UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Bauru

FEB
FACULDADE DE ENGENHARIA BAURU

DOUGLAS RICARDO FUMES

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

Bauru

2020

DOUGLAS RICARDO FUMES

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

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

Fumes, Douglas Ricardo.
Um modelo termodinâmico para análise e seleção de um fluido de trabalho para um ciclo Rankine orgânico com um aquecedor de fluido de alimentação aberto / Douglas Ricardo Fumes, 2020
155 f. : il.

Orientador: Santiago del Rio Oliveira

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

1. Ciclo Rankine orgânico (CRO). 2. Eficiência térmica do ciclo (ETC). 3. Trabalho líquido específico (TLE). 4. Regressão linear múltipla. 5. Seleção de fluidos. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Bauru

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE DOUGLAS RICARDO FUMES, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 03 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 DOUGLAS RICARDO FUMES, 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 ABERTO**. 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. MAURÍCIO SILVA FERREIRA (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 pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: APROVADO. 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, Carlos e Édna

e à minha esposa Aline

dedico

AGRADECIMENTOS

Aos meus queridos pais Carlos e Édna, pelos ensinamentos e valores que me permitiram chegar até aqui e que me permitirão chegar sempre mais longe do que jamais imaginei.

Á minha esposa Aline, companheira para todos os momentos, porto seguro da minha mente e espírito.

Ao professor Dr. Santiago del Rio Oliveira, pela orientação, ensinamentos, paciência e amizade.

Aos professores Dr. Vicente Luiz Scalon e Dr. Délson Luíz Modolo, que tanto contribuíram para o meu desenvolvimento profissional e pessoal.

À Universidade Estadual Paulista (UNESP) por me proporcionar a oportunidade de evoluir constantemente.

“*The minute you loose confidence in yourself and stop believing, you´ve lost*”.

Jan Matthews

RESUMO

O ciclo Rankine orgânico (CRO) é considerado uma tecnologia renovável alternativa na produção energética. Sua concepção contribui para a redução de impactos ambientais como a poluição do ar e o subsequente aquecimento global. Atualmente, diversos pesquisadores e empresas do segmento energético trabalham em busca do aumento da eficiência térmica deste tipo de ciclo para produção de energia elétrica. A utilização de regeneradores (aquecedores de água de alimentação) contribui significativamente para o aumento da eficiência térmica de plantas energéticas deste tipo. Diversos estudos sobre otimização de parâmetros de operação e seleção de fluidos de trabalhos vêm sendo desenvolvidos em convergência a este objetivo. O propósito deste estudo é desenvolver um modelo de seleção de fluidos de trabalho a partir de seu desempenho térmico. Para isto, foram realizadas simulações termodinâmicas de diversos fluidos orgânicos operando em diferentes ciclos termodinâmicos (subcrítico, subcrítico com superaquecimento e supercrítico) a partir de variáveis de entrada adimensionais (percentuais dos valores críticos de cada fluido) pré-definidas. Os resultados destas simulações foram utilizados para o desenvolvimento de regressões lineares múltiplas capazes de expressar o comportamento das variáveis ETC e TLE em função dos parâmetros de entrada. Dois métodos foram desenvolvidos para a seleção de fluidos com melhor desempenho térmico, um baseado na máxima ETC obtida pelos fluidos de trabalho e outro baseado na ETC média produzida pelos mesmos sob diversas condições de operação. A validação dos métodos se baseou na comparação entre os valores de ETC e TLE obtidos a partir das leis clássicas da termodinâmica e os valores de ETC e TLE obtidos pelo método da regressão linear múltipla desenvolvido. Os resultados demonstraram que os modelos para obtenção da ETC e seleção de fluidos em função desta variável demonstrou alta assertividade, com valores de desvio praticamente desprezíveis, o que não ocorreu para o TLE, onde os modelos de regressão desenvolvidos não apresentaram elevada representatividade estatística.

Palavras-chave: *ciclo Rankine orgânico (CRO), eficiência térmica do ciclo (ETC), trabalho líquido específico (TLE), regressão linear múltipla, seleção de fluidos.*

ABSTRACT

The Organic Rankine cycle (ORC) is considered an alternative renewable technology in energy production. Its design contributes to the reduction of environmental impacts such as air pollution and the subsequent global warming. Currently, several researchers and companies in the energy segment are working to increase the thermal efficiency of this type of cycle for the production of electrical energy. The use of regenerators (feed water heaters) contributes significantly to increasing the thermal efficiency of energy plants of this type. Several studies on optimization of operating parameters and selection of working fluids have been developed in convergence to this objective. The purpose of this study is to develop a model for selecting working fluids based on their thermal performance. For this, thermodynamic simulations of several organic fluids were performed operating in different thermodynamic cycles (subcritical, subcritical with superheating and supercritical) from pre-defined dimensionless input variables (percentages of the critical values of each fluid). The results of these simulations were used to develop multiple linear regressions able to express the behavior of the ETC and TLE variables according to the input parameters. Two methods were developed for the selection of fluids with greater thermal performance, one based on the maximum ETC obtained by the working fluids and the other one based on the average ETC produced under different operating conditions. The validation of the methods was based on the comparison between the ETC and TLE values obtained from the classical laws of thermodynamics and the ETC and TLE values obtained by the developed method of multiple linear regression. The results showed that the models for obtaining the ETC and for the fluid selection according to this variable demonstrated high assertiveness, with deviation values practically negligible, which did not occur for the TLE, where the regression models developed did not present high statistical representativeness.

Keywords: *organic Rankine cycle (ORC), cycle thermal efficiency (CTE), specific net work (SNW), multiple linear regression, fluid selection.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Utilização da tecnologia ORC no mundo. 29

Figura 2.1 – Modelo básico de uma planta de potência a vapor. 35

Figura 2.2 – Ciclo de Rankine simples ideal. 36

Figura 2.3 –Ciclo Rankine com regenerador aberto e diagrama *T-s.* 37

Figura 2.4 – Diagrama *T-s* característico para fluidos (a) isentrópicos, (b) molhados e (c) secos 38

Figura 2.5 – Arquitetura básica de um ORC subcrítico (básico) e diagrama *T-s.* 39

Figura 3.1 – Ciclo Rankine orgânico regenerativo aberto 47

Figura 3.2 – Ciclo Rankine subcrítico e diagrama T-s 55

Figura 3.3 – Representação das pressões adimensionais de evaporação e regeneração para o ciclo subcrítico em um diagrama T-s 56

Figura 3.4 – Ciclo Rankine subcrítico com superaquecimento e diagrama T-s 57

Figura 3.5 – Representação das pressões adimensionais de evaporação e regeneração para o ciclo subcrítico com superaquecimento em um diagrama T-s 57

Figura 3.6 – Ciclo Rankine supercrítico e diagrama T-s 58

Figura 3.7 – Representação das pressões e temperaturas adimensionais de evaporação e regeneração para o ciclo supercrítico em um diagrama *T-s.* 59

Figura 3.8 – Fluxo para obtenção de propriedades (ciclo subcrítico). 60

Figura 3.9 – Fluxo para obtenção de propriedades (ciclo subcrítico com superaquecimento) 61

Figura 3.10 – Fluxo para obtenção de propriedades (ciclo supercrítico). 62

Figura 4.1 – Isocurvas de eficiências térmica para fluidos molhados (ciclo subcrítico). 76

Figura 4.2 – Isocurvas de eficiências térmica para fluidos isentrópicos (ciclo subcrítico). 77

Figura 4.3 – Isocurvas de eficiências térmica para fluidos secos (ciclo subcrítico). 79

Figura 4.4 – Isocurvas de trabalho líquido específico para fluidos molhados (ciclo subcrítico). 80

Figura 4.5 – Isocurvas de trabalho líquido específico para fluidos isentrópicos (ciclo subcrítico). 81

Figura 4.6 – Isocurvas de trabalho líquido específico para fluidos secos (ciclo subcrítico). 82

Figura 4.7 – Isocurvas de eficiência térmica do ciclo para fluidos molhados (ciclo subcrítico com superaquecimento). 85

Figura 4.8 – Isocurvas de eficiência térmica do ciclo para fluidos isentrópicos (ciclo subcrítico com superaquecimento). 86

Figura 4.9 – Isocurvas de eficiência térmica do ciclo para fluidos secos (ciclo subcrítico com superaquecimento). 87

Figura 4.10 – Isocurvas de trabalho líquido específico para fluidos molhados (ciclo subcrítico com superaquecimento). 88

Figura 4.11 – Isocurvas de trabalho líquido específico para fluidos isentrópicos (ciclo subcrítico com superaquecimento). 89

Figura 4.12 – Isocurvas de trabalho líquido específico para fluidos secos (ciclo subcrítico com superaquecimento). 90

Figura 4.13 – Isocurvas de eficiência térmica do ciclo para fluidos molhados (ciclo supercrítico). 94
Figura 4.14 – Isocurvas de eficiência térmica do ciclo para fluidos isentrópicos (ciclo supercrítico). 95
Figura 4.15 – Isocurvas de eficiência térmica do ciclo para fluidos secos (ciclo supercrítico). 96
Figura 4.16 – Isocurvas de trabalho líquido específico para fluidos molhados (ciclo supercrítico). 97
Figura 4.17 – Isocurvas de trabalho líquido específico para fluidos isentrópicos (ciclo supercrítico). 98
Figura 4.18 – Isocurvas de trabalho líquido específico para fluidos isentrópicos (ciclo supercrítico). 99

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Fluidos de trabalhos selecionados para o estudo. 52

Tabela 3.2 – Parâmetros de operação para os ciclos subcrítico, subcrítico com superaquecimento e supercrítico. 54

Tabela 4.1 – Resultados de eficiência térmica e trabalho líquido específico para fluidos molhados no ciclo subcrítico. 65

Tabela 4.2 – Resultados de eficiência térmica e trabalho líquido específico para fluidos isentrópicos no ciclo subcrítico. 66

Tabela 4.3 – Resultados de eficiência térmica e trabalho líquido específico para fluidos secos no ciclo subcrítico. 67

Tabela 4.4 – Resultados de eficiência térmica e trabalho líquido específico para fluidos molhados no ciclo subcrítico com superaquecimento. 68

Tabela 4.5 – Resultados de eficiência térmica e trabalho líquido específico para fluidos isentrópicos no ciclo subcrítico com superaquecimento. 69

Tabela 4.6 – Resultados de eficiência térmica e trabalho líquido específico para fluidos secos no ciclo subcrítico com superaquecimento. 70

Tabela 4.7 – Resultados de eficiência térmica e trabalho líquido específico para fluidos molhados no ciclo supercrítico. 71

Tabela 4.8 – Resultados de eficiência térmica e trabalho líquido específico para fluidos isentrópicos no ciclo supercrítico. 72

Tabela 4.9 – Resultados de eficiência térmica e trabalho líquido específico para fluidos secos no ciclo supercrítico. 73

Tabela 4.10 – Resultados de correlação linear para o ciclo Subcrítico 100

Tabela 4.11 – Resultados de correlação linear para o ciclo Subcrítico com Superaquecimento 101

Tabela 4.12 – Resultados de correlação linear para o ciclo Supercrítico 101

Tabela 4.13 – Estatística de regressão linear múltipla para a eficiência térmica de fluidos molhados (ciclo subcrítico). 102

Tabela 4.14 – Estatística de regressão linear múltipla para o trabalho líquido específico de fluidos molhados (ciclo subcrítico). 103

Tabela 4.15 – Estatística de regressão linear múltipla para a eficiência térmica de fluidos isentrópicos (ciclo subcrítico). 104

Tabela 4.16 – Estatística de regressão linear múltipla para o trabalho líquido específico de fluidos isentrópicos (ciclo subcrítico). 105

Tabela 4.17 – Estatística de regressão linear múltipla para a eficiência térmica de fluidos secos (ciclo subcrítico). 106

Tabela 4.18 – Estatística de regressão linear múltipla para o trabalho líquido específico de fluidos secos (ciclo subcrítico). 106

Tabela 4.19 – Estatística de regressão linear múltipla para a eficiência térmica de fluidos molhados (ciclo subcrítico com superaquecimento). 107

Tabela 4.20 – Estatística de regressão linear múltipla para o trabalho líquido específico de fluidos molhados (ciclo subcrítico com superaquecimento). 108

Tabela 4.21 – Estatística de regressão linear múltipla para a eficiência térmica de fluidos isentrópicos (ciclo subcrítico com superaquecimento). 109

Tabela 4.22 – Estatística de regressão linear múltipla para o trabalho líquido específico de fluidos isentrópicos (ciclo subcrítico com superaquecimento). 110

Tabela 4.23 – Estatística de regressão linear múltipla para a eficiência térmica de fluidos secos (ciclo subcrítico com superaquecimento). 111

Tabela 4.24 – Estatística de regressão linear múltipla para o trabalho líquido específico de fluidos secos (ciclo subcrítico com superaquecimento). 112

Tabela 4.25 – Estatística de regressão linear múltipla para a eficiência térmica de fluidos molhados (ciclo supercrítico). 113
Tabela 4.26 – Estatística de regressão linear múltipla para o trabalho líquido específico de fluidos molhados (ciclo supercrítico). 113
Tabela 4.27 – Estatística de regressão linear múltipla para a eficiência térmica de fluidos isentrópicos (ciclo supercrítico). 114
Tabela 4.28 – Estatística de regressão linear múltipla para o trabalho líquido específico de fluidos isentrópicos (ciclo supercrítico). 115
Tabela 4.29 – Estatística de regressão linear múltipla para a eficiência térmica de fluidos secos (ciclo supercrítico). 116
Tabela 4.30 – Estatística de regressão linear múltipla para o trabalho líquido específico de fluidos secos (ciclo supercrítico). 116
Tabela 4.31 – Resultados de eficiência térmica do ciclo (ETC) subcrítico pelo método termodinâmico. 118
Tabela 4.32 – Resultados de eficiência térmica do ciclo (ETC) subcrítico pelo método da regressão linear múltipla. 119
Tabela 4.33 – Desvio entre os resultados de eficiência térmica do ciclo (ETC) subcrítico obtidos pelo método termodinâmico e método da regressão linear múltipla. 121
Tabela 4.34 – Resultados de eficiência térmica do ciclo (ETC) subcrítico com superaquecimento pelo método termodinâmico. 123
Tabela 4.35 – Resultados de eficiência térmica do ciclo (ETC) subcrítico com superaquecimento pelo método da regressão linear múltipla. 124

Tabela 4.36 – Desvio entre os resultados de eficiência térmica do ciclo (ETC) subcrítico com superaquecimento obtidos pelo método termodinâmico e método da regressão linear múltipla. 125

Tabela 4.37 – Resultados de eficiência térmica do ciclo (ETC) supercrítico pelo método termodinâmico. 127

Tabela 4.38 – Resultados de eficiência térmica do ciclo (ETC) supercrítico pelo método da regressão linear múltipla. 128

Tabela 4.39 – Desvio entre os resultados de eficiência térmica do ciclo (ETC) supercrítico obtidos pelo método termodinâmico e método da regressão linear múltipla. 130

Tabela 4.40 – Comparação entre métodos de seleção de fluidos (convencional e regressão) para o ciclo subcrítico com estratificação por categoria de fluido. 132

Tabela 4.41 – Comparação entre métodos de seleção de fluidos (convencional e regressão) para o ciclo subcrítico (geral). 133

Tabela 4.42 – Comparação entre métodos de seleção de fluidos (convencional e regressão) para o ciclo subcrítico (por pressão de regeneração). 135

Tabela 4.43 – Comparação entre métodos de seleção de fluidos (convencional e regressão) para o ciclo subcrítico com superaquecimento com estratificação por categoria de fluido. 138

Tabela 4.44 – Comparação entre métodos de seleção de fluidos (convencional e regressão) para o ciclo subcrítico com superaquecimento (geral). 139

Tabela 4.45 – Comparação entre métodos de seleção de fluidos (convencional e regressão) para o ciclo subcrítico com superaquecimento (por pressão de regeneração). 140

Tabela 4.46 – Comparação entre métodos de seleção de fluidos (convencional e regressão) para o ciclo supercrítico com estratificação por categoria de fluido. 143
Tabela 4.47 – Comparação entre métodos de seleção de fluidos (convencional e regressão) para o ciclo subcrítico com superaquecimento (geral). 144
Tabela 4.48 – Comparação entre métodos de seleção de fluidos (convencional e regressão) para o ciclo supercrítico (por pressão de regeneração). 146
Tabela 4.49 – Eficiência térmica máxima por fluido e correspondentes valores de operação – Ciclo Subcrítico 149
Tabela 4.50 – Eficiência térmica máxima por fluido e correspondentes valores de operação – Ciclo Subcrítico com Superaquecimento 150
Tabela 4.51 – Eficiência térmica máxima por fluido e correspondentes valores de operação – Ciclo Supercrítico 150

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAA	Aquecedor de água de alimentação aberto
BORC	Basic organic Rankine cycle (Ciclo Rankine orgânico básico)
CFC	Clorofluorcarboneto
DRORC	Double-stage regenerative organic Rankine cycle (Ciclo Rankine orgânico de duplo estágio)
ETC	Eficiência térmica do ciclo
FOM	Figure of merit (Figura de mérito)
GWP	Global warming potential (Potencial de aquecimento global)
HCFC	Hidroclorofluorcarboneto
MBWR	Modified Benedict-Webb-Rubin
ODP	Ozone depletion potential (Potencial de depleção de ozônio)
ORC	Organic Rankine cycle (Ciclo Rankine orgânico)
SRORC	Single-stage regenerative organic Rankine cycle (Ciclo Rankine orgânico de estágio único)
TLE	Trabalho líquido específico

LISTA DE SÍMBOLOS

h Entalpia específica, [kJ/kg]

s Entropia específica, [kJ/(kg.K)]

T Temperatura, [K]

P Pressão, [kPa]

p Pressão, [kPa]

q Calor específico, [kJ/kg]

w Trabalho específico, [kJ/kg]

W Trabalho, [kJ]

η Eficiência térmica, [%]

x Título, [adimensional]

y Fração de extração na turbina, [adimensional]

SUBSCRITOS

1 Estado 1 (saída do evaporador)

2 Estado 2 (extração da turbina)

3 Estado 3 (saída da turbina / entrada do condensador)

4 Estado 4 (saída do condensador)

5 Estado 5 (entrada do regenerador)

6 Estado 6 (saída do regenerador)

7 Estado 7 (entrada do evaporador)

s Isentrópico

$evap$ Evaporação

$r, evap$ Evaporação adimensional

sup Superaquecimento

r, sup Superaquecimento adimensional

$supc$ Supercrítico

$r, supc$ Supercrítico adimensional

reg Regeneração

r, reg Regeneração adimensional

cr Crítica

$entrada$ Entrada

$saída$ Saída

$b1$ Bomba 1

$b2$ Bomba 2

t Turbina

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 28

1.1 Panorama global. 28
1.2 Justificativa. 29
1.3 Objetivos. 30
1.3.1 Objetivos gerais. 30
1.3.2 Objetivos específicos. 30
1.4 Motivação para o desenvolvimento da pesquisa e particularidades 31

2. REVISÃO DE LITERATURA 32

2.1 Sistemas de potência a vapor 32
2.1.1 Modelo básico de um sistema de potência a vapor. 34
2.1.2 Ciclo Rankine. 35
2.1.2.1 Ciclo Rankine regenerativo. 37
2.1.2.2 Ciclo Rankine orgânico. 37
2.1.2.3 Aumento da eficiência de um ciclo Rankine. 39
2.1.2.4 Análise termodinâmica de ciclos Rankine orgânicos regenerativos. 40
2.1.2.5 Cálculo da eficiência térmica do ciclo e seleção do fluido de trabalho. 42

3. METODOLOGIA 47

3.1 Análise termodinâmica do ciclo Rankine orgânico regenerativo. 47
3.1.1 Balanço de energia do ciclo Rankine orgânico regenerativo. 48
3.1.2 Trabalho líquido específico do ciclo (TLE). 50
3.1.3 Eficiência térmica do ciclo (ETC). 51
3.2 Pré-seleção de fluidos de trabalho. 51
3.3 Parâmetros de operação dos ciclos. 52
3.3.1 Parâmetros de operação para o ciclo subcrítico. 55

3.3.2 Parâmetros de operação para o ciclo subcrítico com superaquecimento. 56
3.3.3 Parâmetros de operação para o ciclo supercrítico. 57
3.4 Análise dos ciclos. 59
3.4.1 Ciclo subcrítico. 59
3.4.2 Ciclo subcrítico com superaquecimento. 60
3.4.3 Ciclo supercrítico. 61
3.6 Regressão linear múltipla. 62

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES 64

4.1 Resultados do ciclo subcrítico. 64
4.1.1 Resultados do ciclo subcrítico para fluidos molhados. 64
4.1.2 Resultados do ciclo subcrítico para fluidos isentrópicos. 65
4.1.3 Resultados do ciclo subcrítico para fluidos secos. 66
4.2 Resultados do ciclo subcrítico com superaquecimento. 67
4.2.1 Resultados do ciclo subcrítico com superaquecimento para fluidos molhados. 67
4.2.2 Resultados do ciclo subcrítico com superaquecimento para fluidos isentrópicos. 69
4.2.3 Resultados do ciclo subcrítico com superaquecimento para fluidos secos 69
4.3 Resultados do ciclo supercrítico. 71
4.3.1 Resultados do ciclo supercrítico para fluidos molhados. 71
4.3.2 Resultados do ciclo supercrítico para fluidos isentrópicos. 72
4.3.3 Resultados do ciclo supercrítico para fluidos secos. 73
4.4 Isocurvas de eficiência térmica do ciclo e trabalho líquido específico. 74
4.4.1 Isocurvas de eficiência térmica e trabalho líquido específico para o ciclo subcrítico. 74
4.4.2 Isocurvas de eficiência térmica e trabalho líquido específico para o ciclo subcrítico com superaquecimento. 83
4.4.3 Isocurvas de eficiência térmica e trabalho líquido específico para o ciclo supercrítico. 91

4.5 Regressão linear múltipla para eficiência térmica do ciclo (ETC) e trabalho líquido específico (TLE). 100
4.5.1 Regressão linear múltipla para o ciclo subcrítico. 102
4.5.1.1 Regressão linear múltipla para fluidos molhados operando em ciclo subcrítico. 102
4.5.1.2 Regressão linear múltipla para fluidos isentrópicos operando em ciclo subcrítico. 103
4.5.1.3 Regressão linear múltipla para fluidos secos operando em ciclo subcrítico. 105
4.5.2 Regressão linear múltipla para o ciclo subcrítico com superaquecimento. 107
4.5.2.1 Regressão linear múltipla para fluidos molhados operando em ciclo subcrítico com superaquecimento. 107
4.5.2.2 Regressão linear múltipla para fluidos isentrópicos operando em ciclo subcrítico com superaquecimento. 108
4.5.2.3 Regressão linear múltipla para fluidos secos operando em ciclo subcrítico com superaquecimento. 110
4.5.3 Regressão linear múltipla para o ciclo supercrítico. 112
4.5.3.1 Regressão linear múltipla para fluidos molhados operando em ciclo supercrítico. 112
4.5.3.2 Regressão linear múltipla para fluidos isentrópicos operando em ciclo supercrítico. 114
4.5.3.3 Regressão linear múltipla para fluidos secos operando em ciclo supercrítico. 115
4.5.4 Discussões acerca da análise estatística de regressão 117
4.6 Análise dos modelos de regressão desenvolvidos. 117
4.6.1 Análise dos modelos de regressão desenvolvidos para o ciclo subcrítico. 118
4.6.2 Análise dos modelos de regressão desenvolvidos para o ciclo subcrítico com superaquecimento. 122
4.6.3 Análise dos modelos de regressão desenvolvidos para o ciclo supercrítico. 127
4.7 Seleção de fluidos pelo modelo de regressão linear. 132
4.7.1 Ciclo subcrítico. 132

4.7.1.1 Seleção pela eficiência térmica média. 132
4.7.1.2 Seleção pela eficiência térmica máxima. 134
4.7.2 Ciclo subcrítico com superaquecimento. 137
4.7.2.1 Seleção pela eficiência térmica média. 137
4.7.2.2 Seleção pela eficiência térmica máxima. 140
4.7.3 Ciclo supercrítico. 143
4.7.3.1 Seleção pela eficiência térmica média. 143
4.7.3.2 Seleção pela eficiência térmica máxima. 145
4.8 Resumo dos resultados 148

5. CONCLUSÕES E EXTENSÕES FUTURAS 152

6. REFERÊNCIAS BILIOGRÁFICAS 154

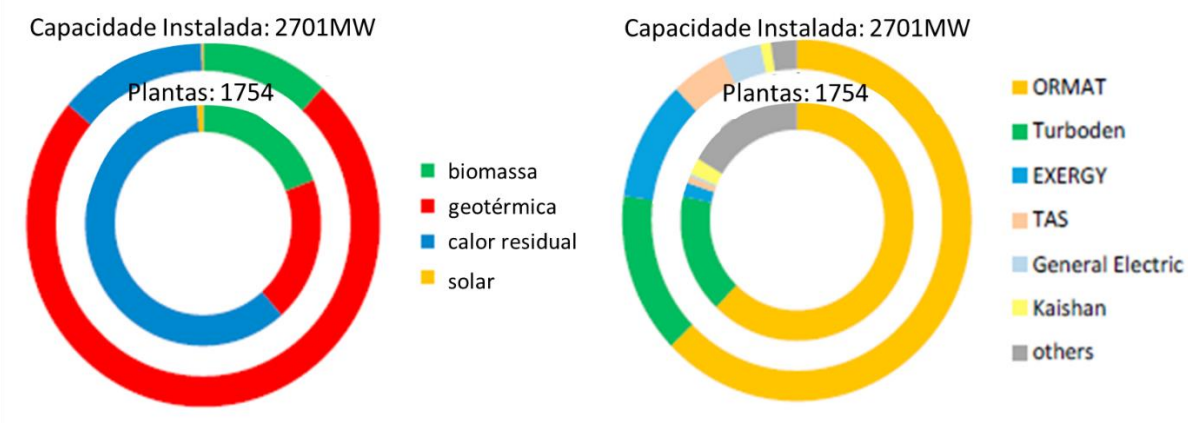
1.INTRODUÇÃO

1.1 Panorama global

O elevado calor residual oriundo de processos térmicos e a queima de combustíveis fósseis têm produzido diversos impactos ao meio ambiente, tais como poluição do ar, a destruição da camada de ozônio e o consequente aquecimento global. Uma das soluções propostas para estes problemas remete ao uso de tecnologias renováveis, que envolvam a recuperação de calor rejeitado para a geração de energia elétrica. Dentre estas tecnologias, considera-se o ciclo Rankine orgânico (ORC) que utiliza um fluido orgânico para recuperação de calor residual a baixas temperaturas e posterior geração de energia (Adaptado de MAGO *et al*., 2008).

Segundo Tartière e Astolfi (2017), o ciclo Rankine orgânico é considerado uma tecnologia confiável para conversão de energia térmica em energia elétrica a partir de baixas temperaturas e para as mais diversas aplicações, que abrangem desde instalações com fontes de energia renováveis até eficiência de plantas industriais geradoras de energia. Os autores citam que até o final do ano de 2016, a tecnologia ORC apresentava uma capacidade instalada equivalente a 2701 MW distribuídas em 1754 instalações em operação. A aplicação do ORC, até a referida data, divide-se basicamente em instalações de energia solar, de biomassa, de recuperação de calor residual e geotérmica. As plantas de geração geotérmica são predominantes no mercado mundial, correspondendo a 74,8% do total. Devido ao elevado investimento requerido, poucas empresas são responsáveis pelas 337 instalações ORC ao redor do mundo, conforme demonstrado pela Fig. 1.1:

Figura 1.1 – Utilização da tecnologia ORC no mundo. Fonte: Adaptado de Tartière e Astolfi, 2017.



1.2 Justificativa

Atualmente, diversos sistemas de potência a vapor são operacionalizados com base no ciclo Rankine convencional. Neste modelo operacional, o princípio de funcionamento remete à uma fonte térmica onde, em geral, o calor é obtido a partir da queima de um combustível fóssil, promovendo a emissão de gases poluentes, resultando em uma série de impactos ambientais.

Entretanto, os ciclos de potência, em geral, apresentam uma proporcionalidade direta entre a temperatura de aquecimento do fluido e sua eficiência térmica resultante. Desta forma, torna-se um desafio a adequação dos parâmetros do ciclo de potência a vapor de modo que se obtenha elevadas eficiências térmicas com baixa deterioração ambiental, decorrente da operação do sistema.

O ciclo Rankine convencional, cuja operacionalização se baseia no uso de água como fluido de trabalho, requer uma quantidade considerável de energia térmica (queima de grandes quantidades de combustível) para alteração do estado deste fluido, visando o funcionamento do elemento turbomáquina (turbina), que será responsável pela geração da energia elétrica desejada.

A substituição da água por um fluido de trabalho orgânico permite a operacionalização do ciclo Rankine a partir de temperaturas inferiores, o que proporciona uma redução na quantidade de calor de entrada quando comparado com o ciclo convencional, resultando, desta forma, em uma diminuição proporcional na queima de combustíveis e respectiva emissão de poluentes.

A inclusão de um regenerador também permitirá uma redução no fornecimento de energia necessária, devido ao pré-aquecimento da água de alimentação do sistema. A incorporação deste componente também proporciona uma elevação na eficiência térmica do ciclo, em convergência com a redução do calor de entrada necessário.

Por fim, torna-se necessário um estudo que correlacione a adequada seleção de um fluido de trabalho orgânico com a utilização do regenerador, visando o aumento da eficiência térmica do ciclo Rankine em consonância com a redução da queima de combustíveis para alimentação do sistema e subsequente emissão de poluentes.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivos gerais

O objetivo geral deste trabalho é analisar a influência das variáveis de entrada (pressão e temperatura) na eficiência térmica de um ciclo Rankine utilizando diversos fluidos orgânicos. A influência destas mesmas variáveis na quantidade de calor de entrada requerida também está inclusa no objetivo geral, considerando-se a necessidade de redução da queima de combustíveis nos ciclos de potência a vapor.

1.3.2 Objetivos específicos

- Estabelecer os parâmetros de entrada (variáveis e permanentes) e suas faixas de operação, para os volumes de controle aplicáveis ao ciclo Rankine orgânico regenerativo aberto;
- Realizar a análise termodinâmica de um ciclo Rankine orgânico regenerativo aberto, operando sob condições subcríticas, subcríticas com superaquecimento e supercríticas, para diversos fluidos de trabalho, a partir dos parâmetros de entrada estabelecidos para os volumes de controle evaporador, regenerador e condensador;
- Analisar a influência dos parâmetros de entrada estabelecidos, assim como a influência conjunta dos mesmos nos resultados de eficiência térmica e trabalho líquido do ciclo Rankine orgânico regenerativo aberto;

- Representar, graficamente, a influência dos parâmetros de entrada estabelecidos, assim como a influência conjunta dos mesmos nos resultados de eficiência térmica e trabalho líquido do ciclo Rankine orgânico regenerativo aberto;
- Desenvolver e validar um modelo matemático, a partir dos resultados das análises termodinâmicas realizadas, que permita a análise de desempenho termodinâmico dos ciclos subcrítico, subcrítico superaquecido e superaquecido, em termos de eficiência térmica do ciclo, a partir dos parâmetros de entrada estabelecidos para os volumes de controle evaporador, regenerador e condensador;
- Desenvolver um método de seleção de fluidos orgânicos operando em ciclos Rankine regenerativos abertos, considerado como referência a máxima eficiência térmica e máximo trabalho líquido obtidos para cada ciclo.

1.4 Motivação para desenvolvimento da pesquisa e particularidades

O desenvolvimento de modelos termodinâmicos para o cálculo de eficiência térmica, trabalho líquido e seleção de fluidos de trabalho relacionado ao ciclo Rankine orgânico regenerativo apresentam, de maneira geral, limitações acerca de sua abrangência. Algumas limitações observadas referem-se ao próprio fluido de trabalho, sua classificação (molhado, seco ou isentrópico), ao tipo de ciclo (subcrítico, subcrítico superaquecido ou supercrítico), ou às variáveis de influência (algumas pesquisas estabelecem variáveis complexas que não representam os parâmetros de entrada do sistema, ou seja, variáveis secundárias, obtidas a partir dos parâmetros de operação iniciais do ciclo).

Outro aspecto importante a ser ressaltado remete à comparação do desempenho de fluidos de trabalho orgânicos sujeitos às mesmas condições de operação (pressão e temperatura). Entretanto, estes fluidos possuem temperaturas e pressões críticas distintas, o que torna a comparação realizada questionável, considerando que a análise considera valores absolutos e não um percentual do potencial térmico de cada fluido.

Esse trabalho consiste em desenvolver um modelo matemático que permita a seleção de fluidos de trabalho para o ciclo Rankine orgânico através de seu desempenho termodinâmico (eficiência térmica e trabalho líquido do ciclo). Os

modelos serão aplicáveis a cada ciclo termodinâmico (subcrítico, subcrítico superaquecido e supercrítico) e a eficiência térmica será expressa matematicamente a partir de parâmetros de entrada do sistema (pressão e temperatura de evaporação e pressão de regeneração). Para que seja feita uma análise de desempenho coerente, as variáveis serão estabelecidas através de adimensionais, onde as pressões e temperaturas de operação corresponderão a percentuais dos valores críticos de cada fluido de trabalho. A simulação dos resultados fornecerá dados para desenvolvimento de regressões lineares que permitirão o cálculo da eficiência térmica e trabalho líquido do ciclo e a consequente seleção do fluido de trabalho com melhor desempenho térmico.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo, é apresentada uma breve revisão de literatura com objetivo de discorrer sobre: I) os fundamentos para entendimento do ciclo Rankine regenerativo orgânico; II) as análises termodinâmicas realizadas por diversos autores para o ciclo Rankine orgânico regenerativo; III) a forma de obtenção dos valores de eficiência térmica de sistemas operando neste ciclo e a subsequente seleção dos melhores fluidos de trabalho com base neste parâmetro de desempenho.

Ao término do capítulo, estão destacados os principais aspectos que motivaram o desenvolvimento da pesquisa e contribuíram para a delimitação do estudo.

2.1 Sistemas de potência a vapor

Para Moran *et al*. (2018), conceber sistemas capazes de efetuar diversos tipos de conversão de energia em virtude de uma necessidade específica é uma meta de grande importância na engenharia. Considera-se um sistema de potência a vapor como um modelo onde há produção de uma potência líquida de saída oriunda da queima de um combustível fóssil ou nuclear, ou até mesmo da captação de energia solar (MORAN *et al*., 2018).

Sonntag e Borgnakke (2013) diferenciam os sistemas de potência a vapor pela ocorrência ou não de mudança de fase do fluido de trabalho. Um sistema de potência a vapor onde há ocorrência de mudança de fase se resume a um modelo onde o fluido de trabalho apresenta conversões alternadas entre o estado de vapor e o estado líquido, ou seja, sofre vaporização e condensação cíclicas (MORAN *et al*.,2018).

Alguns sistemas de energia trabalham de maneira cíclica, de modo que seu fluido de trabalho passe por diversas transformações ao longo dos processos e retorna ao seu estado inicial. Para estas situações, dizemos que o fluido opera em um ciclo fechado. Em outros casos, podemos ter sistemas onde o fluido de trabalho não passa por um ciclo termodinâmico, ou seja, não retorna à sua condição inicial após conclusão dos processos, muito embora o próprio sistema possa operar em um ciclo mecânico definido. Nestes casos, o fluido de trabalho apresenta uma composição ou

estado diferente de sua condição de trabalho inicial. (BORGNAKKE; SONNTAG, 2013, p. 403).

2.1.1 Modelo básico de um sistema de potência a vapor

De acordo com Moran *et al*. (2018) a modelagem de sistemas nos permite compreender como a variação dos parâmetros principais de operação afetam o desempenho real do sistema e nos fornece uma visão simples sobre as funções e características que tem por finalidade a melhoria do desempenho global.

Moran *et al*. (2018) consideram que as instalações responsáveis por geração de energia elétrica, em sua grande maioria, são oriundas de sistemas de potência a vapor onde a água é o fluido de trabalho. Com o objetivo de detalhar o funcionamento de uma instalação deste tipo, movida a combustível fóssil (fonte de calor), os autores subdividem a representação esquemática ilustrada na Fig. 2.1 em quatro subsistemas principais (A, B, C e D), onde:

A: Onde ocorre o fornecimento da energia (calor) necessária para vaporização da água que escoa pela caldeira. Esta energia pode ser obtida através da queima de um combustível fóssil, reações nucleares (usinas nucleares) ou pela captação, concentração e armazenamento de energia solar.

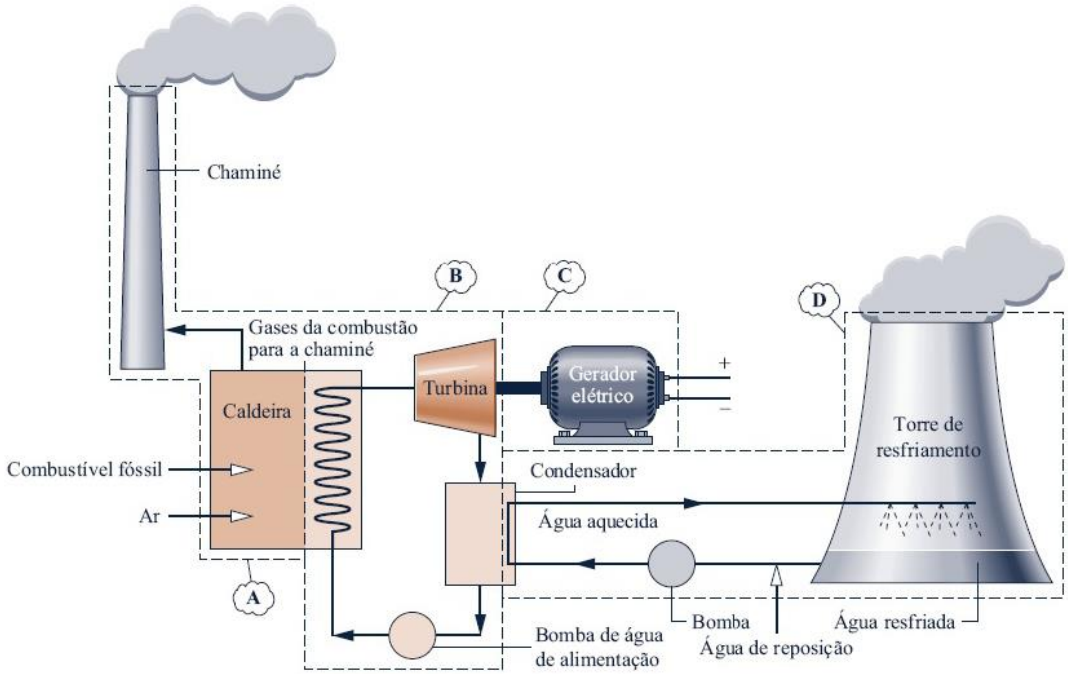
B: Principal parte do sistema de potência, onde ocorre a conversão de energia térmica (calor) em trabalho. Após o aquecimento na caldeira, o fluido de trabalho é convertido em vapor e movimenta a turbina, sofrendo expansão. Em seguida, ao deixar a turbina, o fluido é direcionado para um condensador, onde calor é rejeitado para o ambiente, fazendo com que o vapor retorne ao estado líquido e, enviado à bomba de alimentação, inicia um novo ciclo.

C: Eixo da turbina, que se encontra acoplado ao gerador elétrico, movimenta-o, iniciando o processo de geração de energia elétrica (saída do sistema).

D: Este subsistema trata do arrefecimento do fluido de trabalho. O condensador retira energia térmica do vapor, convertendo o fluido novamente ao estado líquido. Esta água, ainda aquecida, passa pela torre de resfriamento, onde calor é rejeitado para a atmosfera. Com o auxílio de uma bomba, o fluido de trabalho é recirculado pelo condensador. Um dos aspectos relevantes acerca do arrefecimento trata da utilização das torres de arrefecimento, cujo objetivo é fornecer água suficiente para a operação de resfriamento. Este subsistema faz com que a instalação de uma usina térmica não

se limite à localização geográfica e contribui significativamente com a redução da poluição térmica.

Figura 2.1 – Modelo básico de uma planta de potência a vapor. Fonte: Adaptado de Moran *et al*., 2018.



2.1.2 Ciclo Rankine

Çengel e Boles (2013) abordam o ciclo Rankine como o ideal para sistemas de potência a vapor. Este ciclo é resultante de um superaquecimento do vapor d'água na caldeira e de uma condensação, o que viabiliza a correção das limitações práticas encontradas no ciclo de Carnot. Os autores detalham os processos deste ciclo conforme a Fig. 2.2:

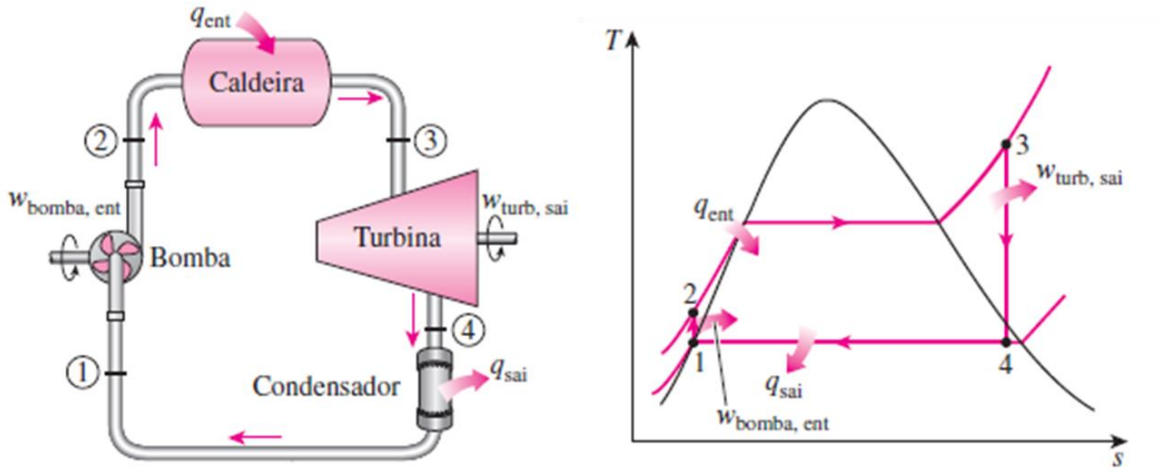
(1-2) Compressão isentrópica em uma bomba;

(2-3) Fornecimento de calor a pressão constante em uma caldeira;

(3-4) Expansão isentrópica em uma turbina;

(4-1) Rejeição de calor a pressão constante em um condensador.

Figura 2.2 – Ciclo de Rankine simples ideal. Fonte: Çengel e Boles (2013).



Inicialmente, o fluido de trabalho (água), ao entrar na bomba (estado 1) sofre uma compressão isentrópica na bomba (ou compressor) até a pressão de operação da caldeira (estado 2). Em virtude da redução do volume específico da água, sua temperatura sofre uma ligeira elevação. Logo após, o líquido comprimido que sai da bomba adentra a caldeira, onde recebe calor oriundo de combustão, reações nucleares, ou outras fontes.

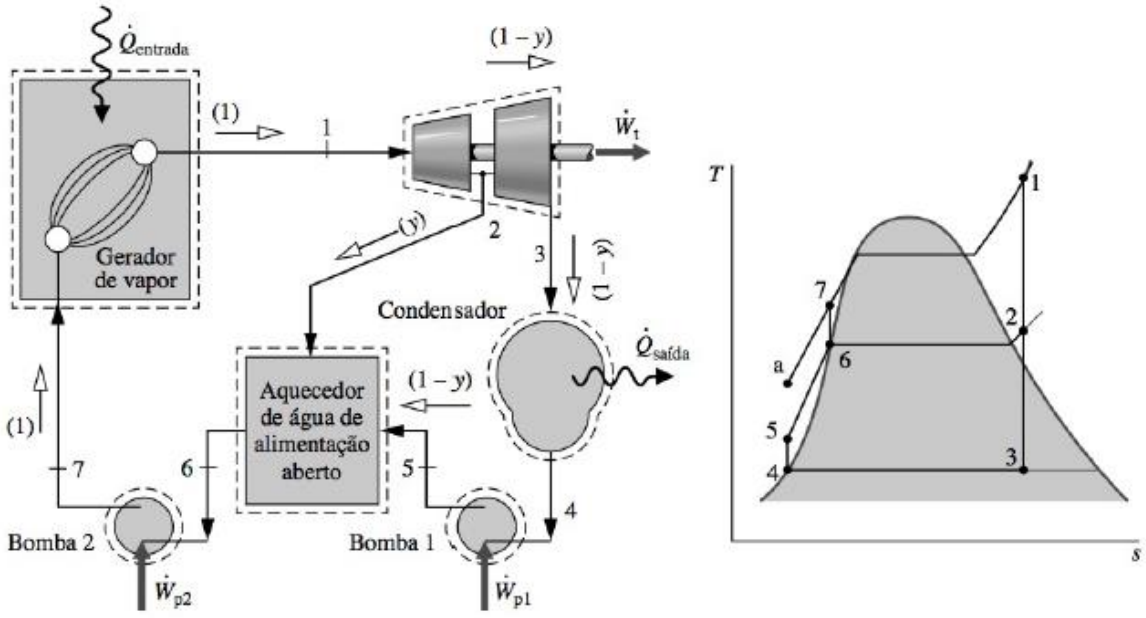
O fluido de trabalho recebe este calor a uma pressão constante, deixando a caldeira como vapor superaquecido (estado 3) – no diagrama *T*-*s*, ilustrado na Fig. 1.3, o calor transferido para a água corresponde à área sob a curva do processo 2-3. Em seguida, o vapor superaquecido chega à turbina, onde sofre uma expansão isentrópica, produzindo trabalho, movendo um eixo que se encontra conectado a um gerador elétrico. Nessa etapa do processo, temperatura e pressão sofrem uma redução (estado 4). Ao entrar no condensador, o vapor se encontra como mistura água e vapor, com título de alto valor. A condensação ocorre sob pressão constante, devido à transferência de calor para um reservatório a baixa temperatura, como rios, lagos ou a própria atmosfera – no diagrama *T*-*s*, ilustrado na Fig. 1.3, o calor transferido para este reservatório corresponde à área sob a curva do processo 4-1. Ao sair do condensador, a água se encontra em um estado de líquido saturado, adentrando a bomba e dando início a um novo ciclo. (Adaptado de ÇENGEL e BOLES, 2013, p.557).

2.1.2.1 Ciclo Rankine regenerativo

A transferência de calor para o fluido de trabalho ocorre em uma temperatura relativamente baixa, o que promove uma redução na eficiência térmica do ciclo. A partir desta consideração, torna-se interessante proporcionar um pré-aquecimento ao fluido de trabalho que sai da bomba (líquido comprimido) antes que entre na caldeira. A este fluido de trabalho, nesta etapa do ciclo, dá-se o nome de fluido de alimentação (ÇENGEL e BOLES, 2013, p.571)

Moran *et al*. (2005) denominam este aquecimento do fluido de trabalho nesta fase como aquecimento regenerativo da água de alimentação, sendo que este processo promove o aumento da temperatura média no fornecimento de calor, que por sua vez, tende a aumentar a eficiência térmica do ciclo, conforme a Fig. 2.3.

Figura 2.3 – Ciclo Rankine com regenerador aberto e diagrama *T-s*. Fonte: Moran *et al.* (2005).

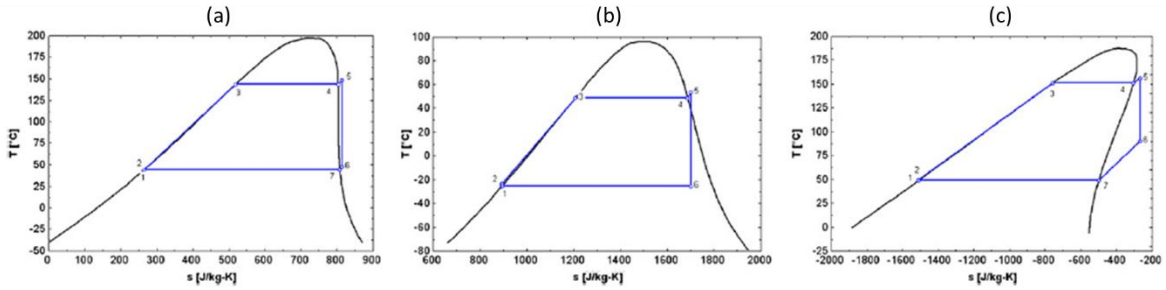


2.1.2.2 Ciclo Rankine orgânico (ORC)

Lecompte *et al*. (2015) definem o ciclo Rankine orgânico (ORC) como um modelo muito similar ao ciclo Rankine convencional, cuja diferença básica remete ao fluido de trabalho utilizado. Neste modelo, ocorre a substituição do fluido usual (água) por um fluido orgânico, que, cuidadosamente selecionado, permite ao sistema a conversão de energia térmica em eletricidade a partir de baixas temperaturas.

Quoilin *et al*. (2013) classificam os fluidos orgânicos em três categorias básicas: isentrópicos, molhados e secos. Segundo os autores, tal classificação é baseada na forma da linha de saturação de vapor do diagrama *T-s* de cada fluido. Curvas de saturação que tendem ao infinito representam fluidos isentrópicos. Este tipo de fluido tem seu diagrama *T-s* representado na Fig.2.4 (a). Já as curvas de saturação de vapor com direção negativa são características de fluidos molhados, tendo em vista que, após a expansão na turbina, o fluido se encontra em um estado de líquido-vapor. Estes casos estão exemplificados pela Fig.2.4 (b). Por fim, curvas de saturação de vapor positivas denotam fluidos secos, considerando que, após o processo de expansão, o fluido se encontra em um estado de vapor saturado. Os fluidos secos são representados pela curva ilustrada na Fig.2.4 (c).

Figura 2.4 – Diagrama *T-s* característico para fluidos (a) isentrópicos, (b) molhados e (c) secos.
Fonte: Quoilin *et al.* (2013).

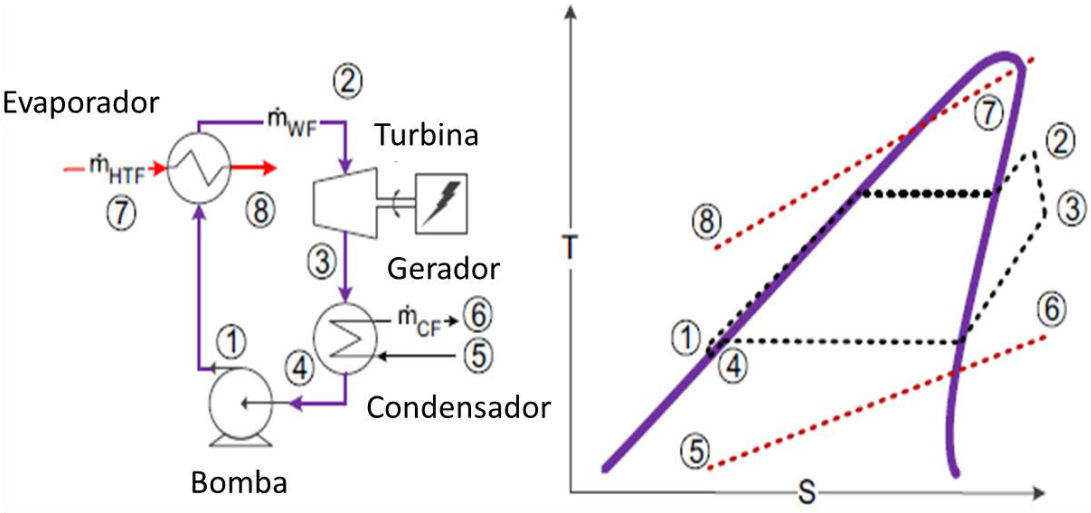


A arquitetura básica de um sistema operando a partir de um ORC consiste de uma bomba de alimentação, um evaporador, uma turbina e um condensador, apresentando o mesmo princípio operacional de um ciclo Rankine convencional. O processo é iniciado com a compressão de um líquido seguida de sua mudança de fase (evaporação), logo após, o vapor sofre um processo de expansão na turbina, e em seguida, passa por uma nova mudança de fase, desta vez para o estado líquido (condensador), retornando ao seu estado inicial, para conclusão e reinício do ciclo (Adaptado de JAVANSHIR e SARUNAC, 2013).

Na Fig. 2.5, a bomba fornece fluido de trabalho ao evaporador (caldeira), que promove a mudança de fase a uma pressão aproximadamente constante. Este aquecimento é realizado a partir da transferência de calor produzida por uma fonte externa ao sistema. Em seguida, o fluido de trabalho saturado ou superaquecido

passa pela turbina, sofrendo um processo de expansão. Neste instante, a turbina, que está conectada à um gerador, promove a geração de energia elétrica, enquanto o fluido de trabalho no estado de vapor a baixa pressão e temperatura (saída da turbina) é conduzido a um trocador de calor (condensador) para retornar ao seu estado inicial. Ao passar pela bomba de alimentação, a pressão do fluido é elevada novamente para o início de um novo ciclo (Adaptado de JAVANSHIR e SARUNAC, 2013).

Figura 2.5 – Arquitetura básica de um ORC subcrítico (básico) e diagrama *T*-*s*. Fonte: Adaptado de Lecompte *et al.* (2015).



2.1.2.3 Aumento da eficiência térmica do ciclo Rankine

De acordo com Çengel e Boles (2013) as ideias acerca do aumento da eficiência térmica do ciclo Rankine remetem basicamente ao aumento da temperatura média na qual o calor é fornecido ao fluido (o que envolve, naturalmente, ciclos de reaquecimento, superaquecimento e regeneração do fluido de trabalho), e à redução da temperatura média na qual o calor é rejeitado para o ambiente (condensador).

Sonntag e Borgnakke (2013) resumem as oportunidades de melhoria na eficiência térmica do ciclo Rankine à três alternativas básicas: Aumento da pressão durante adição de calor, redução da pressão no condensador e superaquecimento do vapor. A qualidade do vapor que sai da turbina é afetada diretamente por estas intervenções. Quando superaquecemos o vapor ou aumentamos a pressão durante a adição de calor, temos uma melhora na qualidade do mesmo, entretanto, há um decréscimo em sua qualidade quando reduzimos a pressão de saída.

2.1.2.4 Análise termodinâmica de ciclos Rankine orgânicos regenerativos

Mago *et al*. (2008) desenvolveram um modelo para análise de eficiência térmica de um ORC regenerativo aplicando a primeira e segunda leis da termodinâmica a cada volume de controle do sistema (regenerador, bomba, evaporador, turbina e condensador). Com base nos balaços de energia e entropia realizados, os autores obtiveram um modelo na qual a eficiência térmica do ciclo corresponde à relação entre o trabalho líquido do ciclo e a taxa de calor de entrada do sistema (evaporador). Os cálculos foram realizados para os fluidos R113, R123, isobutano e R245ca (fluidos secos), e os resultados foram comparados com um ORC convencional (sem regenerador). Os autores utilizaram como parâmetros de operação do ciclo: a) Temperaturas de evaporação entre -12°C e 48°C; b) Pressões de entrada da turbina entre 1 e 4 MPa; c) Eficiência isentrópica da turbina igual a 80% e d) Eficiência isentrópica das bombas igual a 85%. Os resultados obtidos indicaram um aumento na eficiência térmica para todos os fluidos utilizados no ORC quando em comparação com o ciclo Rankine convencional, onde o maior aumento de eficiência térmica foi proporcionado pelo fluido R113 (13,4% e 16%, para a menor e maior pressão de entrada da turbina, respectivamente). Foi também observado uma redução de 42% das irreversibilidades do sistema (ORC), além da redução da quantidade de calor de entrada requerido, quando comparado com o ciclo Rankine convencional.

Roy e Misra (2012) realizara uma análise de um ORC regenerativo utilizando dois fluidos diferentes (R123 e R134a), com o objetivo de selecionar o melhor para a operação do ciclo a partir dos resultados de eficiência térmica, trabalho de saída da turbina, taxa de irreversibilidades e eficiência de segunda lei da termodinâmica. Para isso, inicialmente foi variada a temperatura da fonte de calor (e consequentemente a variação da temperatura de entrada da turbina) durante o superaquecimento do fluido, mantendo uma pressão constante em 2,5 MPa. Em seguida, foi realizada uma variação da pressão de entrada da turbina (2,0 MPa a 3,0 MPa). Os resultados obtidos demonstraram que tanto a eficiência térmica quanto o trabalho de saída da turbina aumentam com o aumento da temperatura de entrada da turbina, muito embora a correlação entre as variáveis não apresente linearidade. Além disso, a maior eficiência térmica do ciclo e o maior trabalho de saída da turbina foram obtidos elevando a pressão de entrada da turbina para 2,7 MPa, para temperaturas entre 160 °C e 245

°C, e 2,85 MPa para temperaturas acima de 245 °C, sendo esta última combinação a responsável pelo maior valor de eficiência térmica e trabalho de saída da turbina.

Xi *et al*. (2013) realizaram um estudo comparativo entre um ciclo Rankine regenerativo simples (BORC – *Basic organic Rankine cycle*), um ciclo Rankine orgânico regenerativo de estágio único (SRORC – *Single stage regenerative organic Rankine cycle*) e um ciclo Rankine orgânico regenerativo de estágio duplo (DRORC - *Double stage regenerative organic Rankine cycle*), considerando seis fluidos de trabalho: R11, R123, R141b, R113, R245ca e isobutano. Os parâmetros de operação do sistema adotados para otimização foram a temperatura da fonte de calor (420 K), temperatura de condensação (303,15 K), eficiência isentrópica da turbina (80 %) e eficiências isentrópicas das bombas (70 %). Os resultados obtidos demonstraram que as eficiências térmicas obtidas pelos ciclos regenerativos são superiores ao ciclo Rankine básico, para todos os fluidos de trabalho utilizados. Os valores de trabalho líquido dos sistemas regenerativos apresentam uma redução considerável em relação ao ciclo básico. Moran *et al*. (2005) mencionam que esta redução se deve ao fato de que a extração de vapor da turbina reduz a quantidade de fluido em expansão, o que resulta em menor capacidade de produção de trabalho.

Imran *et al*. (2014) determinaram a eficiência térmica de um ciclo Rankine orgânico regenerativo de único estágio como sendo a razão entre o trabalho líquido (diferença entre trabalhos das turbinas e bombas) e o calor de entrada (evaporador). Os fluidos utilizados foram o R245fa (seco), R134a (molhado), R11, R123 e R141b (isentrópicos), com o objetivo de desenvolver uma avaliação termo econômica do sistema, obtendo a máxima eficiência térmica com menor custo de investimento. Realizando uma otimização dos parâmetros de entrada do sistema (pressão de evaporação, temperatura de superaquecimento e diferença de temperaturas entre o fluido de trabalho e a fonte de calor) os autores obtiveram a máxima eficiência térmica para o fluido 245fa e, comparando o ciclo Rankine regenerativo com um ciclo Rankine simples, concluíram que este último possui um baixo custo de investimento e baixa eficiência térmica, em relação ao ciclo regenerativo. Além disso, foi analisado um ciclo Rankine de dupla regeneração (*double stage regenerative ORC* ou *DS regenerative ORC*) para comparação dos resultados obtidos. Os resultados obtidos permitiram a otimização do desempenho do sistema, considerado que o modelo matemático desenvolvido possibilita a obtenção do ponto ótimo entre eficiência térmica do ciclo e o custo de investimento relacionado. Além disso, foi verificado um aumento da

eficiência térmica do ciclo em função do aumento da pressão de evaporação, embora ocorra um decréscimo após determinado valor de pressão, devido à redução do trabalho líquido de saída da turbina. Finalmente, foi verificado que o superaquecimento do fluido na entrada da turbina é desnecessário, em função da baixa influência na eficiência térmica e nos custos de investimento.

Javanshir e Sarunac (2017) desenvolvem em seu trabalho um método para o cálculo de trabalho líquido e eficiência térmica na qual os valores de entrada do sistema (pressão e temperatura) são definidos como a relação entre o valor máximo de operação e o valor crítico de operação para cada fluido de trabalho. Para a análise do ciclo termodinâmico, os autores estabeleceram faixas de operação para cada classe de fluidos (molhados, secos e isentrópicos), definindo, desta forma, os valores de operação para cada fluido, em função de sua temperatura e pressão crítica. Outros parâmetros de operação relevantes, pré-definidos pelos autores foram a temperatura de condensação (15 °C), eficiência isentrópica a turbina (85%), pressão de saturação mínima (15 °C) e limites de temperatura máxima (50-250 °C). Os autores apresentaram resultados do trabalho líquido específico e eficiência térmica para um ciclo subcrítico superaquecido para cada um dos fluidos em função das temperaturas e pressões adimensionais.

2.1.2.5 Cálculo da eficiência térmica do ciclo e seleção do fluido de trabalho

Drescher e Bruggemann (2007) descreveram como vantajosa a utilização de fluidos orgânicos para pequenas plantas energéticas e/ou sistemas operando em ORC em que a temperatura máxima é baixa. Para ORC’s de baixa temperatura, os fluidos orgânicos promovem uma eficiência térmica superior à que a água poderia promover. Em plantas energéticas consideradas pequenas, os fluidos orgânicos são utilizados devido ao fato de permitirem uma alta eficiência na turbina em carga parcial. Outro aspecto relevante é que a água apresenta elevada eficiência térmica para operações em altas pressões e esta condição exige a adoção de medidas de segurança que são consideradas economicamente inviáveis para operações em pequenas plantas energéticas.

De acordo com Rayegan e Tao (2011) a seleção do fluido de trabalho e condições de operação tem efeitos significativos sobre o sistema, sua eficiência energética e impactos ambientais. Os autores mencionaram que condições de

trabalho para ciclos otimizados são diferentes para cada tipo de fluido de trabalho, permitindo questionamentos acerca de comparações e análises realizadas em trabalhos anteriores. Já Bertrand *et al*. (2009) apresentaram uma correlação entre a seleção do fluido de trabalho e a viabilidade econômica de um sistema ORC. Os autores mencionaram que uma seleção inadequada do fluido de trabalho poderia levar o sistema à uma baixa eficiência térmica com plantas energéticas de alto custo operacional.

Conforme Drescher e Brugemman (2007), pode-se definir alguns critérios a serem levados em consideração durante o processo de identificação do fluido de trabalho mais confiável. São eles: propriedades termodinâmicas; estabilidade do fluido de trabalho e sua compatibilidade com os materiais em contato (baseado no limite superior da temperatura máxima do processo); aspectos ambientais, de saúde e segurança; disponibilidade e custos.

Bertrand *et al*. (2009) citaram algumas propriedades de um fluido orgânico que o tornam favorável ao ciclo Rankine: baixo volume específico, baixo custo, baixa toxicidade, baixo ODP (*Ozone Depletion Potential*), baixo GWP (*Global Warming Potential*), dentre outras. Segundo Rayegan e Tao (2011), um processo de seleção preliminar do fluido de trabalho deve evitar produtos à base de cloro (CFCs e HCFCs), tendo em vista que os mesmos não são considerados seguros para a camada de ozônio e foram banidos pelo protocolo de Montreal. Javanshir e Sarunac (2017) e Bertrand *et al*. (2009) afirmaram que refrigerantes e hidrocarbonetos são considerados fluidos de trabalho adequados para sistemas operando em ORC.

Roy e Misra (2012) apresentaram, em seu trabalho sobre um ciclo Rankine orgânico regenerativo, um método para seleção do fluido de trabalho, considerando como resultados desejados elevada eficiência térmica e elevado trabalho líquido do ciclo, além de baixa taxa de geração de entropia. Para isso, os autores desenvolveram um modelo computacional para otimização de parâmetros do processo e análise de resultados em função da variação da temperatura de entrada na turbina, utilizando os fluidos R123 e R134a. Os autores detalharam a obtenção das equações de estado para cada fluido utilizado utilizando a equação de estado de MBWR (*Modified Benedict-Webb-Rubin).* Utilizando o MATLAB, os autores obtiveram expressões para uma correlação entre a entropia e a temperatura de entrada na turbina, para cada fluido de trabalho considerado. A utilização dos modelos matemáticos desenvolvidos permitiu a otimização da temperatura de entrada na turbina para uma pressão

constante de 2,5 MPa de entrada (fonte de calor) e para diversas pressões de entrada na turbina (2,0 a 3,0 MPa) em um ciclo com superaquecimento. Além disso os autores verificaram um aumento do trabalho de saída da turbina e da eficiência térmica do ciclo em função da temperatura de entrada da turbina, muito embora não haja linearidade nesta relação. A máxima eficiência térmica foi observada para uma pressão de entrada da turbina igual a 2,7 MPa, e temperaturas entre 165 °C e 245 °C. Para temperaturas acima de 245 °C, a pressão de 2,85 MPa resulta em uma maior eficiência térmica. O método desenvolvido também proporcionou aos autores a seleção do R123 como melhor fluido de trabalho, superando o R134 no que tange aos critérios adotados (eficiência térmica, trabalho líquido e irreversibilidades do ciclo).

Wang *et al*. (2013) propuseram um modelo termodinâmico para a análise da influência do fluido de trabalho na eficiência térmica do ciclo de sistemas de geração de energia que aproveitam calor residual para funcionamento. Neste modelo, a eficiência térmica do ciclo Rankine orgânico foi calculada em função do número de Jacob, que indica uma relação matemática entre o calor sensível e o calor latente oriundos da operação de aquecimento. Os resultados de eficiência térmica foram expressos em função do número de Jacob para diversos fluidos de trabalho. Nestes resultados, um aumento da eficiência térmica do ciclo foi observado com o aumento do número de Jacob. Os autores também avaliaram a influência da temperatura de entrada da turbina na eficiência térmica do ciclo, para cada fluido de trabalho analisado. De acordo com os resultados, fluidos com baixo calor específico e elevada entalpia de vaporização são preferíveis para ciclos Rankine orgânicos, do ponto de vista de obtenção de elevadas eficiências térmicas. Finalmente, os autores mencionaram que o número de Jacob somente deve ser utilizado como critério para seleção para diferentes fluidos de trabalho operando nas mesmas condições.

Com relação ao trabalho líquido de saída do ciclo, Wang *et al*. (2013) analisaram a influência da temperatura de fornecimento de calor ao ciclo, que é alta para fluidos que possuem temperaturas crítica mais elevadas. Os autores também verificaram a baixa influência do fluido de trabalho selecionado no trabalho líquido de saída do ciclo. Assim, caso este for o resultado desejado em uma aplicação prática, os aspectos a serem considerados para a seleção do fluido de trabalho devem ser somente acerca da segurança, impacto ambiental e custo. Por fim, os autores concluíram que a seleção do fluido de trabalho deve ser determinada principalmente pela temperatura da fonte de calor do sistema, sendo que, fluidos com baixa

temperatura crítica, baixo calor específico e elevada entalpia de vaporização são adaptáveis ao ciclo Rankine orgânico.

Roedder *et al*. (2016) propôs um método de seleção do fluido de trabalho envolvendo quatro etapas:

- Pré-seleção - considera uma seleção prévia de fluidos de trabalho com base na temperatura da fonte de calor, propriedades críticas dos fluidos de trabalho e restrição no uso de substâncias proibidas por questões ambientais e de segurança;
- Eliminação - eliminação de alguns fluidos de trabalho devido a faixa de operação, tolerâncias e valores;
- Pontuação - classificação dos fluidos de trabalho em função de suas propriedades termodinâmicas, aspectos de segurança, impacto ambiental e financeiro;
- Seleção final - análise e classificação da pontuação realizada na etapa anterior, sendo que fluidos de trabalho com pontuação igual são submetidos à um ciclo termodinâmico para o cálculo da eficiência térmica e posterior seleção, em função do melhor resultado.

Javanshir e Sarunac (2017) propuseram uma tabela contendo fluidos orgânicos pré-selecionados, suas propriedades físicas, ambientais e de segurança. Os autores utilizaram os índices GWP e ODP como potenciais de ameaça ambiental de cada fluido. O GWP mede a contribuição de uma determinada quantidade de gás do efeito estufa no aquecimento global. Já o ODP indica quanto a composição química do gás pode contribuir na deterioração da camada de ozônio. O método utilizado pelos autores para a seleção do fluido de trabalho consistiu em uma avaliação da eficiência térmica do ciclo em função de um índice pré-estabelecido que varia para cada tipo de ciclo (subcrítico, subcrítico superaquecido e supercrítico). Para o ciclo subcrítico, os autores expressaram a eficiência térmica de duas maneiras distintas. Primeiramente, a eficiência térmica foi descrita em termos do número de Jacob. Na sequência, uma nova variável foi utilizada para expressar a eficiência térmica do ciclo, a Figura de Mérito (*Figure of Merit – FOM).*

Kuo *et al*. (2011, apud JAVANSHIR e SARUNAC, 2017) propuseram o uso da figura de mérito considerando que a mesma representa uma relação matemática entre o número de Jacob e a relação entre as temperaturas de evaporação e de

condensação do ciclo. Os autores realizaram, para o ciclo subcrítico, uma comparação entre valores de eficiência térmica obtidos a partir do número de Jacob e os valores de eficiência térmica obtidos através de um modelo computacional (função de FOM). O modelo computacional desenvolvido obedeceu a um modelo de regressão linear quadrática (ordem 2) obtido através de uma simulação para 23 fluidos, 31 temperaturas de evaporação e 15 temperaturas de condensação. Para o ciclo subcrítico superaquecido, a eficiência térmica foi expressa pelos autores em função do número de Jacob modificado. Esse adimensional é uma relação matemática entre o número de Jacob e o número de Jacob de superaquecimento, que é uma relação entre o calor sensível e o calor latente no processo de superaquecimento. No ciclo subcrítico sem superaquecimento, regressões lineares de relações quadráticas foram obtidas a partir de simulações computacionais, na qual os autores consideraram 23 fluidos de trabalho, 8 temperaturas de condensação, 11 temperaturas de evaporação e 9 temperaturas máximas, totalizando 18.216 casos. Por fim, no ciclo supercrítico, os autores expressaram a eficiência térmica do ciclo em função da temperatura de operação, que por sua vez é função da relação entre as temperaturas de evaporação e de condensação do ciclo.

Javanshir e Sarunac (2017) mostraram em seu trabalho a existência de uma proporcionalidade direta entre a pressão máxima de operação e a eficiência térmica de um ciclo ORC. Entretanto, os autores mostraram uma independência entre essas variáveis para pressões acima da pressão crítica. Os autores também afirmaram que a relação entre a eficiência térmica do ciclo e a temperatura de entrada da turbina depende do fluido utilizado. Para fluidos molhados, um aumento da temperatura de entrada eleva a eficiência térmica do ciclo, sendo que o oposto ocorre com os fluidos secos (desde que haja convergência entre pressões e temperaturas de entrada). Fluidos isentrópicos não mostraram dependência significativa da temperatura de entrada na turbina, apresentando maior eficiência térmica, quando comparados com os demais tipos de fluidos.

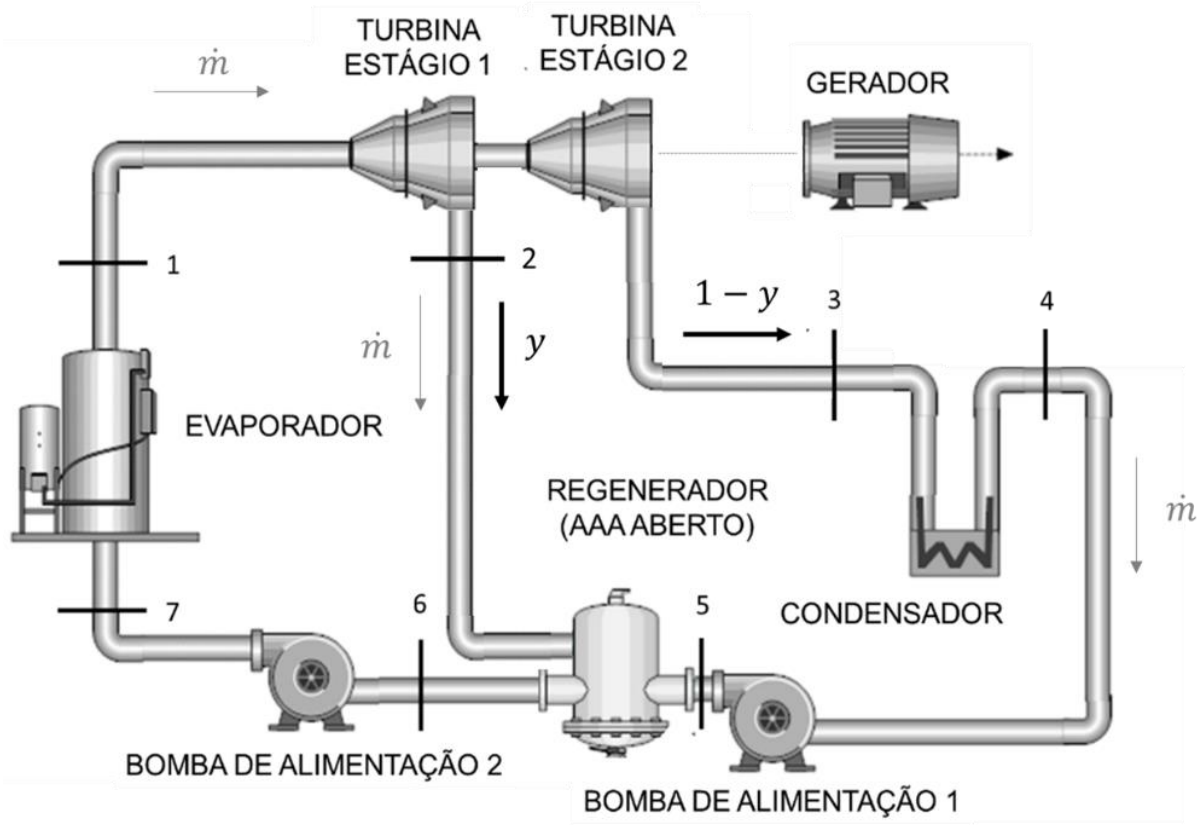
3. METODOLOGIA

3.1 Análise termodinâmica do ciclo Rankine orgânico regenerativo

O sistema de potência a vapor considerado para a pesquisa é classificado como Rankine orgânico regenerativo aberto, ou seja, trata-se de um sistema operando em ciclo Rankine com uso de fluidos orgânicos e aquecedor de água de alimentação aberto (AAAA) para pré-aquecimento do fluido de trabalho.

A análise termodinâmica do ciclo foi realizada através da aplicação do balanço de energia para cada volume de controle do referido sistema, representado na Fig. 3.1. Para o elemento turbina, houve a divisão em dois volumes de controle, devido ao processo de sangria realizado para alimentação do volume de controle regenerador.

Figura 3.1 – Ciclo Rankine orgânico regenerativo aberto. Fonte: Próprio Autor (2019).



3.1.1 Balanços de energia do ciclo Rankine orgânico regenerativo

Para realização do balanço energético em cada volume de controle do sistema, as seguintes hipóteses simplificadoras foram adotadas:

- Variações de energia cinética e potencial desprezíveis;
- Regime estacionário;
- Transferência de calor a pressão constante (evaporador e condensador);
- Equipamentos adiabáticos em relação ao ambiente (turbina estágio 1, turbina estágio 2, bomba estágio 1, bomba estágio 2 e regenerador);
- Fonte fria com temperatura constante (15ºC) (condensador).

Aplicando a primeira lei da termodinâmica em conjunto com a conservação da massa para um volume de controle englobando o evaporador, o calor transferido ao equipamento por unidade de massa é escrito como:

$$q_{entra} = h_1 - h_7 \tag{3.1}$$

Aplicando a aplicação da primeira lei da termodinâmica em conjunto com a conservação da massa para um volume de controle englobando o primeiro estágio da turbina, a potência produzida no equipamento por unidade de massa é escrita como:

$$w_{t1} = h_1 - h_2 \tag{3.2}$$

Como não admitimos a hipótese de turbina isentrópica, torna-se necessário considerar uma eficiência isentrópica para o primeiro estágio da turbina, ou seja:

$$\eta_{t1} = \frac{h_2 - h_1}{h_{2s} - h_1} \tag{3.3}$$

Aplicando a aplicação da primeira lei da termodinâmica em conjunto com a conservação da massa para um volume de controle englobando o primeiro estágio da turbina, o trabalho produzido no equipamento por unidade de massa é escrito como:

$$w_{t2} = (1-y)(h_2 - h_3) \tag{3.4}$$

Como não admitimos a hipótese de turbina isentrópica, torna-se necessário considerar uma eficiência isentrópica para o segundo estágio da turbina, ou seja:

$$\eta_{t2} = \frac{h_3 - h_2}{h_{3s} - h_2} \tag{3.5}$$

Aplicando a primeira lei da termodinâmica em conjunto com a conservação da massa para o volume de controle condensador, podemos escrever, matematicamente, o calor de saída do sistema promovido pelo equipamento por unidade de massa através da seguinte expressão:

$$q_{sai} = (h_3 - h_4)(1-y) \tag{3.6}$$

Aplicando a primeira lei da termodinâmica em conjunto com a conservação da massa para um volume de controle englobando o regenerador, a fração em massa extraída no primeiro estágio da turbina é escrita como:

$$y = \frac{h_6 - h_5}{h_2 - h_5} \tag{3.7}$$

Aplicando a aplicação da primeira lei da termodinâmica em conjunto com a conservação da massa para um volume de controle englobando a bomba de alimentação 1, o trabalho realizado pelo equipamento por unidade de massa é escrito como:

$$w_{b1} = (1-y)(h_5 - h_4) \tag{3.8}$$

Como não admitimos a hipótese de bomba isentrópica, torna-se necessário considerar uma eficiência isentrópica para a bomba de alimentação 1, ou seja:

$$\eta_{b1} = \frac{h_{5s} - h_4}{h_5 - h_4} \tag{3.9}$$

Aplicando a aplicação da primeira lei da termodinâmica em conjunto com a conservação da massa para um volume de controle englobando a bomba de alimentação 2, a potência consumida pelo equipamento por unidade de massa é escrita como:

$$w_{b2} = h_7 - h_6 \tag{3.10}$$

Como não admitimos a hipótese de bomba isentrópica, torna-se necessário considerar uma eficiência isentrópica para a bomba de alimentação 2, ou seja:

$$\eta_{b1} = \frac{h_{7s} - h_6}{h_7 - h_6} \tag{3.11}$$

3.1.2 Trabalho líquido específico

O trabalho líquido do ciclo por unidade de massa pode ser obtido através da diferença entre o calor de entrada por unidade de massa e o calor de saída por unidade de massa, ou seja:

$$w_{ciclo} = q_{entra} - q_{sai} \tag{3.12}$$

Substituindo as Eqs. (3.1) e (3.6) na Eq. (3.12) obtém-se:

$$w_{ciclo} = (h_1 - h_7) - (h_3 - h_4)(1 - y) \tag{3.13}$$

Substituindo a Eq. (3.7) na Eq. (3.13) obtém-se:

$$w_{ciclo} = (h_1 - h_7) - (h_3 - h_4)\left[1 - \left(\frac{h_6 - h_5}{h_2 - h_5}\right)\right] \tag{3.14}$$

Para simplificar a forma escrita deste capítulo, a partir deste ponto, o termo trabalho líquido específico será representado por TLE.

3.1.3 Eficiência térmica do ciclo

A eficiência térmica do ciclo pode ser obtida pela razão entre o TLE e o calor de entrada por unidade de massa, ou seja:

$$\eta_t = \frac{w_{ciclo}}{q_{entra}} \tag{3.15}$$

Para simplificar a forma escrita deste capítulo, a partir deste ponto, o termo eficiência térmica do ciclo será representado por ETC.

Substituindo as Eqs. (3.1) e (3.14) na Eq. (3.15) obtém-se:

$$\eta_t = \frac{(h_1 - h_7) - (h_3 - h_4)\left[1 - \left(\frac{h_6 - h_5}{h_2 - h_5}\right)\right]}{(h_1 - h_7)} \tag{3.16}$$

3.2 Pré-seleção de fluidos de trabalho

Nesse trabalho foram selecionados 17 fluidos de trabalho, conforme Javanshir e Sarunac (2017). Dentre os fluidos mencionados, 7 são classificados como molhados, 7 como isentrópicos e quatro (4) como secos. A Tab. 3.1 apresenta os fluidos de trabalho considerados neste estudo, suas temperaturas críticas, pressões críticas e classificação, respectivamente.

Tabela 3.1 – Fluidos de trabalhos selecionados para o estudo. Fonte: Javanshir e Sarunac (2017).

Fluido	T_{cr} (°C)	p_{cr} (MPa)	Classificação
Amônia	132,250	11,330	Molhado
R152A	113,260	4,510	Molhado
R134A	101,060	4,050	Molhado
R22	96,145	4,990	Molhado
R32	78,105	5,780	Molhado
Etanol	240,750	6,140	Molhado
Metanol	239,450	8,100	Molhado
R11	197,960	4,400	Isentrópico
R12	111,970	4,130	Isentrópico
R123	183,680	3,660	Isentrópico
R141B	204,350	4,210	Isentrópico
R142B	137,110	4,050	Isentrópico
Isobutano	134,660	3,620	Seco
Isopentano	187,200	3,370	Seco
R245FA	154,010	3,650	Seco
R113	214,060	3,390	Seco
R227EA	101,750	2,920	Seco
R114	145,680	3,250	Seco

3.3 Parâmetros de operação dos ciclos

O estudo desenvolvido abrange três ciclos termodinâmicos distintos e independentes: ciclo subcrítico, ciclo subcrítico com superaquecimento e ciclo supercrítico.

Para todos os ciclos em estudo, optou-se pela definição de uma temperatura fixa de condensação igual a 15°C (288,15K), em convergência ao valor médio obtido nas literaturas de referência, tais como Dai, Wong e Gao (2009), Wei *et al.* (2007), Chen, Goswami e Stefanakos (2010), Lakew e Bolland (2010), Freeman, Hellgardt e Markrides (2015) e Javanshir e Sarunac (2017).

Foram definidas como variáveis dos ciclos: temperatura e pressão de aquecimento (volume de controle evaporador) e pressão de regeneração (volume de controle aquecedor de água de alimentação) do sistema. Logo, estes foram os parâmetros com valores de operação variáveis, desta forma, faixas de valores de operação foram estabelecidas para análise da influência destes parâmetros no TLE e na ETC. Para todos os ciclos mencionados, a temperatura de regeneração foi obtida com base na temperatura de saturação para a pressão de referência (estabelecida), levando em consideração cada fluido avaliado. A obtenção da temperatura de aquecimento varia de acordo com cada ciclo mencionado, de acordo com a detalhamento a seguir, entretanto, de maneira resumida, pode-se afirmar que a mesma também se baseia no respectivo valor de saturação da pressão de referência do volume de controle (caldeira), para cada fluido avaliado.

Utilizando o conceito de adimensionalidade considerado por Wang *et al.* (2011) e Javanshir e Sarunac (2017), foram estabelecidas temperaturas e pressões adimensionais para os volumes de controle caldeira e regenerador. Basicamente, a temperatura adimensional consiste em uma razão entre a temperatura de operação e a temperatura crítica do fluido de trabalho utilizado. A pressão adimensional, por sua vez, segue a mesma lógica, resultando da razão entre a pressão de operação e a pressão crítica do fluido de trabalho, ou seja:

$$P_r = \frac{p}{p_{cr}} \tag{3.17}$$

$$T_r = \frac{T}{T_{cr}} \tag{3.18}$$

De forma didática, uma pressão adimensional igual 0,85 representa uma pressão de operação equivalente à 85% da pressão crítica do fluido de trabalho em operação. O mesmo conceito é válido para a temperatura adimensional, para qualquer volume de controle definido. O conceito de adimensionalidade é fundamental para comparação de desempenho entre fluidos a partir de parâmetros de operação equivalentes, tendo em vista que os fluidos orgânicos possuem valores de temperatura e pressão críticas muito particulares. Desta forma, torna-se possível a obtenção de um resultado global para o TLE e para a ETC, para cada fluido de

trabalho considerado, sujeitos a condições de operação equivalentes, ou seja, proporcionais às suas propriedades termodinâmicas. A Tab. 3.2 apresenta os valores estabelecidos para operação de cada ciclo termodinâmico considerado neste estudo.

Tabela 3.2 – Parâmetros de operação para os ciclos subcrítico, subcrítico com superaquecimento e supercrítico.

Ciclo	Evaporador		Regenerador	Condensador
Subcrítico	$P_{r,1} = 0,85$		$P_{r,1} = 0,50$	15°C
	$P_{r,2} = 0,90$		$P_{r,2} = 0,60$	
	$P_{r,3} = 0,95$		$P_{r,3} = 0,70$	
Subcrítico com superaquecimento	$P_{r,1} = 0,95$	$T_{r,1} = 1,10$	$P_{r,1} = 0,50$	15°C
		$T_{r,2} = 1,20$	$P_{r,2} = 0,60$	
		$T_{r,3} = 1,30$	$P_{r,3} = 0,70$	
Supercrítico	$P_{r,1} = 1,35$	$T_{r,1} = 1,25$	$P_{r,1} = 0,50$	15°C
		$T_{r,2} = 1,30$	$P_{r,2} = 0,60$	
		$T_{r,3} = 1,35$	$P_{r,3} = 0,70$	

Desta forma, atribuindo valores de temperatura e pressão adimensionais e considerando os valores críticos de operação de cada fluido, foi possível obter as temperaturas e pressões de operação (máximas) para os volumes de controle caldeira e regenerador. Observa-se que foram considerados três valores adimensionais para o parâmetro principal de cada volume de controle para cada ciclo, tendo em vista a necessidade de se realizar a análise de influência de cada parâmetro e de suas combinações nas saídas do processo (TLE e ETC).

Em complemento, a metodologia desenvolvida não se limitou à análise de influência dos parâmetros descritos na saída do sistema, considerando também a combinação destes valores. Desta forma, os cálculos de TLE e ETC foram realizados considerando a combinação entre cada valor de pressão (ou temperatura) adimensional da caldeira e cada valor de pressão adimensional do regenerador.

Para todos os ciclos explorados neste estudo, os valores de pressão do volume de controle regenerador (aquecedor de água de alimentação aberto) foram estabelecidos com base nos valores adimensionais 0,5, 0,6 e 0,7, ou seja, 50%, 60% e 70% da pressão crítica de cada fluido considerado para o estudo. O valor limite de 0,7 assegura o não cruzamento das linhas isobáricas dos volumes de controle regenerador e evaporador, considerando que a pressão adimensional mínima definida para o aquecimento na caldeira foi de 0,85.

3.3.1 Parâmetros de operação para o ciclo subcrítico

Para o ciclo subcrítico foram definidas três (3) pressões adimensionais para o volume de controle caldeira. Desta forma, a temperatura de aquecimento neste volume de controle é obtida através da temperatura de saturação para a referida pressão para qualquer valor de título (qualidade do vapor) considerando o processo de fornecimento de calor a pressão constante (linhas isobáricas do diagrama *T-s*, representada na Fig. 3.2). A Fig. 3.3 representa, esquematicamente, os parâmetros de operação e suas variações, considerados para o referido ciclo, exemplificado através do diagrama *T-s* do fluido Amônia.

Figura 3.2 – Ciclo Rankine subcrítico e diagrama *T-s*. Fonte: Adaptado de Moran *et al.* (2018).

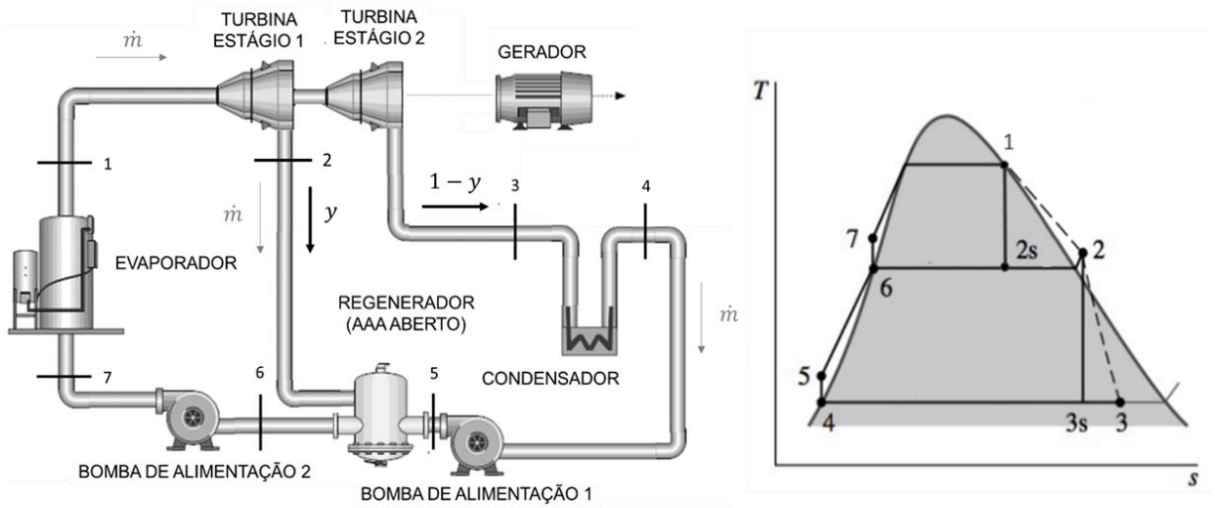
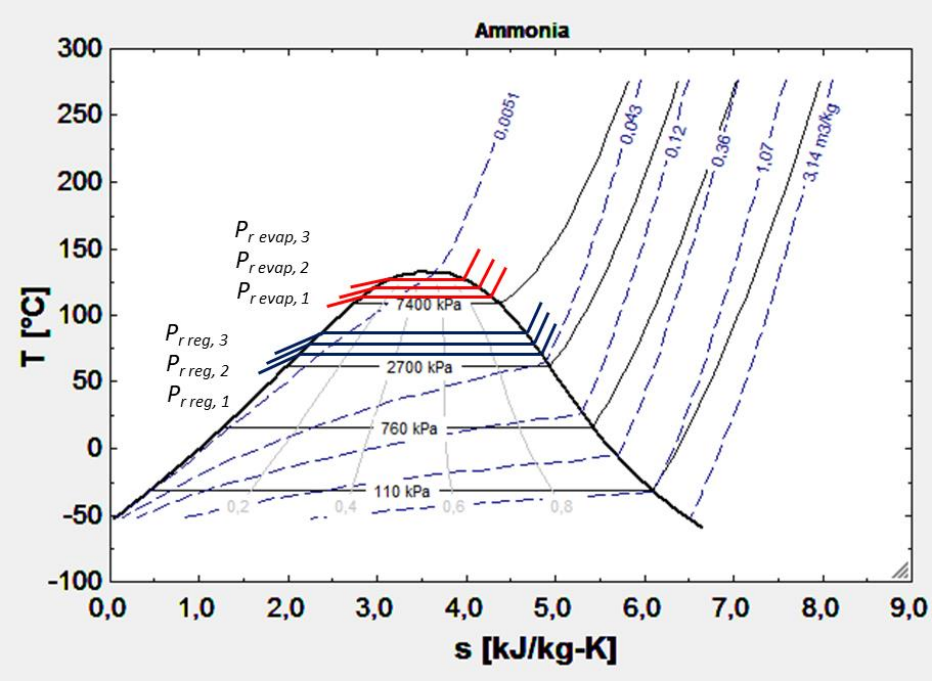


Figura 3.3 – Representação das pressões adimensionais de evaporação e regeneração para o ciclo subcrítico em um diagrama *T-s*. Fonte: Próprio Autor (2019).



3.3.2 Parâmetros de operação para o ciclo subcrítico superaquecido

O ciclo subcrítico superaquecido requer a inclusão de um parâmetro de operação adicional, a temperatura de superaquecimento no volume de controle evaporador. Para este ciclo, foi estabelecida uma única pressão adimensional (0,95) para o volume de controle evaporador, o que torna a temperatura de superaquecimento sua variável. Os diversos valores de operação deste parâmetro foram definidos através do modelo adimensional, considerando temperaturas superiores à temperatura crítica de cada fluido utilizado (acréscimos de 10%, 20% e 30% em relação à temperatura crítica de cada fluido). Neste ciclo, o fornecimento de calor no volume de controle evaporador também ocorre a pressão constante (linhas isobáricas do diagrama *T-s*, representado na Fig. 3.4). Desta forma, a pressão de superaquecimento é igual à pressão de aquecimento do ciclo. A Fig. 3.5 representa, esquematicamente, os parâmetros de operação e suas variações, considerados para o referido ciclo, exemplificado através do diagrama *T-s* do fluido Amônia.

Figura 3.4 - Ciclo Rankine subcrítico com superaquecimento e diagrama *T*-*s*. Fonte: Adaptado de Moran et *al*. (2018).

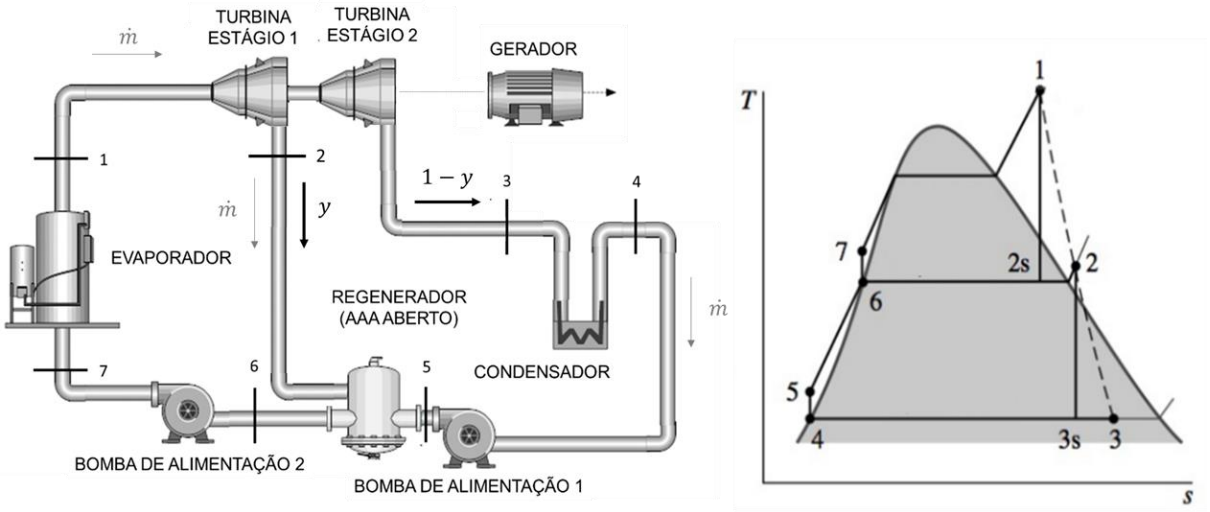
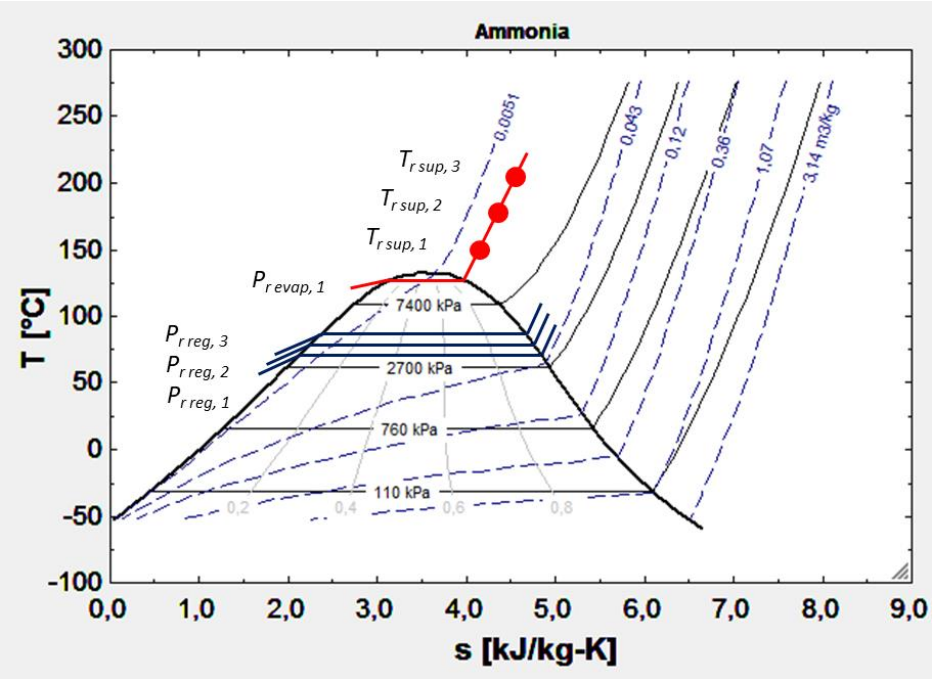


Figura 3.5 – Representação das pressões e temperaturas adimensionais de evaporação e regeneração para o ciclo subcrítico superaquecido em um diagrama *T*-*s*. Fonte: Próprio Autor (2019).



3.3.3 Parâmetros de operação para o ciclo supercrítico

Para o ciclo supercrítico, os valores de operação do ciclo também foram selecionados com base no critério de adimensionalidade, assim como nos demais

ciclos. Entretanto, considerando que o aquecimento do fluido de trabalho ocorre a valores superiores ao ponto crítico do mesmo, os termos adimensionais excedem o valor 1 (um), o qual representa a temperatura ou pressão crítica do fluido. Logo, a pressão de operação definida se baseia na pressão adimensional de 1,35, ou seja, um acréscimo de 35% no valor de pressão crítica de cada fluido de trabalho considerado.

As temperaturas supercríticas para o volume de controle evaporador foram definidas com base no mesmo princípio, utilizando os valores adimensionais de 1,25, 1,30 e 1,35, ou seja, um acréscimo de 25%, 30% e 35% em relação à temperatura crítica de cada fluido. Estes valores foram utilizados de forma combinada com o valor de pressão estabelecido para o referido ciclo e está fundamentado na pesquisa de Gao *et al*. (2012), onde o valor médio das temperaturas (adimensionais) máximas de aquecimento (considerando todos os fluidos) é de 1,35, para ciclos supercríticos. A Fig. 3.6 apresenta o sistema e o diagrama *T-s* para o ciclo supercrítico, enquanto a Fig. 3.7 representa, esquematicamente, os parâmetros de operação e suas variações, considerados para o referido ciclo, exemplificado através do diagrama *T-s* do fluido Amônia.

Figura 3.6 - Ciclo Rankine supercrítico e diagrama *T-s*. Fonte: Adaptado de Moran *et al*. (2018).

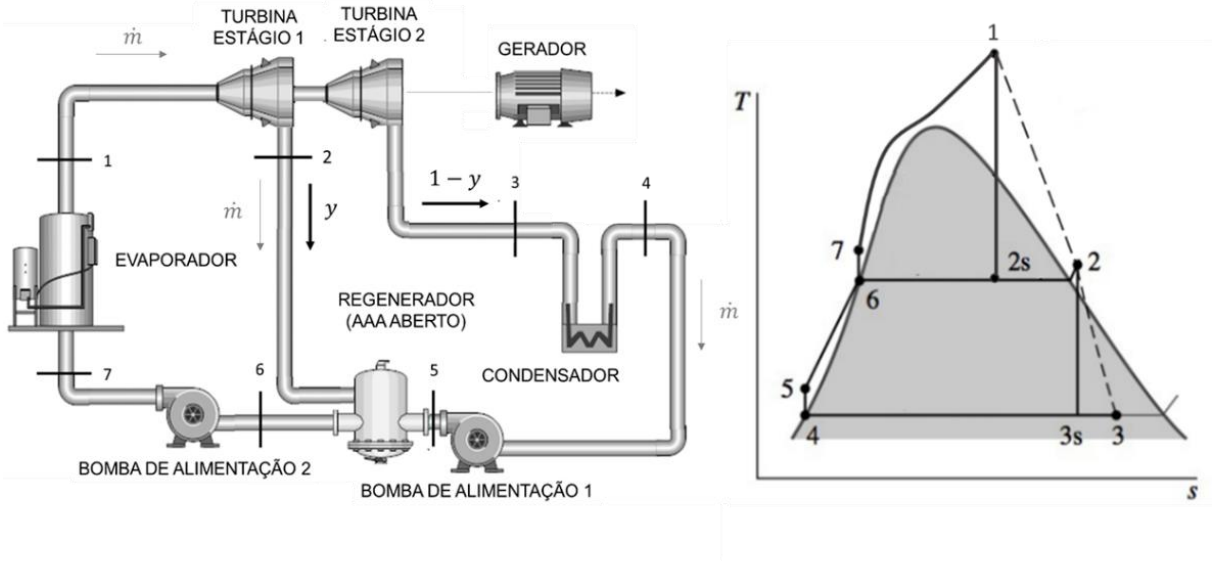
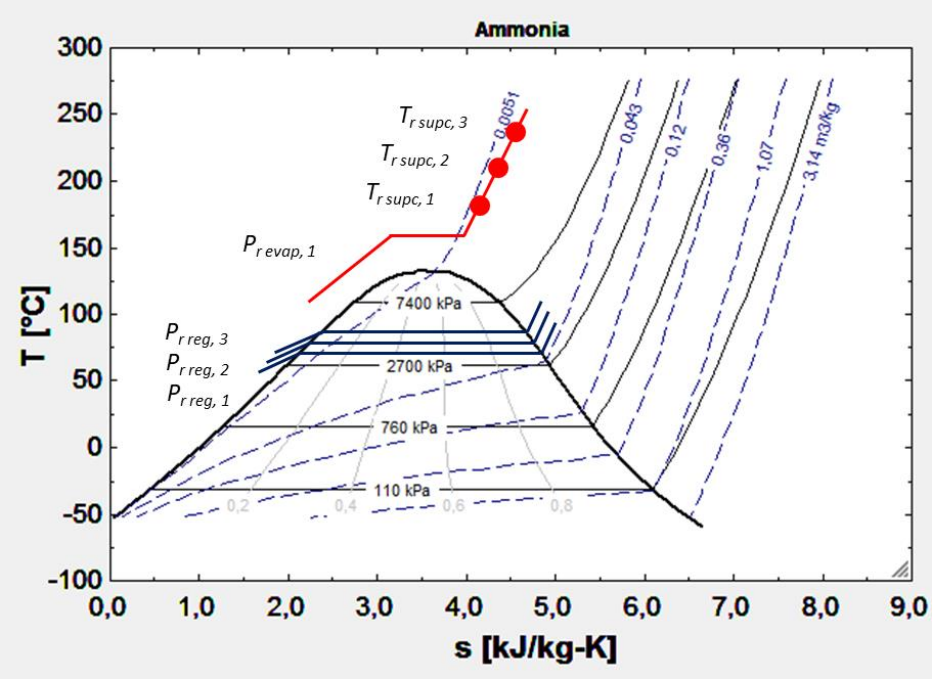


Figura 3.7 – Representação das pressões e temperaturas adimensionais de evaporação e regeneração para o ciclo supercrítico em um diagrama *T*-*s*. Fonte: Próprio Autor (2019).



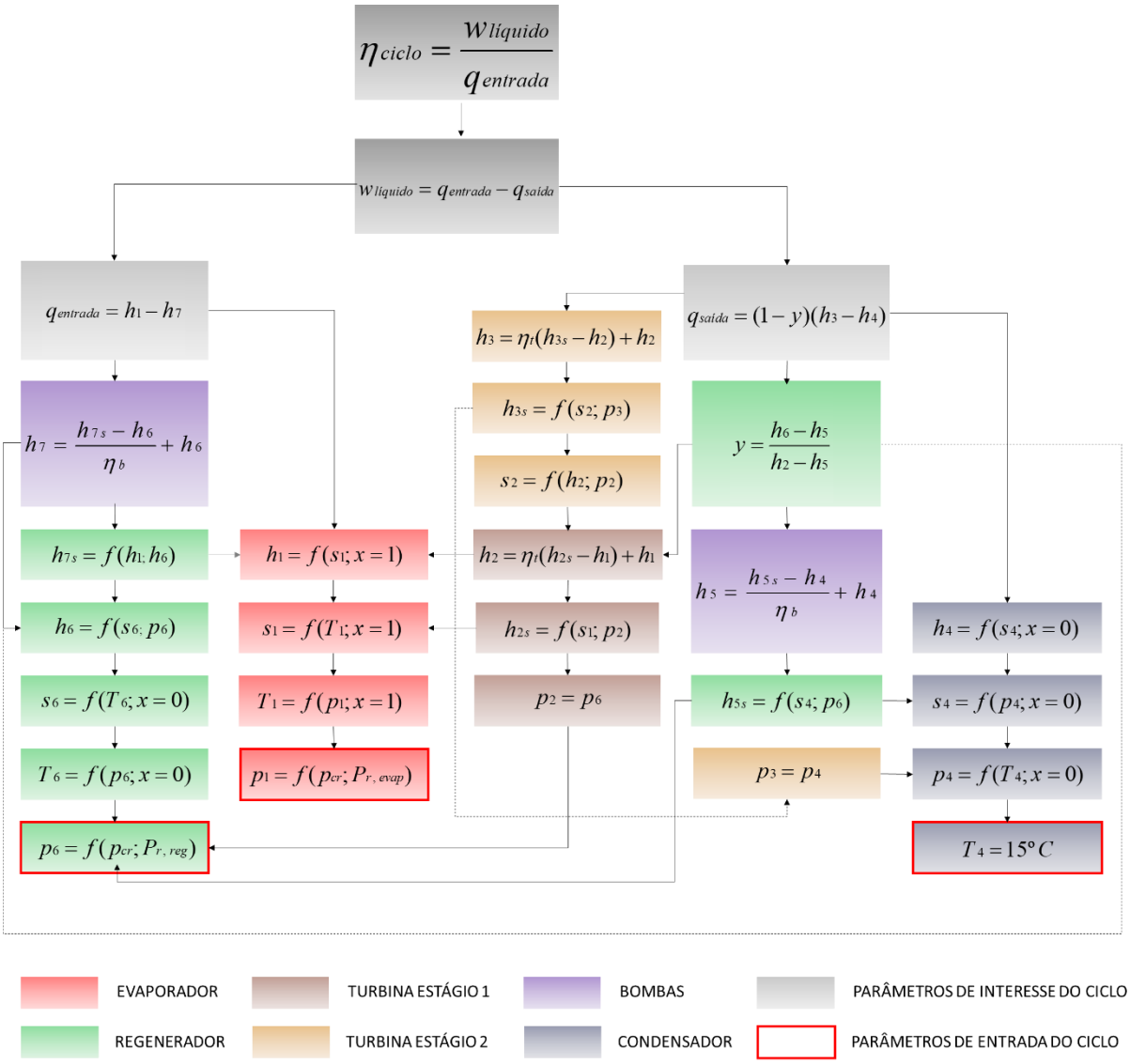
3.4 Análise dos ciclos

A obtenção dos parâmetros de operação em cada volume de controle do ciclo é algo de extrema importância, tendo em vista que deve haver consonância entre estes e os parâmetros de entrada do sistema. Desta forma, a análise termodinâmica de cada ciclo foi realizada considerando que as propriedades de cada volume de controle foram obtidas a partir dos valores de entrada definidos para o evaporador, regenerador e condensador.

3.4.1 Ciclo subcrítico

A Fig. 3.8 representa, esquematicamente, um fluxo de informações para o ciclo subcrítico. Conforme mencionado anteriormente, todas as propriedades dos volumes de controle foram obtidas através dos valores de pressão estabelecidos para os volumes de controle evaporador e regenerador e através do valor de temperatura estabelecido para o condensador.

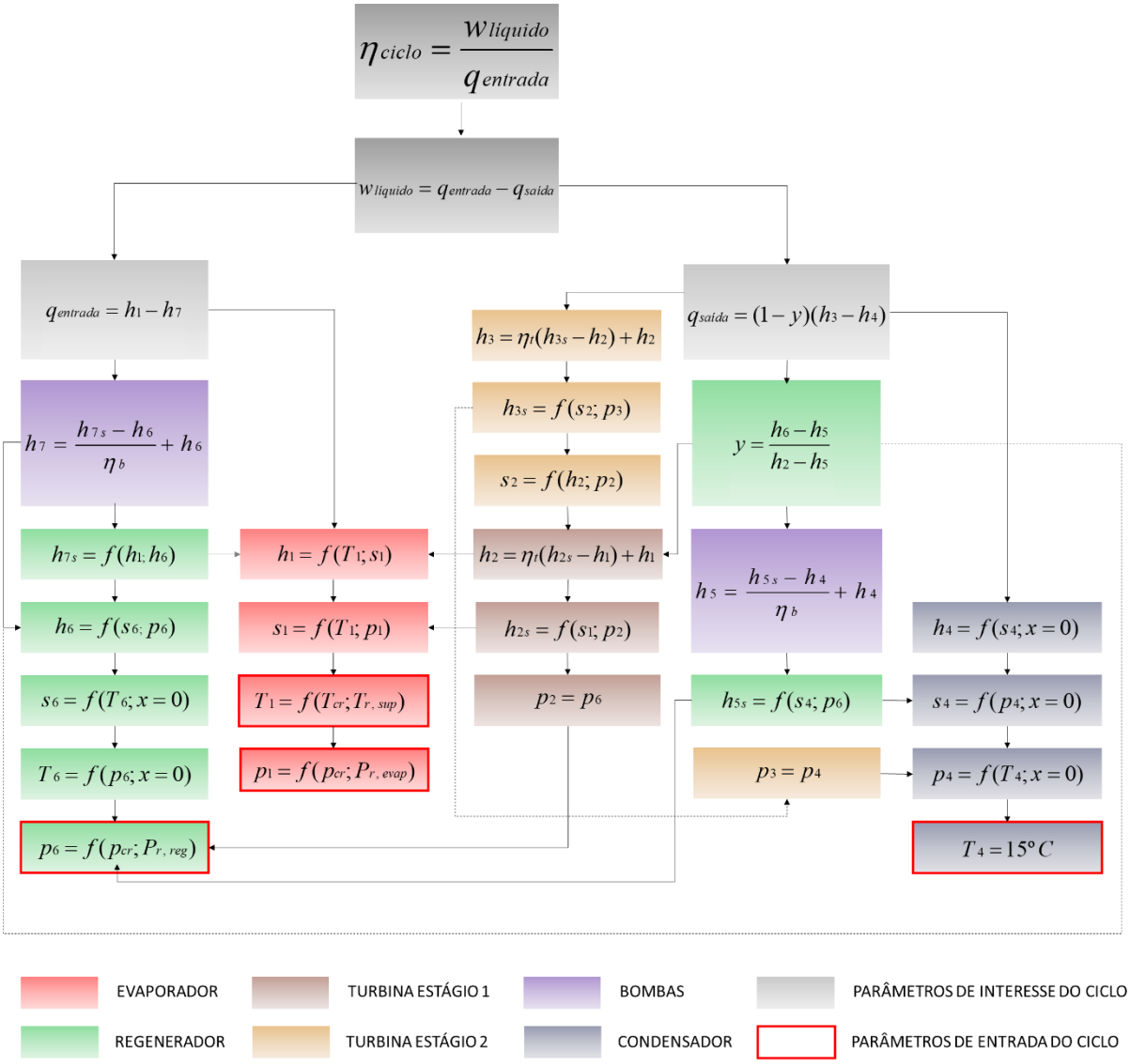
Figura 3.8 – Fluxo para obtenção de propriedades (ciclo subcrítico). Fonte: Próprio autor (2019).



3.4.2 Ciclo supercrítico com superaquecimento

Desta forma, todas as propriedades dos volumes de controle são obtidas a partir da pressão de aquecimento, temperatura de superaquecimento (volume de controle evaporador), pressão de regeneração (volume de controle regenerador) e temperatura de condensação. O detalhamento para a obtenção das propriedades termodinâmicas no ciclo subcrítico superaquecido, a partir dos parâmetros de entrada do ciclo, se encontra ilustrado na Fig. 3.9.

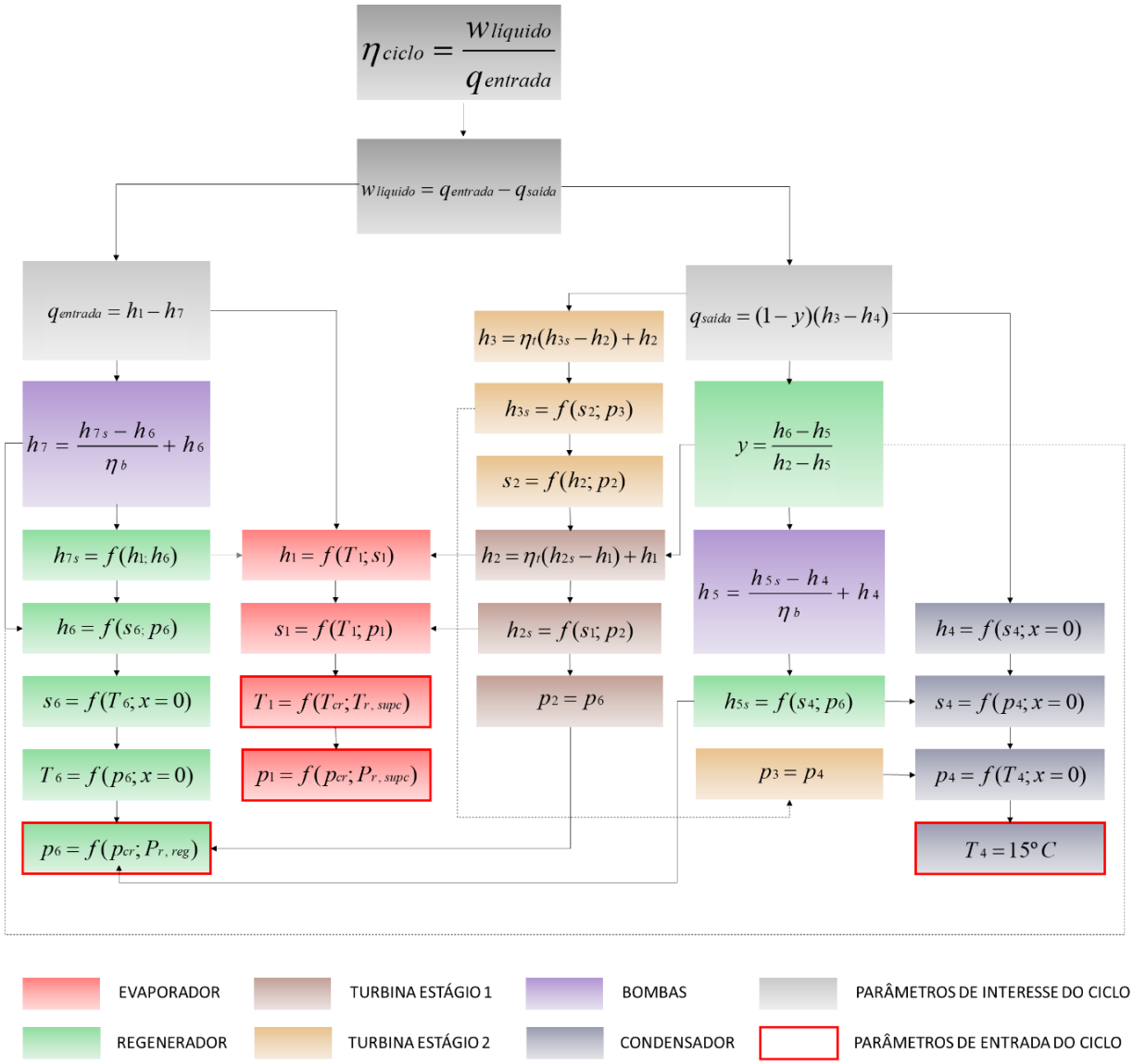
Figura 3.9 – Fluxo para obtenção de propriedades (ciclo subcrítico com superaquecimento).
Fonte: Próprio autor (2019).



3.4.3 Ciclo supercrítico

Para o ciclo supercrítico, as propriedades termodinâmicas dos volumes de controle são dependentes das pressões e temperatura de aquecimento (volume de controle evaporador), da pressão de regeneração (volume de controle regenerador) e da temperatura de condensação (volume de controle condensador). O detalhamento da obtenção das propriedades em cada volume de controle pode ser observado na Fig. 3.10.

Figura 3.10 - Fluxo para obtenção de propriedades (ciclo supercrítico). Fonte: Próprio autor (2019).



3.5 Regressão linear múltipla

A regressão linear múltipla é uma expressão algébrica que explica o comportamento de uma variável de função de outras. Com a obtenção das expressões de regressão linear múltipla para cada ciclo e cada categoria de fluido, torna-se possível calcular, de forma rápida e objetiva, a ETC para cada faixa de valores de operação, devido ao critério de adimensionalidade adotado para as mesmas e selecionar o fluido com melhor desempenho térmico.

Os dados de interesse, para a análise em questão são o R-quadrado ajustado e os coeficientes, sempre observando em adição, o resultado do desvio estimado. O valor do R-quadrado ajustado representa a influência das variáveis de entrada declaradas nos resultados da variável de saída.

Se o valor do R-quadrado ajustado é de 0,989, por exemplo, isso significa que 98,9% do comportamento da ETC pode ser explicado pelas variáveis temperatura de evaporação (T_{evap}) e pressão de regeneração (p_{reg}) de maneira conjunta, em um ciclo subcrítico. Considera-se também o desvio estimado, ou seja, a possibilidade de variação deste valor para mais ou para menos. Os coeficientes, de maneira associada, nos fornecem a expressão que representa este comportamento, ou seja, uma equação da ETC em função das variáveis temperatura de evaporação e pressão de regeneração.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para simplificar a forma escrita nesse capítulo, o termo pressão adimensional de regeneração será representado por $P_{r,reg}$ e o termo pressão adimensional de evaporação será representado por $P_{r,evap}$ O termo temperatura adimensional de evaporação será representado por $T_{r,evap}$ enquanto o termo temperatura adimensional de superaquecimento será representado por $T_{r,sup}$. Para o ciclo supercrítico, a temperatura adimensional supercrítica será representada por $T_{r,supc}$. Os termos p_{reg}, p_{evap} ,T_{evap}, T_{sup} e T_{supc} representam, respectivamente, a pressão de regeneração, a pressão de evaporação, a temperatura de evaporação, a temperatura de superaquecimento e a temperatura supercrítica dos ciclos.

4.1 Resultados do ciclo subcrítico

4.1.1 Resultados do ciclo subcrítico para fluidos molhados

Resultados da ETC e do TLE para fluidos molhados e ciclo subcrítico podem ser vistos na Tab. 4.1. Dentre os fluidos molhados, sujeitos ao ciclo subcrítico, destacou-se positivamente o metanol, com os maiores valores de ETC e TLE. Os valores máximos obtidos foram de 29,72 % para a ETC e 157,60 kJ/kg para o TLE, em pontos diferentes. O valor médio de ETC para o metanol foi de 29,21 %. Para o TLE, o valor médio obtido foi igual a 135,54 kJ/kg. Para o mesmo ciclo, o fluido molhado com o pior resultado observado para ETC foi o R32, cujo valor máximo não passou de 11,83 %, com TLE máximo igual a 21,4 kJ/kg. Seus valores médios, para a ETC e para o TLE foram de 11,5 % e 18,26 kJ/kg, respectivamente. Entretanto, o pior resultado no que tange o TLE ocorreu para o fluido R134a, com valor igual a 17,4 kJ/kg. Sua máxima ETC obtida foi de 14,74 % e seus valores médios foram iguais a 14,30 % para a ETC e 14,55 kJ/kg para o TLE.

Tabela 4.1 – Resultados de eficiência térmica (ETC [%]) e trabalho líquido específico (TLE [kJ/kg]) para fluidos molhados no ciclo subcrítico.

$P_{r,evap}$	$P_{r,reg}$	AMÔNIA		ETANOL		METANOL		R22	
		ETC	TLE	ETC	TLE	ETC	TLE	ETC	TLE
0,85	0,5	18,99	118,10	28,46	111,00	29,57	157,60	14,08	17,43
0,90	0,5	19,17	114,00	28,44	104,9	29,67	152,60	14,30	16,98
0,95	0,5	19,18	106,10	28,28	96,78	29,72	147,00	14,37	15,99
0,85	0,6	18,59	104,90	27,93	96,23	29,11	140,40	13,81	15,31
0,90	0,6	18,79	101,00	27,93	90,30	29,23	135,50	14,05	14,86
0,95	0,6	18,81	93,21	27,78	82,42	29,29	130,00	14,14	13,90
0,85	0,7	18,15	92,41	27,44	82,73	28,65	123,90	13,44	13,23
0,90	0,7	18,37	88,51	27,47	76,96	28,78	119,10	13,71	12,80
0,95	0,7	18,40	80,96	27,34	69,3	28,87	113,80	13,81	11,87

$P_{r,evap}$	$P_{r,reg}$	R32		R134A		R152A	
		ETC	TLE	ETC	TLE	ETC	TLE
0,85	0,5	11,5	21,40	14,5	17,41	16,26	28,80
0,90	0,5	11,73	20,79	14,69	17,07	16,44	28,08
0,95	0,5	11,83	19,48	14,74	16,20	16,48	26,52
0,85	0,6	11,33	19,10	14,16	15,00	15,87	24,97
0,90	0,6	11,59	18,50	14,38	14,68	16,08	24,27
0,95	0,6	11,71	17,21	14,45	13,84	16,14	22,76
0,85	0,7	11,05	16,76	13,74	12,73	15,43	21,37
0,90	0,7	11,34	16,17	13,99	12,42	15,67	20,7
0,95	0,7	11,46	14,91	14,08	11,61	15,75	19,24

4.1.2 Resultados do ciclo subcrítico para fluidos isentrópicos

Resultados da ETC e do TLE para fluidos isentrópicos e ciclo subcrítico podem ser vistos na Tab. 4.2. O ciclo subcrítico utilizando fluidos isentrópicos apresentou, como destaque positivo, os resultados do fluido R141b, cuja ETC máxima foi igual a 24,04 % e TLE máximo igual a 30,86 kJ/kg. Os resultados médios do fluido também apresentaram valores relativamente elevados, com ETC igual a 23,15 % e TLE de 25,29 kJ/kg. Neste ciclo, o pior resultado foi observado no fluido R12, onde a ETC máxima não passou de 14,7 % e o TLE máximo apresentou valor igual a 13,77 kJ/kg. As médias dos resultados para este fluido foram de 13,93 % para a ETC e 10,97 kJ/kg para o TLE.

Tabela 4.2 – Resultados de eficiência térmica (ETC [%]) e trabalho líquido específico (TLE [kJ/kg]) para fluidos isentrópicos no ciclo subcrítico.

$P_{r,evap}$	$P_{r,reg}$	R11		R12		R123		R141B		R142B	
		ETC	TLE	ETC	TLE	ETC	TLE	ETC	TLE	ETC	TLE
0,85	0,5	22,71	24,44	14,70	13,77	23,26	24,31	24,04	30,86	18,90	24,97
0,90	0,5	23,59	24,63	14,51	13,08	23,48	24,05	23,91	29,82	19,10	24,62
0,95	0,5	23,07	22,82	13,89	11,72	23,57	23,19	23,38	27,85	19,15	23,62
0,85	0,6	21,99	20,86	14,31	11,81	22,37	20,23	23,43	26,40	18,46	21,37
0,90	0,6	23,02	21,10	14,12	11,15	22,62	19,98	23,29	25,41	18,68	21,03
0,95	0,6	22,45	19,35	13,42	9,83	22,71	19,14	22,71	23,49	18,76	20,06
0,85	0,7	21,24	17,55	13,87	9,97	22,10	17,12	22,83	22,52	17,94	17,99
0,90	0,7	22,47	17,84	13,66	9,34	22,40	16,88	22,70	21,57	18,20	17,66
0,95	0,7	21,84	16,16	12,89	8,07	22,54	16,07	22,06	19,71	18,31	16,73

4.1.3 Resultados do ciclo subcrítico para fluidos secos

Resultados da ETC e do TLE para fluidos secos e ciclo subcrítico podem ser vistos na Tab. 4.3. Com o ciclo subcrítico, com utilização de fluidos secos, foram obtidos resultados relativamente elevados para a ETC do fluido R113, quando comparado com os demais fluidos de sua categoria. A ETC máxima obtida foi de 23,78 %, entretanto, seu TLE máximo, igual a 22,5 kJ/kg foi superado pelos fluidos R245fa, isobutano e isopentano. Dentre estes, o isopentano apresentou o maior valor de TLE, considerando os fluidos secos. Seu resultado máximo foi de 51,97 kJ/kg, entretanto, seu resultado para a ETC não foi tão satisfatório em relação aos demais fluidos de sua categoria. O máximo valor apresentado pelo mesmo para a ETC foi de 22,70 %.

Os valores médios para este fluido foram de 21,97 % para a ETC e 34,81 kJ/kg para ao TLE. Já o R113, melhor fluido seco para a ETC, apresentou valores médios de 23,03 % para ETC e 18,52 kJ/kg para o TLE. O pior resultado foi observado para o fluido R227ea, onde a máxima ETC não passou de 14,34 % e o maior valor de TLE foi igual a 11,11 kJ/kg. Seus resultados médios de ETC e TLE foram de 13,84 % e 9,14 kJ/kg, respectivamente.

Tabela 4.3 – Resultados de eficiência térmica (ETC [%]) e trabalho líquido específico (TLE [kJ/kg]) para fluidos secos no ciclo subcrítico.

$P_{r,evap}$	$P_{r,reg}$	ISOBUTANO		ISOPENTANO		R113	
		ETC	TLE	ETC	TLE	ETC	TLE
0,85	0,5	18,25	41,70	22,32	51,84	23,78	22,50
0,90	0,5	18,47	41,36	22,55	51,97	23,74	22,14
0,95	0,5	18,59	40,49	22,70	51,05	23,43	21,16
0,85	0,6	17,81	35,15	21,69	42,80	23,17	18,97
0,90	0,6	18,06	34,82	21,95	42,92	23,12	18,59
0,95	0,6	18,20	33,97	22,12	42,00	22,77	17,63
0,85	0,7	17,28	29,07	21,21	34,98	22,58	15,79
0,90	0,7	18,57	28,76	21,51	35,09	22,54	15,44
0,95	0,7	17,75	27,94	21,75	34,19	22,12	14,51

$P_{r,evap}$	$P_{r,reg}$	R114		R227EA		R245FA	
		ETC	TLE	ETC	TLE	ETC	TLE
0,85	0,5	18,07	15,62	14,07	11,11	20,15	23,92
0,90	0,5	18,00	15,20	14,24	10,98	20,34	23,70
0,95	0,5	17,59	14,14	14,34	10,71	20,42	22,94
0,85	0,6	17,54	13,13	13,70	9,27	19,66	20,23
0,90	0,6	17,46	12,72	13,91	9,14	19,88	20,02
0,95	0,6	16,99	11,69	14,02	8,88	19,99	19,28
0,85	0,7	16,99	10,92	13,22	7,55	19,09	16,82
0,90	0,7	16,91	10,53	13,46	7,42	19,36	16,62
0,95	0,7	16,37	9,53	13,59	7,17	19,49	15,91

4.2 Resultados do ciclo subcrítico com superaquecimento

4.2.1 Resultados do ciclo subcrítico com superaquecimento para fluidos molhados

Resultados da ETC e do TLE para fluidos molhados e ciclo subcrítico com superaquecimento podem ser vistos na Tab. 4.4. Assim como no ciclo subcrítico, o ciclo com superaquecimento apresentou o melhor resultado com o metanol, dentre os fluidos classificados como molhados. A ETC máxima obtida por este fluido foi de 33,05 % e seu TLE máximo igual a 313,40 kJ/kg. Os valores médios para o referido fluido

foram 31,96 % de ETC e 256,84 kJ/kg para o TLE. O pior resultado para a ETC, dentre os fluidos molhados operando neste ciclo, foi evidenciado no fluido R32. Sua ETC máxima foi de 13,49 % e seu TLE de 34,46 kJ/kg. Os resultados médios deste fluido para a ETC e TLE foram iguais a 12,99 % e 28,69 kJ/kg, respectivamente. Entretanto, o pior resultado em termos de TLE foi observado no fluido R22, cujo máximo valor obtido foi de 28,58 kJ/kg, muito embora sua ETC máxima seja superior ao R32, com valor igual a 16,34 %. Os valores médios destas propriedades para ETC e TLE são iguais a 15,67 % e 23,40 kJ/kg, respectivamente.

Tabela 4.4 – Resultados de eficiência térmica (ETC [%]) e trabalho líquido específico (TLE [kJ/kg]) para fluidos molhados no ciclo subcrítico com superaquecimento.

$T_{r,sup}$	$P_{r,reg}$	AMÔNIA		ETANOL		METANOL		R22	
		ETC	TLE	ETC	TLE	ETC	TLE	ETC	TLE
0,85	0,5	20,58	160,00	30,70	183,50	31,63	236,80	15,41	22,78
0,90	0,5	21,19	182,50	31,45	215,90	32,42	278,70	15,91	25,84
0,95	0,5	21,72	201,60	32,10	245,60	33,05	313,40	16,34	28,58
0,85	0,6	20,28	146,00	30,26	167,10	31,23	218,00	15,24	20,54
0,90	0,6	20,90	167,90	31,01	198,70	32,02	258,90	15,73	23,51
0,95	0,6	21,41	186,40	31,67	227,90	32,65	293,00	16,16	26,17
0,85	0,7	19,93	132,40	29,83	151,80	30,82	199,70	14,96	18,31
0,90	0,7	20,53	153,60	30,58	182,80	31,60	239,90	15,44	21,16
0,95	0,7	21,03	171,50	31,25	211,40	32,24	273,20	15,87	23,73

$T_{r,sup}$	$P_{r,reg}$	R32		R134A		R152A	
		ETC	TLE	ETC	TLE	ETC	TLE
0,85	0,5	12,71	27,84	15,89	23,69	17,76	39,35
0,90	0,5	13,11	31,34	16,22	27,01	18,30	45,35
0,95	0,5	13,49	34,46	16,39	29,78	18,64	50,42
0,85	0,6	12,63	25,43	15,64	21,11	17,47	35,23
0,90	0,6	13,04	28,88	15,98	24,35	18,01	41,05
0,95	0,6	13,42	31,91	16,16	27,08	18,36	46,02
0,85	0,7	12,44	22,94	15,30	18,62	17,10	31,28
0,90	0,7	12,85	26,28	15,66	21,78	17,66	36,92
0,95	0,7	13,22	29,20	15,85	24,45	18,01	41,76

4.2.2 Resultados do ciclo subcrítico com superaquecimento para fluidos isentrópicos

Resultados da ETC e do TLE para fluidos isentrópicos e ciclo subcrítico com superaquecimento podem ser vistos na Tab. 4.5. No ciclo superaquecido, os fluidos isentrópicos com melhor desempenho dividem-se em melhor resultado para ETC e melhor resultado para TLE. Considerando a ETC, o melhor resultado obtido foi a partir da utilização do fluido R11. Seu resultado máximo foi de 26,09 %, entretanto, seu TLE, com valor máximo igual a 45,94 kJ/kg foi superado pelo R141b, com resultado de 59,45 kJ/kg. Por outro lado, os resultados de ETC para o R141b são inferiores aos obtidos pela utilização do R11. O valor máximo obtido foi de 25,71 %. Os valores médios para o R141b são iguais a 24,99 % para a ETC e 46,89 % para o TLE, enquanto o R11 apresentou resultados de 25,17 % para ETC e 36,37 kJ/kg para TLE. Dentre os fluidos isentrópicos operando no ciclo superaquecido, o pior resultado obtido foi observado no fluido R12, cuja ETC máxima foi de 16,67 % e TLE máximo de 23,04 kJ/kg. Os valores médios destas quantias para este fluido são iguais a 15,92 % para a ETC e 18,73 kJ/kg para o TLE.

Tabela 4.5 – Resultados de eficiência térmica (ETC [%]) e trabalho líquido específico (TLE [kJ/kg]) para fluidos isentrópicos no ciclo subcrítico com superaquecimento

$T_{r,sup}$	$P_{r,reg}$	R11		R12		R123		R141B		R142B	
		ETC	TLE	ETC	TLE	ETC	TLE	ETC	TLE	ETC	TLE
1,1	0,5	25,13	34,67	15,77	18,19	24,25	34,39	25,20	43,50	20,33	33,76
1,2	0,5	25,73	40,68	16,33	21,02	24,22	40,04	25,57	51,94	20,59	38,75
1,3	0,5	26,09	45,94	16,67	23,40	24,09	45,05	25,71	59,45	20,69	43,02
1,1	0,6	24,62	30,83	15,44	16,09	23,55	30,08	24,65	38,70	19,98	29,91
1,2	0,6	25,26	36,71	16,03	18,85	23,59	35,68	25,07	47,00	20,26	34,80
1,3	0,6	25,64	41,88	16,38	21,18	23,52	40,67	25,24	54,43	20,37	39,01
1,1	0,7	24,10	27,24	15,03	14,07	23,33	26,77	24,10	34,44	19,56	26,25
1,2	0,7	24,77	32,98	15,65	16,74	23,36	32,30	24,56	42,59	19,86	31,03
1,3	0,7	25,18	38,05	16,02	19,01	23,29	37,25	24,77	49,93	20,00	35,18

4.2.3 Resultados do ciclo subcrítico com superaquecimento para fluidos secos

Resultados da ETC e do TLE para fluidos secos e ciclo subcrítico com superaquecimento podem ser vistos na Tab. 4.6. Por fim, com a utilização dos fluidos secos no ciclo superaquecido, o destaque positivo em termos de ETC foi o R113, que

apresentou valor máximo de 24,06 % para esta propriedade. O TLE máximo obtido pelo mesmo fluido foi igual a 41,61 kJ/kg. Já o destaque positivo relacionado ao TLE foi o isopentano, cujo valor máximo apresentado para esta propriedade foi de 97,05 kJ/kg. Todavia, sua ETC máxima igual a 22,52 % foi superada pelo R113, mencionado anteriormente. Os valores médios de ETC e TLE obtidos para o R113 foram de 23,53 % e 32,71 kJ/kg, respectivamente, confirmando superioridade em termos de ETC. Já o isopentano apresentou valor médio de 21,72 % para a ETC e 77,19 kJ/kg para o TLE. O pior desempenho dentre os fluidos secos no ciclo superaquecido foi identificado no R227ea, cujo valor de ETC máximo se limitou a 14,84 %. Seu TLE também apresentou resultado relativamente baixo, com valor igual a 19,20 kJ/kg. Sua ETC média foi de 14,48 % e seu TLE médio igual a 15,46 kJ/kg.

Tabela 4.6 – Resultados de eficiência térmica (ETC [%]) e trabalho líquido específico (TLE [kJ/kg]) para fluidos secos no ciclo subcrítico com superaquecimento.

$T_{r,sup}$	$P_{r,reg}$	ISOBUTANO		ISOPENTANO		R113	
		ETC	TLE	ETC	TLE	ETC	TLE
0,85	0,5	19,21	57,56	22,52	74,55	24,06	30,84
0,90	0,5	19,15	65,68	22,11	86,46	24,03	36,49
0,95	0,5	19,01	72,77	21,69	97,05	23,90	41,61
0,85	0,6	18,88	50,70	22,06	65,32	23,54	27,15
0,90	0,6	18,85	58,76	21,70	77,26	23,57	32,76
0,95	0,6	18,72	65,84	21,31	87,92	23,48	37,86
0,85	0,7	18,47	44,22	21,70	57,20	23,03	23,83
0,90	0,7	18,47	52,19	21,37	69,15	23,11	29,38
0,95	0,7	18,37	59,24	21,01	79,84	23,06	34,45

$T_{r,sup}$	$P_{r,reg}$	R114		R227EA		R245FA	
		ETC	TLE	ETC	TLE	ETC	TLE
0,85	0,5	18,39	20,33	14,84	15,43	21,07	33,31
0,90	0,5	18,45	23,51	14,77	17,47	21,04	38,46
0,95	0,5	18,41	26,3	14,64	19,20	20,92	42,94
0,85	0,6	17,94	17,75	14,58	13,51	20,69	29,43
0,90	0,6	18,04	20,89	14,53	15,53	20,68	34,53
0,95	0,6	18,03	23,67	14,42	17,26	20,58	38,98
0,85	0,7	17,45	15,41	14,21	11,66	20,24	25,79
0,90	0,7	17,60	18,51	14,19	13,67	20,27	30,83
0,95	0,7	17,63	21,27	14,1	15,39	20,19	35,25

4.3 Resultados do ciclo supercrítico

4.3.1 Resultados do ciclo supercrítico para fluidos molhados

Resultados da ETC e do TLE para fluidos molhados e ciclo supercrítico podem ser vistos na Tab. 4.7. No ciclo supercrítico, foi confirmada a superioridade térmica do fluido metanol, na categoria fluidos molhados. Sua ETC mais uma vez foi a mais elevada, com valor máximo obtido igual a 34,55 %, assim como seu TLE, com valor máximo de 317,70 kJ/kg. Os valores médios obtidos para este fluido foram de 33,84 % de ETC e 275,93 kJ/kg para o TLE. O pior resultado em termos de ETC foi apresentado pelo fluido R32, cujo valor máximo obtido foi de 14,50 %, enquanto seu TLE máximo foi de 29,54 kJ/kg. Entretanto, o fluido R22 apresentou o pior desempenho para o TLE, com valor máximo de 25,87 kJ/kg. Sua ETC máxima também apresentou valores relativamente baixos, quando comparado com os demais fluidos molhados, com valor máximo igual a 17,40 %. Os valores médios para o R22 foram de 16,80 % para ETC e 21,00 kJ/kg para o TLE. Já o R32 apresentou valor médio de ETC igual a 13,91 % e 23,60 kJ/kg para o TLE.

Tabela 4.7 – Resultados de eficiência térmica (ETC [%]) e trabalho líquido específico (TLE [kJ/kg]) para fluidos molhados no ciclo supercrítico.

$T_{r,supc}$	$P_{r,reg}$	AMÔNIA		ETANOL		METANOL		R22	
		ETC	TLE	ETC	TLE	ETC	TLE	ETC	TLE
0,85	0,5	21,99	152,80	32,74	215,10	33,70	272,90	16,34	20,53
0,90	0,5	22,54	170,20	33,18	233,90	34,16	296,40	16,94	23,45
0,95	0,5	22,99	184,90	33,56	251,60	34,55	317,70	17,40	25,87
0,85	0,6	21,78	138,70	32,42	198,20	33,40	253,40	16,25	18,28
0,90	0,6	22,36	155,80	32,86	216,70	33,86	276,40	16,88	21,16
0,95	0,6	22,83	170,40	33,24	234,00	34,25	297,30	17,37	23,55
0,85	0,7	21,53	125,00	32,10	182,30	33,10	234,50	16,06	16,05
0,90	0,7	20,53	153,60	30,58	182,80	31,60	239,90	15,44	21,16
0,95	0,7	21,03	171,50	31,25	211,40	32,24	273,20	15,87	23,73

$T_{r,supc}$	$P_{r,reg}$	R32		R134A		R152A	
		ETC	TLE	ETC	TLE	ETC	TLE
0,85	0,5	13,37	22,40	17,08	23,64	19,04	39,27
0,90	0,5	14,01	26,38	17,62	26,64	19,61	44,10

0,95	0,5	14,47	29,54	17,97	29,10	20,06	48,30
0,85	0,6	13,34	19,97	16,96	21,06	18,89	35,18
0,90	0,6	14,01	23,89	17,51	23,98	19,47	39,89
0,95	0,6	14,50	27,02	17,87	26,40	19,92	43,98
0,85	0,7	13,19	17,48	16,76	18,56	18,68	31,23
0,90	0,7	13,91	21,33	17,32	21,40	19,26	35,80
0,95	0,7	14,42	24,41	17,69	23,76	19,72	39,78

4.3.2 Resultados do ciclo supercrítico para fluidos isentrópicos

Resultados da ETC e do TLE para fluidos isentrópicos no ciclo supercrítico podem ser vistos na Tab. 4.8. A utilização de fluidos isentrópicos no ciclo supercrítico evidenciou resultados relativamente elevados para a ETC do fluido R11. O valor máximo obtido para esta quantia, neste caso, foi de 30,37 %. Entretanto, seu TLE, de valor máximo igual a 52,46 kJ/kg, foi superado pelo R141b que apresentou o maior desempenho em relação a este parâmetro. O valor máximo obtido nesta situação, para este fluido, foi de 58,09 kJ/kg. Sua ETC máxima foi igual a 26,71 %. Os valores médios de ambos os fluidos apresentaram razoável proximidade. Com o R11 foi obtido uma ETC média de 29,28 % e TLE médio igual a 43,22 kJ/kg, enquanto o R141b apresentou ETC média de 26,36 % e TLE médio igual a 49,77 kJ/kg. Na categoria isentrópicos, no ciclo supercrítico, o pior desempenho ocorreu no fluido R12, cujo máximo valor de ETC foi de 18,82 % e TLE máximo igual a 23,32 kJ/kg. Os valores médios para a ETC e TLE deste fluido, foram, respectivamente, 18,18 % e 19,17 kJ/kg.

Tabela 4.8 – Resultados de eficiência térmica (ETC [%]) e trabalho líquido específico (TLE [kJ/kg]) para fluidos isentrópicos no ciclo supercrítico.

$T_{r,supc}$	$P_{r,reg}$	R11		R12		R123		R141B		R142B	
		ETC	TLE	ETC	TLE	ETC	TLE	ETC	TLE	ETC	TLE
1,25	0,5	30,00	45,01	17,48	18,64	25,93	40,4	25,9	48,03	21,92	36,19
1,3	0,5	30,22	48,95	18,18	21,19	25,95	43,96	26,27	53,29	22,27	39,95
1,35	0,5	30,37	52,46	18,66	23,32	25,93	47,18	26,51	58,09	22,49	43,17
1,25	0,6	29,02	39,30	17,66	16,91	25,63	36,33	26,09	44,67	21,71	32,27
1,3	0,6	29,29	43,17	18,34	19,39	25,67	39,87	26,43	49,87	22,08	35,96
1,35	0,6	29,48	46,61	18,82	21,47	25,66	43,07	26,65	54,62	22,31	39,13
1,25	0,7	28,09	34,18	17,56	14,94	25,32	32,55	26,20	41,47	21,45	28,51
1,3	0,7	28,41	37,96	18,24	17,33	25,37	36,05	26,51	46,59	21,83	32,13
1,35	0,7	28,64	41,35	18,72	19,35	25,36	39,23	26,71	52,18	22,07	35,25

4.3.3 Resultados do ciclo supercrítico para fluidos secos

Resultados da ETC e do TLE para fluidos secos e ciclo supercrítico podem ser vistos na Tab. 4.9. Da mesma forma que nos demais ciclos, a utilização de fluidos secos no ciclo supercrítico confirmou o R113 como melhor desempenho em termos de ETC e o isopentano como melhor desempenho em relação ao TLE. A ETC máxima obtida pelo R113 foi de 26,76 % e seu TLE máximo 46,30 kJ/kg. Para o isopentano, máxima ETC igual 23,66 % e TLE com valor máximo de 103,40 kJ/kg. Os valores médios obtidos pelos fluidos em termos de ETC e TLE foram, respectivamente, 26,14 % e 38,84 kJ/kg para o R113 e 23,23 % e 87,71 kJ/kg para o isopentano. O desempenho mais baixo observado neste ciclo também confirmou os resultados dos ciclos anteriores acerca do fluido R227ea. Sua máxima ETC de 16,35 % e seu TLE máximo igual a 19,75 kJ/kg são relativamente baixos, quando comparados com os demais fluidos secos. Seus valores médios foram de 16,13 % para a ETC e 16,29 kJ/kg para o TLE.

Tabela 4.9 – Resultados de eficiência térmica (ETC [%]) e trabalho líquido específico (TLE [kJ/kg]) para fluidos secos no ciclo supercrítico.

$T_{r,supc.}$	$P_{r,reg}$	ISOBUTANO		ISOPENTANO		R113	
		ETC	TLE	ETC	TLE	ETC	TLE
0,85	0,5	20,79	63,58	23,66	89,63	26,76	39,8
0,90	0,5	20,90	69,68	23,48	96,83	26,68	43,17
0,95	0,5	20,92	74,95	23,28	103,40	26,57	46,30
0,85	0,6	20,60	56,55	23,42	80,49	26,20	35,41
0,90	0,6	20,72	62,60	23,24	87,72	26,15	38,77
0,95	0,6	20,76	67,86	23,05	94,30	26,06	41,88
0,85	0,7	20,34	49,95	23,14	71,97	25,66	31,50
0,90	0,7	20,48	55,94	22,98	79,21	25,64	34,83
0,95	0,7	20,53	61,17	22,81	85,82	25,58	37,93

T_{sup}	$P_{r,reg}$	R114		R227EA		R245FA	
		ETC	TLE	ETC	TLE	ETC	TLE
0,85	0,5	20,98	24,60	16,18	16,66	22,62	38,37
0,90	0,5	21,05	26,83	16,31	18,34	22,67	41,73
0,95	0,5	21,05	28,79	16,35	19,75	22,67	44,72
0,85	0,6	20,61	21,71	16,04	14,69	22,3	34,39

0,90	0,6	20,70	23,92	16,18	16,35	22,44	37,73
0,95	0,6	20,73	25,88	16,24	17,76	22,45	40,70
0,85	0,7	20,21	19,08	15,82	12,80	22,10	30,66
0,90	0,7	20,32	21,27	15,99	14,45	22,17	33,97
0,95	0,7	20,36	23,2	16,06	15,85	22,19	36,92

4.4 Isocurvas de eficiência térmica do ciclo (ETC) e trabalho líquido específico (TLE)

Além da análise numérica dos resultados, foram desenvolvidas isocurvas para a ETC e para o TLE, com objetivo de expressar estes resultados em função das variáveis de aquecimento e regeneração dos ciclos. Através das isocurvas é possível avaliar a influência dos principais parâmetros de entrada nos resultados de ETC e TLE e verificar a tendência de comportamento para valores além do estabelecido como delimitação para o estudo. As isocurvas foram desenvolvidas no software MATLAB através da função CONTOURF, após declaração de todas as variáveis no formato matricial.

4.4.1 Isocurvas de ETC e TLE para o ciclo subcrítico

Resultados da ETC para fluidos molhados no ciclo subcrítico podem ser vistos na Fig. 4.1. De uma forma geral, a ETC dos fluidos molhados apresentam uma sensibilidade maior a p_{reg} em relação a p_{evap} Este fato pode ser observado nas isocurvas de cada fluido molhado, onde as linhas de ETC se apresentam em uma posição mais próxima da vertical do que da horizontal. Também fica evidenciado o aumento desta relação de influência para $P_{r,evap} \geq 0,9$ ou seja, para aquecimento acima deste valor, a ETC torna-se ainda mais dependente de p_{reg} e menos dependente da p_{evap} Exceção se faz ao etanol, que apresenta, basicamente o mesmo comportamento, porém, de maneira mais acentuada. Para este fluido, $P_{r,evap}$ até 0,9 tornam a ETC exclusivamente dependente da P_{reg}. Para os fluidos R22 e R32, uma dependência equivalente pode ser observada entre a ETC e os parâmetros de operação p_{evap} e p_{reg} até $P_{r,evap} = 0,9$ ou seja, a ETC apresenta uma dependência

próxima de ambos os parâmetros. Todos os fluidos molhados apresentam, de forma geral, uma proporcionalidade direta entre a ETC e a p_{evap} e uma proporcionalidade inversa entre a ETC e a p_{reg}. Estas proporcionalidades sofrem uma pequena variação após $P_{r,evap} = 0,9$ em todos os casos. Em geral, os maiores valores da ETC para os fluidos molhados são obtidas para p_{evap} elevadas a p_{reg} baixas.

Resultados da ETC para fluidos isentrópicos no ciclo subcrítico podem ser vistos na Fig. 4.2. Para esta categoria de fluidos, a ETC não apresenta padrão de comportamento. Cada fluido possui curvas características para cada faixa de valores dos parâmetros de operação. O fluido R11 apresentou um comportamento similar aos fluidos molhados até $p_{r,evap} = 0,9$, onde ocorre uma proporcionalidade direta entre a ETC e a p_{evap} e uma proporcionalidade inversa entre a ETC e a p_{reg}. Após este valor, a proporcionalidade sofre uma inversão, promovendo uma relação de proporção inversão entre a ETC e p_{evap} e uma proporção direta entre ETC e p_{reg}. Desta forma, observa-se o maior desempenho em termos de ETC para o fluido em uma p_{evap} de 0,90 e uma p_{reg} igual a 0,50. Já o R12 apresenta uma proporcionalidade inversa entre a ETC e p_{evap} e entre a ETC e p_{reg}. Para valores de $P_{r,evap} > 0,90$ a dependência da ETC por ambas as variáveis se apresenta de forma equivalente, ou seja, a sensibilidade à variação dos parâmetros de operação é aproximadamente a mesma. Para valores de $P_{r,evap} < 0,90$, a ETC se torna mais dependente de p_{reg}. Desta forma, os maiores valores de ETC são obtidos a partir de valores baixos para p_{evap} e p_{reg}.

Figura 4.1 – Isocurvas de ETC [adimensional] para fluidos molhados (ciclo subcrítico).

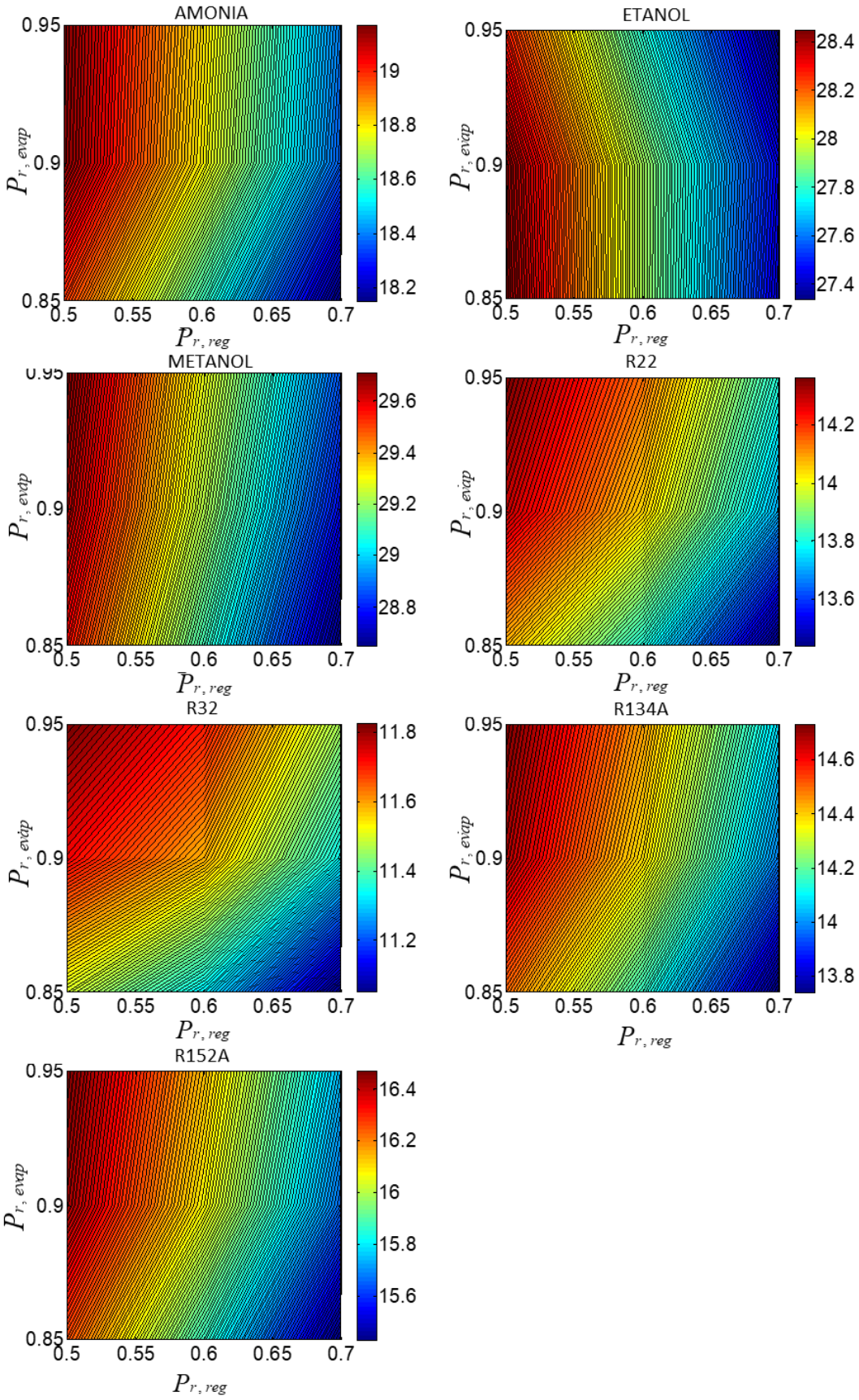
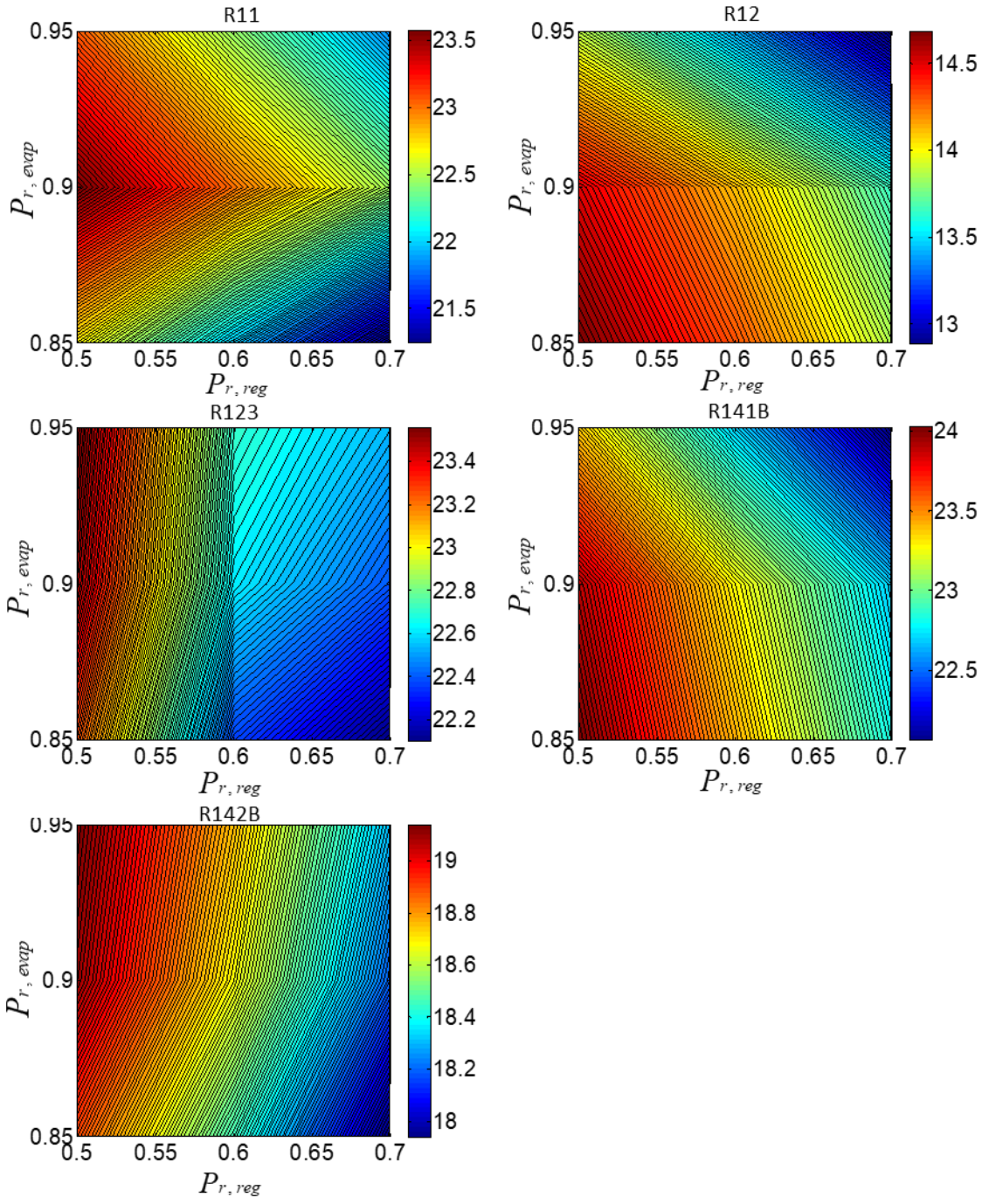


Figura 4.2 – Isocurvas de ETC [adimensional] para fluidos isentrópicos (ciclo subcrítico).



O fluido R141b apresentou um comportamento similar ao R12, entretanto, sua ETC apresenta uma dependência ainda maior de p_{reg}, quando comparado ao outro fluido. O fluido R123 apresenta comportamento muito particular em função das diversas faixas de operação dos parâmetros de entrada do sistema. Sua ETC para

valores de $P_{r,reg} < 0,60$ apresenta comportamento similar ao observado em fluidos molhados, com uma proporcionalidade direta à p_{evap} e uma proporcionalidade inversa à p_{reg}, tornando-se quase exclusivamente dependente de p_{reg} quando $P_{r,evap} > 0,90$.

Para $P_{r,reg} > 0,60$, a ETC passa a se comportar de maneira mais proporcional em relação à dependência dos parâmetros de operação, porém, com valores muito inferiores aos obtidos nas demais faixas de operação (evaporação e regeneração). Por fim, o fluido R142b apresenta um comportamento muito próximo ao padrão dos fluidos molhados, demonstrando suas proporcionalidades de forma similar ao R22, R134a e R152a, mesmo sendo classificado como isentrópico.

Resultados da ETC para fluidos secos no ciclo subcrítico podem ser vistos na Fig. 4.3. A utilização de fluidos secos demonstrou basicamente, dois padrões de comportamentos distintos. Para os fluidos isobutano, isopentano, R227ea e R245fa, o comportamento básico da ETC se demonstrou muito similar ao padrão observado nos fluidos molhados. Para estes casos, há uma proporcionalidade direta entre a ETC e p_{evap} e uma proporcionalidade inversa entre a ETC e p_{reg}. Desta forma, para todos os fluidos secos citados, os valores de ETC máxima foram obtidas para elevados valores de p_{evap} e valores baixos de p_{reg}.

Exceção se faz aos fluidos R113 e R114, cujo comportamento se assemelha ao R141b, onde há uma proporcionalidade inversa entre a ETC e p_{evap} e entre a ETC e a p_{reg}. Assim sendo, os maiores valores de ETC são obtidos para $P_{r,evap} > 0,85$ e $P_{r,reg} = 0,50$. É importante ressaltar que as faixas de operação definidas indicam, através das isocurvas, uma tendência de comportamento dos fluidos, ou seja, para os casos R113 e R114, por exemplo, os maiores valores de ETC foram obtidos com base nos valores de operação descritos. Entretanto, através deste dado, por si só, não é possível afirmar que esta é a faixa de valores para obtenção do maior desempenho térmico destes fluidos.

Os TLE's para o ciclo subcrítico apresentaram, de forma geral, um comportamento similar para todas as categorias de fluidos (molhados, isentrópicos e secos). Os resultados do TLE estão ilustrados na Fig. 4.4 para os fluidos molhados, na Fig. 4.5 para os fluidos isentrópicos e na Fig. 4.6 para os fluidos secos.

Figura 4.3 - Isocurvas de ETC [adimensional] para fluidos secos (ciclo subcrítico).

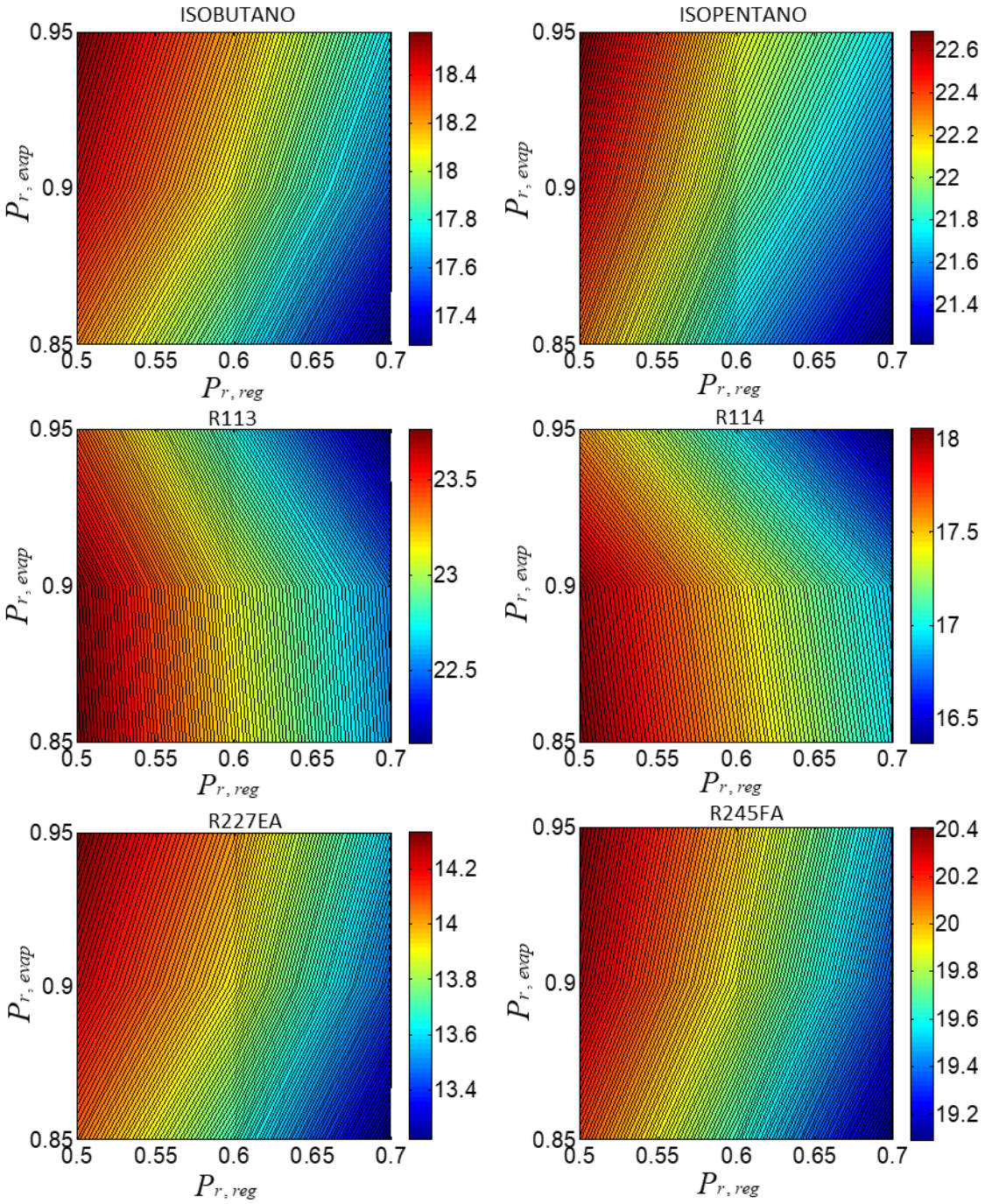


Figura 4.4 - Isocurvas de TLE [(kJ/kg)] para fluidos molhados (ciclo subcrítico).

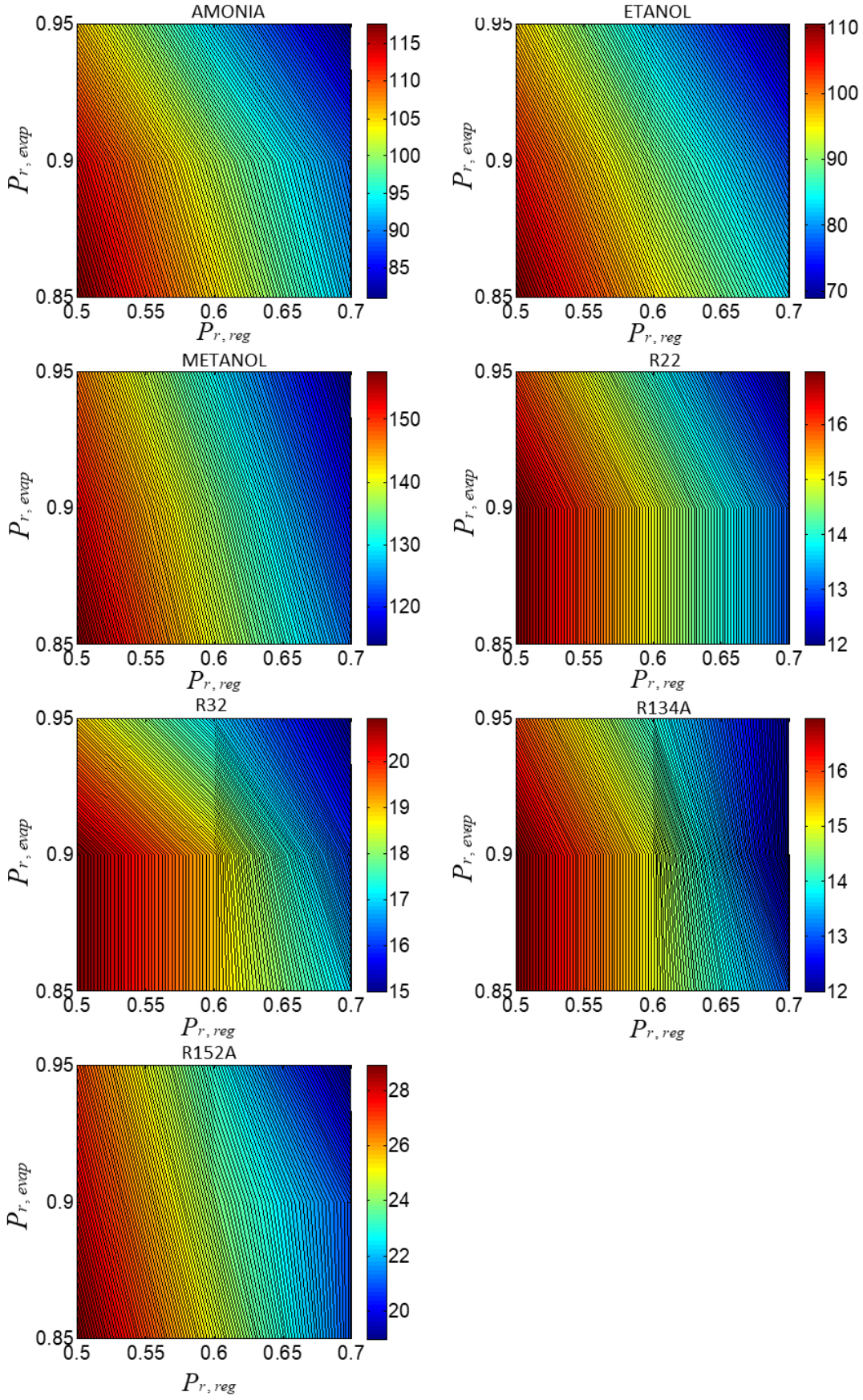
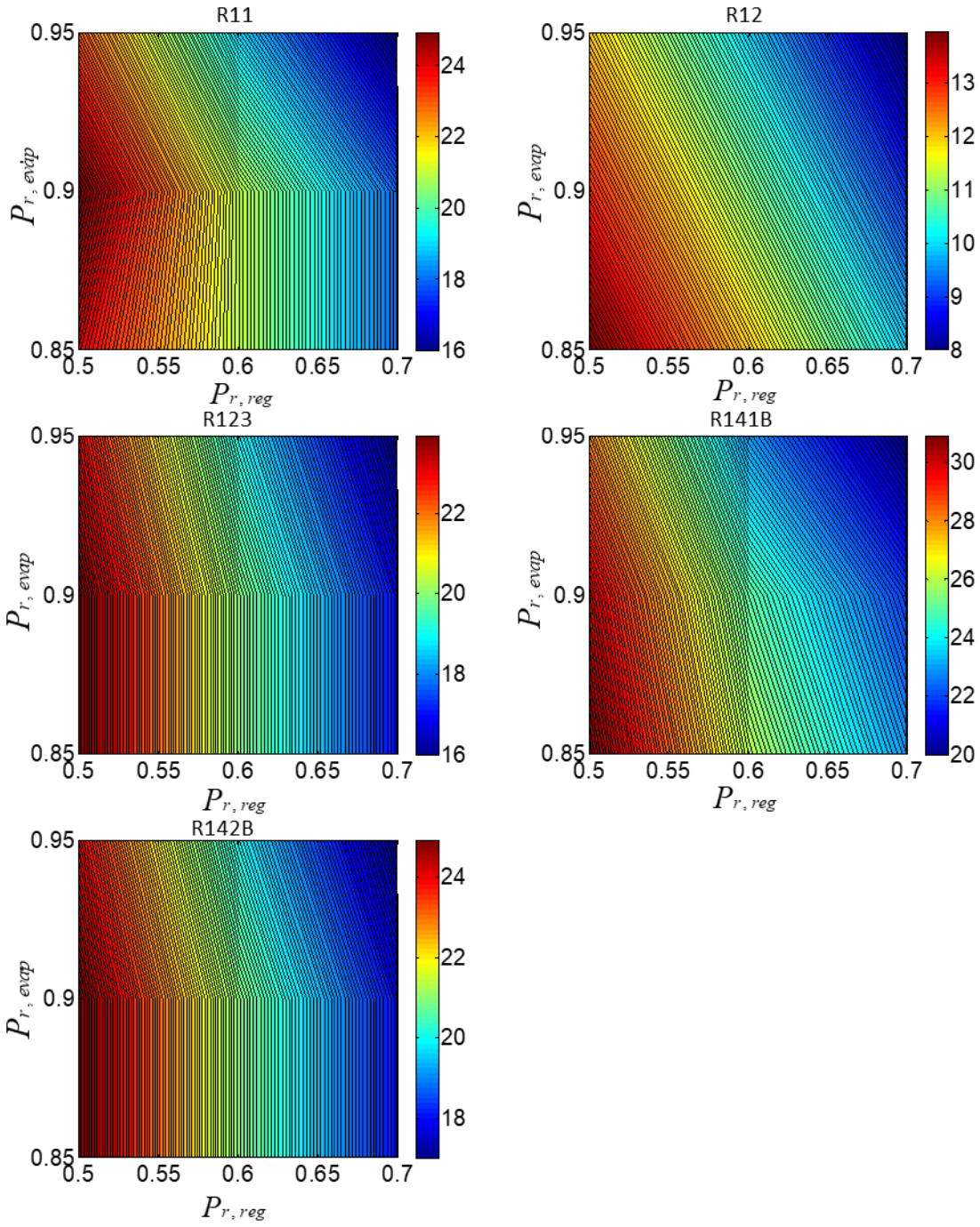


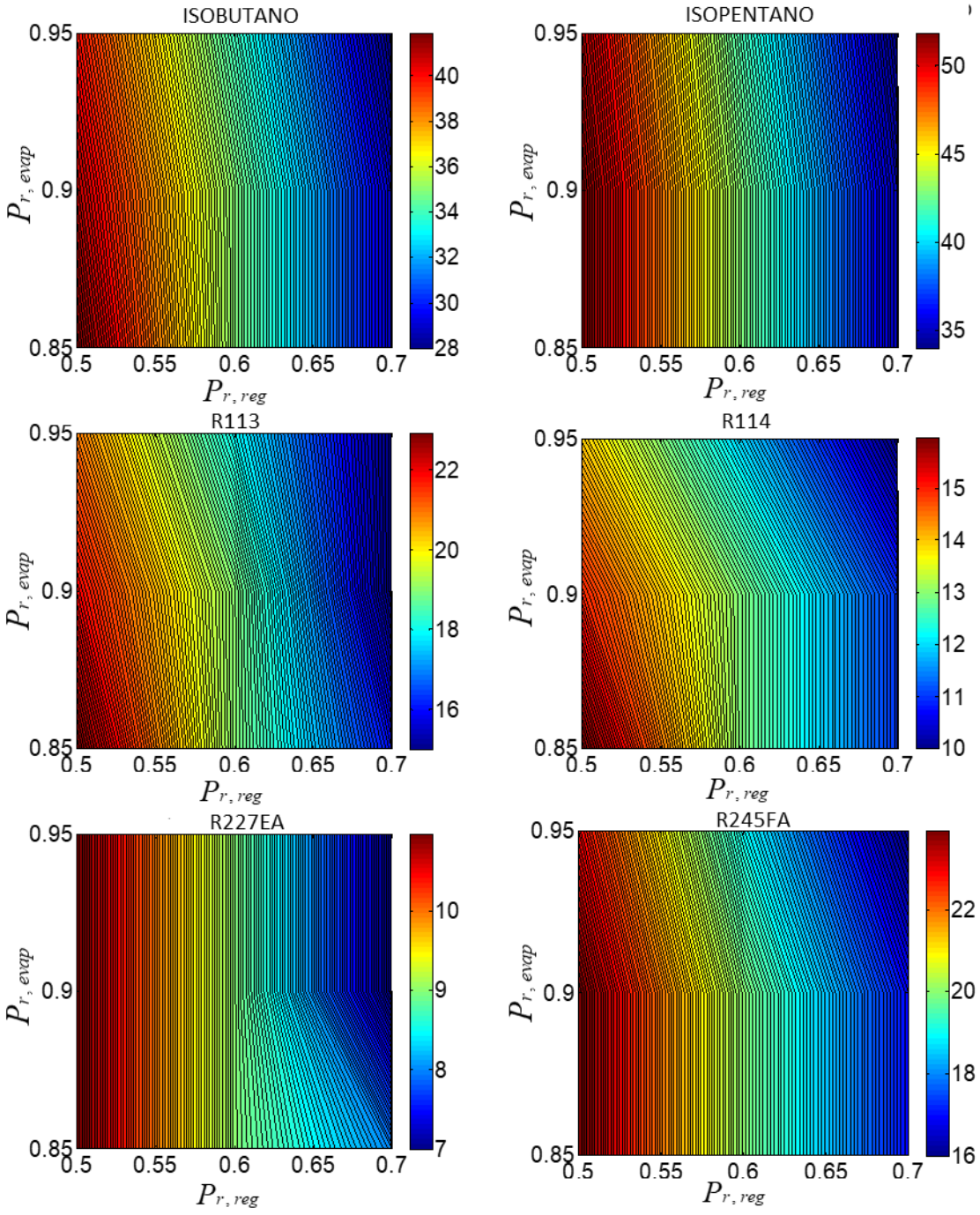
Figura 4.5 - Isocurvas de TLE [(kJ/kg)] para fluidos isentrópicos (ciclo subcrítico).



É possível observar a ocorrência de uma proporcionalidade inversa entre o TLE e a p_{evap} e entre o TLE e a p_{reg}, com pequenas exceções que ocorrem em alguns fluidos sob condições de operação específicas. Fluidos como o R22, R123, R142b, isopentano e R245fa apresentaram um comportamento praticamente exclusivo em função de p_{reg} para $P_{r,evap} < 0{,}90$.

O fluido R227ea apresenta a mesma dependência exclusiva (independe de p_{evap}) para quase todos os valores dos parâmetros de operação estabelecidos. Exceção se faz à $P_{r,evap} < 0{,}90$ que opera com $P_{r,reg} > 0{,}60$. Sendo assim, é possível afirmar que, de maneira geral, os maiores desempenhos em termos de TLE são obtidos para p_{evap} baixas combinados com p_{reg} também baixos.

Figura 4.6 - Isocurvas de TLE [(kJ/kg)] para fluidos secos (ciclo subcrítico).



4.4.2 Isocurvas de ETC e TLE para o ciclo subcrítico com superaquecimento

No ciclo com superaquecimento, as curvas para representação da ETC replicam-se de maneira similar para praticamente todos os fluidos classificados como molhados. Para esta categoria de fluido, observa-se uma proporcionalidade direta entre a ETC e T_{sup} e uma proporcionalidade inversa entre a ETC e p_{reg}. A maioria dos fluidos com esta classificação demonstra uma sensibilidade da ETC praticamente equivalente em relação à T_{sup} e à p_{reg}.

Resultados da ETC para fluidos molhados no ciclo subcrítico com superaquecimento podem ser vistos na Fig. 4.7. Pequenas exceções ocorrem em alguns fluidos sob determinadas condições de operação. Variações mais acentuadas em relação à condição normal podem ser observadas no fluido R32, para $P_{r,reg} < 0,60$. Para esta faixa de valores, a ETC do fluido apresenta uma dependência praticamente exclusiva de T_{sup}. Além deste, os fluidos R134a e R152a apresentaram uma sensibilidade maior à p_{reg} quando operando a $T_{r,sup} > 1,20$. Para todos os fluidos classificados como molhados, os melhores desempenhos de ETC são evidenciados para valores elevados de T_{sup} e valores baixos de p_{reg}.

Ainda no ciclo subcrítico superaquecido, os fluidos classificados como isentrópicos apresentam um comportamento muito similar ao observado na maioria dos fluidos molhados. Este comportamento se replica nos fluidos R11, R12, R141b e R142b. Para o R11 e o R12, a ETC depende de maneira praticamente equivalente das variáveis T_{sup} e p_{reg}, apresentando uma proporcionalidade direta com a primeira e inversa com a segunda. Para os fluidos R141b e R142b, a ETC apresenta as mesmas proporcionalidades, entretanto, sua ETC sofre maior influência de p_{reg} do que de T_{sup}, especialmente para $T_{r,sup} > 1,20$, na qual esta dependência torna-se mais acentuada. Uma exceção de comportamento evidenciada no ciclo superaquecido remete ao fluido R123, onde a ETC sofre pouca influência de T_{sup}, praticamente para todos os valores de operação. Observa-se, em adição, uma queda razoável nos

valores de ETC para o mesmo fluido operando com $P_{r,reg} > 0,60$, independentemente do valor de T_{sup}.

De maneira geral, os fluidos isentrópicos apresentam os maiores valores de ETC para valores elevados de T_{sup} e valores baixos de p_{reg}, com exceção do fluido R123, cujo comportamento apresentado é muito particular, obtendo bom desempenho em relação a ETC para qualquer valor de T_{sup}, desde que p_{reg} seja baixo (próximo de 0,50). Os resultados da ETC para fluidos isentrópicos no ciclo subcrítico com superaquecimento podem ser vistos na Fig. 4.8.

Os fluidos secos, sujeitos ao ciclo superaquecido, apresentam comportamento relativo a ETC muito próximo ao observado no ciclo subcrítico simples. Os fluidos isobutano, R113, R227ea e R245fa apresentaram uma proporcionalidade inversa entre a ETC e T_{sup} e entre a ETC e p_{reg}, muito embora a ETC seja pouco sensível à variação de T_{sup}, principalmente para valores de $T_{r,sup} < 1,20$. Logo, pode-se afirmar que a ETC destes fluidos apresenta maior dependência de p_{reg} do que T_{sup}. Desta forma, o melhor desempenho em termos de ETC para estes fluidos pode ser obtido para valores baixos para T_{sup} e valores baixos de p_{reg}. Os fluidos R113 e R245fa apresentam ETC relativamente elevada até $T_{sup} = 1,20$, mantendo baixos valores para $P_{r,reg}$. O fluido isopentano também apresenta a mesma proporcionalidade inversa entre ETC e T_{sup} e entre ETC e p_{reg}. Entretanto, seu resultado é sensível às duas variáveis de entrada na mesma proporção, ou seja, depende, na mesma intensidade de T_{sup} e de p_{reg}. Desta forma, para um bom desempenho em termos de ETC, o fluido requer valores baixos de T_{sup} e de p_{reg}. Por fim, o fluido R114 apresentou um comportamento similar ao R113, entretanto, a ETC possui baixa sensibilidade à variação de T_{sup}, principalmente para a faixa $T_{r,sup} > 1,20$, tornando o fluido mais dependente de p_{reg}. Uma pequena variação neste comportamento ocorre para $T_{r,sup} < 1,20$, em que a ETC sofre maior influência desta variável de entrada. Os resultados da ETC para fluidos secos no ciclo subcrítico com superaquecimento podem ser vistos na Fig. 4.9.

Figura 4.7 - Isocurvas de ETC [adimensional] para fluidos molhados (ciclo subcrítico com superaquecimento).

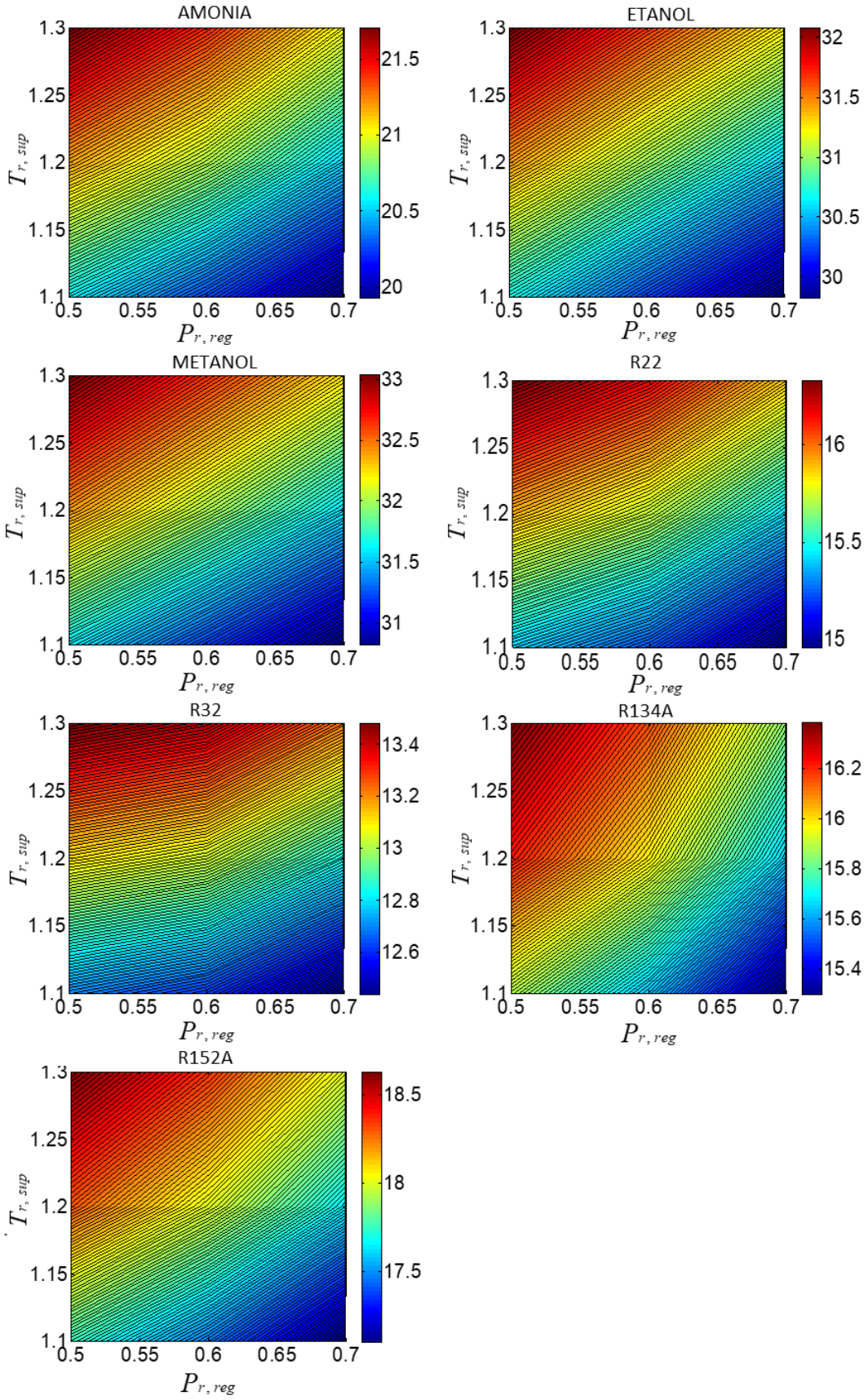


Figura 4.8 - Isocurvas de ETC [adimensional] para fluidos isentrópicos (ciclo subcrítico com superaquecimento).

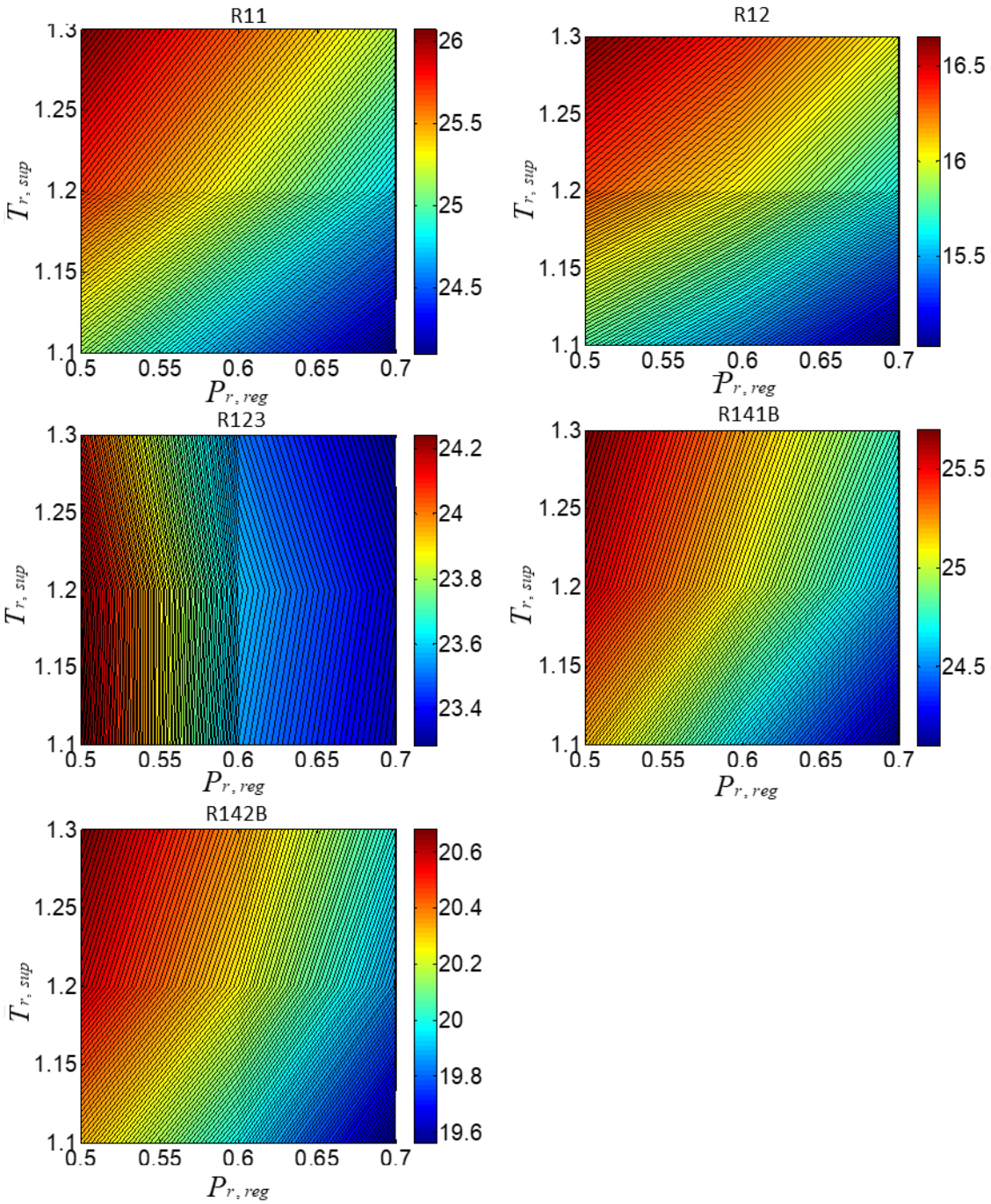


Figura 4.9 - Isocurvas de ETC [adimensional] para fluidos secos (ciclo subcrítico com superaquecimento).

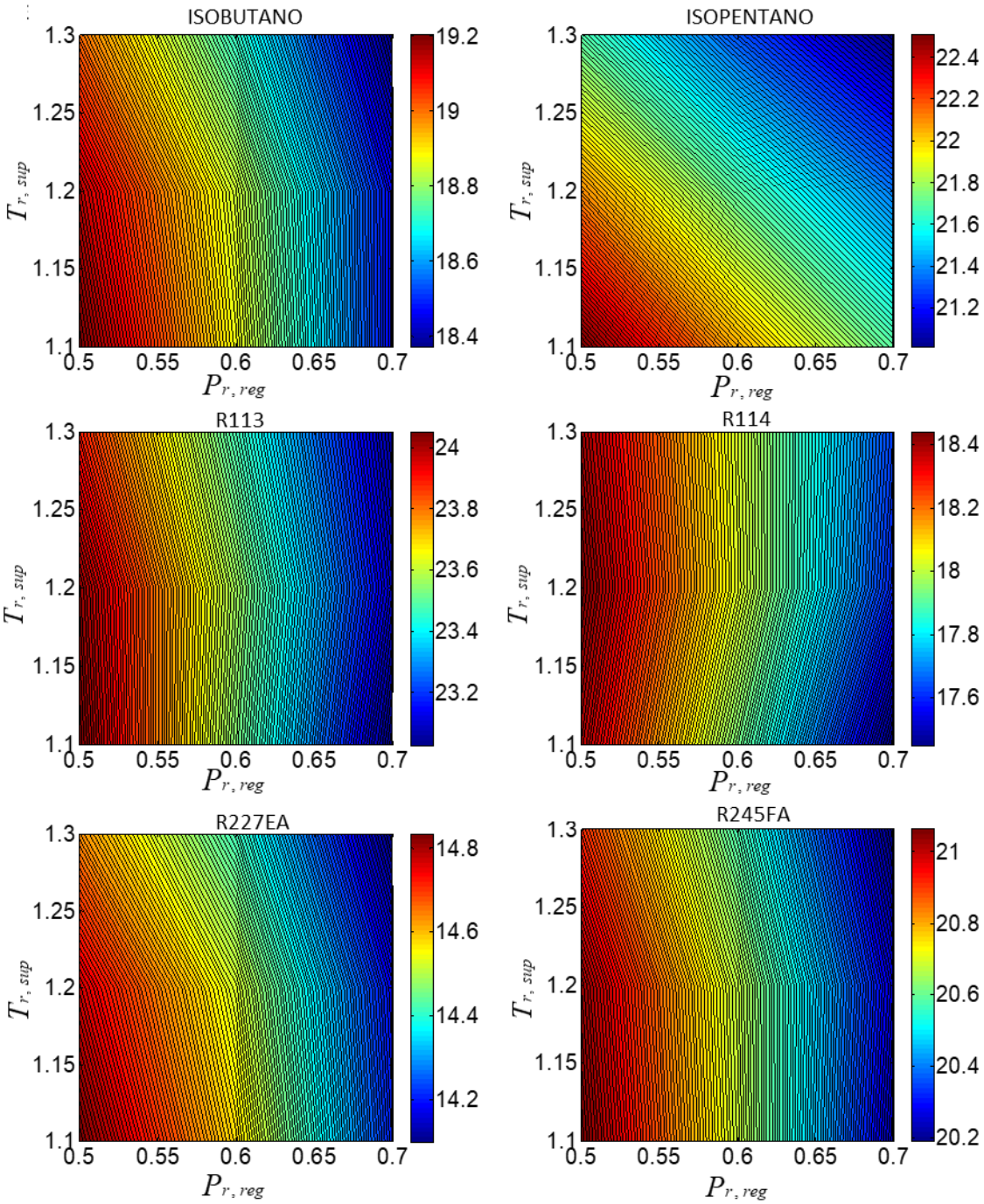


Figura 4.10 - Isocurvas de TLE [(kJ/kg)] para fluidos molhados (ciclo subcrítico com superaquecimento).

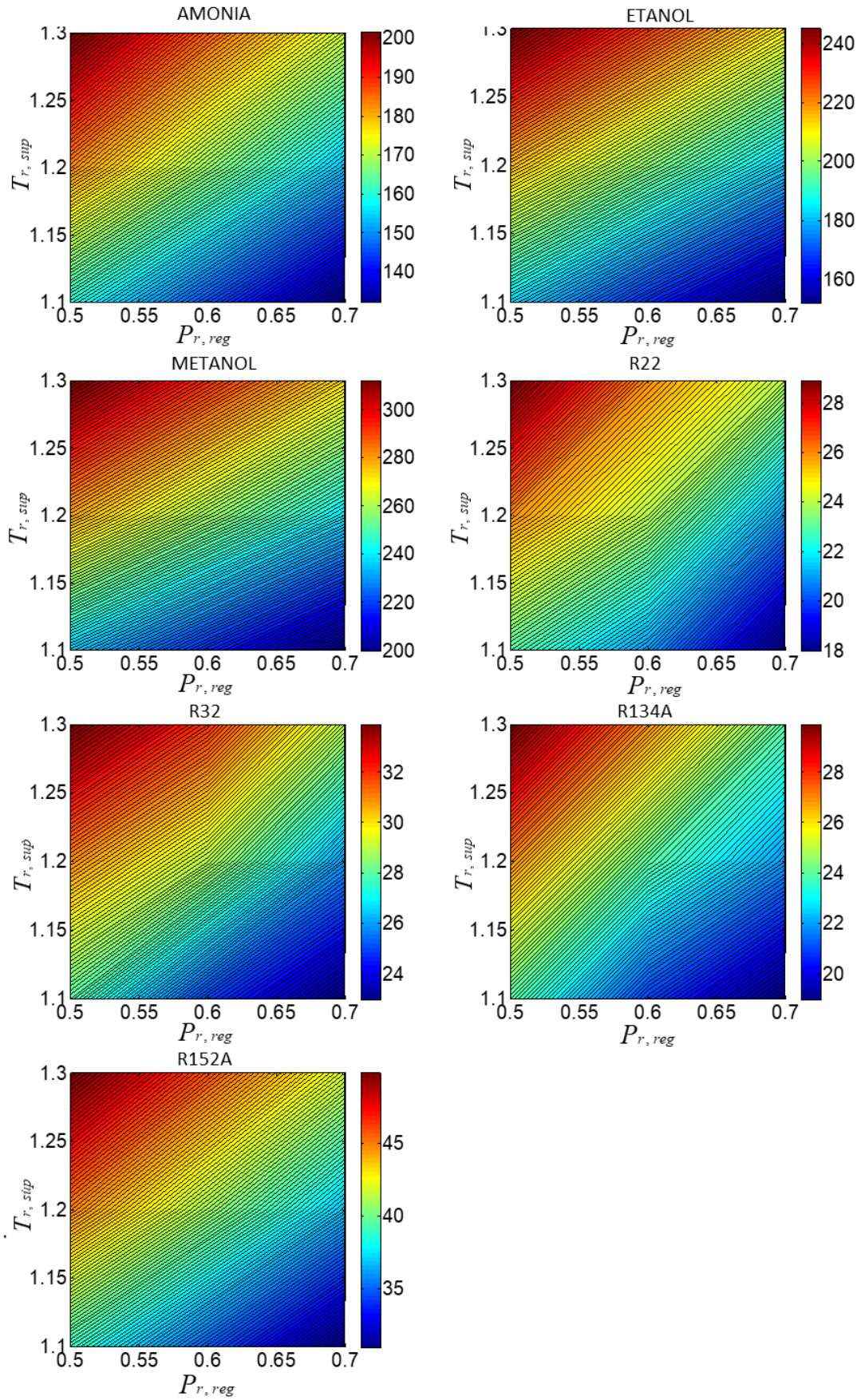


Figura 4.11 - Isocurvas de TLE [(kJ/kg)] para fluidos isentrópicos (ciclo subcrítico com superaquecimento).

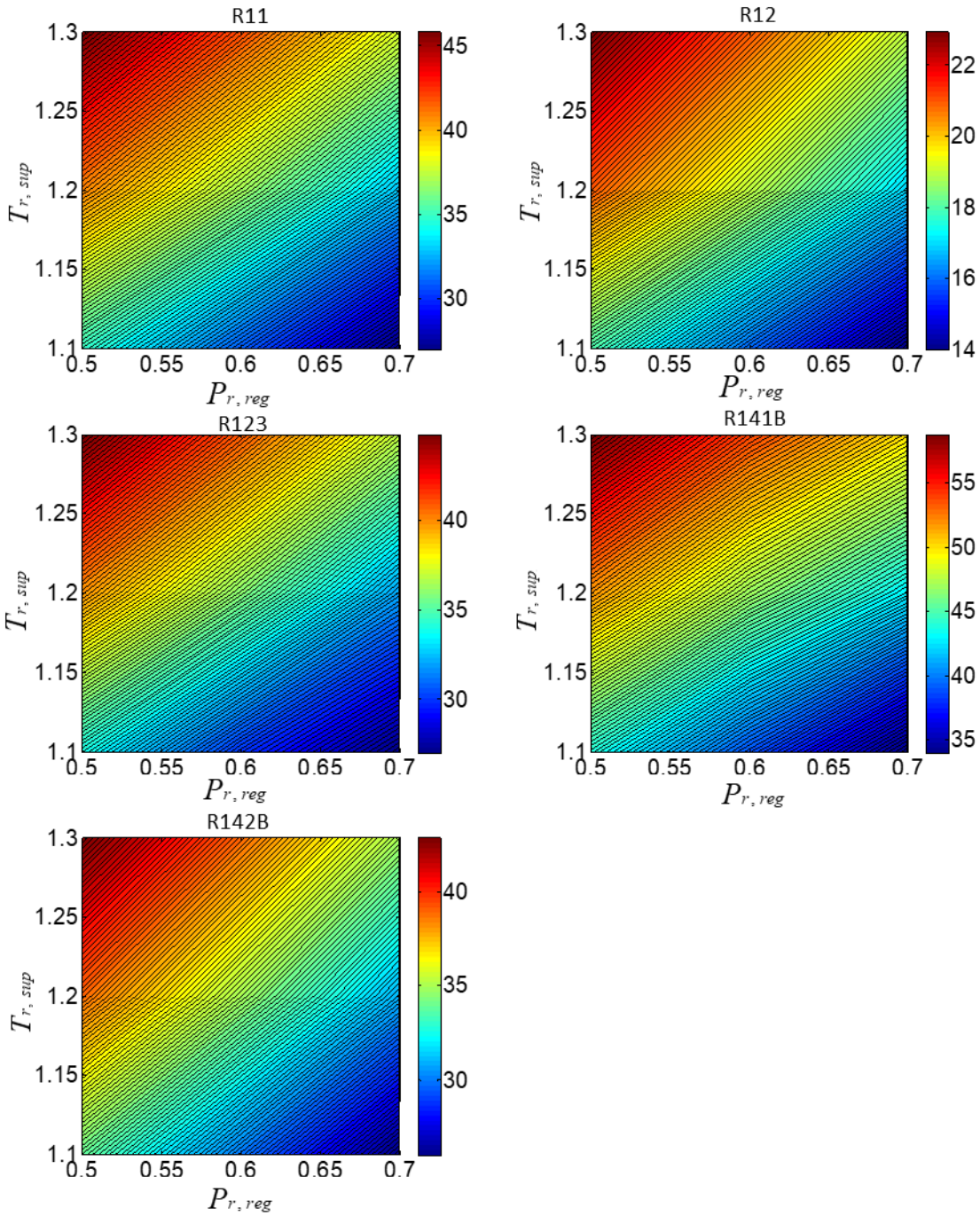
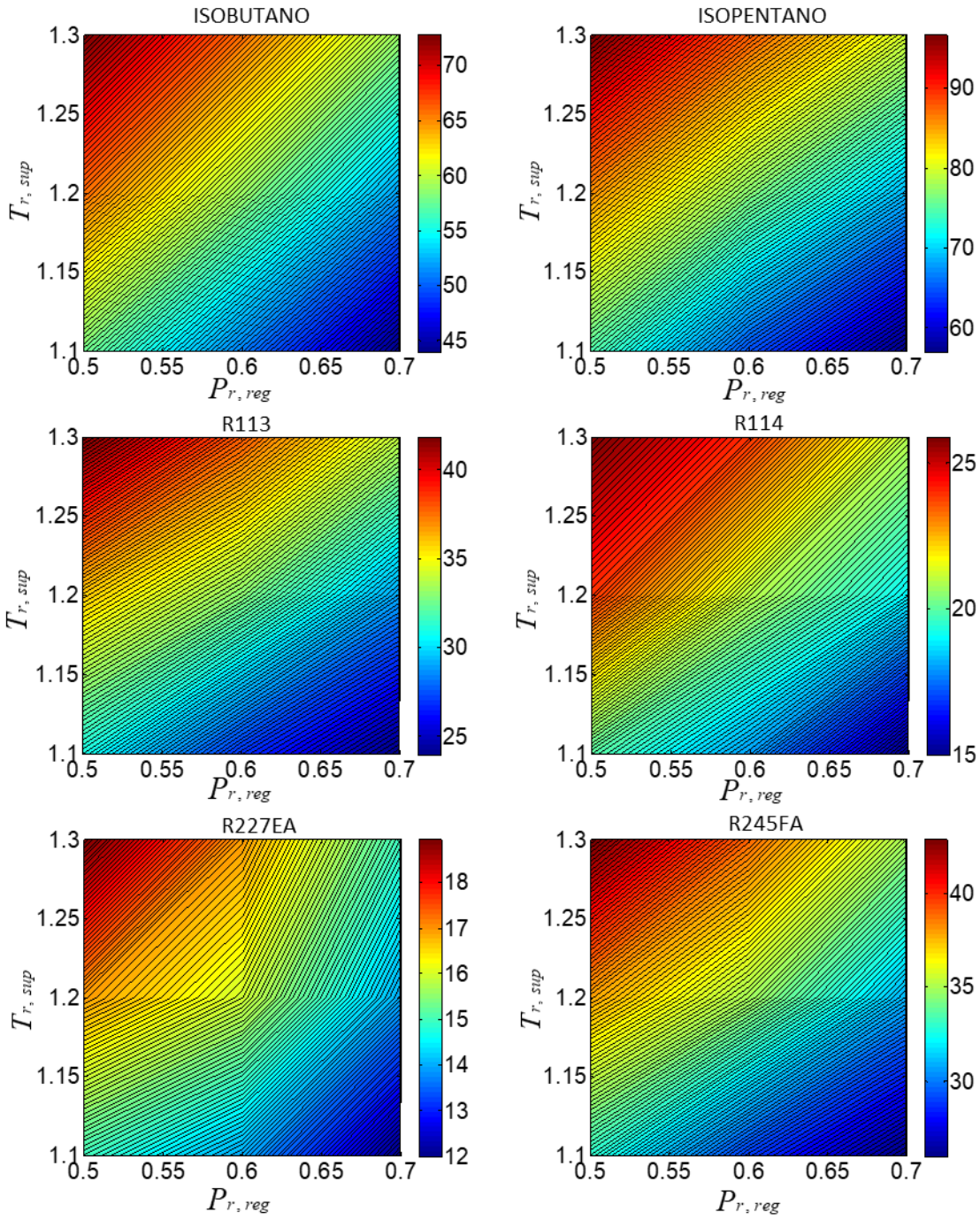


Figura 4.12 - Isocurvas de TLE [(kJ/kg)] para fluidos secos (ciclo subcrítico com superaquecimento).



Os resultados de TLE do ciclo superaquecido basicamente se replicam para todos os fluidos, independentemente de sua classificação (molhado, isentrópico ou seco). Os resultados do TLE estão ilustrados na Fig. 4.10 para os fluidos molhados, na Fig. 4.11 para os fluidos isentrópicos e na Fig. 4.12 para os fluidos secos.

Para todos os casos, fica evidente a ocorrência de uma proporcionalidade direta entre o TLE e T_{sup} e uma proporcionalidade inversa e TLE e p_{reg}. Praticamente para todos os fluidos, o TLE é influenciado igualitariamente por ambas as variáveis de entrada do processo. Pequenas variações deste comportamento são observadas em faixas específicas de alguns fluidos, porém, de maneira geral, o comportamento apresenta um padrão considerável. Para todos os fluidos, os melhores desempenhos em termos de TLE são obtidos para valores elevados de T_{sup} e valores baixos de p_{reg}.

4.4.3 Isocurvas de eficiência térmica e trabalho líquido específico para o ciclo supercrítico

O ciclo supercrítico também apresenta fluidos com comportamento similares, tanto em termos de ETC quanto em TLE. Os fluidos etanol e metanol apresentam isocurvas muito próximas, onde a ETC é afetada proporcionalmente pela variável T_{supc} e pela variável p_{reg}. A amônia apresenta condição similar ao etanol e ao metanol, muito embora sua ETC seja mais sensível à variação de T_{supc} do que à variação de p_{reg}. Os fluidos R22 e R32 também demonstram grande similaridade em termos de ETC, sendo que para $P_{r,reg} < 0,60,$ a ETC pode ser descrita, de forma prática, somente em função de T_{supc}.

Os resultados da ETC para fluidos molhados no ciclo supercrítico podem ser vistos na Fig. 4.13. Para $P_{r,reg} > 0,60,$ uma pequena alteração no comportamento faz com que a ETC passe a depender também de P_{reg}, entretanto, a T_{supc} continua a ser predominante para o resultado da ETC destes fluidos em qualquer faixa de operação. Os fluidos R134a e R152a apresentaram condição similar aos fluidos R22 e R32 no que tange a ETC, entretanto, a sensibilidade deste parâmetro à variação de p_{reg} é mais significativa para estes fluidos. Para $P_{r,reg} > 0,60,$ um aumento da sensibilidade da ETC em relação à p_{reg} é observado nos fluidos R134a e R152a. Um pequeno acréscimo na dependência da ETC pela pressão de regeneração também pode ser

observado para estes fluidos, quando operando com valores de $T_{r,supc}$ >1,30. Em todos os fluidos classificados como molhados, a ETC é diretamente proporcional à T_{supc} e inversamente proporcional à p_{reg}. Assim, os maiores valores de ETC são obtidos através de altas valores de T_{supc} e baixos valores de p_{reg}, exceto para os fluidos R22 e R32, que devido à sua parcial independência de p_{reg}, apresentam bom desempenho de ETC para praticamente toda a faixa de operação deste parâmetro.

Assim como nos demais ciclos, os resultados de ETC para os fluidos isentrópicos não configuram padrão de comportamento. Os resultados da ETC para fluidos isentrópicos no ciclo supercrítico podem ser vistos na Fig. 4.14. Cada fluido apresenta uma ETC com sensibilidade diferente aos parâmetros de operação do processo e seus valores. A ETC do fluido R11 sofre uma grande influência de p_{reg} em toda a faixa de operação, tornando sua dependência de T_{supc} relativamente baixa, entretanto, mesma com pouca influência, este parâmetro limita os maiores valores de ETC deste fluido para $T_{r,supc} > 1{,}30$. A relação da ETC com p_{reg} representa uma proporcionalidade inversa. A ETC do fluido R12 apresentou uma dependência maior de T_{supc} em comparação com p_{reg}. Dois comportamentos diferentes são observados neste fluido.

Para $P_{r,reg} < 0{,}60$ observa-se uma proporcionalidade direta entre a ETC e T_{supc} e entre a ETC e p_{reg}. Para $P_{r,reg} > 0{,}60$ a proporcionalidade direta entre ETC e T_{supc}, entretanto, para esta faixa, o aumento de p_{reg} faz com que a ETC sofra um decréscimo. O fluido R123 apresentou uma dependência relativamente elevada em relação à p_{reg} no que tange a ETC. Para $T_{r,supc} \leq 1{,}30$ a temperatura ainda exerce uma pequena influência nos resultados de ETC, porém, para valores de operação superiores a este, a ETC pode ser escrita exclusivamente de acordo com p_{reg}, de maneira geral. Devido à esta condição, os melhores resultados de ETC para este fluido são obtidas para valores baixos de p_{reg} para qualquer valor de T_{supc}. O fluido R141b apresentou uma proporcionalidade direta entre a ETC e T_{supc} e entre ETC e p_{reg}, logo, o melhor desempenho em termos de ETC é observado para elevados

valores de T_{supc} e p_{reg}. Por fim, o fluido R142b apresentou um comportamento muito similar aos fluidos molhados, em específico ao R134a e R152a, onde a ETC é diretamente proporcional à T_{supc} e inversamente proporcional à p_{reg}. Os maiores valores de ETC são obtidos para valores elevados de T_{supc} e baixos valores de p_{reg}.

Para os fluidos secos operando em regime supercrítico, podemos notar uma grande similaridade no comportamento da ETC para alguns casos. Isobutano, R113 e R227ea apresentam curvas muito próximas, muito embora o isobutano apresente um desempenho superior em termos de ETC. Ambos os fluidos apresentam o melhor desempenho para valores elevados de T_{supc} e valores baixos de p_{reg}, além de sofrer uma influência maior de p_{reg} quando $T_{r,supc} > 1{,}30$. Os fluidos R114 e R245fa também apresentaram grande similaridade de comportamento no que se refere à ETC. Para $T_{r,supc} > 1{,}30$ a ETC destes fluidos se comporta exclusivamente em função de p_{reg}. Os maiores valores de ETC podem ser obtidos para baixos valores de p_{reg} e $T_{r,supc} > 1{,}30$ para os fluidos R114 e R45fa, tendo em vista que, para $T_{r,supc} < 1{,}30$, este parâmetro ainda exerce influência no resultado da ETC destes fluidos. Assim como nos demais ciclos, o isopentano apresenta um comportamento que difere dos padrões observados para os fluidos secos. Para este fluido, os maiores valores de ETC ocorrem para baixos valores de T_{supc} e de p_{reg}, logo, observa-se uma proporcionalidade inversa entre a ETC e T_{supc} e entre a ETC e p_{reg}. Os resultados da ETC para fluidos secos no ciclo supercrítico podem ser vistos na Fig. 4.15.

Em termos de TLE, o ciclo supercrítico se assemelha aos demais para todas as categorias de fluido. Em todos os casos, observa-se uma proporcionalidade direta entre o TLE e T_{supc} e uma proporcionalidade inversa entre o TLE e p_{reg}. Desta forma, os melhores desempenhos referentes ao TLE dos fluidos são obtidos através da combinação de valores elevados para T_{supc} e baixos para p_{reg}. Os resultados do TLE estão ilustrados na Fig. 4.16 para os fluidos molhados, na Fig. 4.17 para os fluidos isentrópicos e na Fig. 4.18 para os fluidos secos.

Figura 4.13 - Isocurvas de ETC [adimensional] para fluidos molhados (ciclo supercrítico).

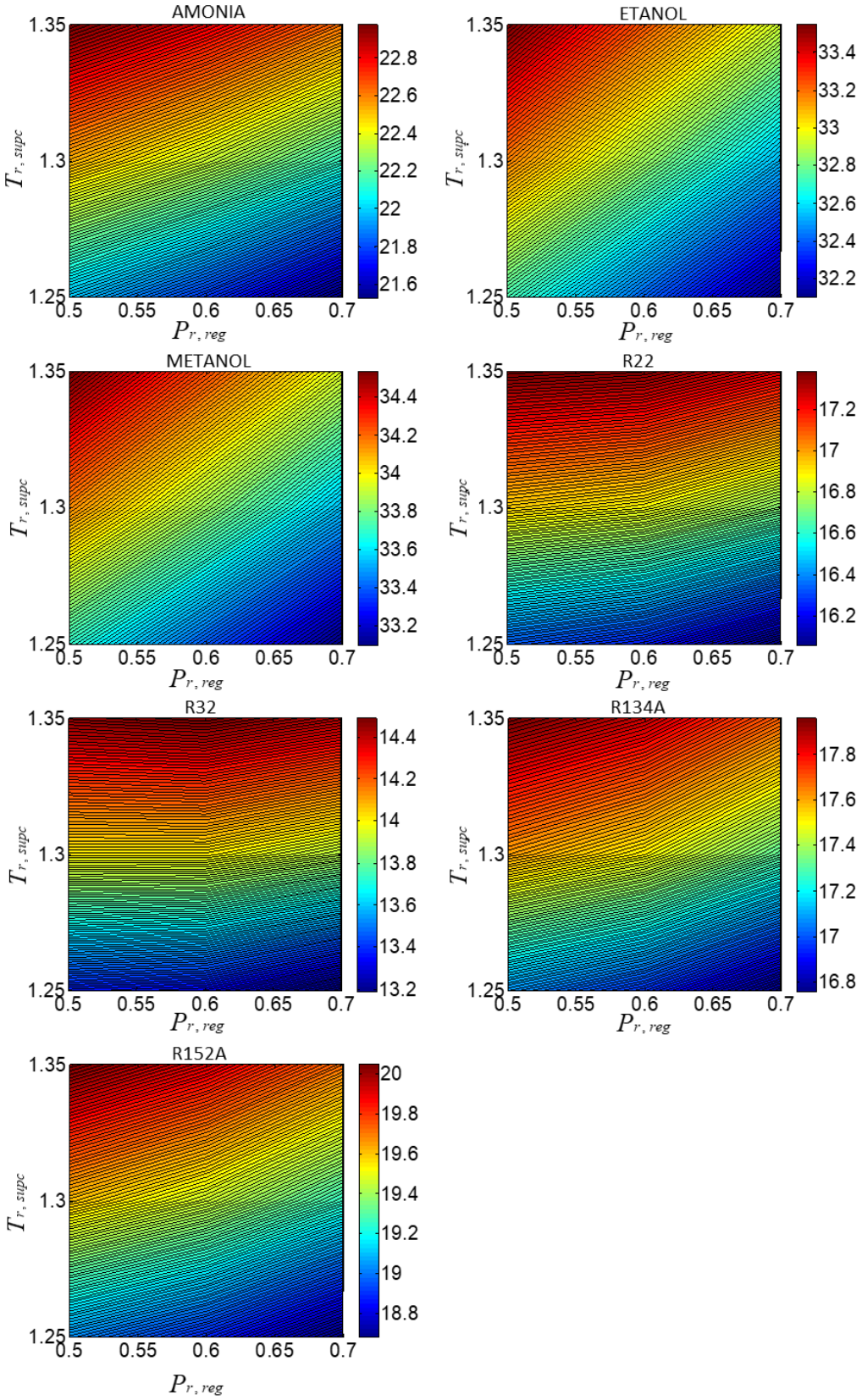

AMONIA
ETANOL
METANOL
R22
R32
R134A
R152A
$T_{r,supc}$
$P_{r,reg}$
1.35
1.3
1.25
0.5
0.55
0.6
0.65
0.7
22.8
22.6
22.4
22.2
22
21.8
21.6
33.4
33.2
33
32.8
32.6
32.4
32.2
34.4
34.2
34
33.8
33.6
33.4
33.2
17.2
17
16.8
16.6
16.4
16.2
14.4
14.2
14
13.8
13.6
13.4
13.2
17.8
17.6
17.4
17.2
17
16.8
20
19.8
19.6
19.4
19.2
19
18.8

Figura 4.14 - Isocurvas de ETC [adimensional] para fluidos isentrópicos (ciclo supercrítico).

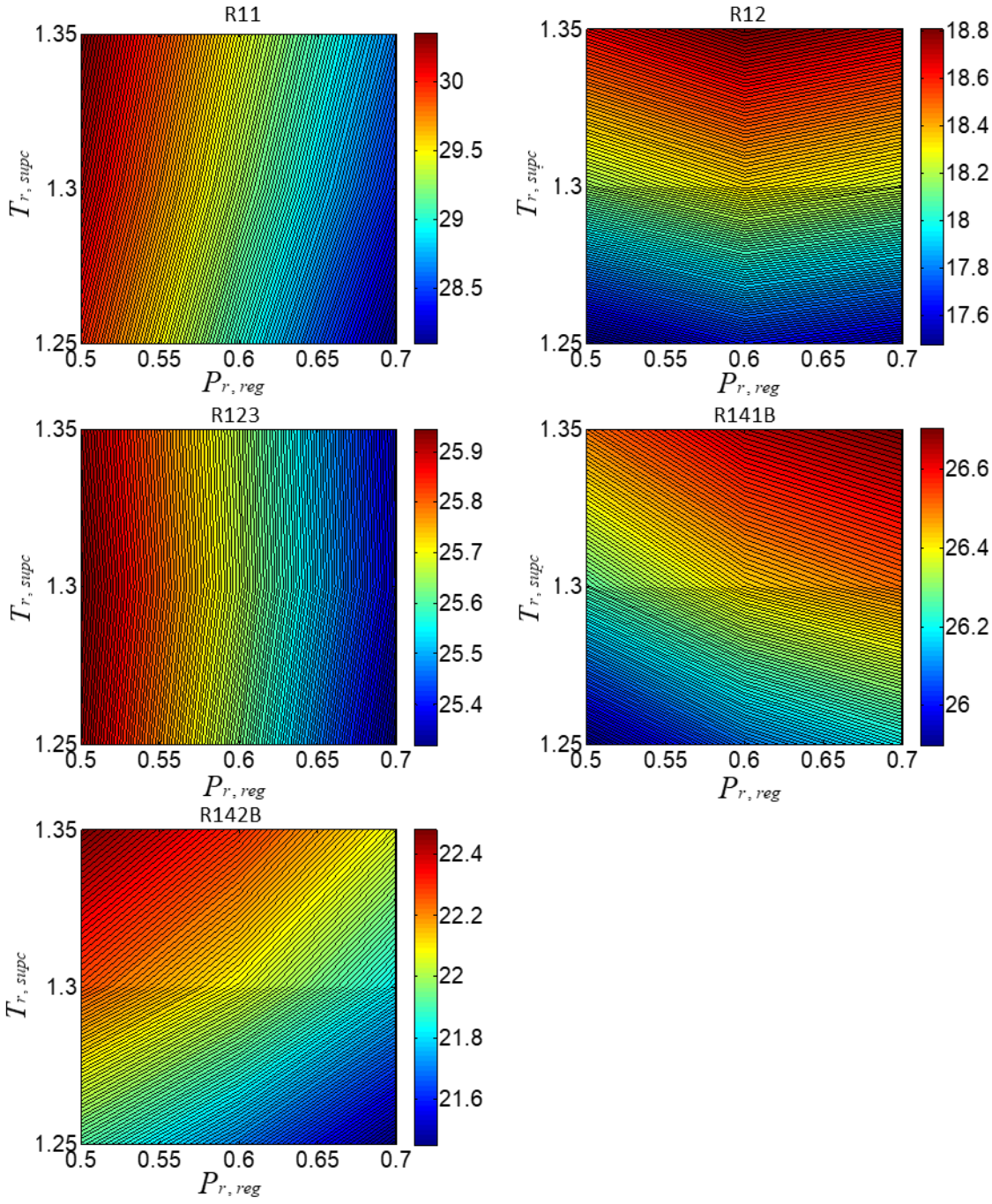


Figura 4.15 - Isocurvas de ETC [adimensional] para fluidos secos (ciclo supercrítico).

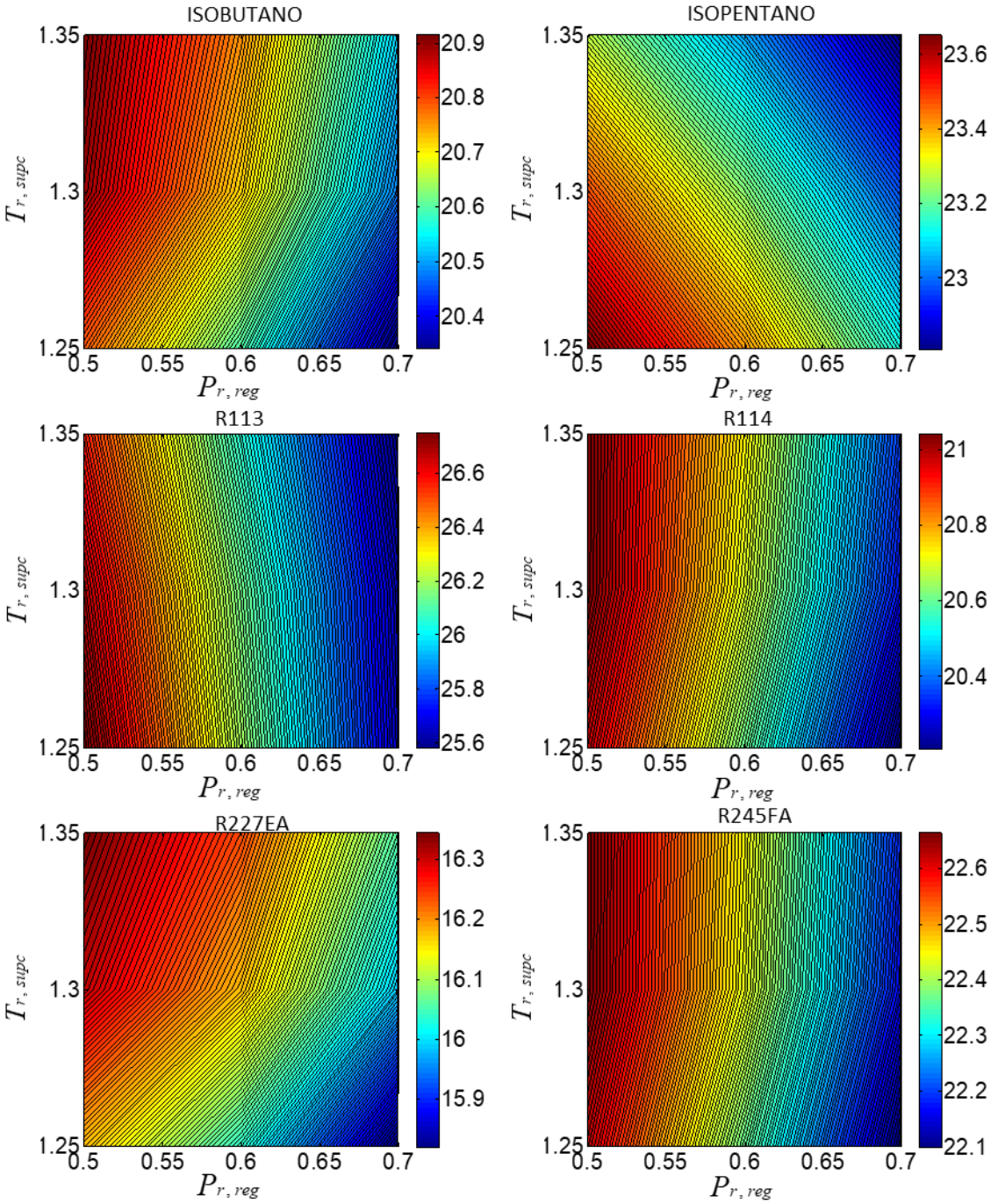


Figura 4.16 - Isocurvas de TLE [(kJ/kg)] para fluidos molhados (ciclo supercrítico).

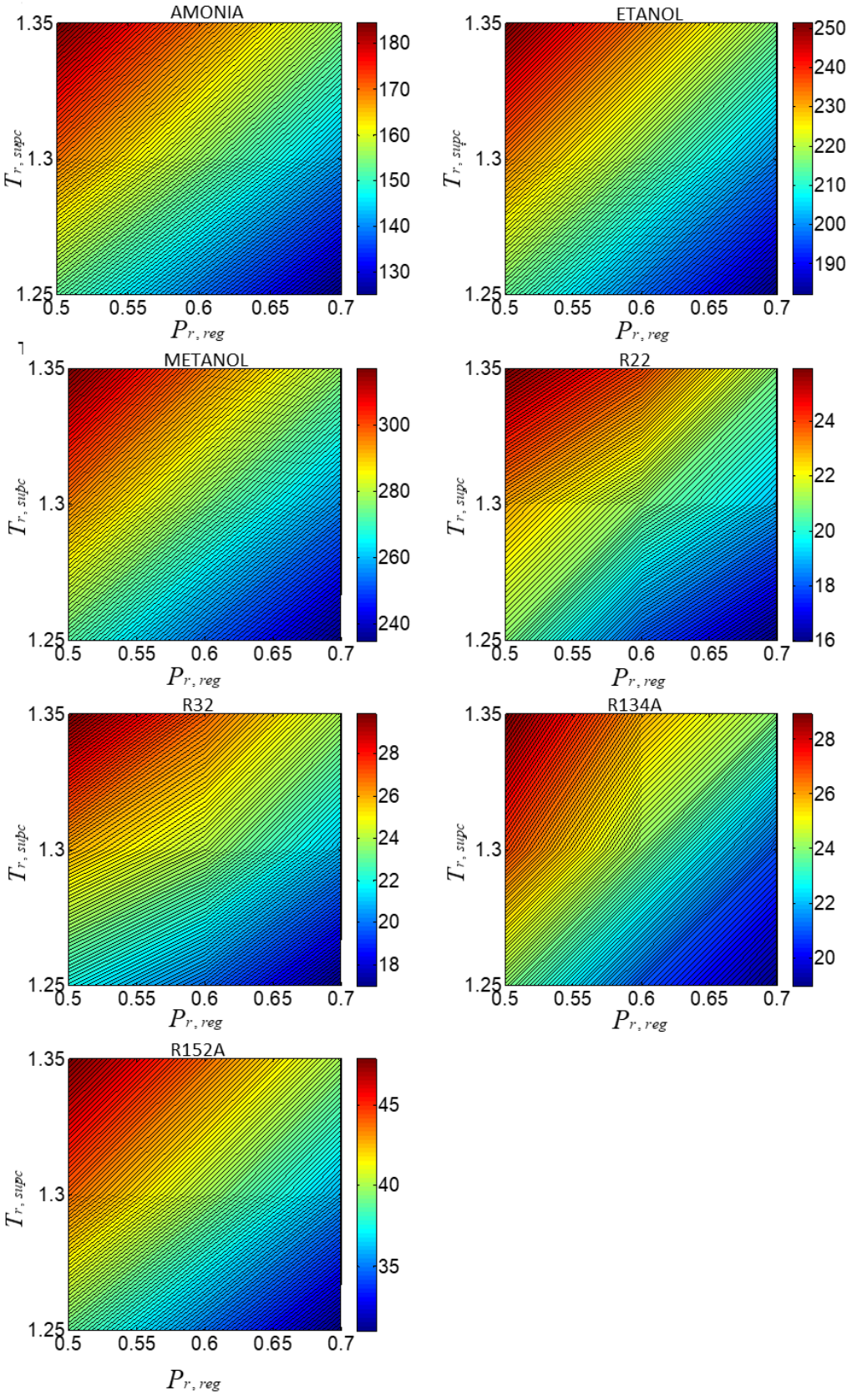


Figura 4.17 - Isocurvas de TLE [(kJ/kg)] para fluidos isentrópicos (ciclo supercrítico).

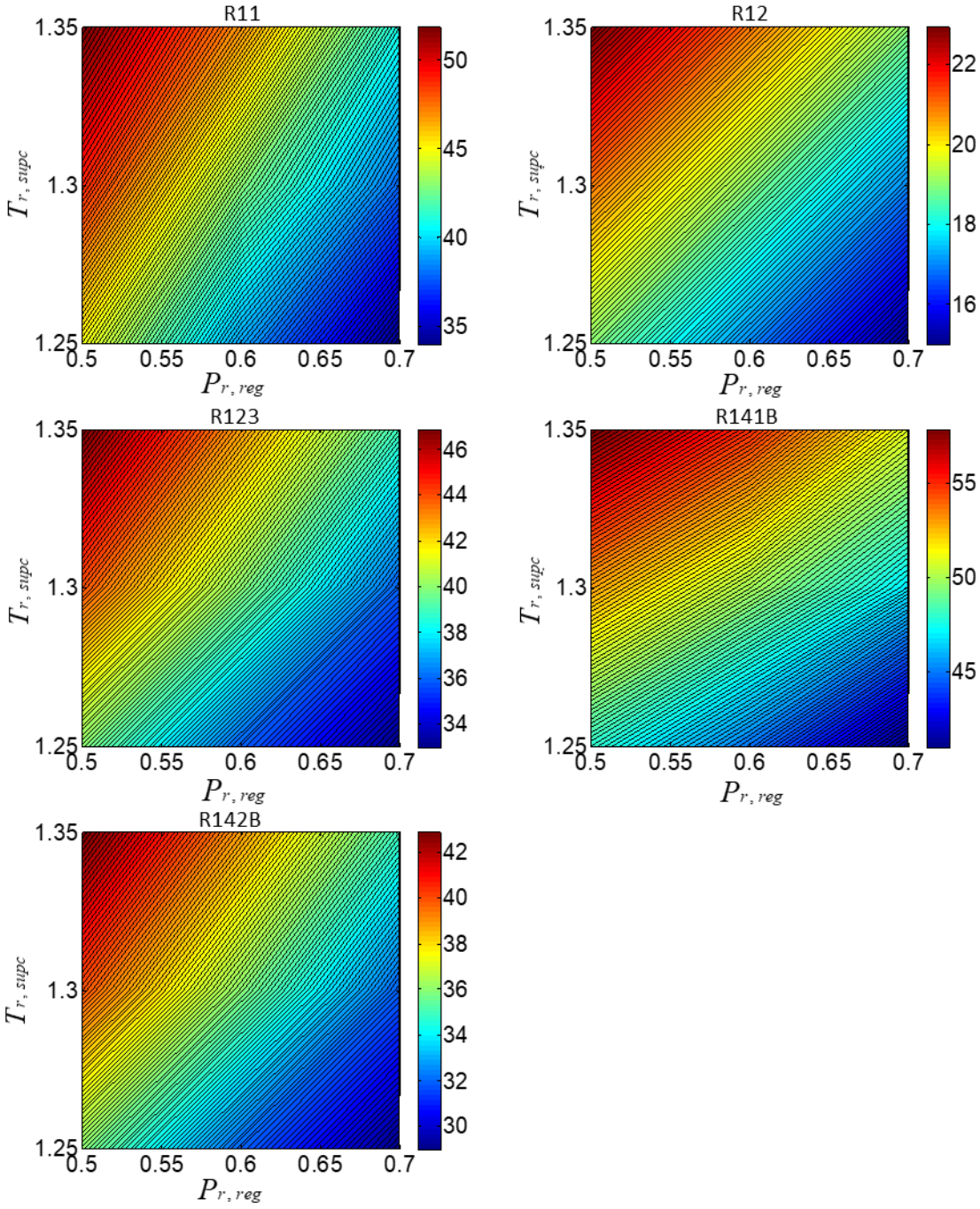
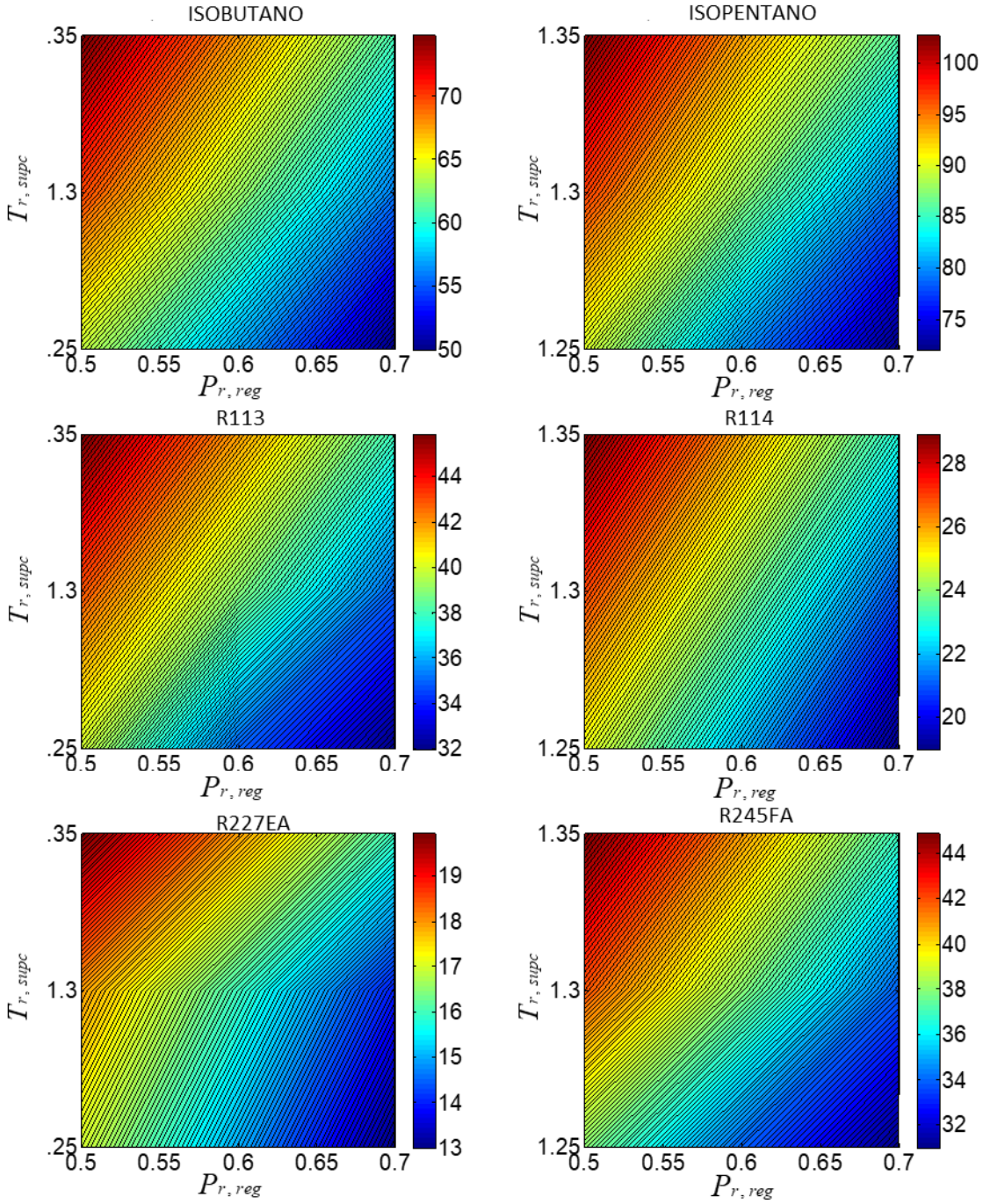


Figura 4.18 - Isocurvas de TLE [(kJ/kg)] para fluidos secos (ciclo supercrítico).



4.5 Regressão linear múltipla para eficiência térmica do ciclo (ETC) e trabalho líquido específico (TLE)

Após a obtenção de resultados para diversos fluidos, com classificações diversas (molhados, isentrópicos e secos), tornou-se possível realizar uma análise estatística dos dados.

Inicialmente, uma análise de correlação linear entre os resultados de ETC e TLE e as variáveis de entrada foi realizada, permitindo a compreensão inicial da influência de cada parâmetro no desempenho térmico do ciclo. Os resultados das correlações podem ser vistos nas tabelas 4.10, 4.11 e 4.12. Os valores detalhados nas tabelas em questão indicam, em percentual, a influência de cada variável de entrada do sistema nos resultados do mesmo (ETC e TLE).

Em seguida, regressões lineares foram desenvolvidas para análise da influência conjunta das variáveis de entrada do ciclo no desempenho térmico do mesmo.

Tabela 4.10 – Resultados de correlação linear para o ciclo subcrítico [(%)]

FLUIDOS MOLHADOS	**ETC**	**TLE**
T_{evap}	99,38	83,36
p_{evap}	39,15	73,03
p_{reg}	34,93	63,74

FLUIDOS SECOS	**ETC**	**TLE**
T_{evap}	95,38	29,73
p_{evap}	46,27	45,50
p_{reg}	11,90	-2,53

FLUIDOS ISENTRÓPICOS	**ETC**	**TLE**
T_{evap}	95,07	68,26
p_{evap}	-0,48	0,71
p_{reg}	-1,120	-4,020

Tabela 4.11 – Resultados de correlação linear para o ciclo subcrítico com superaquecimento [(%)]

FLUIDOS MOLHADOS	ETC	TLE
T_{evap}	98,53	89,79
T_{sup}	99,87	91,28
p_{reg}	35,47	57,98
ΔT	81,39	75,33

FLUIDOS SECOS	ETC	TLE
T_{evap}	95,67	37,44
T_{sup}	99,96	42,70
p_{reg}	18,68	4,620
ΔT	72,03	38,93

FLUIDOS ISENTRÓPICOS	ETC	TLE
T_{evap}	68,76	36,89
T_{sup}	99,95	83,23
p_{reg}	4,015	-20,74
ΔT	71,89	79,27

Tabela 4.12 – Resultados de correlação linear para o ciclo supercrítico [(%)]

FLUIDOS MOLHADOS	ETC	TLE
T_{supc}	99,46	94,05
p_{reg}	35,23	53,01

FLUIDOS SECOS	ETC	TLE
T_{supc}	95,24	45,65
p_{reg}	18,45	4,96

FLUIDOS ISENTRÓPICOS	ETC	TLE
T_{supc}	94,02	88,71
p_{reg}	5,81	-17,96

4.5.1 Regressão linear múltipla para o ciclo subcrítico

4.5.1.1 Regressão linear múltipla para fluidos molhados operando em ciclo subcrítico

O resultado da análise estatística, fornece, dentre outros dados, os coeficientes que, em conjunto, permitem a construção de uma expressão linear múltipla que descreve o comportamento da variável de saída, neste caso, a ETC. Outro dado importante fornecido pela análise é o R-quadrado ajustado, que expressa a representatividade das variáveis (coeficientes) na variável de saída. Para a aplicação em questão, isso representa o quanto as variáveis T_{evap}, e p_{reg} influenciam no resultado da ETC. A estatística de regressão linear da ETC para fluidos molhados operando em ciclo subcrítico está ilustrada na Tab. 4.13.

Tabela 4.13 – Estatística de regressão linear múltipla para a ETC de fluidos molhados (ciclo subcrítico).

DADOS DA REGRESSÃO [(%)]	
R-quadrado ajustado	98,94
Desvio estimado	0,6752
COEFICIENTES	
Interseção	4,1463
T_{evap}	0,1010
p_{reg}	0,0002

De acordo com os coeficientes obtidos, é possível elaborar uma expressão (regressão) que expresse o comportamento da ETC em função de suas principais variáveis, para o ciclo subcrítico, obtendo-se:

$$ETC = 4{,}146 + 0{,}101 T_{evap} + 0{,}0002 p_{reg} \tag{4.1}$$

Também é possível afirmar, através da análise estatística da regressão, que as variáveis T_{evap}, e p_{reg} são responsáveis, em conjunto, pela explicação de 98,9 % do comportamento da ETC. O percentual restante (1,1 %) é explicado pelas demais variáveis existentes no processo, ou seja, T_{evap}, e p_{reg} representam as variáveis de maior relevância, no que tange o comportamento da ETC. O desvio calculado para a expressão fornecida é inferior a 1 % (0,6752%).

A regressão relativa ao TLE demonstrou uma influência inferior das variáveis T_{evap}, e p_{reg} no resultado do mesmo, em comparação ao obtido para a ETC. Juntas, estas duas variáveis explicam, aproximadamente 85 % do comportamento do TLE realizado pelos fluidos molhados operando em regime subcrítico. A estatística de regressão linear do TLE para fluidos molhados operando em ciclo subcrítico está ilustrada na Tab. 4.14.

Tabela 4.14 – Estatística de regressão linear múltipla para o TLE de fluidos molhados (ciclo subcrítico).

DADOS DA REGRESSÃO [(%)]	
R-quadrado ajustado	84,99
Desvio estimado	18,5469
COEFICIENTES	
Interseção	-66,7851
T_{evap}	0,5299
p_{reg}	0,0131

Mediante os resultados descritos, a seguinte expressão foi obtida para o TLE:

$$TLE = -66,785 + 0,5299T_{evap} + 0,0131p_{reg} \quad (4.2)$$

4.5.1.2 Regressão linear múltipla para fluidos isentrópicos operando em ciclo subcrítico

Para os fluidos isentrópicos sujeitos ao ciclo subcrítico, a representatividade das variáveis na explicação da ETC também apresentou valor considerável (93,5 %).

O desvio obtido para esta categoria de fluidos neste ciclo foi de 0,925 %. A estatística de regressão linear da ETC para fluidos isentrópicos operando em ciclo subcrítico está ilustrada na Tab. 4.15.

Tabela 4.15 - Estatística de regressão linear múltipla para a ETC de fluidos isentrópicos (ciclo subcrítico).

DADOS DA REGRESSÃO [(%)]	
R-quadrado ajustado	93,45
Desvio estimado	0,9253
COEFICIENTES	
Interseção	9,1859
T_{evap}	0,0961
p_{reg}	-0,0018

Com base nos resultados explícitos na estatística da regressão, foi possível obter a expressão que explica o comportamento da ETC para fluidos isentrópicos operando em um ciclo subcrítico, obtendo-se:

$$ETC = 9{,}186 + 0{,}096 T_{evap} - 0{,}0018 p_{reg} \tag{4.3}$$

A regressão de TLE desenvolvida para fluidos isentrópicos demonstrou um baixo coeficiente de determinação (aproximadamente 66 %), ou seja, as variáveis T_{evap}, e p_{reg} explicam, de maneira conjunta, somente 66 % do comportamento do TLE deste tipo de fluido operando em ciclo subcrítico. A estatística de regressão linear do TLE para fluidos isentrópicos operando em ciclo subcrítico está ilustrada na Tab. 4.16

Tabela 4.16 – Estatística de regressão linear múltipla para o TLE de fluidos isentrópicos (ciclo subcrítico).

DADOS DA REGRESSÃO [(%)]	
R-quadrado ajustado	65,68
Desvio estimado	3,2541
COEFICIENTES	
Interseção	18,7379
T_{evap}	0,1097
p_{reg}	-0,0068

Abaixo, segue a expressão obtida para o TLE dos fluidos isentrópicos operando sob regime subcrítico.

$$TLE = 18{,}738 + 0{,}109 T_{evap} - 0{,}00683 p_{reg} \tag{4.4}$$

4.5.1.3 Regressão linear múltipla para fluidos secos operando em ciclo subcrítico

Para os fluidos secos, o desvio estimado apresentou valor um pouco superior aos demais tipos de fluido operando em ciclo subcrítico, entretanto, ainda inferior a 1 % (aproximadamente 0,95 %). Desta forma, a representatividade das variáveis na ETC apresenta uma pequena queda, mas ainda apresenta valor superior a 90 %, ou seja, as variáveis T_{evap}, e p_{reg} são responsáveis, em conjunto, pela explicação de 90,75 % do comportamento da ETC. A estatística de regressão linear da ETC para fluidos secos operando em ciclo subcrítico está ilustrada na Tab. 4.17

Com base nos resultados demonstrados na estatística da regressão, foi possível redigir a expressão que explica o comportamento da ETC para fluidos secos operando em um ciclo subcrítico, obtendo-se:

$$ETC = 7{,}193 + 0{,}084 T_{evap} - 0{,}00037 p_{reg} \tag{4.5}$$

Tabela 4.17 – Estatística de regressão linear múltipla para a ETC de fluidos secos (ciclo subcrítico).

DADOS DA REGRESSÃO [(%)]	
R-quadrado ajustado	90,75
Desvio estimado	0,9498
COEFICIENTES	
Interseção	7,1932
T_{evap}	0,0835
p_{reg}	-0,00037

A regressão para o TLE dos fluidos secos apresentou o pior resultado dentre todas as categorias de fluido. Neste caso, o coeficiente de determinação apresentou valor igual a 5,8 %, o que nos permite afirmar que as variáveis T_{evap}, e p_{reg} explicam, de maneira conjunta, menos de 6 % do comportamento do TLE deste tipo de fluido operando em ciclo subcrítico. A estatística de regressão linear do TLE para fluidos secos operando em ciclo subcrítico está ilustrada na Tab. 4.18.

Com base na regressão desenvolvida, foi possível obter a seguinte expressão para o TLE desta categoria de fluidos, operando neste tipo de ciclo:

$$TLE = 13{,}064 + 0{,}092 T_{evap} - 0{,}0026 p_{reg} \tag{4.6}$$

Tabela 4.18 – Estatística de regressão linear múltipla para o TLE de fluidos secos (ciclo subcrítico).

DADOS DA REGRESSÃO [(%)]	
R-quadrado ajustado	5,84
Desvio estimado	10,3731
COEFICIENTES	
Interseção	13,0645
T_{sup}	0,0922
p_{reg}	-0,0026

4.5.2 Regressão linear múltipla para o ciclo subcrítico com superaquecimento

Para realização da mesma análise no ciclo superaquecido, torna-se necessária a alteração de uma das variáveis de entrada. Neste ciclo, foram consideradas desenvolvimento da regressão as variáveis T_{evap}, e p_{reg}, sendo esta última já utilizada no ciclo subcrítico.

4.5.2.1 Regressão linear múltipla para fluidos molhados operando em ciclo subcrítico com superaquecimento

Neste ciclo, a análise dos fluidos molhados apresentou um valor de R-quadrado ajustado (98,1 %) muito próximo ao resultado obtido no ciclo subcrítico (98,9 %), ou seja, as variáveis T_{sup} e p_{reg} explicam, de maneira conjunta, 98,1 % do comportamento da ETC para esta categoria de fluido. A estatística de regressão linear da ETC para fluidos molhados operando em ciclo subcrítico com superaquecimento está ilustrada na Tab. 4.19.

Tabela 4.19 – Estatística de regressão linear múltipla para a ETC de fluidos molhados (ciclo subcrítico com superaquecimento).

DADOS DA REGRESSÃO [(%)]	
R-quadrado ajustado	98,17
Desvio estimado	0,9628
COEFICIENTES	
Interseção	4,629
T_{sup}	0,0891
p_{reg}	0,00025

Com base nos resultados explícitos na estatística da regressão (Fig. 4.25), foi possível redigir a expressão que explica o comportamento da ETC para fluidos molhados operando em um ciclo subcrítico com superaquecimento, obtendo-se:

$$ETC = 4,629 + 0,089T_{sup} + 0,00025p_{reg} \quad (4.7)$$

A análise realizada para o TLE do ciclo superaquecido utilizando fluidos molhados resultou em um coeficiente de determinação igual a 89,5 %, ou seja, um resultado muito próximo do ciclo subcrítico convencional. Desta forma, podemos afirmar que, aproximadamente 90 % do comportamento do TLE pode ser explicado pelas variáveis T_{sup} e p_{reg}. A estatística de regressão linear do TLE para fluidos molhados operando em ciclo subcrítico com superaquecimento está ilustrada na Tab. 4.20.

Tabela 4.20 – Estatística de regressão linear múltipla para o TLE de fluidos molhados (ciclo subcrítico com superaquecimento).

DADOS DA REGRESSÃO [(%)]	
R-quadrado ajustado	89,55
Desvio estimado	29,0982
COEFICIENTES	
Interseção	-136,1033
T_{sup}	0,8783
p_{reg}	0,0224

Através da análise realizada para esta categoria de fluidos, operando em regime superaquecido, chegamos à seguinte expressão:

$$TLE = -136,103 + 0,878T_{sup} + 0,02242p_{reg} \quad (4.8)$$

4.5.2.2 Regressão linear múltipla para fluidos isentrópicos operando em ciclo subcrítico com superaquecimento

Para os fluidos isentrópicos operando em ciclos superaquecidos, a representatividade das variáveis T_{sup} e p_{reg} na ETC apresentou valor de 89,7 %, com desvio estimado de aproximadamente 1,15 %, configurando um resultado inferior ao obtido para os próprios fluidos isentrópicos operando em regime subcrítico e inferior

aos resultados dos fluidos molhados em ambos os ciclos (subcrítico e superaquecido). A estatística de regressão linear da ETC para fluidos isentrópicos operando em ciclo subcrítico com superaquecimento está ilustrada na Tab. 4.21.

Tabela 4.21 – Estatística de regressão linear múltipla para a ETC de fluidos isentrópicos (ciclo subcrítico com superaquecimento).

DADOS DA REGRESSÃO [(%)]	
R-quadrado ajustado	89,77
Desvio estimado	1,1489
COEFICIENTES	
Interseção	8,2868
T_{sup}	0,00713
p_{reg}	0,00029

Com base nos resultados explícitos na estatística da regressão, foi possível redigir a expressão que explica o comportamento da ETC para fluidos isentrópicos operando em um ciclo subcrítico com superaquecimento, obtendo-se:

$$ETC = 8,287 + 0,071T_{\sup} + 0,00029p_{reg} \quad (4.9)$$

Os resultados para o TLE dos fluidos isentrópicos em regime superaquecido apresentaram um coeficiente de determinação relativamente baixo (aproximadamente 71 %), ou seja, as variáveis T_{sup} e p_{reg} explicam, de maneira conjunta, 71 % do comportamento do TLE deste tipo de fluido operando sob condições de superaquecimento. A estatística de regressão linear do TLE para fluidos isentrópicos operando em ciclo subcrítico com superaquecimento está ilustrada na Tab. 4.22.

Tabela 4.22 – Estatística de regressão linear múltipla para o TLE de fluidos isentrópicos (ciclo subcrítico com superaquecimento).

DADOS DA REGRESSÃO [(%)]	
R-quadrado ajustado	71,40
Desvio estimado	5,6913
COEFICIENTES	
Interseção	-11,9838
T_{sup}	0,21055
p_{reg}	0,00218

Através da análise dos resultados, chegamos à equação que expressa o comportamento do TLE para fluidos isentrópicos operando em ciclo superaquecido:

$$TLE = -11{,}984 + 0{,}211 T_{\sup} - 0{,}00218 p_{reg} \quad (4.10)$$

4.5.2.3 Regressão linear múltipla para fluidos secos operando em ciclo subcrítico com superaquecimento

Assim como no ciclo subcrítico, o resultado com menor representatividade das variáveis de entrada na ETC foi obtido na categoria fluidos secos, muito embora ainda se tenha um valor considerável de R-quadrado ajustado (80,76 %). Desta forma, as variáveis T_{sup} e p_{reg} representam a explicação de 80,76 % do comportamento da ETC para esta categoria de fluidos operando neste tipo de ciclo, com um desvio de aproximadamente 1,29 %. A estatística de regressão linear da ETC para fluidos secos operando em ciclo subcrítico com superaquecimento está ilustrada na Tab. 4.23

Tabela 4.23 – Estatística de regressão linear múltipla para a ETC de fluidos secos (ciclo subcrítico com superaquecimento).

DADOS DA REGRESSÃO [(%)]	
R-quadrado ajustado	80,77
Desvio estimado	1,2928
COEFICIENTES	
Interseção	8,0652
T_{sup}	0,0582
p_{reg}	0,00026

Com base nos resultados explícitos na estatística da regressão, foi possível redigir a expressão que explica o comportamento da ETC para fluidos secos operando em um ciclo subcrítico com superaquecimento, obtendo-se:

$$ETC = 8{,}065 + 0{,}058T_{\text{sup}} + 0{,}00026p_{reg} \tag{4.11}$$

A regressão para o TLE dos fluidos secos apresentou, assim como no ciclo subcrítico, o pior resultado dentre todas as categorias de fluido. Neste caso, o coeficiente de determinação apresentou valor igual a 15 %, o que nos permite afirmar que as variáveis T_{sup} e p_{reg} explicam, de maneira conjunta, 15 % do comportamento do TLE deste tipo de fluido operando em ciclo subcrítico com superaquecimento. A estatística de regressão linear do TLE para fluidos secos operando em ciclo subcrítico com superaquecimento está ilustrada na Tab. 4.24

Para este caso, a expressão do TLE tem a seguinte forma:

$$TLE = 2{,}626 + 0{,}2154T_{\text{sup}} - 0{,}00157p_{reg} \tag{4.12}$$

Tabela 4.24 - Estatística de regressão linear múltipla para o TLE específico de fluidos secos (ciclo subcrítico com superaquecimento).

DADOS DA REGRESSÃO [(%)]	
R-quadrado ajustado	15,07
Desvio estimado	20,9781
COEFICIENTES	
Interseção	2,6265
T_{sup}	0,2154
p_{reg}	-0,00157

4.5.3 Regressão linear múltipla para o ciclo supercrítico

Para análise do ciclo supercrítico, o parâmetro de operação referente ao volume de controle evaporador foi alterada em relação aos demais ciclos. Desta forma, foram consideradas as variáveis T_{supc} e p_{reg}, já utilizada nos demais ciclos.

4.5.3.1 Regressão linear múltipla para fluidos molhados operando em ciclo supercrítico

A categoria fluidos molhados no ciclo supercrítico forneceu o melhor resultado no que tange a influência das variáveis de entrada na ETC, apresentando valor superior a 99 %, com desvio de apenas 0,7 %. Considerando o desvio estimado obtido, podemos afirmar que, praticamente, o comportamento da ETC pode ser escrito exclusivamente de acordo com as variáveis T_{supc} e p_{reg}, com certa segurança. A estatística de regressão linear da ETC para fluidos molhados operando em ciclo supercrítico está ilustrada na Tab. 4.25. Com base nos resultados explícitos na estatística da regressão, foi possível redigir a expressão que explica o comportamento da ETC para fluidos molhados operando em um ciclo supercrítico, obtendo-se:

$$ETC = 5,25 + 0,087T_{supc} + 0,00024p_{reg} \quad (4.13)$$

Tabela 4.25 – Estatística de regressão linear múltipla para a ETC de fluidos molhados (ciclo supercrítico).

DADOS DA REGRESSÃO [(%)]	
R-quadrado ajustado	99,11
Desvio estimado	0,7009
COEFICIENTES	
Interseção	5,2502
T_{sup}	0,0870
p_{reg}	0,00024

A análise estatística realizada para o TLE dos fluidos molhados operando sob regime supercrítico demonstrou um coeficiente de determinação igual a 94,6 %, ou seja, as variáveis T_{supc} e p_{reg} explicam, de forma conjunta, aproximadamente 95 % do comportamento do TLE. A estatística de regressão linear do TLE para fluidos molhados operando em ciclo supercrítico está ilustrada na Tab. 4.26.

Tabela 4.26 – Estatística de regressão linear múltipla para o TLE de fluidos molhados (ciclo supercrítico).

DADOS DA REGRESSÃO [(%)]	
R-quadrado ajustado	94,60
Desvio estimado	23,4275
COEFICIENTES	
Interseção	-152,2608
T_{supc}	1,0378
p_{reg}	0,01743

A expressão do TLE, para fluidos molhados operando em regime supercrítico se encontra descrita abaixo:

$$TLE = -152,26 + 1,038 T_{\sup c} + 0,01743 p_{reg} \quad (4.14)$$

4.5.3.2 Regressão linear múltipla para fluidos isentrópicos operando em ciclo supercrítico

Fluidos isentrópicos operando em ciclo supercrítico apresentaram menor relação entre as variáveis de entrada e a ETC, quando comparados com os próprios fluidos operando nos demais ciclos. 87,86 % do comportamento da ETC é explicado pela combinação das variáveis T_{supc} e p_{reg}, para este ciclo, com um desvio estimado igual a 1,36 %. A estatística de regressão linear da ETC para fluidos isentrópicos operando em ciclo supercrítico está ilustrada na Tab. 4.27.

Tabela 4.27 – Estatística de regressão linear múltipla para a ETC de fluidos isentrópicos (ciclo supercrítico).

DADOS DA REGRESSÃO [(%)]	
R-quadrado ajustado	87,86
Desvio estimado	1,3603
COEFICIENTES	
Interseção	8,0417
T_{supc}	0,0764
p_{reg}	-0,000137

Com base nos resultados explícitos na estatística da regressão, foi possível redigir a expressão que explica o comportamento da ETC para fluidos isentrópicos operando em um ciclo supercrítico:

$$ETC = 8{,}042 + 0{,}0764 T_{supc} - 0{,}0001374 p_{reg} \quad (4.15)$$

A regressão de TLE desenvolvida para fluidos isentrópicos demonstrou um razoável coeficiente de determinação (aproximadamente 84 %), ou seja, as variáveis T_{supc} e p_{reg} explicam, de maneira conjunta, 84 % do comportamento do TLE deste tipo de fluido operando em ciclo supercrítico. A estatística de regressão linear da TLE para fluidos isentrópicos operando em ciclo supercrítico está ilustrada na Tab. 4.28

Tabela 4.28 – Estatística de regressão linear múltipla para o TLE de fluidos isentrópicos (ciclo supercrítico).

DADOS DA REGRESSÃO [(%)]	
R-quadrado ajustado	84,10
Desvio estimado	4,4987
COEFICIENTES	
Interseção	9,9817
T_{supc}	0,2126
p_{reg}	-0,007548

Abaixo, temos a expressão desenvolvida para o TLE desta categoria de fluido operando sob regime supercrítico:

$$TLE = 9,982 + 0,2126T_{supc} - 0,007549p_{reg} \quad (4.16)$$

4.5.3.3 Regressão linear múltipla para fluidos secos operando em ciclo supercrítico

A análise referente aos fluidos secos operando em ciclo supercrítico apresentou valores muito próximos aos obtidos pela mesma categoria de fluidos sujeitos ao ciclo subcrítico. Aproximadamente 90,43 % do comportamento da ETC pode ser explicado, neste caso, pelas variáveis T_{supc} e p_{reg}, com desvio inferior a 1 % (0,954 %). A estatística de regressão linear da ETC para fluidos secos operando em ciclo supercrítico está ilustrada na Tab. 4.29.

Com base nos resultados explícitos na estatística da regressão, foi possível redigir a expressão que explica o comportamento da ETC para fluidos secos operando em um ciclo supercrítico, obtendo-se:

$$ETC = 8,443 + 0,0614T_{supc} + 0,0003p_{reg} \quad (4.17)$$

Tabela 4.29 – Estatística de regressão linear múltipla para a ETC de fluidos secos (ciclo supercrítico).

DADOS DA REGRESSÃO [(%)]	
R-quadrado ajustado	90,43
Desvio estimado	0,9541
COEFICIENTES	
Interseção	8,4426
T_{supc}	0,0614
p_{reg}	0,00030

A análise estatística de TLE dos fluidos secos operando em ciclo supercrítico resultou em um coeficiente de determinação de apenas 17,8 %, ou seja, as variáveis T_{supc} e p_{reg} explicam, de maneira conjunta, somente 18 % do comportamento do TLE. A estatística de regressão linear da TLE para fluidos secos operando em ciclo supercrítico está ilustrada na Tab. 4.30. Mediante a análise da regressão desenvolvida, a expressão que explica o comportamento do TLE em função das variáveis de entrada é apresentada da seguinte forma:

$$TLE = -0,493 + 0,2416T_{supc} - 0,0021p_{reg} \tag{4.18}$$

Tabela 4.30 – Estatística de regressão linear múltipla para o TLE de fluidos secos (ciclo supercrítico).

DADOS DA REGRESSÃO [(%)]	
R-quadrado ajustado	17,79
Desvio estimado	22,6374
COEFICIENTES	
Interseção	-0,4927
T_{supc}	0,2416
p_{reg}	-0,00204

4.5.4 Discussões acerca da análise estatística de regressão

A análise estatística de regressão apresentou, de maneira geral, resultados consistentes no que se refere à influência dos parâmetros de entrada na ETC. Desta forma, pode-se afirmar, através dos valores obtidos de R-quadrado ajustado, que os parâmetros estudados explicam, de forma conjunta e majoritariamente, o comportamento da ETC.

Já as regressões desenvolvidas para o TLE indicam uma baixa representatividade dos parâmetros de entrada neste parâmetro de desempenho. Observa-se, para este caso, valores de R-quadrado ajustado muito baixos, em especial na categoria fluidos secos, onde temos resultados iguais a 5,84% (ciclo subcrítico), 15,07% (ciclo subcrítico com superaquecimento) e 17,80% (ciclo supercrítico).

Desta forma, optou-se pela delimitação adicional da pesquisa a partir deste ponto, considerando a ETC como parâmetro único para a seleção do fluido de trabalho, em virtude dos resultados coletados e representados até então.

4.6 Análise dos modelos de regressão desenvolvidos

Os modelos matemáticos desenvolvidos a partir de regressões lineares têm como objetivo principal selecionar fluidos de trabalho a partir do cálculo de ETC, desta forma, é possível substituir os valores dos parâmetros de operação para diversos fluidos de trabalho e obter a comparação entre o desempenho térmico dos mesmos.

Para a validação destes modelos, foi realizada uma simulação afim de comparar os valores de ETC obtidos pelos modelos de regressão com os valores obtidos através da análise termodinâmica. O termo desvio foi utilizado para especificar a diferença entre os valores obtidos por cada método (valor de ETC obtido pelo modelo convencional subtraído o valor de ETC obtido pelo modelo desenvolvido).

Foram calculados o desvio médio em cada fluido, o desvio médio por categoria (molhados, isentrópicos e secos) e o desvio geral por ciclo (subcrítico, subcrítico com superaquecimento e supercrítico). Uma posterior comparação com o desvio estimado pela análise estatística (denominado desvio estimado) durante o desenvolvimento da regressão linear, também foi realizada para análise da confiabilidade do método.

4.6.1 Análise dos modelos de regressão desenvolvidos para o ciclo subcrítico

Para o ciclo subcrítico, os resultados de ETC obtidos pelo método termodinâmico estão descritos na Tab. 4.31, enquanto os valores de ETC obtidos pelo modelo da regressão linear estão detalhados na Tab. 4.32. O desvio entre os valores obtidos por cada método está representado na Tab. 4.33.

O referido ciclo apresentou um desvio médio geral de 0,62 %, ou seja, uma variação média igual a este valor, considerando todos os tipos de fluidos sujeitos a este ciclo, operando mediante os diversos valores sugeridos para as principais variáveis de entrada do sistema. Os desvios calculados para as categorias molhados, isentrópicos e secos foram, 0,41 %, 0,68 % e 0,83 %, respectivamente, indicando variações médias inferiores aos desvios estimados fornecidos pela análise estatística durante o desenvolvimento das regressões lineares (0,68 %, 0,93 % e 0,95 %, na mesma ordem de categoria, com utilização da mesma quantidade de algarismos significativos). Os fluidos com maior valor de desvio calculado foram o R245fa, com 0,97 % e o R12 com -0,97 %. O sinal negativo indicado no desvio deste último significa que o valores de ETC obtidos pelo modelo desenvolvido (regressão linear) são, em média, superiores aos valores obtidos pelo modelo termodinâmico. Os fluidos com menor desvio foram o R134a, com 0,00 % e R22, com 0,08 %.

Considerando os dados fornecidos, e observando que a média dos desvios calculados (0,62 %) foi inferior à média dos desvios estimados fornecidos pelo desenvolvimento das regressões (0,85 %), pode-se afirmar que os modelos desenvolvidos para o ciclo subcrítico apresentam razoável confiabilidade matemática.

Tabela 4.31 – ETC [%] para o ciclo subcrítico pelo método termodinâmico.

Parâmetro		FLUIDOS MOLHADOS						
$P_{r,evap}$	$P_{r,reg}$	Amônia	Etanol	Metanol	R22	R32	R134a	R152a
0,85	0,5	18,99	28,46	29,57	14,08	11,5	14,5	16,26
0,9	0,5	19,17	28,44	29,67	14,3	11,73	14,69	16,44
0,95	0,5	19,18	28,28	29,72	14,37	11,83	14,74	16,48
0,85	0,6	18,59	27,93	29,11	13,81	11,33	14,16	15,87
0,9	0,6	18,79	27,93	29,23	14,05	11,59	14,38	16,08

0,95	0,6	18,81	27,78	29,29	14,14	11,71	14,45	16,14
0,85	0,7	18,15	27,44	28,65	13,44	11,05	13,74	15,43
0,9	0,7	18,37	27,47	28,78	13,71	11,34	13,99	15,67
0,95	0,7	18,4	27,34	28,87	13,81	11,46	14,08	15,75

Parâmetro		FLUIDOS ISENTRÓPICOS				
$P_{r,evap}$	$P_{r,reg}$	R11	R12	R123	R141b	R142b
0,85	0,5	22,71	14,7	23,26	24,04	18,9
0,9	0,5	23,59	14,51	23,48	23,91	19,1
0,95	0,5	23,07	13,89	23,57	23,38	19,15
0,85	0,6	21,99	14,31	22,37	23,43	18,46
0,9	0,6	23,02	14,12	22,62	23,29	18,68
0,95	0,6	22,45	13,42	22,71	22,71	18,76
0,85	0,7	21,24	13,87	22,1	22,83	17,94
0,9	0,7	22,47	13,66	22,4	22,7	18,2
0,95	0,7	21,84	12,89	22,54	22,06	18,31

Parâmetro		FLUIDOS SECOS					
$P_{r,evap}$	$P_{r,reg}$	Isobutano	Isopentano	R113	R114	R227ea	R245fa
0,85	0,5	18,25	22,32	23,78	18,07	14,07	20,15
0,9	0,5	18,47	22,55	23,74	18	14,24	20,34
0,95	0,5	18,59	22,7	23,43	17,59	14,34	20,42
0,85	0,6	17,81	21,69	23,17	17,54	13,7	19,66
0,9	0,6	18,06	21,95	23,12	17,46	13,91	19,88
0,95	0,6	18,2	22,12	22,77	16,99	14,02	19,99
0,85	0,7	17,28	21,21	22,58	16,99	13,22	19,09
0,9	0,7	18,57	21,51	22,54	16,91	13,46	19,36

Tabela 4.32 – ETC [%] do ciclo subcrítico pelo método da regressão linear múltipla.

Parâmetro		FLUIDOS MOLHADOS						
$P_{r,evap}$	$P_{r,reg}$	Amônia	Etanol	Metanol	R22	R32	R134a	R152a
0,85	0,5	17,71	28,12	28,26	13,49	11,83	13,94	15,17

0,9	0,5	18,04	28,46	28,59	13,79	12,11	14,23	15,48
0,95	0,5	18,35	28,78	28,91	14,08	12,37	14,50	15,77
0,85	0,6	17,94	28,25	28,42	13,59	11,95	14,02	15,26
0,9	0,6	18,26	28,58	28,75	13,89	12,22	14,31	15,57
0,95	0,6	18,58	28,90	29,08	14,18	12,48	14,58	15,86
0,85	0,7	18,17	28,37	28,58	13,69	12,06	14,11	15,35
0,9	0,7	18,49	28,70	28,91	13,99	12,34	14,39	15,66
0,95	0,7	18,80	29,02	29,24	14,28	12,60	14,66	15,95

Parâmetro		FLUIDOS ISENTRÓPICOS				
$P_{r,evap}$	$P_{r,reg}$	R11	R12	R123	R141b	R142b
0,85	0,5	23,14	15,33	22,54	24,00	17,86
0,9	0,5	23,52	15,64	22,89	24,36	18,17
0,95	0,5	23,88	15,95	23,21	24,70	18,45
0,85	0,6	22,35	14,59	21,88	23,23	17,13
0,9	0,6	22,72	14,90	22,23	23,60	17,44
0,95	0,6	23,09	15,21	22,55	23,93	17,72
0,85	0,7	21,56	13,85	21,22	22,47	16,40
0,9	0,7	21,93	14,16	21,57	22,83	16,71
0,95	0,7	22,29	14,47	21,89	23,17	16,99

Parâmetro		FLUIDOS SECOS					
$P_{r,evap}$	$P_{r,reg}$	Isobutano	Isopentano	R113	R114	R227ea	R245fa
0,85	0,5	17,03	21,40	23,69	18,10	14,61	18,72
0,9	0,5	17,31	21,71	24,00	18,37	14,84	18,99
0,95	0,5	17,57	22,02	24,31	18,63	15,07	19,24
0,85	0,6	16,89	21,28	23,57	17,98	14,50	18,59
0,9	0,6	17,17	21,59	23,88	18,25	14,73	18,86
0,95	0,6	17,44	21,89	24,18	18,51	14,96	19,10
0,85	0,7	16,76	21,15	23,44	17,86	14,39	18,45
0,9	0,7	17,04	21,47	23,75	18,13	14,62	18,72
0,95	0,7	17,30	21,77	24,05	18,39	14,85	18,96

Tabela 4.33 – Desvio entre os resultados de ETC [%] do ciclo subcrítico obtidos pelo método termodinâmico e método da regressão linear múltipla.

Parâmetro		FLUIDOS MOLHADOS						
$P_{r,evap}$	$P_{r,reg}$	Amônia	Etanol	Metanol	R22	R32	R134a	R152a
0,85	0,5	1,28	0,34	1,31	0,59	-0,33	0,56	1,09
0,9	0,5	1,13	-0,02	1,08	0,51	-0,38	0,46	0,96
0,95	0,5	0,83	-0,50	0,81	0,29	-0,54	0,24	0,71
0,85	0,6	0,65	-0,32	0,69	0,22	-0,62	0,14	0,61
0,9	0,6	0,53	-0,65	0,48	0,16	-0,63	0,07	0,51
0,95	0,6	0,23	-1,12	0,21	-0,04	-0,77	-0,13	0,28
0,85	0,7	-0,02	-0,93	0,07	-0,25	-1,01	-0,37	0,08
0,9	0,7	-0,12	-1,23	-0,13	-0,28	-1,00	-0,40	0,01
0,95	0,7	-0,40	-1,68	-0,37	-0,47	-1,14	-0,58	-0,20
Desvio médio por fluido		0,46	-0,68	0,46	0,08	-0,71	0,00	0,45
Desvio médio da categoria		0,41						

Parâmetro		FLUIDOS ISENTRÓPICOS				
$P_{r,evap}$	$P_{r,reg}$	R11	R12	R123	R141b	R142b
0,85	0,5	-0,43	-0,63	0,72	0,04	1,04
0,9	0,5	0,07	-1,13	0,59	-0,45	0,93
0,95	0,5	-0,81	-2,06	0,36	-1,32	0,70
0,85	0,6	-0,36	-0,28	0,49	0,20	1,33
0,9	0,6	0,30	-0,78	0,39	-0,31	1,24
0,95	0,6	-0,64	-1,79	0,16	-1,22	1,04
0,85	0,7	-0,32	0,02	0,88	0,36	1,54
0,9	0,7	0,54	-0,50	0,83	-0,13	1,49
0,95	0,7	-0,45	-1,58	0,65	-1,11	1,32
Desvio médio por fluido		-0,23	-0,97	0,56	-0,44	1,18
Desvio médio da categoria		0,68				

Parâmetro		FLUIDOS SECOS					
$P_{r,evap}$	$P_{r,reg}$	Isobutano	Isopentano	R113	R114	R227ea	R245fa
0,85	0,5	1,22	0,92	0,09	-0,03	-0,54	1,43
0,9	0,5	1,16	0,84	-0,26	-0,37	-0,60	1,35
0,95	0,5	1,02	0,68	-0,88	-1,04	-0,73	1,18
0,85	0,6	0,92	0,41	-0,40	-0,44	-0,80	1,07
0,9	0,6	0,89	0,36	-0,76	-0,79	-0,82	1,02
0,95	0,6	0,76	0,23	-1,41	-1,52	-0,94	0,89
0,85	0,7	0,52	0,06	-0,86	-0,87	-1,17	0,64
0,9	0,7	1,53	0,04	-1,21	-1,22	-1,16	0,64
0,95	0,7	0,45	-0,02	-1,93	-2,02	-1,26	0,53
Desvio médio por fluido		0,94	0,39	-0,85	-0,92	-0,89	0,97
Desvio médio da categoria		0,83					

4.6.2 Análise dos modelos de regressão desenvolvidos para o ciclo subcrítico com superaquecimento

Para o ciclo subcrítico com superaquecimento, os resultados de ETC obtidos pelo método termodinâmico estão descritos na Tab. 4.34, enquanto os valores de ETC obtidos pelo modelo da regressão linear estão detalhados na Tab. 4.35. O desvio entre os valores obtidos por cada método está representado na Tab. 4.36.

Este ciclo apresentou os melhores resultados em relação ao desvio calculado. O desvio médio geral do ciclo é de apenas 0,56 %. A categoria fluidos molhados apresentou a menor variação média, com apenas 0,38 %. As categorias isentrópicos e secos apresentaram desvios médios próximos, de 0,66 % e 0,69 %, respectivamente. Os desvios estimados estimado pela análise estatística durante o desenvolvimento das regressões foram de 0,96 % (molhados), 1,15 % (isentrópicos) e 1,29 % (secos), resultando em um desvio estimado médio de 1,13 %. Desta forma, assim como no ciclo subcrítico, os desvios médios calculados apresentaram valores inferiores aos valores de desvio estimado estimados no desenvolvimento da regressão. Os destaques negativos, em termos de desvio calculado foram observados

nos fluidos R245fa (1,28 %), R227ea (-1,21 %) e R12 (-1,19 %). Os menores desvios foram obtidos nos fluidos R22 (0,03 %), R141b (0,04 %) e R113 (0,03 %). Com base nos dados obtidos, os modelos desenvolvidos para o ciclo superaquecido também apresentam confiabilidade matemática considerável.

Tabela 4.34 – Resultados de ETC [%] para o ciclo subcrítico com superaquecimento pelo método termodinâmico.

Parâmetro		FLUIDOS MOLHADOS						
$T_{r,\text{sup}}$	$P_{r,reg}$	Amônia	Etanol	Metanol	R22	R32	R134a	R152a
1,1	0,5	20,58	30,70	31,63	15,41	12,71	15,89	17,76
1,2	0,5	21,19	31,45	32,42	15,91	13,11	16,22	18,30
1,3	0,5	21,72	32,10	33,05	16,34	13,49	16,39	18,64
1,1	0,6	20,28	30,26	31,23	15,24	12,63	15,64	17,47
1,2	0,6	20,90	31,01	32,02	15,73	13,04	15,98	18,01
1,3	0,6	21,41	31,67	32,65	16,16	13,42	16,16	18,36
1,1	0,7	19,93	29,83	30,82	14,96	12,44	15,30	17,10
1,2	0,7	20,53	30,58	31,60	15,44	12,85	15,66	17,66
1,3	0,7	21,03	31,25	32,24	15,87	13,22	15,85	18,01

Parâmetro		FLUIDOS ISENTRÓPICOS				
$T_{r,\text{sup}}$	$P_{r,reg}$	R11	R12	R123	R141b	R142b
1,1	0,5	25,13	15,77	24,25	25,20	20,33
1,2	0,5	25,73	16,33	24,22	25,57	20,59
1,3	0,5	26,09	16,67	24,09	25,71	20,69
1,1	0,6	24,62	15,44	23,55	24,65	19,98
1,2	0,6	25,26	16,03	23,59	25,07	20,26
1,3	0,6	25,64	16,38	23,52	25,24	20,37
1,1	0,7	24,10	15,03	23,33	24,10	19,56
1,2	0,7	24,77	15,65	23,36	24,56	19,86
1,3	0,7	25,18	16,02	23,29	24,77	20,00

Parâmetro		FLUIDOS SECOS					
$T_{r,\text{sup}}$	$P_{r,reg}$	Isobutano	Isopentano	R113	R114	R227ea	R245fa

1,1	0,5	19,21	22,52	24,06	18,39	14,84	21,07
1,2	0,5	19,15	22,11	24,03	18,45	14,77	21,04
1,3	0,5	19,01	21,69	23,90	18,41	14,64	20,92
1,1	0,6	18,88	22,06	23,54	17,94	14,58	20,69
1,2	0,6	18,85	21,70	23,57	18,04	14,53	20,68
1,3	0,6	18,72	21,31	23,48	18,03	14,42	20,58
1,1	0,7	18,47	21,70	23,03	17,45	14,21	20,24
1,2	0,7	18,47	21,37	23,11	17,60	14,19	20,27
1,3	0,7	18,37	21,01	23,06	17,63	14,10	20,19

Tabela 4.35 – Resultados de ETC [%] para o ciclo subcrítico com superaquecimento pelo método da regressão linear múltipla.

Parâmetro		FLUIDOS MOLHADOS						
$T_{r,\text{sup}}$	$P_{r,reg}$	Amônia	Etanol	Metanol	R22	R32	R134a	R152a
1,1	0,5	19,00	28,96	29,16	14,66	13,00	15,02	16,28
1,2	0,5	20,17	31,11	31,30	15,52	13,69	15,92	17,29
1,3	0,5	21,34	33,25	33,44	16,38	14,39	16,82	18,29
1,1	0,6	19,28	29,12	29,37	14,78	13,14	15,13	16,40
1,2	0,6	20,45	31,26	31,50	15,65	13,84	16,02	17,40
1,3	0,6	21,63	33,41	33,64	16,50	14,53	16,92	18,41
1,1	0,7	19,56	29,27	29,57	14,91	13,29	15,23	16,51
1,2	0,7	20,74	31,42	31,71	15,77	13,98	16,13	17,52
1,3	0,7	21,91	33,56	33,84	16,63	14,67	17,03	18,52

Parâmetro		FLUIDOS ISENTRÓPICOS				
$T_{r,\text{sup}}$	$P_{r,reg}$	R11	R12	R123	R141b	R142b
1,1	0,5	23,11	16,44	22,10	23,62	18,41
1,2	0,5	24,52	17,23	23,40	25,07	19,38
1,3	0,5	25,92	18,03	24,71	26,52	20,35
1,1	0,6	22,98	16,32	21,99	23,49	18,29
1,2	0,6	24,39	17,11	23,30	24,94	19,26
1,3	0,6	25,80	17,91	24,60	26,40	20,23
1,1	0,7	22,86	16,20	21,88	23,37	18,17

1,2	0,7	24,26	16,99	23,19	24,82	19,14
1,3	0,7	25,67	17,79	24,50	26,27	20,12

Parâmetro		FLUIDOS SECOS					
$T_{r,\sup}$	$P_{r,reg}$	Isobutano	Isopentano	R113	R114	R227ea	R245fa
1,1	0,5	17,13	20,45	22,17	17,79	15,01	18,36
1,2	0,5	17,91	21,54	23,41	18,64	15,61	19,26
1,3	0,5	18,69	22,62	24,65	19,48	16,20	20,15
1,1	0,6	17,22	20,54	22,26	17,88	15,09	18,46
1,2	0,6	18,01	21,62	23,50	18,72	15,69	19,35
1,3	0,6	18,79	22,71	24,74	19,56	16,28	20,25
1,1	0,7	17,32	20,63	22,35	17,96	15,17	18,55
1,2	0,7	18,10	21,71	23,59	18,81	15,77	19,45
1,3	0,7	18,88	22,80	24,83	19,65	16,36	20,34

Tabela 4.36 – Desvio entre os resultados de ETC [(%)] para o ciclo subcrítico com superaquecimento obtidos pelo método termodinâmico e método da regressão linear múltipla.

Parâmetro		FLUIDOS MOLHADOS						
$P_{r,evap}$	$P_{r,reg}$	Amônia	Etanol	Metanol	R22	R32	R134a	R152a
0,85	0,5	1,58	1,74	2,47	0,75	-0,29	0,87	1,48
0,9	0,5	1,02	0,34	1,12	0,39	-0,58	0,30	1,01
0,95	0,5	0,38	-1,15	-0,39	-0,04	-0,90	-0,43	0,35
0,85	0,6	1,00	1,14	1,86	0,46	-0,51	0,51	1,07
0,9	0,6	0,45	-0,25	0,52	0,08	-0,80	-0,04	0,61
0,95	0,6	-0,22	-1,74	-0,99	-0,34	-1,11	-0,76	-0,05
0,85	0,7	0,37	0,56	1,25	0,05	-0,85	0,07	0,59
0,9	0,7	-0,21	-0,84	-0,11	-0,33	-1,13	-0,47	0,14
0,95	0,7	-0,88	-2,31	-1,60	-0,76	-1,45	-1,18	-0,51
Desvio médio por fluido		0,39	-0,28	0,46	0,03	-0,85	-0,13	0,52
Desvio médio da categoria		0,38						

Parâmetro		FLUIDOS ISENTRÓPICOS				
$P_{r,evap}$	$P_{r,reg}$	R11	R12	R123	R141b	R142b
0,85	0,5	2,02	-0,67	2,15	1,58	1,92
0,9	0,5	1,21	-0,90	0,82	0,50	1,21
0,95	0,5	0,17	-1,36	-0,62	-0,81	0,34
0,85	0,6	1,64	-0,88	1,56	1,16	1,69
0,9	0,6	0,87	-1,08	0,29	0,13	1,00
0,95	0,6	-0,16	-1,53	-1,08	-1,16	0,14
0,85	0,7	1,24	-1,17	1,45	0,73	1,39
0,9	0,7	0,51	-1,34	0,17	-0,26	0,72
0,95	0,7	-0,49	-1,77	-1,21	-1,50	-0,12
Desvio médio por fluido		0,78	-1,19	0,39	0,04	0,92
Desvio médio da categoria		0,66				

Parâmetro		FLUIDOS SECOS					
$P_{r,evap}$	$P_{r,reg}$	Isobutano	Isopentano	R113	R114	R227ea	R245fa
0,85	0,5	2,08	2,07	1,89	0,60	-0,17	2,71
0,9	0,5	1,24	0,57	0,62	-0,19	-0,84	1,78
0,95	0,5	0,32	-0,93	-0,75	-1,07	-1,56	0,77
0,85	0,6	1,66	1,52	1,28	0,06	-0,51	2,23
0,9	0,6	0,84	0,08	0,07	-0,68	-1,16	1,33
0,95	0,6	-0,07	-1,40	-1,26	-1,53	-1,86	0,33
0,85	0,7	1,15	1,07	0,68	-0,51	-0,96	1,69
0,9	0,7	0,37	-0,34	-0,48	-1,21	-1,58	0,82
0,95	0,7	-0,51	-1,79	-1,77	-2,02	-2,26	-0,15
Desvio médio por fluido		0,79	0,10	0,03	-0,73	-1,21	1,28
Desvio médio da categoria		0,69					

4.6.3 Análise dos modelos de regressão desenvolvidos para o ciclo supercrítico

Para o ciclo supercrítico, os resultados de ETC obtidos pelo método termodinâmico estão descritos na Tab. 4.37, enquanto os valores de ETC obtidos pelo modelo da regressão linear estão detalhados na Tab. 4.38. O desvio entre os valores obtidos por cada método está representado na Tab. 4.39.

Neste ciclo, foi observado o maior desvio médio geral dentre os ciclos considerados neste estudo, entretanto, ainda com um valor muito pequeno (0,67 %), próximo ao obtido no ciclo subcrítico (0,62 %). A categoria com maior desvio apresentado foi a dos fluidos isentrópicos, com valor igual a 1,04 %, motivada principalmente pelos fluidos R11, com desvio médio de 1,94 % e R141b, com -1,61 %. Este desvio também foi estimado pela análise estatística no desenvolvimento das regressões, entretanto, com valor um pouco superior (1,36 %).

As categorias molhados e secos apresentaram desvios médios relativamente pequenos, quando comparados com a categoria isentrópicos (0,45 % e 0,61 %, respectivamente) e próximos dos resultados médios das mesmas categorias nos demais ciclos (subcrítico e superaquecido). Novamente o desvio médio geral calculado (0,67 %) apresenta valor inferior ao desvio estimado médio estimado durante desenvolvimento das regressões lineares (aproximadamente 1 %). Comparando os desvios calculados para cada categoria de fluido com os desvios estimados nas regressões, temos a confirmação de que os modelos desenvolvidos para este ciclo também apresentam uma confiabilidade matemática considerável.

Tabela 4.37 – Resultados de ETC [%] para o ciclo supercrítico pelo método termodinâmico.

Parâmetro		FLUIDOS MOLHADOS						
$T_{r,\text{supc}}$	$P_{r,reg}$	Amônia	Etanol	Metanol	R22	R32	R134a	R152a
1,25	0,5	21,99	32,74	33,70	16,34	13,37	17,08	19,04
1,3	0,5	22,54	33,18	34,16	16,94	14,01	17,62	19,61
1,35	0,5	22,99	33,56	34,55	17,40	14,47	17,97	20,06
1,25	0,6	21,78	32,42	33,40	16,25	13,34	16,96	18,89
1,3	0,6	22,36	32,86	33,86	16,88	14,01	17,51	19,47
1,35	0,6	22,83	33,24	34,25	17,37	14,50	17,87	19,92
1,25	0,7	21,53	32,10	33,10	16,06	13,19	16,76	18,68

1,3	0,7	22,14	32,54	33,55	16,73	13,91	17,32	19,26
1,35	0,7	22,63	32,93	33,95	17,25	14,42	17,69	19,72

Parâmetro		FLUIDOS ISENTRÓPICOS				
$T_{r,\text{supc}}$	$P_{r,reg}$	R11	R12	R123	R141b	R142b
1,25	0,5	30,00	17,48	25,93	25,90	21,92
1,3	0,5	30,22	18,18	25,95	26,27	22,27
1,35	0,5	30,37	18,66	25,93	26,51	22,49
1,25	0,6	29,02	17,66	25,63	26,09	21,71
1,3	0,6	29,29	18,34	25,67	26,43	22,08
1,35	0,6	29,48	18,82	25,66	26,65	22,31
1,25	0,7	28,09	17,56	25,32	26,20	21,45
1,3	0,7	28,41	18,24	25,37	26,51	21,83
1,35	0,7	28,64	18,72	25,36	26,71	22,07

Parâmetro		FLUIDOS SECOS					
$T_{r,\text{supc}}$	$P_{r,reg}$	Isobutano	Isopentano	R113	R114	R227ea	R245fa
1,1	0,5	20,79	23,66	26,76	20,98	16,18	22,62
1,2	0,5	20,90	23,48	26,68	21,05	16,31	22,67
1,3	0,5	20,92	23,28	26,57	21,05	16,35	22,67
1,1	0,6	20,60	23,42	26,20	20,61	16,04	22,37
1,2	0,6	20,72	23,24	26,15	20,70	16,18	22,44
1,3	0,6	20,76	23,05	26,06	20,73	16,24	22,45
1,1	0,7	20,34	23,14	25,66	20,21	15,82	22,10
1,2	0,7	20,48	22,98	25,64	20,32	15,99	22,17
1,3	0,7	20,53	22,81	25,58	20,36	16,06	22,19

Tabela 4.38 – Resultados de ETC [%] para o ciclo supercrítico pelo método da regressão linear múltipla.

Parâmetro		FLUIDOS MOLHADOS						
$T_{r,\text{supc}}$	$P_{r,reg}$	Amônia	Etanol	Metanol	R22	R32	R134a	R152a
1,25	0,5	20,99	32,17	32,35	16,31	14,44	16,73	18,11
1,3	0,5	21,57	33,22	33,39	16,72	14,77	17,16	18,60

1,35	0,5	22,14	34,26	34,44	17,14	15,11	17,60	19,09
1,25	0,6	21,26	32,31	32,54	16,43	14,58	16,82	18,22
1,3	0,6	21,84	33,37	33,59	16,84	14,91	17,26	18,71
1,35	0,6	22,41	34,41	34,63	17,26	15,25	17,70	19,20
1,25	0,7	21,54	32,46	32,74	16,55	14,72	16,92	18,33
1,3	0,7	22,11	33,51	33,78	16,96	15,05	17,36	18,82
1,35	0,7	22,68	34,56	34,83	17,38	15,39	17,80	19,31

Parâmetro		FLUIDOS ISENTRÓPICOS				
$T_{r,\text{supc}}$	$P_{r,reg}$	R11	R12	R123	R141b	R142b
1,25	0,5	26,65	18,46	25,33	27,26	20,86
1,3	0,5	27,40	18,88	26,03	28,03	21,38
1,35	0,5	28,16	19,31	26,74	28,81	21,91
1,25	0,6	26,59	18,40	25,28	27,20	20,80
1,3	0,6	27,34	18,83	25,98	27,98	21,32
1,35	0,6	28,10	19,25	26,69	28,76	21,85
1,25	0,7	26,53	18,34	25,23	27,14	20,75
1,3	0,7	27,28	18,77	25,93	27,92	21,27
1,35	0,7	28,04	19,20	26,64	28,70	21,79

Parâmetro		FLUIDOS SECOS					
$T_{r,\text{supc}}$	$P_{r,reg}$	Isobutano	Isopentano	R113	R114	R227ea	R245fa
1,1	0,5	19,32	23,32	25,39	20,12	16,78	20,81
1,2	0,5	19,74	23,89	26,05	20,57	17,10	21,28
1,3	0,5	20,15	24,47	26,71	21,01	17,42	21,76
1,1	0,6	19,43	23,42	25,49	20,22	16,87	20,92
1,2	0,6	19,85	23,99	26,15	20,66	17,19	21,39
1,3	0,6	20,26	24,57	26,81	21,11	17,51	21,87
1,1	0,7	19,54	23,52	25,60	20,32	16,96	21,03
1,2	0,7	19,96	24,10	26,25	20,76	17,28	21,50
1,3	0,7	20,37	24,67	26,92	21,21	17,60	21,97

Tabela 4.39 – Desvio entre os resultados de ETC [%] para o ciclo supercrítico obtidos pelo método termodinâmico e método da regressão linear múltipla.

Parâmetro		FLUIDOS MOLHADOS						
$P_{r,evap}$	$P_{r,reg}$	Amônia	Etanol	Metanol	R22	R32	R134a	R152a
0,85	0,5	1,00	0,57	1,35	0,03	-1,07	0,35	0,93
0,9	0,5	0,97	-0,04	0,77	0,22	-0,76	0,46	1,01
0,95	0,5	0,85	-0,70	0,11	0,26	-0,64	0,37	0,97
0,85	0,6	0,52	0,11	0,86	-0,18	-1,24	0,14	0,67
0,9	0,6	0,52	-0,51	0,27	0,04	-0,90	0,25	0,76
0,95	0,6	0,42	-1,17	-0,38	0,11	-0,75	0,17	0,72
0,85	0,7	-0,01	-0,36	0,36	-0,49	-1,53	-0,16	0,35
0,9	0,7	0,03	-0,97	-0,23	-0,23	-1,14	-0,04	0,44
0,95	0,7	-0,05	-1,63	-0,88	-0,13	-0,97	-0,11	0,41
Desvio médio por fluido		0,47	-0,52	0,25	-0,04	-1,00	0,16	0,47
Desvio médio da categoria		0,45						

Parâmetro		FLUIDOS ISENTRÓPICOS				
$P_{r,evap}$	$P_{r,reg}$	R11	R12	R123	R141b	R142b
0,85	0,5	3,35	-0,98	0,60	-1,36	1,06
0,9	0,5	2,82	-0,70	-0,08	-1,76	0,89
0,95	0,5	2,21	-0,65	-0,81	-2,30	0,58
0,85	0,6	2,43	-0,74	0,35	-1,11	0,91
0,9	0,6	1,95	-0,49	-0,31	-1,55	0,76
0,95	0,6	1,38	-0,43	-1,03	-2,11	0,46
0,85	0,7	1,56	-0,78	0,09	-0,94	0,70
0,9	0,7	1,13	-0,53	-0,56	-1,41	0,56
0,95	0,7	0,60	-0,48	-1,28	-1,99	0,28
Desvio médio por fluido		1,94	-0,64	-0,34	-1,61	0,69
Desvio médio da categoria		1,04				

Parâmetro		FLUIDOS SECOS					
$P_{r,evap}$	$P_{r,reg}$	Isobutano	Isopentano	R113	R114	R227ea	R245fa
0,85	0,5	1,47	0,34	1,37	0,86	-0,60	1,81
0,9	0,5	1,16	-0,41	0,63	0,48	-0,79	1,39
0,95	0,5	0,77	-1,19	-0,14	0,04	-1,07	0,91
0,85	0,6	1,17	0,00	0,71	0,39	-0,83	1,45
0,9	0,6	0,87	-0,75	0,00	0,04	-1,01	1,05
0,95	0,6	0,50	-1,52	-0,75	-0,38	-1,27	0,58
0,85	0,7	0,80	-0,38	0,06	-0,11	-1,14	1,07
0,9	0,7	0,52	-1,12	-0,61	-0,44	-1,29	0,67
0,95	0,7	0,16	-1,86	-1,34	-0,85	-1,54	0,22
Desvio médio por fluido		0,82	-0,77	-0,01	0,00	-1,06	1,02
Desvio médio da categoria		0,61					

4.7 Seleção de fluidos pelo modelo de regressão linear

A seleção de fluidos através do modelo matemático desenvolvido foi simulada por dois métodos distintos: através da ETC média e através da ETC máxima. Ambos os métodos foram aplicados para a simulação da seleção de fluidos em todos os ciclos contemplados neste estudo (subcrítico, subcrítico com superaquecimento e supercrítico). Para o método da ETC média, foram esboçados os resultados dentro de cada categoria de fluidos e um resultado global (independente da categoria do fluido).

A seleção de fluidos será restrita à ETC, tendo em vista os resultados inconsistentes apresentados para o TLE nas categorias isentrópicos e secos. Para a inclusão do TLE no método de seleção de fluidos, uma nova pesquisa deverá ser desenvolvida, através um estudo específico sobre quais parâmetros de entrada dos ciclos produzem maior influência sobre o TLE.

4.7.1 Ciclo subcrítico

4.7.1.1 Seleção pela eficiência térmica média

Este método utilizou como base para o cálculo da ETC média o resultado médio das eficiências obtidas para cada fluido, quando sujeitos aos diversos valores estabelecidos para os principais parâmetros de entrada (T_{evap} e p_{reg}). A Tab. 4.40 apresenta a seleção de fluidos, para cada categoria, no ciclo subcrítico, em ordem decrescente, de acordo com sua ETC média. O resultado global da seleção de fluidos (independe da categoria), também em ordem decrescente, para o mesmo ciclo, pode ser vista na Tab. 4.41. Ambas as tabelas apresentam uma breve comparação entre os desempenhos térmicos obtidos pelo modelo termodinâmico e resultados obtidos pelo modelo da regressão linear.

Tabela 4.40 – Comparação entre métodos de seleção de fluidos (convencional e regressão) para o ciclo subcrítico com estratificação por categoria de fluido.

FLUIDOS MOLHADOS			
MODELO TERMODINÂNICO CONVENCIONAL		MODELO DA REGRESSÃO LINEAR	
FLUIDO	$ETC_{média}$ (%)	FLUIDO	$ETC_{média}$ (%)
Metanol	29,21	Metanol	28,75
Etanol	27,90	Etanol	28,57
Amônia	18,72	Amônia	18,26
R152a	16,01	R152a	15,56
R134a	14,30	R134a	14,30
R22	13,97	R22	13,89
R32	11,50	R32	12,22

FLUIDOS ISENTRÓPICOS			
MODELO TERMODINÂNICO CONVENCIONAL		MODELO DA REGRESSÃO LINEAR	
FLUIDO	$ETC_{média}$ (%)	FLUIDO	$ETC_{média}$ (%)

R141b	23,15	R141b	23,59
R123	22,78	R11	22,72
R11	22,49	R123	22,22
R142b	18,61	R142b	17,43
R12	13,93	R12	14,90

FLUIDOS SECOS			
MODELO TERMODINÂNICO CONVENCIONAL		MODELO DA REGRESSÃO LINEAR	
FLUIDO	$ETC_{média}$ (%)	FLUIDO	$ETC_{média}$ (%)
R113	23,03	R113	23,87
Isopentano	21,98	Isopentano	21,59
R245fa	19,82	R245fa	18,85
R114	17,32	R114	18,25
Isobutano	18,11	Isobutano	17,17
R227ea	13,84	R227ea	14,73

Tabela 4.41 – Comparação entre métodos de seleção de fluidos (convencional e regressão) para o ciclo subcrítico (geral).

MODELO TERMODINÂNICO CONVENCIONAL			MODELO DA REGRESSÃO LINEAR		
FLUIDO	$ETC_{média}$ (%)	CLASSIFICAÇÃO	FLUIDO	$ETC_{média}$ (%)	CLASSIFICAÇÃO
Metanol	29,21	Molhado	Metanol	28,75	Molhado
Etanol	27,90	Molhado	Etanol	28,57	Molhado
R141B	23,15	Isentrópico	R113	23,87	Seco
R113	23,03	Seco	R141B	23,59	Isentrópico
R123	22,78	Isentrópico	R11	22,72	Isentrópico
R11	22,49	Isentrópico	R123	22,22	Isentrópico
Isopentano	21,98	Seco	Isopentano	21,59	Seco
R245FA	19,82	Seco	R245FA	18,85	Seco
Amônia	18,72	Molhado	Amônia	18,26	Molhado
R142B	18,61	Isentrópico	R114	18,25	Seco
Isobutano	18,11	Seco	R142B	17,43	Isentrópico
R114	17,32	Seco	Isobutano	17,17	Seco
R152A	16,01	Molhado	R152A	15,56	Molhado
R134A	14,30	Molhado	R12	14,90	Isentrópico

R22	13,97	Molhado	R227EA	14,73	Seco
R12	13,93	Isentrópico	R134A	14,3	Molhado
R227EA	13,84	Seco	R22	13,89	Molhado
R32	11,50	Molhado	R32	12,22	Molhado

Os resultados evidenciam a consistência do modelo matemático desenvolvido. Comparando ambos os métodos, é possível perceber basicamente a mesma sequência de fluidos, em ordem decrescente de ETC. Pequenas alterações na sequencia podem ser observadas, todavia, a variação média observada se encontra dentro da média de desvio calculada anteriormente para o ciclo (0,62 %). O maior desvio foi observado no fluido R142b, onde a ETC apresentou variação de 1,18 % entre os métodos convencional e o desenvolvido. O fluido R134a não apresentou variação na ETC em função do método utilizado.

Já o método da seleção de fluidos pela ETC máxima leva em consideração os maiores valores de ETC obtidos por cada fluido para determinados valores dos parâmetros de operação do ciclo, neste caso (ciclo subcrítico), T_{evap} e p_{reg}. Para esboço dos resultados, utilizou-se somente o valor $T_{r,evap} = 0{,}95$, levando em consideração que a grande maioria dos fluidos orgânicos apresenta uma proporcionalidade direta entre ETC e T_{evap}. Para o parâmetro p_{reg} foram utilizados todos os valores considerados neste estudo (0,50, 0,60 e 0,70), tendo em vista que as diversas categorias de fluido (molhados, isentrópicos e secos) apresentam comportamentos particulares para esta variável.

4.7.1.2 Seleção pela ETC máxima

O método da seleção de fluidos pela ETC máxima também apresentou resultados satisfatórios, realizando uma comparação entre o método desenvolvido (regressão) e o método convencional. Novamente, é possível observar uma sequência muito similar na seleção dos melhores fluidos de trabalho, para todas as faixas de operação simuladas. Variações pequenas também se fazem presentes neste método, entretanto, novamente dentro da faixa de desvio calculada. As maiores variações ocorreram para o fluido R12 (2,06 %) e R114 (2,02 %). O fluido Isopentano apresentou variação mínima (0,02 %) em sua ETC, quando obtida por métodos diferentes.

Para a seleção de fluidos pela ETC máxima, também houve estimativa de desvio por faixa de operação (P_{reg}), ou seja, a diferença média da ETC dos fluidos, quando calculadas por ambos os métodos (convencional e regressão). Para $P_{r,reg} = 0{,}50$, o desvio médio foi de 0,82 %, seguido de 0,74 % para $P_{r,reg} = 0{,}60$ e 0,90 para $P_{r,reg} = 0{,}70$. O desvio médio geral para o ciclo, utilizando a seleção por ETC máxima, foi de 0,82 %, apresentando desvio superior ao obtido pelo método de seleção de fluidos pela ETC média. A Tab. 4.42 apresenta a seleção de fluidos para o ciclo subcrítico, em ordem decrescente, de acordo com sua ETC máxima. A referida tabela ainda apresenta uma comparação entre os resultados obtidos pelo modelo termodinâmico e pelo modelo matemático desenvolvido (regressão linear), para o mesmo ciclo.

Tabela 4.42 – Comparação entre métodos de seleção de fluidos (convencional e regressão) para o ciclo subcrítico (por pressão de regeneração).

$P_{r,evap} = 0{,}95$ e $P_{r,reg} = 0{,}50$			
MODELO TERMODINÂNICO CONVENCIONAL		MODELO DA REGRESSÃO LINEAR	
FLUIDO	$ETC_{máxima}$ (%)	FLUIDO	$ETC_{máxima}$ (%)
Metanol	28,91	Metanol	29,72
Etanol	28,78	Etanol	28,28
R141b	24,70	R123	23,57
R113	24,31	R113	23,43
R11	23,88	R141b	23,38
R123	23,21	R11	23,07
Isopentano	22,02	Isopentano	22,70
R245fa	19,24	R245fa	20,42
R114	18,63	Amônia	19,18
R142b	18,45	R142b	19,15
Amônia	18,35	Isobutano	18,59
Isobutano	17,57	R114	17,59
R12	15,95	R152a	16,48
R152a	15,77	R134a	14,74

R227ea	15,07	R22	14,37
R134a	14,50	R227ea	14,34
R22	14,08	R12	13,89
R32	12,37	R32	11,83

$P_{r,evap} = 0,95$ e $P_{r,reg} = 0,60$			
MODELO TERMODINÂNICO CONVENCIONAL		MODELO DA REGRESSÃO LINEAR	
FLUIDO	$ETC_{máxima}$ (%)	FLUIDO	$ETC_{máxima}$ (%)
Metanol	29,08	Metanol	29,29
Etanol	28,90	Etanol	27,78
R113	24,18	R113	22,77
R141b	23,93	R123	22,71
R11	23,09	R141b	22,71
R123	22,55	R11	22,45
Isopentano	21,89	Isopentano	22,12
R245fa	19,10	R245fa	19,99
Amônia	18,58	Amônia	18,81
R114	18,51	R142b	18,76
R142b	17,72	Isobutano	18,20
Isobutano	17,44	R114	16,99
R152a	15,86	R152a	16,14
R12	15,21	R134a	14,45
R227ea	14,96	R22	14,14
R134a	14,58	R227ea	14,02
R22	14,18	R12	13,42
R32	12,48	R32	11,71

$P_{r,evap} = 0,95$ e $P_{r,reg} = 0,70$	
MODELO TERMODINÂNICO CONVENCIONAL	MODELO DA REGRESSÃO LINEAR

FLUIDO	$ETC_{máxima}$ (%)	FLUIDO	$ETC_{máxima}$ (%)
Metanol	29,24	Metanol	28,87
Etanol	29,02	Etanol	27,34
R113	24,05	R123	22,54
R141b	23,17	R113	22,12
R11	22,29	R141b	22,06
R123	21,89	R11	21,84
Isopentano	21,77	Isopentano	21,75
R245fa	18,96	R245fa	19,49
Amônia	18,80	Amônia	18,40
R114	18,39	R142b	18,31
Isobutano	17,30	Isobutano	17,75
R142b	16,99	R114	16,37
R152a	15,95	R152a	15,75
R227ea	14,85	R134a	14,08
R134a	14,66	R22	13,81
R12	14,47	R227ea	13,59
R22	14,28	R12	12,89
R32	12,60	R32	11,46

4.7.2 Ciclo subcrítico com superaquecimento

4.7.2.1 Seleção pela ETC média

Assim como no ciclo subcrítico, o método utiliza como base para o cálculo da ETC média, o resultado médio das eficiências obtidas para cada fluido, quando sujeitos aos diversos valores estabelecidos para os principais parâmetros de entrada (neste caso, T_{sup} e p_{reg}). A Tab. 4.43 apresenta a seleção de fluidos, para cada categoria, no ciclo subcrítico, em ordem decrescente, de acordo com sua ETC média. O resultado global da seleção de fluidos (independe da categoria), também em ordem decrescente, para o mesmo ciclo, pode ser vista na Tab. 4.44. Ambas as tabelas apresentam uma breve comparação entre os desempenhos térmicos obtidos pelo modelo termodinâmico e resultados obtidos pelo modelo da regressão linear.

Tabela 4.43 – Comparação entre métodos de seleção de fluidos (convencional e regressão) para o ciclo subcrítico com superaquecimento com estratificação por categoria de fluido.

FLUIDOS MOLHADOS			
MODELO TERMODINÂMICO CONVENCIONAL		MODELO DA REGRESSÃO LINEAR	
FLUIDO	$ETC_{média}$ (%)	FLUIDO	$ETC_{média}$ (%)
Metanol	31,96	Metanol	31,50
Etanol	30,98	Etanol	31,26
Amônia	20,84	Amônia	20,45
R152a	17,92	R152a	17,40
R134a	15,90	R134a	16,02
R22	15,67	R22	15,64
R32	12,99	R32	13,84

FLUIDOS ISENTRÓPICOS			
MODELO TERMODINÂMICO CONVENCIONAL		MODELO DA REGRESSÃO LINEAR	
FLUIDO	$ETC_{média}$ (%)	FLUIDO	$ETC_{média}$ (%)
R11	25,17	R141b	24,95
R141b	24,99	R11	24,39
R123	23,69	R123	23,30
R142b	20,18	R142b	19,26
R12	15,92	R12	17,11

FLUIDOS SECOS			
MODELO TERMODINÂMICO CONVENCIONAL		MODELO DA REGRESSÃO LINEAR	
FLUIDO	$ETC_{média}$ (%)	FLUIDO	$ETC_{média}$ (%)
R113	23,53	R113	23,50
Isopentano	21,72	Isopentano	21,62
R245fa	20,63	R245fa	19,35
R114	17,99	R114	18,72

Isobutano	18,79	Isobutano	18,01
R227ea	14,48	R227ea	15,69

Tabela 4.44 – Comparação entre métodos de seleção de fluidos (convencional e regressão) para o ciclo subcrítico com superaquecimento (geral).

MODELO TERMODINÂNICO CONVENCIONAL			MODELO DA REGRESSÃO LINEAR		
FLUIDO	$ETC_{média}$ (%)	CLASSIFICAÇÃO	FLUIDO	$ETC_{média}$ (%)	CLASSIFICAÇÃO
Metanol	31,96	Molhado	Metanol	31,50	Molhado
Etanol	30,98	Molhado	Etanol	31,26	Molhado
R11	25,17	Isentrópico	R141B	24,95	Isentrópico
R141B	24,99	Isentrópico	R11	24,39	Isentrópico
R123	23,69	Isentrópico	R113	23,50	Seco
R113	23,53	Seco	R123	23,30	Isentrópico
Isopentano	21,72	Seco	Isopentano	21,62	Seco
Amônia	20,84	Molhado	Amônia	20,45	Molhado
R245FA	20,63	Seco	R245FA	19,35	Seco
R142B	20,18	Isentrópico	R142B	19,26	Isentrópico
Isobutano	18,79	Seco	R114	18,72	Seco
R114	17,99	Seco	Isobutano	18,01	Seco
R152A	17,92	Molhado	R152A	17,40	Molhado
R12	15,92	Isentrópico	R12	17,11	Isentrópico
R134A	15,90	Molhado	R134A	16,02	Molhado
R22	15,67	Molhado	R227EA	15,69	Seco
R227EA	14,48	Seco	R22	15,64	Molhado
R32	12,99	Molhado	R32	13,84	Molhado

O método da seleção de fluidos pela ETC média também apresentou resultados satisfatórios para o ciclo superaquecido. Novamente observa-se uma sequência muito próxima na ordem dos fluidos, quando comparamos os valores de ETC obtidos pelo método convencional com os valores obtidos pelo método desenvolvido. O fluido com maior desvio apresentado foi o R245fa, com valor igual a 1,28 %. Já o R22 apresentou

a menor variação, com valor de 0,03 %. As variações observadas neste ciclo, utilizando o método da seleção de fluidos pela ETC média, apresentam coerência com o desvio médio geral calculado para o mesmo (0,56 %).

4.7.2.2 Seleção pela ETC máxima

Novamente, o método da seleção de fluidos pela ETC máxima leva em consideração os maiores valores de ETC obtidos por cada fluido para determinados valores dos parâmetros de operação do ciclo, neste caso (ciclo superaquecido) T_{sup} e p_{reg}. Para esboço dos resultados, utilizou-se somente o valor $T_{r,sup} = 1{,}30$, levando em consideração que a grande maioria dos fluidos orgânicos apresenta uma proporcionalidade direta entre ETC e T_{sup}. Para a regeneração foram utilizados todos os valores de $P_{r,reg}$ considerados neste estudo (0,50, 0,60 e 0,70), pois assim como no ciclo subcrítico, as diversas categorias de fluido (molhados, isentrópicos e secos) apresentam comportamentos particulares para esta variável. A Tab. 4.45 apresenta a seleção de fluidos para o ciclo subcrítico, em ordem decrescente, de acordo com sua ETC máxima. A referida tabela ainda apresenta uma comparação entre os resultados obtidos pelo modelo termodinâmico e pelo modelo matemático desenvolvido (regressão linear), para o mesmo ciclo.

Tabela 4.45 – Comparação entre métodos de seleção de fluidos (convencional e regressão) para o ciclo subcrítico com superaquecimento (por pressão de regeneração).

$T_{r,\sup} = 1{,}3$ e $P_{r,reg} = 0{,}50$			
MODELO TERMODINÂNICO CONVENCIONAL		MODELO DA REGRESSÃO LINEAR	
FLUIDO	$ETC_{máxima}$ (%)	FLUIDO	$ETC_{máxima}$ (%)
Metanol	33,44	Metanol	33,05
Etanol	33,25	Etanol	32,10
R141b	26,52	R11	26,09
R11	25,92	R141b	25,71
R123	24,71	R123	24,09

R113	24,65	R113	23,90
Isopentano	22,62	Amônia	21,72
Amônia	21,34	Isopentano	21,69
R142b	20,35	R245fa	20,92
R245fa	20,15	R142b	20,69
R114	19,48	Isobutano	19,01
Isobutano	18,69	R152a	18,64
R152a	18,29	R114	18,41
R12	18,03	R12	16,67
R134a	16,82	R134a	16,39
R22	16,38	R22	16,34
R227ea	16,20	R227ea	14,64
R32	14,39	R32	13,49

$T_{r,\text{sup}} = 1{,}3$ e $P_{r,reg} = 0{,}60$			
MODELO TERMODINÂNICO CONVENCIONAL		MODELO DA REGRESSÃO LINEAR	
FLUIDO	$ETC_{máxima}$ (%)	FLUIDO	$ETC_{máxima}$ (%)
Metanol	33,64	Metanol	32,65
Etanol	33,41	Etanol	31,67
R141b	26,40	R11	25,64
R11	25,80	R141b	25,24
R113	24,74	R123	23,52
R123	24,60	R113	23,48
Isopentano	22,71	Amônia	21,41
Amônia	21,63	Isopentano	21,31
R245fa	20,25	R245fa	20,58
R142b	20,23	R142b	20,37
R114	19,56	Isobutano	18,72
Isobutano	18,79	R152a	18,36
R152a	18,41	R114	18,03
R12	17,91	R12	16,38

R134a	16,92	R22	16,16
R22	16,50	R134a	16,16
R227ea	16,28	R227ea	14,42
R32	14,53	R32	13,42

$T_{r,\text{sup}} = 1{,}3$ e $P_{r,reg} = 0{,}70$			
MODELO TERMODINÂNICO CONVENCIONAL		MODELO DA REGRESSÃO LINEAR	
FLUIDO	$ETC_{máxima}$ (%)	FLUIDO	$ETC_{máxima}$ (%)
Metanol	33,84	Metanol	32,24
Etanol	33,56	Etanol	31,25
R141b	26,27	R11	25,18
R11	25,67	R141b	24,77
R113	24,83	R123	23,29
R123	24,50	R113	23,06
Isopentano	22,80	Amônia	21,03
Amônia	21,91	Isopentano	21,01
R245fa	20,34	R245fa	20,19
R142b	20,12	R142b	20,00
R114	19,65	Isobutano	18,37
Isobutano	18,88	R152a	18,01
R152a	18,52	R114	17,63
R12	17,79	R12	16,02
R134a	17,03	R22	15,87
R22	16,63	R134a	15,85
R227ea	16,36	R227ea	14,10
R32	14,67	R32	13,22

O método da seleção de fluidos pela ETC máxima também apresentou resultados satisfatórios para o ciclo superaquecido. Assim como no ciclo subcrítico, é possível observar uma sequência muito similar na seleção dos fluidos de trabalho,

para todas as faixas de operação consideradas. A maior variação ocorreu no fluido etanol (2,31 %). O fluido R22 apresentou a menor variação (0,04 %) em sua ETC.

A estimativa de desvio para $P_{r,reg} = 0{,}50$ foi de 0,69 %, seguido de 0,87 % para $P_{r,reg} = 0{,}60$ e 1,24 % para $P_{r,reg} = 0{,}70$. O desvio médio geral para o ciclo, utilizando a seleção por ETC máxima, foi de 0,93 %, apresentando desvio superior ao obtido pelo método de seleção de fluidos pela ETC média e desvio médio superior ao ciclo subcrítico, utilizando o mesmo método.

4.7.3 Ciclo supercrítico

4.7.3.1 Seleção pela ETC média

Este método apresenta a mesma lógica adotada nos demais ciclos, entretanto, os parâmetros de entrada considerados para o mesmo são T_{supc} e p_{reg}, em virtude da natureza do ciclo. A Tab. 4.46 apresenta a seleção de fluidos, para cada categoria, no ciclo subcrítico, em ordem decrescente, de acordo com sua ETC média. O resultado global da seleção de fluidos (independe da categoria), também em ordem decrescente, para o mesmo ciclo, pode ser vista na Tab. 4.47. Ambas as tabelas apresentam uma breve comparação entre os desempenhos térmicos obtidos pelo modelo termodinâmico e resultados obtidos pelo modelo da regressão linear.

Tabela 4.46 – Comparação entre métodos de seleção de fluidos (convencional e regressão) para o ciclo supercrítico com estratificação por categoria de fluido.

FLUIDOS MOLHADOS			
MODELO TERMODINÂNICO CONVENCIONAL		MODELO DA REGRESSÃO LINEAR	
FLUIDO	$ETC_{média}$ (%)	FLUIDO	$ETC_{média}$ (%)
Metanol	33,84	Metanol	33,59
Etanol	32,84	Etanol	33,36
Amônia	22,31	Amônia	21,84
R152a	19,41	R152a	18,71
R134a	17,42	R134a	17,26
R22	16,80	R22	16,84
R32	13,91	R32	14,91

FLUIDOS ISENTRÓPICOS			
MODELO TERMODINÂMICO CONVENCIONAL		MODELO DA REGRESSÃO LINEAR	
FLUIDO	$ETC_{média}$ (%)	FLUIDO	$ETC_{média}$ (%)
R11	29,28	R141b	27,98
R141b	26,36	R11	27,34
R123	25,65	R123	25,98
R142b	22,01	R142b	21,32
R12	18,18	R12	18,83

FLUIDOS SECOS			
MODELO TERMODINÂMICO CONVENCIONAL		MODELO DA REGRESSÃO LINEAR	
R113	26,14	R113	26,15
Isopentano	23,23	Isopentano	24,00
R245fa	22,41	R245fa	21,39
R114	20,67	R114	20,67
Isobutano	20,67	Isobutano	19,85
R227ea	16,13	R227ea	17,19
Isopentano	23,23	Isopentano	24,00

Tabela 4.47 – Comparação entre métodos de seleção de fluidos (convencional e regressão) para o ciclo subcrítico com superaquecimento (geral).

MODELO TERMODINÂMICO CONVENCIONAL			MODELO DA REGRESSÃO LINEAR		
FLUIDO	$ETC_{média}$ (%)	CLASSIFICAÇÃO	FLUIDO	$ETC_{média}$ (%)	CLASSIFICAÇÃO
Metanol	33,84	Molhado	Metanol	33,59	Molhado
Etanol	32,84	Molhado	Etanol	33,36	Molhado
R11	29,28	Isentrópico	R141B	27,98	Isentrópico
R141b	26,36	Isentrópico	R11	27,34	Isentrópico
R113	26,14	Seco	R113	26,15	Seco

R123	25,65	Isentrópico	R123	25,98	Isentrópico
Isopentano	23,23	Seco	Isopentano	24	Seco
R245FA	22,41	Seco	Amônia	21,84	Molhado
Amônia	22,31	Molhado	R245FA	21,39	Seco
R142B	22,01	Isentrópico	R142B	21,32	Isentrópico
R114	20,67	Seco	R114	20,67	Seco
Isobutano	20,67	Seco	Isobutano	19,85	Seco
R152A	19,41	Molhado	R12	18,83	Isentrópico
R12	18,18	Isentrópico	R152A	18,71	Molhado
R134A	17,42	Molhado	R134A	17,26	Molhado
R22	16,8	Molhado	R227EA	17,19	Seco
R227EA	16,13	Seco	R22	16,84	Molhado
R32	13,91	Molhado	R32	14,91	Molhado

Assim como nos ciclos subcrítico e superaquecido, os resultados demonstram a assertividade dos modelos matemáticos desenvolvidos. Ao analisar os resultados, é possível observar sequências similares de fluidos. Pequenas alterações na sequência são observadas, entretanto, a variação média observada se encontra dentro da média de desvio estimada para o ciclo (0,67 %). O maior desvio foi observado no fluido R11, onde a ETC apresentou variação de 1,94 % entre os métodos convencional e de regressão. O fluido R114 não apresentou variação na ETC, quando comparados os métodos convencional e desenvolvido.

4.7.3.2 Seleção pela ETC máxima

Para o ciclo supercrítico, o método da seleção de fluidos pela ETC máxima leva em consideração os maiores valores de ETC obtidos por cada fluido para determinados valores dos parâmetros de operação do ciclo. Para este caso, a as variáveis consideradas foram T_{supc} e p_{reg}. Para esboço dos resultados, utilizou-se somente $T_{r,supc} = 1{,}35$, levando em consideração que a grande maioria dos fluidos orgânicos apresenta uma proporcionalidade direta entre ETC e este parâmetro. Para

p_{reg} foram utilizados todos os valores considerados neste estudo (0,50, 0,60 e 0,70), pois assim como nos demais ciclos, as diversas categorias de fluido (molhados, isentrópicos e secos) apresentam comportamentos particulares para esta variável. A Tab. 4.48 apresenta a seleção de fluidos para o ciclo subcrítico, em ordem decrescente, de acordo com sua ETC máxima. A referida tabela ainda apresenta uma comparação entre os resultados obtidos pelo modelo termodinâmico e pelo modelo matemático desenvolvido (regressão linear), para o mesmo ciclo.

Tabela 4.48 – Comparação entre métodos de seleção de fluidos (convencional e regressão) para o ciclo supercrítico (por pressão de regeneração).

$T_{r,supc} = 1{,}35$ e $P_{r,reg} = 0{,}50$			
MODELO TERMODINÂNICO CONVENCIONAL		MODELO DA REGRESSÃO LINEAR	
FLUIDO	$ETC_{máxima}$ (%)	FLUIDO	$ETC_{máxima}$ (%)
Metanol	34,44	Metanol	34,55
Etanol	34,26	Etanol	33,56
R141b	28,81	R11	30,37
R11	28,16	R113	26,57
R123	26,74	R141b	26,51
R113	26,71	R123	25,93
Isopentano	24,47	Isopentano	23,28
Amônia	22,14	Amônia	22,99
R142b	21,91	R245fa	22,67
R245fa	21,76	R142b	22,49
R114	21,01	R114	21,05
Isobutano	20,15	Isobutano	20,92
R12	19,31	R152a	20,06
R152a	19,09	R12	18,66
R134a	17,60	R134a	17,97
R227ea	17,42	R22	17,4
R22	17,14	R227ea	16,35
R32	15,11	R32	14,47

$T_{r,supc} = 1{,}35$ e $P_{r,reg} = 0{,}60$			
MODELO TERMODINÂNICO CONVENCIONAL		MODELO DA REGRESSÃO LINEAR	
FLUIDO	$ETC_{máxima}$ (%)	FLUIDO	$ETC_{máxima}$ (%)
Metanol	34,63	Metanol	34,25
Etanol	34,41	Etanol	33,24
R141b	28,76	R11	29,48
R11	28,10	R141b	26,65
R113	26,81	R113	26,06
R123	26,69	R123	25,66
Isopentano	24,57	Isopentano	23,05
Amônia	22,41	Amônia	22,83
R245fa	21,87	R245fa	22,45
R142b	21,85	R142b	22,31
R114	21,11	Isobutano	20,76
Isobutano	20,26	R114	20,73
R12	19,25	R152a	19,92
R152a	19,20	R12	18,82
R134a	17,70	R134a	17,87
R227ea	17,51	R22	17,37
R22	17,26	R227ea	16,24
R32	15,25	R32	14,50

$T_{r,supc} = 1{,}35$ e $P_{r,reg} = 0{,}70$			
MODELO TERMODINÂNICO CONVENCIONAL		MODELO DA REGRESSÃO LINEAR	
FLUIDO	$ETC_{máxima}$ (%)	FLUIDO	$ETC_{máxima}$ (%)
Metanol	34,83	Metanol	33,95
Etanol	34,56	Etanol	32,93
R141b	28,70	R11	28,64
R11	28,04	R141b	26,71

R113	26,92	R113	25,58
R123	26,64	R123	25,36
Isopentano	24,67	Isopentano	22,81
Amônia	22,68	Amônia	22,63
R245fa	21,97	R245fa	22,19
R142b	21,79	R142b	22,07
R114	21,21	Isobutano	20,53
Isobutano	20,37	R114	20,36
R152a	19,31	R152a	19,72
R12	19,20	R12	18,72
R134a	17,80	R134a	17,69
R227ea	17,60	R22	17,25
R22	17,38	R227ea	16,06
R32	15,39	R32	14,42

A seleção de fluidos pela ETC máxima também apresentou resultados satisfatórios no ciclo supercrítico. As variações entre os valores de ETC máxima obtidas pelo método convencional e os valores de ETC máximas resultantes do modelo desenvolvido apresentam valores relativamente pequenos. Para $P_{r,reg} = 0{,}50$, o desvio médio apresentado foi de 0,81 %. Para $P_{r,reg} = 0{,}60$, o desvio cai para 0,79 %, seguido de 0,82 % para $P_{r,reg} = 0{,}70$. O destaque negativo em termos de variação fica com o fluido R141b (2,3 %), enquanto o destaque positivo novamente vai para o R114 (0,04 %). O desvio médio geral utilizando a seleção de fluidos pela ETC máxima, neste ciclo, é de 0,81 %. Novamente, este método demonstra desvio superior ao método da seleção de fluidos pela ETC média (0,67 %).

4.8 Resumo dos resultados

Por fim, uma visão geral dos resultados de ETC máxima por fluido e valores de operação correspondentes pode ser vista nas tabelas 4.49 (ciclo subcrítico), 4.50 (ciclo subcrítico com superaquecimento) e 4.51 (ciclo supercrítico).

Com base nestes dados, torna-se possível realizar uma análise, não somente do ponto de vista de desempenho térmico, mas considerando também, os valores de operação, que afetam diretamente a construção, especificações e custos (desenvolvimento e operação) dos equipamentos que compõe o ciclo.

Tabela 4.49 – Eficiência térmica máxima por fluido e correspondentes valores de operação – Ciclo Subcrítico

Fluidos Molhados	p_{evap} (kPa)	p_{reg} (kPa)	$ETC_{máxima}$ (%)
Etanol	5226	3074	28,46
Metanol	7699	4052	29,72
Amônia	10766	5667	19,18
R22	4740	2495	14,37
R32	5495	2892	11,83
R134A	3856	2030	14,74
R152A	3842	2712	16,48

Fluidos Isentrópicos	p_{evap} (kPa)	p_{reg} (kPa)	$ETC_{máxima}$ (%)
R11	3967	2204	23,59
R12	3497	2880	14,7
R123	3485	1834	23,57
R141B	3612	2125	24,04
R142B	3852	2028	19,15

Fluidos Secos	p_{evap} (kPa)	p_{reg} (kPa)	$ETC_{máxima}$ (%)
Isobutano	3458	1820	18,59
Isopentano	3033	1685	22,55
R113	2923	1720	23,78
R114	2960	1645	18,07
R227EA	2849	1500	14,34
R245FA	3468	1826	20,42

Tabela 4.50 – Eficiência térmica máxima por fluido e correspondentes valores de operação – Ciclo Subcrítico com Superaquecimento

Fluidos Molhados	T_{sup}.(°C)	p_{reg}.(kPa)	$ETC_{máxima}$ (%)
ETANOL	313,04	4304	33,56
METANOL	312,26	5673	33,84
AMONIA	171,99	6800	21,63
R22	124,97	3492	16,63
R32	101,54	4049	14,67
R134A	131,3	2841	17,03
R152A	124,63	2712	18,52

Fluidos Isentrópicos	T_{sup}.(°C)	p_{reg}.(kPa)	$ETC_{máxima}$ (%)
R11	257,4	2204	25,92
R12	145,6	2057	18,03
R123	238,81	1834	24,71
R141B	265,46	2125	26,52
R142B	178,33	2028	20,35

Fluidos Secos	T_{sup}.(°C)	p_{reg}.(kPa)	$ETC_{máxima}$ (%)
Isobutano	18,88	2548	175,11
Isopentano	243,36	2359	22,8
R113	278,33	2407	24,83
R114	189,41	1973	19,65
R227EA	133,64	2099	16,36
R245FA	200,2	2556	20,34

Tabela 4.51 – Eficiência térmica máxima por fluido e correspondentes valores de operação – Ciclo Supercrítico

Fluidos Molhados	T_{supc} (°C)	p_{reg}.(kPa)	$ETC_{máxima}$ (%)
ETANOL	325,1	3074	33,56

METANOL	324,27	4052	34,55
AMONIA	178,6	5667	22,99
R22	129,78	2495	17,4
R32	105,45	2892	14,47
R134A	136,35	2030	17,97
R152A	152,96	2260	20,06

Fluidos Isentrópicos	T_{supc} (°C)	$p_{reg.}$ (kPa)	$ETC_{máxima}$ (%)
R11	267,3	2204	30,37
R12	151,2	2468	18,82
R123	238,81	1834	25,95
R141B	275,67	2974	26,71
R142B	185,09	2028	22,49

Fluidos Secos	T_{supc} (°C)	$p_{reg.}$ (kPa)	$ETC_{máxima}$ (%)
Isobutano	181,85	1820	20,92
Isopentano	234	1685	23,66
R113	267,63	1720	26,76
R114	189,41	1645	21,05
R227EA	138,78	1500	16,35
R245FA	200,2	1826	22,67

5. CONCLUSÕES E EXTENSÕES

Inicialmente, é possível afirmar que os parâmetros de entrada dos ciclos abrangidos nesta pesquisa, apresentaram, de forma significativa, elevado nível de influência sobre o desempenho térmico dos fluidos, em termos da ETC. As faixas de operação pré-estabelecidas para as simulações e cálculos de ETC e TLE forneceram uma vasta base de dados que permitiram o entendimento do comportamento dos fluidos de trabalho. A obtenção das demais propriedades termodinâmicas do ciclo foi realizada através da definição dos parâmetros de entrada (temperaturas e pressão do evaporador, pressão de regeneração e temperatura de condensação) e da admissão de hipóteses simplificadoras para os volumes de controle. Após obtenção dos resultados de ETC e TLE, a utilização de isocurvas para representação do comportamento dos fluidos permitiu a compreensão das relações de proporcionalidade e tendências que cada fluido e categoria de fluidos apresentava em função das variáveis de entrada do sistema.

Os modelos matemáticos desenvolvidos a partir de regressões lineares múltiplas apresentaram elevada assertividade para a obtenção dos valores de ETC, considerando a comparação realizada entre os valores obtidos pelo método termodinâmico e os valores obtidos pelo método da regressão. Os desvios (diferenças entre os valores obtidos pelos métodos distintos) individuais (por fluido) e médios (por categoria e geral) foram calculados e os resultados são consideravelmente baixos. Tais desvios foram, em complemento, comparados com os desvios estimados fornecidos pelas análises estatísticas realizadas, e a diferença encontrada foi novamente considerada desprezível, assegurando a viabilidade dos cálculos de ETC pelas expressões de regressão linear obtidas.

Também é possível afirmar que as variáveis selecionadas para o estudo demonstraram representatividade no que se refere ao comportamento da variável ETC, ou seja, as variáveis pressão e temperatura do evaporador e pressão do regenerador explicam, em conjunto, de forma quase integral, o comportamento da ETC para todas as categorias de fluido operando em todos os tipos de ciclo (subcrítico, subcrítico com superaquecimento e supercrítico). Por outro lado, as expressões desenvolvidas para obtenção do TLE não apresentaram resultados significativos, devido ao baixo coeficiente de determinação resultante da análise estatística

desenvolvida, principalmente para fluidos secos e isentrópicos, independente do ciclo. Desta forma, é possível afirmar que, muito embora o método para desenvolvimento da regressão linear múltipla seja aplicável ao TLE em ciclos Rankine orgânicos regenerativos, as variáveis selecionadas para o estudo em questão (temperaturas e pressão do evaporador e pressão do regenerador) não explicam, de forma majoritária, o comportamento do TLE, diferente do observado na ETC.

Dois métodos de seleção de fluidos de trabalho foram desenvolvidos e apresentaram resultados satisfatórios. No primeiro, o parâmetro de desempenho que permitiu a priorização dos fluidos de trabalho foi a ETC máxima, considerando todas as faixas de operação nas quais os fluidos foram avaliados. No segundo, o parâmetro de referência foi a ETC média, considerando todos os valores de ETC obtidos por cada fluido de trabalho, para todas as faixas de operação nas quais os mesmos foram avaliados. A validação destes métodos teve como base uma simples comparação entre a priorização de fluidos obtida com base nas ETCs resultantes do método termodinâmico e a priorização de fluidos obtida com base nas ETCs resultantes do método desenvolvido (expressões de regressão linear). As priorizações apresentaram razoável compatibilidade para todos os níveis avaliados (geral, por tipo de ciclo e categoria de fluido).

Por fim, muito embora o modelo desenvolvido seja aplicável à seleção de fluidos em função da ETC, observa-se a necessidade de continuidade da pesquisa em relação ao TLE, tendo em vista a necessidade de uma análise detalhada para identificação de quais variáveis de entrada promovem maior influência em seu resultado. Outra oportunidade de desenvolvimento remete ao desenvolvimento de um método de seleção de fluidos com base na interação entre os valores de ETC e TLE, ou seja, um meio termo para classificação do desempenho termodinâmico dos fluidos orgânicos operando em um ciclo regenerativo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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, Tradução da 7ª edição americana.

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.

Dai, Y.; Wang, J.; Gao. L. Mar. 2009. “Parametric optimization and comparative study of organic Rankine cycle (ORC) for low-grade waste heat recovery”. *Energy Conversion and Management*, Vol. 50, No. 3, pp. 576-582.

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.

Freeman, J.; Hellgardt, K.; Markrides, C.N. Jan. 2015. “An assessment of solar-powered organic Rankine cycle systems for combined heating and power in UK domestic applications”. *Applied Energy*, Vol. 138, pp. 605-620.

Hung, T.C. Mar. 2001. “Waste heat recovery of organic Rankine cycle using dry fluids”. *Energy Conversion and Management*, Vol. 42, No. 5, pp. 539-553.

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.

Javanshir, A.; Sarunac, N. Jan. 2017. “Thermodynamic analysis of a simple Organic Rankine Cycle”. *Energy*, Vol. 118, pp. 85-96.

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. 2005. *Introdução à Engenharia de Sistemas Térmicos*. LTC, Rio de Janeiro, Tradução da 1ª edição americana.

Moran, M.J. et al. 2018. *Princípios de Termodinâmica para Engenharia*. LTC, Rio de Janeiro, Tradução da 8ª edição americana.

Quoilin, S. et al. Jun. 2013. “Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 22, pp. 168-186.

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.

Roedder, M. et al. Mar. 2016. “Systematic Fluid Selection for Organic Rankine Cycles and Performance Analysis for a Combined High and Low Temperature Cycle”. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 138, No. 3.

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.

Sonntag, C.; Borgnakke, R.E. 2013. *Fundamentos da Termodinâmica*. Blucher, São Paulo, Tradução da 8ª edição americana.

Tartière, T.; Astolfi, M. Sep. 2017. “A World Overview of the Organic Rankine Cycle Market”. *Energy Procedia*, Vol. 129, pp. 2-9.

Wang, D. et al. Feb. 2013. “Efficiency and optimal performance evaluation of organic Rankine cycle for low grade waste heat power generation”. *Energy*, Vol. 50, pp. 343-352.

Wang, E.H. et al. May. 2011. “Study of working fluid selection of organic Rankine cycle (ORC) for engine waste heat recovery”. *Energy*, Vol. 36, No. 5, pp. 3406-3418.

Wei, D. et al. Apr. 2007. “Performance analysis and optimization of organic Rankine cycle (ORC) for waste heat recovery”. *Energy Conversion and Management*, Vol. 48, No. 4, pp. 1113-1119.

Xi, H. et al. Sep. 2013. “Parametric optimization of regenerative organic Rankine cycle (ORC) for low grade waste heat recovery using genetic algorithm”. *Energy*, Vol. 58, No. 1, pp. 473-482.