítica, esse valor é de 21,8%. Sua faixa de temperatura é apenas um pouco maior que a do MM (Hexametildisiloxano). A sua curva de eficiência se destaca dos outros fluidos a partir de 0,3MPa.

Possui a mesma desvantagem da pressão baixa que o MM. Não obstante, trabalha a pressões altas menos elevadas, o que favorece a diminuição dos custos dos equipamentos.

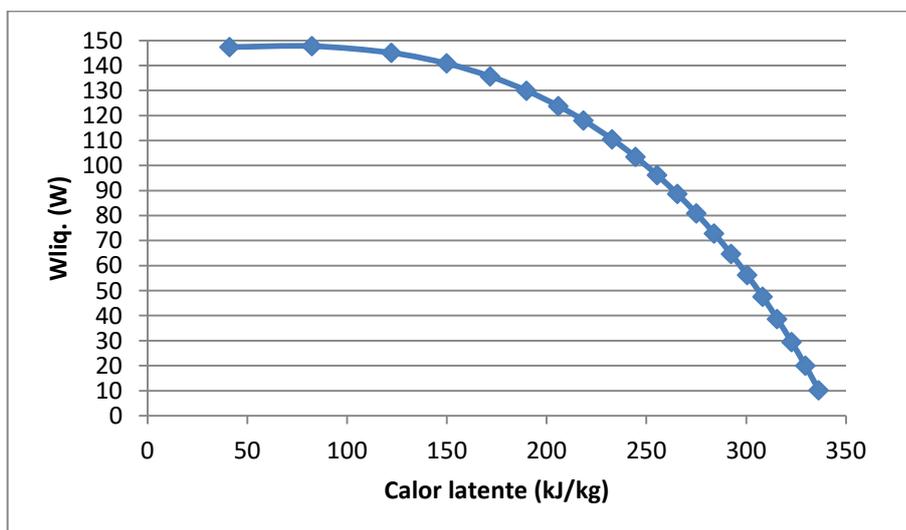
Figura 19 - Gráfico de Vazão por Razão de compressão do n-Heptano ($T_a > 100^\circ\text{C}$)



Fonte: Autor

Na Figura 19, apresenta-se a vazão do heptano em função da razão de compressão. Já que seu P_b é baixo, a razão de compressão chega a valores ainda maiores. Comparando a Figura 19 com a Figura 12, observa-se que o pentano tem taxas de compressões menores, porém, na mesma compressão de aproximadamente 18 vezes o heptano já possui menor vazão e com a vantagem das pressões altas serem muito menores.

Figura 20 - Calor latente por potência líquida para o Heptano



Fonte: Autor

A faixa de calor latente do Heptano é parecida com a do MM. Algo que evidencia a sua maior capacidade de absorção de calor e o fato de chegar a maiores potências líquidas geradas. Isso é visto na Figura 20.

4.2.5 ORC Tolueno

É um hidrocarboneto aromático, também pode ser chamado de metilbenzeno. É formado por sete carbonos e oito hidrogênios como a fórmula compacta $C_6H_5CH_3$. Seu ponto de ebulição é $110,6^\circ C$, e possui peso molecular de $92,15 \text{ g/mol}$. Muito usado como solvente, o tolueno está presente em produtos domésticos e indústrias. Não possui classificação pela ASHRAE 34. Ainda que seja inflamável e tóxico.

Em relação à toxicidade é chamado de lipossolúvel, que são substâncias que atravessam com facilidade a barreira hematoencefálica, que pode alterar o estado de consciência (FORSTER, TANNHAUSER e TANNHAUSER, 1994). Estes autores citam que a exposição prolongada ao tolueno pode causar tolerância e dependência, que se caracteriza por “*fissura e/ou compulsão para obter ou consumir a droga; inquietação, ansiedade, e irritabilidade*”. Por essas considerações, é a substância mais perigosa abordada neste trabalho.

Nas condições normais de temperatura e pressão é encontrado no estado líquido. A Tabela 12 considera as características deste fluido.

Tabela 12 - Características do Tolueno

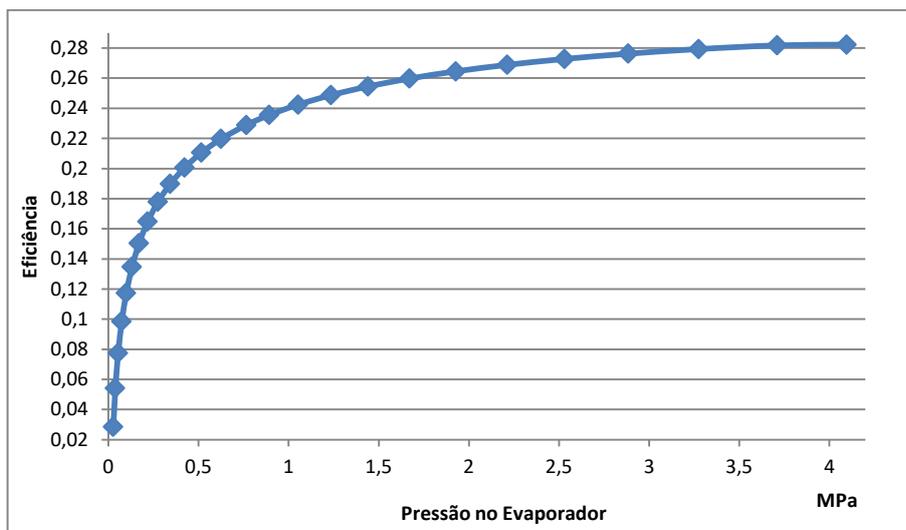
Característica	Valor
Temperatura Crítica	$591,8^\circ C$
Pressão Crítica	4106 kPa
Pressão de saturação a $60^\circ C$	$0,19 \text{ atm}$
Massa Molar	$100,21 \text{ g/mol}$
Calor Latente a $150^\circ C$	275.01 kJ/kg

Fonte: *CoolProp*

Tendo em vista a sua temperatura de ebulição, já era esperado que sua pressão de saturação a $60^\circ C$ seria a menor dentre os fluidos analisados. Essa pressão é até menor que a da água, nesta condição, na qual é de aproximadamente $0,20 \text{ atm}$.

O gráfico de eficiência do ORC com tolueno é mostrado na Figura 21 a partir de vinte e seis pontos.

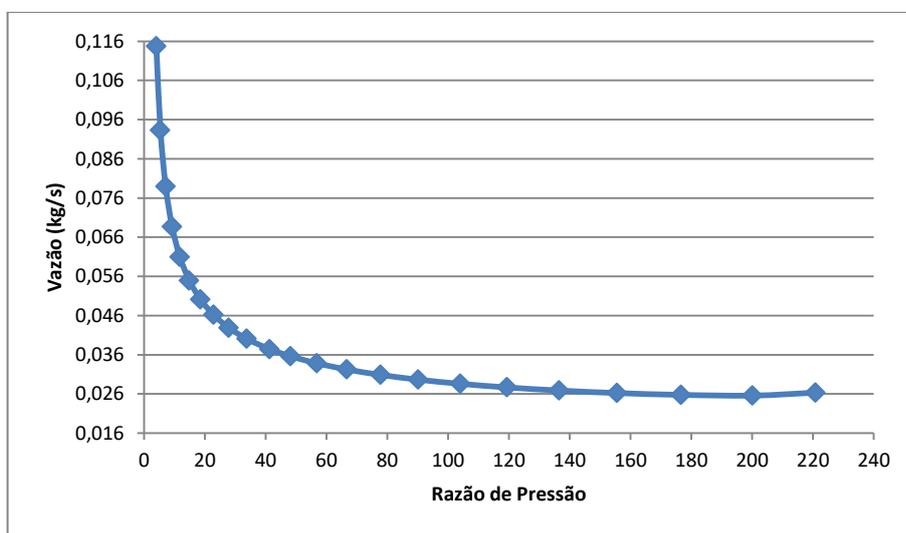
Figura 21 - Eficiência do Tolueno em função da Pressão



Fonte: Autor

A partir da Figura 21 observa-se que este fluido possui as maiores eficiências dentre todos os fluidos apresentados neste trabalho. Apesar de operar a pressões maiores, comparando-o nas mesmas pressões, a afirmação anterior se mostra verdadeira. Só havendo maiores discrepâncias em temperaturas (pressões) mais elevadas.

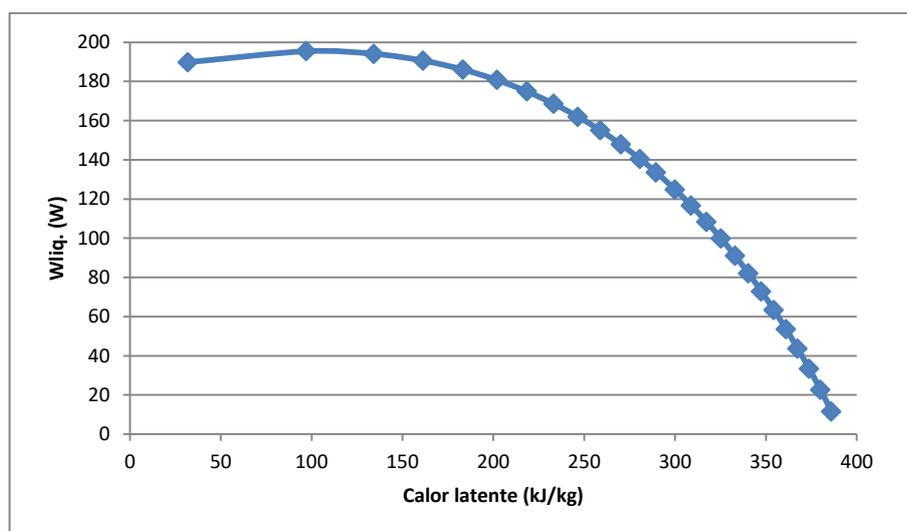
Figura 22 - Gráfico de Vazão por Razão de compressão do Tolueno ($T_a > 100^\circ\text{C}$)



Fonte: Autor

A Figura 22 mostra que o tolueno também teria as menores vazões para gerar 5kW de potência líquida. É interessante observar que a partir de razões de compressão de 140, a vazão difere minimamente, dessa forma, não é necessário considerar razões de compressão maiores que essa, onde o fluido pode trabalhar no limite de 285°C .

Figura 23 - Calor latente por potência líquida para o Tolueno



Fonte: Autor

O calor latente está relacionado à capacidade de absorção de energia do fluido. Por meio da Figura 23, verifica-se que o calor latente do Tolueno é maior e seu trabalho líquido também para cada ponto de temperatura.

4.2.6 ORC R141b

Trata-se de um composto orgânico de forma molecular $C_2H_3FC_2$ classificado como HCFC. Estes tipos de fluido surgiram como alternativa aos CFCs após a proibição do uso destes compostos na década de 90. É comumente usado como fluido refrigerante e expensor de espuma de poliuretano. Pela norma ASHRAE-34, possui classificação A3 (THE CHEMOURS COMPANY, 2016).

O HCFC, apesar de ter substituído o CFC, ainda é nocivo à camada de ozônio, porém com menor impacto. O R141b apresenta ODP de 0.12 (12% do potencial nocivo do R11) enquanto os hidrocarbonetos citados, segundo esta classificação, não prejudicam a camada de ozônio. Em relação ao efeito estufa, possui GWP no valor de 725 (725 vezes mais danoso que o dióxido de carbono) (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2019).

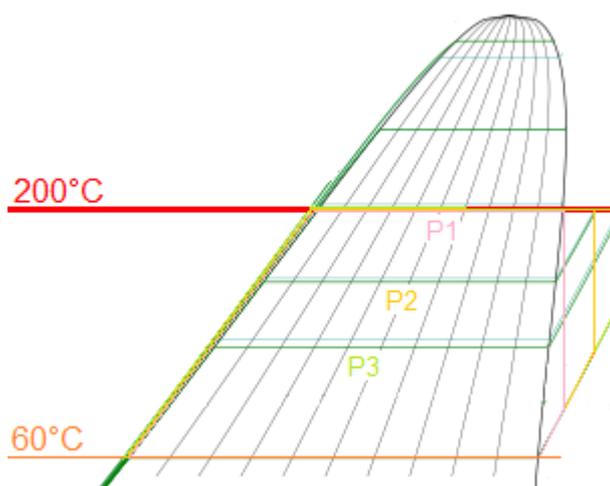
Para que fosse possível comparar esse fluido com os demais estudados, foi necessário arbitrar uma metodologia de superaquecimento da forma mais otimizada possível. Para isso as primeiras simulações foram feitas de forma idênticas a dos demais fluidos (usando o ponto 1, mostrado no diagrama da Figura 2, como vapor saturado). E depois, para cada simulação de ciclo, foram feitas novas simulações seguindo os seguintes critérios:

- a) A temperatura alta para as novas simulações é fixada.

- b) A nova pressão alta passa a ser uma fração da primeira.
- c) Por consequência, a temperatura alta passa a ser uma temperatura de superaquecimento e todos os pontos do ciclo são recalculados, inclusive a eficiência.
- d) O item b) e c) são repetidos entre 99% e 88% da pressão, com intervalos de 1%.
- e) O comportamento da eficiência em relação a estes pontos é observado.

A Figura 24 mostra uma ilustração das simulações para uma temperatura, dentro do diagrama T-s. Vê-se que a temperatura baixa e alta estão fixadas, e que as simulações são feitas para diferentes pressões altas.

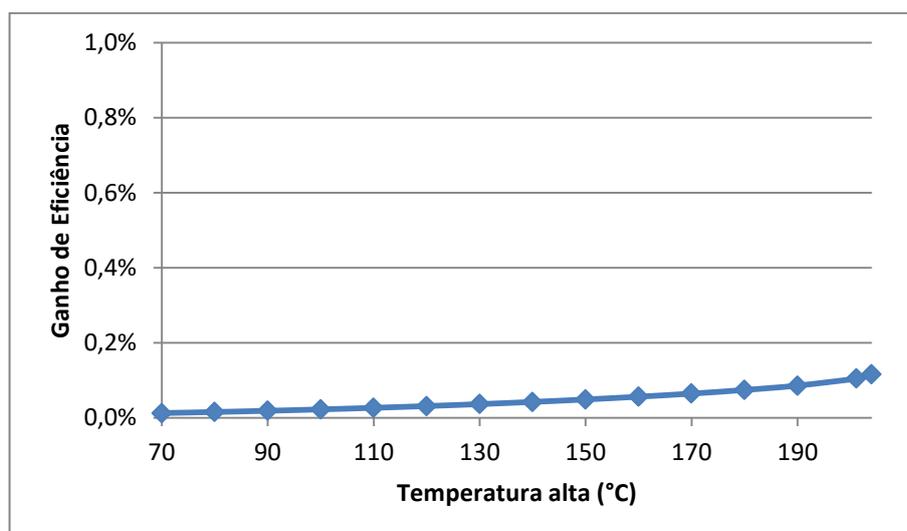
Figura 24 - Diagrama T-s ilustrativo das simulações do R-141b



Fonte: Autor

Depois de feitas todas essas considerações, e levando-se em conta o que foi dito no item e), verificou-se que todos os pontos tiveram um ganho de eficiência com o superaquecimento, porém a maior melhora foi de 0,3%. Como a intenção não era uma melhora na eficiência, e sim um afastamento satisfatório da curva de saturação, que não afetasse negativamente a eficiência, percebeu-se que o melhor percentual dentro deste critério estaria em 90%. A Figura 25 mostra o ganho de eficiência em relação às simulações com vapor saturado, em função da temperatura.

Figura 25 - Ganho de Eficiência pelo superaquecimento



Fonte: Autor

Este fluido é encontrado em estado líquido à temperatura ambiente. A Tabela 13 mostra suas características de interesse.

Tabela 13 - Características do R141b

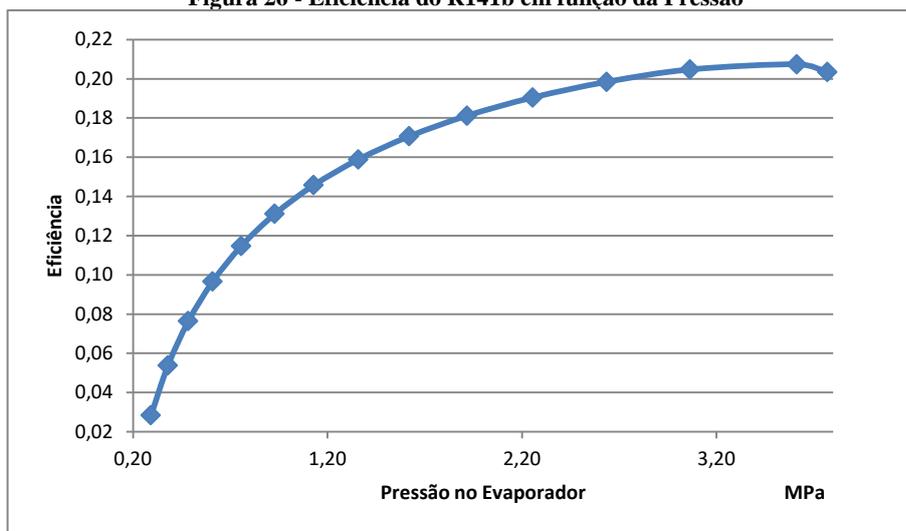
Característica	Valor
Temperatura Crítica	205,7 °C
Pressão Crítica	4340 kPa
Pressão de saturação a 60°C	2,43 atm
Massa Molar	116,9496 g/mol
Calor Latente a 150 °C	144,22 kJ/kg

Fonte: CoolProp

O fluido seco que melhor se compara com o R141b é o pentano, com seus pontos de temperatura e pressão críticas e pressão de saturação similares. Este fluido possui pressão de saturação mais alta que a atmosférica à T_b , além disso, apresenta a vantagem de sua massa molar ser maior que 90 g/mol.

O gráfico de eficiência abaixo (Figura 26), cuja simulação gerou 15 pontos, mostra variação de pressões entre 0,29 e 3,77MPa, com eficiência máxima em 20,74%. Este valor supera o obtido pela simulação com o pentano, que alcançou 18,65% em condições próximas de temperatura e pressão. É possível observar que o fluido já possui boa eficiência a partir de 1,5MPa (temperatura alta, aproximadamente 140 °C).

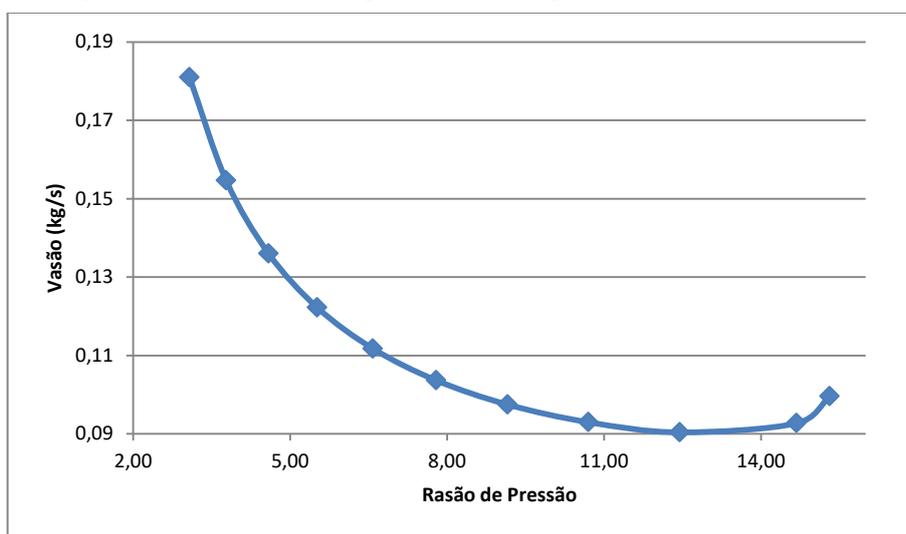
Figura 26 - Eficiência do R141b em função da Pressão



Fonte: Autor

A Figura 27 mostra a vazão do R141b em função da razão de compressão. Já que seu P_b não é muito baixo, os valores de compressão não chegam a pontos muito altos. Estes, como esperado, também se assemelham a do pentano, porém uma desvantagem é encontrada neste diagrama: sua vazão estabiliza-se a 90 g/s, o maior valor obtido dentre os fluidos analisados neste trabalho, havendo necessidade de aumento no diâmetro nominal da tubulação.

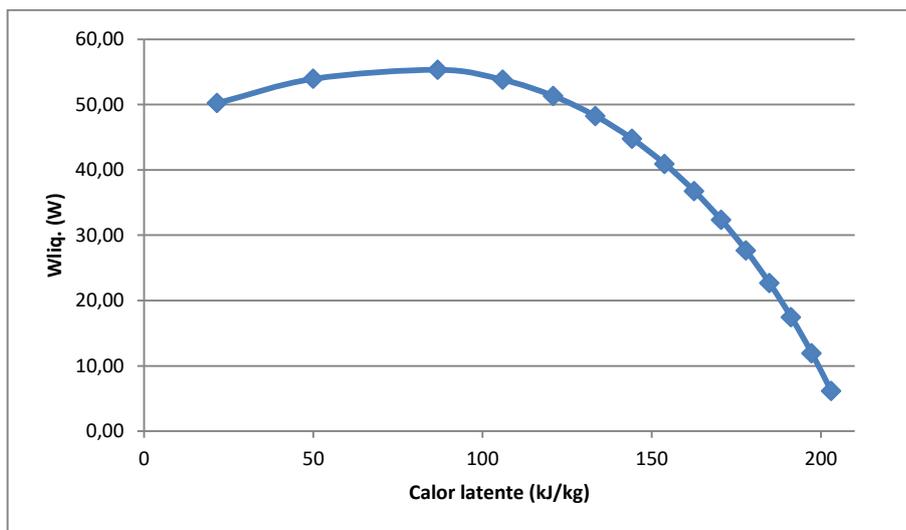
Figura 27 - Gráfico de Vazão por Razão de compressão do R141b ($T_a > 100^\circ\text{C}$)



Fonte: Autor

A Figura 28 mostra a relação do calor latente com a potência líquida. É interessante observar que o R141b tem potência líquida mais baixa que a dos outros fluidos e seu calor latente a 150°C é bem maior que o do pentano.

Figura 28 - Calor latente por potência líquida para o R141b



Fonte: Autor

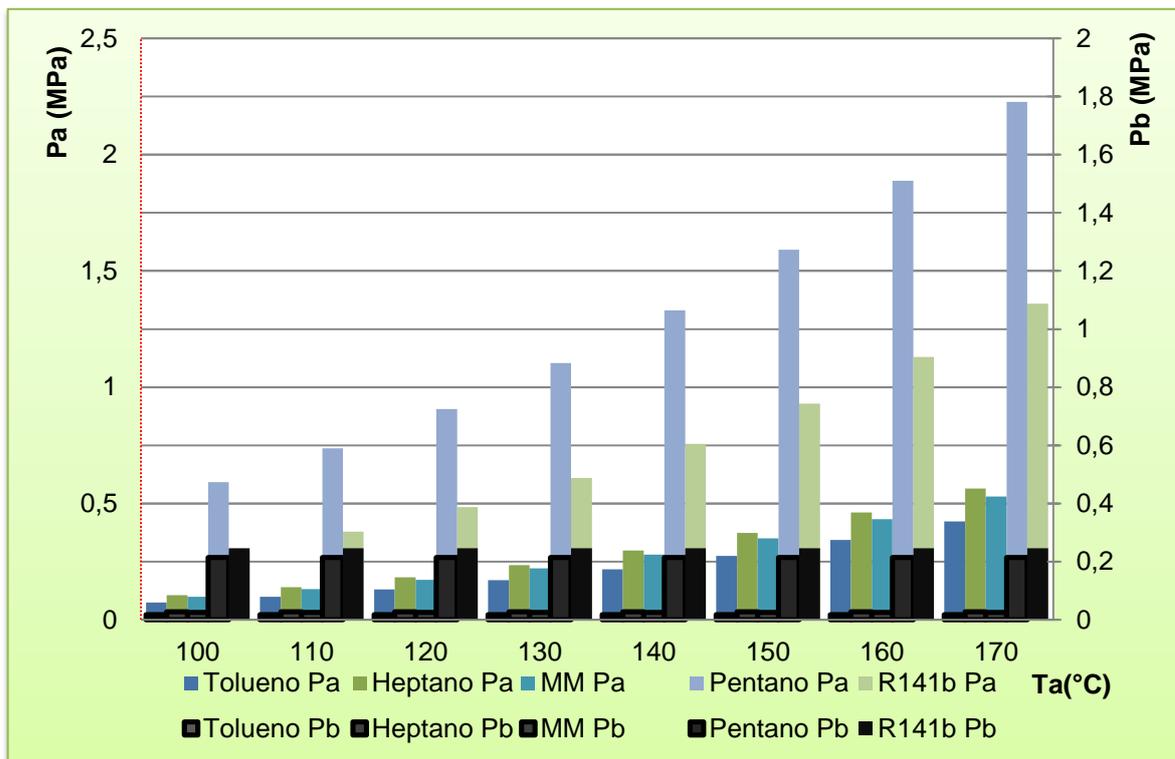
4.3 COMPARAÇÃO DOS FLUIDOS

4.3.1 Pressão x Temperatura

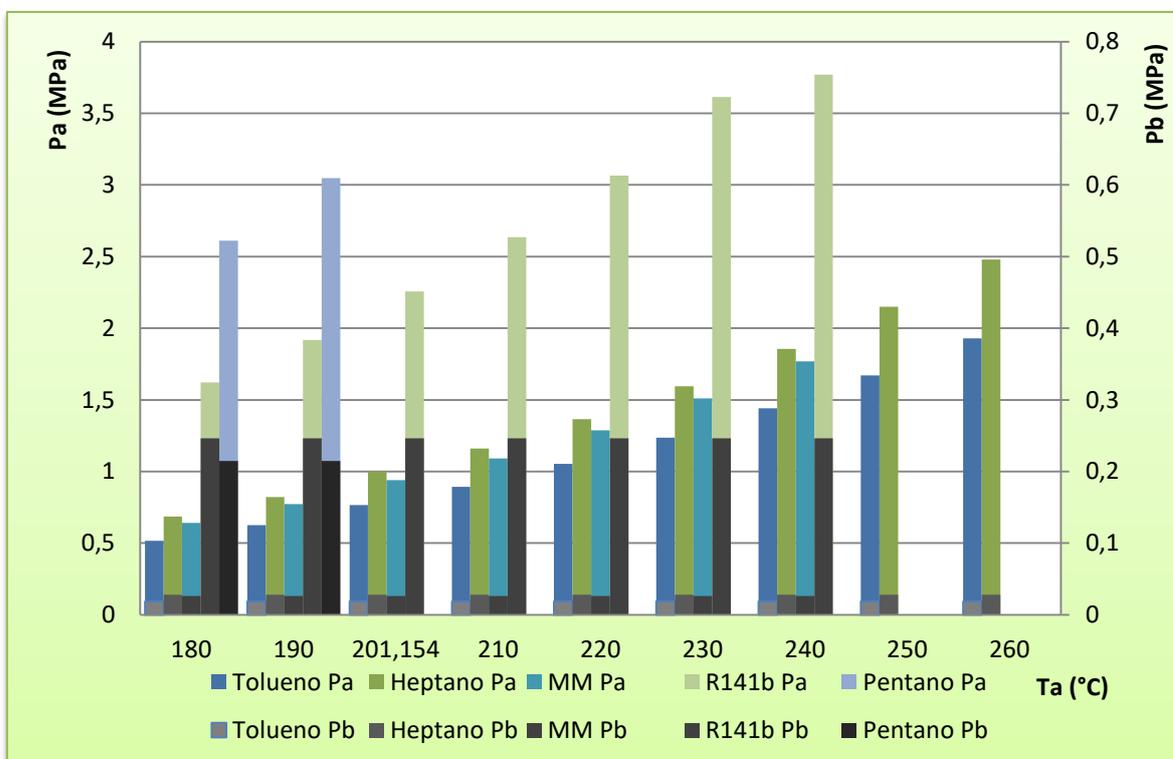
A pressão é um fator importante para a seleção dos fluidos. No projeto de ORC as características ideais para o fluido com relação às suas pressões são: menor diferencial de pressão, pressão no condensador maior que a atmosférica e menor pressão no evaporador.

Com relação aos fluidos estudados neste trabalho, a Figura 29 mostra as pressões P_a e P_b em relação à temperatura no evaporador. Na Figura 29(a) é possível observar que o tolueno, o heptano e o MM trabalham a pressões similares. Fica evidente que o pentano destoa dos demais, todavia, é o único fluido nestes gráficos que trabalha à pressão P_b acima da atmosférica.

Figura 29 - Gráficos Comparativo de Pressão x Temperatura



(a)

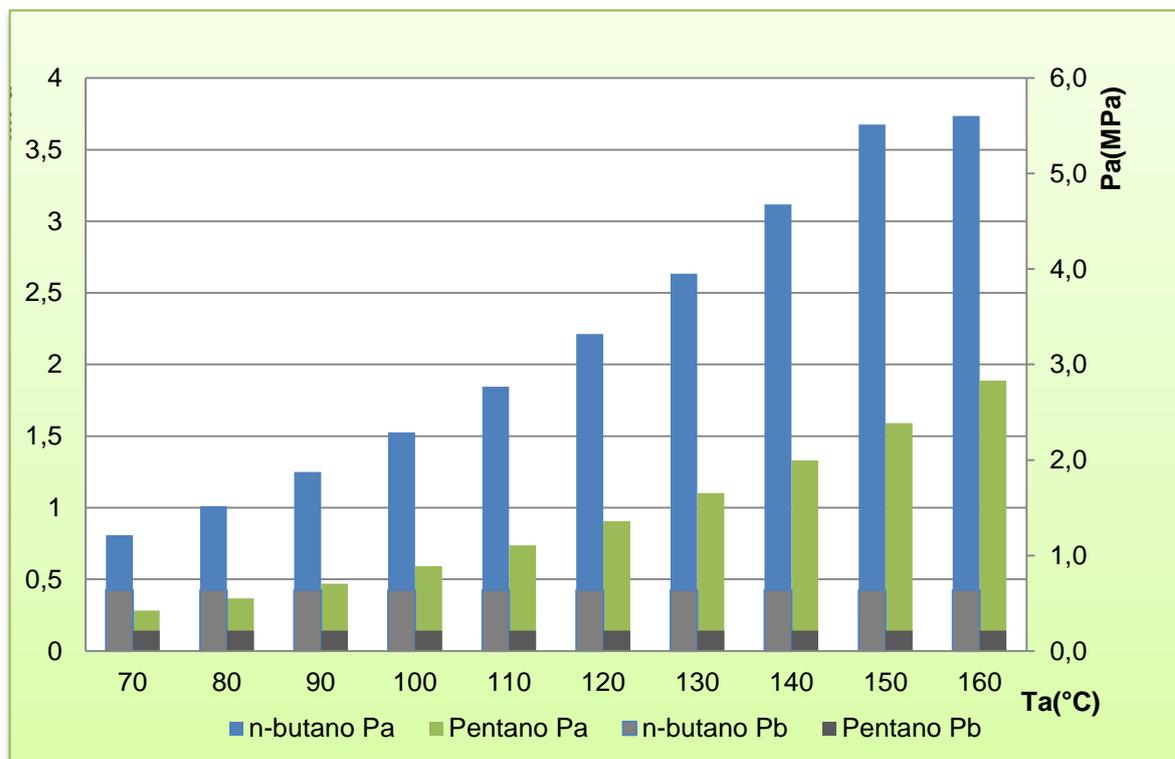


(b)

Fonte: Autor

Pelo fato do butano trabalhar a pressões muito altas em relação aos demais fluidos, um novo gráfico apenas comparando o butano com o pentano foi realizado. Este gráfico é mostrado na Figura 30, onde se observa que o butano trabalha a pressões com o dobro dos valores de pressão obtidos para o pentano.

Figura 30 - Gráfico de Pressão x Temperatura do Butano e Pentano

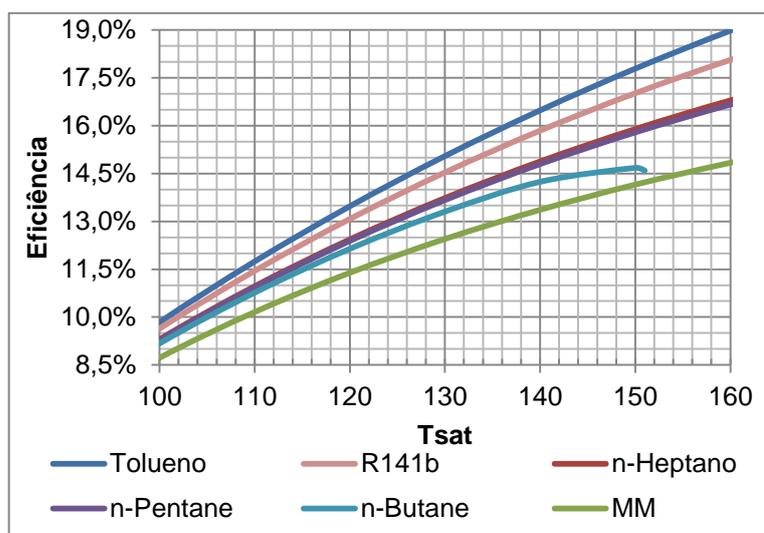


Fonte: Autor

4.3.2 Temperatura x Eficiência

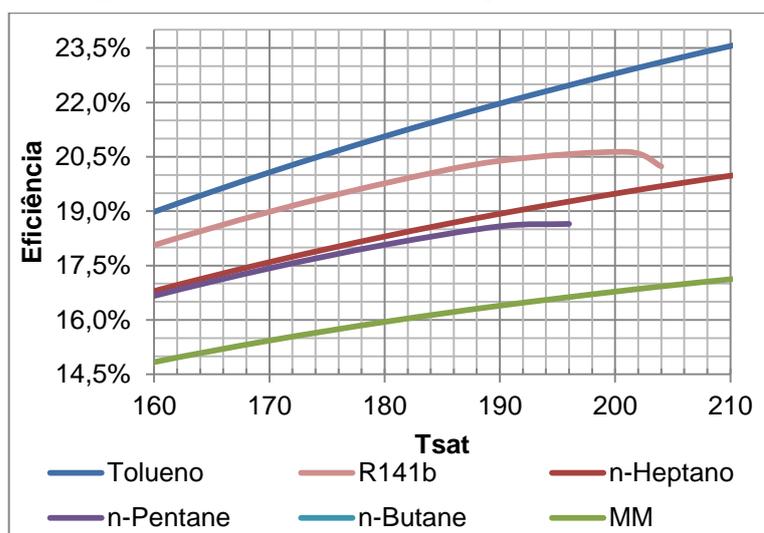
A eficiência é um dos parâmetros mais importantes no dimensionamento de um ciclo ORC e esse parâmetro é influenciado pela temperatura a que o fluido está submetido. As figuras nesta seção relacionam as temperaturas de saturação no evaporador com a eficiência do ciclo. Foram divididas em três faixas de temperatura: de 100 a 160°C; de 160 a 210°C; e 210 a 260°C.

Figura 31 - Gráfico de Eficiência x Temperatura (100-160°C)



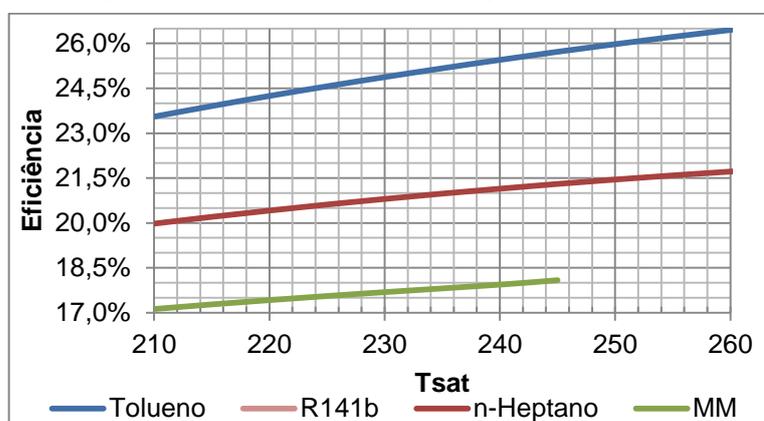
Fonte: Autor

Figura 32 - Gráfico de Eficiência x Temperatura (160-210°C)



Fonte: Autor

Figura 33 - Gráfico de Eficiência x Temperatura (210-260°C)



Fonte: Autor

A Figura 31 mostra a primeira faixa de temperatura, em que tolueno, R141b, heptano, pentano e butano não diferem muito suas eficiências. Todavia, o R141b se destaca para as últimas temperaturas mostrando diferenças menores que 0.2% em relação ao tolueno.

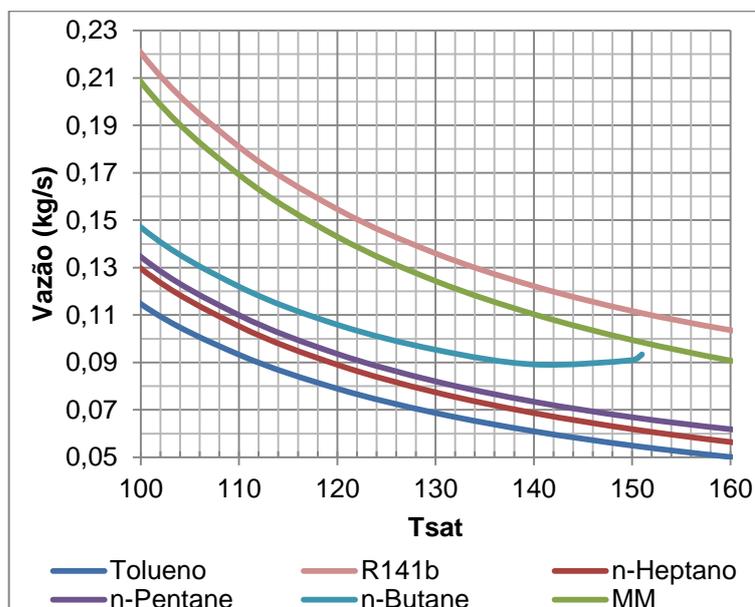
A segunda faixa de temperatura é mostrada pela Figura 32, na qual o tolueno se destaca por alcançar maiores valores de eficiência. É possível observar também que o pentano, com relação à eficiência poderia substituir o heptano em toda esta faixa de temperatura. O hexametildisiloxano destoa dos demais negativamente por ser o menos eficiente para a primeira e a segunda faixas de temperatura.

Na última faixa de temperatura, mostrada pela Figura 33, já é possível observar um afastamento considerável entre o heptano, o tolueno e o MM. A vantagem do tolueno se torna evidente.

4.3.3 Vazão x Temperatura

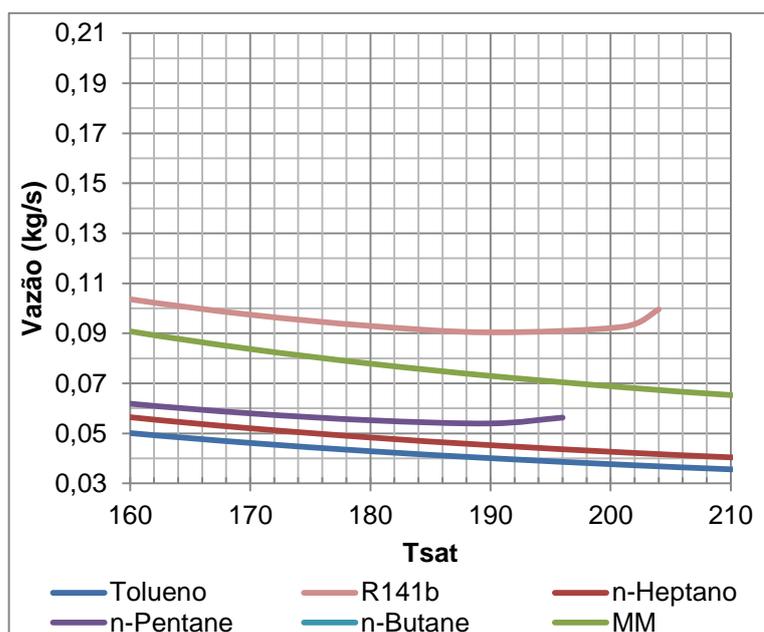
A vazão é um parâmetro que está diretamente relacionado à eficiência, já que a potência desejada para esse estudo foi fixada em 5kW, e influencia diretamente no dimensionamento dos equipamentos. Assim como na seção anterior, foram gerados três gráficos nas mesmas faixas de temperatura: de 100 a 150°C; de 150 a 200°C; e 200 a 250°C.

Figura 34 - Gráfico de Vazão x Temperatura (100-160°C)



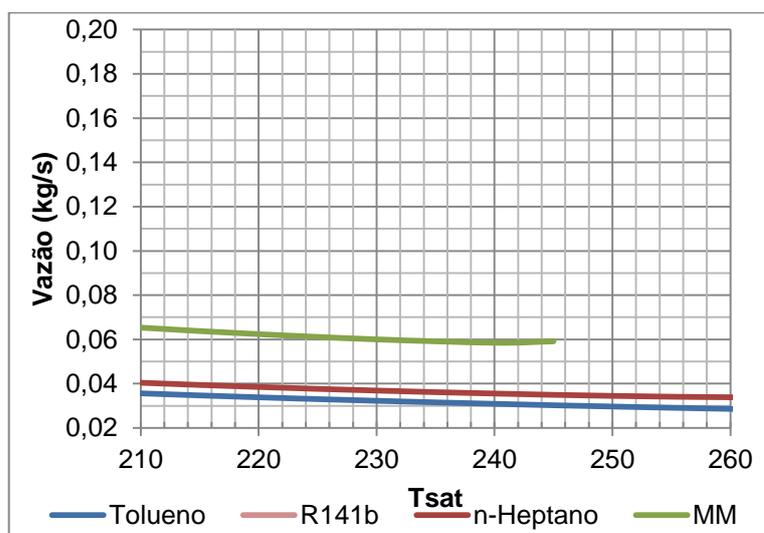
Fonte: Autor

Figura 35- Gráfico de Vazão x Temperatura (160-210°C)



Fonte: Autor

Figura 36- Gráfico de Vazão x Temperatura (210-260°C)



Fonte: Autor

Para a primeira faixa de temperatura, vista na Figura 34, observa-se que o R141b, apesar de possuir a mesma eficiência que o tolueno (Figura 34), teria o dobro de sua vazão. Na Figura 35, o pentano, o heptano e o tolueno se aproximam em relação às suas vazões dentro da segunda faixa de temperatura.

Para a terceira faixa de temperatura (Figura 36), o heptano e o tolueno não variam muito suas vazões, mantendo diferença entre eles de aproximadamente 4g/s.

4.3.4 Comparação do Tolueno com a água

Devido ao tolueno possuir algumas características termodinâmicas similares às da água, como ponto de ebulição e pressão de saturação a 60°C , e temperatura crítica elevada, um último comparativo foi proposto a fim de verificar se existe alguma faixa de temperatura em que o tolueno apresenta eficiência maior que a da água.

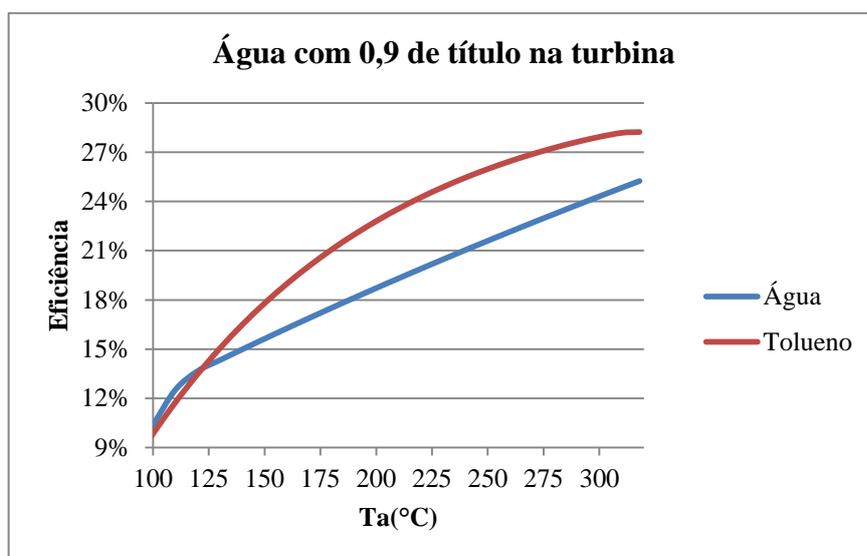
Para que esta comparação fosse possível, foi necessário arbitrar critérios para que fosse possível a simulação da água nas mesmas temperaturas que as do tolueno. Pelo fato da água ser um fluido úmido, a temperatura alta (T_a) deve estar na faixa de superaquecimento, de forma que o título na saída da turbina seja alto (pouco líquido saturado).

Os pontos de temperatura da água foram fixados aos mesmos valores do tolueno e a incógnita nesta simulação passou a ser a pressão alta. Para determinar o valor da pressão alta, primeiramente, o título foi fixado. Desta forma, a entropia do ponto de saída da turbina passa a ser conhecida e igual para todos os pontos. A pressão alta será o ponto com mesmo valor de entropia e a temperatura T_a da simulação.

As simulações foram feitas com título de 0,9 (10% de líquido na saída da turbina). Neste caso, a entropia dos pontos 3 e 4 (Figura 1) ficou em 7200kJ/kg.K para todas as simulações desta série.

O resultado das eficiências da água em relação à temperatura para o título de 0,9 é mostrado na Figura 37, juntamente com as eficiências do tolueno. Pode-se observar que o tolueno possui eficiências melhores que a da água a partir de 125°C . Ou seja, mesmo para ciclos trabalhando a 300°C (temperatura onde já se cogita o uso da água) o tolueno possui resultados melhores, levando em consideração apenas a eficiência.

Figura 37 - Comparação de eficiências: Água e Tolueno



Fonte: Autor

É evidente que levando em conta outros parâmetros, a água se mostra com muitas vantagens em relação ao tolueno, para altas temperaturas. Por exemplo, nas simulações, observou-se que a vazão da água poderia ser um quinto das do tolueno, além de ser mais barato, de extrema abundância e não possuir toxicidade.

4.4 CLASSIFICAÇÃO DOS FLUIDOS EM RELAÇÃO AOS PARÂMETROS ESTUDADOS

Esta seção tem o objetivo de reunir todas as características anteriormente analisadas e ordenar os fluidos a partir dos dados obtidos, dispondo-os do mais adequado ao menos adequado para cada aspecto e classificando-os nestas características como Bom, Regular ou Ruim, a partir do critério que: “Bom” se aplica a características de destaque positivo; “Regular” denomina características em que não há significativo destaque; “Ruim” se aplica a características de destaque negativo.

As

Tabela 14 e Tabela 15 mostram a classificação dos fluidos. A

Tabela 14 destaca parâmetros dos fluidos e a Tabela 15 mostra o comportamento do fluido no ciclo ORC. Através destas tabelas é possível, sabendo a faixa de temperatura que se deseja trabalhar e a ordem de prioridade das características que se busca dos fluidos, selecionar o mais adequado.

Tabela 14 - Classificação Qualitativa das propriedades dos Fluidos

	Inflamabilidade	Toxicidade	ODP	GWP	Estabilidade Térmica	Calor latente de Vaporização
Butano	6°	4°	1°	5°	2°	4°
Pentano	5°	4°	1°	4°	2°	5°
MM	1°	1°	1°	1°	5°	6°
R141b	3°	2°	6°	6°	6°	3°
Heptano	4°	3°	1°	2°	2°	2°
Tolueno	2°	6°	1°	2°	1°	1°

*Os fluidos foram ordenados a partir do mais adequado. Classificação: ■ Bom □ Regular ■ Ruim

Fonte: Autor

Na

Tabela 14, com relação às características do fluido, o fluido que mais se destaca é o hexametildiloxano, apesar de ter a pior avaliação nos parâmetros do ciclo. Como esperado, o que apresenta pior avaliação nestes quesitos é o R141b, classificado como Ruim em ODP, GWP e estabilidade térmica. Outro fluido com classificação Ruim nesta tabela é o tolueno, por ser o mais tóxico dentre os avaliados.

Tabela 15 - Classificação Qualitativa dos Fluidos no Ciclo ORC

	Pressão no Condensador	T. Alta Entre 100-150°C		T. Alta Entre 150-200°C		T. Alta Entre 200-266°C	
		Eficiência	Vazão	Eficiência	Vazão	Eficiência	Vazão
Butano	3°	5°	4°	-	-	-	-
Pentano	1°	3°	3°	3°	3°	-	-
MM	5°	6°	5°	5°	4°	3°	3°
R141b	2°	1°	6°	2°	5°	-	-
Heptano	4°	3°	2°	3°	2°	2°	2°
Tolueno	6°	1°	1°	1°	1°	1°	1°

*Os fluidos foram ordenados a partir do mais adequado. Classificação: ■ Bom □ Regular ■ Ruim

Fonte: Autor

Na Tabela 15, com relação aos desempenhos do ciclo, o tolueno se destaca para todas as temperaturas; o R141b, apesar das vazões, se mostra uma boa escolha para intervalos de temperatura até 200°C; e o heptano é uma opção adequada para temperaturas acima de 150°C.

5. CONCLUSÃO

A partir das simulações realizadas podem-se chegar as seguintes conclusões:

- A utilização do software *CoolProp* satisfaz as necessidades para os cálculos das propriedades dos fluidos analisados nesse projeto, de forma que tornou possível suas comparações.
- Conclui-se neste trabalho que a seleção de fluidos dependerá das características de necessidades do projeto, embora alguns fluidos tenham se destacado (negativa ou positivamente).
- No presente trabalho foi possível constatar que há uma correlação positiva entre o calor latente e o desempenho do fluido no ciclo Rankine, de acordo com Tchanche (2010). Contudo, não foi possível observar nenhuma correlação entre a massa molar e a eficiência do ciclo, conforme afirmado por Pinto (2018).
- Os hidrocarbonetos se mostraram como uma boa opção como fluidos secos para utilização nos ciclos Rankine orgânicos.
- A metodologia utilizada para análise de fluidos isentrópicos pôde ser validada através dos resultados satisfatórios do R141b. Apesar das restrições do seu uso, impedindo sua escolha como fluido de trabalho em novas instalações, esta mesma metodologia pode ser estendida em futuras pesquisas para outros fluidos isentrópicos.

Como sugestão a trabalhos futuros, pode-se reaplicar a metodologia do presente trabalho ao fluido ciclo-pentano, que foi apontado pelo Ministério do Meio Ambiente (2019) como um possível substituto do R141b, usando os dados apresentados no Apêndice A.7 Ciclo-Pentano. Uma nova busca por fluidos secos menos inflamáveis e com melhor eficiência pode ser feita.

BIBLIOGRAFIA

ABRAVA. RENABRAVA 5, Guia para Uso e Aplicação dos Fluidos Refrigerantes. **Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento**, 2006. Disponível em: <<http://abrava.com.br>>. Acesso em: 12 Abril 2019.

BELL, I. H. et al. Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 53, p. 2498-2508, Janeiro 2014.

CARLÃO, R. L. L. Projecto de um ciclo de Rankine orgânico para produção de 200 kWe. **Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**, Porto, Março 2010.

CORREIA, J. Aplicação de um Ciclo Orgânico de Rankine à Indústria Naval. **INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**, Lisboa, Dezembro 2014. 85.

DICIO. Sobre a definição de Fluido. **Site da Dicio, Dicionário Online de Português**, 2019. Disponível em: <<https://www.dicio.com.br/fluido/>>. Acesso em: Agosto 2019.

FOGAÇA, J. **Mundo Educacao**, 2018. Disponível em: <<https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/quimica/substancias-naturais-organicas.htm>>. Acesso em: 07 Abril 2019.

FORSTER, L. M. K.; TANNHAUSER, M.; TANNHAUSER, S. L. Toxicologia do tolueno: aspectos relacionados ao abuso. **Rev. Saúde Pública**, São Paulo, v. 28, n. 2, 1994. ISSN 0034-8910. On-line: <http://dx.doi.org/10.1590/S0034-89101994000200011> Disponível em 22 de Julho de 2019.

LIU, B. T.; CHIEN, K. H.; WANG, C. C. Effect of working fluids on organic Rankine cycle for waste heat recovery. **Energy**, v. v. 29, p. p.1207-1217, 2004.

MACAGNAN, M. H. **Ciclo Orgânico de Rankine (ORC), Notas de Aula**. Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS. São Leopoldo - RS, p. p. 35. 2017.

MERCK KGAA. Setor de Vendas da Empresa: Merck. **Site da Merck**, 2019. Disponível em: <http://www.merckmillipore.com/BR/pt/product/n-Pentane,MDA_CHEM-107177>. Acesso em: 17 Junho 2019.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Programa Brasileiro de Eliminação dos HCFCs - PBH. **Site do Ministério do Meio Ambiente**, 2019. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/protecao-da-camada-de-ozonio/acoes-brasileiras-para-protecao-da-camada-de-ozonio/programa-brasileiro-de-eliminacao-dos-hcfc-pbh>>. Acesso em: 27 Junho 2019.

MINISTERIO DO MEIO AMBIENTE. Substâncias Destruidoras da Camada de Ozônio. **MMA**, 2019. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/comunicacao/item/581->

subst%C3%A2ncias-destruidoras-da-camada-de-oz%C3%B4nio>. Acesso em: 04 Junho 2019.

MORAES, P. L. USINA HÍBRIDA HELIOTÉRMICA-BIOMASSA EM CICLO RANKINE. **Escola Politecnica - Universidade Federal do Rio de Janeiro**, Rio de Janeiro, fevereiro 2017.

PEREIRA, T. M. **ANÁLISE DE UM CICLO RANKINE ORGÂNICO EMPREGANDO PENTANO COMO FLUIDO DE TRABALHO E RESÍDUOS AGRÍCOLAS COMO INSUMO ENERGÉTICO**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 91 p. 2017. Monografia.

PINTO, R. G. D. APLICAÇÃO DE CICLOS RANKINE ORGÂNICOS PARA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE A PARTIR DE CALOR DE PROCESSO INDUSTRIAL NO BRASIL, TESE DE DOUTORADO. **COPPE UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO**, Rio de Janeiro, Março 2018. p. 333.

QUIMICA MODERNA IND. E COM LTDA. **FICHA DE INFORMAÇÕES DE SEGURANÇA DE PRODUTOS QUÍMICOS FISPQ HEPTANO**. [S.l.], p. 7. 2015. De acordo com a NBR 14725-4:2014, Rev.:2.

QUOILIN, S. et al. Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 22, p. 168-186, 2013.

REIS, M. M. L. D. **Recuperação de energia e redução de Recuperação de energia e redução de orgânico (ORC) em plataformas FPSO**. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS-Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas-SP, p. 189. 2018.

RODRIGUES, J. Butano – Molécula da Semana. **fCiência**, 2015. Disponível em: <<https://www.fciencias.com/2015/08/27/butano-molecula-da-semana/>>. Acesso em: 03 junho 2019.

SANTORO, A. **Propriedades Termodinamicas, NOTAS DE AULA**. UNISANTA – FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA. Santos - SP. 200-?

SANTOS, R. **CONFIGURAÇÃO DE UM CICLO RANKINE ORGÂNICO DE 5 KW E DIMENSIONAMENTO TÉRMICO DE SEU CONDENSADOR**. Universidade Federal do Rio de Janeiro – campus Macaé. Macaé, p. 42. 2018. Trabalho de Monografia.

SILVA, R.; MORAIS, W. Estudo da Falha em Palheta de uma Turbina a Vapor Geradora de Energia. **Unisanta Science and Technology**, Nova Iorque, v. 6, n. 1, p. 27-34, 6 julho 2017. ISSN ISSN 2317-1316.

SONNTAG, R.; BORGNACKE, C.; VAN WYLEN, G. **Fundamentos da termodinâmica**. Tradução da 5ª edição americana. ed. S. Paulo - SP: Edgar Blücher, 2002.

SOTOMONTE, C. OTIMIZAÇÃO MULTI OBJETIVO PARA A SELEÇÃO DE FLUIDOS DE TRABALHO E PARÂMETROS DE PROJETO NO CICLO RANKINE

ORGÂNICO. **UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**, ITAJUBÁ, junho 2015. 132 p.

TCHANCHE, B. F. Low-Grade Heat Conversion into Power Using Small Scale Organic Rankine Cycles, Tese de Doutorado. **Agricultural University Of Athens**, Atenas, 2010. p. 200.

TCHANCHE, B. F.; PÉTRISSANS, M.; PAPADAKIS, G. Heat resources and organic rankine cycle machines. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 39, p. p. 1185 – 1199, 2014. ISSN ISSN 1364-0321.

THE CHEMOURS COMPANY. **FICHA DE INFORMAÇÃO DE SEGURANÇA DE PRODUTOS QUÍMICOS - HCFC 141b**. The Chemours Company Indústria e Comércio de Produtos Químicos Ltda. Barueri, SP, p. 11. 2016. Versão 4.5.

APÊNDECE A – TABELAS DAS PROPRIEDADES DOS FLUIDOS ANALISADOS

A.1 N-BUTANO

Tabela 16 - Lista das Propriedades do Butano

Pa (Pa)	Pb (Pa)	PR	Tsat °C	H1 (J/kg)	S 1-2 (J/kg.k)	H2 (J/kg)	H3 (J/kg)	S 3-4 (J/kg.k)	H4 (J/kg)	Wb (J/kg)	Wt (J/kg)	Qh (J/kg)	Ql (J/kg)	Ef	Wliq (J/kg)	Vazão 5kW (kg/s)
3735412	638236	5,9	151	348908	1488	354729	721524	2428	662171	5820	59353	366795	313263	0,15	53.532	0,09
3674581	638236	5,8	150	348908	1488	354615	729005	2447	668338	5707	60667	374390	319430	0,15	54.960	0,09
3117200	638236	4,9	140	348908	1488	353572	747294	2501	686557	4664	60736	393721	337649	0,14	56.073	0,09
2634352	638236	4,1	130	348908	1488	352667	746695	2513	690505	3758	56190	394028	341597	0,13	52.432	0,10
2213108	638236	3,5	120	348908	1488	351876	740689	2513	690517	2967	50172	388813	341608	0,12	47.205	0,11
1845566	638236	2,9	110	348908	1488	351185	731865	2507	688604	2276	43260	380680	339695	0,11	40.984	0,12
1525876	638236	2,4	100	348908	1488	350583	721289	2498	685611	1674	35677	370706	336703	0,09	34.003	0,15
1249267	638236	2,0	90	348908	1488	350061	709529	2488	682003	1153	27525	359467	333095	0,07	26.372	0,19
1011590	638236	1,6	80	348908	1488	349613	696940	2476	678086	705	18853	347326	329178	0,05	18.149	0,28
809079	638236	1,3	70	348908	1488	349231	683768	2464	674088	322	9679	334537	325179	0,03	9.357	0,53

Fonte: Autor

A.2 N-PENTANO

Tabela 17 - Lista de Propriedades do Pentano

Pa (Pa)	Pb (Pa)	PR	Tsat °C	H1 (J/kg)	S1-2 (J/kg.k)	H2 (J/kg)	H3 (J/kg)	S 3-4 (J/kg.k)	H4 (J/kg)	Wb (J/kg)	Wt (J/kg)	Qh (J/kg)	Ql (J/kg)	Cl (J/kg)	Wliq (J/kg)	Vazão 5kW (kg/s)	Efic.
3342245	214542	15,6	196	58213	181	63544	539702	1338	445575	5331	94127	476158	387362	40280	88797	0,056	0,19
3047625	214542	14,2	190	58213	181	63043	561560	1389	464092	4830	97468	498517	405879	102405	92638	0,054	0,19
2609920	214542	12,2	180	58213	181	62299	563182	1401	468575	4086	94607	500883	410362	146989	90521	0,055	0,18
2225864	214542	10,4	170	58213	181	61645	556478	1396	466830	3432	89648	494832	408617	177690	86216	0,058	0,17
1887903	214542	8,8	160	58213	181	61070	546185	1384	462490	2857	83695	485115	404277	202147	80838	0,062	0,17
1590832	214542	7,4	150	58213	181	60563	533844	1369	456753	2350	77091	473280	398540	222779	74740	0,067	0,16
1330534	214542	6,2	140	58213	181	60119	520202	1351	450210	1906	69992	460082	391997	240746	68085	0,073	0,15
1103522	214542	5,1	130	58213	181	59732	505692	1331	443213	1519	62479	445960	385000	256721	60960	0,082	0,14
906711	214542	4,2	120	58213	181	59396	490593	1311	435995	1183	54597	431197	377782	271137	53414	0,094	0,12
737291	214542	3,4	110	58213	181	59107	475094	1290	428724	894	46370	415987	370511	284290	45476	0,110	0,11
592652	214542	2,8	100	58213	181	58859	459333	1270	421529	647	37804	400474	363316	296399	37157	0,135	0,09
470337	214542	2,2	90	58213	181	58650	443414	1249	414516	437	28899	384764	356303	307629	28461	0,176	0,07
368013	214542	1,7	80	58213	181	58475	427418	1230	407774	262	19643	368942	349561	318108	19381	0,258	0,05
283456	214542	1,3	70	58213	181	58331	411406	1211	401387	118	10019	353075	343174	327942	9901	0,505	0,03

Fonte: Autor

A.3 HEXAMETILDISILOXANO MM

Tabela 18 - Lista das Propriedades do Hexametildisiloxano

Pa (Pa)	Pb (Pa)	PR	Tsat °C	H1 (J/kg)	S1-2 (J/kg.k)	H2 (J/kg)	H3 (J/kg)	S 3-4 (J/kg.k)	H4 (J/kg)	Wb (J/kg)	Wt (J/kg)	Qh (J/kg)	Ql (J/kg)	Cl (J/kg)	Vazão 5kW (kg/s)	Wliq (J/kg)	Efic.
1913954	26180	73,1	245	-83262	-235	-80652	386996	849	299810	2610	87187	467649	383072	21776	0,059	84.577	0,18
1767856	26180	67,5	240	-83262	-235	-80854	395757	868	307858	2408	87899	476611	391120	54981	0,058	85.491	0,18
1510081	26180	57,7	230	-83262	-235	-81210	389877	860	304508	2052	85369	471087	387770	80968	0,060	83.317	0,18
1286562	26180	49,1	220	-83262	-235	-81518	378595	842	296700	1744	81896	460114	379961	97823	0,062	80.152	0,17
1091345	26180	41,7	210	-83262	-235	-81788	365282	820	287261	1474	78021	447070	370523	111115	0,065	76.547	0,17
939217	26180	35,9	201	-83262	-235	-81998	352572	799	278196	1264	74376	434570	361458	121139	0,068	73.112	0,17
771703	26180	29,5	190	-83262	-235	-82230	335778	770	266220	1032	69558	418008	349482	132216	0,073	68.526	0,16
642082	26180	24,5	180	-83262	-235	-82409	320249	743	255187	853	65062	402658	338449	141066	0,078	64.210	0,16
529816	26180	20,2	170	-83262	-235	-82565	304433	715	244015	697	60418	386997	327277	149137	0,084	59.720	0,15
433146	26180	16,5	160	-83262	-235	-82698	288434	687	232800	564	55634	371132	316062	156585	0,091	55.071	0,15
350487	26180	13,4	150	-83262	-235	-82813	272329	659	221612	449	50716	355142	304874	163523	0,099	50.267	0,14
280388	26180	10,7	140	-83262	-235	-82910	256176	630	210509	352	45666	339085	293771	170035	0,110	45.314	0,13
221500	26180	8,5	130	-83262	-235	-82991	240021	601	199538	271	40483	323012	282800	176187	0,124	40.212	0,12
172559	26180	6,6	120	-83262	-235	-83059	223903	572	188740	203	35163	306963	272002	182034	0,143	34.960	0,11
132379	26180	5,1	110	-83262	-235	-83115	207855	543	178153	147	29703	290970	261415	187618	0,169	29.556	0,10
99840	26180	3,8	100	-83262	-235	-83160	191905	514	167809	102	24095	275065	251071	192980	0,208	23.993	0,09
73893	26180	2,8	90	-83262	-235	-83196	176077	486	157744	66	18333	259273	241006	198150	0,274	18.267	0,07
53560	26180	2,0	80	-83262	-235	-83224	160392	458	147987	38	12405	243616	231249	203159	0,404	12.367	0,05
37932	26180	1,4	70	-83262	-235	-83246	144871	430	138572	16	6299	228117	221834	208032	0,796	6.283	0,03

Fonte: Autor

A.4 N-HEPTANO

Tabela 19 - Lista das Propriedades do Heptano

Pa (Pa)	Pb (Pa)	PR	Tsat °C	H1 (J/kg)	H2 (J/kg)	H3 (J/kg)	H4 (J/kg)	Wb (J/kg)	Wt (J/kg)	Qh (J/kg)	Ql (J/kg)	Cl (J/kg)	Wliq (J/kg)	Vazão 5kW (kg/s)	Efic.
2696055	28039	96,2	266	-94816	-90716	583549	432099	4100	151450	674265	526915	41196	147350	0,034	0,22
2479387	28039	88,4	260	-94816	-91048	589191	437693	3768	151499	680239	532509	82509	147730	0,034	0,22
2148697	28039	76,6	250	-94816	-91556	584644	436339	3261	148304	676199	531156	122320	145044	0,034	0,21
1855130	28039	66,2	240	-94816	-92006	573687	430118	2810	143569	665693	524935	149970	140759	0,036	0,21
1594822	28039	56,9	230	-94816	-92406	559542	421522	2410	138021	651949	516338	171794	135611	0,037	0,21
1364180	28039	48,7	220	-94816	-92761	543536	411591	2056	131945	636296	506407	190094	129890	0,038	0,20
1160217	28039	41,4	210	-94816	-93074	526356	400873	1742	125483	619430	495689	205996	123741	0,040	0,20
999996	28039	35,7	201	-94816	-93320	510509	391002	1496	119507	603830	485818	218586	118011	0,042	0,20
822544	28039	29,3	190	-94816	-93593	489954	378277	1223	111677	583547	473093	232941	110454	0,045	0,19
684662	28039	24,4	180	-94816	-93805	471172	366764	1011	104408	564977	461580	244663	103397	0,048	0,18
564954	28039	20,1	170	-94816	-93990	452192	355270	827	96922	546181	450086	255503	96095	0,052	0,18
461744	28039	16,5	160	-94816	-94148	433110	343882	668	89227	527258	438699	265608	88560	0,056	0,17
373459	28039	13,3	150	-94816	-94284	414002	332672	532	81330	508286	427489	275087	80798	0,062	0,16
298607	28039	10,6	140	-94816	-94400	394929	321700	417	73229	489328	416516	284030	72812	0,069	0,15
235771	28039	8,4	130	-94816	-94496	375939	311018	320	64921	470435	405834	292508	64601	0,077	0,14
183605	28039	6,5	120	-94816	-94577	357075	300674	240	56401	451651	395490	300581	56161	0,089	0,12
140827	28039	5,0	110	-94816	-94642	338371	290713	174	47657	433013	385529	308301	47484	0,105	0,11

(a)

Pa (Pa)	Pb (Pa)	PR	Tsat °C	H1 (J/kg)	H2 (J/kg)	H3 (J/kg)	H4 (J/kg)	Wb (J/kg)	Wt (J/kg)	Qh (J/kg)	Ql (J/kg)	Cl (J/kg)	Wliq (J/kg)	Vazão 5kW (kg/s)	Efic.
106229	28039	3,8	100	-94816	-94696	319858	281180	120	38678	414554	375996	315713	38558	0,130	0,09
78670	28039	2,8	90	-94816	-94738	301564	272117	78	29446	396302	366934	322856	29368	0,170	0,07
57090	28039	2,0	80	-94816	-94771	283512	263571	45	19941	378283	358387	329769	19896	0,251	0,05
40510	28039	1,4	70	-94816	-94797	265724	255588	19	10136	360521	350404	336484	10116	0,494	0,03

(b)

Fonte: Autor

A.5 TOLUENO

Tabela 20 - Lista das Propriedades do Tolueno

Pa	Pb	PR	Tsat	H1	H2	H3	H4	Wb	Wt	Qh	Ql	Cl	Wliq	Vazão 5kW	Efic.
4096057	18540	220,9	318	-96667	-91758	580804	386053	4909	194751	672562	482720	31999	189842	0,026	0,28
3711129	18540	200,2	310	-96667	-92221	601239	401388	4446	199851	693460	498055	97191	195405	0,026	0,28
3275679	18540	176,7	300	-96667	-92745	602075	404081	3923	197994	694820	500749	134377	194071	0,026	0,28
2884168	18540	155,6	290	-96667	-93216	596778	402715	3452	194062	689993	499383	161395	190611	0,026	0,28
2531570	18540	136,5	280	-96667	-93640	588436	399372	3027	189064	682076	496039	183346	186037	0,027	0,27
2213986	18540	119,4	270	-96667	-94022	578227	394853	2645	183374	672249	491520	202074	180729	0,028	0,27
1928226	18540	104,0	260	-96667	-94366	566767	389587	2301	177181	661133	486254	218520	174879	0,029	0,26
1671587	18540	90,2	250	-96667	-94675	554430	383835	1992	170595	649106	480503	233244	168603	0,030	0,26
1441708	18540	77,8	240	-96667	-94952	541464	377778	1715	163687	636416	474445	246612	161971	0,031	0,25
1236476	18540	66,7	230	-96667	-95199	528043	371541	1468	156502	623242	468208	258881	155034	0,032	0,25
1053970	18540	56,8	220	-96667	-95419	514295	365222	1248	149073	609714	461890	270237	147824	0,034	0,24
892409	18540	48,1	210	-96667	-95614	500318	358898	1054	141420	595931	455565	280823	140366	0,036	0,24
765615	18540	41,3	201	-96667	-95767	487824	353349	901	134475	583591	450016	289634	133575	0,037	0,23
625556	18540	33,7	190	-96667	-95935	471969	346473	732	125496	567905	443141	300102	124764	0,040	0,22
517195	18540	27,9	180	-96667	-96066	457712	340473	601	117239	553778	437140	308957	116638	0,043	0,21
423614	18540	22,8	170	-96667	-96179	443461	334671	488	108789	539639	431338	317372	108301	0,046	0,20
343442	18540	18,5	160	-96667	-96275	429252	329108	392	100144	525527	425775	325398	99752	0,050	0,19
275365	18540	14,9	150	-96667	-96358	415119	323821	310	91299	511477	420488	333081	90989	0,055	0,18
218121	18540	11,8	140	-96667	-96427	401092	318847	241	82245	497518	415514	340458	82004	0,061	0,16
170504	18540	9,2	130	-96667	-96484	387196	314224	183	72972	483680	410892	347565	72789	0,069	0,15
131367	18540	7,1	120	-96667	-96531	373457	309993	136	63464	469988	406660	354432	63328	0,079	0,13

(a)

Pa	Pb	PR	Tsat	H1	H2	H3	H4	Wb	Wt	Qh	Ql	Cl	Wliq	Vazão 5kW	Efic.
99622	18540	5,4	110	-96667	-96569	359896	306194	98	53702	456466	402861	361090	53604	0,093	0,12
74246	18540	4,0	100	-96667	-96600	346536	302874	67	43662	443136	399541	367565	43595	0,115	0,10
54287	18540	2,9	90	-96667	-96624	333396	300082	43	33314	430020	396750	373885	33270	0,150	0,08
38868	18540	2,1	80	-96667	-96643	320496	297876	25	22620	417139	394544	380073	22595	0,221	0,05
27190	18540	1,5	70	-96667	-96657	307854	296320	10	11534	404511	392988	386155	11523	0,434	0,03

(b)

Fonte: Autor

A.6 R141B

Tabela 21 - Lista das Propriedades do R141b

Pa (Pa)	Pb (Pa)	PR	Tsat °C	H1 (J/kg)	S1-2 (J/kg.k)	H2 (J/kg)	H3 (J/kg)	S 3-4 (J/kg.k)	H4 (J/kg)	Wb (J/kg)	Wt (J/kg)	Qh (J/kg)	Ql (J/kg)	Cl (J/kg)	Wliq (J/kg)	Vazão 5kW (kg/s)	Efic.
3770523	246209	15,3	204	269855	1230	272875	519690	1820	466442	3021	53248	246815	196587	21612	50227	0,10	0,20
3614217	246209	14,7	201	269855	1230	272742	532832	1849	476008	2887	56824	260090	206153	50032	53937	0,09	0,21
3064755	246209	12,4	190	269855	1230	272272	542478	1875	484737	2417	57741	270206	214882	86854	55324	0,09	0,20
2635560	246209	10,7	180	269855	1230	271905	542993	1882	487155	2050	55839	271088	217300	106043	53789	0,09	0,20
2255531	246209	9,2	170	269855	1230	271579	540984	1885	487949	1724	53035	269404	218094	120935	51311	0,10	0,19
1918819	246209	7,8	160	269855	1230	271291	537575	1884	487890	1436	49686	266285	218035	133391	48250	0,10	0,18
1621153	246209	6,6	150	269855	1230	271036	533262	1883	487323	1181	45939	262227	217468	144221	44759	0,11	0,17
1359055	246209	5,5	140	269855	1230	270811	528313	1880	486442	956	41871	257502	216587	153862	40915	0,12	0,16
1129504	246209	4,6	130	269855	1230	270614	522895	1877	485371	759	37523	252281	215516	162585	36765	0,14	0,15
929757	246209	3,8	120	269855	1230	270442	517120	1874	484201	587	32919	246677	214346	170570	32332	0,15	0,13
757257	246209	3,1	110	269855	1230	270294	511068	1870	483000	439	28068	240774	213145	177948	27629	0,18	0,11
609574	246209	2,5	100	269855	1230	270167	504801	1867	481826	312	22974	234634	211972	184818	22662	0,22	0,10
484379	246209	2,0	90	269855	1230	270060	498365	1863	480732	205	17633	228306	210877	191255	17429	0,29	0,08
379420	246209	1,5	80	269855	1230	269969	491799	1860	479764	115	12035	221830	209909	197321	11921	0,42	0,05
292524	246209	1,2	70	269855	1230	269895	485135	1858	478970	40	6165	215240	209115	203069	6125	0,82	0,03

Fonte: Autor

A.7 CICLO-PENTANO

Tabela 22 - Lista das Propriedades do Ciclo-Pentano

Pa (Pa)	Pb (Pa)	PR	Tsat °C	H1 (J/kg)	S1-2 (J/kg.k)	H2 (J/kg)	H3 (J/kg)	S 3-4 (J/kg.k)	H4 (J/kg)	Wb (J/kg)	Wt (J/kg)	Qh (J/kg)	Ql (J/kg)	Cl (J/kg)	Wliq (J/kg)	Vazão 5kW (kg/s)	Efic.
4536085	142364	31,9	238	21165	64	27385	553477	1276	425428	6220	128049	526092	404263	24019	0,041	121.829	0,23
4065114	142364	28,6	230	21165	64	26720	575416	1324	442452	5555	132964	548696	421287	97070	0,039	127.409	0,23
3534733	142364	24,8	220	21165	64	25970	580879	1343	449162	4805	131716	554908	427997	144797	0,039	126.911	0,23
3064427	142364	21,5	210	21165	64	25305	578675	1347	450780	4140	127894	553369	429615	178550	0,040	123.754	0,22
2692567	142364	18,9	201	21165	64	24779	573233	1345	449905	3614	123329	548454	428740	202227	0,042	119.714	0,22
2275785	142364	16,0	190	21165	64	24190	563588	1337	447020	3024	116568	539398	425855	227013	0,044	113.543	0,21
1946255	142364	13,7	180	21165	64	23723	553263	1327	443431	2558	109833	529541	422266	245979	0,047	107.275	0,20
1654242	142364	11,6	170	21165	64	23309	541914	1315	439303	2144	102611	518605	418138	262743	0,050	100.466	0,19
1396352	142364	9,8	160	21165	64	22944	529877	1303	434893	1779	94984	506933	413728	277820	0,054	93.205	0,18
1169618	142364	8,2	150	21165	64	22622	517383	1290	430383	1457	87000	494761	409218	291558	0,058	85.543	0,17
971372	142364	6,8	140	21165	64	22341	504596	1278	425907	1176	78689	482255	404742	304200	0,065	77.513	0,16
799160	142364	5,6	130	21165	64	22097	491638	1265	421576	932	70062	469541	400411	315925	0,072	69.130	0,15
650681	142364	4,6	120	21165	64	21886	478603	1253	417480	721	61123	456716	396315	326869	0,083	60.402	0,13
523758	142364	3,7	110	21165	64	21706	465564	1242	413699	541	51865	443858	392534	337139	0,097	51.324	0,12
416307	142364	2,9	100	21165	64	21554	452583	1232	410308	389	42275	431029	389143	346821	0,119	41.886	0,10
326326	142364	2,3	90	21165	64	21426	439709	1224	407380	261	32329	418283	386215	355986	0,156	32.068	0,08
251893	142364	1,8	80	21165	64	21321	426984	1216	404988	155	21996	405664	383823	364697	0,229	21.841	0,05
191161	142364	1,3	70	21165	64	21234	414445	1211	403208	69	11237	393211	382043	373005	0,448	11.168	0,03

Fonte: Autor