

ALINE JAUCH ANTÔNIO

**UM MODELO TERMODINÂMICO PARA ANÁLISE E SELEÇÃO DE UM FLUIDO
DE TRABALHO PARA UM CICLO RANKINE ORGÂNICO COM UM AQUECEDOR
DE FLUIDO DE ALIMENTAÇÃO FECHADO**

**Bauru
2020**

ALINE JAUCH ANTÔNIO

**UM MODELO TERMODINÂMICO PARA ANÁLISE E SELEÇÃO DE UM FLUIDO DE
TRABALHO PARA UM CICLO RANKINE ORGÂNICO COM UM AQUECEDOR DE
FLUIDO DE ALIMENTAÇÃO FECHADO**

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia da Unesp Campus de Bauru, para
obtenção do título de Mestre em Engenharia
Mecânica

Orientador(a): Professor Dr. Santiago del Rio
Oliveira

Bauru

2020

Antônio, Aline Jauch.

Um modelo termodinâmico para análise e seleção de um fluido de trabalho para um ciclo Rankine orgânico com um aquecedor de fluido de alimentação fechado / Aline Jauch Antônio, 2020

109 f. : il.

Orientador: Santiago del Rio Oliveira

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2020

1. Eficiência térmica. 2. Otimização de cenrais termoelétricas. 3. Trabalho líquido específico. 4. Regressão linear múltipla. 5. Método de seleção de fluidos. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE ALINE JAUCH ANTÔNIO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 02 dias do mês de dezembro do ano de 2020, às 14:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de ALINE JAUCH ANTÔNIO, intitulada **UM MODELO TERMODINÂMICO PARA ANÁLISE E SELEÇÃO DE UM FLUIDO DE TRABALHO PARA UM CICLO RANKINE ORGÂNICO COM UM AQUECEDOR DE FLUIDO DE ALIMENTAÇÃO FECHADO**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. SANTIAGO DEL RIO OLIVEIRA (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. ANTONIO LUIZ PACIFICO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Escola Politécnica - USP, Prof. Dr. DELSON LUIZ MODOLO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP. Após a exposição pela mestranda e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, a discente recebeu o conceito final: APROVADA. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. SANTIAGO DEL RIO OLIVEIRA



Aos meus pais, Ana e Rudinei,

e ao meu marido Douglas

dedico

AGRADECIMENTOS

Não tenho religião, mas creio muito em Deus, então agradeço a ele primeiramente, por ser o meu refúgio e fortaleza, ter me fortalecido e consolado em muitos momentos da minha vida e me guiado até onde me encontro hoje.

Ao meu marido Douglas, amor da minha vida, meu companheiro de todos os momentos, participou de todo processo, esteve sempre presente incentivando, apoiando e acreditando em minha capacidade de ir cada vez mais longe.

Aos meus pais Ana e Rudinei, que me ensinaram a ser uma pessoa íntegra, honesta e humilde. Se cheguei até aqui, foi sendo a pessoa que eles me ensinaram a ser.

As minhas irmãs Elisa e Jéssica, minhas pequenas, minhas caçulas, que amo como se fossem minhas filhas. Elas foram um dos motivos que me fizeram seguir em frente.

Ao meu orientador professor Dr. Santiago del Rio Oliveira, pelo ensinamentos, paciência e orientação.

Aos professores Dr. Vicente Luiz Scalon e Dr. Délon Luíz Modolo, que contribuíram de maneira significativa para o meu desenvolvimento.

À Universidade Estadual Paulista (UNESP) por ter proporcionado a oportunidade de desenvolver meu estudo amparada pelos melhores profissionais.

“Se o dinheiro for a sua esperança de independência, você jamais a terá. A única segurança verdadeira consiste numa reserva de sabedoria, de experiência e de competência.”

Henry Ford

RESUMO

O dióxido de carbono é um dos principais componentes dos gases de efeito estufa (GEE) e seu aumento traz diversas preocupações ao mundo. Por este motivo a redução dos GEE é um dos principais assuntos discutidos internacionalmente. Estas discussões vão desde a substituição dos combustíveis fósseis na geração de energia, até medidas para otimizar e tornar mais eficiente a geração e utilização da energia. A principal função dos engenheiros e cientistas, neste contexto, é desenvolver métodos alternativos de geração de energia de modo que nossa dependência por combustíveis fósseis seja cada vez menor. Um dos métodos para geração de energia elétrica é a partir de centrais termoelétricas, que são baseadas em ciclos de potência a vapor (Ciclo Rankine), onde a energia térmica é transformada em energia elétrica. Diante de todo contexto apresentado, o presente trabalho teve como objetivo estudar a eficiência térmica e o trabalho líquido específico de um ciclo Rankine utilizando um aquecedor de fluido de alimentação fechado, diferentes fluidos de trabalho orgânicos e três modelos de ciclo. O intuito foi encontrar os parâmetros de operação que proporcionavam os maiores valores de eficiência térmica e trabalho específico por fluido e modelo de ciclo, classificar os melhores fluidos por ciclo, e para estes classificados, descrever um modelo matemático para a eficiência térmica e trabalho líquido específico. Por fim, foi elaborado um método de seleção de fluido de trabalho a partir da eficiência térmica e do trabalho líquido específico. Este método é formado por uma matriz de seleção e as tabelas de desempenho dos principais fluidos (classificados como melhores). A matriz de seleção apresenta os melhores fluidos por faixa absoluta de operação (caldeira e regenerador) e as tabelas de desempenho apresentam todos os valores absolutos dos parâmetros, a combinação entre eles e os resultados de eficiência térmica e trabalho líquido específico. Os fluidos de trabalho utilizados são classificados como molhados, secos e isentrópicos. Entre os fluidos molhados o que apresentou melhor desempenho tanto para eficiência térmica quanto para trabalho líquido específico foi o metanol. Entre os fluidos secos o que apresentou melhor desempenho tanto para eficiência térmica quanto para trabalho líquido específico foi o R141b. E nos fluidos isentrópicos o que se destacou em relação a eficiência térmica foi o R113 e ao trabalho líquido específico foi o isopentano. O trabalho foi concluído com sucesso, pois todos os objetivos propostos foram alcançados. Este estudo se limita aos valores dos parâmetros utilizados, assim como, os fluidos de trabalho e modelos de ciclos.

Palavras-chave: *eficiência térmica, otimização de centrais termoelétricas, trabalho líquido específico, regressão linear múltipla, método de seleção de fluidos.*

ABSTRACT

Carbon dioxide is one of the main components of greenhouse gases (GHG) and its increase brings several concerns to the world. For this reason, the reduction of GHG is one of the main issues discussed internationally. These discussions range from replacing fossil fuels in power generation, to measures to optimize and make energy generation and use more efficient. The main function of engineers and scientists, in this context, is to develop alternative methods of generating energy so that our dependence on fossil fuels becomes less and less. One of the methods for generating electrical energy is from thermoelectric power plants, which are based on steam power cycles (Rankine Cycle), where thermal energy is transformed into electrical energy. In view of the context presented, the present study aimed to study the thermal efficiency and the specific network of a Rankine cycle using a closed feed fluid heater, different organic working fluids and three cycle models. The aim was to find the operating parameters that provided the highest values of thermal efficiency and specific work by fluid and cycle model, to classify the best fluids per cycle, and for those classified, to describe a mathematical model for thermal efficiency and specific network. Finally, a method for selecting working fluid based on thermal efficiency and specific liquid work was developed. This method is formed by a selection matrix and the performance tables of the main fluids (classified as best). The selection matrix presents the best fluids by absolute operating range (boiler and regenerator) and the performance tables show all the absolute values of the parameters, the combination between them and the results of thermal efficiency and specific network. The working fluids used are classified as wet, dry and isentropic. Among the wet fluids, the one that showed the best performance for both thermal efficiency and specific liquid work was methanol. Among the dry fluids, the one with the best performance for both thermal efficiency and specific liquid work was R141b. And in isentropic fluids, what stood out in relation to thermal efficiency was R113 and the specific liquid work was isopentane. The work was successfully completed, as all the proposed objectives were achieved. This study is limited to the values of the parameters used, as well as the working fluids and cycle models

Keywords: *thermal efficiency, optimization of thermoelectric plants, specific network, multiple linear regression, fluid selection method.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Fornecimento de energia elétrica em 2017.	26
Figura 1.2 – Central termoeleétrica com combustão externa.	28
Figura 2.1 – Ciclo Rankine Convencional.	32
Figura 2.2 – Ciclo Rankine regenerativo com aquecedor de água de alimentação aberto.	33
Figura 2.3 – Ciclo Rankine regenerativo com aquecedor de água de alimentação fechado.	34
Figura 2.4 – Classificação dos fluídos de trabalho.	36
Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia utilizada no estudo.	41
Figura 3.2 – Ciclo Rankine orgânico regenerativo com aquecedor de água de alimentação fechado.	42
Figura 3.3 – Modelos de ciclo.	44
Figura 3.4 – Variação dos parâmetros por ciclo.	45
Figura 3.5 – Combinação dos parâmetros no ciclo subcrítico.	47
Figura 3.6 – Combinação dos parâmetros nos ciclos subcrítico superaquecido e supercrítico.	47
Figura 3.7 - Obtenção das propriedades para determinar a eficiência térmica e o trabalho líquido específico dos ciclos subcrítico, subcrítico superaquecido e supercrítico	49
Figura 4.1 – Matriz de seleção do fluido de trabalho por faixa de operação de regeneração e evaporação do ciclo subcrítico com extração de 30%.	64
Figura 4.2 – Matriz de seleção do fluido de trabalho por faixa de operação de regeneração e evaporação do ciclo subcrítico com extração de 40%.	65
Figura 4.3 – Matriz de seleção do fluido de trabalho por faixa de operação de regeneração e evaporação do ciclo subcrítico com extração de 50%.	66

Figura 4.4 – Matriz de seleção do fluido de trabalho por faixa de operação de regeneração e evaporação do ciclo subcrítico superaquecido com extração de 30%.	67
Figura 4.5 – Matriz de seleção do fluido de trabalho por faixa de operação de regeneração e evaporação do ciclo subcrítico superaquecido com extração de 40%.	67
Figura 4.6 – Matriz de seleção do fluido de trabalho por faixa de operação de regeneração e evaporação do ciclo subcrítico superaquecido com extração de 50%.	68
Figura 4.7 – Matriz de seleção do fluido de trabalho por faixa de operação de regeneração e evaporação do ciclo supercrítico com extração de 30%.	69
Figura 4.8 – Matriz de seleção do fluido de trabalho por faixa de operação de regeneração e evaporação do ciclo supercrítico com extração de 40%.	69
Figura 4.9 – Matriz de seleção do fluido de trabalho por faixa de operação de regeneração e evaporação do ciclo supercrítico com extração de 50%.	70
Figura 4.10 – Matriz de seleção do fluido de trabalho por faixa de operação de regeneração e evaporação do ciclo subcrítico com extração de 30, 40 e 50%.	82
Figura 4.11 – Matriz de seleção do fluido de trabalho por faixa de operação de regeneração e evaporação do ciclo subcrítico superaquecido com extração de 30, 40 e 50%.	83
Figura 4.12 – Matriz de seleção do fluido de trabalho por faixa de operação de regeneração e evaporação do ciclo supercrítico com extração de 30%.	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Amplitude dos parâmetros de operação.	46
Tabela 3.2 – Fluidos de trabalhos.	48
Tabela 4.1 - Máxima eficiência térmica por ciclo e fluido.	52
Tabela 4.2 – Valores dos parâmetros utilizados para obtenção da máxima eficiência térmica do ciclo subcrítico.	54
Tabela 4.3 – Valores dos parâmetros utilizados para obtenção da máxima eficiência térmica do ciclo subcrítico superaquecido.	55
Tabela 4.4 – Valores dos parâmetros utilizados para obtenção da máxima eficiência térmica do ciclo supercrítico.	56
Tabela 4.5 – Fluidos que apresentaram melhor desempenho por ciclo.	57
Tabela 4.6 – Influência dos parâmetros de operação na eficiência térmica do ciclo subcrítico.	58
Tabela 4.7 – Influência dos parâmetros de operação na eficiência térmica do ciclo subcrítico superaquecido.	59
Tabela 4.8 – Influência dos parâmetros de operação na eficiência térmica do ciclo supercrítico.	59
Tabela 4.9 – Influência do agrupamento dos parâmetros no resultado da eficiência térmica do ciclo subcrítico.	60
Tabela 4.10 - Influência do agrupamento dos parâmetros no resultado da eficiência térmica do ciclo subcrítico superaquecido.	61
Tabela 4.11 - Influência do agrupamento dos parâmetros no resultado da eficiência térmica do ciclo supercrítico.	61
Tabela 4.12 – Tabela de desempenho do fluido de trabalho amônia	71
Tabela 4.13 – Máximo trabalho líquido específico por ciclo e fluido.	72

Tabela 4.14 – Valores dos parâmetros utilizados para obtenção do maior valor de trabalho líquido específico do ciclo subcrítico.	73
Tabela 4.15 – Valores dos parâmetros utilizados para obtenção do maior valor de trabalho líquido específico do ciclo subcrítico superaquecido.	74
Tabela 4.16 – Valores dos parâmetros utilizados para obtenção da máxima eficiência térmica do ciclo supercrítico.	75
Tabela 4.17 – Fluidos que apresentaram melhor desempenho por ciclo.	76
Tabela 4.18 – Influência dos parâmetros de operação no trabalho líquido específico do ciclo subcrítico.	77
Tabela 4.19 – Influência dos parâmetros de operação no trabalho líquido específico do ciclo subcrítico superaquecido.	77
Tabela 4.20 – Influência dos parâmetros de operação no trabalho líquido específico do ciclo supercrítico.	78
Tabela 4.21 – Influência do agrupamento dos parâmetros no resultado do trabalho líquido específico do ciclo subcrítico e modelo matemático correspondente.	79
Tabela 4.22 - Influência do agrupamento dos parâmetros no resultado do trabalho líquido específico do ciclo subcrítico superaquecido.	80
Tabela 4.23 - Influência do agrupamento dos parâmetros no resultado do trabalho líquido específico do ciclo supercrítico.	80
Tabela 4.24 – Tabela de desempenho do fluido de trabalho amônia	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAAA	Aquecedor de água de alimentação aberto
AAAF	Aquecedor de água de alimentação fechado
CO ₂	Dióxido de carbono
EES	Engineering Equation Solver
FOM	Figure of merit (Figura de mérito)
GWP	Global warming potential (Potencial de aquecimento global)
GEE	Gases de efeito estufa
ODP	Ozone depletion potential (Potencial de depleção de ozônio)
ORC	Organic Rankine cycle (Ciclo Rankine orgânico)
RORC	Regenerative organic Rankine cycle (Ciclo Rankine orgânico regenerativo)
SORC	Solar organic Rankine cycle (Ciclo Rankine orgânico solar)

LISTA DE SÍMBOLOS

h_i	Entalpia específica do estado i, [kJ/kg]
s_i	Entropia específica do estado i, [kJ/(kg.K)]
T_i	Temperatura do estado i, [C]
p_i	Pressão do estado i, [kPa]
T_r	Temperatura adimensional
P_r	Pressão adimensional
$T_{r, cald}$	Temperatura adimensional de evaporação
$P_{r, cald}$	Pressão adimensional de evaporação
$P_{r, reg}$	Pressão adimensional de regeneração
T_{max}	Temperatura máxima de operação, [K]
P_{max}	Pressão máxima de operação, [kPa]
T_{cr}	Temperatura crítica do fluido, [K]
P_{cr}	Pressão crítica do fluido, [kPa]
$q_{entrada}$	Calor específico de Entrada [kJ/kg]
w_{ciclo}	Trabalho líquido específico do ciclo [kJ/kg]
w_t	Trabalho específico da turbina [kJ/kg]
w_b	Trabalho específico da bomba [kJ/kg]
η	Eficiência térmica do ciclo, [%]
η_t	Eficiência isentrópica da turbina, [%]
η_b	Eficiência isentrópica da bomba, [%]
x	Título, [adimensional]
y	Fração de extração na turbina, [adimensional]
DP	Diferença entre a pressão do regenerador e da caldeira

Índices

- 1 Estado 1 – Saída da caldeira e entrada da turbina
- 2 Estado 2 – Saída do 1º estágio da turbina e entrada 1 do AAAF
- 3 Estado 3 – Saída do 2º estágio da turbina e entrada do condensador
- 4 Estado 4 – Saída do condensador e entrada da bomba
- 5 Estado 5 – Saída da bomba e entrada 2 do AAAF
- 6 Estado 6 – Saída do AAAF e entrada da caldeira

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	25
1.1 Energia, meio ambiente e sustentabilidade.	25
1.2 Geração de energia elétrica	26
1.3 Ciclo de potência a vapor	27
1.4 Justificativa.	29
1.5 Objetivos.	29
1.5.1 Objetivos gerais.	29
1.5.2 Objetivos específicos.	30
1.6 Motivação para a pesquisa e particularidades	30
2. REVISÃO DE LITERATURA	32
2.1 Ciclo Rankine convencional	32
2.2 Ciclo Rankine regenerativo	33
2.3 Ciclo Rankine orgânico	34
2.3.1 Análise termodinâmica o ciclo Rankine orgânico	35
2.3.2 Seleção de fluidos de trabalho	38
3. METODOLOGIA	41
3.1 Aplicação da 1ª lei da termodinâmica para volume de controle	41
3.2 Modelos de ciclo analisados	43
3.3 Parâmetros de operação	44
3.3.1 Amplitude dos parâmetros	45
3.3.2 Combinação dos parâmetros de operação	46
3.4 Fluidos de trabalho	47
3.5 Simulação da eficiência térmica e trabalho líquido específico dos ciclos.	48
3.6 Análise de desempenho dos fluidos de trabalho e desenvolvimento dos modelos matemáticos	49
3.7 Desenvolvimento do método de seleção de fluido de trabalho	50
3.7.1 Matriz de seleção	50
3.7.2 Tabela de desempenho	51

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
4.1 Eficiência térmica	52
4.1.1 Parâmetros de influência nos resultados da eficiência térmica de cada ciclo	56
4.1.2 Agrupamento dos parâmetros relevantes e desenvolvimento de modelos matemáticos	60
4.1.3 Método para seleção de fluido de trabalho	63
4.1.3.1 Seleção do fluido de trabalho a partir da eficiência térmica do ciclo	63
4.1.3.2 Tabela de desempenho por fluido de trabalho	70
4.2 Trabalho líquido específico	71
4.2.1 Parâmetros de influência nos resultados do trabalho líquido específico de cada ciclo	76
4.2.2 Agrupamento dos parâmetros relevantes e desenvolvimento de modelos matemáticos do trabalho líquido específico	78
4.2.3 Método para seleção de fluido de trabalho	81
4.2.3.1 Seleção do fluido de trabalho a partir do trabalho líquido específico do ciclo	81
4.2.3.2 Tabela de desempenho por fluido de trabalho	84
5. CONCLUSÕES E EXTENSÕES FUTURAS	86
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
7. ANEXOS	
7.1 Anexo A	90
7.2 Anexo B	101

1. INTRODUÇÃO

1.1 Energia, meio ambiente e sustentabilidade

A energia vem sendo utilizada pelo homem desde o início de sua existência. A princípio, o objetivo era satisfazer suas necessidades básicas, como alimentação, iluminação noturna e aquecimento. Com o passar do tempo, o homem descobriu que a energia podia ser armazenada, transmitida e transformada, proporcionando assim maior nível de conforto e otimização de tarefas. Antes da primeira revolução industrial, eram utilizadas como fontes primárias de energia: a madeira, a água e o vento. A partir da primeira revolução industrial, a demanda por energia aumentou significativamente e com isto surgiu a necessidade de se obter fontes primárias de energia que tivessem uma maior densidade energética. A partir deste período começa a utilização do carvão mineral, petróleo, gás natural e energia nuclear como fontes de energia (Farias e Sellitto, 2011).

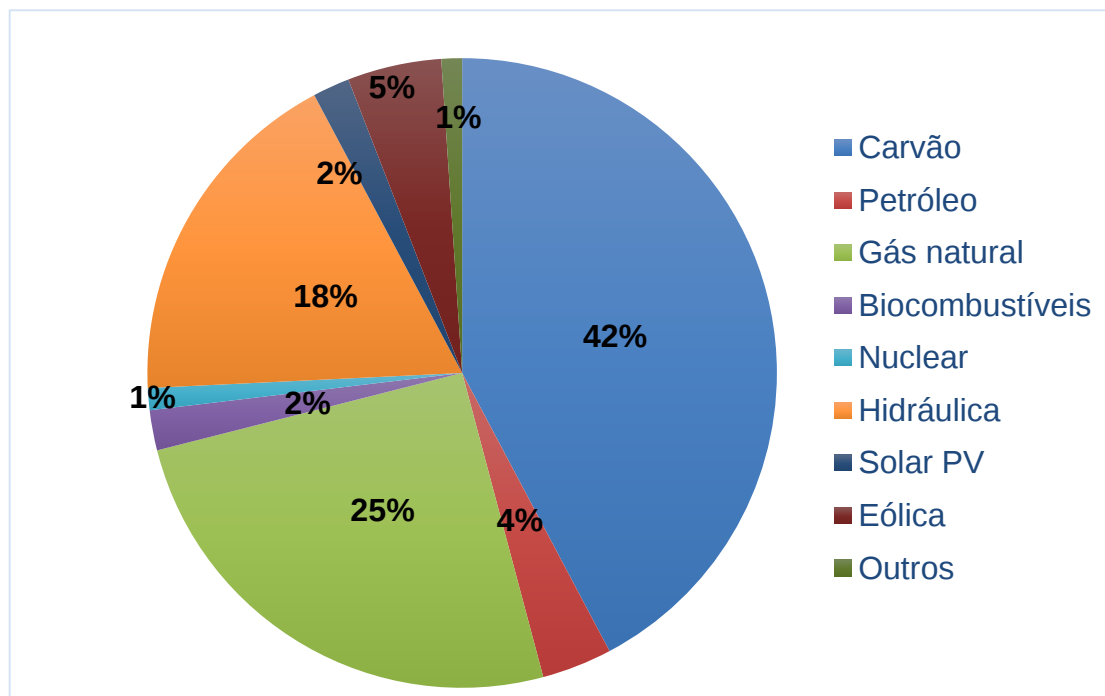
Segundo Reis (2011, p.3), as fontes primárias de energia podem ser classificadas como renováveis e não renováveis. As renováveis são fontes que se renovam com uma velocidade maior do que são gastas, como por exemplo: águas dos rios, mares, sol, vento e biomassas. As não renováveis são aquelas que demoram muito tempo para se renovar, ou seja, são passíveis de esgotamento antes que sejam renovadas, como o petróleo, carvão mineral, gás natural, fontes geotérmicas e combustíveis radioativos.

Silva *et al.* (2003) citam que todas as atividades humanas provocam muitos impactos no meio ambiente, sendo a extração, manuseio, geração e a utilização de energias responsáveis por boa parte destes impactos. A expressiva participação das fontes de energias não renováveis na matriz energética mundial é o principal causador destes impactos. Estas fontes emitem enormes quantidades de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera, sendo que em 2017, este nível atingiu aproximadamente 33 bilhões de toneladas, segundo a International Energy Agency.

O dióxido de carbono (CO₂) é um dos principais componentes dos gases de efeito estufa (GEE) e seu aumento traz diversas preocupações ao mundo. Por este motivo a redução dos GEE é um dos principais assuntos discutidos internacionalmente (Rio-92, Kioto-97 e acordo de Paris). Estes acordos discutem ações para reduzir as emissões dos GEE, ações estas, que vão desde a substituição dos combustíveis fósseis na geração de energia, até medidas para otimizar e tornar mais eficiente a sua geração e utilização (Silva *et al.*, 2003).

Entende-se por sustentável algo que se sustenta, que não acaba. Neste contexto, sustentáveis são sistemas que dependem de recursos que podem ser reabastecidos. Segundo Kroos e Potter (2016) qualquer sistema que dependa de recursos limitados são insustentáveis. Energia sustentável é essencial para a vida do ser humano, visto que sem energia, não existe economia. A principal função dos engenheiros e cientistas, neste contexto, é desenvolver métodos alternativos de geração de energia de modo que nossa dependência por combustíveis fósseis seja cada vez menor. Na Fig. 1.1 pode-se observar a dependência de combustíveis fósseis, nos dias atuais, para geração de energia elétrica (cerca de 72%):

Figura 1.1 – Fornecimento de energia elétrica em 2017. Fonte: Adaptado de International Energy Agency.



1.2 Geração de energia elétrica

Reis (2011) menciona que existem basicamente 4 formas de se transformar energia de diversas fontes em energia elétrica:

- Trabalho resultante da energia mecânica, através de turbinas hidráulicas e eólicas (fontes: quedas d'água, mares e ventos);
- Energia solar, através das células fotovoltaicas;
- Calor gerado a partir do sol, combustão, fissão nuclear ou geotérmica, através da aplicação de máquinas térmicas;

- Trabalho resultante de reações químicas, através de células a combustível.

O autor ainda cita que a maior fonte de energia elétrica no Brasil é a hidrelétrica, e que assim será por longos anos devido a disponibilidade ainda existente no país. No entanto, deve-se observar não só a disponibilidade deste recurso, mas também as restrições ambientais as quais os projetos estão sujeitos, pois existem impactos ambientais provenientes do alagamento necessário para instalação destas usinas. Pode-se citar também, a geração de energia elétrica através das termoelétricas, a oferta de energia vinda deste modo de geração tende a aumentar futuramente, pois existe a preocupação em garantir seu suprimento, visto que em 2001 houve necessidade de racionamento, quando cerca de 90% da energia era fornecida pelas hidrelétricas, este fato repercutiu negativamente na economia, sociedade e política.

A energia termoelétrica pode ser obtida a partir de fontes renováveis e não renováveis descreve Reis (2011). São exemplos de termoelétricas que utilizam fontes não renováveis as centrais nucleares, a gás, a vapor e as a motor (na maioria ciclo diesel). Dentre as termoelétricas movidas a combustíveis de fontes renováveis, pode-se citar as centrais à vapor que utilizam a biomassa como combustível. As termoelétricas são classificadas através do tipo de combustão utilizada, combustão externa e interna. Na combustão interna, o combustível entra em contato com o fluido de trabalho, já na combustão externa não há contato entre o fluido de trabalho e o combustível.

As termoelétricas com combustão externa que utilizam biomassa como combustível, além da energia elétrica, aproveitam o vapor para suprir a necessidade de alguns processos produtivos, esses sistemas são chamados de sistemas de cogeração, pois além da energia elétrica, produzem também energia térmica. Pode-se citar como exemplo as usinas de açúcar e álcool, que possuem sistemas de cogeração a partir do bagaço e palha da cana (biomassa). Segundo Souza e Azevedo (2006) as usinas produzem energia elétrica que suprem cerca de 98% da sua necessidade total. Afirmam ainda que a energia elétrica gerada pelo setor está muito aquém do seu potencial. Reis (2011) ressalta que existem usinas de açúcar e álcool que já estão vendendo a energia elétrica excedente para o sistema.

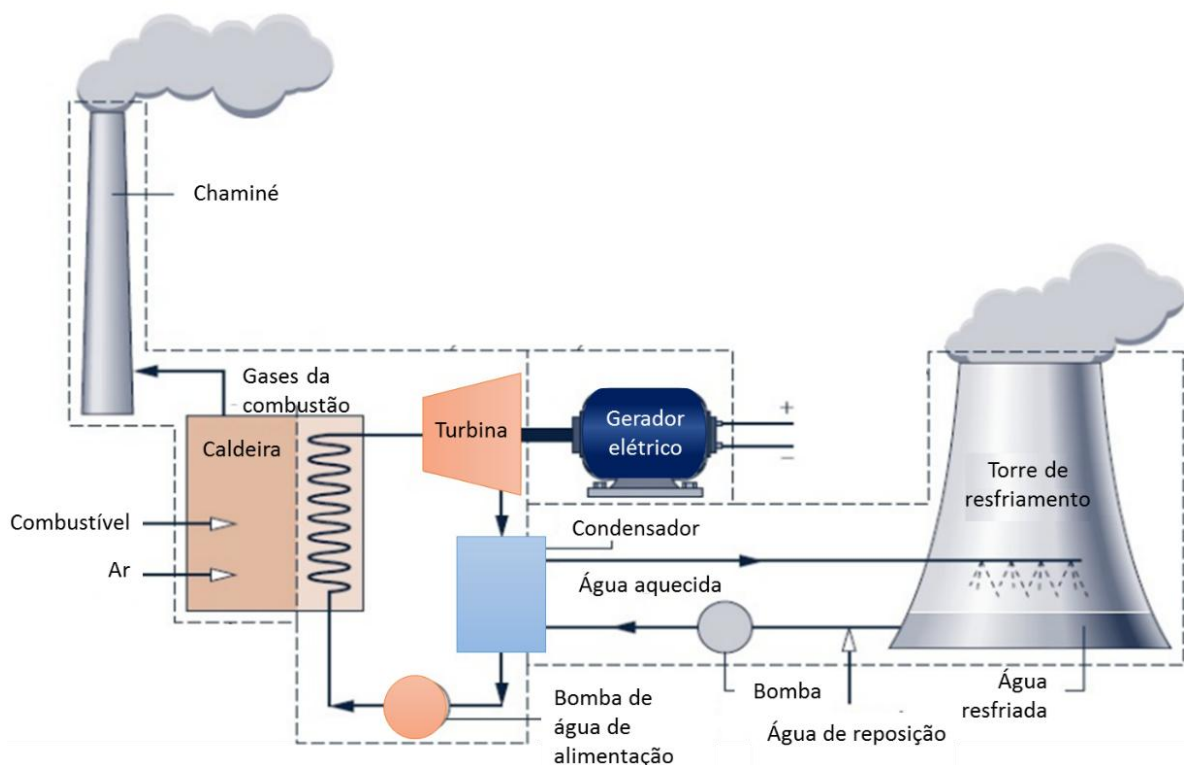
1.3 Ciclo de potência a vapor

As centrais termoelétricas com combustão externa funcionam baseadas nos ciclos de potência a vapor. Estes ciclos têm como finalidade transformar energia térmica em elétrica, através da expansão do vapor por uma turbina que aciona um gerador elétrico,

explica Reis (2011). A Fig. 1.2 apresenta o esquema de uma termoeletrica de combustão externa. Através da queima do combustível, o fluido de trabalho é transformado em vapor (caldeira). O vapor sofre expansão na turbina, que aciona o gerador elétrico. Após a expansão o vapor é condensado e bombeado para a caldeira onde é aquecido até se transformar em vapor novamente, completando desta forma o ciclo. Existe uma grande variedade na geração termoeletrica das usinas de potência a vapor, e isto está relacionado a gama de combustíveis que pode ser utilizado nestes sistemas. Para gerar calor, as usinas podem utilizar basicamente 5 tipos de combustíveis:

- Carvão mineral (não renovável);
- Nuclear (não renovável);
- Biomassa (renovável);
- Geotérmica (renovável);
- Solar (renovável).

Figura 1.2 – Central termoeletrica com combustão externa. Fonte: Moran; *et al.*, 2018.



Todas as usinas de potência a vapor apresentadas acima, trabalham com um ciclo termodinâmico denominado Rankine. Segundo Moran *et al.* (2018), o ciclo Rankine é a estrutura básica das usinas de potência a vapor.

1.4 Justificativa

Atualmente, diversos sistemas de potência a vapor são operacionalizados com base no ciclo Rankine convencional. No que se refere ao aspecto técnico, o ciclo Rankine convencional, utiliza a água como fluido de trabalho, sendo assim, é requerida uma quantidade considerável de energia térmica para a geração de energia elétrica. Em um contexto técnico-econômico, podemos citar o impacto causado pelo fluido de trabalho convencional (água) nos componentes do sistema (principalmente na turbina), promovendo elevados níveis de deterioração e subsequente manutenção.

Considerando os aspectos técnicos e econômicos acima descritos, observa-se a necessidade de aprimoramento dos modelos térmicos convencionais utilizados, cuja operação se baseia no ciclo Rankine, principalmente no que se refere a otimização dos parâmetros e à seleção do fluido de trabalho. Muito embora os modelos que operam em ciclo Rankine orgânico (ORC) demonstrem significativa vantagem em relação aos aspectos técnico e técnico-econômico, ainda há carência de pesquisas relacionadas à seleção de fluidos e ao comportamento da eficiência térmica do ciclo e do trabalho líquido em relação os parâmetros de operação. O intuito desse trabalho é selecionar os parâmetros relevantes para as variáveis pré-definidas, simular diversos níveis de operação para estes e avaliar os resultados obtidos a partir das interações, tornando possível a obtenção de dados experimentais que conduzem à maior eficiência térmica em sistemas ORC. Com base nos resultados obtidos, tornar-se-á possível a seleção da combinação adequada entre fluido e parâmetros de trabalho.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivos gerais

Este estudo tem por objetivo geral realizar uma análise termodinâmica no ciclo Rankine orgânico com aquecedor de fluido de alimentação fechado e a otimização de seus parâmetros de operação, visando a obtenção da maior eficiência térmica para sistemas que operam com base neste ciclo. Em busca do resultado desejado, o estudo será conduzido com base na interação entre as variáveis presentes nos processos (pressão, temperatura, extração e fluido de trabalho) e na variação destas.

1.5.2 Objetivos específicos

- Realizar uma análise termodinâmica em um ciclo Rankine orgânico com aquecedor de fluido de alimentação fechado operando em três modelos distintos: subcrítico, subcrítico superaquecido e supercrítico, através da aplicação das leis clássicas da termodinâmica, a fim de, obter expressões que descrevam a eficiência térmica do ciclo e o trabalho líquido específico;
- Definir os valores dos parâmetros de operação para os dispositivos do ciclo;
- Simular e analisar o desempenho de cada fluido de trabalho sob diversas condições de operação, utilizando as expressões da eficiência térmica do ciclo e do trabalho líquido específico.
- Demonstrar os valores dos parâmetros de operação que proporcionam o melhor desempenho para cada modelo de ciclo e para cada tipo de fluido.
- Selecionar os três melhores fluidos de trabalho por tipo (molhado, seco e isentrópico) e por modelo de ciclo (subcrítico, subcrítico superaquecido e supercrítico) através do desempenho apresentado.
- Através da correlação linear de Pearson e do coeficiente de determinação, analisar os parâmetros de operação que apresentam maior influência no desempenho (eficiência térmica do ciclo e trabalho líquido específico) dos fluidos de trabalho selecionados no item anterior.
- Utilizando regressão linear múltipla, elaborar um modelo matemático que descreva o comportamento da eficiência térmica do ciclo e do trabalho líquido específico para cada fluido de trabalho que apresentar melhor desempenho.
- Para validar os modelos matemáticos obtidos através da regressão linear múltipla, calcular o erro médio absoluto da eficiência térmica do ciclo e do trabalho líquido específico.
- Elaborar uma tabela para seleção de fluido de trabalho, compilando os parâmetros de operação que proporcionam os melhores resultados para cada modelo de ciclo e os modelos matemáticos desenvolvidos.

1.6 Motivação para a pesquisa e particularidades

O presente estudo foi motivado pela necessidade de se obter sistemas de geração de energia cada vez mais eficientes utilizando menos recursos energéticos. A crescente demanda por energia faz com que seja necessário o aumento de pesquisas destinadas a

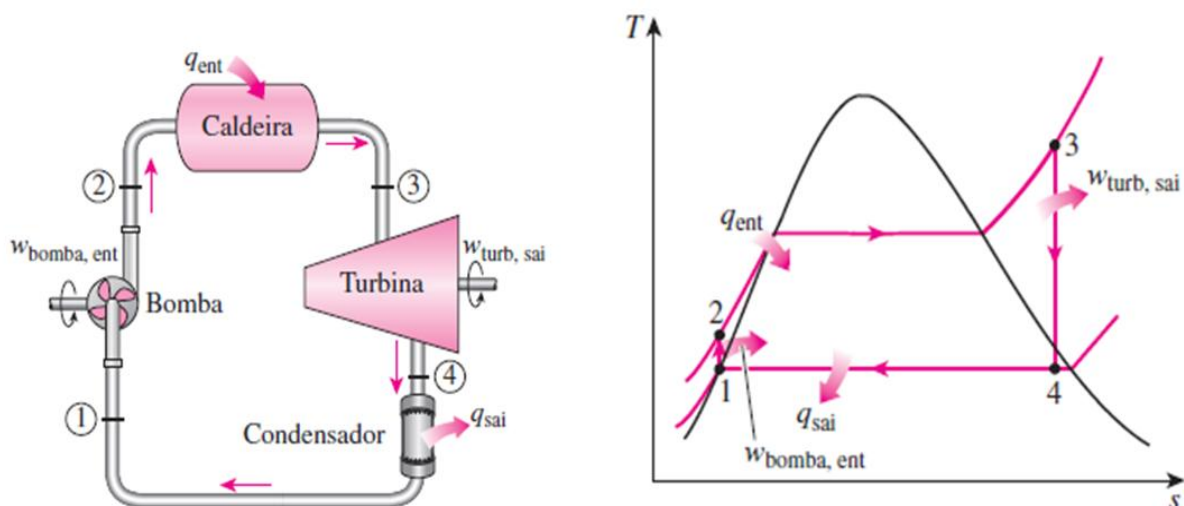
este assunto. O trabalho em questão abordará a seleção do fluido de trabalho e os parâmetros de operação, visando a obtenção da maior eficiência térmica e trabalho líquido específico possível em cada um dos ciclos abordados.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Ciclo Rankine convencional

Kroos e Potter (2016) descrevem o ciclo Rankine como um ciclo que tem por finalidade produzir energia elétrica a partir da energia térmica. Conforme a Fig. 2.1 pode-se notar que este ciclo é composto por quatro componentes, sendo eles: caldeira (evaporador), turbina a vapor, condensador e bomba de água. A caldeira é o componente que tem a função de transferir calor ao fluido de trabalho que se encontra na fase líquido comprimido, até que o fluido se transforme em vapor superaquecido. O calor da caldeira pode ser produzido por diversos tipos de combustíveis. Este calor é transferido para os tubos onde se desloca o fluido de trabalho. Conforme o fluido se desloca pelos tubos, absorve o calor gerado pelo combustível. Este processo acontece a uma pressão constante. O vapor passa pela turbina a vapor movimentando as pás do rotor e desta maneira produz a energia mecânica que é utilizada para gerar energia elétrica a partir do gerador. O fluido de trabalho entra na turbina na fase de vapor superaquecido a altas temperaturas e sai com uma temperatura menor em fase de vapor superaquecido ou mistura saturada. Após a expansão da turbina é necessário condensar o fluido de trabalho até que se torne novamente líquido comprimido, o componente responsável por este processo é o condensador. E para retomar o ciclo tem-se a bomba que possui a função de conduzir o fluido de trabalho que se encontra na fase líquido comprimido para a caldeira.

Figura 2.1 – Ciclo Rankine Convencional. Fonte: Çengel e Boles 2013.

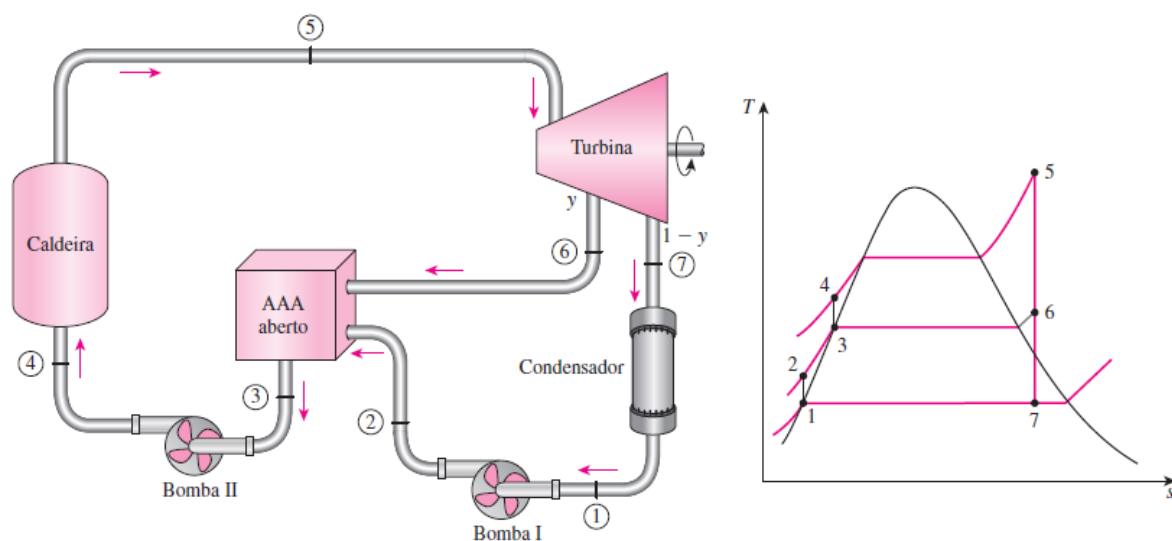


2.2 Ciclo Rankine regenerativo

Como citado anteriormente, a necessidade é otimizar e tornar mais eficiente a geração de energia, ou seja, necessita-se de sistemas que sejam capazes de produzir energia (trabalho) utilizando o mínimo possível de recurso energético (calor de entrada). Existe basicamente três maneiras de se elevar a eficiência térmica do ciclo Rankine segundo Kroos e Potter (2016), aumentando a temperatura do vapor que entra na turbina, reduzindo a pressão de operação do condensador ou aumentando a entalpia da saída da caldeira através da elevação de sua pressão de operação. Sendo assim o ciclo Rankine pode ser modificado considerando o conceito descrito acima, a fim de promover o aumento da eficiência térmica do ciclo.

Moran *et al.* (2018), Kroos e Potter (2016), Çengel e Boles (2013), entre outros autores citam duas modificações que podem ser incorporadas no ciclo para melhorar seu desempenho, o reaquecimento e o superaquecimento. O reaquecimento é realizado através de um dispositivo chamado reaquecedor, sua principal função é reaquecer o fluido de trabalho após a expansão pela turbina de alta pressão. Outra modificação é o superaquecimento que é realizado por um dispositivo denominado aquecedor de água de alimentação. A função do aquecedor de água de alimentação é reduzir a necessidade de energia térmica (calor de entrada) para transformação do fluido de trabalho em vapor.

Figura 2.2 – Ciclo Rankine regenerativo com aquecedor de água de alimentação aberto. Fonte: Çengel e Boles 2013.

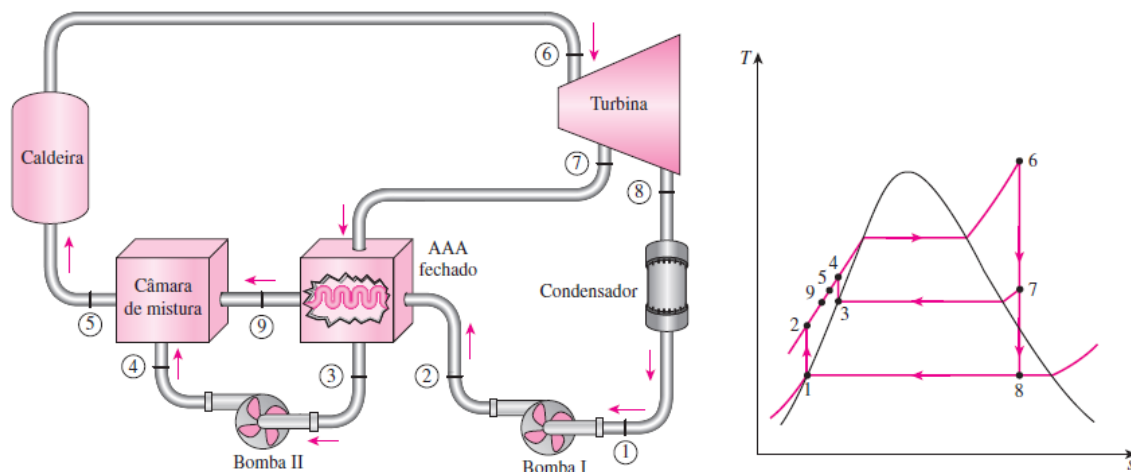


Existem dois tipos de aquecedor de água de alimentação: o aberto e o fechado. O aquecedor de água de alimentação aberto (AAAA) é um trocador de calor no qual há mistura

do fluido de trabalho com diferentes temperaturas (extração do primeiro estágio da turbina e saída do condensador), conforme a Fig. 2.2:

O aquecedor de água de alimentação fechado (AAAF) também é um trocador de calor, mas não há mistura (contato) entre o fluido de trabalho em diferentes temperaturas, conforme a Fig. 2.3. O fluido de trabalho é extraído no primeiro estágio da turbina, este é direcionado para o AAAF onde é utilizado como fonte de calor para aquecer o fluido que sai do condensador. Esse aquecimento promove o aumento da eficiência térmica do ciclo quando comparado com um ciclo sem esta modificação.

Figura 2.3 – Ciclo Rankine regenerativo com aquecedor de água de alimentação fechado. Fonte: Çengel e Boles 2013.



2.3 Ciclo Rankine orgânico

Dentre os sistemas convencionais de potência a vapor, existem diversas oportunidades de melhoria no que se refere ao aspecto ambiental e também em relação à eficiência térmica do ciclo termodinâmico. Considerado um meio confiável de produção energética, Lecompte *et al.* (2015) descrevem o ciclo Rankine orgânico (ORC) como uma tecnologia que permite a conversão de energia térmica em eletricidade a partir de baixas temperaturas, obtidas a partir da queima de combustíveis através de um sistema de aquecimento. Sua principal característica, que o diferencia de sistemas baseados no ciclo Rankine convencional, é a utilização de um fluido de trabalho orgânico, em substituição à água. Neste sistema, este fluido é aquecido e seu vapor utilizado como fonte motriz da turbomáquina (turbina) responsável pela produção de energia elétrica.

A utilização de um fluido de trabalho alternativo (orgânico) permite a conversão de calor em eletricidade a partir de temperaturas inferiores ao ciclo Rankine convencional. Isto ocorre em função do ponto de ebulição destes fluidos, que, em geral, são inferiores ao ponto de ebulição da água. Logo, uma fonte de calor de menor complexidade e custo é requerida para início do ciclo termodinâmico, muito embora a seleção do fluido também dependa da qualidade desta fonte de calor (Descher e Bruggemann, 2007). Rayegan e Tao (2011) citam que a adequada seleção de um fluido de trabalho para um sistema ORC, considerando a fonte de calor e as dimensões da planta, pode apresentar vantagens significativas ao sistema, tais como o aumento da eficiência em turbo máquinas (turbinas), redução da manutenção (diminuição da deterioração de máquinas e equipamentos) e melhoria do desempenho, principalmente para temperaturas até 400°C e energia de saída inferiores à 20MW.

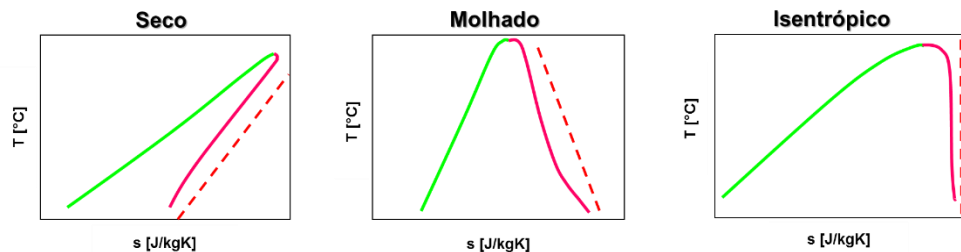
2.3.1 Análise termodinâmica do ciclo Rankine orgânico

Mago *et al.* (2008) apresentaram a classificação dos fluidos orgânicos em função de sua curva de saturação no diagrama T - s , conforme ilustrado na Fig. 2.4. Fluidos classificados como secos apresentaram uma curvatura positiva, enquanto os fluidos molhados demonstraram curva negativa. Para os fluidos isentrópicos, a curvatura do diagrama apresentou formato que tende ao infinito. Os autores ainda afirmaram que fluidos classificados como secos e isentrópicos apresentaram eficiências térmicas superiores aos valores obtidos por ciclos operando com fluidos molhados, tendo em vista que estes fluidos não sofrem condensação após sua expansão no volume de controle turbina. Além disso, os autores verificaram a influência da pressão de entrada da turbina na eficiência térmica do ciclo, mantendo constante a temperatura de entrada deste volume de controle (no ponto de saturação de cada fluido).

Javanshir e Sarunac (2017) citam que os fluidos de trabalho são classificados de acordo com a inclinação da curva do vapor saturado no diagrama T - s . A classificação é dividida em três: fluidos secos, molhados e isentrópicos, na Fig. 2.4 estão esboçados os diagramas T - s dos três tipos de fluidos. O primeiro diagrama é referente ao fluido de trabalho classificado como seco, pode-se notar que na saída da turbina o fluido de trabalho está na fase vapor superaquecido, ou seja, não há presença de umidade (título), este fato é o que atribui nome a esta classificação, o fluido se encontra seco neste estado. O segundo diagrama representa o fluido classificado como molhado, considerando a mesma sistemática adotada anteriormente, na saída da turbina pode-se notar que o fluido de

trabalho está dentro do domo de vapor, sendo assim, apresenta umidade (título), este é o fato que atribui nome a este tipo de fluido. E por fim, o fluido classificado como isentrópico apresenta a curva de vapor saturado como uma reta infinita, ou seja, não há variação significativa de entropia.

Figura 2.4 – Classificação dos fluidos de trabalho. Fonte: Adaptado de Javanshir e Sarunac 2017.



Os fluidos considerados no estudo foram o R113, R123, R245ca e o isobutano. Os resultados foram esboçados por meio de uma comparação entre o ciclo Rankine orgânico básico (ORC) e o ciclo Rankine orgânico regenerativo (RORC). Os resultados ainda demonstraram uma proporcionalidade direta entre a pressão de entrada da turbina e a eficiência térmica do ciclo, para todos os fluidos considerados no estudo, tendo em vista que o aumento da referida variável de entrada eleva o trabalho do ciclo e o calor de entrada (evaporador). Os autores também afirmam que os resultados podem ser utilizados para analisar a influência da temperatura de ebulição na eficiência térmica do ciclo, considerando que o fluido com melhor desempenho térmico, para ambos os ciclos, foi o R113, cuja temperatura de ebulição é a maior dentre os fluidos selecionados para o estudo. Por outro lado, o fluido com pior desempenho térmico (Isobutano) é aquele com o menor valor de temperatura de ebulição. As eficiências isentrópicas consideradas para as turbinas foram de 80% (ORC) e 85% (RORC).

Bertrand *et al.* (2009) desenvolveram em seu trabalho um modelo para seleção de fluidos para sistemas ORC com fonte de calor solar (SORC). Os autores também destacam a influência da pressão de entrada da turbina na eficiência térmica do ciclo, mencionando uma proporcionalidade direta entre estas.

Drescher e Bruggmann (2007) sugeriram que há dois parâmetros que devem ser considerados como relevantes no estudo de ciclos ORC – a eficiência térmica do ciclo e a eficiência do calor reaproveitado do ciclo, muito embora esta última seja difícil de mensurar, afirmam. Os autores realizaram uma análise termodinâmica de um ORC, expressando a eficiência térmica deste ciclo em função dos valores máximos de operação (pressão e temperatura) e da temperatura de evaporação dos fluidos. Os resultados demonstraram

uma proporcionalidade direta entre a eficiência térmica do ciclo e a temperatura de evaporação.

Lakew e Bolland (2010) desenvolveram um estudo onde, através dos modelos termodinâmicos convencionais, os resultados do trabalho líquido do ciclo foram escritos em função da pressão de entrada da fonte de calor, para diversas temperaturas do evaporador. O estudo considerou a comparação entre os resultados de seis fluidos de trabalho orgânicos. Através da análise dos resultados, os autores concluíram que, com o aumento da pressão de entrada (fonte de calor), a vazão mássica diminui e a entalpia na entrada da turbina aumenta, fazendo com que o trabalho do ciclo aumente, tendo em vista que este pode ser escrito como uma função das variáveis descritas.

Segundo Lakew e Bolland (2010), há um valor ótimo de pressão para obtenção do máximo trabalho líquido do ciclo, entretanto, este valor de pressão não resulta na máxima eficiência térmica. Os autores citaram que há um aumento da eficiência térmica do ciclo com o aumento da pressão, entretanto, para valores elevados desta variável, o fluido carrega menor quantidade de energia térmica, produzindo menos energia na saída, porém, com eficiências térmicas mais altas.

Javanshir e Sarunac (2017) direcionaram seu trabalho sobre o ciclo Rankine orgânico (ORC) a partir de parâmetros denominados adimensionais. Estes parâmetros referem-se à percentuais dos valores críticos de operação dos fluidos de trabalho. Desta forma, os valores de operação pressão e temperatura de cada fluido de trabalho são calculados em função de diversos percentuais previamente estabelecidos. Os autores descreveram, matematicamente, a variável adimensional como a razão entre o valor máximo e o valor crítico desta propriedade, seja ela pressão ou temperatura. Foram realizadas análises termodinâmicas dos ciclos subcrítico, subcrítico com superaquecimento e supercrítico com base na simulação matemática dos valores de trabalho líquido específico e eficiência térmica do ciclo em função de diversas pressões adimensionais e temperaturas adimensionais sugeridas para o volume de controle evaporador. Os resultados apresentados pelos autores demonstraram que os fluidos isentrópicos são capazes de promover maiores eficiências térmicas quando comparados com os fluidos secos e molhados. Os autores também descreveram a ocorrência de uma proporcionalidade inversa entre a eficiência térmica do ciclo e a temperatura de entrada da turbina, para sistemas operando com fluidos secos.

Imran *et al.* (2014) afirmam a ocorrência de uma proporcionalidade direta entre os valores de eficiência térmica do ciclo e a pressão de evaporação em um sistema operando sob o ciclo Rankine orgânico regenerativo simples. Os autores simularam os valores resultantes

para a eficiência térmica do ciclo através da razão entre trabalho líquido de ciclo e calor de entrada do sistema.

2.3.2 Seleção de fluidos de trabalho

Javanshir e Sarunac (2017) estabeleceram, como ponto de partida de seu trabalho, uma pré-seleção de fluidos orgânicos para a análise termodinâmica. Mago *et al.* (2008) afirmaram que a seleção de fluidos de trabalho em um ciclo Rankine orgânico (ORC) é fundamental para a obtenção de eficiências térmicas elevadas. Os autores compararam a importância desta variável com a utilização ótima da fonte de calor disponível para um sistema de potência a vapor.

Segundo Chen, Goswami e Stefanakos (2010), os fluidos podem ser avaliados por suas propriedades físicas e termodinâmicas, sua estabilidade e compatibilidade, impactos ambientais, segurança, disponibilidade e custos. Os autores afirmaram que a temperatura crítica é uma propriedade importante a ser considerada na seleção de fluidos de trabalho. Além desta, os autores também destacaram a temperatura de congelamento (que não deve ser inferior à menor temperatura de operação do ciclo) e os limites de pressão (valores muito altos ou grandes vácuos tendem a afetar a confiabilidade do sistema e elevar custos operacionais).

Segundo Drescher e Bruggmann (2007), diversos parâmetros podem ser utilizados como critério para cálculo da eficiência térmica de ciclo e respectiva seleção de fluidos, entretanto, os autores ressaltam que os principais são a temperatura máxima (entrada da turbina) e temperatura mínima (condensador). Lakew e Booland (2010) afirmaram que a seleção de fluidos de trabalho para um ORC depende do tipo da fonte de calor, do nível de temperatura e do objetivo do sistema, que pode ser a obtenção da máxima energia ou o dimensionamento de componentes menores.

Rayegan e Tao (2011) afirmaram que fluidos com temperaturas críticas elevadas apresentam melhor performance em ciclos Rankine orgânicos. Em sua pesquisa, os autores desenvolvem um modelo para seleção de fluidos de trabalho para um ORC solar (SORC), onde os principais critérios adotados para tal são a eficiência térmica e eficiência exergética, entretanto, os resultados de trabalho líquido do ciclo e taxa de expansão de vapor também foram considerados, sendo este último, um critério eliminatório adotado posteriormente.

De acordo com Bertrand *et al.* (2009), é muito difícil selecionar um fluido ideal, ou seja, que resulte em elevada eficiência térmica de ciclo com baixa vazão volumétrica na

saída da turbina, pressões e índices ambientais (ODP e GWP) e de segurança (toxicidade, inflamabilidade e corrosividade) com valores razoáveis. Desta forma, os autores propuseram um agrupamento de parâmetros para a seleção do fluido adequado no formato de tabela, onde cada variável é destacada como positiva ou negativa. Somadas, as variáveis totalizaram um resultado que permitem a tomada de decisão sobre a seleção do fluido para determinada utilização.

Roy e Misra (2012) também desenvolveram em seu trabalho um método para seleção de fluido de trabalho em um ciclo Rankine regenerativo orgânico (RORC) com superaquecimento, adotando como referência a eficiência térmica e o trabalho líquido do ciclo. Um modelo matemático computacional, desenvolvido pelos autores, tornou possível a otimização da temperatura de entrada da turbina, variável que, segundo os autores, apresenta uma relação de proporcionalidade direta com o desempenho térmico do ciclo (eficiência e trabalho líquido).

Javanshir e Sarunac (2017) propuseram novos modelos matemáticos para expressar a eficiência térmica dos ciclos subcrítico, subcrítico com superaquecimento e supercrítico e, desta forma, simular a seleção dos melhores fluidos de trabalho orgânicos para um ciclo Rankine básico. Para o ciclo subcrítico, os autores expressam a eficiência térmica em função do número de Jacob, que é uma razão entre os calores sensível e latente. A eficiência térmica do ciclo também foi escrita pelos autores em função da variável FOM (*figure of merit*), que é uma interação entre os valores do número de Jacob e valores da razão entre a temperatura de evaporação e condensação do ciclo. A obtenção da expressão que descreve o comportamento da eficiência térmica em função da FOM foi realizada mediante simulação computacional, onde a expressão desenvolvida corresponde à uma regressão linear quadrática, ou seja, de segunda ordem. Para obtenção do modelo, foram realizadas simulações com 23 fluidos, considerando 31 temperaturas distintas para o processo de evaporação e 15 temperaturas para o processo de condensação. No ciclo superaquecido, uma simulação computacional similar foi desenvolvida, envolvendo 23 fluidos de trabalho sujeitos a 8 temperaturas de condensação, 11 temperaturas de evaporação e 9 temperaturas máximas, num total de 18216 combinações de variáveis. A partir desta simulação, foram obtidas novas regressões lineares capazes de expressar a eficiência térmica do ciclo em função das variáveis de entrada. Os resultados para a eficiência térmica do ciclo foram apresentados pelos autores em função do número de Jacob modificado, que é uma razão entre o número de Jacob e o número de Jacob superaquecido. Para o ciclo supercrítico, o mesmo procedimento foi adotado pelos autores,

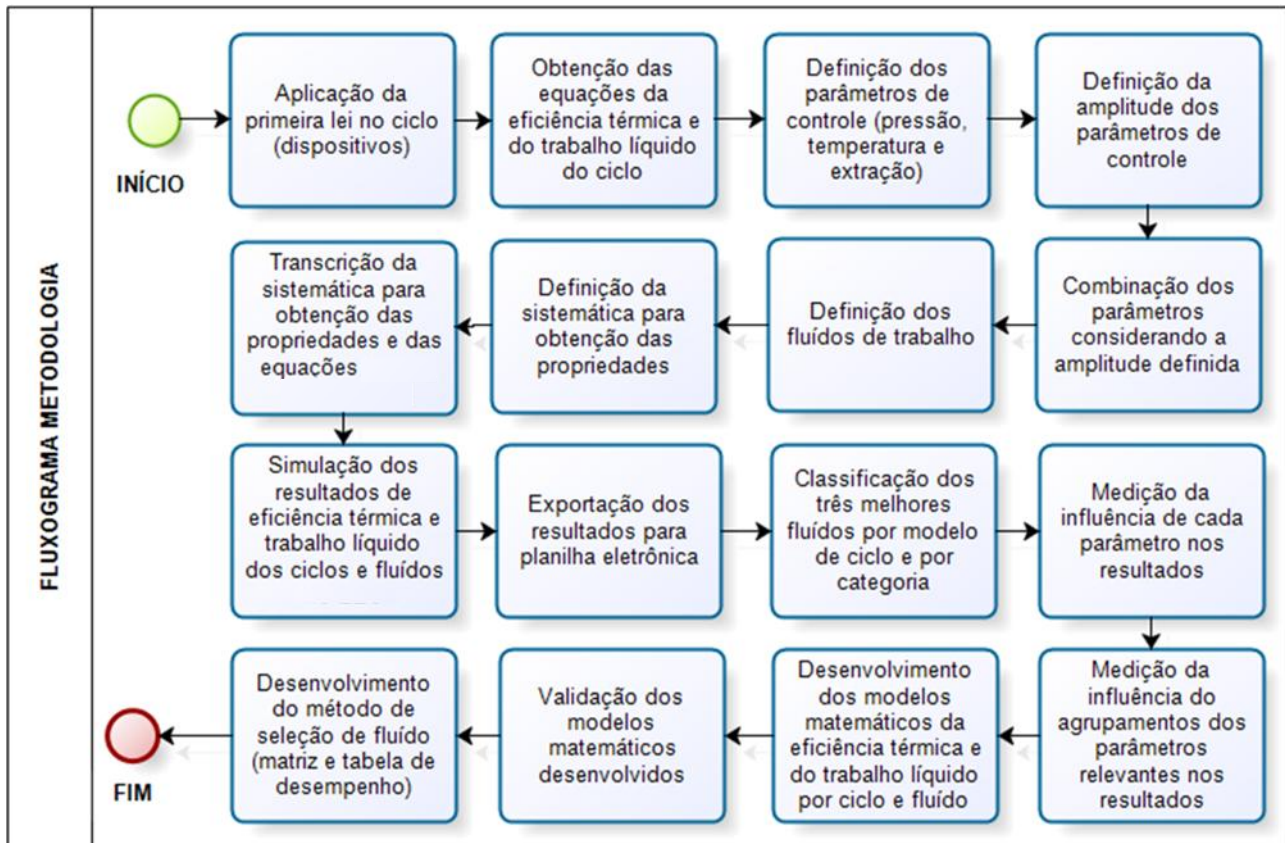
totalizando 14145 resultados. Foram considerados 23 fluidos de trabalho, 41 temperaturas de evaporação (adimensionais) e 15 temperaturas de condensação.

Kuo *et al.* (2011) propuseram a utilização do número de Jacob e da figura de mérito (FOM) para a seleção de fluidos. Os autores afirmam que é improvável a utilização de uma única propriedade para a seleção do fluido de trabalho adequado, tendo em vista que a eficiência térmica do ciclo é afetada por diversas propriedades termofísicas, tais como temperatura crítica, ponto de ebulição, calor latente, calor específico e massa molar (considerados na pesquisa). Desta forma, os autores sugeriram, para ORCs convencionais, a utilização do número de Jacob para a discriminação da eficiência térmica dentre vários fluidos. O método de seleção de fluidos de trabalho diferentes operando sob as mesmas condições de evaporação e condensação (temperaturas) pode ser estabelecido, segundo os autores, observando baixos valores do número de Jacob, considerando que estes resultam em elevados valores de eficiência térmica de ciclo. Além disso, o número de Jacob não deve ser utilizado como indicador de seleção quando se deseja comparar o desempenho do mesmo fluido operando sob diferentes condições de evaporação e condensação. Para estes casos, o método indicado pelos autores se baseia na figura de mérito (*Figure of Merit – FOM*), que denota uma interação entre a razão da temperatura de condensação e temperatura de evaporação e o número de Jacob. Por fim, os autores concluem a análise dos resultados sugerindo uma proporcionalidade inversa entre a eficiência térmica do ciclo e os valores da Figura de Mérito (FOM) e fazendo a menção de que esta variável, utilizada para indicação de desempenho do sistema, é aplicável a diversos fluidos de trabalho descritos nas literaturas aplicáveis.

3. METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste estudo possui diversas etapas, sendo assim, optou-se por esboçá-las em formato de fluxograma, conforme a Fig. 3.1. Cada etapa descrita no fluxograma será abordada em um tópico deste capítulo.

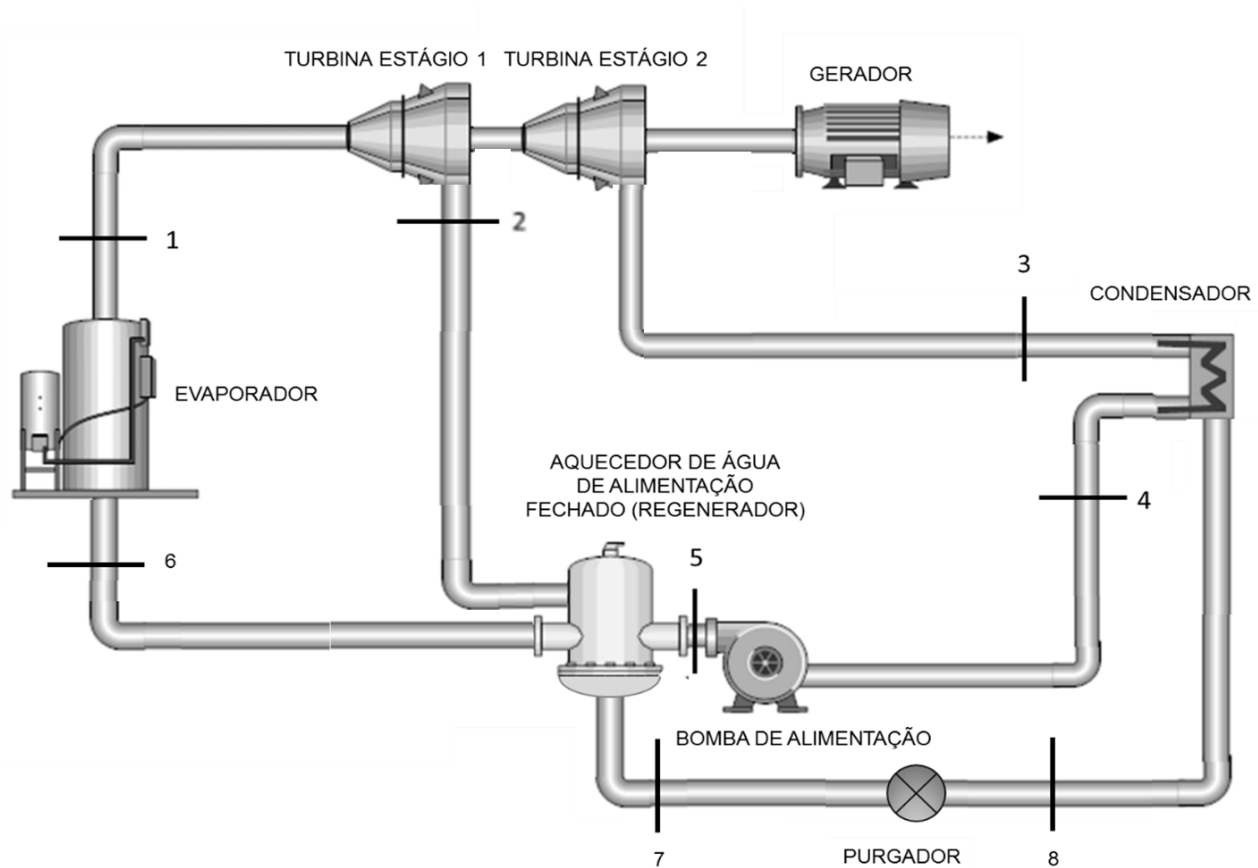
Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia utilizada no estudo. Fonte: Próprio autor (2020).



3.1 Aplicação da 1ª lei da termodinâmica para volume de controle

O ciclo Rankine orgânico regenerativo objeto deste estudo, utiliza o aquecedor de fluido de alimentação fechado para realizar o superaquecimento. Este ciclo possui basicamente seis componentes: caldeira, condensador, bomba, turbina, regenerador e purgador, vide Fig.3.2.

Figura 3.2 – Ciclo Rankine orgânico regenerativo com aquecedor de fluido de alimentação fechado. Fonte: Próprio autor (2020).



Para realizar análise termodinâmica do ciclo, foi aplicado a 1ª lei da termodinâmica em cada dispositivo, obtendo desta forma, as equações que expressam a eficiência térmica e o trabalho líquido específico do ciclo. Foram consideradas as seguintes hipóteses simplificadoras:

- 1) Regime permanente;
- 2) Variações de energia cinética e potencial desprezíveis;
- 3) Bomba, turbina e regenerador adiabáticos;
- 4) Não há trabalho sendo realizado sobre e pelo condensador, caldeira e regenerador;

Aplicando um balanço de massa e energia na turbina de 2 estágios obtém-se:

$$\frac{\dot{W}_t}{\dot{m}} = (h_1 - h_2) + (1 - y)(h_2 - h_3) \quad (3.1)$$

Aplicando um balanço de massa e energia na bomba obtém-se:

$$\frac{\dot{W}_b}{\dot{m}} = (h_5 - h_4) \quad (3.2)$$

Aplicando um balanço de massa e energia no condensador obtém-se:

$$\frac{\dot{Q}_s}{\dot{m}} = (1-y)(h_3 - h_4) \quad (3.3)$$

Aplicando um balanço de massa e energia na caldeira obtém-se:

$$\frac{\dot{Q}_e}{\dot{m}} = (h_1 - h_6) \quad (3.4)$$

Aplicando um balanço de massa e energia no regenerador obtém-se:

$$y = \frac{h_6 - h_5}{h_2 - h_7} \quad (3.5)$$

A eficiência térmica do ciclo é calculada como:

$$\eta = \frac{\frac{\dot{W}_t}{\dot{m}} - \frac{\dot{W}_b}{\dot{m}}}{\frac{\dot{Q}_e}{\dot{m}}} \quad (3.6)$$

O trabalho líquido específico do ciclo é calculado como:

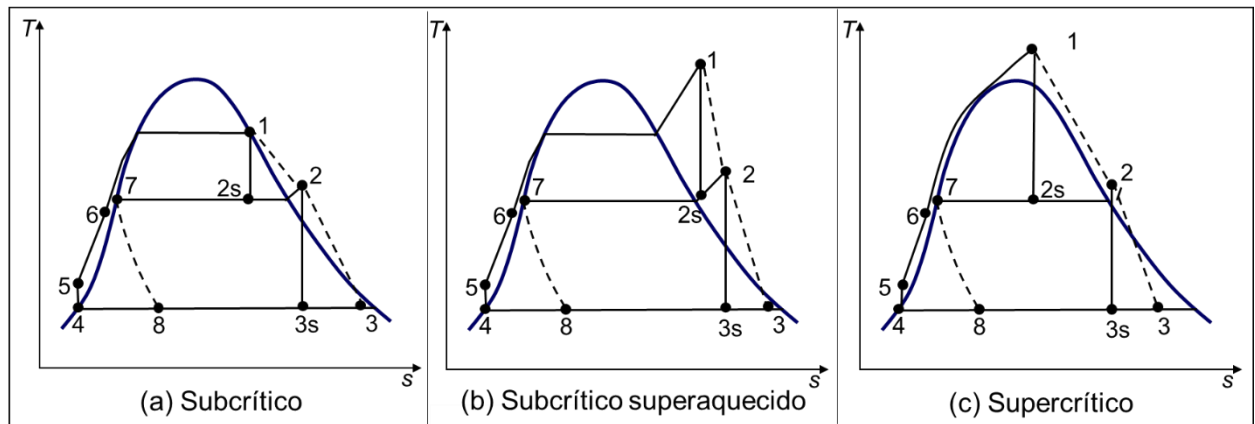
$$\frac{\dot{W}_{ciclo}}{\dot{m}} = \frac{\dot{W}_t}{\dot{m}} - \frac{\dot{W}_b}{\dot{m}} \quad (3.7)$$

3.2 Modelos de ciclo analisados

Foram considerados três modelos de ciclo: subcrítico, subcrítico superaquecido e supercrítico. Conforme ilustrado na Fig. 3.3a, o ciclo subcrítico opera com pressões e

temperaturas abaixo do ponto crítico, ou seja, a mudança de fase do fluido de trabalho acontece abaixo da temperatura e pressão crítica.

Figura 3.3 – Modelos de ciclo. Fonte: Adaptado de Moran *et al.* (2018).



Na Fig. 3.3b é apresentado o ciclo subcrítico com superaquecimento, nesse ciclo a mudança de fase acontece abaixo do ponto crítico, mas após esta etapa, a temperatura do vapor saturado é elevada, transformando-o em vapor superaquecido. O ciclo supercrítico é apresentado na Fig. 3.3c, onde o fluido de trabalho se transforma da fase líquida para vapor superaquecido de uma só vez, sem que exista mistura saturada.

3.3 Parâmetros de operação

Considerando todos os dispositivos do ciclo, foram estabelecidos os parâmetros de operação que seriam controlados. Alguns parâmetros foram fixados e outros sofreram variação. A pressão da caldeira no ciclo subcrítico sofreu variação e nos ciclos superaquecido e supercrítico foi fixada. A pressão do regenerador e a extração da turbina sofreram variação em todos os ciclos. A temperatura de saída da caldeira variou em todos os ciclos, mas no subcrítico esteve em função da variação da pressão, por este motivo não apareceu nos resultados. A temperatura do condensador, a eficiências isentrópicas da bomba e da turbina foram fixadas.

Como os fluidos de trabalho abordados neste estudo possuem propriedades críticas distintas (temperatura e pressão), optou-se por trabalhar com as propriedades adimensionais (reduzidas). O intuito de se utilizar as propriedades adimensionais é conseguir visualizar um padrão de comportamento entre os parâmetros de operação e os melhores resultados, ou seja, conhecer em qual nível da propriedade crítica é possível conseguir o melhor desempenho de cada fluido. Sendo assim, utilizou-se os parâmetros

pressão da caldeira e regenerador e temperatura de saída caldeira como adimensionais, $P_{r,reg}$, $P_{r,cald}$ e T_r , onde T_r é a razão entre a temperatura do fluido de trabalho pela temperatura crítica e P_r é a razão da pressão do fluido de trabalho pela pressão crítica, da caldeira ou do regenerador, ou seja:

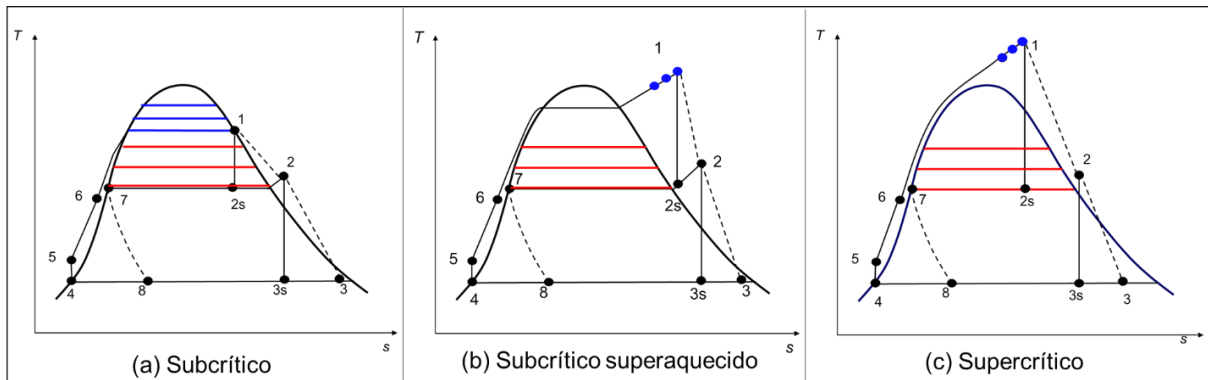
$$T_r = \frac{T}{T_{crit}} \quad (3.8)$$

$$P_r = \frac{P}{P_{crit}} \quad (3.9)$$

3.3.1 Amplitude dos parâmetros

Além de estabelecer os parâmetros de operação, foi definida a amplitude dos parâmetros por modelo de ciclo. A Tab. 3.1 apresenta a amplitude dos parâmetros por ciclo. A pressão do regenerador em todos os ciclos apresentou a mesma amplitude de operação, de 50 a 70% da pressão crítica do fluido de trabalho. A extração da turbina também apresentou a mesma amplitude em todos os ciclos, de 30 a 50%. A amplitude da pressão da caldeira no ciclo subcrítico foi de 85 a 95% da pressão crítica do fluido, no ciclo superaquecido a pressão foi fixada em 95% e no supercrítico em 105%. Nos ciclos superaquecido e supercrítico a amplitude da temperatura foi de 110 a 130% da temperatura crítica do fluido, no subcrítico a temperatura foi consequência da pressão de saturação. As eficiências isentrópicas da bomba e da turbina foram fixadas em 80% e 85% respectivamente. A temperatura do condensador foi fixada em 15°C.

Figura 3.4 – Variação dos parâmetros por ciclo. Fonte: Adaptado de Moran *et al.* (2018).



A Fig. 3.4 apresenta os três ciclos com a variação de cada parâmetro. A linha vermelha mostra a variação da pressão do regenerador, três níveis 50, 60 e 70%. A linha azul indica a variação na pressão da caldeira (ciclo subcrítico), três níveis 85, 90 e 95%. O ponto azul apresenta a variação de temperatura de saída da caldeira (ciclos superaquecido e supercrítico).

Tabela 3.1 – Amplitude dos parâmetros de operação.

		Modelo de ciclo		
		Subcrítico	Subcrítico superaquecido	Supercrítico
Parâmetros de operação	Pressão caldeira	0,85 - 0,95	0,95	1,05
	Pressão regenerador	0,50 - 0,70	0,50 - 0,70	0,50 - 0,70
	Temperatura saída da caldeira	Consequência da pressão da caldeira	1,10 - 1,30	1,10 - 1,30
	Eficiência da bomba isentrópica	0,80	0,80	0,80
	Eficiência da turbina isentrópica	0,85	0,85	0,85
	Extração da turbina	0,3 - 0,5	0,3 - 0,5	0,3 - 0,5
	Temperatura condensador	15°C	15°C	15°C

3.3.2 Combinação dos parâmetros de operação

A eficiência térmica do ciclo e o trabalho líquido específico do ciclo foram obtidos a partir da combinação de todos os parâmetros. As Figs. 3.5 e 3.6 apresentam a combinação dos parâmetros que sofrem variação nos ciclos subcrítico, subcrítico superaquecido e supercrítico. Em todos os ciclos são três parâmetros com três variações, então tem-se vinte e sete resultados possíveis de eficiência térmica e trabalho líquido específico. Os parâmetros fixos se repetiram em todas as combinações.

Foi utilizada a Fig. 3.6 para representar os ciclos superaquecido e supercrítico, pois os parâmetros que variam nestes ciclos são os mesmos. A diferença entre estes ciclos é somente a pressão da caldeira, superaquecido 95% e supercrítico 105% da pressão crítica do fluido de trabalho.

Figura 3.5 – Combinação dos parâmetros no ciclo subcrítico. Fonte: Próprio autor (2020).

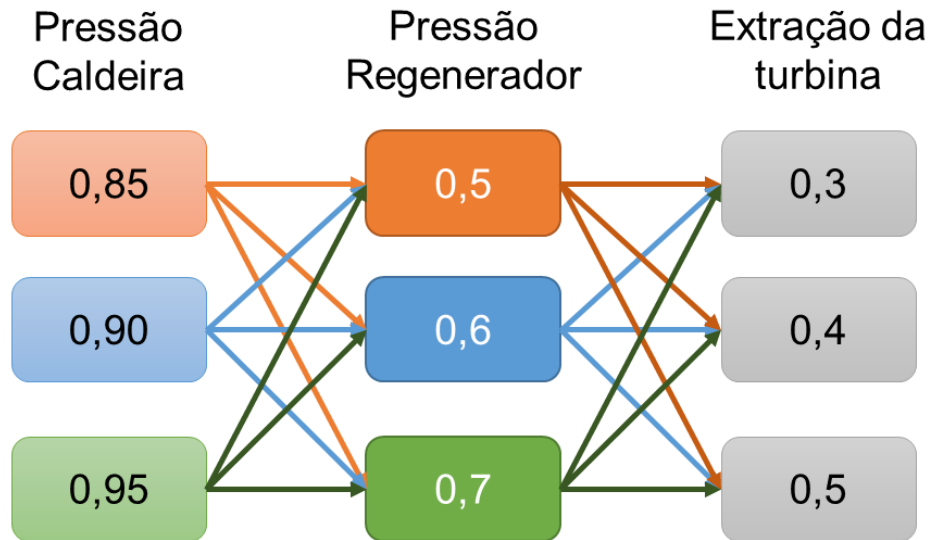
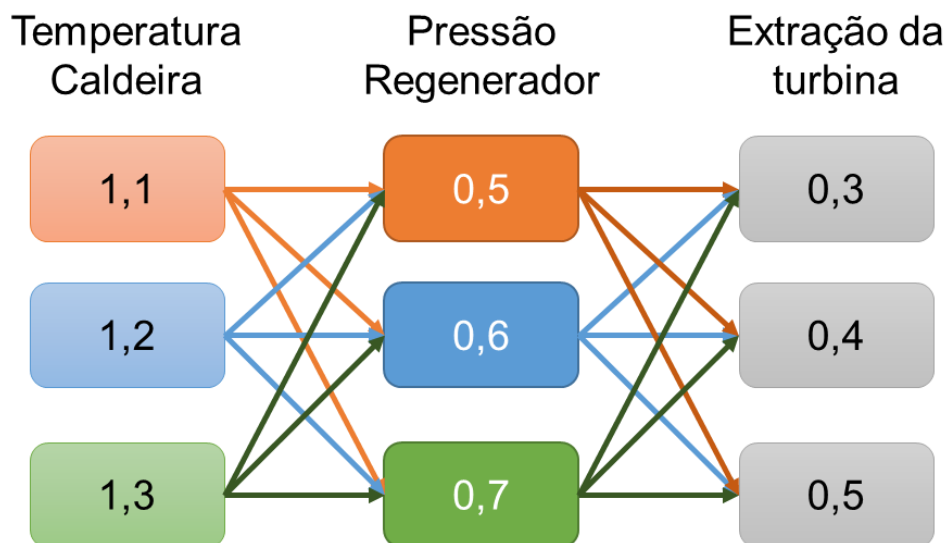


Figura 3.6 – Combinação dos parâmetros nos ciclos subcrítico superaquecido e supercrítico. Fonte: Próprio autor (2020).



3.4 Fluidos de trabalho

Foram considerados neste estudo dezessete fluidos de trabalho, sete molhados, quatro isentrópicos e seis secos. Cada fluido possui uma temperatura e pressão crítica, vide Tab. 3.2. Estes fluidos foram selecionados com base no trabalho de Javanshir e Sarunac (2017):

Tabela 3.2 – Fluidos de trabalhos. Fonte: Javanshir e Sarunac (2017).

Fluido	T_{cr} (°C)	P_{cr} (MPa)	Classificação
Amônia	132,25	11,33	Molhado
R152A	113,26	4,51	Molhado
R134A	101,06	4,05	Molhado
R22	96,145	4,99	Molhado
R32	78,105	5,78	Molhado
Etanol	240,75	6,14	Molhado
Metanol	239,45	8,1	Molhado
R12	111,97	4,13	Isentrópico
R123	183,68	3,66	Isentrópico
R141B	204,35	4,21	Isentrópico
R142B	137,11	4,05	Isentrópico
Isobutano	134,66	3,62	Seco
Isopentano	187,2	3,37	Seco
R245FA	154,01	3,65	Seco
R113	214,06	3,39	Seco
R227EA	101,75	2,92	Seco
R114	145,68	3,25	Seco

3.5 Cálculo da eficiência térmica e trabalho líquido específico dos ciclos

Para o cálculo da eficiência térmica e do trabalho líquido específico dos ciclos foi necessário a obtenção das entalpias específicas de todos os estados dos ciclos. Estas propriedades foram obtidas a partir da combinação de outras propriedades (pressão, entropia, temperatura e título). A Fig. 3.7, apresenta a sistemática adotada para a obtenção das propriedades para os ciclos: subcrítico, subcrítico superaquecido e supercrítico.

Figura 3.7 - Obtenção das propriedades para determinar a eficiência térmica e o trabalho líquido específico dos ciclos subcrítico, subcrítico superaquecido e supercrítico. Fonte: Próprio autor (2020).

$\eta = \frac{w_{ciclo}}{q_{ent}}$	w_{ciclo}	w_t	$h_1, h_2, h_3 \text{ e } y$	$h_2 f(h_{2s}; \eta_t; h_1)$
				$h_1 f(s_1; x=1)$
				$h_3 f(h_{3s}; \eta_t; h_2)$
	w_b		$h_4 \text{ e } h_5$	$h_4 f(p_4; x=0)$
				$h_5 f(h_{5s}; \eta_b; h_4)$
	q_{ent}	q_{ent}	$h_1 \text{ e } h_6$	$h_1 f(s_1; x=1)$
				$h_6 f(h_5; h_7; h_2; y)$

A sistemática adotada para a obtenção das propriedades em cada modelo de ciclo, assim como as equações de eficiência térmica e trabalho líquido específico foram transcritas para um software e este foi utilizado para realizar a simulação de todos os fluidos de trabalho apresentados na Tab. 3.2. Esta simulação submeteu cada fluido a todos os modelos de ciclo e a amplitude dos parâmetros de operação mostradas na Tab. 3.1, obtendo desta maneira a combinação descrita nas Figs. 3.5 e 3.6. Foram obtidos vinte sete resultados de eficiência térmica e trabalho líquido específico por ciclo e fluido de trabalho.

3.6 Análise de desempenho dos fluidos de trabalho e desenvolvimento dos modelos matemáticos

Após a simulação de cada fluido de trabalho em todos os modelos de ciclo, foi realizada uma análise dos resultados da eficiência térmica e do trabalho líquido específico, a fim de entender o comportamento dos fluidos diante dos parâmetros de operação e suas variações. Os resultados foram exportados para uma planilha eletrônica onde foram analisados.

Inicialmente verificou-se quais fluidos apresentaram os melhores valores de eficiência térmica e trabalho líquido específico por ciclo. Após esta verificação, foi realizado a classificação dos três melhores fluidos por ciclo e categoria (molhado, seco e isentrópico). Esta classificação foi realizada com o objetivo de aprofundar o estudo somente nos melhores fluidos de trabalho. Posteriormente verificou-se os valores de eficiência térmica e trabalho líquido específico em conjunto com a variação dos parâmetros de operação. Para realizar esta verificação foi utilizado os coeficientes de correlação e de determinação. Através destes coeficientes foi possível constatar quais foram os parâmetros que influenciaram significativamente nos resultados, assim como o nível de influência de cada

parâmetro. O objetivo desta constatação foi agrupar os parâmetros relevantes, analisar o nível de influência deste agrupamento e descrever um modelo matemático para eficiência térmica e trabalho líquido específico de cada modelo de ciclo e fluido de trabalho.

Para desenvolver os modelos matemáticos foi utilizado a regressão linear múltipla, com auxílio do suplemento do *software* Excel denominado análise de dados (ANOVA). Nestes modelos matemáticos a eficiência térmica e o trabalho líquido específico são função dos parâmetros de operação relevantes.

Para cada fluido de trabalho classificado, foi desenvolvido dois modelos matemáticos (eficiência térmica e trabalho líquido específico). Então cada modelo de ciclo dispõe de nove modelos matemáticos para eficiência térmica e trabalho líquido específico (3 fluidos classificados por categoria). Todos os modelos matemáticos foram validados através da comparação de seus resultados com os obtidos pelas expressões advindas da 1ª lei da termodinâmica. Esta validação gerou um parâmetro de análise denominado erro médio absoluto.

3.7 Desenvolvimento do método de seleção de fluido de trabalho

Utilizando como base todo estudo desenvolvido até este tópico, foi desenvolvido um método de seleção de fluido de trabalho por eficiência térmica e trabalho líquido específico. Este método é composto por duas ferramentas desenvolvidas por este estudo, a matriz de seleção e a tabela de desempenho.

3.7.1 Matriz de seleção

A matriz de seleção foi elaborada considerando as propriedades absolutas ao invés das reduzidas. Quando é realizada a seleção de fluido, além de seu desempenho é considerada sua faixa de operação absoluta. A faixa de operação absoluta do fluido de trabalho é utilizada para selecionar os dispositivos que integram o ciclo de potência (termoelétrica). Pode acontecer o inverso também, selecionar o fluido de trabalho com base na faixa de operação dos dispositivos existentes no ciclo. Como estudou-se três modelos de ciclo, foi elaborada uma matriz de seleção por modelo de ciclo para a eficiência térmica e trabalho líquido específico. Na matriz do ciclo subcrítico tanto para eficiência térmica quanto para trabalho líquido específico, utilizou-se no eixo das ordenadas para pressão da caldeira e o eixo das abscissas para a pressão do regenerador. A amplitude destes eixos é determinada pela faixa de operação dos fluidos de trabalho. Nos ciclos subcrítico

superaquecido e supercrítico, a pressão da caldeira foi fixada, sendo a temperatura o único parâmetro que sofreu variação na caldeira. Então no eixo das ordenadas destes dois ciclos se tem a temperatura da caldeira ao invés da pressão como no ciclo subcrítico. Em todos os ciclos, além dos parâmetros dispostos na matriz de seleção existe ainda a extração da turbina. Por este motivo, foi elaborado uma matriz para cada valor de extração (30, 40 e 50%).

A matriz apresenta diversos preenchimentos de cores variadas. Cada cor representa um fluido de trabalho, sua localização e dispersão corresponde a faixa de operação. Quando dois ou mais fluidos apresentam valores de operação coincidentes, a indicação de cor que sobrepõe as demais indica o melhor desempenho (eficiência térmica ou trabalho líquido específico) para aquela faixa de operação. Para determinar o desempenho de cada fluido nos pontos coincidentes, foi realizado o cálculo através dos modelos matemáticos desenvolvidos por este estudo.

3.7.2 Tabela de desempenho

Para cada fluido de trabalho foi elaborada uma tabela de desempenho (eficiência térmica e trabalho líquido específico). Esta tabela é constituída pelos valores absolutos dos parâmetros (pressão regenerador e caldeira e temperatura caldeira) de cada ciclo, resultado correspondente de eficiência térmica ou trabalho líquido específico e extração da turbina. As tabelas foram elaboradas no software *Excel* utilizando os modelos matemáticos desenvolvidos neste estudo. O método de seleção de fluido de trabalho inicia-se com a escolha do fluido pela matriz de seleção e é finalizado com a definição da melhor combinação de parâmetros de operação através da tabela de desempenho do fluido selecionado.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Eficiência térmica

A Tab. 4.1 apresenta os maiores valores de eficiência térmica obtidos pelos fluidos em cada ciclo, subcrítico, subcrítico superaquecido e no supercrítico. Os resultados foram obtidos a partir da aplicação das equações apresentadas no Cap. 3 nos fluidos em questão e da variação dos parâmetros de operação. Todos os fluidos foram submetidos as mesmas condições de operação. Os parâmetros de operação pré-definidos foram: pressão da caldeira, pressão do regenerador, temperatura de superaquecimento (quando houve superaquecimento) e percentual de extração da turbina de dois estágios.

Tabela 4.1 - Máxima eficiência térmica por ciclo e fluido.

	Fluidos	Subcrítico η	Fluidos	Superaquecido η	Fluidos	Supercrítico η
Molhados	Metanol	23,17%	Metanol	27,14%	Metanol	27,28%
	Etanol	21,43%	Etanol	26,15%	Etanol	26,31%
	Amônia	15,68%	Amônia	19,06%	Amônia	19,32%
	R152a	13,25%	R152a	16,28%	R152a	16,63%
	R22	12,09%	R22	14,86%	R22	15,18%
	R134a	11,89%	R134a	14,39%	R134a	14,81%
	R32	10,69%	R32	13,86%	R32	14,27%
Isentrópicos	R141b	17,89%	R141b	20,68%	R141b	21,84%
	R123	17,47%	R123	19,59%	R123	19,95%
	R142b	14,89%	R142b	17,45%	R142b	17,85%
	R12	11,76%	R12	14,38%	R12	13,43%
Secos	R113	17,51%	R113	19,02%	R113	30,04%
	Isopentano	16,72%	Isopentano	17,70%	R236fa	21,72%
	R245fa	15,28%	R245fa	17,12%	R114	20,50%
	Isobutano	14,30%	Isobutano	16,07%	Isopentano	18,06%
	R114	13,55%	R114	14,89%	R245fa	17,48%
	R236fa	11,93%	R236fa	13,35%	Isobutano	16,52%
	R227ea	11,02%	R227ea	12,46%	R227ea	12,89%

Em todos os ciclos a pressão do regenerador sofreu variação entre 50 e 70% da pressão crítica do fluido. A pressão da caldeira sofreu variação no ciclo subcrítico de 85 a 90% da pressão crítica do fluido, no ciclo subcrítico superaquecido, a pressão da caldeira foi fixada em 95% da pressão crítica e no ciclo supercrítico a pressão também foi fixada em 105% da pressão crítica do fluido. A extração da turbina variou em todos os ciclos de 30 a 50%. A temperatura no ciclo subcrítico superaquecido e no supercrítico variou entre 110 e 130% da temperatura crítica do fluido.

Analisando os fluidos molhados, pode-se verificar que nos ciclos subcrítico, subcrítico com superaquecimento e no supercrítico o metanol, o etanol e a amônia foram os fluidos que apresentaram as melhores eficiências térmicas nos três ciclos. Observa-se também que em todos os ciclos os fluidos R32 e o R134a foram os que apresentaram desempenho inferior aos demais. A eficiência máxima obtida pelos fluidos molhados aconteceu no ciclo supercrítico com o fluido metanol, apresentando eficiência de 27,28%.

Analisando os fluidos isentrópicos, pode-se verificar que em todos os ciclos os fluidos R141b e o R123 apresentaram as maiores eficiências térmicas. Em todos os ciclos o fluido R12 apresentou o menor desempenho. A eficiência máxima obtida pelos fluidos isentrópicos foi no ciclo supercrítico com o R141b, apresentando eficiência de 21,84%.

Por fim, analisando os fluidos secos, pode-se verificar que o R113 apresentou os maiores valores de eficiência térmica em todos os ciclos, no supercrítico 30,04%, subcrítico superaquecido 19,02% e no subcrítico 17,51%. O menor desempenho nos três ciclos foi do fluido R227ea. A maior eficiência térmica utilizando fluidos secos foi no ciclo supercrítico com o fluido R113, eficiência de 30,04%.

Dentre todos os fluidos molhados, isentrópicos e secos, o R113 (seco) apresentou a maior eficiência térmica com 30,04%. Dentre todos os ciclos, o supercrítico apresentou a maior eficiência térmica com 30,04% utilizando o fluido R113. No ciclo subcrítico a maior eficiência foi de 23,17%, utilizando fluido molhado (metanol). No ciclo subcrítico superaquecido a maior eficiência foi de 27,14%, utilizando fluido molhado (metanol). Analisando o desempenho de cada fluido em cada ciclo, observa-se que todos os fluidos apresentam maior eficiência térmica trabalhando o ciclo supercrítico.

Na Tab. 4.2 pode-se visualizar quais os valores dos parâmetros de operação foram utilizados para obter a máxima eficiência térmica no ciclo subcrítico por fluido. Em todos os fluidos de trabalho dois parâmetros se repetiram, a pressão adimensional do regenerador ($0,5 = 50\%$ da pressão crítica do fluido) e a extração do primeiro estágio da turbina ($0,3 = 30\%$ do total). Os valores da pressão adimensional da caldeira e consequentemente os

valores da diferença entre as pressões adimensionais do regenerador e da caldeira sofreram variação entre os fluidos.

Tabela 4.2 – Valores dos parâmetros utilizados para obtenção da máxima eficiência térmica do ciclo subcrítico.

	Fluidos	Máxima eficiência [%]	Pressão do regenerador	Pressão caldeira	Diferença entre pressões	Extração
Molhados	Metanol	23,17%	0,5	0,85	0,35	0,3
	Etanol	21,43%	0,5	0,85	0,35	0,3
	Amônia	15,68%	0,5	0,85	0,35	0,3
	R152a	13,25%	0,5	0,9	0,4	0,3
	R22	12,09%	0,5	0,9	0,4	0,3
	R134a	11,89%	0,5	0,9	0,4	0,3
	R32	10,69%	0,5	0,9	0,4	0,3
Isentrópicos	R11	18,08%	0,5	0,85	0,35	0,3
	R141b	17,89%	0,5	0,85	0,35	0,3
	R123	17,47%	0,5	0,9	0,4	0,3
	R142b	14,89%	0,5	0,9	0,4	0,3
	R12	11,76%	0,5	0,85	0,35	0,3
Secos	R113	17,51%	0,5	0,85	0,35	0,3
	Isopentano	16,72%	0,5	0,95	0,45	0,3
	R245fa	15,28%	0,5	0,9	0,4	0,3
	Isobutano	14,30%	0,5	0,9	0,4	0,3
	R114	13,55%	0,5	0,85	0,35	0,3
	R236fa	11,93%	0,5	0,85	0,35	0,3
	R227ea	11,02%	0,5	0,9	0,4	0,3

A Tab. 4.3 mostra os valores dos parâmetros utilizados em cada fluido para a obtenção da máxima eficiência do ciclo subcrítico superaquecido. Neste ciclo, todos os parâmetros se repetiram para todos fluidos, a pressão adimensional do regenerador 0,5 (50% da pressão crítica do fluido), a extração de 0,3 (30% do total), e a diferença entre as pressões adimensionais do regenerador e da caldeira de 0,45. A temperatura da caldeira também se repete em praticamente todos os fluidos 1,3 (130% da temperatura crítica do fluido) exceto o fluido metanol que alcança no máximo 1,23 (123% da temperatura crítica do fluido).

Tabela 4.3 – Valores dos parâmetros utilizados para obtenção da máxima eficiência térmica do ciclo subcrítico superaquecido.

	Fluidos	Máxima eficiência [%]	Pressão do regenerador	Temperatura da caldeira	Diferença entre pressões	Extração
Molhados	Metanol	27,14%	0,5	1,23	0,45	0,3
	Etanol	26,15%	0,5	1,3	0,45	0,3
	Amônia	19,06%	0,5	1,3	0,45	0,3
	R152a	16,28%	0,5	1,3	0,45	0,3
	R22	14,86%	0,5	1,3	0,45	0,3
	R134a	14,39%	0,5	1,3	0,45	0,3
	R32	13,86%	0,5	1,3	0,45	0,3
Isentrópicos	R11	21,24%	0,5	1,3	0,45	0,3
	R141b	20,68%	0,5	1,3	0,45	0,3
	R123	19,59%	0,5	1,3	0,45	0,3
	R142b	17,45%	0,5	1,3	0,45	0,3
	R12	14,38%	0,5	1,3	0,45	0,3
Secos	R113	19,02%	0,5	1,3	0,45	0,3
	Isopentano	17,70%	0,5	1,3	0,45	0,3
	R245fa	17,12%	0,5	1,3	0,45	0,3
	Isobutano	16,07%	0,5	1,3	0,45	0,3
	R114	14,89%	0,5	1,3	0,45	0,3
	R236fa	13,35%	0,5	1,3	0,45	0,3
	R227ea	12,46%	0,5	1,3	0,45	0,3

Na Tab 4.4 estão dispostos os valores dos parâmetros de operação de todos os fluidos de trabalho que proporcionaram os maiores valores de eficiência térmica do ciclo supercrítico. Os valores dos parâmetros pressão adimensional do regenerador de 0,5, extração do primeiro estágio da turbina de 0,3 e a diferença entre as pressões adimensionais do regenerador e da caldeira 0,55 se repetem para todos os fluidos. Já a temperatura adimensional de 1,3 se repete praticamente para todos os fluidos, exceto pelos fluidos metanol 1,23, R113 e R236FA.

Todos os ciclos dispostos nas Tabs. 4.2, 4.3 e 4.4 apresentam os mesmos valores dos parâmetros pressão adimensional do regenerador (0,5), e a extração do primeiro estágio da turbina (0,3). Então pode-se notar que as maiores eficiências térmicas dos ciclos

acontecem com a menor pressão de regeneração e o menor percentual de extração. As temperaturas que proporcionam as maiores eficiências nos ciclos superaquecido e supercrítico são basicamente as maiores utilizadas no estudo.

Tabela 4.4 – Valores dos parâmetros utilizados para obtenção da máxima eficiência térmica do ciclo supercrítico.

	Fluidos	Máxima eficiência [%]	Pressão do regenerador	Temperatura da caldeira	Diferença entre pressões	Extração
Molhados	Metanol	27,28%	0,5	1,23	0,55	0,3
	Etanol	26,31%	0,5	1,3	0,55	0,3
	Amônia	19,32%	0,5	1,3	0,55	0,3
	R152a	16,63%	0,5	1,3	0,55	0,3
	R22	15,18%	0,5	1,3	0,55	0,3
	R134a	14,81%	0,5	1,3	0,55	0,3
	R32	14,27%	0,5	1,3	0,55	0,5
Isentrópicos	R141b	21,84%	0,5	1,3	0,55	0,3
	R123	19,95%	0,5	1,3	0,55	0,3
	R142b	17,85%	0,5	1,3	0,55	0,3
	R12	13,43%	0,5	1,3	0,55	0,3
Secos	R113	30,04%	0,5	1,1	0,55	0,3
	R236fa	21,72%	0,5	1,1	0,55	0,3
	R114	20,50%	0,5	1,3	0,55	0,3
	Isopentano	18,06%	0,5	1,3	0,55	0,3
	R245fa	17,48%	0,5	1,3	0,55	0,3
	Isobutano	16,52%	0,5	1,3	0,55	0,3
	R227ea	12,89%	0,5	1,3	0,55	0,3

4.1.1 Parâmetros de influência nos resultados da eficiência térmica de cada ciclo

A partir deste tópico os fluidos analisados serão os três que apresentaram melhor desempenho por tipo (molhado, seco e isentrópico) e por ciclo, vide Tab. 4.5:

Foram analisados os parâmetros que mais influenciaram nos resultados das eficiências térmicas dos ciclos e dos fluidos descritos na Tab. 4.5. Abaixo estão dispostos

os resultados obtidos, Tabs 4.6, 4.7 e 4.8. Os parâmetros de operação analisados no ciclo subcrítico foram: a pressão adimensional do regenerador, variando entre 50 a 70% da pressão crítica do fluido, a pressão adimensional da caldeira, variando entre 85 e 95% da pressão crítica do fluido e a extração da turbina de dois estágios, variando entre 30 e 50%. O parâmetro descrito na tabela como sendo a diferença entre as pressões adimensionais do regenerador e da caldeira sofreu variação entre 15 e 45% da pressão crítica do fluido, este parâmetro é calculado realmente pela diferença entre as pressões adimensionais.

Tabela 4.5 – Fluidos que apresentaram melhor desempenho por ciclo.

	Fluidos	Máxima eficiência do ciclo subcrítico [%]	Fluidos	Máxima eficiência do ciclo superaquecido [%]	Fluidos	Máxima eficiência do ciclo supercrítico [%]
Molhados	Metanol	23,17%	Metanol	27,14%	Metanol	27,28%
	Etanol	21,43%	Etanol	26,15%	Etanol	26,31%
	Amônia	15,68%	Amônia	19,06%	Amônia	19,32%
Isentrópicos	R141b	17,89%	R141b	20,68%	R141b	21,84%
	R123	17,47%	R123	19,59%	R123	19,95%
	R142b	14,89%	R142b	17,45%	R142b	17,85%
Secos	R113	17,51%	R113	19,02%	R113	30,04%
	Isopentano	16,72%	Isopentano	17,70%	R236fa	21,72%
	R245fa	15,28%	R245fa	17,12%	R114	20,50%

A Tab. 4.6 dispõe o percentual de influência de cada parâmetro na eficiência térmica do ciclo subcrítico. Pode-se notar que os parâmetros que mais influenciaram a eficiência térmica do ciclo para todos os fluidos foram a pressão adimensional do regenerador, a diferença entre as pressões adimensionais de regeneração e da caldeira e a extração da turbina de dois estágios. E o parâmetro que quase não teve colaboração no resultado foi a pressão adimensional da caldeira.

Tabela 4.6 – Influência dos parâmetros de operação na eficiência térmica do ciclo subcrítico.

	Fluidos	Pressão do regenerador	Pressão caldeira	Diferença entre pressões	Extração
Molhados	Metanol	9,70%	0,11%	6,94%	89,77%
	Etanol	6,70%	1,02%	3,47%	92,02%
	Amônia	38,84%	0,38%	28,06%	58,55%
Isentrópicos	R141b	10,89%	1,66%	5,65%	86,91%
	R123	14,79%	0,00%	11,92%	84,59%
	R142b	31,51%	0,00%	25,22%	66,91%
Secos	R113	9,64%	0,41%	6,20%	89,54%
	Isopentano	14,96%	0,14%	13,16%	84,30%
	R245fa	18,32%	0,01%	14,99%	80,85%

Os parâmetros de operação analisados no ciclo subcrítico superaquecido foram: a pressão adimensional do regenerador, variando entre 50 a 70% da pressão crítica do fluido, a temperatura adimensional de superaquecimento, que na maioria dos fluidos variou de 110 a 130% da temperatura crítica do fluido e a extração da turbina de dois estágios, variando entre 30 e 50%. A pressão adimensional da caldeira foi fixada em 95% da pressão crítica do fluido, portanto não influenciou no resultado. O parâmetro descrito na tabela como sendo a diferença entre as pressões adimensionais do regenerador e da caldeira sofreu variação entre 25 e 45% da pressão crítica do fluido, este parâmetro é calculado realmente pela diferença entre as pressões.

A Tab. 4.7 apresenta o percentual de influência de cada parâmetro na eficiência térmica do ciclo subcrítico superaquecido para cada fluido. Pode-se notar que todos os parâmetros influenciaram na eficiência térmica do ciclo. Em todos os tipos de fluidos o parâmetro que apresentou a maior influência foi a extração da turbina.

No ciclo subcrítico superaquecido, a pressão da caldeira foi fixada em 0,95, por este motivo, a influência da pressão adimensional do regenerador e da diferença entre a pressão da caldeira e do regenerador ficaram iguais. Como a pressão da caldeira se manteve fixa, a única variação existente com relação a pressão, foi a do regenerador, portanto a diferença entre as pressões aconteceu somente pelo parâmetro pressão do regenerador.

Tabela 4.7 – Influência dos parâmetros de operação na eficiência térmica do ciclo subcrítico superaquecido.

	Fluidos	Pressão do regenerador	Temperatura de superaquecimento	Diferença entre pressões	Extração
Molhados	Metanol	13,17%	10,69%	13,17%	75,39%
	Etanol	8,98%	16,17%	8,98%	74,34%
	Amônia	42,41%	22,88%	42,41%	31,80%
Isentrópicos	R141b	14,07%	11,08%	14,07%	73,91%
	R123	19,39%	6,14%	19,39%	73,27%
	R142b	37,59%	11,78%	37,59%	48,21%
Secos	R113	12,63%	4,79%	12,63%	81,76%
	Isopentano	20,89%	1,60%	20,89%	76,10%
	R245fa	24,39%	5,81%	24,39%	68,25%

Os parâmetros de operação analisados no ciclo supercrítico foram: a pressão do regenerador, variando entre 50 a 70% da pressão crítica do fluido, a temperatura da caldeira, que na maioria dos fluidos variou de 110 a 130% da temperatura crítica do fluido e a sangria da turbina de dois estágios, variando entre 30 e 50%. A pressão da caldeira foi fixada em 105% da pressão crítica do fluido, portanto não influenciou no resultado. O parâmetro descrito na tabela 4.8 como a diferença entre as pressões do regenerador e da caldeira sofreu variação entre 35 e 55% da pressão crítica do fluido, este parâmetro é calculado realmente pela diferença entre as pressões.

Tabela 4.8 – Influência dos parâmetros de operação na eficiência térmica do ciclo supercrítico.

	Fluidos	Pressão do regenerador	Temperatura supercrítica	Diferença entre pressões	Extração
Molhados	Metanol	12,36%	15,00%	12,36%	71,90%
	Etanol	8,53%	19,96%	8,53%	70,98%
	Amônia	35,42%	34,30%	35,42%	27,57%
Isentrópicos	R141b	14,46%	15,25%	14,46%	69,18%
	R123	18,77%	9,85%	18,77%	70,08%
	R142b	33,52%	21,15%	33,52%	42,86%
Secos	R113	35,21%	1,10%	35,21%	61,40%
	Isopentano	73,25%	0,00%	73,25%	21,99%
	R245fa	49,16%	1,53%	49,16%	46,12%

A Tab. 4.8 apresenta o percentual de influência de cada parâmetro na eficiência térmica do ciclo supercrítico para cada fluido. Pode-se notar que todos os parâmetros influenciaram na eficiência térmica do ciclo. Na maioria dos fluidos o parâmetro que apresentou a maior influência foi a extração da turbina. O parâmetro que tem menor influência no resultado da eficiência térmica do ciclo supercrítico é a temperatura supercrítica da caldeira.

4.1.2 Agrupamento dos parâmetros relevantes e desenvolvimento de modelos matemáticos

Pode-se observar nas Tabs. 4.6, 4.7 e 4.8 que nenhum parâmetro é responsável por 100% do resultado da eficiência térmica do ciclo. Sendo assim, optou-se por analisar quais parâmetros agrupados corresponderiam por aproximadamente 100% do resultado. As Tabs. 4.9, 4.10 e 4.11, apresentam os níveis de influência que a junção dos principais parâmetros exerce sobre o resultado da eficiência térmica de cada ciclo por fluido.

Tabela 4.9 – Influência do agrupamento dos parâmetros no resultado da eficiência térmica do ciclo subcrítico.

	Fluidos	Modelo Matemático	Influência dos parâmetros agrupados	Erro médio absoluto
Molhados	Metanol	$\eta = 0,354 - 0,0915P_{r,reg} - 0,0163DP_r - 0,229y$	99,53%	0,114%
	Etanol	$\eta = 0,359 - 0,112P_{r,reg} - 0,0491DP_r - 0,233y$	99,71%	0,088%
	Amônia	$\eta = 0,261 - 0,116P_{r,reg} - 0,0193DP_r - 0,119y$	97,48%	0,158%
Isentrópicos	R141b	$\eta = 0,323 - 0,126P_{r,reg} - 0,0551DP_r - 0,119y$	99,39%	0,001%
	R123	$\eta = 0,265 - 0,0728P_{r,reg} - 0,0011DP_r - 0,177y$	99,29%	0,117%
	R142b	$\eta = 0,234 - 0,0883P_{r,reg} - 0,0001DP_r - 0,1289y$	98,21%	0,136%
Secos	R113	$\eta = 0,293 - 0,0926P_{r,reg} - 0,0270DP_r - 0,2y$	99,53%	0,096%
	Isopentano	$\eta = 0,244 - 0,0584P_{r,reg} - 0,0141DP_r - 0,172y$	99,32%	0,845%
	R245fa	$\eta = 0,231 - 0,0681P_{r,reg} - 0,003DP_r - 0,15y$	99,07%	0,200%

Tabela 4.10 - Influência do agrupamento dos parâmetros no resultado da eficiência térmica do ciclo subcrítico superaquecido.

	Fluidos	Modelo Matemático	Influência dos parâmetros agrupados	Erro médio absoluto
Molhados	Metanol	$\eta = 0,158 + 0,114T_r + 0,086DP_r - 0,205y$	99,15%	0,145%
	Etanol	$\eta = 0,165 + 0,1T_r + 0,0748DP_r - 0,215y$	99,43%	0,124%
	Amônia	$\eta = 0,07 + 0,079T_r + 0,107DP_r - 0,093y$	96,71%	0,178%
Isentrópicos	R141b	$\eta = 0,138 + 0,07T_r + 0,079DP_r - 0,18y$	98,93%	0,134%
	R123	$\eta = 0,152 + 0,045T_r + 0,079DP_r - 0,154y$	98,64%	0,129%
	R142b	$\eta = 0,097 + 0,054T_r + 0,096DP_r - 0,109y$	97,26%	0,160%
Secos	R113	$\eta = 0,16 + 0,043T_r + 0,07DP_r - 0,177y$	99,06%	0,114%
	Isopentano	$\eta = 0,163 + 0,021T_r + 0,074DP_r - 0,142y$	98,41%	0,123%
	R245fa	$\eta = 0,13 + 0,037T_r + 0,077DP_r - 0,128y$	98,25%	0,126%

Tabela 4.11 - Influência do agrupamento dos parâmetros no resultado da eficiência térmica do ciclo supercrítico.

	Fluidos	Modelo Matemático	Influência dos parâmetros agrupados	Erro médio absoluto
Molhados	Metanol	$\eta = 0,123 + 0,137T_r + 0,084DP_r - 0,204y$	99,17%	0,141%
	Etanol	$\eta = 0,142 + 0,113T_r + 0,074DP_r - 0,213y$	99,40%	0,123%
	Amônia	$\eta = 0,035 + 0,103T_r + 0,1042DP_r - 0,092y$	96,94%	0,184%
Isentrópicos	R141b	$\eta = 0,125 + 0,081T_r + 0,079DP_r - 0,173y$	98,75%	0,139%
	R123	$\eta = 0,131 + 0,058T_r + 0,079DP_r - 0,153y$	98,52%	0,133%
	R142b	$\eta = 0,0633 + 0,0762T_r + 0,0959DP_r - 0,109y$	97,21%	0,169%
Secos	R113	$\eta = 0,304 - 0,0136T_r + 0,0768DP_r - 0,101y$	97,41%	0,122%
	R236fa	$\eta = 0,185 - 0,0005T_r + 0,0886DP_r - 0,049y$	94,63%	0,140%
	R114	$\eta = 0,167 + 0,0015T_r + 0,085DP_r - 0,0823y$	96,39%	0,137%

Considerando os fluidos que apresentaram os melhores desempenhos nos ciclos subcrítico, subcrítico superaquecido e supercrítico e o nível de influência que cada parâmetro exerce sobre o resultado destes desempenhos, foi realizado o agrupamento dos parâmetros mais relevantes, a fim de se obter níveis maiores de explicação em relação ao resultado.

Os parâmetros que mostraram ter maior influência sobre o resultado da eficiência térmica do ciclo subcrítico foram: a pressão adimensional do regenerador $P_{r,reg}$, a diferença entre as pressões adimensionais da caldeira e do regenerador DP_r e a extração da turbina y . Nos ciclos subcrítico superaquecido e supercrítico os parâmetros que tiveram a maior influência sobre o resultado foram: a temperatura adimensional da caldeira T_r , a diferença entre as pressões adimensionais da caldeira e do regenerador DP_r e a extração da turbina y . Através da regressão linear múltipla foi realizada a junção destes parâmetros e descrito o modelo matemático para cada fluido selecionado.

Analisando o fluido de trabalho metanol, pode-se observar na Tab. 4.6 que os parâmetros que mais influenciaram os resultados deste fluido no ciclo subcrítico foram em ordem decrescente: extração 89,77%, pressão adimensional do regenerador 9,70% e diferença entre as pressões adimensionais da caldeira e do regenerador 6,94%. Estes parâmetros juntos explicam 99,53% do resultado da eficiência térmica do ciclo, vide tabela 4.9. O modelo matemático que descreve o comportamento da eficiência térmica em função destes parâmetros está descrito na Eq. 4.1:

$$\eta = 0,354 - 0,0915P_{r,reg} - 0,0163DP_r - 0,229y \quad (4.1)$$

onde η é a eficiência térmica do ciclo, $P_{r,reg}$ é a pressão adimensional do regenerador (percentual da pressão crítica do fluido), DP_r é a diferença entre as pressões adimensionais da caldeira e do regenerador e y é a extração da turbina de dois estágios. Este modelo foi validado através da comparação entre os valores de eficiência térmica obtidos pelas leis básicas da termodinâmica e os valores obtidos através desta equação de regressão, o erro médio absoluto foi de 0,114%. Todos os fluidos das Tabs. 4.9, 4.10 e 4.11 foram analisados utilizando a mesma metodologia empregada para o fluido metanol.

4.1.3 Método para seleção de fluido de trabalho

Este tópico abordará a sistemática desenvolvida para a seleção de fluido de trabalho. Nos itens 4.1.3.1, 4.1.3.2 e 4.1.3.3 estão as matrizes de seleção de fluido de trabalho por faixa de operação. O objetivo destas matrizes é indicar o melhor fluido por faixa de operação absoluta, considerando a variação de ciclo (subcrítico, subcrítico superaquecido e supercrítico) e a extração da turbina (30, 40 e 50%). Optou-se por apresentar os valores de operação absolutos, pois com base nestes valores torna-se possível a eventual seleção dos dispositivos que compõem o ciclo de geração de energia. Para finalizar a seleção do fluido de trabalho e encontrar os parâmetros ótimos de operação, após utilização da matriz de seleção aplicável, deve-se consultar a tabela de desempenho do fluido selecionado. Esta tabela contém a eficiência térmica do fluido por ciclo e combinação dos valores de operação. As tabelas serão apresentadas no item 4.1.3.2.

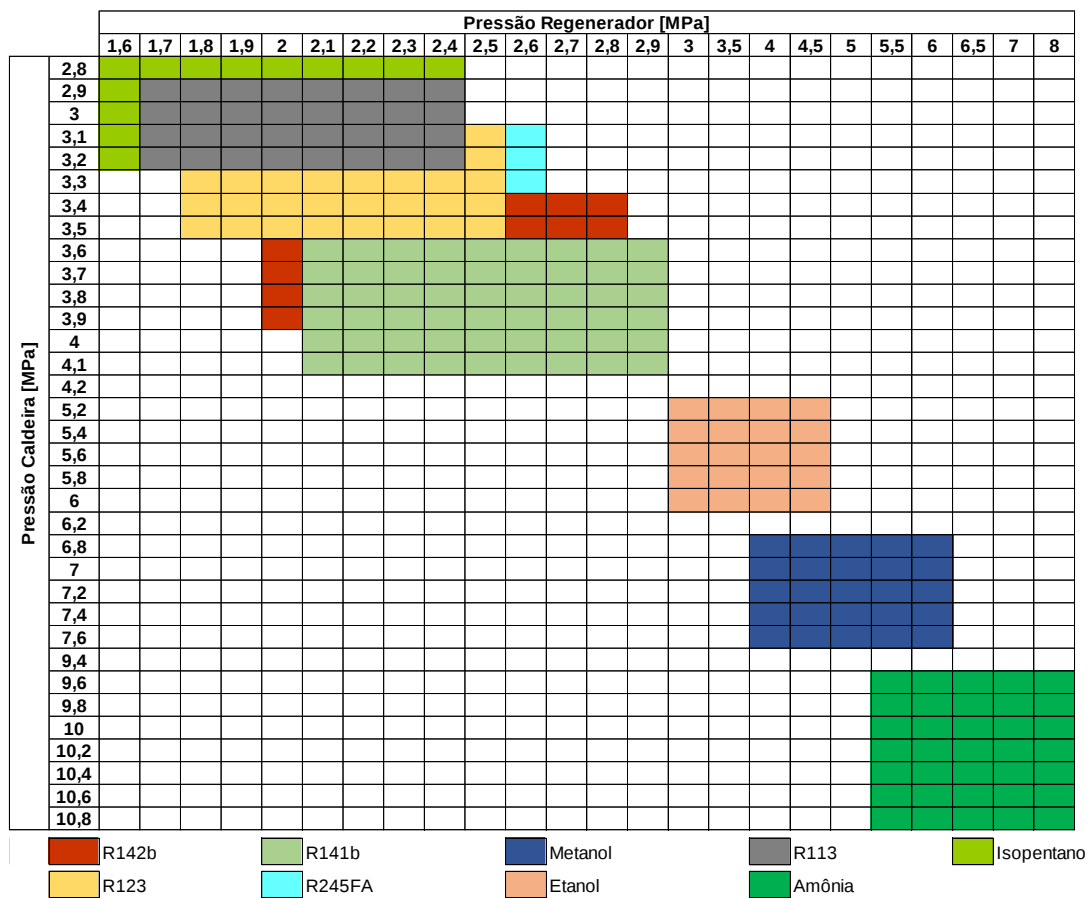
4.1.3.1 Seleção do fluido de trabalho a partir da eficiência térmica do ciclo

Considerando o desempenho apresentado pelos fluidos de trabalho nos três modelos de ciclo, foram elaboradas matrizes de seleção. O principal objetivo destas matrizes é indicar o melhor fluido de trabalho em cada ciclo e por faixa de operação de regeneração (regenerador), evaporação (caldeira) e extração da turbina: 30, 40 e 50%.

Nas Figs. 4.1, 4.2 e 4.3 estão dispostas as matrizes de seleção de fluido de trabalho para o ciclo subcrítico com extração de 30, 40 e 50% respectivamente. No eixo das ordenadas está a amplitude de operação da evaporação, de 2,8MPa a 10,8MPa. No eixo das abcissas está a amplitude de operação da regeneração, de 1,6 MPa a 8MPa.

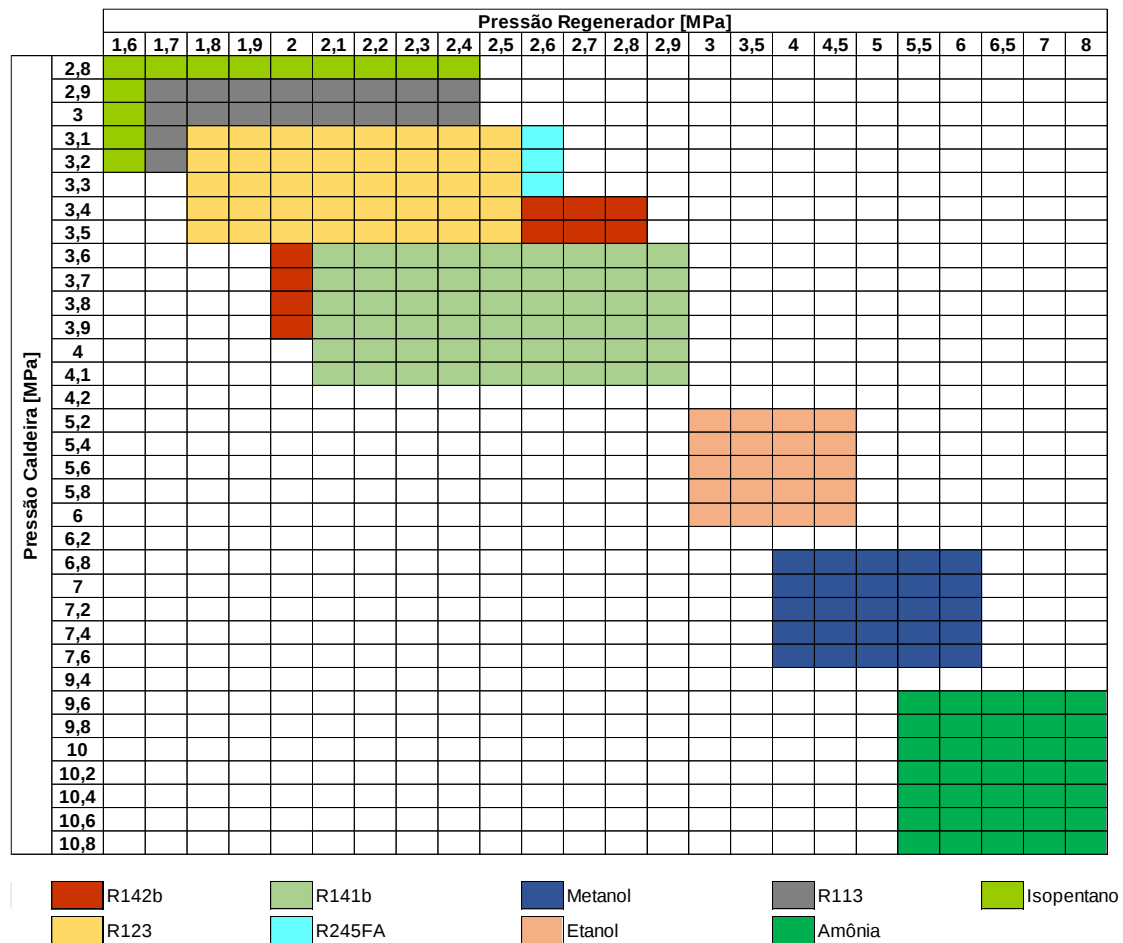
Cada fluido de trabalho está representado por uma cor, o preenchimento da matriz é em função das faixas de operação que o fluido foi submetido no estudo (baseando-se na propriedade crítica de cada fluido). Quando dois ou mais fluidos apresentam valores de operação coincidentes, a indicação de cor que sobrepõe as demais indica a melhor eficiência térmica para a faixa de operação. Para determinar a eficiência térmica de cada fluido nos pontos coincidentes, é realizado o cálculo da mesma através dos modelos matemáticos desenvolvidos por este estudo.

Figura 4.1 – Matriz de seleção do fluido de trabalho por faixa de operação de regeneração e evaporação do ciclo subcrítico com extração de 30%.



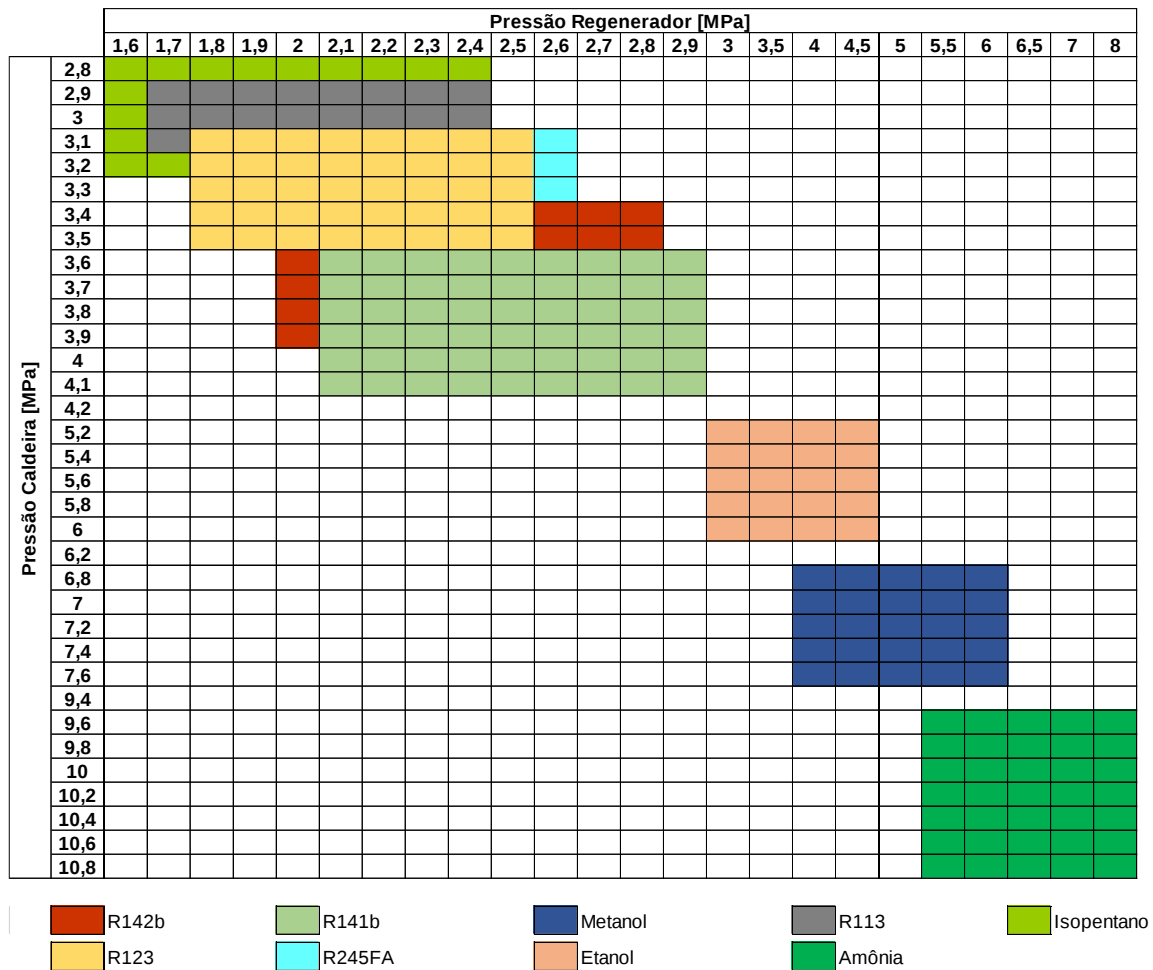
Pode-se notar que no ciclo subcrítico os fluidos amônia, metanol e etanol estão em faixas distintas. Os fluidos R141b e R142b em algum momento foram submetidos aos mesmos valores de operação, pois a pressão crítica destes se encontram próximas, assim como os fluidos R245FA, R123, R113, R142b e isopentano. Nas três matrizes do ciclo subcrítico (extração 30, 40 e 50%) o fluido que apresenta o pior desempenho é o R245FA, este fluido é aplicável em três pontos apenas (2,6; 3,1), (2,6; 3,2) e (2,6; 3,3). O fluido que trabalha com os menores valores de pressão é o isopentano e o que trabalha com os maiores valores de pressão é a amônia.

Figura 4.2 – Matriz de seleção do fluido de trabalho por faixa de operação de regeneração e evaporação do ciclo subcrítico com extração de 40%.



Nas matrizes 4.1, 4.2 e 4.3, pode-se notar que os fluidos R113 e R123 coincidem em quatorze pontos, de (1,8; 3,1) a (2,4; 3,2), e o fluido que se destaca (apresenta maior eficiência térmica do ciclo) no processo com extração de 30% é o R113, vide Fig. 4.1. Este mesmo caso considerando a extração de 40 e 50%, o fluido que se destaca é R123, vide Figs. 4.2 e 4.3. Cada fluido é afetado com uma intensidade diferente pela variação dos parâmetros de operação, sendo assim, em cada situação de extração se tem um fluido apresentando melhor desempenho.

Figura 4.3 – Matriz de seleção do fluido de trabalho por faixa de operação de regeneração e evaporação do ciclo subcrítico com extração de 50%.



As Figs. 4.4, 4.5 e 4.6 apresentam as matrizes de seleção de fluido de trabalho para o ciclo subcrítico superaquecido com extração de 30, 40 e 50% respectivamente. No eixo das ordenadas está a amplitude de operação da evaporação, de 140°C a 320°C, neste ciclo a pressão de evaporação foi fixada em 0,95 da pressão crítica do fluido e a temperatura sofreu variação, por este motivo foi utilizada a temperatura como referência. No eixo das abscissas está a amplitude de operação da regeneração, de 1,6 MPa a 8MPa.

Pode-se notar nas matrizes 4.4, 4.5 e 4.6 que a amônia é o único fluido de trabalho que opera com a combinação de valores de pressão e temperatura distinto dos demais. Os fluidos etanol e metanol coincidem em alguns pontos e o fluido que apresenta melhor desempenho é o metanol, por este motivo é a cor que prevalece. Assim acontece com os fluidos R142b e R245FA e com os fluidos isopentano, R123, R113 e R141b. A coincidência dos pontos se deve pela pressão e temperatura crítica dos fluidos serem próximas. Pode-se notar ainda que o comportamento dos fluidos em relação ao desempenho foi praticamente o mesmo para todas as situações de extração (30, 40 e 50%), diferente do ciclo subcrítico que apresentou alteração em alguns fluidos perante a variação de extração.

O Isopentano é o fluido que apresenta a menor faixa de atuação e trabalha com os menores valores de pressão. O fluido que trabalha com os maiores valores de pressão e menores valores de temperatura é a amônia. O etanol é o fluido que apresenta a maior temperatura de operação.

Figura 4.4 – Matriz de seleção do fluido de trabalho por faixa de operação de regeneração e evaporação do ciclo subcrítico superaquecido com extração de 30%.

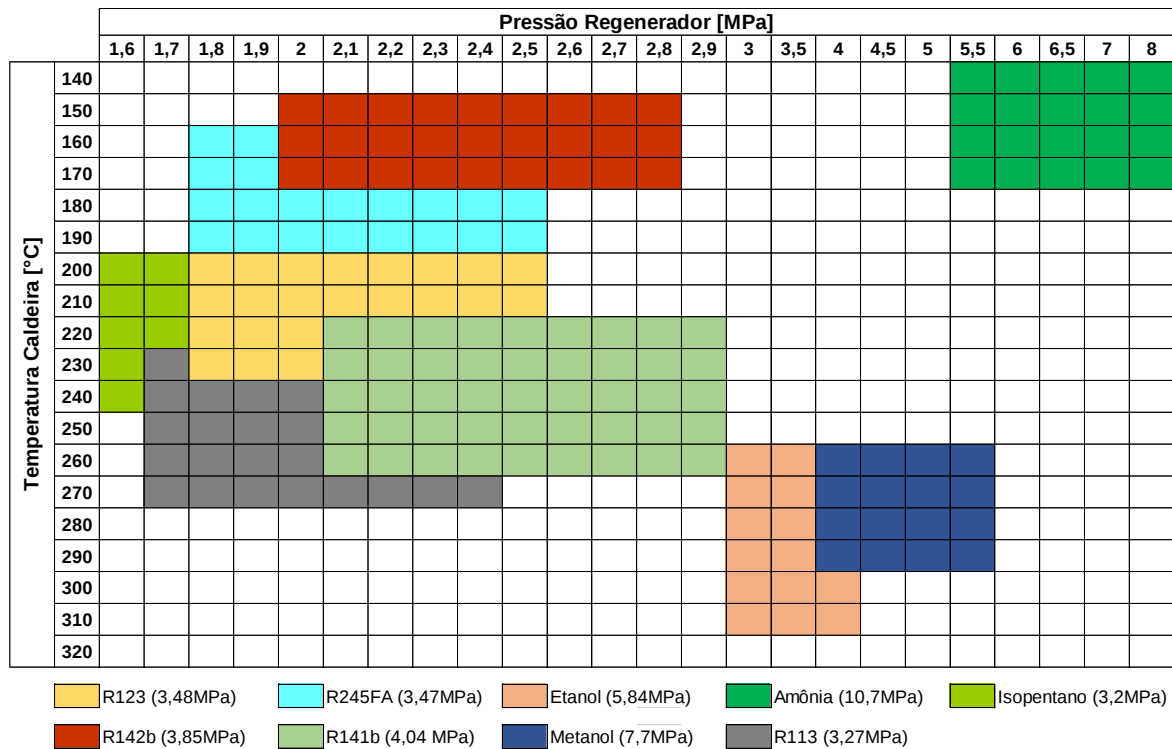


Figura 4.5 – Matriz de seleção do fluido de trabalho por faixa de operação de regeneração e evaporação do ciclo subcrítico superaquecido com extração de 40%.

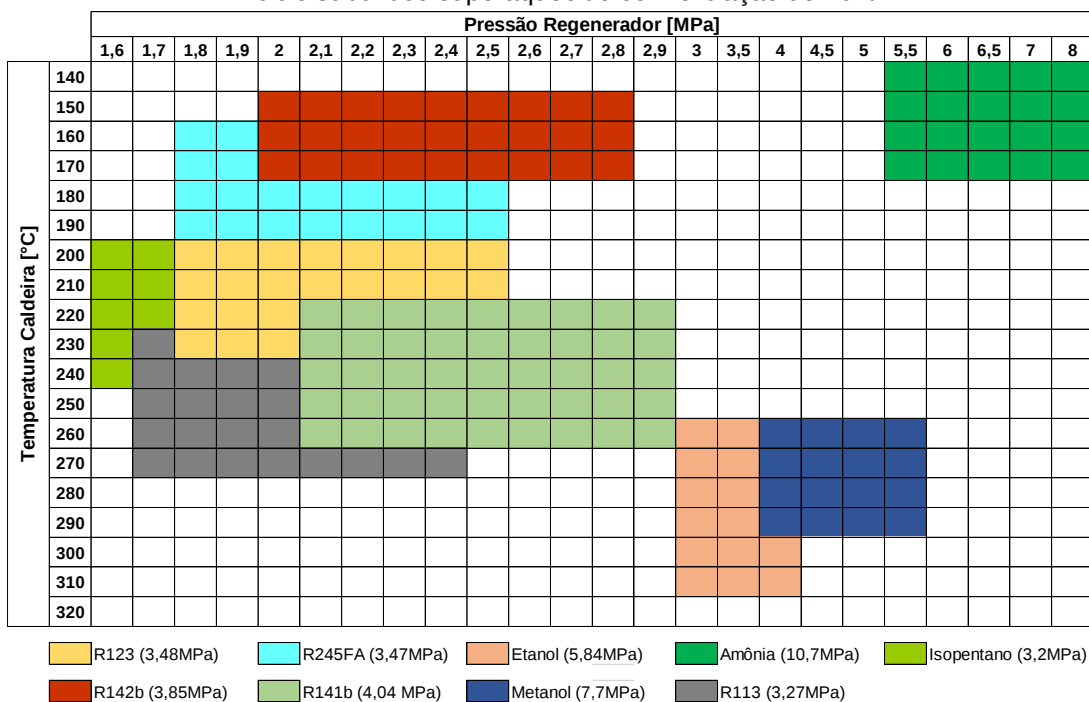
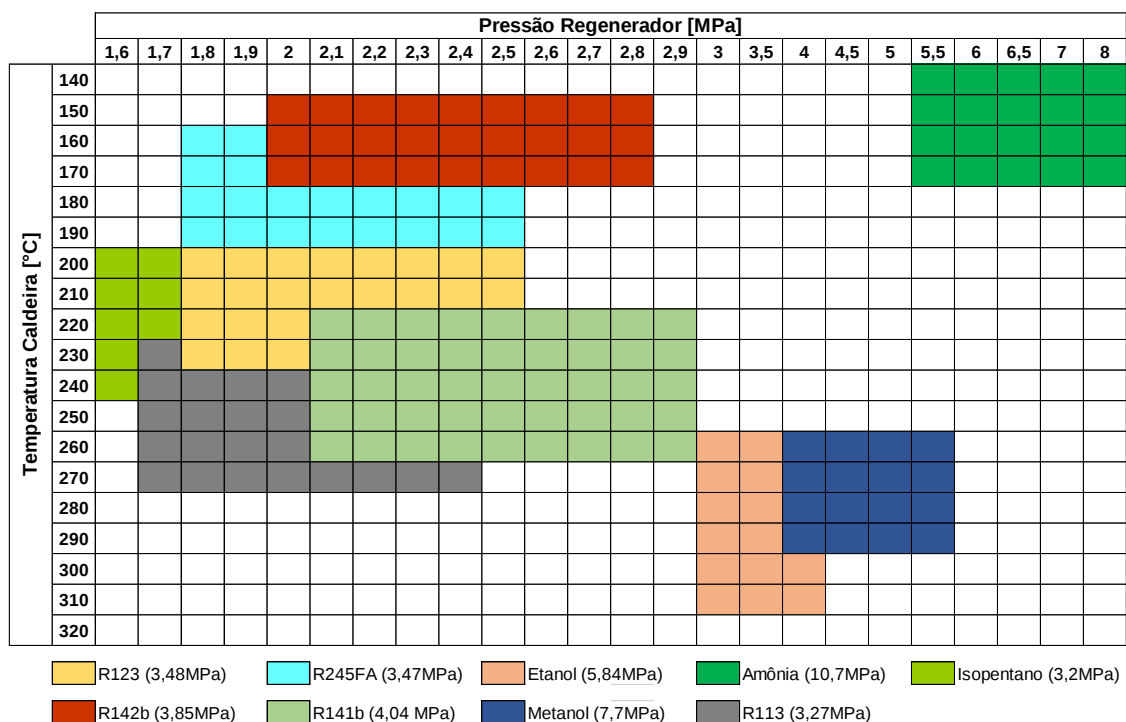


Figura 4.6 – Matriz de seleção do fluido de trabalho por faixa de operação de regeneração e evaporação do ciclo subcrítico superaquecido com extração de 50%.



Para o ciclo supercrítico, pode-se observar as Figs. 4.7, 4.8 e 4.9 que demonstram as matrizes de seleção de fluido de trabalho para extração de 30, 40 e 50% respectivamente. No eixo das ordenadas está a amplitude de operação da evaporação, de 130°C a 320°C, neste ciclo a pressão de evaporação foi fixada em 1,05 da pressão crítica do fluido e a temperatura sofreu variação, por este motivo foi utilizada a temperatura como referência. No eixo das abcissas está a amplitude de operação da regeneração, de 1,5 MPa a 8MPa.

Os fluidos R114, R236FA e R142b e os fluidos R123, R113 e R141b coincidem em alguns pontos e o fluido que apresenta melhor desempenho é a cor que prevalece. Assim como no ciclo subcrítico superaquecido, a extração da turbina não modificou significativamente o desempenho dos fluídos conforme ocorreu no ciclo subcrítico. O R142b apresenta a menor faixa de atuação (faixa onde ele apresenta melhor desempenho). O R236FA trabalha com os menores valores de pressão e temperatura. A amônia trabalha com os maiores valores de pressão e menores valores de temperatura. O fluido que apresenta a maior temperatura de operação é o etanol.

Em complemento as matrizes de seleção de fluido de trabalho, foi elaborado uma tabela de desempenho para cada fluido, onde estão dispostos os valores de eficiência térmica destes fluidos para cada ciclo, considerando a faixa de operação aplicável.

Figura 4.7 – Matriz de seleção do fluido de trabalho por faixa de operação de regeneração e evaporação do ciclo supercrítico com extração de 30%.

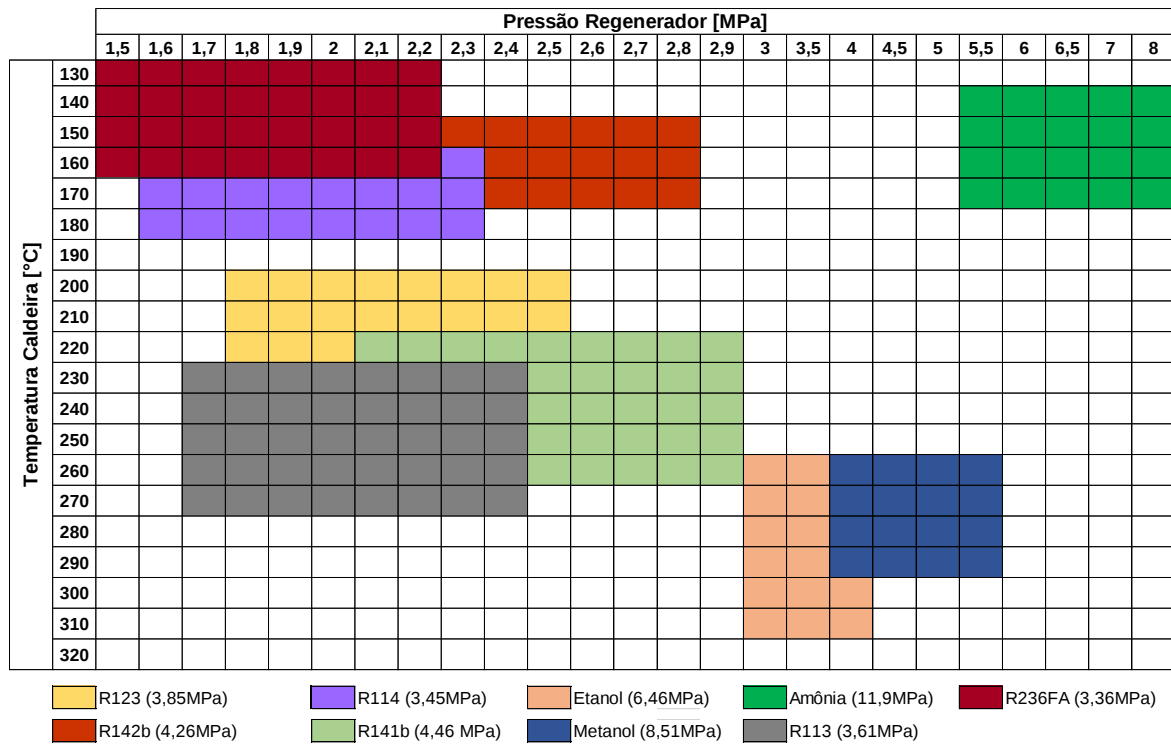


Figura 4.8 – Matriz de seleção do fluido de trabalho por faixa de operação de regeneração e evaporação do ciclo supercrítico com extração de 40%.

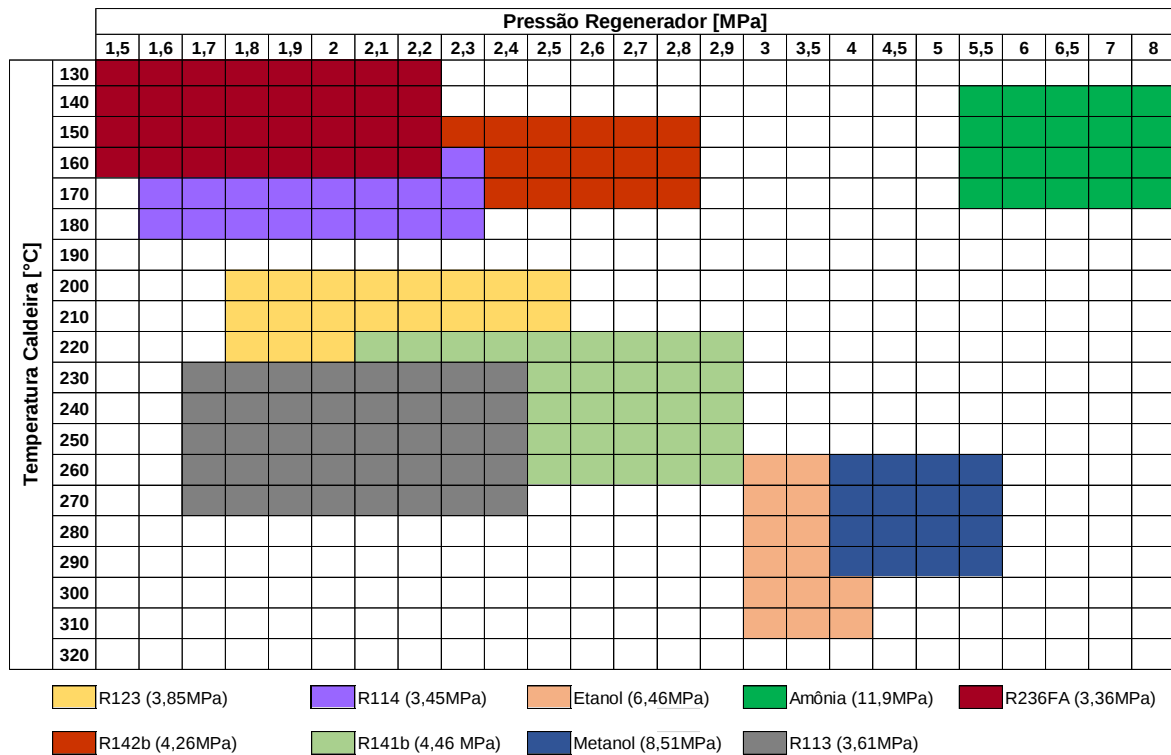
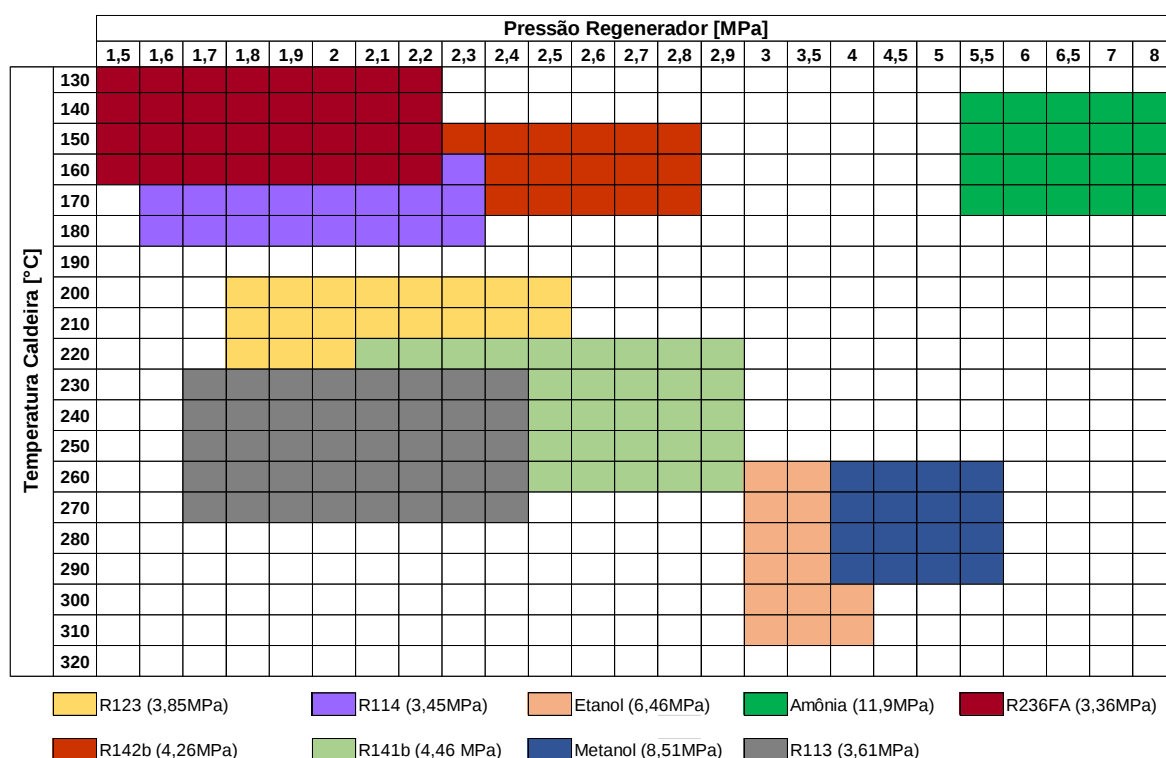


Figura 4.9 – Matriz de seleção do fluido de trabalho por faixa de operação de regeneração e evaporação do ciclo supercrítico com extração de 50%.



4.1.3.2 Tabela de desempenho por fluido de trabalho

As tabelas de desempenho por fluido foram elaboradas aplicando os modelos matemáticos desenvolvidos neste estudo nas possíveis combinações dos parâmetros de operação. Após a seleção do melhor fluido na matriz de seleção, é realizada a consulta da tabela de desempenho do fluido, em busca da combinação de parâmetros que resulta no melhor resultado. A Tab. 4.12 é referente ao fluido amônia, nela estão descritas todas combinações entre os parâmetros de operação e ciclos considerados neste estudo. Como abordado anteriormente a amônia tem maior desempenho quando opera com 50% de sua pressão crítica no regenerador (5,67 MPa), com extração de 30% e temperatura de evaporação (caldeira) 30% acima da temperatura crítica (ciclos superaquecido e supercrítico). A tabela de desempenho dos demais fluidos citados nas matrizes de seleção estão dispostas no anexo A deste estudo.

Tabela 4.12 – Tabela de desempenho do fluido de trabalho amônia.

Fluido de trabalho: Amônia									
Parâmetros comuns		Subcrítico		Subcrítico superaquecido			Supercrítico		
Pressão regeneração [MPa]	Extração	Pressão caldeira [MPa]	Eficiência térmica [%]	Pressão caldeira [MPa]	Temperatura Caldeira [°C]	Eficiência térmica [%]	Pressão caldeira [MPa]	Temperatura Caldeira [°C]	Eficiência térmica [%]
5,67	30%	9,6	15,68%	10,8	172	19,06%	11,9	172	19,32%
		10,2	15,67%	10,8	159	18,38%	11,9	159	18,51%
		10,8	15,50%	10,8	146	17,57%	11,9	146	17,43%
	40%	9,6	14,85%	10,8	172	18,59%	11,9	172	18,87%
		10,2	14,83%	10,8	159	17,84%	11,9	159	17,97%
		10,8	14,63%	10,8	146	16,94%	11,9	146	16,76%
	50%	9,6	13,87%	10,8	172	18,03%	11,9	172	18,34%
		10,2	13,85%	10,8	159	17,20%	11,9	159	17,33%
		10,8	13,63%	10,8	146	16,19%	11,9	146	15,98%
6,8	30%	9,6	14,92%	10,8	172	18,23%	11,9	172	18,52%
		10,2	14,91%	10,8	159	17,58%	11,9	159	17,73%
		10,8	14,74%	10,8	146	16,79%	11,9	146	16,66%
	40%	9,6	13,79%	10,8	172	17,42%	11,9	172	17,74%
		10,2	13,78%	10,8	159	16,72%	11,9	159	16,88%
		10,8	13,59%	10,8	146	15,85%	11,9	146	15,69%
	50%	9,6	12,50%	10,8	172	16,47%	11,9	172	16,83%
		10,2	12,49%	10,8	159	15,71%	11,9	159	15,88%
		10,8	12,30%	10,8	146	14,76%	11,9	146	14,57%
7,9	30%	9,6	14,26%	10,8	172	17,49%	11,9	172	17,80%
		10,2	14,25%	10,8	159	16,87%	11,9	159	17,04%
		10,8	14,09%	10,8	146	16,11%	11,9	146	15,98%
	40%	9,6	12,90%	10,8	172	16,39%	11,9	172	16,74%
		10,2	12,89%	10,8	159	15,73%	11,9	159	15,92%
		10,8	12,72%	10,8	146	14,91%	11,9	146	14,76%
	50%	9,6	11,36%	10,8	172	15,11%	11,9	172	15,51%
		10,2	11,37%	10,8	159	14,41%	11,9	159	14,62%
		10,8	11,19%	10,8	146	13,53%	11,9	146	13,38%

4.2 Trabalho líquido específico

Estão dispostos na Tab. 4.13 os maiores valores de trabalho líquido específico obtido pelos fluidos em cada ciclo, subcrítico, subcrítico superaquecido e no supercrítico. Os resultados foram obtidos a partir da aplicação das equações apresentadas no capítulo 3 nos fluidos em questão e da variação dos parâmetros de operação. Todos os fluidos foram submetidos as mesmas condições de operação. Os parâmetros de operação pré-definidos foram: pressão da caldeira, pressão do regenerador, temperatura de superaquecimento (quando houve superaquecimento) e percentual de extração da turbina de dois estágios. A variação dos parâmetros foram:

1. Pressão do regenerador de 50 e 70% da pressão crítica do fluido,
2. Pressão da caldeira no ciclo subcrítico de 85 a 90% da pressão crítica do fluido, no ciclo subcrítico superaquecido, a pressão da caldeira foi fixada em 95% da pressão crítica e no ciclo supercrítico a pressão também foi fixada em 105% da pressão crítica do fluido.
3. Extração da turbina de 30 a 50%.

4. Temperatura no ciclo subcrítico superaquecido e no supercrítico de 110 a 130% da temperatura crítica do fluido.

Tabela 4.13 – Máximo trabalho líquido específico por ciclo e fluido.

	Fluidos	Subcrítico w [kJ/kg]	Fluidos	Superaquecido w [kJ/kg]	Fluidos	Supercrítico w [kJ/kg]
Molhados	Metanol	234,00	Metanol	344,00	Metanol	341,90
	Etanol	196,70	Etanol	310,80	Etanol	310,70
	Amônia	134,80	Amônia	206,10	Amônia	204,10
	R152a	32,79	R152a	51,54	R152a	51,62
	R32	20,43	R32	32,21	R32	31,83
	R134a	19,48	R134a	30,19	R134a	30,43
	R22	17,80	R22	27,68	R22	27,52
Isentrópicos	R141b	49,59	R141b	72,63	R141b	76,76
	R123	38,15	R123	54,57	R123	55,12
	R142b	31,57	R142b	46,78	R142b	47,15
	R12	14,92	R12	23,10	R12	20,80
Secos	Isopentano	83,77	Isopentano	116,30	Isopentano	117,90
	Isobutano	53,69	Isobutano	78,54	R113	93,79
	R113	39,04	R113	53,20	Isobutano	79,65
	R245fa	35,30	R245fa	50,38	R245fa	50,94
	R114	21,92	R114	30,11	R114	43,66
	R236fa	20,20	R236fa	28,53	R236fa	49,87
	R227ea	13,64	R227ea	20,22	R227ea	20,58

Nos fluidos molhados, pode-se verificar que nos ciclos subcrítico, subcrítico com superaquecimento e no supercrítico o metanol, o etanol e a amônia foram os fluidos que apresentaram maiores valores de trabalho líquido específico. Observa-se também que em todos os ciclos os fluidos R32 e o R134a foram os que apresentaram desempenho inferior aos demais. O maior trabalho líquido específico obtido pelos fluidos molhados, no ciclo subcrítico superaquecido com o fluido metanol, apresentando 344 kJ/kg. Analisando os fluidos isentrópicos, pode-se verificar que em todos os ciclos os fluidos R141b e o R123 apresentaram os maiores valores de trabalho líquido específico. Em todos os ciclos o fluido R12 apresentou o menor desempenho. O melhor desempenho obtido pelos fluidos isentrópicos foi no ciclo supercrítico com o R141b, com $w = 76,76$ kJ/kg. Por fim, analisando os fluidos secos, pode-se verificar que o isopentano apresentou os maiores valores de trabalho líquido específico em todos os ciclos, no supercrítico 117,90kJ/kg, subcrítico superaquecido 116,30kJ/kg e no subcrítico 83,77kJ/kg. O menor desempenho nos três ciclos foi do fluido R227ea.

Tabela 4.14 – Valores dos parâmetros utilizados para obtenção do maior valor de trabalho líquido específico do ciclo subcrítico.

	Fluidos	Trabalho líquido específico [kJ/kg]	Pressão do regenerador	Pressão caldeira	Diferença entre pressões	Extração
Molhados	Metanol	234,00	0,5	0,85	0,35	0,3
	Etanol	196,70	0,5	0,85	0,35	0,3
	Amônia	134,80	0,5	0,85	0,35	0,3
	R152a	32,79	0,5	0,85	0,35	0,3
	R32	20,43	0,5	0,85	0,35	0,3
	R134a	19,48	0,5	0,85	0,35	0,3
	R22	17,80	0,5	0,85	0,35	0,3
Isentrópicos	R141b	49,59	0,5	0,85	0,35	0,3
	R123	38,15	0,5	0,85	0,35	0,3
	R142b	31,57	0,5	0,85	0,35	0,3
	R12	14,92	0,5	0,85	0,35	0,3
Secos	Isopentano	83,77	0,5	0,9	0,4	0,3
	Isobutano	53,69	0,5	0,9	0,4	0,3
	R113	39,04	0,5	0,85	0,35	0,3
	R245fa	35,30	0,5	0,85	0,35	0,3
	R114	21,92	0,5	0,85	0,35	0,3
	R236fa	20,20	0,5	0,85	0,35	0,3
	R227ea	13,64	0,5	0,85	0,35	0,3

Dentre todos os fluidos molhados, isentrópicos e secos, o metano apresentou o maior valor de trabalho líquido específico. Dentre todos os ciclos, o subcrítico superaquecido apresentou o maior valor de trabalho líquido específico 344kJ/kg. No ciclo subcrítico maior trabalho obtido foi de 234kJ/kg, utilizando fluido molhado (metanol). No ciclo supercrítico o maior trabalho líquido específico foi de 341,90 com o fluido molhado (metanol). Analisando todos os fluidos o que apresentou o pior desempenho foi o R227ea.

Na Tab. 4.14 pode-se visualizar quais os valores dos parâmetros de operação foram utilizados para obter o maior valor do trabalho líquido específico no ciclo subcrítico por fluido. Dois parâmetros se repetiram para todos os fluidos, a pressão adimensional do regenerador (0,5 = 50% da pressão crítica do fluido) e a extração do primeiro estágio da turbina (0,3 = 30% do total). Os valores da pressão adimensional da caldeira e consequentemente os valores da diferença entre as pressões adimensionais do

regenerador e da caldeira também se repetiram para praticamente em todos os fluidos, exceto no isobutano e isopentano.

Tabela 4.15 – Valores dos parâmetros utilizados para obtenção do maior valor de trabalho líquido específico do ciclo subcrítico superaquecido.

	Fluidos	Trabalho líquido específico [kJ/kg]	Pressão do regenerador	Temperatura da caldeira	Diferença entre pressões	Extração
Molhados	Metanol	344,00	0,5	1,23	0,45	0,3
	Etanol	310,80	0,5	1,3	0,45	0,3
	Amônia	206,10	0,5	1,3	0,45	0,3
	R152a	51,54	0,5	1,3	0,45	0,3
	R32	32,21	0,5	1,3	0,45	0,3
	R134a	30,19	0,5	1,3	0,45	0,3
	R22	27,68	0,5	1,3	0,45	0,3
Isentrópicos	R141b	72,63	0,5	1,3	0,45	0,3
	R123	54,57	0,5	1,3	0,45	0,3
	R142b	46,78	0,5	1,3	0,45	0,3
	R12	23,10	0,5	1,3	0,45	0,3
Secos	Isopentano	116,30	0,5	1,3	0,45	0,3
	Isobutano	78,54	0,5	1,3	0,45	0,3
	R113	53,20	0,5	1,3	0,45	0,3
	R245fa	50,38	0,5	1,3	0,45	0,3
	R114	30,11	0,5	1,3	0,45	0,3
	R236fa	28,53	0,5	1,3	0,45	0,3
	R227ea	20,22	0,5	1,3	0,45	0,3

A Tab. 4.15 mostra os valores dos parâmetros utilizados em cada fluido para a obtenção do máximo trabalho líquido específico do ciclo subcrítico superaquecido. Neste ciclo, todos os parâmetros se repetiram para todos fluidos, a pressão adimensional do regenerador 0,5 (50% da pressão crítica do fluido), a extração de 0,3 (30% do total), e a diferença entre as pressões adimensionais do regenerador e da caldeira de 0,45. A temperatura da caldeira também se repete em praticamente todos os fluidos 1,3 (130% da temperatura crítica do fluido) exceto o fluido metanol que alcança no máximo 1,23 (123% da temperatura crítica do fluido).

Tabela 4.16 – Valores dos parâmetros utilizados para obtenção da máxima eficiência térmica do ciclo supercrítico.

	Fluidos	Trabalho líquido específico [kJ/kg]	Pressão do regenerador	Temperatura da caldeira	Diferença entre pressões	Extração
Molhados	Metanol	341,90	0,5	1,23	0,55	0,3
	Etanol	310,70	0,5	1,3	0,55	0,3
	Amônia	204,10	0,5	1,3	0,55	0,3
	R152a	51,62	0,5	1,3	0,55	0,3
	R32	31,83	0,5	1,3	0,55	0,3
	R134a	30,43	0,5	1,3	0,55	0,3
	R22	27,52	0,5	1,3	0,55	0,3
Isentrópicos	R141b	76,76	0,5	1,3	0,55	0,3
	R123	55,12	0,5	1,3	0,55	0,3
	R142b	47,15	0,5	1,3	0,55	0,3
	R12	20,80	0,5	1,3	0,55	0,3
Secos	Isopentano	117,90	0,5	1,3	0,55	0,3
	R113	93,79	0,5	1,3	0,55	0,3
	Isobutano	79,65	0,5	1,3	0,55	0,3
	R245fa	50,94	0,5	1,3	0,55	0,3
	R114	43,66	0,5	1,3	0,55	0,3
	R236fa	49,87	0,5	1,3	0,55	0,3
	R227ea	20,58	0,5	1,3	0,55	0,3

Na Tab. 4.16 estão dispostos os valores dos parâmetros de operação de todos os fluidos de trabalho que proporcionaram os maiores valores de trabalho líquido específico no ciclo supercrítico. Os valores dos parâmetros pressão adimensional do regenerador de 0,5, extração do primeiro estágio da turbina de 0,3 e a diferença entre as pressões adimensionais do regenerador e da caldeira 0,55 se repetem para todos os fluidos. Já a temperatura adimensional de 1,3 se repete praticamente para todos os fluidos, exceto o fluido metanol que alcança no máximo 1,23 (123% da temperatura crítica do fluido). Todos os ciclos dispostos nas Tabs. 4.13, 4.14 e 4.15 apresentam os mesmos valores dos parâmetros pressão adimensional do regenerador (0,5), e a extração do primeiro estágio da turbina (0,3). Então pode-se notar que os maiores valores de trabalho líquido específico dos ciclos acontecem com a menor pressão de regeneração e o menor percentual de extração. As temperaturas que proporcionam os melhores desempenhos nos ciclos superaquecido e supercrítico são as maiores utilizadas no estudo.

4.2.1 Parâmetros de influência nos resultados do trabalho líquido específico de cada ciclo

A partir deste tópico os fluidos analisados serão os três que apresentaram melhor desempenho por tipo (molhado, seco e isentrópico) e por ciclo, vide Tab. 4.17:

Tabela 4.17 – Fluidos que apresentaram melhor desempenho por ciclo.

	Fluidos	Subcrítico w [kJ/kg]	Fluidos	Subcrítico superaquecido w [kJ/kg]	Fluidos	Supercrítico w [kJ/kg]
Molhados	Metanol	234	Metanol	344	Metanol	341,9
	Etanol	196,7	Etanol	310,8	Etanol	310,7
	Amônia	134,8	Amônia	206,1	Amônia	204,1
Isentrópicos	R141b	49,59	R141b	72,63	R141b	76,76
	R123	38,15	R123	54,57	R123	55,12
	R142b	31,57	R142b	46,78	R142b	47,15
Secos	Isopentano	83,77	Isopentano	116,3	Isopentano	117,9
	Isobutano	53,69	Isobutano	78,54	R113	93,79
	R113	39,04	R113	53,2	Isobutano	79,65

Assim como no tópico 4.1.1, foram analisados os parâmetros que apresentaram maior influência nos resultados do trabalho líquido específico dos ciclos e dos fluidos descritos na Tab. 4.17. Abaixo estão dispostos os resultados obtidos, Tabs. 4.18, 4.19 e 4.20.

Na Tab. 4.18 pode-se notar que o parâmetro que mais influenciou o resultado do trabalho líquido específico do ciclo subcrítico para todos os fluidos foi a extração da turbina. A pressão adimensional do regenerador, a diferença entre as pressões adimensionais de regeneração e a da caldeira e a pressão adimensional da caldeira tiveram pouco impacto no resultado do trabalho líquido.

Nas Tabs. 4.19 e 4.20 são apresentados os percentuais de influência de cada parâmetro no trabalho líquido específico dos ciclos subcrítico superaquecido e supercrítico para cada fluido. Pode-se notar que para ambos, a extração da turbina e a temperatura de superaquecimento apresentaram maior influência no resultado do trabalho líquido. A

pressão adimensional do regenerador e consequentemente a diferença entre as pressões adimensionais do regenerador e da caldeira pouco influenciaram no trabalho líquido.

Tabela 4.18 – Influência dos parâmetros de operação no trabalho líquido específico do ciclo subcrítico.

	Fluidos	Pressão do regenerador	Pressão da caldeira	Diferença entre pressões	Extração
Molhados	Metanol	1,43%	0,91%	0,42%	97,58%
	Etanol	0,96%	3,20%	0,01%	95,70%
	Amônia	8,19%	4,44%	2,62%	86,79%
Isentrópicos	R141b	2,37%	2,77%	0,40%	94,64%
	R123	2,80%	0,24%	1,64%	96,77%
	R142b	6,63%	0,60%	3,83%	92,34%
Secos	Isopentano	2,64%	0,00%	2,19%	97,20%
	Isobutano	7,11%	0,11%	5,01%	92,37%
	R113	1,89%	0,80%	0,68%	97,16%

Tabela 4.19 – Influência dos parâmetros de operação no trabalho líquido específico do ciclo subcrítico superaquecido.

	Fluidos	Pressão do regenerador	Temperatura de superaquecimento	Diferença entre pressões	Extração
Molhados	Metanol	1,84%	18,02%	1,84%	79,85%
	Etanol	1,26%	26,65%	1,26%	71,68%
	Amônia	7,23%	31,34%	7,23%	60,81%
Isentrópicos	R141b	2,42%	26,27%	2,42%	70,88%
	R123	2,80%	22,66%	2,80%	74,13%
	R142b	5,84%	27,00%	5,84%	66,59%
Secos	Isopentano	2,76%	19,13%	2,76%	77,75%
	Isobutano	6,53%	24,29%	6,53%	68,64%
	R113	2,00%	20,10%	2,00%	77,56%

Tabela 4.20 – Influência dos parâmetros de operação no trabalho líquido específico do ciclo supercrítico.

	Fluidos	Pressão do regenerador	Temperatura supercrítica	Diferença entre pressões	Extração
Molhados	Metanol	1,62%	24,22%	1,62%	73,82%
	Etanol	1,14%	31,76%	1,14%	66,64%
	Amônia	5,39%	44,58%	5,39%	49,26%
Isentrópicos	R141b	2,11%	33,53%	2,11%	63,81%
	R123	2,50%	29,21%	2,50%	67,79%
	R142b	4,78%	38,20%	4,78%	56,27%
Secos	Isopentano	2,54%	24,31%	2,54%	72,73%
	R113	1,83%	25,06%	1,83%	72,71%
	Isobutano	5,54%	34,04%	5,54%	59,75%

4.2.2 Agrupamento dos parâmetros relevantes e desenvolvimento de modelos matemáticos do trabalho líquido específico

As Tabs. 4.21, 4.22 e 4.23, apresentam os níveis de influência que a junção dos principais parâmetros exerce sobre o desempenho do trabalho líquido específico de cada ciclo por fluido.

Considerando os fluidos que apresentaram os melhores desempenhos nos ciclos subcrítico, subcrítico superaquecido e supercrítico e o nível de influência que cada parâmetro exerce sobre o resultado destes desempenhos, foi realizado o agrupamento dos parâmetros mais relevantes, a fim de se obter níveis maiores de explicação em relação ao resultado.

Os parâmetros que mostraram ter maior influência sobre o resultado do trabalho líquido específico do ciclo subcrítico foram: a pressão adimensional do regenerador $P_{r,reg}$, a diferença entre as pressões adimensionais da caldeira e do regenerador DP_r e a extração da turbina y . Nos ciclos subcrítico superaquecido e supercrítico os parâmetros que tiveram a maior influência sobre o resultado foram: a temperatura adimensional da caldeira T_r , a diferença entre as pressões adimensionais da caldeira e do regenerador DP_r e a extração

da turbina y . Através da regressão linear múltipla foi realizada a junção destes parâmetros e descrito o modelo matemático para cada fluido selecionado.

Tabela 4.21 – Influência do agrupamento dos parâmetros no resultado do trabalho líquido específico do ciclo subcrítico e modelo matemático correspondente.

	Fluidos	Modelo Matemático	Influência dos parâmetros agrupados	Erro médio absoluto
Molhados	Metanol	$w = 397,54 - 97,89P_{r,reg} - 60,11DP_r - 311,83y$	99,90%	0,536
	Etanol	$w = 370,25 - 122,50P_{r,reg} - 96,11DP_r - 262,83y$	99,85%	0,613
	Amônia	$w = 274,76 - 126,39P_{r,reg} - 75,26DP_r - 166,43y$	99,34%	0,847
Isentrópicos	R141b	$w = 96,33 - 34,76P_{r,reg} - 23,76DP_r - 69,47y$	99,74%	0,228
	R123	$w = 61,98 - 13,57P_{r,reg} - 4,99DP_r - 50,48y$	99,78%	0,146
	R142b	$w = 54,76 - 17,28P_{r,reg} - 6,49DP_r - 40,29y$	99,52%	0,180
Secos	Isopentano	$w = 125,52 - 17,21P_{r,reg} - 1,23DP_r - 111,85y$	99,83%	0,296
	Isobutano	$w = 88,29 - 23,85P_{r,reg} - 4,72DP_r - 68,94y$	99,53%	0,307
	R113	$w = 68,12 - 17,70P_{r,reg} - 10,02DP_r - 55,12y$	99,83%	0,147

Analisando o fluido de trabalho metanol na Tab. 4.18, pode-se observar que a influência dos parâmetros nos resultados deste fluido no ciclo subcrítico foi em ordem decrescente: extração 97,58%, pressão adimensional do regenerador 1,43% e a diferença entre as pressões adimensionais da caldeira e do regenerador 0,42%. O agrupamento destes parâmetros explica 99,90% do resultado do trabalho líquido específico do fluido metanol no ciclo subcrítico, vide Tab. 4.21. O modelo matemático que descreve o comportamento do trabalho líquido específico em função destes parâmetros está descrito na Eq. 4.4:

$$w = 397,54 - 97,89P_{r,reg} - 60,11DP_r - 311,83y \quad (4.2)$$

onde w é o trabalho líquido específico do ciclo, $P_{r,reg}$ é a pressão adimensional do regenerador (percentual da pressão crítica do fluido), DP_r é a diferença entre as pressões adimensionais da caldeira e do regenerador e y é a extração da turbina de dois estágios.

Tabela 4.22 - Influência do agrupamento dos parâmetros no resultado do trabalho líquido específico do ciclo subcrítico superaquecido.

	Fluidos	Modelo Matemático	Influência dos parâmetros agrupados	Erro médio absoluto
Molhados	Metanol	$w = 81,37 + 291,62T_r + 63,44DP_r - 417,83y$	99,67%	1,612
	Etanol	$w = 104,13 + 225,67T_r + 49,06DP_r - 370,11y$	99,54%	1,771
	Amônia	$w = 35,45 + 155,28T_r + 74,56DP_r - 216,28y$	99,30%	1,387
Isentrópicos	R141b	$w = 20,99 + 54,36T_r + 16,49DP_r - 89,30y$	99,51%	0,446
	R123	$w = 22,21 + 35,16T_r + 12,35DP_r - 63,58y$	99,54%	0,294
	R142b	$w = 12,76 + 32,72T_r + 15,22DP_r - 51,38y$	99,36%	0,292
Secos	Isopentano	$w = 56,95 + 68,17T_r + 25,91DP_r - 137,41y$	99,60%	0,573
	Isobutano	$w = 25,66 + 51,37T_r + 26,63DP_r - 86,34y$	99,38%	0,476
	R113	$w = 28,90 + 34,11T_r + 10,76DP_r - 67,00y$	99,62%	0,278

Tabela 4.23 - Influência do agrupamento dos parâmetros no resultado do trabalho líquido específico do ciclo supercrítico.

	Fluidos	Modelo Matemático	Influência dos parâmetros agrupados	Erro médio absoluto
Molhados	Metanol	$w = 10,59 + 340,66T_r + 59,94DP_r - 404,83y$	99,61%	1,807
	Etanol	$w = 66,87 + 249,17T_r + 47,11DP_r - 360,94y$	99,47%	1,995
	Amônia	$w = -24,52 + 194,39T_r + 67,61DP_r - 204,33y$	99,13%	1,590
Isentrópicos	R141b	$w = 11,80 + 63,10T_r + 15,84DP_r - 87,04y$	99,38%	0,536
	R123	$w = 13,94 + 40,85T_r + 11,96DP_r - 62,23y$	99,47%	0,345
	R142b	$w = 0,953 + 40,83T_r + 14,44DP_r - 49,55y$	99,15%	0,357
Secos	Isopentano	$w = 42,55 + 78,29T_r + 25,28DP_r - 135,41y$	99,52%	0,654
	R113	$w = 57,30 + 38,59T_r + 10,47DP_r - 65,91y$	99,55%	0,314
	Isobutano	$w = 8,39 + 63,37T_r + 25,56DP_r - 83,96y$	99,24%	0,544

O modelo foi validado através da comparação entre os valores do trabalho obtidos pelas leis básicas da termodinâmica e os valores obtidos através desta equação de regressão. Todos os fluidos das Tabs. 4.21, 4.22 e 4.23 foram analisados utilizando a mesma metodologia empregada para o fluido metanol.

4.2.3 Método para seleção de fluido de trabalho

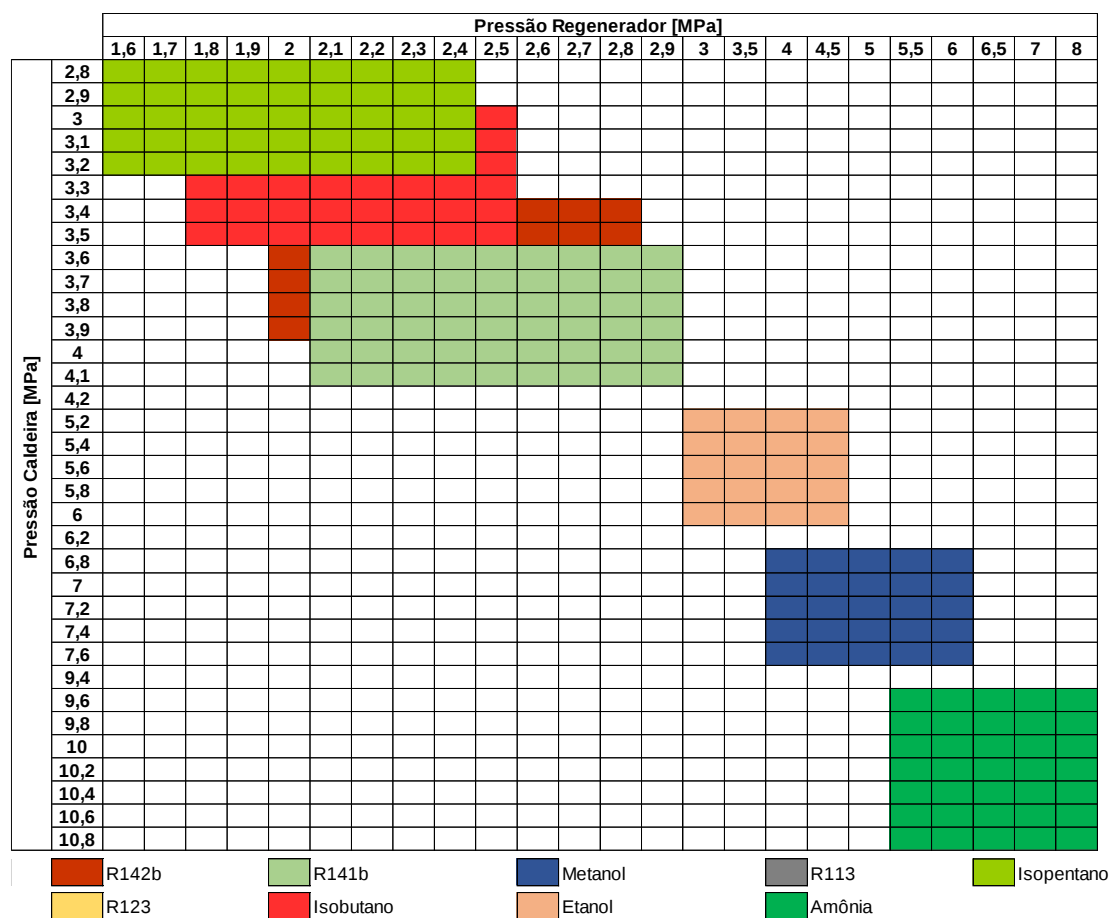
Este tópico abordará a sistemática desenvolvida para a seleção de fluido de trabalho a partir do trabalho líquido específico. Nos itens 4.2.3.1, 4.2.3.2 e 4.2.3.3 estão as matrizes de seleção de fluido de trabalho por faixa de operação. O objetivo destas matrizes é indicar o melhor fluido por faixa de operação absoluta, considerando a variação de ciclo (subcrítico, subcrítico superaquecido e supercrítico) e a extração da turbina (30, 40 e 50%). Optou-se por apresentar os valores de operação absolutos, pois com base nestes valores torna-se possível a eventual seleção dos dispositivos que compõem o ciclo de geração de energia. Para finalizar a seleção do fluido de trabalho e encontrar os parâmetros ótimos de operação, após utilização da matriz de seleção aplicável, deve-se consultar a tabela de desempenho do fluido selecionado. Esta tabela contém o trabalho líquido específico do fluido por ciclo e combinação dos valores de operação. As tabelas serão apresentadas no item 4.2.3.4.

4.2.3.1 Seleção do fluido de trabalho a partir do trabalho líquido específico do ciclo

Considerando o desempenho apresentado pelos fluidos de trabalho nos três modelos de ciclo estudados, foram elaboradas as matrizes de seleção. Como não houve significativa alteração no desempenho dos fluidos com a variação da extração da turbina. Foi elaborado uma única matriz de seleção para cada modelo de ciclo que representa o desempenho dos fluidos para extração de 30, 40 e 50%, vide Figs. 4.10, 4.11 e 4.12.

Para o ciclo subcrítico Fig. 4.10, no eixo das ordenadas está representada a amplitude de operação da evaporação, de 2,8 MPa a 10,8 MPa. No eixo das abcissas está a amplitude de operação da regeneração, de 1,6 MPa a 8 MPa. Os fluidos amônia, metanol e etanol estão em faixas distintas. Os fluidos R141b, R142b, R113, R123, isobutano e isopentano em algum momento foram submetidos aos mesmos valores de operação, pois a pressão crítica destes se encontram próximas.

Figura 4.10 – Matriz de seleção do fluido de trabalho por faixa de operação de regeneração e evaporação do ciclo subcrítico com extração de 30, 40 e 50%.

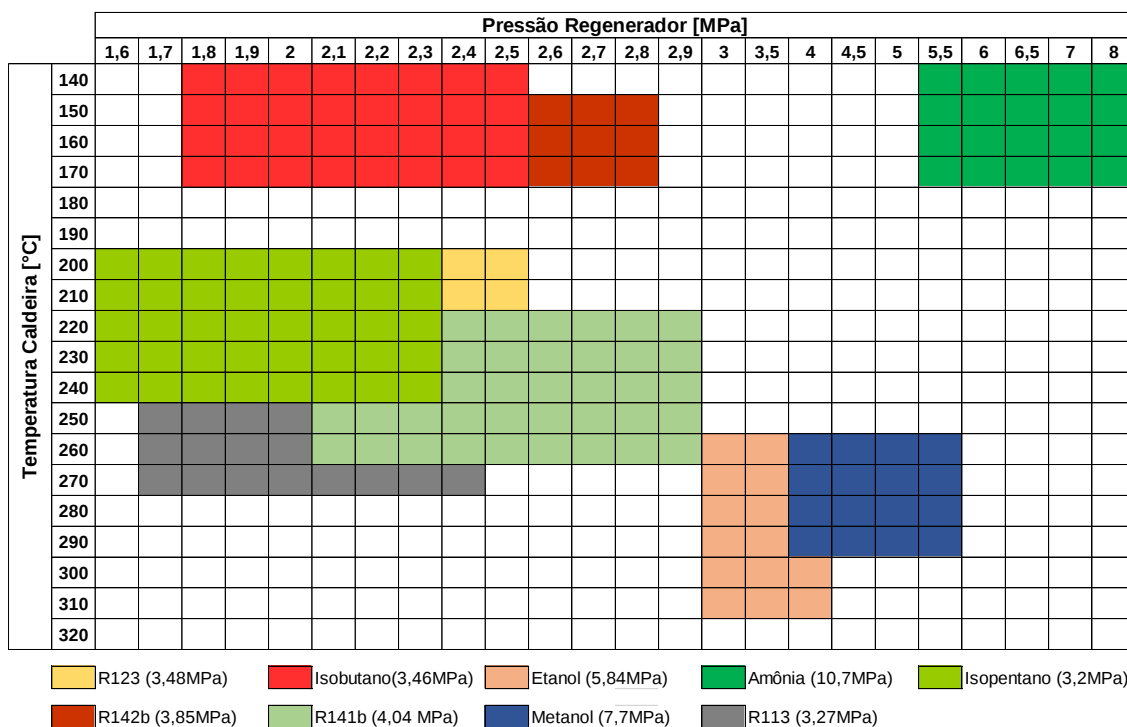


O fluido R113 não aparece em nenhuma faixa de operação. Isto ocorre pois o fluido isopentano opera praticamente no mesmo range que o R113 e apresenta maior valor de trabalho líquido específico, sendo assim o fluido que aparece na matriz é o isopentano (preenchimento verde). O mesmo se repete com o fluido R123, que opera na mesma faixa que o isobutano e apresenta desempenho inferior, sendo, portanto, sobreposto por este fluido.

No ciclo subcrítico superaquecido Fig. 4.11, o eixo das ordenadas representa a amplitude de operação da evaporação, de 140°C a 320°C, neste ciclo a pressão de evaporação foi fixada em 0,95 da pressão crítica do fluido e a temperatura sofreu variação, por este motivo foi utilizada a temperatura como referência. No eixo das abcissas está a amplitude de operação da regeneração, de 1,6 MPa a 8 MPa. A amônia é o único fluido de trabalho que opera com a combinação de valores de pressão e temperatura diferente dos demais. Os fluidos etanol e metanol coincidem em alguns pontos e o fluido que apresenta melhor desempenho é o metanol, por este motivo é a cor que prevalece. Assim acontece com os fluidos R142b e isobutano e com os fluidos isopentano, R123, R113 e R141b. O

fluido que apresenta a menor faixa de atuação (faixa onde ele apresenta melhor desempenho) é o R123. O fluido que trabalha com os menores valores de pressão é o isopentano e o fluido que trabalha com os maiores valores de pressão é a amônia. Os fluidos que operam com os menores valores de temperatura são a amônia e o isobutano. O fluido que apresenta a maior temperatura de operação é o etanol.

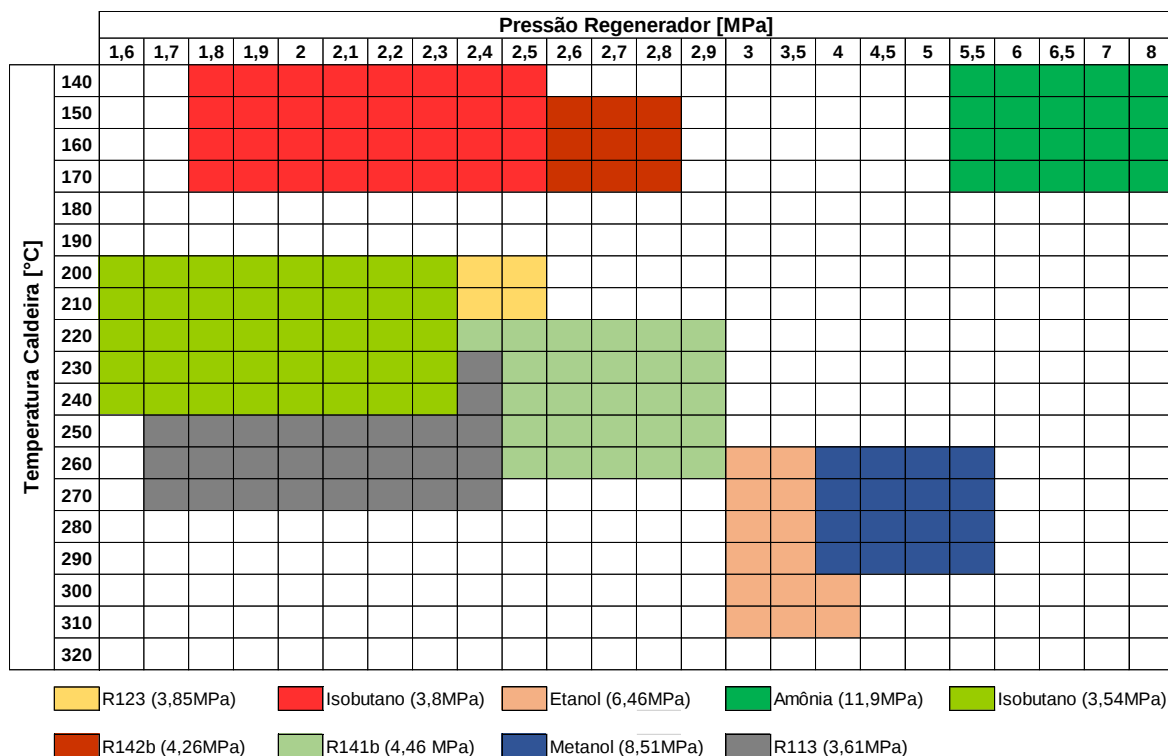
Figura 4.11 – Matriz de seleção do fluido de trabalho por faixa de operação de regeneração e evaporação do ciclo subcrítico superaquecido com extração de 30, 40 e 50%.



Para o ciclo supercrítico Fig. 4.12, no eixo das ordenadas se encontra a amplitude de operação da evaporação, de 140°C a 320°C, neste ciclo a pressão de evaporação foi fixada em 1,05 da pressão crítica do fluido e a temperatura sofreu variação, por este motivo foi utilizada a temperatura como referência. No eixo das abcissas está a amplitude de operação da regeneração, de 1,6 MPa a 8 MPa. O fluido que apresenta a menor faixa de atuação (faixa onde ele apresenta melhor desempenho) é o R142b. O fluido que trabalha com os menores valores de pressão é o isopentano e o fluido que trabalha com os maiores valores de pressão é a amônia. Os fluidos que operam com os menores valores de temperatura são a amônia e o isobutano. O fluido que apresenta a maior temperatura de operação é o etanol.

Em complemento as matrizes de seleção de fluido de trabalho, foi elaborado uma tabela de desempenho para cada fluido, onde estão dispostos os valores de trabalho destes fluidos para cada ciclo, considerando a faixa de operação aplicável.

Figura 4.12 – Matriz de seleção do fluido de trabalho por faixa de operação de regeneração e evaporação do ciclo supercrítico com extração de 30%.



4.2.3.2 Tabela de desempenho por fluido de trabalho

As tabelas de desempenho por fluido foram elaboradas aplicando os modelos matemáticos desenvolvidos neste estudo nas possíveis combinações dos parâmetros de operação. Após a seleção do melhor fluido na matriz de seleção, é realizado a consulta da tabela de desempenho do fluido, em busca da combinação de parâmetros que resulta no melhor resultado (maior trabalho líquido específico). A Tab. 4.24 é referente ao fluido amônia, nela estão descritas todas combinações entre os parâmetros de operação e ciclos considerados neste estudo. Como abordado anteriormente a amônia tem maior desempenho quando opera com 50% de sua pressão crítica no regenerador (5,67 MPa), com extração de 30% e temperatura de evaporação (caldeira) 30% acima da temperatura crítica (ciclos superaquecido e supercrítico). A tabela de desempenho dos demais fluidos citados nas matrizes de seleção estão dispostas no anexo B deste estudo.

Tabela 4.24 – Tabela de desempenho do fluido de trabalho amônia

Fluido de trabalho: Amônia									
Parâmetros comuns		Subcrítico		Subcrítico superaquecido			Supercrítico		
Pressão regeneração [MPa]	Extração	Pressão caldeira [MPa]	Trabalho líquido específico [kJ/kg]	Pressão caldeira [MPa]	Temperatura Caldeira [°C]	Trabalho líquido específico [kJ/kg]	Pressão caldeira [MPa]	Temperatura Caldeira [°C]	Trabalho líquido específico [kJ/kg]
5,67	30%	9,6	134,80	10,8	172	206,10	11,9	172	204,10
		10,2	131,30	10,8	159	189,80	11,9	159	185,00
		10,8	125,30	10,8	146	170,60	11,9	146	160,40
	40%	9,6	118,70	10,8	172	185,00	11,9	172	183,90
		10,2	115,80	10,8	159	169,90	11,9	159	166,00
		10,8	110,60	10,8	146	152,10	11,9	146	143,20
	50%	9,6	102,70	10,8	172	163,80	11,9	172	163,60
		10,2	100,30	10,8	159	150,00	11,9	159	147,10
		10,8	95,85	10,8	146	133,60	11,9	146	126,00
6,8	30%	9,6	130,30	10,8	172	199,30	11,9	172	197,90
		10,2	127,00	10,8	159	183,70	11,9	159	179,50
		10,8	121,30	10,8	146	165,20	11,9	146	155,50
	40%	9,6	112,80	10,8	172	176,10	11,9	172	175,70
		10,2	110,20	10,8	159	161,90	11,9	159	158,80
		10,8	105,30	10,8	146	145,10	11,9	146	136,80
	50%	9,6	95,41	10,8	172	152,90	11,9	172	153,50
		10,2	93,45	10,8	159	140,10	11,9	159	138,20
		10,8	89,41	10,8	146	124,90	11,9	146	118,10
7,9	30%	9,6	126,50	10,8	172	193,30	11,9	172	192,40
		10,2	123,40	10,8	159	178,30	11,9	159	174,70
		10,8	117,90	10,8	146	160,60	11,9	146	151,40
	40%	9,6	107,90	10,8	172	168,30	11,9	172	168,50
		10,2	105,50	10,8	159	154,90	11,9	159	152,50
		10,8	101,00	10,8	146	139,00	11,9	146	131,50
	50%	9,6	89,34	10,8	172	143,30	11,9	172	144,70
		10,2	87,70	10,8	159	131,50	11,9	159	130,40
		10,8	84,06	10,8	146	117,50	11,9	146	111,50

5. CONCLUSÕES E EXTENSÕES

Pode-se concluir que a metodologia utilizada foi eficaz, visto que todos os objetivos foram alcançados. Primeiramente foi realizado a análise termodinâmica no ciclo Rankine orgânico regenerativo, o qual utiliza o aquecedor de água de alimentação fechado para realizar o superaquecimento. A análise foi realizada nos três modelos de ciclo propostos, e foram obtidas as expressões de eficiência térmica e trabalho líquido específico. Através destas expressões foi possível simular o desempenho (eficiência térmica e trabalho líquido específico) dos fluídos de trabalho sob diversas condições de operação (variação dos parâmetros) e concluir que os fluídos molhados apresentaram os melhores resultados. Dentre todos os fluídos analisados, o metanol e o etanol foram os que se destacaram.

Os parâmetros de operação que apresentavam maior influência sobre o resultado da eficiência térmica e do trabalho líquido específico no ciclo subcrítico foram: a pressão do regenerador, a diferença entre as pressões da caldeira e regenerador e a extração da turbina. Nos ciclos subcrítico superaquecido e supercrítico, foram: a temperatura da caldeira, a diferença entre as pressões do regenerador e caldeira e a extração da turbina. O parâmetro que mais influenciou nos resultados de todos os ciclos foi a extração da turbina.

Diante dos parâmetros de maior influência, utilizando a regressão linear múltipla foi possível desenvolver modelos matemáticos de eficiência térmica e trabalho líquido específico para cada fluido e ciclo, estes modelos foram validados pelo cálculo do erro médio absoluto. O maior erro médio absoluto dos modelos matemáticos da eficiência térmica foi de 0,845%, ocorreu no ciclo subcrítico no fluído isopentano. Nos modelos matemáticos do trabalho líquido específico, o maior erro médio absoluto foi de 1,995 kJ/kg no ciclo supercrítico com o fluído etanol.

Utilizando os modelos matemáticos elaborados por este estudo, foi desenvolvido o método de seleção de fluído de trabalho por eficiência térmica e trabalho líquido específico, onde é possível de maneira simples visualizar o fluído de trabalho que apresenta o melhor desempenho (eficiência térmica e trabalho líquido específico) por faixa absoluta de operação e por modelo de ciclo.

Este estudo se limita aos parâmetros de operação selecionados, a amplitude destes parâmetros (fixos e variáveis), os modelos de ciclo, os componentes dos ciclos e os fluídos

de trabalhos analisados. Outra limitação que vale ressaltar é a falta de definição da fase do fluido de trabalho após o primeiro estágio da turbina.

Para os estudos futuros pretende-se analisar a eficiência térmica e o trabalho líquido do ciclo Rankine orgânico modificado combinado, onde haverá o acréscimo não só do aquecedor de fluido de alimentação fechado, mas também, de um reaquecedor que será utilizado para aumentar a temperatura de entrada do segundo estágio da turbina. Nestes estudos futuros, pretende-se ainda, aumentar a amplitude dos parâmetros que sofreram variação neste estudo e variar também os que permaneceram fixos, e com isto, analisar a influência destes na eficiência térmica e no trabalho líquido do ciclo.

REFERÊNCIAS

- Bertrand, T.F. et al. Aug. 2009. "Fluid selection for a low-temperature solar organic Rankine cycle". *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, No. 11-12, pp. 2468-2476.
- Çengel, Y.A.; Boles, M.A. 2013. *Termodinâmica*. McGraw-Hill, São Paulo, 7th edition.
- Chen, H.; Goswami, D.T.; Stefanakos, E.K. Dec. 2010. "A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, No. 9, pp. 3059-3067.
- Drescher, U.; Bruggemann, D. Jan. 2007. "Fluid selection for the organic Rankine cycle (ORC) in biomass power and heat plants". *Applied Thermal Engineering*, Vol. 27, No. 1, pp. 223-228.
- Farias, L.M.; Sellito, M.A. Jun. 2011. "Uso da energia ao longo da história: evolução e perspectivas futuras". *Revista Liberato*, Novo Hamburgo, Vol. 12, No. 17, p. 01-106.
- Imran, M. et al. Nov. 2014. "Thermo-economic optimization of Regenerative Organic Rankine Cycle for waste heat recovery applications". *Energy Conversion and Management*, Vol. 87, pp. 107-118.
- International Energy Agency. Explore energy data by category, indicator, country or region. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics>>. Acesso em Mar/2020.
- Javanshir, A.; Sarunac, N. Jan. 2017. "Thermodynamic analysis of a simple Organic Rankine Cycle". *Energy*, Vol. 118, pp. 85-96.
- Kroos, K.A.; Potter, M.C. 2016. *Termodinâmica para engenheiros*. Cengage Learning, São Paulo, 1^a Edição.
- Kuo, C. et al. Oct. 2011. "Analysis of a 50 kW organic Rankine cycle system". *Energy*, Vol. 36, No. 10, pp. 5877-5885.
- Lakew, A.A.; Bolland, O. Jul. 2010. "Working fluids for low-temperature heat source". *Applied Thermal Engineering*, Vol. 30, No. 10, pp. 1262-1268.
- Lecompte, S. et al. Jul. 2015. "Review of organic Rankine cycle (ORC) architectures for waste heat recovery". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 47, pp. 448-461.

- Mago, P.J. et al. Jun. 2008. "An examination of regenerative organic Rankine cycles using dry fluids". *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, No. 8-9, pp. 998-1007.
- Moran, M.J. et al. 2018. *Princípios de Termodinâmica para Engenharia*. LTC, Rio de Janeiro, 8th edition.
- Rayegan, R.; Tao, Y.X. Fev. 2011. "A procedure to select working fluids to solar organic Rankine cycle (ORCs) review of organic Rankine cycles (ORCs)". *Renewable Energy*, Vol. 36, No. 2, pp. 659-670.
- Reis, L.B.; 2011. "Geração de Energia Elétrica". Editora Manole, Barueri, SP: 2^a Edição.
- Roy, J.P.; Misra, A. Mar. 2012. "Parametric optimization and performance analysis of a regenerative Organic Rankine Cycle using R-123 for waste heat recovery". *Energy*, Vol. 39, No. 1 ,pp. 227-235.
- Silva, E.P; et al. Nov. 2003. "Recursos energéticos, meio ambiente e desenvolvimento". MultiCiência: Revista Interdisciplinar dos Centros e Núcleos da Unicamp. Vol. 1, No. 1.
- Souza, Z.J.; Azevedo, P.F. Jun. 2006. "Geração de energia elétrica excedente no setor sucroalcooleiro: um estudo a partir das usinas paulistas". *Revista de Economia e Sociologia Rural*. Vol. 44, No.2, p. 179-199.

ANEXO A – TABELA DE DESEMPENHO

(EFICIÊNCIA TÉRMICA)

Fluído de trabalho: Amônia									
Parâmetros comuns		Subcrítico		Subcrítico superaquecido			Supercrítico		
Pressão regeneração [MPa]	Extração	Pressão caldeira [MPa]	Eficiência térmica [%]	Pressão caldeira [MPa]	Temperatura Caldeira [°C]	Eficiência térmica [%]	Pressão caldeira [MPa]	Temperatura Caldeira [°C]	Eficiência térmica [%]
5,67	30%	9,6	15,68%	10,8	172	19,06%	11,9	172	19,32%
		10,2	15,67%	10,8	159	18,38%	11,9	159	18,51%
		10,8	15,50%	10,8	146	17,57%	11,9	146	17,43%
	40%	9,6	14,85%	10,8	172	18,59%	11,9	172	18,87%
		10,2	14,83%	10,8	159	17,84%	11,9	159	17,97%
		10,8	14,63%	10,8	146	16,94%	11,9	146	16,76%
	50%	9,6	13,87%	10,8	172	18,03%	11,9	172	18,34%
		10,2	13,85%	10,8	159	17,20%	11,9	159	17,33%
		10,8	13,63%	10,8	146	16,19%	11,9	146	15,98%
6,8	30%	9,6	14,92%	10,8	172	18,23%	11,9	172	18,52%
		10,2	14,91%	10,8	159	17,58%	11,9	159	17,73%
		10,8	14,74%	10,8	146	16,79%	11,9	146	16,66%
	40%	9,6	13,79%	10,8	172	17,42%	11,9	172	17,74%
		10,2	13,78%	10,8	159	16,72%	11,9	159	16,88%
		10,8	13,59%	10,8	146	15,85%	11,9	146	15,69%
	50%	9,6	12,50%	10,8	172	16,47%	11,9	172	16,83%
		10,2	12,49%	10,8	159	15,71%	11,9	159	15,88%
		10,8	12,30%	10,8	146	14,76%	11,9	146	14,57%
7,9	30%	9,6	14,26%	10,8	172	17,49%	11,9	172	17,80%
		10,2	14,25%	10,8	159	16,87%	11,9	159	17,04%
		10,8	14,09%	10,8	146	16,11%	11,9	146	15,98%
	40%	9,6	12,90%	10,8	172	16,39%	11,9	172	16,74%
		10,2	12,89%	10,8	159	15,73%	11,9	159	15,92%
		10,8	12,72%	10,8	146	14,91%	11,9	146	14,76%
	50%	9,6	11,36%	10,8	172	15,11%	11,9	172	15,51%
		10,2	11,37%	10,8	159	14,41%	11,9	159	14,62%
		10,8	11,19%	10,8	146	13,53%	11,9	146	13,38%

Fluído de trabalho: Etanol									
Parâmetros comuns		Subcrítico		Subcrítico superaquecido			Supercrítico		
Pressão regeneração [MPa]	Extração	Pressão caldeira [MPa]	Eficiência térmica [%]	Pressão caldeira [MPa]	Temperatura Caldeira [°C]	Eficiência térmica [%]	Pressão caldeira [MPa]	Temperatura Caldeira [°C]	Eficiência térmica [%]
3,07	30%	5,2	21,43%	5,8	313	26,15%	6,5	313	26,31%
		5,5	21,24%	5,8	289	25,24%	6,5	289	25,32%
		5,8	20,93%	5,8	265	24,19%	6,5	265	24,12%
	40%	5,2	19,33%	5,8	313	24,35%	6,5	313	24,54%
		5,5	19,13%	5,8	289	23,40%	6,5	289	23,50%
		5,8	18,81%	5,8	265	22,29%	6,5	265	22,22%
	50%	5,2	17,05%	5,8	313	22,32%	6,5	313	22,54%
		5,5	16,85%	5,8	289	21,32%	6,5	289	21,45%
		5,8	16,53%	5,8	265	20,16%	6,5	265	20,10%
3,69	30%	5,2	20,89%	5,8	313	25,53%	6,5	313	25,70%
		5,5	20,70%	5,8	289	24,64%	6,5	289	24,73%
		5,8	20,41%	5,8	265	23,61%	6,5	265	23,55%
	40%	5,2	18,64%	5,8	313	23,54%	6,5	313	23,73%
		5,5	18,45%	5,8	289	22,60%	6,5	289	22,71%
		5,8	18,14%	5,8	265	21,52%	6,5	265	21,46%
	50%	5,2	16,22%	5,8	313	21,28%	6,5	313	21,51%
		5,5	16,04%	5,8	289	20,32%	6,5	289	20,46%
		5,8	15,73%	5,8	265	19,21%	6,5	265	19,16%
4,3	30%	5,2	20,42%	5,8	313	24,99%	6,5	313	25,16%
		5,5	20,24%	5,8	289	24,10%	6,5	289	24,20%
		5,8	19,95%	5,8	265	23,09%	6,5	265	23,04%
	40%	5,2	18,05%	5,8	313	22,82%	6,5	313	23,02%
		5,5	17,87%	5,8	289	21,90%	6,5	289	22,02%
		5,8	17,57%	5,8	265	20,85%	6,5	265	20,80%
	50%	5,2	15,51%	5,8	313	20,38%	6,5	313	20,62%
		5,5	15,34%	5,8	289	19,45%	6,5	289	19,60%
		5,8	15,05%	5,8	265	18,38%	6,5	265	18,35%

Fluído de trabalho: Metanol									
Parâmetros comuns		Subcrítico		Subcrítico superaquecido			Supercrítico		
Pressão regeneração [MPa]	Extração	Pressão caldeira [MPa]	Eficiência térmica [%]	Pressão caldeira [MPa]	Temperatura Caldeira [°C]	Eficiência térmica [%]	Pressão caldeira [MPa]	Temperatura Caldeira [°C]	Eficiência térmica [%]
4,05	30%	6,9	23,17%	7,7	295	27,14%	8,5	295	27,28%
		7,3	23,11%	7,7	288	26,86%	8,5	288	26,96%
		7,7	23,01%	7,7	264	25,74%	8,5	264	25,62%
	40%	6,9	21,18%	7,7	295	25,48%	8,5	295	25,65%
		7,3	21,11%	7,7	288	25,18%	8,5	288	25,30%
		7,7	21,00%	7,7	264	23,97%	8,5	264	23,84%
	50%	6,9	18,96%	7,7	295	23,58%	8,5	295	23,77%
		7,3	18,89%	7,7	288	23,26%	8,5	288	23,40%
		7,7	18,78%	7,7	264	21,96%	8,5	264	21,82%
4,86	30%	6,9	22,56%	7,7	295	26,46%	8,5	295	26,61%
		7,3	22,50%	7,7	288	26,18%	8,5	288	26,30%
		7,7	22,40%	7,7	264	25,09%	8,5	264	24,98%
	40%	6,9	20,37%	7,7	295	24,56%	8,5	295	24,74%
		7,3	20,31%	7,7	288	24,27%	8,5	288	24,40%
		7,7	20,20%	7,7	264	23,10%	8,5	264	22,98%
	50%	6,9	17,96%	7,7	295	22,40%	8,5	295	22,61%
		7,3	17,90%	7,7	288	22,09%	8,5	288	22,25%
		7,7	17,80%	7,7	264	20,85%	8,5	264	20,74%
5,7	30%	6,9	22,01%	7,7	295	25,84%	8,5	295	26,00%
		7,3	21,95%	7,7	288	25,57%	8,5	288	25,69%
		7,7	21,85%	7,7	264	24,50%	8,5	264	24,40%
	40%	6,9	19,66%	7,7	295	23,74%	8,5	295	23,93%
		7,3	19,60%	7,7	288	23,46%	8,5	288	23,60%
		7,7	19,50%	7,7	264	22,32%	8,5	264	22,22%
	50%	6,9	17,10%	7,7	295	21,36%	8,5	295	21,58%
		7,3	17,05%	7,7	288	21,06%	8,5	288	21,24%
		7,7	16,96%	7,7	264	19,88%	8,5	264	19,79%

Fluido de trabalho: R141b									
Parâmetros comuns		Subcrítico		Subcrítico superaquecido			Supercrítico		
Pressão regeneração [MPa]	Extração	Pressão caldeira [MPa]	Eficiência térmica [%]	Pressão caldeira [MPa]	Temperatura Caldeira [°C]	Eficiência térmica [%]	Pressão caldeira [MPa]	Temperatura Caldeira [°C]	Eficiência térmica [%]
2,12	30%	3,6	17,89%	4,0	265	20,68%	4,5	265	21,84%
		3,8	17,73%	4,0	245	20,18%	4,5	245	21,30%
		4,0	17,34%	4,0	225	19,44%	4,5	225	20,40%
	40%	3,6	16,15%	4,0	265	19,27%	4,5	265	20,52%
		3,8	15,98%	4,0	245	18,68%	4,5	245	19,87%
		4,0	15,58%	4,0	225	17,84%	4,5	225	18,86%
	50%	3,6	14,25%	4,0	265	17,67%	4,5	265	19,01%
		3,8	14,07%	4,0	245	16,99%	4,5	245	18,27%
		4,0	13,65%	4,0	225	16,05%	4,5	225	17,15%
2,55	30%	3,6	17,28%	4,0	265	20,04%	4,5	265	21,21%
		3,8	17,13%	4,0	245	19,55%	4,5	245	20,66%
		4,0	16,75%	4,0	225	18,81%	4,5	225	19,77%
	40%	3,6	15,36%	4,0	265	18,41%	4,5	265	19,65%
		3,8	15,20%	4,0	245	17,83%	4,5	245	19,01%
		4,0	14,81%	4,0	225	17,00%	4,5	225	18,02%
	50%	3,6	13,28%	4,0	265	16,56%	4,5	265	17,90%
		3,8	13,12%	4,0	245	15,90%	4,5	245	17,18%
		4,0	12,71%	4,0	225	15,00%	4,5	225	16,10%
3,0	30%	3,6	16,78%	4,0	265	19,50%	4,5	265	20,66%
		3,8	16,63%	4,0	245	19,00%	4,5	245	20,11%
		4,0	16,26%	4,0	225	18,27%	4,5	225	19,23%
	40%	3,6	14,71%	4,0	265	17,68%	4,5	265	18,92%
		3,8	14,56%	4,0	245	17,10%	4,5	245	18,29%
		4,0	14,18%	4,0	225	16,30%	4,5	225	17,32%
	50%	3,6	12,50%	4,0	265	15,63%	4,5	265	16,97%
		3,8	12,35%	4,0	245	14,99%	4,5	245	16,27%
		4,0	11,96%	4,0	225	14,13%	4,5	225	15,23%

Fluido de trabalho: R123									
Parâmetros comuns		Subcrítico		Subcrítico superaquecido			Supercrítico		
Pressão regeneração [MPa]	Extração	Pressão caldeira [MPa]	Eficiência térmica [%]	Pressão caldeira [MPa]	Temperatura Caldeira [°C]	Eficiência térmica [%]	Pressão caldeira [MPa]	Temperatura Caldeira [°C]	Eficiência térmica [%]
1,83	30%	3,1	17,41%	3,5	239	19,59%	3,9	239	19,95%
		3,3	17,47%	3,5	220	19,31%	3,9	220	19,60%
		3,5	17,42%	3,5	202	18,87%	3,9	202	19,00%
	40%	3,1	15,89%	3,5	239	18,43%	3,9	239	18,81%
		3,3	15,96%	3,5	220	18,07%	3,9	220	18,37%
		3,5	15,89%	3,5	202	17,53%	3,9	202	17,65%
	50%	3,1	14,22%	3,5	239	17,11%	3,9	239	17,51%
		3,3	14,29%	3,5	220	16,66%	3,9	220	16,97%
		3,5	14,22%	3,5	202	16,03%	3,9	202	16,14%
2,20	30%	3,1	16,79%	3,5	239	18,96%	3,9	239	19,32%
		3,3	16,85%	3,5	220	18,68%	3,9	220	18,97%
		3,5	16,80%	3,5	202	18,23%	3,9	202	18,36%
	40%	3,1	15,08%	3,5	239	17,58%	3,9	239	17,96%
		3,3	15,14%	3,5	220	17,21%	3,9	220	17,51%
		3,5	15,09%	3,5	202	16,68%	3,9	202	16,80%
	50%	3,1	13,22%	3,5	239	16,01%	3,9	239	16,41%
		3,3	13,29%	3,5	220	15,57%	3,9	220	15,88%
		3,5	13,23%	3,5	202	14,96%	3,9	202	15,07%
2,6	30%	3,1	16,26%	3,5	239	18,42%	3,9	239	18,78%
		3,3	16,33%	3,5	220	18,13%	3,9	220	18,42%
		3,5	16,28%	3,5	202	17,69%	3,9	202	17,81%
	40%	3,1	14,40%	3,5	239	16,85%	3,9	239	17,22%
		3,3	14,47%	3,5	220	16,48%	3,9	220	16,78%
		3,5	14,41%	3,5	202	15,96%	3,9	202	16,08%
	50%	3,1	12,40%	3,5	239	15,09%	3,9	239	15,48%
		3,3	12,48%	3,5	220	14,65%	3,9	220	14,96%
		3,5	12,43%	3,5	202	14,06%	3,9	202	14,18%

Fluido de trabalho: R142b									
Parâmetros comuns		Subcrítico		Subcrítico superaquecido			Supercrítico		
Pressão regeneração [MPa]	Extração	Pressão caldeira [MPa]	Eficiência térmica [%]	Pressão caldeira [MPa]	Temperatura Caldeira [°C]	Eficiência térmica [%]	Pressão caldeira [MPa]	Temperatura Caldeira [°C]	Eficiência térmica [%]
2,03	30%	3,4	14,82%	3,9	178	17,45%	4,3	178	17,85%
		3,6	14,89%	3,9	165	17,07%	4,3	165	17,35%
		3,9	14,81%	3,9	151	16,50%	4,3	151	16,48%
	40%	3,4	13,83%	3,9	178	16,77%	4,3	178	17,19%
		3,6	13,90%	3,9	165	16,33%	4,3	165	16,60%
		3,9	13,81%	3,9	151	15,67%	4,3	151	15,63%
	50%	3,4	12,71%	3,9	178	15,98%	4,3	178	16,42%
		3,6	12,79%	3,9	165	15,46%	4,3	165	15,75%
		3,9	12,69%	3,9	151	14,72%	4,3	151	14,66%
2,43	30%	3,4	14,10%	3,9	178	16,70%	4,3	178	17,10%
		3,6	14,17%	3,9	165	16,32%	4,3	165	16,60%
		3,9	14,10%	3,9	151	15,76%	4,3	151	15,74%
	40%	3,4	12,86%	3,9	178	15,73%	4,3	178	16,15%
		3,6	12,93%	3,9	165	15,29%	4,3	165	15,57%
		3,9	12,86%	3,9	151	14,65%	4,3	151	14,62%
	50%	3,4	11,47%	3,9	178	14,61%	4,3	178	15,05%
		3,6	11,56%	3,9	165	14,10%	4,3	165	14,40%
		3,9	11,48%	3,9	151	13,39%	4,3	151	13,36%
2,8	30%	3,4	13,49%	3,9	178	16,05%	4,3	178	16,45%
		3,6	13,56%	3,9	165	15,68%	4,3	165	15,95%
		3,9	13,50%	3,9	151	15,11%	4,3	151	15,10%
	40%	3,4	12,05%	3,9	178	14,84%	4,3	178	15,25%
		3,6	12,13%	3,9	165	14,41%	4,3	165	14,69%
		3,9	12,06%	3,9	151	13,78%	4,3	151	13,77%
	50%	3,4	10,47%	3,9	178	13,46%	4,3	178	13,90%
		3,6	10,57%	3,9	165	12,97%	4,3	165	13,27%
		3,9	10,50%	3,9	151	12,29%	4,3	151	12,28%

Fluido de trabalho: Isopentano									
Parâmetros comuns		Subcrítico		Subcrítico superaquecido			Supercrítico		
Pressão regeneração [MPa]	Extração	Pressão caldeira [MPa]	Eficiência térmica [%]	Pressão caldeira [MPa]	Temperatura Caldeira [°C]	Eficiência térmica [%]	Pressão caldeira [MPa]	Temperatura Caldeira [°C]	Eficiência térmica [%]
1,69	30%	2,9	16,58%	3,2	243	17,70%	3,5	243	18,06%
		3,0	16,69%	3,2	225	17,66%	3,5	225	17,98%
		3,2	16,72%	3,2	206	17,52%	3,5	206	17,74%
	40%	2,9	15,10%	3,2	243	16,66%	3,5	243	17,04%
		3,0	15,21%	3,2	225	16,53%	3,5	225	16,85%
		3,2	15,23%	3,2	206	16,27%	3,5	206	16,47%
	50%	2,9	13,47%	3,2	243	15,48%	3,5	243	15,87%
		3,0	13,59%	3,2	225	15,24%	3,5	225	15,57%
		3,2	13,61%	3,2	206	14,86%	3,5	206	15,06%
2,02	30%	2,9	15,97%	3,2	243	17,12%	3,5	243	17,48%
		3,0	16,07%	3,2	225	17,07%	3,5	225	17,39%
		3,2	16,11%	3,2	206	16,91%	3,5	206	17,13%
	40%	2,9	14,30%	3,2	243	15,87%	3,5	243	16,25%
		3,0	14,41%	3,2	225	15,72%	3,5	225	16,04%
		3,2	14,44%	3,2	206	15,45%	3,5	206	15,66%
	50%	2,9	12,49%	3,2	243	14,46%	3,5	243	14,84%
		3,0	12,61%	3,2	225	14,21%	3,5	225	14,54%
		3,2	12,63%	3,2	206	13,84%	3,5	206	14,03%
2,4	30%	2,9	15,45%	3,2	243	16,62%	3,5	243	16,98%
		3,0	15,56%	3,2	225	16,56%	3,5	225	16,88%
		3,2	15,60%	3,2	206	16,40%	3,5	206	16,61%
	40%	2,9	13,64%	3,2	243	15,20%	3,5	243	15,57%
		3,0	13,75%	3,2	225	15,05%	3,5	225	15,36%
		3,2	13,78%	3,2	206	14,77%	3,5	206	14,97%
	50%	2,9	11,70%	3,2	243	13,60%	3,5	243	13,99%
		3,0	11,82%	3,2	225	13,36%	3,5	225	13,68%
		3,2	11,85%	3,2	206	12,99%	3,5	206	13,18%

Fluido de trabalho: R113									
Parâmetros comuns		Subcrítico		Subcrítico superaquecido			Supercrítico		
Pressão regeneração [MPa]	Extração	Pressão caldeira [MPa]	Eficiência térmica [%]	Pressão caldeira [MPa]	Temperatura Caldeira [°C]	Eficiência térmica [%]	Pressão caldeira [MPa]	Temperatura Caldeira [°C]	Eficiência térmica [%]
1,72	30%	2,9	17,51%	3,3	278	19,02%	3,6	278	29,51%
		3,1	17,46%	3,3	257	18,76%	3,6	257	29,79%
		3,3	17,26%	3,3	236	18,36%	3,6	236	30,04%
	40%	2,9	15,75%	3,3	278	17,62%	3,6	278	28,86%
		3,1	15,69%	3,3	257	17,27%	3,6	257	29,03%
		3,3	15,47%	3,3	236	16,76%	3,6	236	29,16%
	50%	2,9	13,83%	3,3	278	16,04%	3,6	278	28,13%
		3,1	13,76%	3,3	257	15,59%	3,6	257	28,20%
		3,3	13,52%	3,3	236	14,98%	3,6	236	28,19%
2,06	30%	2,9	16,95%	3,3	278	18,47%	3,6	278	28,93%
		3,1	16,90%	3,3	257	18,20%	3,6	257	29,19%
		3,3	16,70%	3,3	236	17,79%	3,6	236	29,42%
	40%	2,9	15,02%	3,3	278	16,87%	3,6	278	28,05%
		3,1	14,97%	3,3	257	16,51%	3,6	257	28,22%
		3,3	14,75%	3,3	236	16,01%	3,6	236	28,32%
	50%	2,9	12,95%	3,3	278	15,08%	3,6	278	27,09%
		3,1	12,89%	3,3	257	14,64%	3,6	257	27,15%
		3,3	12,66%	3,3	236	14,04%	3,6	236	27,14%
2,4	30%	2,9	16,48%	3,3	278	17,99%	3,6	278	28,41%
		3,1	16,43%	3,3	257	17,72%	3,6	257	28,66%
		3,3	16,24%	3,3	236	17,31%	3,6	236	28,88%
	40%	2,9	14,42%	3,3	278	16,23%	3,6	278	27,36%
		3,1	14,37%	3,3	257	15,87%	3,6	257	27,50%
		3,3	14,16%	3,3	236	15,37%	3,6	236	27,60%
	50%	2,9	12,23%	3,3	278	14,28%	3,6	278	26,20%
		3,1	12,17%	3,3	257	13,84%	3,6	257	26,25%
		3,3	11,95%	3,3	236	13,27%	3,6	236	26,23%

Fluido de trabalho: R245fa									
Parâmetros comuns		Subcrítico		Subcrítico superaquecido			Supercrítico		
Pressão regeneração [MPa]	Extração	Pressão caldeira [MPa]	Eficiência térmica [%]	Pressão caldeira [MPa]	Temperatura Caldeira [°C]	Eficiência térmica [%]	Pressão caldeira [MPa]	Temperatura Caldeira [°C]	Eficiência térmica [%]
1,83	30%	3,1	15,22%	3,5	200	17,12%	3,8	200	17,48%
		3,3	15,28%	3,5	185	16,90%	3,8	185	17,19%
		3,5	15,24%	3,5	169	16,53%	3,8	169	16,65%
	40%	3,1	13,96%	3,5	200	16,20%	3,8	200	16,58%
		3,3	14,03%	3,5	185	15,90%	3,8	185	16,19%
		3,5	13,98%	3,5	169	15,44%	3,8	169	15,55%
	50%	3,1	12,57%	3,5	200	15,14%	3,8	200	15,54%
		3,3	12,64%	3,5	185	14,77%	3,8	185	15,07%
		3,5	12,59%	3,5	169	14,22%	3,8	169	14,31%
2,19	30%	3,1	14,62%	3,5	200	16,52%	3,8	200	16,88%
		3,3	14,69%	3,5	185	16,29%	3,8	185	16,58%
		3,5	14,65%	3,5	169	15,92%	3,8	169	16,04%
	40%	3,1	13,17%	3,5	200	15,37%	3,8	200	15,75%
		3,3	13,25%	3,5	185	15,07%	3,8	185	15,36%
		3,5	13,20%	3,5	169	14,62%	3,8	169	14,72%
	50%	3,1	11,59%	3,5	200	14,07%	3,8	200	14,46%
		3,3	11,67%	3,5	185	13,70%	3,8	185	14,00%
		3,5	11,63%	3,5	169	13,17%	3,8	169	13,27%
2,6	30%	3,1	14,12%	3,5	200	16,00%	3,8	200	16,36%
		3,3	14,19%	3,5	185	15,77%	3,8	185	16,05%
		3,5	14,16%	3,5	169	15,40%	3,8	169	15,51%
	40%	3,1	12,52%	3,5	200	14,67%	3,8	200	15,04%
		3,3	12,60%	3,5	185	14,37%	3,8	185	14,66%
		3,5	12,56%	3,5	169	13,92%	3,8	169	14,03%
	50%	3,1	10,80%	3,5	200	13,17%	3,8	200	13,56%
		3,3	10,88%	3,5	185	12,81%	3,8	185	13,11%
		3,5	10,85%	3,5	169	12,30%	3,8	169	12,41%

Fluido de trabalho: R236fa									
Parâmetros comuns		Subcrítico		Subcrítico superaquecido			Supercrítico		
Pressão regeneração [MPa]	Extração	Pressão caldeira [MPa]	Eficiência térmica [%]	Pressão caldeira [MPa]	Temperatura Caldeira [°C]	Eficiência térmica [%]	Pressão caldeira [MPa]	Temperatura Caldeira [°C]	Eficiência térmica [%]
1,60	30%	2,7	11,93%	3,0	162	13,35%	3,4	162	21,51%
		2,9	11,75%	3,0	150	13,10%	3,4	150	21,65%
		3,0	11,22%	3,0	137	12,71%	3,4	137	21,72%
	40%	2,7	10,92%	3,0	162	12,62%	3,4	162	21,38%
		2,9	10,72%	3,0	150	12,30%	3,4	150	21,45%
		3,0	10,15%	3,0	137	11,83%	3,4	137	21,42%
	50%	2,7	9,78%	3,0	162	11,78%	3,4	162	21,24%
		2,9	9,57%	3,0	150	11,38%	3,4	150	21,22%
		3,0	8,96%	3,0	137	10,82%	3,4	137	21,08%
1,92	30%	2,7	11,33%	3,0	162	12,74%	3,4	162	20,84%
		2,9	11,16%	3,0	150	12,49%	3,4	150	20,97%
		3,0	10,65%	3,0	137	12,10%	3,4	137	21,03%
	40%	2,7	10,12%	3,0	162	11,78%	3,4	162	20,45%
		2,9	9,93%	3,0	150	11,46%	3,4	150	20,50%
		3,0	9,39%	3,0	137	11,00%	3,4	137	20,46%
	50%	2,7	8,79%	3,0	162	10,68%	3,4	162	20,01%
		2,9	8,59%	3,0	150	10,29%	3,4	150	19,98%
		3,0	8,02%	3,0	137	9,76%	3,4	137	19,83%
2,2	30%	2,7	10,84%	3,0	162	12,23%	3,4	162	20,26%
		2,9	10,67%	3,0	150	11,97%	3,4	150	20,38%
		3,0	10,17%	3,0	137	11,59%	3,4	137	20,42%
	40%	2,7	9,48%	3,0	162	11,08%	3,4	162	19,65%
		2,9	9,30%	3,0	150	10,76%	3,4	150	19,69%
		3,0	8,78%	3,0	137	10,31%	3,4	137	19,64%
	50%	2,7	8,01%	3,0	162	9,78%	3,4	162	18,96%
		2,9	7,82%	3,0	150	9,41%	3,4	150	18,93%
		3,0	7,28%	3,0	137		3,4	137	18,79%

Fluido de trabalho: R114									
Parâmetros comuns		Subcrítico		Subcrítico superaquecido			Supercrítico		
Pressão regeneração [MPa]	Extração	Pressão caldeira [MPa]	Eficiência térmica [%]	Pressão caldeira [MPa]	Temperatura Caldeira [°C]	Eficiência térmica [%]	Pressão caldeira [MPa]	Temperatura Caldeira [°C]	Eficiência térmica [%]
1,64	30%	2,8	13,55%	3,1	189	14,89%	3,5	189	20,50%
		3,0	13,46%	3,1	175	14,65%	3,5	175	20,50%
		3,1	13,14%	3,1	160	14,28%	3,5	160	20,40%
	40%	2,8	12,37%	3,1	189	14,02%	3,5	189	20,04%
		3,0	12,27%	3,1	175	13,71%	3,5	175	19,97%
		3,1	11,92%	3,1	160	13,25%	3,5	160	19,76%
	50%	2,8	11,06%	3,1	189	13,02%	3,5	189	19,53%
		3,0	10,95%	3,1	175	12,62%	3,5	175	19,36%
		3,1	10,56%	3,1	160	12,07%	3,5	160	19,04%
1,97	30%	2,8	12,93%	3,1	189	14,27%	3,5	189	19,84%
		3,0	12,85%	3,1	175	14,03%	3,5	175	19,84%
		3,1	12,53%	3,1	160	13,66%	3,5	160	19,73%
	40%	2,8	11,55%	3,1	189	13,17%	3,5	189	19,14%
		3,0	11,46%	3,1	175	12,85%	3,5	175	19,05%
		3,1	11,12%	3,1	160	12,40%	3,5	160	18,83%
	50%	2,8	10,04%	3,1	189	11,91%	3,5	189	18,34%
		3,0	9,93%	3,1	175	11,52%	3,5	175	18,17%
		3,1	9,57%	3,1	160	10,99%	3,5	160	17,85%
2,3	30%	2,8	12,42%	3,1	189	13,75%	3,5	189	19,28%
		3,0	12,34%	3,1	175	13,50%	3,5	175	19,27%
		3,1	12,03%	3,1	160	13,13%	3,5	160	19,15%
	40%	2,8	10,89%	3,1	189	12,45%	3,5	189	18,37%
		3,0	10,80%	3,1	175	12,14%	3,5	175	18,27%
		3,1	10,47%	3,1	160	11,70%	3,5	160	18,06%
	50%	2,8	9,22%	3,1	189	11,00%	3,5	189	17,35%
		3,0	9,13%	3,1	175	10,62%	3,5	175	17,18%
		3,1	8,78%	3,1	160	10,11%	3,5	160	16,87%

ANEXO B – TABELA DE DESEMPENHO

(TRABALHO LÍQUIDO ESPECÍFICO)

Fluído de trabalho: Amônia									
Parâmetros comuns		Subcrítico		Subcrítico superaquecido			Supercrítico		
Pressão regeneração [MPa]	Extração	Pressão caldeira [MPa]	Trabalho líquido específico [kJ/kg]	Pressão caldeira [MPa]	Temperatura Caldeira [°C]	Trabalho líquido específico [kJ/kg]	Pressão caldeira [MPa]	Temperatura Caldeira [°C]	Trabalho líquido específico [kJ/kg]
5,67	30%	9,6	134,80	10,8	172	206,10	11,9	172	204,10
		10,2	131,30	10,8	159	189,80	11,9	159	185,00
		10,8	125,30	10,8	146	170,60	11,9	146	160,40
	40%	9,6	118,70	10,8	172	185,00	11,9	172	183,90
		10,2	115,80	10,8	159	169,90	11,9	159	166,00
		10,8	110,60	10,8	146	152,10	11,9	146	143,20
	50%	9,6	102,70	10,8	172	163,80	11,9	172	163,60
		10,2	100,30	10,8	159	150,00	11,9	159	147,10
		10,8	95,85	10,8	146	133,60	11,9	146	126,00
6,8	30%	9,6	130,30	10,8	172	199,30	11,9	172	197,90
		10,2	127,00	10,8	159	183,70	11,9	159	179,50
		10,8	121,30	10,8	146	165,20	11,9	146	155,50
	40%	9,6	112,80	10,8	172	176,10	11,9	172	175,70
		10,2	110,20	10,8	159	161,90	11,9	159	158,80
		10,8	105,30	10,8	146	145,10	11,9	146	136,80
	50%	9,6	95,41	10,8	172	152,90	11,9	172	153,50
		10,2	93,45	10,8	159	140,10	11,9	159	138,20
		10,8	89,41	10,8	146	124,90	11,9	146	118,10
7,9	30%	9,6	126,50	10,8	172	193,30	11,9	172	192,40
		10,2	123,40	10,8	159	178,30	11,9	159	174,70
		10,8	117,90	10,8	146	160,60	11,9	146	151,40
	40%	9,6	107,90	10,8	172	168,30	11,9	172	168,50
		10,2	105,50	10,8	159	154,90	11,9	159	152,50
		10,8	101,00	10,8	146	139,00	11,9	146	131,50
	50%	9,6	89,34	10,8	172	143,30	11,9	172	144,70
		10,2	87,70	10,8	159	131,50	11,9	159	130,40
		10,8	84,06	10,8	146	117,50	11,9	146	111,50

Fluído de trabalho: Etanol									
Parâmetros comuns		Subcrítico		Subcrítico superaquecido			Supercrítico		
Pressão regeneração [MPa]	Extração	Pressão caldeira [MPa]	Trabalho líquido específico [kJ/kg]	Pressão caldeira [MPa]	Temperatura Caldeira [°C]	Trabalho líquido específico [kJ/kg]	Pressão caldeira [MPa]	Temperatura Caldeira [°C]	Trabalho líquido específico [kJ/kg]
3,07	30%	5,2	196,70	5,8	313	310,80	6,5	313	310,70
		5,5	191,80	5,8	289	285,80	6,5	289	283,90
		5,8	185,10	5,8	265	258,50	6,5	265	253,20
	40%	5,2	170,20	5,8	313	271,90	6,5	313	272,50
		5,5	166,10	5,8	289	249,80	6,5	289	248,70
		5,8	160,30	5,8	265	225,60	6,5	265	221,30
	50%	5,2	143,80	5,8	313	233,10	6,5	313	234,40
		5,5	140,30	5,8	289	213,80	6,5	289	213,60
		5,8	135,40	5,8	265	192,60	6,5	265	189,40
3,69	30%	5,2	194,20	5,8	313	306,20	6,5	313	306,10
		5,5	189,50	5,8	289	281,60	6,5	289	279,90
		5,8	183,00	5,8	265	254,80	6,5	265	249,80
	40%	5,2	167,10	5,8	313	266,00	6,5	313	266,80
		5,5	163,10	5,8	289	244,40	6,5	289	243,60
		5,8	157,50	5,8	265	220,90	6,5	265	217,00
	50%	5,2	140,00	5,8	313	225,90	6,5	313	227,40
		5,5	136,80	5,8	289	207,30	6,5	289	207,30
		5,8	132,00	5,8	265	187,00	6,5	265	184,20
4,3	30%	5,2	192,30	5,8	313	302,20	6,5	313	302,20
		5,5	187,70	5,8	289	278,00	6,5	289	276,40
		5,8	181,30	5,8	265	251,80	6,5	265	246,90
	40%	5,2	164,60	5,8	313	260,90	6,5	313	261,80
		5,5	160,80	5,8	289	239,90	6,5	289	239,20
		5,8	155,30	5,8	265	217,00	6,5	265	213,30
	50%	5,2	136,90	5,8	313	219,70	6,5	313	221,40
		5,5	133,90	5,8	289	201,80	6,5	289	202,00
		5,8	129,40	5,8	265	182,30	6,5	265	179,70

Fluído de trabalho: Metanol									
Parâmetros comuns		Subcrítico		Subcrítico superaquecido			Supercrítico		
Pressão regeneração [MPa]	Extração	Pressão caldeira [MPa]	Trabalho líquido específico [kJ/kg]	Pressão caldeira [MPa]	Temperatura Caldeira [°C]	Trabalho líquido específico [kJ/kg]	Pressão caldeira [MPa]	Temperatura Caldeira [°C]	Trabalho líquido específico [kJ/kg]
4,05	30%	6,9	234,00	7,7	295	344,00	8,5	295	341,90
		7,3	230,50	7,7	288	335,00	8,5	288	331,90
		7,7	226,40	7,7	264	300,40	8,5	264	291,50
	40%	6,9	203,00	7,7	295	301,70	8,5	295	300,70
		7,3	200,10	7,7	288	293,70	8,5	288	291,70
		7,7	196,70	7,7	264	262,80	8,5	264	255,40
	50%	6,9	172,00	7,7	295	259,50	8,5	295	259,50
		7,3	169,80	7,7	288	252,40	8,5	288	251,50
		7,7	167,00	7,7	264	225,20	8,5	264	219,40
4,86	30%	6,9	230,60	7,7	295	338,20	8,5	295	336,40
		7,3	227,20	7,7	288	329,40	8,5	288	326,60
		7,7	223,30	7,7	264	295,70	8,5	264	287,20
	40%	6,9	198,70	7,7	295	294,40	8,5	295	293,70
		7,3	196,00	7,7	288	286,60	8,5	288	284,90
		7,7	192,70	7,7	264	256,80	8,5	264	249,90
	50%	6,9	166,80	7,7	295	250,50	8,5	295	250,90
		7,3	164,70	7,7	288	243,80	8,5	288	243,30
		7,7	162,10	7,7	264	217,90	8,5	264	212,60
5,7	30%	6,9	227,80	7,7	295	333,20	8,5	295	331,60
		7,3	224,50	7,7	288	324,60	8,5	288	322,00
		7,7	220,70	7,7	264	291,70	8,5	264	283,50
	40%	6,9	195,20	7,7	295	288,00	8,5	295	287,60
		7,3	192,60	7,7	288	280,50	8,5	288	279,10
		7,7	189,40	7,7	264	251,70	8,5	264	245,10
	50%	6,9	162,50	7,7	295	242,80	8,5	295	243,60
		7,3	160,60	7,7	288	236,40	8,5	288	236,30
		7,7	158,20	7,7	264	211,60	8,5	264	206,80

Fluido de trabalho: R141b									
Parâmetros comuns		Subcrítico		Subcrítico superaquecido			Supercrítico		
Pressão regeneração [MPa]	Extração	Pressão caldeira [MPa]	Trabalho líquido específico [kJ/kg]	Pressão caldeira [MPa]	Temperatura Caldeira [°C]	Trabalho líquido específico [kJ/kg]	Pressão caldeira [MPa]	Temperatura Caldeira [°C]	Trabalho líquido específico [kJ/kg]
2,12	30%	3,6	49,59	4,0	265	72,63	4,5	265	76,76
		3,8	48,69	4,0	245	66,82	4,5	245	70,30
		4,0	46,91	4,0	225	60,10	4,5	225	62,33
	40%	3,6	42,79	4,0	265	63,45	4,5	265	67,75
		3,8	41,98	4,0	245	58,24	4,5	245	61,93
		4,0	40,34	4,0	225	52,22	4,5	225	54,72
	50%	3,6	35,99	4,0	265	54,28	4,5	265	58,73
		3,8	35,28	4,0	245	49,67	4,5	245	53,55
		4,0	33,77	4,0	225	44,34	4,5	225	47,12
2,55	30%	3,6	48,62	4,0	265	71,11	4,5	265	75,28
		3,8	47,74	4,0	245	65,42	4,5	245	68,96
		4,0	45,99	4,0	225	58,87	4,5	225	61,16
	40%	3,6	41,53	4,0	265	61,48	4,5	265	65,82
		3,8	40,76	4,0	245	56,44	4,5	245	60,18
		4,0	39,16	4,0	225	50,62	4,5	225	53,21
	50%	3,6	34,45	4,0	265	51,85	4,5	265	56,36
		3,8	33,78	4,0	245	47,46	4,5	245	51,41
		4,0	32,33	4,0	225	42,37	4,5	225	45,27
3,0	30%	3,6	47,83	4,0	265	69,82	4,5	265	74,03
		3,8	46,97	4,0	245	64,25	4,5	245	67,83
		4,0	45,26	4,0	225	57,83	4,5	225	60,20
	40%	3,6	40,52	4,0	265	59,81	4,5	265	64,20
		3,8	39,78	4,0	245	54,92	4,5	245	58,72
		4,0	38,22	4,0	225	49,29	4,5	225	51,97
	50%	3,6	33,21	4,0	265	49,80	4,5	265	54,37
		3,8	32,58	4,0	245	45,60	4,5	245	49,62
		4,0	31,17	4,0	225	40,74	4,5	225	43,74

Fluido de trabalho: R123									
Parâmetros comuns		Subcrítico		Subcrítico superaquecido			Supercrítico		
Pressão regeneração [MPa]	Extração	Pressão caldeira [MPa]	Trabalho líquido específico [kJ/kg]	Pressão caldeira [MPa]	Temperatura Caldeira [°C]	Trabalho líquido específico [kJ/kg]	Pressão caldeira [MPa]	Temperatura Caldeira [°C]	Trabalho líquido específico [kJ/kg]
1,83	30%	3,1	38,15	3,5	239	54,57	3,9	239	55,12
		3,3	38,06	3,5	220	50,81	3,9	220	50,94
		3,5	37,45	3,5	202	46,47	3,9	202	45,79
	40%	3,1	33,24	3,5	239	48,10	3,9	239	48,75
		3,3	33,20	3,5	220	44,73	3,9	220	44,98
		3,5	32,69	3,5	202	40,83	3,9	202	40,32
	50%	3,1	28,33	3,5	239	41,63	3,9	239	42,37
		3,3	28,34	3,5	220	38,65	3,9	220	39,01
		3,5	27,92	3,5	202	35,20	3,9	202	34,84
2,20	30%	3,1	37,40	3,5	239	53,45	3,9	239	54,02
		3,3	37,32	3,5	220	49,77	3,9	220	49,93
		3,5	36,74	3,5	202	45,54	3,9	202	44,89
	40%	3,1	32,26	3,5	239	46,64	3,9	239	47,31
		3,3	32,24	3,5	220	43,37	3,9	220	43,66
		3,5	31,77	3,5	202	39,61	3,9	202	39,15
	50%	3,1	27,13	3,5	239	39,82	3,9	239	40,60
		3,3	27,16	3,5	220	36,98	3,9	220	37,39
		3,5	26,79	3,5	202	33,69	3,9	202	33,41
2,6	30%	3,1	36,79	3,5	239	52,50	3,9	239	53,10
		3,3	36,72	3,5	220	48,90	3,9	220	49,09
		3,5	36,17	3,5	202	44,76	3,9	202	44,15
	40%	3,1	31,48	3,5	239	45,41	3,9	239	46,11
		3,3	31,47	3,5	220	42,24	3,9	220	42,56
		3,5	31,03	3,5	202	38,60	3,9	202	38,19
	50%	3,1	26,16	3,5	239	38,31	3,9	239	39,12
		3,3	26,22	3,5	220	35,59	3,9	220	36,04
		3,5	25,89	3,5	202	32,45	3,9	202	32,23

Fluido de trabalho: R142b									
Parâmetros comuns		Subcrítico		Subcrítico superaquecido			Supercrítico		
Pressão regeneração [MPa]	Extração	Pressão caldeira [MPa]	Trabalho líquido específico [kJ/kg]	Pressão caldeira [MPa]	Temperatura Caldeira [°C]	Trabalho líquido específico [kJ/kg]	Pressão caldeira [MPa]	Temperatura Caldeira [°C]	Trabalho líquido específico [kJ/kg]
2,03	30%	3,4	31,57	3,9	178	46,78	4,3	178	47,15
		3,6	31,40	3,9	165	43,36	4,3	165	43,14
		3,9	30,66	3,9	151	39,28	4,3	151	37,87
	40%	3,4	27,72	3,9	178	41,69	4,3	178	42,17
		3,6	27,62	3,9	165	38,57	4,3	165	38,50
		3,9	26,99	3,9	151	34,85	4,3	151	33,67
	50%	3,4	23,87	3,9	178	36,59	4,3	178	37,20
		3,6	23,83	3,9	165	33,78	4,3	165	33,87
		3,9	23,31	3,9	151	30,42	4,3	151	29,46
2,43	30%	3,4	30,62	3,9	178	45,40	4,3	178	45,82
		3,6	30,48	3,9	165	42,08	4,3	165	41,92
		3,9	29,78	3,9	151	38,13	4,3	151	36,81
	40%	3,4	26,48	3,9	178	39,88	4,3	178	40,43
		3,6	26,42	3,9	165	36,90	4,3	165	36,91
		3,9	25,84	3,9	151	33,35	4,3	151	32,28
	50%	3,4	22,35	3,9	178	34,36	4,3	178	35,04
		3,6	22,35	3,9	165	31,72	4,3	165	31,90
		3,9	21,89	3,9	151	28,57	4,3	151	27,74
2,8	30%	3,4	29,85	3,9	178	44,24	4,3	178	44,69
		3,6	29,73	3,9	165	41,01	4,3	165	40,90
		3,9	29,07	3,9	151	37,17	4,3	151	35,93
	40%	3,4	25,48	3,9	178	38,37	4,3	178	38,97
		3,6	25,45	3,9	165	35,51	4,3	165	35,58
		3,9	24,92	3,9	151	32,10	4,3	151	31,13
	50%	3,4	21,12	3,9	178	32,49	4,3	178	33,24
		3,6	21,16	3,9	165	30,00	4,3	165	30,26
		3,9	20,76	3,9	151	27,03	4,3	151	26,33

Fluido de trabalho: R113									
Parâmetros comuns		Subcrítico		Subcrítico superaquecido			Supercrítico		
Pressão regeneração [MPa]	Extração	Pressão caldeira [MPa]	Trabalho líquido específico [kJ/kg]	Pressão caldeira [MPa]	Temperatura Caldeira [°C]	Trabalho líquido específico [kJ/kg]	Pressão caldeira [MPa]	Temperatura Caldeira [°C]	Trabalho líquido específico [kJ/kg]
1,72	30%	2,9	39,04	3,3	278	53,20	3,6	278	93,79
		3,1	38,75	3,3	257	49,50	3,6	257	89,74
		3,3	37,92	3,3	236	45,34	3,6	236	84,94
	40%	2,9	33,67	3,3	278	46,35	3,6	278	87,01
		3,1	33,41	3,3	257	43,04	3,6	257	83,38
		3,3	32,64	3,3	236	39,32	3,6	236	79,05
	50%	2,9	28,31	3,3	278	39,50	3,6	278	80,24
		3,1	28,07	3,3	257	36,59	3,6	257	77,02
		3,3	27,35	3,3	236	33,30	3,6	236	73,17
2,06	30%	2,9	38,36	3,3	278	52,22	3,6	278	92,82
		3,1	38,08	3,3	257	48,59	3,6	257	88,86
		3,3	37,27	3,3	236	44,52	3,6	236	84,15
	40%	2,9	32,80	3,3	278	45,07	3,6	278	85,76
		3,1	32,55	3,3	257	41,86	3,6	257	82,23
		3,3	31,80	3,3	236	38,25	3,6	236	78,03
	50%	2,9	27,23	3,3	278	37,92	3,6	278	78,69
		3,1	27,01	3,3	257	35,13	3,6	257	75,60
		3,3	26,32	3,3	236	31,99	3,6	236	71,90
2,4	30%	2,9	37,83	3,3	278	51,40	3,6	278	92,02
		3,1	37,56	3,3	257	47,84	3,6	257	88,12
		3,3	36,76	3,3	236	43,85	3,6	236	83,50
	40%	2,9	32,11	3,3	278	44,00	3,6	278	84,71
		3,1	31,87	3,3	257	40,88	3,6	257	81,27
		3,3	31,14	3,3	236	37,38	3,6	236	77,19
	50%	2,9	26,38	3,3	278	36,60	3,6	278	77,40
		3,1	26,18	3,3	257	33,92	3,6	257	74,42
		3,3	25,51	3,3	236	30,91	3,6	236	70,87

Fluido de trabalho: Isopentano									
Parâmetros comuns		Subcrítico		Subcrítico superaquecido			Supercrítico		
Pressão regeneração [MPa]	Extração	Pressão caldeira [MPa]	Trabalho líquido específico [kJ/kg]	Pressão caldeira [MPa]	Temperatura Caldeira [°C]	Trabalho líquido específico [kJ/kg]	Pressão caldeira [MPa]	Temperatura Caldeira [°C]	Trabalho líquido específico [kJ/kg]
1,69	30%	2,9	83,38	3,2	243	116,30	3,5	243	117,90
		3,0	83,77	3,2	225	109,00	3,5	225	109,80
		3,2	83,30	3,2	206	100,60	3,5	206	100,00
	40%	2,9	72,58	3,2	243	102,40	3,5	243	104,10
		3,0	73,01	3,2	225	95,85	3,5	225	96,86
		3,2	72,64	3,2	206	88,32	3,5	206	87,98
	50%	2,9	61,79	3,2	243	88,51	3,5	243	90,36
		3,0	62,25	3,2	225	82,71	3,5	225	83,89
		3,2	61,99	3,2	206	76,03	3,5	206	75,94
2,02	30%	2,9	81,78	3,2	243	114,00	3,5	243	115,60
		3,0	82,18	3,2	225	106,80	3,5	225	107,70
		3,2	81,74	3,2	206	98,63	3,5	206	98,10
	40%	2,9	70,49	3,2	243	99,34	3,5	243	101,10
		3,0	70,93	3,2	225	93,00	3,5	225	94,06
		3,2	70,61	3,2	206	85,73	3,5	206	85,47
	50%	2,9	59,20	3,2	243	84,72	3,5	243	86,62
		3,0	59,69	3,2	225	79,18	3,5	225	80,43
		3,2	59,48	3,2	206	72,82	3,5	206	72,83
2,4	30%	2,9	80,51	3,2	243	112,00	3,5	243	113,70
		3,0	80,92	3,2	225	105,00	3,5	225	105,90
		3,2	80,53	3,2	206	97,01	3,5	206	96,53
	40%	2,9	68,84	3,2	243	96,80	3,5	243	98,59
		3,0	69,30	3,2	225	90,64	3,5	225	91,76
		3,2	69,03	3,2	206	83,60	3,5	206	83,42
	50%	2,9	57,17	3,2	243	81,57	3,5	243	83,53
		3,0	57,68	3,2	225	76,27	3,5	225	77,58
		3,2	57,53	3,2	206	70,20	3,5	206	70,31

Fluido de trabalho: Isobutano									
Parâmetros comuns		Subcrítico		Subcrítico superaquecido			Supercrítico		
Pressão regeneração [MPa]	Extração	Pressão caldeira [MPa]	Trabalho líquido específico [kJ/kg]	Pressão caldeira [MPa]	Temperatura Caldeira [°C]	Trabalho líquido específico [kJ/kg]	Pressão caldeira [MPa]	Temperatura Caldeira [°C]	Trabalho líquido específico [kJ/kg]
1,82	30%	3,1	53,65	3,5	175	78,54	3,8	175	79,65
		3,3	53,69	3,5	162	73,11	3,8	162	73,34
		3,5	52,86	3,5	148	66,78	3,8	148	65,29
	40%	3,1	47,13	3,5	175	70,06	3,8	175	71,33
		3,3	47,24	3,5	162	65,11	3,8	162	65,54
		3,5	46,55	3,5	148	59,32	3,8	148	58,12
	50%	3,1	40,61	3,5	175	61,59	3,8	175	63,01
		3,3	40,80	3,5	162	57,11	3,8	162	57,73
		3,5	40,23	3,5	148	51,86	3,8	148	50,95
2,18	30%	3,1	51,99	3,5	175	76,15	3,8	175	77,32
		3,3	52,06	3,5	162	70,89	3,8	162	71,20
		3,5	51,28	3,5	148	64,76	3,8	148	63,38
	40%	3,1	44,95	3,5	175	66,92	3,8	175	68,27
		3,3	45,11	3,5	162	62,18	3,8	162	62,71
		3,5	44,48	3,5	148	56,66	3,8	148	55,61
	50%	3,1	37,91	3,5	175	57,69	3,8	175	59,21
		3,3	38,16	3,5	162	53,48	3,8	162	54,23
		3,5	37,68	3,5	148	48,57	3,8	148	47,84
2,5	30%	3,1	50,65	3,5	175	74,15	3,8	175	75,38
		3,3	50,75	3,5	162	69,03	3,8	162	69,42
		3,5	50,02	3,5	148	63,08	3,8	148	61,81
	40%	3,1	43,20	3,5	175	64,29	3,8	175	65,71
		3,3	43,40	3,5	162	59,76	3,8	162	60,38
		3,5	42,84	3,5	148	54,47	3,8	148	53,56
	50%	3,1	35,76	3,5	175	54,43	3,8	175	56,05
		3,3	36,05	3,5	162	50,48	3,8	162	51,34
		3,5	35,66	3,5	148	45,86	3,8	148	45,30