INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

**ATUAÇÃO DE UM SISTEMA PASSIVO DE REMOÇÃO DE CALOR
DE EMERGÊNCIA DE REATORES AVANÇADOS EM
ESCOAMENTO BIFÁSICO E COM ALTA CONCENTRAÇÃO DE
NÃO-CONDENSÁVEIS**

LUIZ ALBERTO MACEDO

**Tese apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do grau de
Doutor em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear – Reatores**

**Orientador:
Prof. Dr. Benedito Dias Baptista Filho**

SÃO PAULO
2008

Sou eternamente agradecido a Deus, pelas maravilhas realizadas em minha vida e, pelos dons e talentos que me foram por Ele dados, na absoluta certeza de multiplicá-los cada vez mais, com o propósito de revelar a Sua grandeza a todos.

À minha amada e querida esposa Maria Aparecida, pelo amor, carinho, respeito, dedicação, compreensão e de sobremaneira pelo auxílio e apoio em todos os momentos de minha vida.

À minha mãe Nilce e tia Albenair (in memoriam), por terem me ensinado valores como a humildade, a perseverança e o amor, proporcionando-me condições de encontrar nas pequenas adversidades da vida, alegria e motivação, para que nas grandes, ser forte e enfrentá-las sem ressentimentos ou temores.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Benedito Dias Baptista Filho, pela amizade, confiança, orientação e contínuo incentivo no desenvolvimento desse trabalho.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN – CNEN/SP), pelo apoio e incentivo à capacitação científica nacional.

Ao Centro de Engenharia Nuclear (CEN), na pessoa do Prof. Dr. Antonio Teixeira e Silva, pelo incentivo e apoio financeiro.

Ao meu amigo, Walmir Maximo Torres, pelo companheirismo, incentivo e ajuda experimental no trabalho.

À Prof^a. Dr^a. Gaianê Sabundjian, pela valiosa ajuda e incentivo no aprendizado do Código Computacional de Análise de Acidentes e Termo-Hidráulica RELAP5/MOD3.3.

Ao Prof. Dr. Antonio Carlos de Oliveira Barroso, pelo incentivo e pela valiosa ajuda no desenvolvimento do trabalho.

Ao Prof. Dr. Mario D. Carelli, Prof. Dr. Davor Grgic e Dr. Luca Oriani, da Westinghouse, pelas informações de projeto do Reator Integrado IRIS (International Reactor Innovative and Secure), possibilitando a sua utilização no desenvolvimento do trabalho.

EPÍGRAFES

“É preciso que não se tenha medo de dizer alguma coisa que possa ser considerada como erro. Porque tudo que é novo, aparece aos olhos antigos como coisa errada. É sempre nesta violação do que é considerado correto, que nasce o novo e há a criação. E este espírito deve ser redescoberto pela juventude brasileira”.

Prof. Dr. Mário Schenberg

“O que move os homens geniais não são as novas idéias, mas a sua obsessão pela idéia de que o que já foi dito ainda não é suficiente”.

Ferdinand-Victor Eugène Delacroix

“A confiança em si mesmo é o primeiro e o maior segredo para chegar ao sucesso em qualquer empreitada”.

Dirk Wolter

“A princípio, as pessoas se recusam a acreditar que uma coisa nova e estranha pode ser feita; depois elas começam a ter esperança de que ela possa ser feita - então ela é feita e todo mundo se pergunta por que já não havia sido feita há séculos”.

Frances Hodgson Burnett

ATUAÇÃO DE UM SISTEMA PASSIVO DE REMOÇÃO DE CALOR DE EMERGÊNCIA DE REATORES AVANÇADOS EM ESCOAMENTO BIFÁSICO E COM ALTA CONCENTRAÇÃO DE NÃO-CONDENSÁVEIS

Luiz Alberto Macedo

RESUMO

A pesquisa e o desenvolvimento de sistemas passivos de resfriamento de emergência são necessários para os sistemas termo-nucleares de nova geração. Algumas informações fundamentais sobre a operação desses sistemas requerem a pesquisa de alguns processos relativos à circulação natural, principalmente em condições de escoamento bifásico envolvendo processos de condensação na presença não-condensáveis, pois muitas situações encontradas são novas. A bancada experimental de circulação natural (BCN) foi utilizada para a realização de testes com diversas concentrações de não-condensáveis e níveis de potência. O não-condensável presente no circuito diminui a taxa de transferência de calor para o secundário do trocador de calor, causando baixo desempenho do trocador de calor. A presença de altas concentrações de não-condensáveis no trocador de calor propicia elevadas variações de pressão, decorrentes do processo de condensação abrupto, determinando a inversão da vazão e de fortes vibrações e esforços nas tubulações do circuito. A concentração inicial de não-condensável e a geometria do circuito, na entrada do trocador de calor, determinam o estabelecimento de transitórios com escoamento bifásico. A BCN foi modelada com o código computacional de Análise de Acidentes e Termo-Hidráulica RELAP5/MOD3.3 e, os valores calculados foram comparados com os dados experimentais, apresentando boa concordância para menores concentrações de ar. Os valores calculados para maiores concentrações de não-condensável foram satisfatórios após o circuito ter atingido a temperatura de saturação no aquecedor elétrico.

PERFORMANCE OF A PASSIVE EMERGENCY HEAT REMOVAL SYSTEM OF ADVANCED REACTORS IN TWO-PHASE FLOW AND WITH HIGH CONCENTRATION OF NON-CONDENSABLES

Luiz Alberto Macedo

ABSTRACT

The research and the development of passive emergency cooling systems are necessary for the new generation of thermo-nuclear systems. Some basic information on the operation of these systems require the research of some relative processes to the natural circulation, mainly in conditions of two-phase flow involving processes of condensation in the presence of non-condensable gases, because many found situations are new. The experimental facility called Bancada de Circulação Natural (BCN) was used for the realization of tests with diverse concentrations of non-condensable and power levels. The non-condensable gas present in the circuit decreases the rate of heat transfer for the secondary of the heat exchanger, determining low efficiency of the heat exchanger. High concentration of non-condensable in the vapor condensation, determines negative pressure, and cause the inversion of the flow in the circuit. The initial concentration of non-condensable and the geometry of the circuit, in the inlet of the heat exchanger, determines the establishment of transitory with two-phase flow. The BCN was performed with the computational code of Analysis of Accidents and Thermal-Hydraulics RELAP5/MOD3.3 and, the calculated values had been compared with the experimental data, presenting good agreement for small non-condensable concentrations. The values calculated for high concentrations of non-condensable had been satisfactory after the circuit to have reached the temperature of saturation in the electric heater.

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO	22
1.1 Breve histórico	22
1.2 Motivação para o trabalho	24
1.3 Objetivos	29
1.4 Organização da tese	30
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	32
3 METODOLOGIA	43
3.1 Descrição do circuito experimental	43
3.2 Modificações realizadas na BCN	49
3.2.1 Aumento da potência elétrica	49
3.2.2 Substituição do medidor de vazão magnético – MVM	49
3.2.3 Termopares	50
3.2.4 Sensores de pressão	53
3.3 Instrumentação	54
3.4 Dispositivos experimentais	57
3.5 Controle e aquisição de dados	59
3.6 Programa computacional <i>Air_NCL</i>	62
3.7 Código computacional RELAP5/MOD3.3	62
4 RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISES	66
4.1 Testes 25% Ar – NP1 e NP2	68
4.2 Testes 50% Ar – NP1 e NP2	90
4.3 Testes 75% Ar – NP1 e NP2	119
4.4 Testes 100% Ar – NP1 e NP2	144

5 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS E DADOS EXPERIMENTAIS	166
5.1 Testes 25% Ar e 50% Ar – NP1 e NP2	179
5.2 Testes 75% Ar e 100% Ar – NP1 e NP2	197
6 CONCLUSÕES	207
APÊNDICE A – Calibração do sinal de potência	211
APÊNDICE B – Aferição do medidor de vazão magnético	220
APÊNDICE C – Calibração dos sensores de pressão	223
APÊNDICE D – Calibração dos termopares	226
APÊNDICE E – Programa “Air_NCL”	243
APÊNDICE F – Aferição dos sensores de pressão P1 e P2	253
APÊNDICE G – Dados de entrada “Input” – Relap5	259
ANEXO A – Princípio de funcionamento do	
medidor de vazão magnético	286
ANEXO B – Sensor de pressão diferencial com indutância magnética	288
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	291

LISTA DE TABELAS

Página

TABELA 3.1 – Características Geométricas do Trocador de Calor	46
TABELA 3.2 – Características dos Termopares – BCN	51
TABELA 3.3 – Regiões e Termopares para Cálculo da Massa de Líquido da BCN	64
TABELA 4.1 – Nível de Potência – Fluxo de Calor (ϕ) – Testes.....	66
TABELA 4.2 – Nível de Potência – Testes – Potência Aplicada Temperatura Ambiente – Vazão de Resfriamento	67
TABELA 4.3 – Condições Iniciais dos Testes 25% Ar – NP1 e NP2	69
TABELA 4.4 – TC1 e TC17 – Vazões – NP1 e NP2 – 33.000 s	70
TABELA 4.5 – Valores Iniciais Máximos de Vazões, TC1 – NP1 e NP2	73
TABELA 4.6 – Períodos Iniciais – Testes 25% Ar – NP1 e NP2	73
TABELA 4.7 – Taxas de Aumento – TC1, TC17 e Vazões – NP1 e NP2	74
TABELA 4.8 – Taxas de Diminuição – TC1 e Vazão – NP1 e NP2	74
TABELA 4.9 – Valores Iniciais Máximos de Pressão P2 – NP1 e NP2	77
TABELA 4.10 – Períodos Iniciais de P2 – Testes 25% Ar – NP1 e NP2	78
TABELA 4.11 – Taxas de Aumento – Pressão P2 – NP1 e NP2	78
TABELA 4.12 – TC9, TC10 e TC11 – Testes 25% Ar – NP1 e NP2	84
TABELA 4.13 – TC9, TC10 e TC11 – NP1 e NP2	86
TABELA 4.14 – Condições Finais dos Testes 25% Ar – NP1 e NP2	90
TABELA 4.15 – Condições Iniciais dos Testes 50% Ar – NP1 e NP2	91
TABELA 4.16 – TC1 e TC17 – Vazões – NP1 e NP2 – 33.000 s	91
TABELA 4.17 – Comparação de TC1, TC17 e de Vazões 25% Ar e 50% Ar – NP1 e NP2 – 33.000 s	92
TABELA 4.18 – Comparação dos Atrasos de TC1 e das Vazões Convecção Natural – 25% Ar e 50% Ar – NP1 e NP2 Início dos Transitórios	93
TABELA 4.19 – Valores Iniciais Máximos de Vazões, TC1 – NP1 e NP2	94
TABELA 4.20 – Comparação de TC1, TC17 e das Vazões 25% Ar e 50% Ar – NP1 e NP2 – Início dos Transitórios	94
TABELA 4.21 – Períodos Iniciais – Testes 50% Ar – NP1 e NP2	95

TABELA 4.22 – Comparação de TC1, TC17 e das Vazões	
25% Ar e 50% Ar – NP1 e NP2 – Início dos Transitórios	95
TABELA 4.23 – Taxas de Aumento – TC1, TC17 e Vazões – NP1 e NP2	96
TABELA 4.24 – Comparação das Taxas de Aumento	
TC1, TC17 e das Vazões 25% Ar e 50% Ar	
NP1 e NP2 – Início dos Transitórios	96
TABELA 4.25 – Taxas de Diminuição – TC1, TC17 e Vazão – NP1 e NP2	97
TABELA 4.26 – Comparação das Taxas de Diminuição	
TC1, TC17 e das Vazões – 25% Ar e 50% Ar	
NP1 e NP2 – Início dos Transitórios	97
TABELA 4.27 – Atrasos – TC1 e Vazões – 25% Ar e 50% Ar	
NP1 e NP2 – Início dos Transitórios	98
TABELA 4.28 – Variação no Nível do Vaso de Expansão	
25% Ar e 50% Ar – NP1 e NP2	100
TABELA 4.29 – Desníveis de Montagem – Pressão P2	
Testes 25% Ar e 50% Ar – NP1 e NP2	102
TABELA 4.30 – Valores Iniciais Máximos de Pressão P2 – NP1 e NP2	103
TABELA 4.31 – Pressão P2 – Período Oscilatório Inicial	
25% Ar e 50% Ar – NP1 e NP2	103
TABELA 4.32 – Períodos Iniciais de P2 – Testes 50% Ar – NP1 e NP2	104
TABELA 4.33 – Duração dos Períodos Oscilatórios Iniciais para P2	
25% Ar e 50% Ar – NP1 e NP2	104
TABELA 4.34 – Taxas de Aumento – Pressão P2 – NP1 e NP2	105
TABELA 4.35 – Taxas de Aumento de P2 – Períodos Oscilatórios	
Iniciais para P2 25% Ar e 50% Ar – NP1 e NP2	105
TABELA 4.36 – Desníveis de Montagem – Pressão P1	
Testes 25% Ar e 50% Ar – NP1 e NP2	110
TABELA 4.37 – TC8, TC9, TC10 e TC11	
Testes 50% Ar – 33.000 s – NP1	111
TABELA 4.38 – Comparação de Temperaturas TC24 e TC25	
33.000 s – Testes 25% Ar e 50% Ar – NP1 e NP2	116
TABELA 4.39 – Potências Aplicadas e Retiradas	
Testes 25% Ar e 50% Ar – NP1 e NP2	117
TABELA 4.40 – Condições Finais dos Testes 50% Ar – NP1 e NP2	119

TABELA 4.41 – Condições Iniciais dos Testes 75% Ar – NP1 e NP2	120
TABELA 4.42 – Condições Finais dos Testes 75% Ar – NP1 e NP2	120
TABELA 4.43 – TC1 e TC17 – Vazões – NP1 e NP2 – 30.000 s	122
TABELA 4.44 – Temperaturas TC8, TC9, TC10 e TC11 30.000 s – NP1 e NP2	134
TABELA 4.45 – Potências Aplicadas e Retiradas Testes 50% Ar e 75% Ar – NP1 e NP2	142
TABELA 4.46 – Condições Iniciais dos Testes 100% Ar – NP1 e NP2	144
TABELA 4.47 – Condições Finais dos Testes 100% Ar – NP1 e NP2	144
TABELA 4.48 – TC1 e TC17 – Vazões – NP1 e NP2 – 30.000 s	146
TABELA 4.49 – TC1, TC17 e de Vazões – 75% Ar e 100% Ar NP1 e NP2	146
TABELA 4.50 – Convecção Natural – 75% Ar e 100% Ar NP1 e NP2	148
TABELA 4.51 – Temperaturas TC8, TC9, TC10 e TC11 – 30.000 s NP1 e NP2	158
TABELA 4.52 – Potências Aplicadas e Retiradas Testes 75% Ar e 100% Ar – NP1 e NP2	164
TABELA 5.1 – Componentes do Código e Regiões Hidráulicas	167
TABELA 5.2 – Correlações de Transferência de Calor – Relap5/mod3.3	168
TABELA 5.3 – Vazões Calculadas e Medidas 25% Ar – NP1 e NP2 – 33.000 s	180
TABELA 5.4 – Vazões Calculadas e Medidas 50% Ar – NP1 e NP2 – 33.000 s	181
TABELA 5.5 – TC1 e TC17 Calculadas e Medidas 25% Ar – NP1 e NP2 – 33.000 s	183
TABELA 5.6 – TC1 E TC17 Calculadas e Medidas 50% Ar – NP1 e NP2 – 33.000 s	184
TABELA 5.7 – TC9, TC10 e TC11 Calculadas e Medidas 25% Ar – NP1 e NP2 – 33.000 s	185
TABELA 5.8 – TC9, TC10 E TC11 Calculadas e Medidas 50% Ar – NP1 e NP2 33.000 s	186
TABELA 5.9 – TC23, TC24 e TC25 Calculadas e Medidas 25% Ar – NP1 e NP2 33.000 s	187

TABELA 5.10 – TC23, TC24 e TC25 Calculadas e Medidas	
50% Ar – NP1 e NP2 – 33.000 s	188
TABELA 5.11 – Níveis de Não-Condensável R5 e <i>Air_NCL</i>	
25% Ar – NP1 e NP2 33.000 s	191
TABELA 5.12 – Níveis de Não-Condensável R5 e <i>Air_NCL</i>	
50% Ar – NP1 e NP2 33.000 s	192
TABELA ApA.1 – Testes e Tabelas de Resultados	213
TABELA ApA.2 – Resultados para Teste 1	213
TABELA ApA.3 – Resultados para Teste 2	213
TABELA ApA.4 – Resultados para Teste 3	214
TABELA ApA.5 – Resultados para Teste 4	214
TABELA ApA.6 – Resultados para Teste 5	214
TABELA ApA.7 – Resultados para Teste 6	215
TABELA ApA.8 – Resultados para Teste 7	215
TABELA ApA.9 – Médias e Desvios Padrão – Potência Térmica	215
TABELA ApA.10 – Tensão V_a – Tensão V_t – Potência Elétrica (Q_e)	217
TABELA ApA.11 – Comparação entre Potências Térmica e Elétrica	217
TABELA ApB.1 – Comparação das Vazões com Fluido Frio (25 °C)	221
TABELA ApB.2 – Comparação das Vazões com Fluido Quente (42 °C)	221
TABELA ApC.1 – Medidas do Sinal do Sensor P1 – Média e Desvio Padrão	224
TABELA ApC.2 – Medidas do Sinal do Sensor P2 – Média e Desvio Padrão	225
TABELA ApD.1 – Relação de Tabelas e Figuras	227
TABELA ApD.2 – Padrão PT100 para TC6, TC7, TC11 e TC12	228
TABELA ApD.3 – Medidas do Sinal de Temperatura do TC6	228
TABELA ApD.4 – Comparação do TC6 com o Padrão PT100	228
TABELA ApD.5 – Medidas do Sinal de Temperatura do TC7	229
TABELA ApD.6 – Comparação do TC7 com o Padrão PT100	229
TABELA ApD.7 – Medidas do Sinal de Temperatura do TC11	229
TABELA ApD.8 – Comparação do TC11 com o Padrão PT100	230
TABELA ApD.9 – Medidas do Sinal de Temperatura do TC12	230
TABELA ApD.10 – Comparação do TC12 com o Padrão PT100	230
TABELA ApD.11 – Padrão PT100 para TC8, TC9, TC10 e TC24	233

TABELA ApD.12 – Medidas do Sinal de Temperatura do TC8	233
TABELA ApD.13 – Comparação do TC8 com o Padrão PT100	233
TABELA ApD.14 – Medidas do Sinal de Temperatura do TC9	234
TABELA ApD.15 – Comparação do TC9 com o Padrão PT100	234
TABELA ApD.16 – Medidas do Sinal de Temperatura do TC10	234
TABELA ApD.17 – Comparação do TC10 com o Padrão PT100	235
TABELA ApD.18 – Medidas do Sinal de Temperatura do TC24	235
TABELA ApD.19 – Comparação do TC24 com o Padrão PT100	235
TABELA ApD.20 – Padrão PT100 para TC18, TC23, TC25 e TC26	238
TABELA ApD.21 – Medidas do Sinal de Temperatura do TC18	238
TABELA ApD.22 – Comparação do TC18 com o Padrão PT100	238
TABELA ApD.23 – Medidas do Sinal de Temperatura do TC23	239
TABELA ApD.24 – Comparação do TC23 com o Padrão PT100	239
TABELA ApD.25 – Medidas do Sinal de Temperatura do TC25	239
TABELA ApD.26 – Comparação do TC25 com o Padrão PT100	240
TABELA ApD.27 – Medidas do Sinal de Temperatura do TC26	240
TABELA ApD.28 – Comparação do TC26 com o Padrão PT100	240
TABELA ApF.1 – Pressões Iniciais Medidas e Calculadas para P1 – NP1	253
TABELA ApF.2 – Pressões Finais Medidas e Calculadas para P1 – NP1	254
TABELA ApF.3 – Pressões Iniciais Medidas e Calculadas para P1 – NP2	254
TABELA ApF.4 – Pressões Finais Medidas e Calculadas para P1 – NP2	254
TABELA ApF.5 – Pressões Iniciais Medidas e Calculadas para P2 – NP1	256
TABELA ApF.6 – Pressões Finais Medidas e Calculadas para P2 – NP1	256
TABELA ApF.7 – Pressões Iniciais Medidas e Calculadas para P2 – NP2	256
TABELA ApF.8 – Pressões Finais Medidas e Calculadas para P2 – NP2	257
TABELA AnB.1 – Relação de Diafragmas e Pressão Diferencial	290

LISTA DE FIGURAS

Página

FIGURA 1.1 – Sistema de Resfriamento Passivo da Contenção (a) e Sistema Passivo de Remoção de Calor de Emergência (b) – Reator AP 600	24
FIGURA 1.2 – Vaso do Reator Integrado IRIS	26
FIGURA 1.3 – Sistema Passivo de Remoção de Calor de Emergência – Reator Integrado IRIS	26
FIGURA 1.4 – Sistema Passivo de Remoção de Calor 1 e 2 – <i>LONF</i> (L1) e <i>FLB</i> (L2 e L3)	27
FIGURA 1.5 – Sistema Passivo de Remoção de Calor de Emergência – AP600	28
FIGURA 3.1 – Bancada de Circulação Natural – BCN	43
FIGURA 3.2 – Planta do Galpão do Loop – 70 / Localização Física da BCN	44
FIGURA 3.3 – Circuito Primário da BCN – Aquecedor Elétrico Perna Quente, Trocador de Calor, Perna Fria	45
FIGURA 3.4 – Circuito Secundário – BCN	46
FIGURA 3.5 – Trocador de Calor – BCN	47
FIGURA 3.6 – Sistema Auxiliar de Vazão Forçada – BCN	48
FIGURA 3.7 – Vaso de Expansão – BCN	48
FIGURA 3.8 – Medidor de Vazão Magnético Krohne Conaut – BCN	50
FIGURA 3.9 – Localização dos Termopares no Circuito Primário – BCN	52
FIGURA 3.10 – Localização dos Termopares no Circuito Secundário – BCN	52
FIGURA 3.11 – Sensor de Pressão P1 – BCN	53
FIGURA 3.12 – Sensor de Pressão P2 – BCN	54
FIGURA 3.13 – Esquema do DFT	55
FIGURA 3.14 – Teste com Protótipo de DFT	55
FIGURA 3.15 – DFT's 1, 2, 3 e 4 – Trocador de Calor	56
FIGURA 3.16 – Localização dos DFT's com Termopares no Trocador de Calor	57

FIGURA 3.17 – Injeção de Ar no Trocador de Calor – (A) Condição Inicial – (B) Preenchimento com Água – (C) Nível e Sensor P2 – (D) Pressão do Sistema.....	58
FIGURA 3.18 – Sistema de Aquisição de Dados	61
FIGURA 3.19 – Tela de Interface – BCN	62
FIGURA 3.20 – Tela de Interface <i>Air_NCL</i>	65
FIGURA 4.1 – Testes Experimentais – Concentrações Iniciais de Não-Condensável	68
FIGURA 4.2 – Temperaturas TC1 e TC17, Vazões– NP1 e NP2	69
FIGURA 4.3 – Transitórios Iniciais – Testes 25% Ar – NP1 e NP2	70
FIGURA 4.4 – Convecção Natural – Aquecedor Elétrico	71
FIGURA 4.5 – Acelerações do Fluido na BCN	72
FIGURA 4.6 – Pressão P2 – Vazão – Testes 25% Ar – NP1e NP2	75
FIGURA 4.7 – Condição Inicial – Sensor de Pressão P2 – NP1 e NP2	76
FIGURA 4.8 – Comportamento Inicial das Pressões P2 e das Vazões – NP1 e NP2	77
FIGURA 4.9 – Pressão P1 e Vazão – Testes 25% Ar – NP1 e NP2	79
FIGURA 4.10 – Comportamento Inicial da Pressão P1 e Vazão Testes 25% Ar – NP1 e NP2	80
FIGURA 4.11 – Comportamento Inicial da Pressão P1 e TC1 Testes 25% Ar – NP1 e NP2	81
FIGURA 4.12 – Condição Inicial – Sensor de Pressão P1 NP1 e NP2	82
FIGURA 4.13 – Temperaturas TC9, TC10 e TC11 Testes 25% Ar – NP1 e NP2	83
FIGURA 4.14 – Temperaturas TC8 e TC10 – 25% Ar – NP1 e NP2	84
FIGURA 4.15 – Primário e Secundário – Trocador de Calor – BCN	85
FIGURA 4.16 – TC9, TC10 e TC11 – Testes 25% Ar – NP1 e NP2	86
FIGURA 4.17 – Temperaturas do Secundário do Trocador de Calor – 25% Ar – NP1 e NP2	87
FIGURA 4.18 – Potência Aplicada e Potência Retirada 25% Ar – NP1 e NP2	88
FIGURA 4.19 – Níveis de Não-Condensável – 33.000 s – NP1 e NP2	89
FIGURA 4.20 – Níveis de Não-Condensável – 3000 s – NP1 e NP2	89

FIGURA 4.21 – Temperaturas TC1 e TC17, Vazões– NP1 e NP2	91
FIGURA 4.22 – Transitórios Iniciais – Testes 50% Ar – NP1 e NP2	93
FIGURA 4.23 – Pressão P2 – Vazão – Testes 50% Ar – NP1 e NP2	99
FIGURA 4.24 – Condição Inicial – Sensor de Pressão P2 – NP1 e NP2	101
FIGURA 4.25 – Comportamento Inicial das Pressões P2 e das Vazões – NP1 e NP2	102
FIGURA 4.26 – Pressão P1 e Vazão – Testes 50% Ar – NP1 e NP2	106
FIGURA 4.27 – Temperatura na Parede (T_w) e Coeficiente de Transferência de Calor ($W/m^2\text{°C}$) na Resistência Elétrica do Aquecedor Elétrico	107
FIGURA 4.28 – Pressão P1 e Vazão – Testes 50% Ar – NP1 e NP2.....	108
FIGURA 4.29 – Condição Inicial – Sensor de Pressão P1 – NP1 e NP2	109
FIGURA 4. 30 – Temperaturas TC8, TC9, TC10 e TC11 Teste 50% Ar – NP1	111
FIGURA 4. 31 – Início do Transitório Temperaturas TC8, TC9, TC10 e TC11 – Teste 50% Ar – NP1	112
FIGURA 4.32 – Temperaturas TC8, TC9, TC10 e TC11 Teste 50% Ar – NP2	113
FIGURA 4.33 – Transitório Inicial – TC8, TC9 e TC10 Teste 50% Ar – NP2	114
FIGURA 4.34 – Temperaturas do Secundário do Trocador de Calor – 50% Ar – NP1 e NP2	115
FIGURA 4.35 – Potência Aplicada e Potência Retirada 50% Ar – NP1 e NP2	116
FIGURA 4.36 – Níveis de Não-Condensáveis – 33.000 s – NP1 e NP2	118
FIGURA 4.37 – Níveis de Não-Condensáveis – 3000 s – NP1 e NP2	118
FIGURA 4.38 – Geometria da BCN e Concentração Inicial de Ar	120
FIGURA 4.39 – Temperaturas TC1 e TC17, Vazões– NP1 e NP2	121
FIGURA 4.40 – Transitórios Iniciais – TC1, TC17 e Vazões Testes 75% Ar – NP1 e NP2	122
FIGURA 4.41 – Convecção Natural – TC1 e Vazão 75% Ar – NP1 e NP2	123
FIGURA 4.42 – Transitórios Iniciais – P1 e P2 Testes 75% Ar – NP1 e NP2	126

FIGURA 4.43 – Condição Inicial – Sensor de Pressão P1	
75% Ar – NP1 e NP2	127
FIGURA 4.44 – Condição Inicial – Sensor de Pressão P2	
75% Ar – NP1 e NP2	128
FIGURA 4.45 – Comparação de Pressões P1 e P2	
Testes 75% Ar – NP1	129
FIGURA 4.46 – Comparação de Pressões P1 e P2	
Testes 75% Ar – NP2	130
FIGURA 4.47 – Esquema de Liberação de Não-Condensável para o Ambiente	131
FIGURA 4.48 – Variação de Não-Condensável no Trocador de Calor – NP1 e NP2	132
FIGURA 4.49 – Temperaturas TC8, TC9, TC10 e TC11 30.000 s – NP1	133
FIGURA 4.50 – Temperaturas TC8, TC9, TC10 e TC11 30.000 s – NP2	134
FIGURA 4.51 – Início do Transitório – TC8, TC9, TC10, TC11 e Vazão – NP1	135
FIGURA 4.52 – Início do Transitório – TC8, TC9, TC10, TC11 e Vazão – NP2	136
FIGURA 4.53 – Comportamento Oscilatório de TC8, TC9, TC10 – NP1	137
FIGURA 4.54 – Comportamento Oscilatório de TC8, TC9 e TC10 – NP2	138
FIGURA 4.55 – Temperatura TC11 – Saída do Trocador de Calor – NP1 e NP2	139
FIGURA 4.56 – Temperaturas TC21, TC24 e TC25 – NP1 e NP2	140
FIGURA 4.57 – Transitório Inicial – TC21, TC24 e TC25 – NP1 e NP2	141
FIGURA 4.58 – Potências Aplicadas e Retiradas – 30.000 s NP1 e NP2	142
FIGURA 4.59 – Potências Aplicadas e Retiradas – 4000 s – NP1 e NP2	143
FIGURA 4.60 – Temperaturas TC1 e TC17, Vazões– NP1 e NP2	145
FIGURA 4.61 – Transitórios Iniciais – TC1, TC17 e Vazões Testes 100% Ar – NP1 e NP2	146
FIGURA 4.62 – Convecção Natural – TC1 e Vazão – 100% Ar NP1 e NP2	147

FIGURA 4.63 – Transitórios Iniciais – P1 e P2	
Testes 100% Ar – NP1 e NP2	151
FIGURA 4.64 – Condição Inicial – Sensor de Pressão P1	
100% Ar – NP1 e NP2	152
FIGURA 4.65 – Condição Inicial – Sensor de Pressão P2	
100% Ar – NP1 e NP2	153
FIGURA 4.66 – Comparação de Pressões P1 e P2	
Testes 100% Ar – NP1	154
FIGURA 4.67 – Comparação de Pressões P1 e P2	
Testes 100% Ar – NP2	155
FIGURA 4.68 – Variação de Não-Condensável no	
Trocador de Calor – NP1 e NP2	156
FIGURA 4.69 – Temperaturas TC8, TC9, TC10 e TC11	
30.000 s – NP1	157
FIGURA 4.70 – Temperaturas TC8, TC9, TC10 e TC11	
30.000 s – NP2	158
FIGURA 4.71 – Início do Transitório – TC8, TC9, TC10, TC11	
e Vazão – NP1	159
FIGURA 4.72 – Início do Transitório – TC8, TC9, TC10, TC11	
e Vazão – NP2	160
FIGURA 4.73 – Temperaturas TC21, TC24 e TC25 – NP1 e NP2	162
FIGURA 4.74 – Transitórios Iniciais – TC21, TC24 e TC25 – NP1 e NP2	163
FIGURA 4.75 – Potências Aplicadas e Retiradas – 30.000 s – NP1 e NP2	164
FIGURA 4.76 – Potências Aplicadas e Retiradas – 4000 s – NP1 e NP2	165
FIGURA 5.1 – Nodalização em Componentes da BCN	168
FIGURA 5.2 – Fator F x Inverso do Número de Lockhart-Martinelli ($1/\chi_{tt}$).....	172
FIGURA 5.3 – Fator de Supressão (S) x Número de	
Reynolds – duas fases (Re_{tp}).....	173
FIGURA 5.4 – Método Iterativo de Colburn e Hougen	175
FIGURA 5.5 – Vazão: Experimental e R5 – Testes 25% Ar – NP1 e NP2	180
FIGURA 5.6 – Vazão: Experimental e R5 – Testes 50% Ar – NP1 e NP2	181
FIGURA 5.7 – TC1 e TC17: Experimental e R5	
Testes 25% Ar – NP1 e NP2	182
FIGURA 5.8 – TC1 e TC17: Experimental e R5 - Testes 50% Ar – NP1 e NP2	183

FIGURA 5.9 – TC9, TC10 e TC11: Experimental e R5	
Testes 25% Ar – NP1 e NP2	185
FIGURA 5.10 – TC9, TC10 e TC11: Experimental e R5	
Testes 50% Ar – NP1 e NP2	186
FIGURA 5.11 – TC23, TC24 e TC25: Experimental e R5	
Testes 25% Ar – NP1 e NP2	188
FIGURA 5.12 – TC23, TC24 e TC25: Experimental e R5	
Testes 50% Ar – NP1 e NP2	189
FIGURA 5.13 – Nível de Não-Condensável: <i>Air_NCL</i> e R5	
Testes 25% Ar – NP1 e NP2	190
FIGURA 5.14 – Nível de Não-Condensável: <i>Air_NCL</i> e R5	
Testes 50% Ar – NP1 e NP2	191
FIGURA 5.15 – Pressão P1: Experimental e R5	
Testes 25% Ar – NP1 e NP2	193
FIGURA 5.16 – Pressão P2: Experimental e R5	
Testes 50% Ar – NP1 e NP2	194
FIGURA 5.17 – Potência Retirada no Trocador de	
Calor: Experimental e R5 – Testes 25% Ar – NP1 e NP2	195
FIGURA 5.18 – Potência Retirada no Trocador de	
Calor: Experimental e R5 – Testes 50% Ar – NP1 e NP2	196
FIGURA 5.19 – Vazão: Experimental e R5	
Testes 75% Ar – NP1 e NP2	197
FIGURA 5.20 – Vazão: Experimental e R5	
Testes 100% Ar – NP1 e NP2	198
FIGURA 5.21 – Esquema de Simulação	
Tubulão Superior do Trocador de Calor	198
FIGURA 5.22 – TC1 e TC17: Experimental e R5	
Testes 100% Ar – NP2	199
FIGURA 5.23 – TC9, TC10 e TC11: Experimental e R5	
Testes 100% Ar – NP1 e NP2	200
FIGURA 5.24 – TC23, TC25 e TC25: Experimental e R5	
Testes 75% Ar – NP1 e NP2	201
FIGURA 5.25 – Nível: <i>Air_NCL</i> e R5 – Testes 100% Ar	
NP1 e NP2	202

FIGURA 5.26 – Pressão P2: Experimental e R5	
Testes 100% Ar – NP1 e NP2	203
FIGURA 5.27 – Q_{sec} R5 e Q_{sec} : R5 e Balanço de Energia	
100% Ar – NP1 e NP2	204
FIG. 5.28 – Fração de Vazio – 100% Ar – NP1	206
FIGURA 5.29 – Fração de Vazio – 100% Ar – NP2	206
FIGURA ApA.1 – Esquema do Sinal de Tensão (V_a) – Potência no Aquecedor	211
FIGURA ApA.2 – Esquema para Calibração do Sinal de Tensão (V_a) por Balanço Térmico no Aquecedor Elétrico	212
FIGURA ApA.3 – Esquema de Resistências no Aquecedor Elétrico	216
FIGURA ApA.4 – Curvas de Potência Elétrica e Térmica – Sinal de Tensão	218
FIGURA ApB.1 – Esquema da BCN para Aferição da Calibração do MVM	220
FIGURA ApB.2 – Aferição do MVM para Fluido Frio (25 °C)	222
FIGURA ApB.3 – Aferição do MVM para Fluido Quente (42 °C)	222
FIGURA ApC.1 – Bancada de Calibração – Sensores de Pressão P1 e P2	223
FIGURA ApC.2 – Curva de Calibração P1	224
FIGURA ApC.3 – Curva de Calibração P2	225
FIGURA ApD.1 – Bancada de Calibração	226
FIGURA ApD.2 – Curva Ajustada TC6	231
FIGURA ApD.3 – Curva Ajustada TC7	231
FIGURA ApD.4 – Curva Ajustada TC11	232
FIGURA ApD.5 – Curva Ajustada TC12	232
FIGURA ApD.6 – Curva Ajustada TC8	236
FIGURA ApD.7 – Curva Ajustada TC9	236
FIGURA ApD.8 – Curva Ajustada TC10	237
FIGURA ApD.9 – Curva Ajustada TC24	237
FIGURA ApD.10 – Curva Ajustada TC18	241
FIGURA ApD.11 – Curva Ajustada TC23	241
FIGURA ApD.12 – Curva Ajustada TC25	242
FIGURA ApD.13 – Curva Ajustada TC26	242
FIGURA ApF.1 – Comparação das Pressões Medidas e Calculadas P1	255
FIGURA ApF.2 – Comparação das Pressões Medidas e Calculadas P2	257

FIGURA AnA.1 – Princípio de Funcionamento do Medidor de Vazão Magnético	286
FIGURA AnB.1 – Esquema do Sensor de Pressão com Indutância Variável	288
FIGURA AnB.2 – Princípio de Funcionamento do Sensor de Pressão	289
FIGURA AnB.3 – Esquema do Circuito Elétrico – Sensor de Pressão e Demodulador	289

1 INTRODUÇÃO

1.1 Breve histórico

No período de 1980 a 2004, a demanda mundial de energia primária (carvão, petróleo, energia solar e urânio) cresceu 54%. Até 2030, projeta-se um crescimento na demanda de 1,6% ao ano, passando de 469.10^{12} MJ para 716.10^{12} MJ. No mesmo período, o crescimento do consumo de energia elétrica é ainda maior, passando de 17.10^6 MWh para 34.10^6 MWh, apresentando uma taxa de crescimento de 2,6% ao ano, quase o dobro do crescimento da demanda de energia primária (Energy Information Administration, 2007).

Estima-se que a população mundial passará de 6,4 bilhões de pessoas em 2004 para 8,1 bilhões em 2030. A melhoria da qualidade de vida da população em países em desenvolvimento, aliada ao crescimento populacional, indicam um crescimento da ordem de 53% no consumo de energia elétrica no período de 2004 até 2030 (World Nuclear Association, 2007).

A indústria nuclear está pronta para contribuir ainda mais para satisfazer as necessidades de energia do mundo, à medida que chega ao fim a segunda era de energia nuclear. Há uma recuperação do setor, que impulsionado em parte pelas crescentes preocupações com a segurança energética nacional e com os custos elevados dos combustíveis fósseis importados; pelo substancial crescimento da demanda por energia para promover a prosperidade econômica; pela atenção redobrada com a eliminação das ameaças ambientais associadas à queima de combustíveis fósseis e sua substituição por energia nuclear sem emissão de poluentes; e pelo mercado de eletricidade muito receptivo à energia nuclear de baixo custo (Lake, 2006).

A confiança pública na operação das usinas nucleares tem aumentado cada vez mais devido à melhor compreensão dos benefícios ambientais e econômicos e à operação mais segura. Hoje, 439 usinas nucleares atendem a 16% da necessidade de eletricidade mundial (World Nuclear Association, 2007).

Programas agressivos de construção de novas usinas nucleares começaram principalmente nos países do Leste Asiático, na Rússia e na Índia. Os próprios Estados Unidos estão prestes a retomar a construção de novas usinas nucleares, processo que ficou estacionado por mais de 25 anos. Este é o começo da terceira era, o renascimento da energia nuclear.

De acordo com Lake (2000), para atender às expectativas ambiciosas, a indústria nuclear deve enfrentar quatro metas: a energia nuclear deve continuar economicamente competitiva no mercado mundial; em especial, as empresas de energia devem controlar melhor os custos de capital; a fim de atender às expectativas do público com relação a um desempenho excepcional no aspecto da segurança, as usinas atuais precisam continuar operando de forma segura, e as futuras usinas devem melhorar continuamente a segurança nos mercados mundiais em expansão; a energia nuclear e seu ciclo de combustível devem ser vistos pelo público e pelos líderes nacionais como sustentáveis; em especial, o combustível nuclear usado deve ser gerenciado de modo seguro e eficaz quanto ao custo durante o período prolongado em que se mantém altamente radioativo, e o fornecimento de combustível nuclear deve se estender por séculos em face da redução dos combustíveis fósseis e; os materiais nucleares do ciclo do combustível devem ser protegidos contra a proliferação e o mau uso para fins não pacíficos.

O estabelecimento das metas e a experiência adquirida na operação de reatores nucleares durante as últimas cinco décadas permitem o desenvolvimento de novos conceitos de reatores nucleares, denominados Reatores Avançados, que contemplam aperfeiçoamentos como a elevada padronização, segurança passiva, maior vida operacional (em torno de 60 anos), drástica redução na possibilidade de acidentes, mínimo impacto sobre o meio ambiente, melhor aproveitamento do combustível, menor geração de rejeitos, reduzidos custos de investimento e tempo de construção (World Nuclear Association, 2007).

O conceito de segurança passiva é uma inovação tecnológica muito importante nos Reatores Avançados, fazendo com que as funções de segurança

sejam menos dependentes da intervenção do homem (operador) e de componentes mecânicos como válvulas e bombas, aumentando a confiabilidade do projeto, utilizando conceitos baseados na convecção natural e na ação da gravidade.

Conforme a Westinghouse (2007), a segurança passiva dos Reatores Avançados engloba o sistema passivo de resfriamento da contenção e o sistema passivo de remoção de calor de emergência, seja na forma de calor residual ou em condições de acidente (perda de refrigerante – LOCA). A FIG. 1.1 indica o sistema passivo de resfriamento da contenção e o sistema passivo de remoção de calor de emergência para o reator AP 600.

FIGURA 1.1 – Sistema de Resfriamento Passivo da Contenção (a) e Sistema Passivo de Remoção de Calor de Emergência (b) – Reator AP 600

1.2 Motivação para o trabalho

Em 2001, o Departamento de Energia (DOE) dos Estados Unidos liderou um projeto denominado “Fórum Internacional Geração IV – GIF”, onde foram definidos requisitos, objetivos e metas para o setor nuclear, sendo selecionadas as tecnologias de reatores mais promissoras para o período

posterior a 2030 (Uranium Information Center, 2007). As principais metas para os reatores de IV geração são: melhor utilização e aproveitamento do combustível nuclear, minimização dos rejeitos, resistência à proliferação, maior segurança e confiabilidade para os trabalhadores e população, drástica redução na probabilidade de ocorrência de acidentes, aumento na segurança da usina, aumento da eficiência da geração da planta e maior atratividade para o investidor (Aranha, 2001). O GIF reconheceu outros tipos de reatores conceituais para aplicação a médio prazo (INTD – International Near Term Deployment) para estarem disponíveis até 2015. Observando as metas estabelecidas e, entre os vários projetos conceituais, os reatores integrais de pequeno e médio porte estão ganhando a atenção da comunidade nuclear internacional, pois eles diversificam o uso pacífico da energia nuclear na área de desalinização da água do mar, geração de energia e propulsão naval (Chung et al., 2004).

Nesse sentido, o reator integrado IRIS (reator internacional inovador e seguro) foi desenvolvido por um consórcio internacional de indústrias, laboratórios e universidades (20 participantes de 10 países), liderados pela Westinghouse (Carelli, 2003). A FIG. 1.2 indica o reator, que tem um projeto integrado, significando que os geradores de vapor, bombas, pressurizador, mecanismos de acionamento de barras e a blindagem do núcleo se encontram dentro do vaso do reator.

De acordo com Ricotti et al. (2002), o reator integrado IRIS adota sistemas passivos de remoção de calor de emergência (*PEHRS*), utilizando o fenômeno da circulação natural, que é composto por quatro circuitos, cada um conectado a um par de geradores de vapor (o reator integrado IRIS possui 8 geradores de vapor do tipo helicoidal) e associado, respectivamente a uma linha de alimentação (*MFL – Main Feed Line*) e a uma linha de saída (*MSL – Main Steam Line*), conforme indicado na FIG. 1.3. Em caso de acidente, as válvulas da linha de alimentação (*MFLV*) e de saída (*MSLV*) são fechadas e as válvulas de segurança do circuito de resfriamento de emergência são abertas.

FIGURA 1.2 – Vaso do Reator Integrado IRIS

IRIS - Sistema Passivo de Remoção de
Calor de Emergência
Agosto, 2002

FIGURA 1.3 - Sistema Passivo de Remoção de Calor de Emergência – Reator Integrado IRIS

O código termo-hidráulico RELAP5/MOD3.3 utilizado em análise de acidentes foi empregado para avaliar o comportamento do sistema sob as diferentes condições operacionais. Nas simulações iniciais de transitórios com o código RELAP5/MOD3.3, observou-se que a quantidade de energia retirada por dois PEHRS eram diferentes, conforme o acidente postulado. Foram simulados três acidentes (L1, L2 e L3), a partir do instante 50 s. Em L1 simulou-se um acidente *LONF* (*Loss of Normal Feedwater*) que pode ser a quebra de uma bomba no circuito secundário do reator, por exemplo. Em L2 e L3 foram simulados transientes *FLB* (*Feedwater Line Break*) que é o rompimento da tubulação da linha de alimentação, que pode ser dentro ou fora da contenção (Del Nevo et al., 2002). A FIG. 1.4 indica a comparação da quantidade de energia removida pelos PEHRS 1 e 2 em um transitório de 300 s. O motivo dessa diferença foi atribuído a um atraso no início da condensação no feixe de tubos dos trocadores de calor dos circuitos. De acordo com Bajs et al. (2003), esse atraso pode ser atribuído à presença de não-condensáveis (ar, nitrogênio, etc.) no sistema.

FIGURA 1.4 – Sistema Passivo de Remoção de Calor 1 e 2 – *LONF* (L1) e *FLB* (L2 e L3)

Deve-se destacar que o reator integrado IRIS não foi projetado para operar com a presença de não-condensáveis no seu *PEHRS*. No caso de um acidente do tipo *FLB*, onde ocorra entrada de ar no *PEHRS*, esse circuito será automaticamente isolado, e a energia do núcleo do reator será retirada de forma satisfatória pelos outros três circuitos restantes (Carelli et al., 2004). Na verdade, há sempre pequenas concentrações de não-condensáveis presentes no nível superior do *PEHRS* (geralmente no trocador de calor), em função da utilização do anti-corrosivo denominado Hidrazina (N_2H_4) diluído na água do circuito de resfriamento (Lima et al., 1996). A Hidrazina reage com o oxigênio, formando água e liberando nitrogênio, que é um gás inerte.

Em termos de segurança passiva, uma característica importante quanto ao projeto, que diferencia o reator integrado IRIS dos reatores AP 600 e AP 1000 é que seu *PEHRS* encontra-se associado ao sistema secundário por meio dos geradores de vapor (ver FIG. 1.3), enquanto que nos reatores AP 600 e AP 1000, estão interligados ao sistema primário, como mostrado na FIG. 1.5, para o reator AP 600.

fonte: www.ap600.westinghousenuclear.com, 2003

FIGURA 1.5 – Sistema Passivo de Remoção de Calor de Emergência – AP600

No caso de um acidente pela perda de refrigerante (*LOCA*), os *PEHRS* dos reatores AP 600 e AP 1000 estão sujeitos à presença de gases não-condensáveis, como o hidrogênio, formado pelas reações químicas exotérmicas no revestimento do combustível nuclear com o vapor e pela decomposição radiolítica da água (Hasanein et al., 1996).

Nesse cenário, há um crescente interesse nos efeitos causados pela presença de gases não-condensáveis nesses circuitos passivos de resfriamento. Há a necessidade de um detalhado estudo experimental e teórico da condensação de vapor na presença de não-condensáveis e de uma correta avaliação do comportamento do escoamento de fluidos na condição de duas ou mais fases, pois estes afetam significativamente o desempenho de trocadores de calor, como acontece no *PEHRS* de *Reatores Avançados* resfriados a água leve, como o AP 600 e o AP 1000 da Westinghouse, ambos já licenciados pela U. S. NRC (*United States Nuclear Regulatory Commission*), respectivamente em 1999 (U. S. Nuclear Regulatory Commission, 1999) e 2005 (Westinghouse, 2007).

1.3 Objetivos

O objetivo da tese é o estudo experimental e teórico do processo de condensação de vapor na presença de grande concentração de não-condensáveis em um circuito fechado de circulação natural, operando em condições de escoamento bifásico.

Para atender esse objetivo, um circuito experimental denominado Bancada de Circulação Natural (BCN) foi alterado para permitir a investigação e análise do comportamento em condições análogas a um *PEHRS* de Reatores Avançados resfriados a água leve, com um transitório em escoamento bifásico, envolvendo condensação de vapor na presença de um gás não-condensável (ar). A BCN é composta por uma fonte quente (aquecedor elétrico) e por uma fonte fria (trocador de calor), que são interligadas por meio de tubos de cobre, isolados termicamente com lã de vidro (Macedo e Baptista Filho, 2006). Os dados experimentais da BCN serão registrados digitalmente e divididos em diversos

testes, em função da potência aplicada ao circuito e de diferentes concentrações iniciais de gás não-condensável (ar) no trocador de calor, possibilitando a geração de um banco de dados (*benchmark*) disponível para consulta de especialistas da área e de alunos interessados no assunto tratado.

Para as análises teóricas dos processos termo-hidráulicos envolvidos nos testes experimentais, foram realizadas simulações da BCN utilizando-se o código termo-hidráulico e de análise de acidentes RELAP5/MOD3.3. Há uma necessidade de se avaliar o desempenho e o comportamento do código computacional RELAP5/MOD3.3 em simulações com condições de escoamento bifásico na presença de não-condensáveis, comparando os resultados com os dados experimentais obtidos na BCN, ressaltando a originalidade do trabalho.

Os resultados desta tese serão utilizados na análise de *PEHRS* de Reatores Avançados (III Geração) resfriados a água leve, originando um detalhado estudo experimental e teórico dos efeitos de altas concentrações de gases não-condensáveis no processo de condensação de vapor em um circuito fechado com circulação natural, em condições de escoamento bifásico, empregando metodologia inédita, ainda não tratada em sistemas similares e de maneira original.

Estabelecendo-se uma analogia entre os diversos projetos de *PEHRS* de Reatores Avançados e a BCN, o trabalho possibilitará a identificação de soluções para a correção da quantidade de energia retirada pela fonte fria (trocador de calor), em função da concentração inicial de não-condensáveis no circuito experimental. A análise de similaridade e a escala entre modelo (BCN) e protótipo (*PEHRS* de Reatores Avançados) não foram consideradas, devendo serem tratadas em trabalhos futuros.

1.4 Organização da tese

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os efeitos de gases não-condensáveis na condensação de vapor, destacando-se as

contribuições experimentais e teóricas de diversos pesquisadores para o desenvolvimento do trabalho. No Capítulo 3 é descrita a metodologia que foi adotada para a realização do trabalho, descrevendo o circuito experimental, as modificações necessárias na BCN para a execução dos experimentos em condições de escoamento bifásico e na presença não-condensável, a instrumentação utilizada, os dispositivos experimentais, o controle de potência e a aquisição de dados. No Capítulo 4 são apresentadas as rotinas experimentais, os testes realizados e os resultados obtidos, sendo efetuada uma detalhada análise experimental da presença do não-condensável em um sistema passivo de remoção de calor. No Capítulo 5 são realizadas simulações da BCN com os modelos desenvolvidos no código RELAP5/MOD3.3 e comparadas com os dados experimentais obtidos. Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões gerais e as sugestões para trabalhos futuros, relacionados com o tema desenvolvido neste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica apresentada considera alguns dos principais pesquisadores e suas valiosas contribuições teóricas e experimentais, que permitiram o desenvolvimento de uma criteriosa metodologia científica do estudo da condensação de vapor sob efeitos de gases não-condensáveis.

Colburn e Hougen (1934) desenvolveram um método analítico que é utilizado para o cálculo da temperatura na interface líquido/vapor na presença de gás não-condensável. A formulação é baseada no princípio que o calor transferido pela condensação de vapor na interface líquido/vapor por difusão é igual ao calor transferido no filme de líquido condensado. Por meio do princípio da conservação de energia, a temperatura e a pressão na interface líquido/vapor são determinados por um processo iterativo, permitindo que a taxa de transferência de calor seja calculada.

Tanner et al. (1965) apresentaram um trabalho experimental, em pressão atmosférica, sobre os efeitos de gases não-condensáveis (CO_2 e N_2) e da variação do fluxo de calor fornecido, no coeficiente de troca de calor na condensação por gotas. Como a condensação por gotas é um fenômeno instável e temporal, o aparato experimental utilizado foi projetado para permitir um apurado controle das variáveis envolvidas. Observou-se que o coeficiente de transferência de calor para o vapor puro aumentou de 35.000 a 55.000 BTU/h.ft².°F para uma variação no fluxo de calor de 20.000 a 200.000 BTU/h.ft². A redução no coeficiente de transferência de calor é maior na presença de CO_2 do que N_2 e com a diminuição da velocidade do vapor e do fluxo de calor.

Uma extensa investigação analítica considerada pioneira na área de condensação com gases não-condensáveis foi apresentada por Minkowycz e Sparrow (1966). A situação física em estudo é uma placa vertical com escoamento da mistura vapor e ar por gravidade. Os resultados para a transferência de calor são obtidos em função da concentração em massa de ar na mistura, da pressão no sistema, da diferença de temperaturas entre a parede da

placa e a mistura. Demonstrou-se que para pequenas concentrações de ar na mistura pode ter efeito decisivo na taxa de transferência de calor. Para uma concentração em massa de ar igual a 0,5%, foram obtidas reduções na taxa de transferência de calor iguais ou superiores a 50%. A influência do gás não-condensável é mais acentuada para menores níveis de pressão do sistema.

Sparrow et al (1967) apresentaram um trabalho analítico em que o sistema físico é representado por condensação em uma placa horizontal com escoamento forçado da mistura vapor/ar. A redução na taxa de transferência de calor na condensação devida à presença de ar é elevada em condições de baixa pressão do sistema. O coeficiente de transferência de calor na condensação com escoamento forçado é maior que do escoamento por gravidade (Minkowycz e Sparrow, 1966).

Rose (1969) apresentou um trabalho analítico, baseado nas equações de conservação e de difusão de massa, representando a condensação em uma placa vertical com escoamento por gravidade de uma mistura de vapor e ar. Obteve-se uma solução aproximada para o sistema, adotando-se o perfil de velocidades e o de concentrações de ar à mesma espessura da camada de difusão. A solução aproximada foi comparada com a solução exata obtida por Minkowycz e Sparrow (1966). Para pequenas concentrações de ar há uma significativa diferença entre os valores de transferência de calor e para altas concentrações de ar, os valores são praticamente coincidentes.

Um modelo analítico representando a condensação na presença de ar em uma placa vertical com escoamento forçado foi desenvolvido por Denny e Jusionis (1972). Os fluidos condensados são: água, amônia, freon-12, etanol, butanol e tetracloreto de carbono. As taxas de transferência de calor foram apresentadas considerando-se o tipo do fluido, o comprimento da superfície e a concentração de ar na mistura. Observa-se que os coeficientes de transferência de calor locais são maiores na região inicial da superfície para todos os fluidos. As taxas de transferência de calor para todas as condições simuladas são maiores para o vapor de amônia e menores para o vapor de água.

Al-Diwany e Rose (1973) apresentaram um trabalho experimental para a condensação de vapor na presença gases não-condensáveis mais pesados e mais leves que a água, em termos moleculares, sendo os mais pesados o ar, o argônio, o neônio e o mais leve, o hélio. A seção de teste é uma superfície vertical sob condições de escoamento laminar. Os resultados experimentais envolvendo os gases mais pesados são bem próximos aos calculados por Rose (1969) para o ar. A comparação entre os dados experimentais na presença de ar e os resultados teóricos de Minkowycz e Sparrow (1966), que são calculados para o ar, observa-se para o teste experimental, valores de transferência de calor 20% maiores. As taxas de transferência de calor na condensação na presença de hélio embora apresentem a mesma tendência que o ar, neônio e argônio, indicam menores valores aos mostrados pelos gases mais pesados que a água.

Um modelo analítico para simular um circuito fechado, contendo uma fonte quente (aquecedor elétrico) e uma fonte fria (trocador de calor), operando em escoamento bifásico na presença de ar, desenvolvido em 2-D, em coordenadas cilíndricas, utilizando as equações de conservação e de difusão de massa foi proposto por Hijikata et al (1984). Particular atenção foi dada ao atraso na condensação de vapor devido à difusão de massa nos sentidos radial e axial da tubulação. A análise demonstra a insuficiência de um modelo de difusão de massa unidimensional, que considera apenas difusão axial. O estudo mostra que a difusão radial é governada por dois fatores: a concentração de gás não-condensável e a taxa de difusão radial de gás para a condensação de vapor.

Um modelo analítico para condensação de vapor na presença de pequenas quantidades de ar, com escoamento turbulento em um tubo vertical foi proposto por Wang e Tu (1988). As reduções na transferência de calor são mais significantes a baixas pressões e para misturas de vapor e ar com pequenos valores de número de Reynolds. Os resultados teóricos foram comparados com os calculados por Borishansky et al. (1977), apresentando boa concordância.

Siddique et al. (1993) conduziram uma investigação experimental para determinação do coeficiente de transferência de calor local na condensação de vapor na presença de ar ou hélio, escoando dentro de um tubo vertical. As

equações de conservação aplicadas à fronteira de vapor e gás não-condensável foram utilizadas para identificação de grupos adimensionais para o estabelecimento de uma correlação, que foi adotada no modelo desenvolvido para o cálculo dos coeficientes de transferência de calor locais e que apresentou razoável concordância com os dados experimentais. A correlação estabelecida por Vierow (1990) demonstrou ser conservativa para misturas de vapor e ar para altos valores de número de Reynolds e baixa concentração de ar na mistura e não conservativa para baixos valores de número de Reynolds da mistura e alta concentração de ar na mistura, com relação à correlação adotada no modelo. Observou-se que para a mesma concentração em massa na mistura, comparada com o ar, o hélio tem um efeito mais inibidor na transferência de calor por condensação.

Kageyama et al. (1993) demonstraram que os gases não-condensáveis podem causar substancial impacto na transferência de calor por condensação em tubos verticais com escoamento turbulento. A analogia entre energia e difusão de massa possibilitou o desenvolvimento de um modelo empírico em 2-D, que quando formulado em termos das temperaturas da mistura de vapor e ar e na interface, oferece meios de calcular o fluxo de calor utilizando a equação de Dittus-Boelter modificada, conforme Ackers et al. (1960) e a condutividade térmica de condensação (Peterson et al., 1992). Há boa concordância entre os resultados calculados pelo modelo teórico e os dados experimentais apresentados por Ogg (1991), Vierow (1990) e Siddique (1992).

Um estudo experimental e analítico da condensação de uma mistura de vapor e hélio e de vapor, ar e hélio, escoando em regime turbulento em um tubo vertical, foi realizado por Hasanein et al. (1996). O número de Nusselt local da mistura foi correlacionado em termos do número de Reynolds local da mistura, do número de Jakob da mistura e da concentração em massa do gás e do número de Schmidt da mistura. A correlação para uma mistura de vapor e hélio estabelecida por Siddique et al. (1992) foi comparada com a correlação obtida experimentalmente, apresentando razoável concordância. Observou-se que a resistência térmica do filme de condensado é significativa para escoamento

forçado, quando o número de Reynolds da mistura é elevado (> 6.000) e a concentração dos gases da mistura é baixa ($< 0,2$).

Muñoz-Cobo et al. (1996) desenvolveram um modelo analítico para a condensação por filme, utilizando um tubo vertical com o escoamento forçado da mistura vapor e ar. Na região turbulenta, para elevados valores do número de Reynolds da mistura, o coeficiente de transferência de calor depende da tensão de cisalhamento interfacial, a qual depende da correlação de Wallis (1969) usada para calcular o atrito interfacial. Para maiores pressões do sistema, conforme Hewitt (1978), outras correlações foram adotadas para a determinação do atrito interfacial (Hetsroni, 1982; Whalley e Hewitt, 1978). Os resultados calculados foram comparados com os dados experimentais obtidos por Vierow e Schrock (1991) e Siddique et al. (1992), apresentando, respectivamente, excelente concordância na região turbulenta e excelente concordância para todas as regiões.

Hassan e Banerjee (1996) desenvolveram um modelo teórico de condensação de vapor na presença de ar e de nitrogênio, para um tubo vertical, baseado em Peterson et al. (1992), para ser implementado no código RELAP5/MOD3. O modelo foi validado por meio da simulação numérica de quatro experimentos realizados, sendo que três desses experimentos foram conduzidos pelo Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT) e um pela Universidade da Califórnia – Berkeley (UCB). Os experimentos no MIT foram realizados por Kang et al. (1984), Dehbi et al. (1990) e Siddique (1992) e o experimento desenvolvido na UCB foi realizado por Vierow e Schrock (1990). A utilização do modelo de condensação no RELAP5/MOD3 resulta em coeficientes de transferência de calor em boa concordância com os obtidos experimentalmente.

Yao et al. (1996) desenvolveram uma metodologia para modelagem numérica da condensação de vapor e ar, baseada no modelo de filme estagnado, que é aplicado de forma simultânea à transferência de calor e massa, como detalhado por Bird et al. (1960) e Edwards et al. (1979). A metodologia é totalmente compatível com a representação matemática e com o esquema de solução numérica das equações de conservação em duas fases do código

computacional RELAP5/MOD3, utilizando processos de transferência de massa e calor. A modificação no código RELAP5/MOD3, por meio da utilização do modelo de condensação, foi validada pela comparação com resultados experimentais obtidos por Ogg (1991), Siddique (1992) e Vierow (1990), apresentando satisfatória concordância.

Utilizando uma bancada experimental, Kuhn et al (1997) estudaram o coeficiente de transferência de calor local de uma mistura de vapor puro, vapor e ar e vapor e hélio, escoando em um tubo vertical. Foram apresentadas três diferentes correlações para o cálculo do coeficiente de transferência de calor na condensação, utilizando um fator de degradação, diferente do sugerido por Vierow e Schrock (1991), difusão de massa na interface, baseada em Peterson et al. (1993), e o modelo de condutância na transferência de massa (Mills, 1995). A correlação desenvolvida, baseada no fator de degradação, indicou resultados apenas razoáveis quando comparados com os dados experimentais, apresentando um desvio padrão relativo igual a 7,36% para vapor puro, 17,6% para vapor e ar e 13% para vapor e hélio. As correlações baseadas na difusão de massa e condutância na transferência de massa demonstraram boa concordância com os resultados experimentais, apresentando para o modelo de difusão de massa, um desvio padrão relativo igual a 8,4% para vapor e ar e 6,1% para vapor e hélio. Para o modelo de condutância na transferência de massa, obteve-se um desvio padrão relativo igual a 6,4% para vapor e ar e 3,2% para vapor e hélio.

O estudo do desempenho de condensadores verticais projetados para operarem com altas concentrações de gases não-condensáveis foi realizado por Dehbi e Guentay (1997), que propuseram um modelo analítico que considera a transferência de calor no lado de resfriamento do tubo condensador (secundário). Partindo-se do balanço na conservação de quantidade de movimento, incluindo os efeitos da tensão interfacial. A analogia de transferência de massa e calor é utilizada para o cálculo da taxa de condensação de vapor na parede interna do tubo. A transferência de calor para o secundário é modelada para considerar o resfriamento por escoamento livre (convecção natural) ou forçado. Simulações foram parametrizadas para determinar o impacto no desempenho do tubo condensador, de importantes fatores tais como a concentração de gás na mistura,

a vazão da mistura na entrada do tubo e a pressão total do sistema. As simulações teóricas foram comparadas com os dados experimentais de Kuhn et al. (1995), apresentando boa concordância. A observação experimental mostra a importância de se considerar a transferência de calor no lado secundário do condensador, uma vez que a temperatura da parede do tubo varia significativamente ao longo do comprimento vertical do tubo.

Park e No (1999) desenvolveram uma seção de teste para a condensação de vapor em um tubo vertical na presença de ar, onde diversos experimentos foram realizados para a obtenção de um banco de dados confiável, no intuito de validar uma correlação empírica de condensação para ser utilizada no código RELAP5/MOD3.2. Os dados experimentais também foram comparados com os modelos “*default*” e “*alternativo*” de condensação do RELAP5/MOD3.2. O modelo “*alternativo*” utiliza a correlação de Nusselt (1916) modificada por Vierow e Schrock (1991). O modelo “*default*” adota o maior valor entre as correlações de Nusselt (1916) e Shah (1979), utilizando-o no método de difusão de Colburn-Hougen (1934), quando há gases não-condensáveis presentes na condensação de vapor. Os experimentos demonstraram que os coeficientes de transferência de calor aumentam com as diminuições, na entrada do tubo, da concentração de ar na mistura e da temperatura de saturação do vapor na mistura e, praticamente não se alteram com a variação do número de Reynolds da mistura, na entrada do tubo. A correlação empírica desenvolvida, baseada no fator de degradação de Vierow e Schrock (1991), mostrou razoáveis resultados quando comparados com os dados experimentais obtidos na seção de teste, apresentando um desvio padrão relativo igual a 22,3%. Os resultados estimados experimentalmente mostram boa concordância em relação aos modelos “*default*” e “*alternativo*” quando, respectivamente, há baixa concentração em massa de ar (10%) com elevado número de Reynolds da mistura (20.000) e elevado número de Reynolds da mistura (20.000), exceto na região central do tubo condensador.

No e Park (2002), baseados na analogia entre a conservação de quantidade de movimento e a transferência de calor e de massa, desenvolveram um modelo iterativo para a condensação de vapor na presença de ar para um tubo condensador vertical, onde duas fronteiras foram simuladas separadamente.

Para a fronteira do condensado, utilizou-se o modelo de filme de Blangetti et al. (1982) para o cálculo dos coeficientes de transferência de calor do filme locais, onde a espessura do filme é calculada com método de Muñoz-Cobo et al. (1996). Para a fronteira da mistura vapor e ar, foi desenvolvido o modelo iterativo, baseado no balanço de energia na interface entre o condensado e o ar. Para eliminar a complexidade causada pela iteração, um modelo não-iterativo foi proposto, na forma de uma correlação, que considera parâmetros não-dimensionais, como o número de Nusselt, o número de Jakob, o número de Stanton e os números de Reynolds e de Prandtl para a mistura de vapor e ar. A comparação do modelo não-iterativo com o modelo iterativo indica excelente concordância ao longo do comprimento total da seção de teste, apresentando um desvio padrão relativo igual a 7,9%. O modelo não-iterativo, quando comparado com os dados experimentais obtidos por Park e No (1999), mostrou razoável concordância. O modelo não-iterativo também foi validado por meio da comparação com os resultados experimentais de Siddique et al. (1993) e Kuhn (1995), indicando boa concordância.

Um modelo teórico foi desenvolvido por Maheshwari et al. (2004), para estudar o coeficiente de transferência de calor local na condensação de vapor na presença de ar, com escoamento turbulento descendente, para um tubo condensador vertical. A mistura de vapor e ar é modelada utilizando a analogia de transferência de calor e massa. O coeficiente de transferência de calor no filme de condensado é calculado por meio da equação de Nusselt, adotando-se o fator de McAdams (1954) que, também foi utilizado por Siddique et al. (1994) para considerar os efeitos de “waviness” na transmissão de calor no filme de condensado e pelo modelo de Blangetti et al. (1982), que permite a correção do escoamento laminar. Adotaram-se também as correlações de Moody (1944) e de Wallis (1969), que consideram os efeitos de “waviness” na interface de vapor e ar. Os resultados calculados foram comparados com os dados experimentais de Maheshwari et al. (2003), Siddique (1992) e Tanrikut e Yesin (1998), apresentando razoáveis resultados. Para altos valores de número de Reynolds da mistura de vapor e ar (± 90.000), há um aumento do coeficiente de transferência de calor na condensação devido ao aumento da turbulência na interface vapor-ar e filme de líquido.

Testes experimentais envolvendo a transferência de calor na condensação de vapor por filme e por gotas, variando-se a concentração de ar presente na mistura de vapor e ar, em placas verticais, foram realizados por Chung et al. (2004). Os resultados dos testes para condensação por filme, utilizando-se pequena vazão de vapor puro, mostram boa concordância quando comparados com a correlação de Nusselt (1916). As taxas de transferência de calor na condensação de vapor puro por gotas mostraram ser de três a seis vezes maiores que as taxas de transferência de calor na condensação de vapor puro por filme. Nos casos de misturas de vapor e ar, as taxas de transferências de calor na condensação por filme e por gotas apresentam resultados bem similares, indicando que a transferência de calor na condensação por gotas pode ser representada, com boa concordância, por correlações de transferência de calor na condensação por filme.

Um modelo bidimensional, em regime permanente, para um tubo vertical condensando uma mistura vapor e gás não-condensável foi realizado por Revankar e Pollock (2005). Os valores calculados do coeficiente de transferência de calor para vapor puro são comparados com os resultados experimentais (Jakob, 1936; Goodykoontz e Dorsch, 1966), indicando razoável concordância. Os perfis axiais e radiais da concentração em massa de não-condensável e das temperaturas na mistura apresentam uma diminuição da transferência de calor devido ao acúmulo de não-condensáveis na interface vapor e filme de condensado.

Oh e Revankar (2005) investigaram os efeitos dos gases não-condensáveis em um sistema de transferência de calor por condensação de vapor em um tubo vertical em condições de escoamento forçado. O projeto dessa seção de teste é baseado em um sistema passivo de condensação da contenção em um reator avançado, tipo BWR (GE, 1992). O desempenho do condensador foi avaliado com o aumento da concentração de ar no escoamento do vapor, indicando que o coeficiente de transferência de calor na condensação e a taxa de transferência de calor diminuem com a presença do ar. A taxa de transferência de calor por condensação é melhorada pelo aumento na vazão de vapor e pelo

aumento da pressão do sistema. O coeficiente de transferência de calor aumenta com maiores valores de vazão de vapor e, diminui com a pressão no sistema.

Wu e Vierow (2006) estudaram experimentalmente a transferência de calor na condensação de uma mistura de vapor e ar em um trocador de calor horizontal, onde a estratificação do condensado e a natureza multidimensional do fenômeno são características que aumentam a complexidade do fenômeno. Os gradientes de temperatura foram medidos localmente para investigação das características assimétricas da transferência de calor no perímetro da seção transversal do tubo condensador. Os coeficientes de transferência de calor na condensação são muito maiores na parte superior do tubo horizontal do que na inferior e o aumento da concentração de ar na mistura reduz significativamente a taxa de transferência de calor.

De forma geral, todos os trabalhos selecionados fornecem resultados que são utilizados até hoje. Os trabalhos experimentais e analíticos mostram que o principal efeito do gás não-condensável na condensação, no interior de tubos e placas verticais e tubos horizontais, é a diminuição do coeficiente de transferência de calor.

Os resultados mostrados foram obtidos em uma extensa faixa de parâmetros, tais como: concentração de gás na mistura de vapor e de gás não-condensável, nível de pressão, diferença de temperatura entre a mistura de vapor e de gás não-condensável e a parede da superfície. Verificou-se que pequenas concentrações de gases não-condensáveis podem ter um efeito considerável no coeficiente de transferência de calor. Um aumento na concentração de gás não-condensável acentua a diminuição do coeficiente de transferência de calor. Observa-se, também, a diminuição do coeficiente de transferência de calor quando o sistema opera a baixas pressões.

A redução no coeficiente de transferência de calor é devida totalmente à resistência difusiva que ocorre na região de fronteira da interface líquido e mistura de vapor e de gás não-condensável. Quando se compara o escoamento laminar e forçado (Número de Reynolds) de uma mistura de vapor e de gás não-

condensável, observa-se que o escoamento laminar apresenta menores valores para os coeficientes de transferência de calor, enquanto que no escoamento forçado, os coeficientes de transferência de calor são maiores. Os modelos analíticos desenvolvidos apresentaram boa concordância com os resultados experimentais obtidos.

3.1 Descrição do circuito experimental

A FIG. 3.1 indica o esquema da BCN que foi projetada nos moldes de um sistema passivo de remoção de calor de emergência (*PEHRS*) de um reator PWR avançado de III geração (Baptista Filho e Macedo, 2002).

FIGURA 3.1 – Bancada de Circulação Natural – BCN

A BCN está instalada no galpão do “Loop – 70” (Circuito Experimental de Água Pressurizada do Centro de Engenharia Nuclear), montada sobre a própria estrutura metálica do “Loop – 70”. A bancada está posicionada entre a

lateral da estrutura metálica do circuito de água pressurizada e a oficina/sala de controle, conforme a planta do galpão, indicada esquematicamente na FIG. 3.2.

FIGURA 3.2 – Planta do Galpão do Loop – 70 / Localização Física da BCN

A BCN contém um aquecedor elétrico que é a fonte quente do sistema, um trocador de calor constituído por dois tubulões horizontais, um superior e outro, inferior, interligados por dezoito tubos verticais imersos em um tanque de água, que é alimentado por gravidade a partir de um grande reservatório elevado e uma linha de desvio, não utilizada nesse trabalho (Macedo et al., 2004).

A FIG. 3.3 mostra o circuito primário, que é constituído pelo aquecedor elétrico, perna quente, trocador de calor e perna fria, que é preenchido com água por meio da válvula esfera C. O circuito secundário, que tem a função de resfriamento do trocador de calor, é alimentado por gravidade a partir de um reservatório elevado, sendo que sua vazão (m_s) é controlada por uma válvula globo e medida pelo rotâmetro secundário, conforme indicado na FIG. 3.4. O controle do preenchimento de água no primário é feito por um visor de nível localizado no vaso de expansão.

Quando a BCN está em operação, a vazão no circuito externo, compreendido pelo aquecedor elétrico, perna quente, trocador de calor e perna fria, é representada por m (ver FIG. 3.1).

FIGURA 3.3 – Circuito Primário da BCN – Aquecedor Elétrico, Perna Quente, Trocador de Calor, Perna Fria

A tubulação utilizada é de cobre apresentando 22 mm de diâmetro externo e 0,6 mm de espessura. O circuito foi montado com conexões soldadas e uniões roscadas de $\frac{3}{4}$ pol. compatíveis com as válvulas, instrumentos, e com os bocais dos equipamentos. O aquecedor elétrico e todas as tubulações foram isolados termicamente com calhas de lã de vidro de 25 mm de espessura, encamisadas com chapas de alumínio corrugado. A isolação térmica do trocador de calor foi feita com placas retangulares de lã de vidro de espessura igual a 25 mm, que são fixadas por meio de tiras de alumínio rebitadas.

O aquecedor elétrico é do tipo passagem direta, com tubos e conexões de aço inoxidável e é equipado com três resistências de imersão em “U” com flange, elementos tubulares blindados em aço inoxidável e um termostato de segurança. Inicialmente, o aquecedor elétrico, embora projetado para 10 kW, tinha sua potência fornecida ao sistema limitada a 2.400 W em operação com escoamento monofásico (Macedo, 2001).

FIGURA 3.4 – Circuito Secundário – BCN

O trocador de calor foi projetado com base em resfriadores de aplicação naval e em conceitos considerados no projeto do reator avançado AP600 (Westinghouse, 2007). Foi totalmente construído em cobre, com dois tubulões horizontais de 44,45 mm de diâmetro externo (1 $\frac{3}{4}$ pol.) e 990 mm de comprimento, interligados por 18 tubos verticais de 9,53 mm de diâmetro externo (3/8 pol.) e 590 mm de comprimento imersos em um reservatório com volume de 0,202 m³, conforme indicado na FIG. 3.5.

As principais características geométricas do trocador de calor são mostradas na TAB. 3.1.

TABELA 3.1 – Características Geométricas do Trocador de Calor

Dimensões Principais Externas	1,0 x 1,0 x 0,25 m
Volume de Água – Primário	2,8 x 10 ⁻³ m ³
Volume de Água – Secundário	0,202 m ³
Área de Transferência de Calor nos Tubulões (ϕ 44,45 mm)	0,2793 m ²
Área de Transferência de Calor nos Tubos (ϕ 9,53 mm)	0,3232 m ²

FIGURA 3.5 – Trocador de Calor - BCN

Desenvolveu-se também um sistema auxiliar de vazão forçada, constituído por uma bomba hidráulica associada em série a um rotâmetro calibrado, que pode ser interligado à BCN por meio das válvulas de esfera C e E (ver FIG. 3.1), com o objetivo do estabelecimento de uma vazão forçada ao longo do circuito para a realização de operações de calibração do sinal de potência no aquecedor elétrico (ver Apêndice A) e para a aferição da vazão registrada pelo medidor de vazão magnético (ver Apêndice B).

A FIG. 3.6 mostra esquematicamente o sistema auxiliar de vazão forçada ligado na região inferior da perna fria da BCN, por intermédio das válvulas de esfera C e E.

A FIG. 3.7 mostra o vaso de expansão que tem por finalidade acomodar as variações de volume da água no circuito primário da BCN devido à variação de temperatura. O vaso é feito de um tubo de PVC, fechado nas extremidades, com 101,6 mm (4 pol.) de diâmetro interno e com comprimento de

800 mm, rosqueado à tubulação da linha de surto, e permite a expansão do fluido em até $6,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ (6,5 l).

FIGURA 3.6 – Sistema Auxiliar de Vazão Forçada - BCN

FIGURA 3.7 – Vaso de Expansão – BCN

3.2 Modificações realizadas na BCN

Para permitir a investigação e análise do comportamento de um *PEHRS* em condições de escoamento bifásico envolvendo condensação de vapor na presença de gases não-condensáveis, a BCN foi modificada em seu projeto original, que previa sua operação apenas em regime de escoamento monofásico. Macedo (2001) desenvolveu um extenso trabalho analítico e experimental sobre circulação natural utilizando a BCN com regime de escoamento monofásico. As modificações são detalhadas a seguir.

3.2.1 Aumento da potência elétrica

Para operar a BCN em condições de escoamento bifásico e para garantir um aumento na produção de vapor na perna quente, foi realizada uma alteração na potência do aquecedor elétrico, passando de 2.400 W para 4200 W. Originariamente, três resistências eram utilizadas e, com a aplicação de uma tensão de 110 V, dissipavam 2.400 W. Com a mudança, foram adotadas duas resistências sob tensão elétrica de 220 V, dissipando 4.200 W no aquecedor. A calibração do sinal de potência, que é um sinal de tensão (V_a) que controla a potência fornecida pelo aquecedor elétrico, é detalhada no Apêndice A.

3.2.2 Substituição do medidor de vazão magnético - MVM

Quando a BCN era operada em condições de escoamento monofásico, com potência até 2.400 W, utilizava na região superior da perna fria (ver FIG. 3.1) do circuito um medidor de vazão tipo magnético (MVM), marca Sparling TIGERMAG, modelo FM 625, diâmetro 12, 7 mm ($\frac{1}{2}$ pol.), ajustado para a faixa de vazão máxima de 0,1 kg/s e com transmissor remoto com sinal de saída de 4 a 20 mA (Macedo, 2001). Devido a observação sistemática do “zero” do MVM depender da temperatura da bobina do sensor, induzindo a um erro de medida, o MVM foi substituído por um de marca Krohne Conaut, também tipo magnético, modelo IFS4000W/6, diâmetro 10 mm e calibrado para uma faixa de vazão

máxima de 0,08 kg/s (300 l/h) e com transmissor remoto com sinal de saída de 4 a 20 mA (Krohne Conaut, 2003). Associou-se uma resistência de 250 Ω em série ao sinal de saída do transmissor, modificando-o de 1 a 5 V. O princípio de funcionamento do medidor de vazão magnético é mostrado no Anexo A.

A FIG. 3.8 mostra a fixação tipo *waffer* por flanges do MVM na tubulação da perna fria da BCN. O MVM é composto pelo transmissor remoto com visor de leitura da vazão e o sensor de vazão.

FIGURA 3.8 – Medidor de Vazão Magnético Krohne Conaut – BCN

O Apêndice B mostra em detalhes duas aferições da calibração do medidor de vazão magnético, uma realizada com fluido em temperatura ambiente (25 °C) e a outra com o fluido quente (42 °C).

3.2.3 Termopares

Ao longo da BCN foram instalados 24 termopares, sendo 5 de marca OMEGA, do tipo T (Cobre – Constantan) com 1,5 mm de diâmetro e 19 do tipo K (Cromel – Alumel), sendo 12 de marca IOPE com 1,5 mm de diâmetro e 7 de marca OMEGA com 0,5 mm de diâmetro (OMEGA, 1987; IOPE, 2005). A

calibração dos 12 termopares da marca IOPE tipo K de 1,5 mm de diâmetro para uma faixa de trabalho de 20 a 95 °C é apresentada no Apêndice D.

As características principais dos termopares são indicadas na TAB. 3.2, conforme o número de identificação de cada termopar na BCN.

TABELA 3.2 – Características dos Termopares - BCN

Número de Identificação do Termopar	Tipo	Diâmetro (mm)	Instalação	Localização na BCN
TC1	T	1,5	fluido	Primário
TC2	K	0,5	parede	Primário
TC3	K	0,5	parede	Primário
TC4	K	0,5	parede	Primário
TC5	T	1,5	fluido	Primário
TC6	K	1,5	fluido	Primário
TC7	K	1,5	fluido	Primário
TC8	K	1,5	fluido	Primário
TC9	K	1,5	fluido	Primário
TC10	K	1,5	fluido	Primário
TC11	K	1,5	fluido	Primário
TC12	K	1,5	fluido	Primário
TC13	K	0,5	parede	Primário
TC14	T	1,5	fluido	Primário
TC15	K	0,5	parede	Primário
TC16	K	0,5	parede	Primário
TC17	T	1,5	fluido	Primário
TC18	K	1,5	fluido	Primário
TC21	T	1,5	fluido	Secundário
TC22	K	0,5	parede	Secundário
TC23	K	1,5	fluido	Secundário
TC24	K	1,5	fluido	Secundário
TC25	K	1,5	fluido	Secundário
TC26	K	1,5	ambiente	Temp. Ambiente

As FIG. 3.9 e 3.10 mostram de forma esquemática, respectivamente a localização dos termopares nos circuitos primário e secundário da BCN.

FIGURA 3.9 – Localização dos Termopares no Circuito Primário – BCN

FIGURA 3.10 – Localização dos Termopares no Circuito Secundário – BCN

3.2.4 Sensores de pressão

Para se medir a pressão em locais determinados na BCN, foram instalados dois sensores de pressão da marca Validyne, modelo DP 15. O sinal de saída varia de ± 10 V. Os sensores de pressão Validyne caracterizam-se por apresentar excelente qualidade para trabalhos em laboratórios e, principalmente pelas respostas extremamente rápidas, justificando sua utilização na BCN em condições de escoamento bifásico (Validyne, 2005).

O princípio de funcionamento e as principais características do sensor de pressão Validyne são apresentados no Anexo B.

O sensor de pressão P1, calibrado para uma faixa de pressão de 5.000 mm de coluna de água, está instalado na saída do aquecedor elétrico e tem por objetivo medir a flutuação de pressão na base da perna quente, conforme mostrado na FIG. 3.11.

FIGURA 3.11 – Sensor de Pressão P1 – BCN

A FIG. 3.12 mostra o sensor de pressão P2 que está instalado no nível do tubulão inferior do trocador de calor e medirá a pressão no tubulão superior do trocador de calor, sendo calibrado para uma faixa de pressão de 2.000 mm de coluna de água.

FIGURA 3.12 – Sensor de Pressão P2 – BCN

As calibrações e as aferições dos sensores de pressão P1 e P2 são apresentadas, respectivamente nos Apêndice C e F.

3.3 Instrumentação

Para se obter a variação e o comportamento das temperaturas no interior (primário e secundário) do trocador de calor, foi projetado um dispositivo para fixação de termopares (DFT), que é mostrado na FIG. 3.13. O DFT é composto por um conector com tampa usinados em latão, um grampo em “U” de aço galvanizado com um tirante para fixação por meio de porcas sextavadas e dois anéis O’ring, um com espessura igual a 1,5 mm e o outro igual a 4 mm.

FIGURA 3.13 – Esquema do DFT

Testes preliminares realizados em um “protótipo” de DFT, indicaram que suportam uma pressão absoluta da ordem de 133 kPa, como é mostrado na FIG. 3.14.

FIGURA 3.14 – Teste com Protótipo de DFT

A FIG. 3.15 mostra a fixação dos termopares TC6, TC7 e TC8 na superfície do tubulão superior (diâmetro de 1 3/4 pol.) do trocador de calor por meio dos DFT's 1, 3 e 4. Os grampos de fixação em “U” fazem com que os anéis O’ring apropriados se comprimam em um conector de latão e impeçam o vazamento de fluido. Observa-se que o DFT2 tem a função de respiro no tubulão superior do trocador de calor. Os termopares a serem utilizados são da marca IOPE™, tipo K, diâmetro 1,5 mm e são calibrados para uma faixa de trabalho de 20 a 90 °C, mostrado no Apêndice D.

FIGURA 3.15 – DFT's 1, 2, 3 e 4 – Trocador de Calor

Os locais adotados para a colocação dos DFT's no tubulão superior do trocador de calor são mostrados esquematicamente na FIG. 3.16. No total são 8 DFT's. Para o primário do trocador de calor foram escolhidas 7 posições para uso de termopares e, como já comentado anteriormente, uma será utilizada para respiro de ar no tubulão (“sangrar” o ar contido no tubulão – DFT 2). Os DFT's 1, 3, 5 e 8 permitem posicionar os termopares na superfície interna inferior do tubulão superior. Os DFT's 4 e 6 posicionam os termopares na região central dos tubos de diâmetro 3/8 pol.. O DFT 7 permite posicionar o termopar na saída do trocador de calor (tubulão inferior). Para se medir as temperaturas no secundário

do trocador de calor, foram utilizados 3 termopares (TC23, TC24 e TC25), que estão imersos no fluido e suas posições em relação à altura, comprimento e largura do trocador de calor, poderão ser modificadas (ver FIG. 3.10).

FIGURA 3.16 – Localização dos DFT's com Termopares no Trocador de Calor

3.4 Dispositivos experimentais

Esse sistema possibilitará a reprodução na BCN dos fenômenos esperados na atuação de um *PEHRS* do reator integrado IRIS ou de qualquer outro reator avançado refrigerado com água leve, após um acidente de perda de refrigerante que provoque o ingresso de não-condensáveis no circuito.

A esse sistema estão associados o nível inicial de ar e a medida da pressão no trocador de calor, permitindo a caracterização do escoamento na presença de gás não-condensável (ar) por intermédio da vazão (medidor de vazão magnético), temperatura (termopares) e da pressão (sensor de pressão

diferencial). A FIG. 3.17 indica a posição do sistema de injeção de ar, do nível e do sensor de pressão diferencial (P2) na parte superior da BCN e a rotina experimental para a medição do nível inicial de ar no trocador de calor e da pressão inicial no tubulão superior do trocador de calor. O princípio utilizado para a determinação do nível inicial de ar no trocador de calor é o de “vasos comunicantes”.

FIGURA 3.17 – Injeção de Ar no Trocador de Calor – (A) Condição Inicial – (B) Preenchimento com Água – (C) Nível e Sensor P2 – (D) Pressão do Sistema

A medição do nível deve observar os procedimentos detalhados a seguir. As válvulas A (DFT2), B e C encontram-se abertas, conforme mostrado na FIG. 3.17 (A). O vaso de expansão é preenchido com água e a correspondente altura de água será indicada no nível (ver FIG. 3.17 (B)). Para se efetuar a medida da pressão diferencial (P2) em relação ao tubulão superior do trocador de calor, nivela-se a coluna de água negativa (-) do sensor de pressão com a linha de centro do tubulão superior do trocador de calor, por intermédio do “sangrador” do sensor de pressão.

Em seguida, por intermédio das válvulas B ou C, permite-se que a água escoe para fora da tubulação, fazendo com que a altura da coluna de água seja o mesmo no vaso de expansão, no trocador de calor e na régua de nível (ver FIG. 3.17 (C)). As válvulas B e C são fechadas. A mangueira da coluna positiva (+) do sensor de pressão deve ser conectada à válvula A (DFT2) e, o vaso será novamente completado com água no nível desejado, estabelecendo uma pressão diferencial (ΔP) a ser medida no sensor P2 (ver FIG. 3.17 (D)). A altura de água que for medida na régua de nível, será a mesma que no tubulão superior do trocador de calor.

Os volumes iniciais e finais de água e de ar podem ser calculados, uma vez que a geometria do trocador de calor é conhecida.

3.5 Controle e aquisição de dados

Diferente dos modelos industriais, o controlador de potência foi especialmente projetado visando aplicações experimentais nas quais a contínua informação da potência fornecida é necessária para registro ou para ações de controle. Considerou-se ainda uma maior preocupação com a segurança dos pesquisadores envolvidos no trabalho.

A variação de potência é feita por meio de um sinal de tensão gerado na interface gráfica e enviado ao controlador pela placa de aquisição de dados. Esse sinal pode ser modulado de 0 a 7,5 V. O ajuste de potência é tiristorizado com o controle dos disparos feito por um circuito integrado desenvolvido para essa aplicação. A isolação da rede para o aquecedor é feita por um transformador isolador de potência especificado para 5 kVA. O sistema de proteção é baseado no intertravamento com contatos em série ao comando de um contator que ativa a alimentação 220 VAC monofásica. As condições consideradas para desligamento da alimentação de potência foram a temperatura da água acima de 110 °C e a abertura da porta do controlador de potência. O controlador desenvolvido pode trabalhar com cargas resistivas tanto em 110 V como em 220 V, devendo ser respeitada apenas a potência máxima.

O controlador de potência recebe o sinal de controle de uma saída do sistema de aquisição de dados que é constituído por uma placa de aquisição de dados da National Instruments, AT-MIO-16E (National, 1995), um computador (PC), um bloco terminal isolado SCXI, um módulo condicionador de sinais SCXI e um bastidor SCXI.

A placa de aquisição de dados possui 8 entradas diferenciais analógicas (16 entradas com terra comum), sinal de entrada de -10 a +10V, selecionável por software, 8 entradas/saídas digitais, taxa de amostragem 100 kS/s, 2 saídas analógicas no intervalo de -10 a +10V configurável via software, resolução (I/O) menor ou igual a 12 bits, com contador/temporizador disponível para acesso a leitura.

O bloco SCXI é formado pelo bloco terminal, por um módulo condicionador de sinais e um bastidor. A fiação da instrumentação é montada no bloco terminal isolado, que é conectado diretamente na parte frontal do módulo condicionador de sinais. Este é acondicionado no bastidor SCXI, e multiplexa todos os sinais em um canal, tal que apenas um cabo é usado para conectar o sistema SCXI à placa de aquisição de dados.

A atuação do condicionador de sinais é controlada via software. Para isso foi utilizado o programa LabVIEW™ 6.1 (National, 2000), que é um ambiente de programação que permite o desenvolvimento de aplicações de instrumentação e controle, aplicações em testes automatizados e aquisição de dados. Suas bibliotecas contêm funções de alto nível para aquisição, análise e apresentação de dados.

A FIG. 3.18 mostra o esquema do sistema de aquisição de dados configurado para os experimentos.

Com o LabVIEW™ 6.1 foi desenvolvido um programa para aquisição, apresentação e armazenamento dos dados da seguinte instrumentação da BCN: 19 termopares tipo K – sinal em mV, 5 termopares tipo T – sinal em mV, medidor

de vazão magnético – sinal de 1 a 5 V, potência do aquecedor – sinal de 0 a 7,5 V e 2 sensores de pressão diferencial – sinal de 0 a 10 V.

FIGURA 3.18 – Sistema de Aquisição de Dados

A tela de interface para utilização do programa pelo usuário é indicada na FIG. 3.19. A tela de interface foi feita de tal modo que as posições de indicação das temperaturas correspondam aos locais de instalação dos termopares no circuito, na forma de um quadro sinóptico, de forma a facilitar a visualização do comportamento do circuito durante sua operação. Antes de iniciar a aquisição de dados, o usuário fornece o valor da escala de vazão que está sendo utilizado no medidor de vazão do circuito, o sinal de tensão (V_a) gerado na interface e enviado ao controlador pela placa de aquisição de dados (0 a 7,5 V) para a determinação da potência aplicada na BCN, a taxa de aquisição, a média desejada de pontos na aquisição e seleciona dois termopares para serem acompanhados de forma gráfica.

O programa permite a operação e acompanhamento dos experimentos sem gravação dos dados ou com a opção de armazenamento em um arquivo definido durante a sua execução. Deve ser fornecido o nome e a localização do arquivo onde serão armazenados os dados e acionar o botão ON (SAVE). O arquivo de saída registra a data, hora de início e fim da gravação, temperaturas em graus Celsius, vazão em l/min., potência do aquecedor em W e pressão em mm de coluna de água. Dessa forma, ao terminar o experimento, os dados poderão ser analisados utilizando-se programas adequados.

FIGURA 3.19 – Tela de Interface - BCN

3.6 Programa computacional “Air_NCL”

Os cálculos dos volumes internos correspondentes às regiões compreendidas pelo aquecedor elétrico, perna quente, trocador de calor, perna fria, linha de surto e vaso de expansão, bem como das massas iniciais e finais de ar e de líquido presentes na BCN, foram realizados por um programa computacional executável denominado *Air_NCL*, desenvolvido no ambiente “*Engineering Equation Solver*” (EES, 2001), que é um *software* largamente utilizado em cálculos de Engenharia.

As massas iniciais de ar e de líquido são calculadas com o circuito em repouso, antes do início do teste com aplicação de potência. As massas finais de

ar e de líquido são calculadas 48h após o término do experimento, com o circuito resfriado e em repouso.

Os volumes internos dos componentes da BCN são calculados, pois toda a geometria do circuito é conhecida.

De acordo com Van Wylen (1976), pode-se considerar o ar como um gás de baixa densidade e, desta forma, o cálculo da massa inicial e final de ar presente no tubulão superior do trocador de calor da BCN foi feito utilizando-se a equação dos gases perfeitos, que é representada por:

$$P_i = \rho_i R_{\text{ar} + \text{vapor}} T_i \quad (3.1)$$

onde P_i é a pressão absoluta (P_2 mais a pressão atmosférica) em Pa, ρ_i é a densidade do ar em kg/m^3 , $R_{\text{ar} + \text{vapor}}$ é a constante do ar, considerando a umidade do vapor e T_i é a temperatura do ar, baseada na média das medidas dos termopares instalados no tubulão superior do trocador de calor (TC6, TC7, TC9 e TC12) em K.

A massa de ar (m_{ar}) é calculada através da relação de densidade do ar, expressa por:

$$m_{\text{ar}} = \rho_i V_i \quad (3.2)$$

onde ρ_i é a densidade do ar em kg/m^3 e V_i é o volume de ar em m^3 .

As massas de líquido na BCN são calculadas por meio dos volumes conhecidos nas regiões do circuito e, pelas suas respectivas densidades da água, baseadas nas temperaturas médias medidas nos termopares do circuito, conforme TAB. 3.3. O programa *Air_NCL* também calcula o nível de ar no trocador de calor (f), as pressões medidas nos sensores P1 em mmH_2O , P2 em Pa e as demais pressões em kPa nas regiões da BCN determinadas em função do nível de água no vaso de expansão e da pressão média nas regiões da BCN

(P_{i1} , P_{i2} , P_{i3} , P_{i4} , P_{i5} , P_{i6} , P_{i7} , P_{i8} , P_{i9}). Os resultados apresentados fornecem a massa de ar em kg, o volume de ar em m^3 , a densidade do ar em kg/m^3 , a massa de água em kg, o volume de água em m^3 , a diferença entre a medida de pressão P_2 e a calculada por meio do nível do vaso de expansão em mm e seu respectivo erro relativo (DN_{v2}) em %, a diferença entre a medida de pressão P_1 e a calculada por meio do nível do vaso de expansão em mm e seu respectivo erro relativo (DN_{v1}) em %. Os dados de entrada (em azul) e os de saída (em vermelho) são apresentados na tela de interface do *Air_NCL*, que é mostrada na FIG. 3.20.

TABELA 3.3 – Regiões e Termopares para Cálculo da Massa de Líquido da BCN

Regiões da BCN	Medida dos Termopares (°C)
A – Aquecedor Elétrico	$T_{i1} = (TC1+TC17)/2$
B – Perna Quente	$T_{i2} = (TC1+TC2+TC3+TC4+TC5)/5$
C – Tubulão Superior do Trocador de Calor	$T_{i3} = (TC6+TC7+TC9+TC12)/4$
D – Tubos Verticais do Trocador de Calor	$T_{i4} = (TC8+TC10)/2$
E – Tubulão Inferior do Trocador de Calor	$T_{i5} = TC11$
F – Trecho Horizontal Superior da Perna Fria	$T_{i6} = (TC13+TC14)/2$
G – Trecho Vertical da Perna Fria	$T_{i7} = (TC13+TC14+TC15)/3$
H – Trecho Horizontal Inferior da Perna Fria	$T_{i8} = (TC15+TC16+TC17)/3$
I – Linha de Surto e Vaso de Expansão	$T_{i9} = TC18$

O nível de ar no trocador de calor (f) é calculado para todos os experimentos simulados no programa *Air_NCL*, tanto com os que apresentam escoamento monofásico como bifásico no circuito experimental. Nos testes onde ocorre escoamento bifásico, o cálculo de f é válido até os instantes anteriores ao estabelecimento da temperatura de saturação (T_{sat}) na saída do aquecedor elétrico da BCN.

O programa computacional *Air_NCL* desenvolvido para os cálculos dos volumes internos das tubulações, do aquecedor elétrico, do trocador de calor e das massas de ar e de líquido presentes na BCN, desenvolvido no ambiente EES para simular as condições iniciais e finais dos experimentos 25% Ar, 50% Ar, 75% Ar e 100% Ar, para NP1 e NP2, é apresentado no Apêndice E.

FIGURA 3.20 – Tela de Interface *Air_NCL*

3.7 Código computacional RELAP5/MOD3.3

Para as simulações dos testes realizados, adotou-se o código computacional RELAP5/MOD3.3, que é considerado, no âmbito nuclear, o melhor código computacional para análise de acidentes e termo-hidráulica (NUREG/CR-5535 – Rev. 1, 2001). O código é baseado em um modelo não-homogêneo, no estado de não-equilíbrio, para duas fases com resolução por um processo numérico parcialmente implícito. São resolvidas simultaneamente oito equações, sendo duas de continuidade (fases líquido e vapor), duas de quantidade de movimento (fases líquido e vapor) e duas de energia (fases líquido e vapor). Há também duas equações constitutivas, que relacionam respectivamente, a massa de não-condensável com a massa de vapor e a massa de vapor com a massa de líquido.

4 RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISES

Os experimentos em circulação natural, com a presença de gás não-condensável (ar), consistiram de um transitório de aumento de potência, partindo-se da condição inicial de fluido estacionário na temperatura ambiente. Os testes foram realizados na parte externa do circuito, considerando o aquecedor elétrico, a perna quente, o trocador de calor e a perna fria (ver FIG. 3.1) e foram divididos em dois níveis (degraus) diferentes de potência aplicada pelo aquecedor elétrico.

O primeiro e o segundo níveis de potência foram denominados, respectivamente de NP1 e de NP2, correspondendo NP1, em média, a 1600 W e NP2, a 2500 W.

A TAB 4.1 fornece o nível de potência, o fluxo de calor (ϕ) e os testes realizados.

TABELA 4.1 – Nível de Potência – Fluxo de Calor (ϕ) – Testes

Nível de Potência Médio	Testes
NP1 1600 W $\phi = 5000 \text{ W/m}^2$	25% Ar
	50% Ar
	75% Ar
	100% Ar
NP2 2500 W $\phi = 7813 \text{ W/m}^2$	25% Ar
	50% Ar
	75% Ar
	100% Ar

Na fase conceitual deste trabalho foi prevista a execução de um terceiro nível de potência (NP3), com a aplicação de 3500 W. Com a experiência adquirida na operação da BCN, observou-se que para valores de potência acima de 2500 W, o processo de condensação de vapor no trocador de calor gera intensa movimentação de fluidos, causando vibrações ao longo de todo o circuito experimental. Como a maioria da estrutura da BCN é constituída de tubos de

cobre unidos por solda de estanho e chumbo, optou-se pela não realização da etapa NP3, para não danificar o circuito experimental, sendo suficiente efetuar as etapas NP1 e NP2 para a compreensão dos processos termo-hidráulicos inerentes à condensação na presença de gás não-condensável.

Após detalhada e criteriosa análise dos experimentos realizados, conclui-se que todos os fenômenos termo-hidráulicos relacionados a um sistema de circulação natural na presença de não-condensável na BCN, ocorrem nos primeiros 5000 s dos transitórios.

A TAB. 4.2 indica os experimentos realizados com NP1 e NP2, a potência média aplicada, a temperatura ambiente média no decorrer dos testes e a vazão de resfriamento no trocador de calor da BCN.

TABELA 4.2 – Nível de Potência – Testes – Potência Aplicada – Temperatura Ambiente – Vazão de Resfriamento

Nível de Potência	Testes	Potência Média Aplicada (W)	Temperatura Ambiente Média (°C)	Vazão de Resfriamento (kg/s)
NP1	25% Ar	1660	21	0,022
	50% Ar	1580	19	0,022
	75% Ar	1580	19	0,022
	100% Ar	1620	22	0,022
NP2	25% Ar	2579	21	0,035
	50% Ar	2537	20	0,035
	75% Ar	2596	20	0,035
	100% Ar	2445	20,5	0,035

A seguir, são apresentadas as análises termo-hidráulicas envolvendo os dados obtidos nos testes realizados, como as vazões estabelecidas no trecho externo da BCN (m), as temperaturas de entrada (TC17) e as de saída (TC1) do aquecedor elétrico, as temperaturas do primário e do secundário do trocador de calor e as pressões de saída no aquecedor elétrico (P1) e a do tubulão superior do trocador de calor (P2).

As análises são feitas em função das concentrações iniciais de não-condensável nos experimentos, levando-se em conta os níveis de potência aplicados. Cada teste realizado apresenta uma massa inicial de ar conhecida.

A FIG. 4.1 indica os nomes dos testes, que representam as porcentagens da seção transversal do tubulão superior do trocador de calor ocupadas pelo ar, nas condições iniciais dos experimentos.

FIGURA 4.1 – Testes Experimentais – Concentrações Iniciais de Não-Condensável

4.1 Testes 25% Ar – NP1 e NP2

As condições iniciais dos testes 25% Ar com NP1 e NP2 são apresentadas na TAB. 4.3, relacionando o nível de potência aplicado, concentração inicial de não-condensável, potência efetivamente aplicada, nível inicial de não-condensável no tubulão superior do trocador de calor, nível inicial de líquido no vaso de expansão e a massa e o volume iniciais de ar. O programa computacional *Air_NCL* calcula as variáveis massa e volume iniciais de ar.

A FIG. 4.2 indica as temperaturas de entrada (TC17) e de saída (TC1) do aquecedor elétrico e as vazões ($\dot{m}$) no circuito para os testes 25% Ar, com

NP1 e NP2, sendo que a duração do transitório é de 33.000 s. Os resultados obtidos para as temperaturas TC1, TC17 e para as vazões, no final do transitório, são mostrados na TAB. 4.4.

TABELA 4.3 – Condições Iniciais dos Testes 25% Ar – NP1 e NP2

Nível de Potência	Testes	Potência Aplicada (W)	Nível Inicial de Ar (mmH ₂ O)	Nível Inicial de Líquido no Vaso de Expansão (mmH ₂ O)	Massa Inicial de Ar (kg)	Volume Inicial de Ar (m ³)
NP1	25% Ar	1660	9,0	173,0	$2,593 \cdot 10^{-4}$	$2,297 \cdot 10^{-4}$
NP2	25% Ar	2579	9,0	173,0	$2,596 \cdot 10^{-4}$	$2,297 \cdot 10^{-4}$

FIGURA 4.2 – Temperaturas TC1 e TC17, Vazões– NP1 e NP2

Para dois níveis distintos de potência aplicados (NP1 e NP2), com os testes apresentando a mesma concentração de não-condensável (25% Ar), os

valores de temperaturas TC1 e TC17, de vazão são maiores para um nível de potência aplicado maior (NP2), no final do transitório.

TABELA 4.4 – TC1 e TC17 – Vazões – NP1 e NP2 – 33.000 s

Nível de Potência	Testes	TC1 (°C)	TC17 (°C)	Vazão (kg/s)
NP1	25% Ar	54,4	31,5	0,017
NP2	25% Ar	61,1	32,8	0,021

Os instantes iniciais dos testes 25% Ar (até 1500 s) são indicados na FIG. 4.3, comparando as temperaturas TC1, TC17 e vazões, respectivamente com NP1 e NP2.

FIGURA 4.3 – Transitórios Iniciais – Testes 25% Ar – NP1 e NP2

No início dos transitórios, as vazões dos testes 25% Ar apresentam um atraso de 126 e 84 s, respectivamente para NP1 e NP2, correspondendo ao processo de convecção natural nas proximidades das resistências do aquecedor elétrico, sendo ainda incipiente para o estabelecimento de vazão no circuito. Nesse período inicial, o líquido frio presente no aquecedor elétrico em maior quantidade, quando comparado com o líquido aquecido pelas resistências elétricas, impede o estabelecimento de circulação natural pela BCN, conforme mostrado na FIG. 4.4. Considera-se também a precisão do MVM, que apresenta uma incerteza de medida igual $\pm 9.10^{-5}$ kg/s, correspondente a $\pm 0,11$ % do fundo de sua escala ($300\text{l/h} \approx 0,08$ kg/s), de acordo com Krohne Conaut (2003).

FIGURA 4.4 – Convecção Natural – Aquecedor Elétrico

A análise das temperaturas TC1 também indica o processo de convecção natural no aquecedor elétrico, indicando um atraso inicial de 77 e 49 s, respectivamente para NP1 e NP2, correspondendo ao tempo necessário para as

linhas de escoamento do líquido aquecido no aquecedor elétrico (ascendente) alcançar o termopar TC1.

Observa-se um comportamento oscilatório inicial para as temperaturas TC1, TC17 e para as vazões, que é característico para todas as variáveis (temperatura, vazão e pressão) dos circuitos experimentais que representam passivos de remoção de calor de emergência de reatores avançados com escoamento monofásico, de acordo com Macedo (2001) e Macedo e Baptista Filho (2004).

O comportamento oscilatório inicial é caracterizado pela aceleração do fluido, que a princípio está numa mesma temperatura inicial. Quando a potência é fornecida à BCN, pelo aquecedor elétrico, a temperatura da perna quente (TC1) começa a aumentar, fazendo com que o fluido se acelere (fase a), alcançando o tubulão superior do trocador de calor (fase b). Assim que a velocidade do fluido atinja um valor máximo, ela começa a diminuir suavemente quando o fluido mais aquecido alcançar a perna fria (fase c). Com a chegada de fluido quente à entrada do aquecedor elétrico, a temperatura TC1 começa a aumentar novamente, estabilizando em regime permanente.

As variações geométricas da BCN, como os trechos horizontais e verticais, determinam o comportamento oscilatório inicial. O esquema de aceleração do fluido na BCN é indicado na FIG. 4.5.

FIGURA 4.5 – Acelerações do Fluido na BCN

A TAB. 4.5 relaciona os valores máximos alcançados pelas temperaturas TC1, TC17 e vazões, apresentando também os respectivos instantes em que acontecem nos períodos iniciais dos testes 25% Ar, para NP1 e NP2. As temperaturas TC17 praticamente não apresentam valores máximos nos transitórios iniciais, apresentando uma tendência de crescimento até alcançar o regime permanente. Para NP2, a temperatura TC17 possui um patamar mais elevado, no período oscilatório inicial, decorrente da maior temperatura TC1 alcançada.

TABELA 4.5 – Valores Iniciais Máximos de Vazões, TC1 – NP1 e NP2

Nível de Potência	Testes	TC1 (°C)	t_{TC1} (s)	Vazão (kg/s)	$t_{vazão}$ (s)
NP1	25% Ar	45,1	651	0,016	623
NP2	25% Ar	52,5	490	0,020	483

Para a mesma concentração inicial de não-condensável (25% Ar) apresentam-se valores iniciais maiores de temperatura TC1 e de vazão com a aplicação de um maior nível de potência (NP2). Os instantes em que ocorrem os valores máximos de temperatura TC1 e de vazão são menores no teste realizado com um nível maior de potência (NP2).

Os períodos oscilatórios iniciais para as variáveis podem ser quantificados pelo intervalo de tempo existente entre o início do transitório e o valor mínimo da variável após ela ter alcançado o seu máximo inicial (ver FIG. 4.3). Os períodos oscilatórios iniciais são apresentados na TAB. 4.6, relacionando os níveis de potência aplicados, os testes e os intervalos de tempo aproximados para as temperaturas TC1 e para as vazões.

TABELA 4.6 – Períodos Iniciais – Testes 25% Ar – NP1 e NP2

Nível de Potência	Testes	Período Inicial da Vazão (s)	Período Inicial de TC1 (s)
NP1	25% Ar	910	938
NP2	25% Ar	707	700

A TAB. 4.7 mostra as taxas de aumento, no período inicial de oscilação, para os valores de temperatura TC1, TC17 e para as vazões, nos testes 25% Ar, com NP1 e NP2.

TABELA 4.7 – Taxas de Aumento – TC1, TC17 e Vazões – NP1 e NP2

Nível de Potência	Testes	Taxa de Aumento TC1 (°C/s)	Taxas de Aumento TC17 (°C/s)	Taxa de Aumento Vazão (kg/s ²)
NP1	25% Ar	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$6,7 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$
NP2	25% Ar	$7,0 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-5}$

Os resultados obtidos indicam que as taxas iniciais de aumento para as temperaturas TC1, TC17 e para a vazão são maiores no teste com a utilização do nível maior de potência (NP2).

Após a temperatura TC1 e a vazão terem alcançado seus valores máximos iniciais, observa-se uma tendência de queda mais suave, para o período oscilatório inicial, no teste realizado com menor potência (NP1). As taxas de diminuição das variáveis TC1 e das vazões são apresentadas na TAB. 4.8.

TABELA 4.8 – Taxas de Diminuição – TC1 e Vazão – NP1 e NP2

Nível de Potência	Testes	Taxa de Diminuição TC1 (°C/s)	Taxa de Diminuição Vazão (kg/s ²)
NP1	25% Ar	$8,7 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$
NP2	25% Ar	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$

Há um atraso da curva de temperatura TC1 em relação à curva de vazão, para os valores máximos alcançados no período oscilatório inicial, igual a 28 e 7 s, respectivamente para NP1 e NP2, determinando que para a mesma concentração inicial de não-condensável (25% Ar), tem-se um menor atraso entre os valores máximos de TC1 e vazão com a utilização no teste de um maior nível de potência (NP2).

A FIG. 4.6 apresenta os resultados da pressão P2 nos testes 25% Ar, com NP1 e NP2, que são comparados com os dados obtidos de vazão ao longo

do transitório de 33000 s. Os valores iniciais de pressão P2 são iguais a 3688 Pa (376 mmH₂O) e 3693 Pa (377 mmH₂O), respectivamente para NP1 e NP2. Os valores máximos alcançados de pressão P2 são iguais a 3989 Pa (407 mmH₂O) e 4073 Pa (415 mmH₂O), respectivamente para NP1 e NP2. No instante 33.000 s, apresenta-se 3967 Pa (405 mmH₂O) e 4034 Pa (411 mmH₂O), respectivamente para NP1 e NP2.

Embora os valores iniciais dos níveis de líquido no vaso de expansão sejam iguais nos testes 25% Ar, para NP1 e NP2 (ver TAB. 4.3), observa-se que para a mesma concentração de não-condensável (25% Ar), são obtidos maiores valores de pressão P2, ao longo dos transitórios, nos testes realizados com maior nível de potência (NP2).

FIGURA 4.6 – Pressão P2 – Vazão – Testes 25% Ar – NP1e NP2

Comparando-se os valores de pressão P2 ao longo dos transitórios com NP1 e NP2, observa-se que a pressão P2 para NP2 é maior em relação à medida de pressão P2 com NP1, em função do estabelecimento de uma temperatura média do fluido maior na BCN com NP2. No instante 33.000 s, há um acréscimo de aproximadamente 6,0 mmH₂O no nível de líquido no vaso de expansão, no transitório com NP2, em relação ao NP1, devido à maior expansão volumétrica do fluido no circuito.

A FIG. 4.7 indica a condição inicial dos testes 25% Ar, com NP1 e NP2, em relação ao sensor de pressão P2. A comparação entre os valores iniciais calculados e medidos de P2 indica uma diferença de 13 e 14 mmH₂O, respectivamente para NP1 e NP2. De acordo com Validyne (2005), a precisão do sensor de pressão P2 é igual a $\pm 5,0$ mmH₂O ($\pm 0,25\%$ do fundo de escala do instrumento – 2000 mmH₂O), indicando um desnível de montagem do sensor de pressão P2 em relação ao nível de líquido do vaso de expansão igual a 8 e 9 mmH₂O, respectivamente para NP1 e NP2.

$$\Delta P2_{NP1} = 173 + 839 - 649 = 363 \text{ mm} = \underline{3560 \text{ Pa}}$$

$$\Delta P2_{NP2} = 173 + 839 - 649 = 363 \text{ mm} = \underline{3560 \text{ Pa}}$$

FIGURA 4.7 – Condição Inicial – Sensor de Pressão P2 – NP1 e NP2

A FIG. 4.8 mostra os instantes iniciais das pressões P2 e das vazões, nos testes 25% Ar, com NP1 e NP2. O comportamento da pressão P2 apresenta a mesma tendência da vazão. A TAB. 4.9 relaciona os valores máximos alcançados pela pressão P2, apresentando também os respectivos instantes em que acontecem nos períodos iniciais dos testes 25% Ar, para NP1 e NP2.

FIGURA 4.8 – Comportamento Inicial das Pressões P2 e das Vazões – NP1 e NP2

TABELA 4.9 – Valores Iniciais Máximos de Pressão P2 – NP1 e NP2

Nível de Potência	Testes	Pressão P2 (Pa)	t_{P2} (s)
NP1	25% Ar	3783	784
NP2	25% Ar	3831	602

No período inicial de oscilação, observa-se um maior valor de pressão P2, ocorrendo em menor tempo no transitório, para o teste realizado com maior nível de potência (NP2).

A TAB. 4.10 mostra a duração do período oscilatório inicial para as pressões P2, nos testes 25% Ar, com NP1 e NP2 (ver FIG. 4.17). Para um maior nível de potência nos testes (NP2), tem-se um menor período oscilatório para a pressão P2.

TABELA 4.10 – Períodos Iniciais de P2 – Testes 25% Ar – NP1 e NP2

Nível de Potência	Testes	Período Inicial de Pressão P2 (s)
NP1	25% Ar	889
NP2	25% Ar	721

Verifica-se uma maior taxa de aumento da pressão P2, no período oscilatório inicial, no teste 25% Ar, com NP2, conforme indicado na TAB. 4.11.

TABELA 4.11 – Taxas de Aumento – Pressão P2 – NP1 e NP2

Nível de Potência	Testes	Taxa de Aumento - Pressão P2 (Pa/s)
NP1	25% Ar	0,17
NP2	25% Ar	0,30

A FIG. 4.9 indica os valores obtidos de pressão P1 e de vazão nos testes 25% Ar, com NP1 e NP2, considerando-se transitórios de 33.000 s.

O sensor de pressão P1, instalado na saída do aquecedor elétrico, é utilizado para medir as flutuações de pressão existentes na região do aquecedor elétrico e perna quente da BCN.

No período compreendido entre 13h e 15h30, observou-se que a carcaça do instrumento ficava sob a incidência de luz solar, devido à posição da BCN em relação a uma área envidraçada que proporciona iluminação natural ao galpão do *loop* 70 (ver FIG. 3.2). A incidência de luz solar determinou o

aquecimento das câmaras diferenciais que compõem a carcaça do sensor P1 e, o conseqüente desvio de suas leituras de pressão, demonstrando a sensibilidade do sensor de pressão utilizado (Validyne, 2005). A partir dos instantes 15.000 e 20.000 s, respectivamente para NP1 e NP2, o sensor de pressão P1 deixou de registrar corretamente os valores de pressão. A luz solar causou a interferência no sensor de pressão P1 nos testes 25% Ar, com NP1 e NP2 e 50% Ar, com NP1, sendo que a solução foi a instalação de um anteparo fixado à BCN, que isolou o instrumento dos efeitos da luz do solar.

Embora os dados de pressão P1 tenham sido afetados na fase final dos testes, observam-se maiores valores de pressão P1, com um nível maior de potência (NP2). O comportamento das pressões P1 apresenta a mesma tendência das vazões.

FIGURA 4.9 – Pressão P1 e Vazão – Testes 25% Ar – NP1 e NP2

A comparação dos resultados da pressão P1 e das vazões nos testes 25% Ar, é mostrada na FIG. 4.10, sendo indicados os primeiros 3000 s dos transitórios, para NP1 e NP2.

FIGURA 4.10 – Comportamento Inicial da Pressão P1 e Vazão – Testes 25% Ar – NP1 e NP2

O sensor de pressão P1 registra o nível da coluna de fluido na perna quente mais a medida da pressão P2 no tubulão superior do trocador de calor. Com o estabelecimento da vazão no circuito, as medidas do sensor de pressão P1 determinam a pressão total do circuito, com relação a sua posição de instalação na BCN. Quando a temperatura do fluido da perna quente aumenta (fluido mais leve), a medida de pressão P1 diminui e quando a temperatura do fluido da perna quente diminui (fluido mais pesado), a pressão P1 aumenta, conforme demonstrado na FIG. 4.11.

FIGURA 4.11 – Comportamento Inicial da Pressão P1 e TC1 – Testes 25% Ar – NP1 e NP2

As medidas iniciais da pressão P1 são iguais a 40831 Pa (4164 mmH₂O) e 40988 Pa (4180 mmH₂O), respectivamente para NP1 e NP2.

A FIG. 4.12 indica a condição inicial dos testes 25% Ar, com NP1 e NP2 em relação ao sensor de pressão P1. A comparação entre os valores iniciais calculados e medidos de P2 indica uma diferença de 39 e 54 mmH₂O, respectivamente para NP1 e NP2.

De acordo com Validyne (2005), a precisão do sensor de pressão P1 é igual a $\pm 12,5$ mmH₂O ($\pm 0,25\%$ do fundo de escala do instrumento – 5000 mmH₂O), indicando um desnível de montagem do sensor de pressão P1 em relação ao nível de líquido do vaso de expansão igual a aproximadamente 27 e 42 mmH₂O, respectivamente para NP1 e NP2. Esses valores são considerados

excelentes, em função da distância entre a posição de montagem do sensor de pressão P1 e o vaso de expansão na BCN.

$$\Delta P1_{NP1} = 376 - 9 + 3445 + 313 = \underline{4125 \text{ mm}}$$

$$\Delta P1_{NP2} = 377 - 9 + 3445 + 313 = \underline{4126 \text{ mm}}$$

FIGURA 4.12 – Condição Inicial – Sensor de Pressão P1 – NP1 e NP2

Nos testes 25% Ar, a partir dos valores iniciais de pressão P1, que são iguais a 40831 Pa (4164 mmH₂O) e 40988 Pa (4180 mmH₂O), respectivamente para NP1 e NP2, a pressão P1 aumenta para 40851 Pa (4166 mmH₂O) e 41014 Pa (4182 mmH₂O), respectivamente para NP1 e NP2. Nesse intervalo de tempo, com a ausência de vazão no circuito, a pressão P1 mede o nível de coluna de fluido na perna quente mais a pressão P2, totalizando uma variação de 2 mmH₂O, tanto para NP1 como para NP2. A seguir, com o aumento da temperatura TC1 na perna quente (fluido mais leve), a pressão P1 diminui para valores iguais a 40744 Pa (4155 mmH₂O) e 40850 Pa (4166 mmH₂O), respectivamente para NP1 e NP2, perfazendo uma diminuição no valor de P1 igual a 11 e 16 mmH₂O, respectivamente para NP1 e NP2. Com a queda na temperatura da perna quente (fluido mais pesado), a pressão P1 volta a aumentar e, dando continuidade, os valores de pressão P1 tendem a acompanhar o comportamento de estabilização da temperatura TC1.

Para a mesma concentração de não-condensável (25% Ar), o comportamento da pressão P1 com NP1 apresenta um atraso em relação à pressão P1 com NP2, de aproximadamente 50 s ao longo do transitório.

A FIG. 4.13 apresenta as temperaturas TC9, TC10 e TC11 do primário do trocador de calor, ao longo do transitório de 33.000 s, para os testes 25% Ar, com NP1 e NP2.

FIGURA 4.13 – Temperaturas TC9, TC10 e TC11 – Testes 25% Ar – NP1 e NP2

A TAB. 4.12 mostra os valores de TC9, TC10 e TC11, no instante 33.000 s, para NP1 e NP2. Observa-se que os valores de temperatura TC9, TC10 e TC11, no instante 33.000 s, são maiores no teste realizado com um maior nível de potência (NP2).

TABELA 4.12 – TC9, TC10 e TC11 – Testes 25% Ar – NP1 e NP2

Nível de Potência	Testes	TC9 (°C)	TC10 (°C)	TC11 (°C)
NP1	25% Ar	50,7	38,6	34
NP2	25% Ar	56,4	40,3	35,6

A FIG. 4.14 compara as temperaturas TC8 e TC10 ao longo dos transitórios de 33.000 s, para NP1 e NP2.

FIGURA 4.14 – Temperaturas TC8 e TC10 – 25% Ar – NP1 e NP2

No instante 33.000 s, as temperaturas TC8 e TC10 apresentam valores iguais a 35,8 °C e 38,6°C, respectivamente para NP1 e 36 °C e 40,3 °C, respectivamente para NP2. Próximo ao regime permanente dos testes 25% Ar, as temperaturas TC10 são maiores que as temperaturas TC8, tanto para NP1 como para NP2, indicando que a remoção de calor nos tubos verticais do primário do

trocador de calor está ocorrendo mais efetivamente na região próxima à entrada de líquido frio no secundário do trocador de calor, de acordo com a FIG. 4.15.

FIGURA 4.15 – Primário e Secundário – Trocador de Calor – BCN

A FIG. 4.16 apresenta as temperaturas TC9, TC10 e TC11, com NP1 e NP2, para os primeiros 3000 s dos transitórios.

Nos testes 25% Ar, os atrasos iniciais das temperaturas TC9, TC10 e TC11 são respectivamente iguais a 364, 413 e 476 s para NP1. Os correspondentes atrasos de TC9, TC10 e TC11 são respectivamente iguais a 252, 259 e 441 s para NP2. Os atrasos são crescentes em relação à distância entre a instalação dos termopares TC9, TC10 e TC11 e a entrada do tubulão superior do trocador de calor, tanto para NP1 como para NP2.

Observa-se que os atrasos nas temperaturas TC9, TC10 e TC11 são maiores para o teste realizado com um nível de potência menor (NP1).

No período inicial do transitório, há uma diminuição da temperatura TC9, tanto para NP1 como para NP2, que varia de 20 °C para aproximadamente 18 °C, decorrente da entrada de líquido frio no tubulão superior do trocador de calor, proveniente da perna quente, com o início da vazão no circuito.

FIGURA 4.16 – TC9, TC10 e TC11 – Testes 25% Ar – NP1 e NP2

A TAB. 4.13 indica os valores máximos de TC9, TC10 e TC11 e os respectivos instantes em que ocorrem no período de oscilação inicial.

TABELA 4.13 – TC9, TC10 e TC11 – NP1 e NP2

Nível de Potência	Testes	TC9 (°C)	t_{TC9} (s)	TC10 (°C)	t_{TC10} (s)	TC11 (°C)	t_{TC11} (s)
NP1	25% Ar	38,9	756	27,6	735	25,7	735
NP2	25% Ar	45,3	588	30,6	567	28,5	616

No período de oscilação inicial, as temperaturas TC9, TC10 e TC11 são maiores para a aplicação de um nível de potência maior (NP2) e os instantes em que essas temperaturas ocorrem são menores, também com NP2.

A seguir, o comportamento das temperaturas TC9, TC10 e TC11 apresentam a mesma tendência da vazão.

As temperaturas TC21, TC24 e TC25 do secundário do trocador de calor são comparadas ao longo dos transitórios, para NP1 e NP2, na FIG. 4.17. As temperaturas TC21, TC24 e TC25 correspondem respectivamente à entrada, à região central e à saída do secundário do trocador de calor.

FIGURA 4.17 – Temperaturas do Secundário do Trocador de Calor – 25% Ar – NP1 e NP2

No instante 33.0000 s, as temperaturas TC21, TC24 e TC25 são respectivamente iguais a 20,7 °C, 30,7 °C e 37,3 °C, para NP1 e com a aplicação de NP2, são respectivamente iguais a 19,9 °C, 28,4 °C e 35,8 °C. As temperaturas são maiores no teste com a aplicação de um nível menor de potência (NP1).

A FIG. 4.18 indica que no teste 25% Ar, com NP2, há uma diferença de 250 W entre a potência aplicada e a retirada pelo secundário. No teste 25% Ar, com NP1, a potência aplicada praticamente é toda retirada pelo secundário do trocador de calor a partir do instante 30.000 s.

FIGURA 4.18 – Potência Aplicada e Potência Retirada – 25% Ar – NP1 e NP2

A FIG. 4.19 apresenta a variação do nível de não-condensável no primário do trocador de calor (f) nos testes 25% Ar, para NP1 e NP2, ao longo dos transitórios de 33.000 s. O nível inicial de não-condensável no tubulão superior do trocador de calor, nos testes 25% Ar, é igual a 9 mm, tanto para NP1 como para NP2 (ver TAB. 4.3). No instante 33.000 s, os valores dos níveis de não-condensável no trocador de calor são iguais a aproximadamente 9,7 e 9,8 mm, respectivamente para NP1 e NP2. Há uma variação de 0,7 e 0,8 mm,

respectivamente para NP1 e NP2, em relação às condições iniciais dos níveis de não-condensável nos testes 25% Ar (9 mm).

A FIG. 4.20 apresenta os níveis de não-condensável no trocador de calor, com NP1 e NP2, para os primeiros 3000 s dos transitórios.

FIGURA 4.19 – Níveis de Não-Condensável – 33.000 s – NP1 e NP2

FIGURA 4.20 – Níveis de Não-Condensável – 3000 s – NP1 e NP2

Há atrasos nas variações dos níveis iniciais de não-condensável iguais a 315 e 210 s, respectivamente para NP1 e NP2. Esses intervalos de tempo são correspondentes aos atrasos existentes na vazão, para NP1 e NP2 (ver FIG. 4.3).

As condições finais dos testes 25% Ar, para NP1 e NP2, após resfriamento de 48h, em temperatura ambiente, são apresentadas na TAB. 4.14, sendo que os resultados finais são semelhantes às condições iniciais do testes realizados (ver TAB. 4.3).

TABELA 4.14 – Condições Finais dos Testes 25% Ar – NP1 e NP2

Nível de Potência	Testes	Nível Final de Ar (mmH ₂ O)	Nível Final de Líquido no Vaso de Expansão (mmH ₂ O)	Massa Final de Ar (kg)	Volume Final de Ar (m ³)
NP1	25% Ar	9,0	173,0	$2,593 \cdot 10^{-4}$	$2,297 \cdot 10^{-4}$
NP2	25% Ar	9,0	173,0	$2,596 \cdot 10^{-4}$	$2,297 \cdot 10^{-4}$

4.2 Testes 50% Ar – NP1 e NP2

A TAB. 4.15 apresenta as condições iniciais dos testes 50% Ar com NP1 e NP2, relacionando o nível de potência aplicado, concentração inicial de não-condensável, potência efetivamente aplicada, nível inicial de não-condensável no tubulão superior do trocador de calor, nível inicial de líquido no vaso de expansão e a massa e o volume iniciais do não-condensável. As variáveis massa e volume iniciais de não-condensável são calculadas pelo programa computacional *Air_NCL*.

O transitório de 33.000 s indicando as temperaturas TC17 e TC1 do aquecedor elétrico e as vazões no circuito experimental para os testes 50% Ar, com NP1 e NP2, são mostrados na FIG. 4.21. Os resultados obtidos para as temperaturas TC1, TC17 e para as vazões, no final do transitório, são mostrados na TAB. 4.16.

TABELA 4.15 – Condições Iniciais dos Testes 50% Ar – NP1 e NP2

Nível de Potência	Testes	Potência Aplicada (W)	Nível Inicial de Ar (mmH ₂ O)	Nível Inicial de Líquido no Vaso de Expansão (mmH ₂ O)	Massa Inicial de Ar (kg)	Volume Inicial de Ar (m ³)
NP1	50% Ar	1580	19	180	$7,048 \cdot 10^{-4}$	$6,234 \cdot 10^{-4}$
NP2	50% Ar	2537	18	184	$6,540 \cdot 10^{-4}$	$5,788 \cdot 10^{-4}$

FIGURA 4.21 – Temperaturas TC1 e TC17, Vazões– NP1 e NP2

TABELA 4.16 – TC1 e TC17 – Vazões – NP1 e NP2 – 33.000 s

Nível de Potência	Testes	TC1 (°C)	TC17 (°C)	Vazão (kg/s)
NP1	50% Ar	59,1	32,0	0,014
NP2	50% Ar	67,6	37,7	0,019

Os testes 50% Ar, com NP1 e NP2, apresentam valores de temperaturas TC1 e TC17, e de vazão maiores para um nível de potência aplicado maior (NP2), no instante 33.000 s.

Comparando-se os valores de TC1, TC17 e de vazão obtidos nos finais dos transitórios, entre os testes com maior concentração inicial de não-condensável (50% Ar) e os testes com menor concentração inicial de não-condensável (25% Ar), obtêm-se maiores valores de TC1, TC17 e menores de vazão, para os mesmos níveis de potência aplicados, nos experimentos realizados com maior concentração inicial de não-condensável (50% Ar), conforme apresentado na TAB. 4.17.

TABELA 4.17 – Comparação de TC1, TC17 e de Vazões – 25% Ar e 50% Ar – NP1 e NP2 – 33.000 s

Nível de Potência	Testes	TC1 (°C)	TC17 (°C)	Vazão (kg/s)
NP1	25% Ar	54,4	31,5	0,017
NP1	50% Ar	59,1	32,0	0,014
NP2	25% Ar	61,1	32,8	0,021
NP2	50% Ar	67,6	37,7	0,019

A FIG. 4.22 indica os instantes iniciais dos testes 50% Ar (até 1500 s), comparando as temperaturas TC1, TC17 e vazões, respectivamente com NP1 e NP2. As vazões dos experimentos 50% Ar apresentam um atraso de 406 e 287 s, respectivamente para NP1 e NP2, no início dos transitórios, correspondendo ao processo de convecção natural nas proximidades das resistências do aquecedor elétrico. A análise das temperaturas TC1 também indica o processo de convecção natural no aquecedor elétrico, indicando um atraso inicial de 399 e 259 s, respectivamente para NP1 e NP2, correspondendo ao tempo necessário para as linhas de escoamento do líquido aquecido no aquecedor elétrico (ascendente) alcançar o termopar TC1. Os atrasos de TC1 e da vazão são menores para os testes realizados com maiores níveis de potência (NP2). A TAB. 4.18 compara os atrasos das vazões e das temperaturas TC1, relativos à convecção natural existente no aquecedor elétrico, para os testes realizados com menor (25% Ar) e

com maior (50% Ar) concentração inicial de não-condensável, com o mesmo nível de potência aplicado. Os intervalos de tempo de convecção natural no aquecedor elétrico são maiores para os testes de maior concentração inicial de não-condensável (50% Ar), para o mesmo nível de potência aplicado.

TABELA 4.18 – Comparação dos Atrasos de TC1 e das Vazões – Convecção Natural – 25% Ar e 50% Ar – NP1 e NP2 – Início dos Transitórios

Nível de Potência	Testes	Atraso TC1 (s)	Atraso Vazão (s)
NP1	25% Ar	77	126
NP1	50% Ar	399	406
NP2	25% Ar	49	84
NP2	50% Ar	259	287

FIGURA 4.22 – Transitórios Iniciais – Testes 50% Ar – NP1 e NP2

Da mesma forma que nos testes 25% Ar, observa-se um comportamento oscilatório inicial para as temperaturas TC1, TC17 e para as vazões (ver FIG. 4.22).

A TAB. 4.19 relaciona os valores máximos alcançados pelas temperaturas TC1, TC17 e vazões, apresentando também os respectivos instantes em que acontecem nos períodos iniciais dos testes 50% Ar, para NP1 e NP2.

TABELA 4.19 – Valores Iniciais Máximos de Vazões, TC1 – NP1 e NP2

Nível de Potência	Testes	TC1 (°C)	t _{TC1} (s)	TC17 (°C)	t _{TC17} (s)	Vazão (kg/s)	t _{vazão} (s)
NP1	50% Ar	54,4	840	23,7	1344	0,016	791
NP2	50% Ar	61,5	602	25,9	987	0,020	602

Para a mesma concentração inicial de não-condensável (50% Ar) apresentam-se valores iniciais maiores de temperatura TC1, TC17 e de vazão com a aplicação de um maior nível de potência (NP2). Os instantes em que ocorrem os valores máximos de temperatura TC1, TC17 e de vazão são menores no experimento realizado com um nível maior de potência (NP2).

A TAB. 4.20 compara os valores máximos iniciais de TC1, TC17 e das vazões, no período oscilatório inicial, para os testes realizados com menor (25% Ar) e com maior (50% Ar) concentração inicial de não-condensável, para o mesmo nível de potência aplicado.

TABELA 4.20 – Comparação de TC1, TC17 e das Vazões – 25% Ar e 50% Ar – NP1 e NP2 – Início dos Transitórios

Nível de Potência	Testes	TC1 (°C)	TC17 (°C)	Vazão (kg/s)
NP1	25% Ar	45,1	-	0,016
NP1	50% Ar	54,4	23,7	0,016
NP2	25% Ar	52,5	-	0,020
NP2	50% Ar	61,5	25,9	0,020

Para o mesmo nível de potência aplicado, os testes realizados com maior concentração inicial de não-condensável (50% Ar) apresentam maiores temperaturas TC1 e os mesmos valores de vazão, no período oscilatório inicial. Como as temperaturas TC17 dos testes 25% Ar praticamente não apresentam comportamento oscilatório inicial (ver FIG. 4.3), não foi realizada a comparação com as temperaturas TC17 dos testes 50% Ar.

Os períodos oscilatórios iniciais para as variáveis dos testes 50% Ar (TC1, TC17 e vazão), com NP1 e NP2, podem ser medidos por meio do intervalo de tempo existente entre o início do transitório e o valor mínimo da variável após ela ter alcançado o seu máximo inicial (ver FIG. 4.22). Os períodos oscilatórios iniciais são apresentados na TAB. 4.21, relacionando os níveis de potência aplicados, os testes e os intervalos de tempo aproximados para as temperaturas TC1 e para as vazões. Os períodos oscilatórios iniciais de TC1, TC17 e da vazão são menores para os testes efetuados com um nível maior de potência (NP2).

TABELA 4.21 – Períodos Iniciais – Testes 50% Ar – NP1 e NP2

Nível de Potência	Testes	Período Inicial de TC1 (s)	Período Inicial de TC17 (s)	Período Inicial da Vazão (s)
NP1	50% Ar	1155	1687	1155
NP2	50% Ar	861	1253	882

A TAB. 4.22 compara os períodos oscilatórios iniciais de TC1, TC17 e das vazões, para os testes realizados com menor (25% Ar) e com maior (50% Ar) concentração de não-condensável, para o mesmo nível de potência aplicado.

TABELA 4.22 – Comparação de TC1, TC17 e das Vazões – 25% Ar e 50% Ar – NP1 e NP2 – Início dos Transitórios

Nível de Potência	Testes	Período TC1 (s)	Período TC17 (s)	Período Vazão (s)
NP1	25% Ar	938	-	910
NP1	50% Ar	1155	1687	1155
NP2	25% Ar	700	-	707
NP2	50% Ar	861	1253	882

Para um mesmo nível de potência, os períodos oscilatórios iniciais das temperaturas TC1 e da vazão são maiores para os testes com maior concentração inicial de não-condensável (50% Ar). Como citado anteriormente, não foi realizada a comparação das temperaturas TC17, entre os testes 25% Ar e 50% Ar.

A seguir, a TAB. 4.23 apresenta as taxas de aumento, no período inicial de oscilação, para os valores de temperatura TC1, TC17 e para as vazões, nos testes 50% Ar, com NP1 e NP2.

TABELA 4.23 – Taxas de Aumento – TC1, TC17 e Vazões – NP1 e NP2

Nível de Potência	Testes	Taxa de Aumento TC1 (°C/s)	Taxas de Aumento TC17 (°C/s)	Taxa de Aumento Vazão (kg/s ²)
NP1	50% Ar	0,06	0,01	$4,16 \cdot 10^{-5}$
NP2	50% Ar	0,22	0,02	$6,35 \cdot 10^{-5}$

Os resultados indicam que as taxas médias de aumento iniciais para as temperaturas TC1, TC17 e para a vazão são maiores no teste com a utilização do nível maior de potência (NP2).

A TAB. 4.24 compara as taxas de aumento das temperaturas TC1, TC17 e das vazões, nos períodos oscilatórios iniciais, para os testes realizados com menor (25% Ar) e com maior (50% Ar) concentração de não-condensável, para o mesmo nível de potência aplicado.

TABELA 4.24 – Comparação das Taxas de Aumento – TC1, TC17 e das Vazões 25% Ar e 50% Ar – NP1 e NP2 – Início dos Transitórios

Nível de Potência	Testes	Taxa de Aumento TC1 (°C/s)	Taxa de Aumento TC17 (°C/s)	Taxa de Aumento Vazão (kg/s ²)
NP1	25% Ar	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$6,7 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$
NP1	50% Ar	0,06	0,01	$4,16 \cdot 10^{-5}$
NP2	25% Ar	$7,0 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-5}$
NP2	50% Ar	0,22	0,02	$6,35 \cdot 10^{-5}$

Para um mesmo nível de potência aplicado, as taxas de aumento das temperaturas TC1, TC17 e das vazões, nos períodos oscilatórios iniciais, são maiores para os experimentos com maior concentração inicial de não-condensável (50% Ar).

Após as temperaturas TC1, TC17 e a vazão terem alcançado seus valores máximos iniciais, observa-se nas variáveis uma tendência de queda mais suave, para o período oscilatório inicial, no experimento realizado com menor potência (NP1). As taxas de diminuição das temperaturas TC1, TC17 e das vazões são apresentadas na TAB. 4.25.

TABELA 4.25 – Taxas de Diminuição – TC1, TC17 e Vazão – NP1 e NP2

Nível de Potência	Testes	Taxa de Diminuição TC1 (°C/s)	Taxa de Diminuição TC17 (°C/s)	Taxa de Diminuição Vazão (kg/s ²)
NP1	50% Ar	0,03	$3,50 \cdot 10^{-3}$	$1,37 \cdot 10^{-5}$
NP2	50% Ar	0,04	$3,38 \cdot 10^{-3}$	$2,14 \cdot 10^{-5}$

A TAB. 4.26 compara as taxas de diminuição das temperaturas TC1, TC17 e das vazões, nos períodos oscilatórios iniciais, para os testes realizados com menor (25% Ar) e com maior (50% Ar) concentração de não-condensável, para o mesmo nível de potência aplicado.

TABELA 4.26 – Comparação das Taxas de Diminuição – TC1, TC17 e das Vazões – 25% Ar e 50% Ar – NP1 e NP2 – Início dos Transitórios

Nível de Potência	Testes	Taxa de Diminuição TC1 (°C/s)	Taxa de Diminuição TC17 (°C/s)	Taxa de Diminuição Vazão (kg/s ²)
NP1	25% Ar	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$6,7 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$
NP1	50% Ar	0,03	$3,50 \cdot 10^{-3}$	$1,37 \cdot 10^{-5}$
NP2	25% Ar	$7,0 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-5}$
NP2	50% Ar	0,04	$3,38 \cdot 10^{-3}$	$2,14 \cdot 10^{-5}$

As taxas de diminuição das temperaturas TC1, nos períodos oscilatórios iniciais, são maiores para os experimentos com maior concentração

inicial de não-condensável (50% Ar), para um mesmo nível de potência aplicado. As taxas de diminuição das temperaturas TC17 e das vazões, nos períodos oscilatórios iniciais, são menores para os experimentos com maior concentração inicial de não-condensável (50% Ar), para um mesmo nível de potência aplicado.

A temperatura TC1 apresenta um atraso em relação à vazão, para os valores máximos alcançados, no período oscilatório inicial, igual a 49 e 14 s, respectivamente para NP1 e NP2, determinando que para a mesma concentração inicial de não-condensável (50% Ar), tem-se um menor atraso entre os valores máximos de TC1 e vazão com a utilização no teste de um maior nível de potência (NP2).

A TAB. 4.27 compara os atrasos entre as temperaturas TC1 e as vazões, nos períodos oscilatórios iniciais, para os testes realizados com menor (25% Ar) e com maior (50% Ar) concentração de não-condensável, para o mesmo nível de potência aplicado.

TABELA 4.27 – Atrasos – TC1 e Vazões – 25% Ar e 50% Ar – NP1 e NP2 – Início dos Transitórios

Nível de Potência	Testes	Atraso TC1 – Vazão (s)
NP1	25% Ar	28
NP1	50% Ar	49
NP2	25% Ar	7
NP2	50% Ar	14

Para um mesmo nível de potência aplicado, os atrasos entre as temperaturas máximas TC1 e as vazões máximas, nos períodos oscilatórios iniciais, são maiores para os experimentos com maior concentração inicial de não-condensável (50% Ar).

Os resultados da pressão P2 nos testes 50% Ar, com NP1 e NP2, são comparados com os dados obtidos de vazão ao longo do transitório de 33000 s e, são apresentados na FIG. 4.23. Os valores iniciais de pressão P2 são iguais a

3714 Pa (379 mmH₂O) e 3821 Pa (390 mmH₂O), respectivamente para NP1 e NP2. Os valores alcançados de pressão P2, no instante 24.000 s, são iguais a 4120 Pa (420 mmH₂O) e 4180 Pa (426 mmH₂O), respectivamente para NP1 e NP2. No instante 33.000 s, apresenta-se 4106 Pa (418 mmH₂O) e 4186 Pa (427 mmH₂O), respectivamente para NP1 e NP2.

A partir do instante 26.000 s, no teste 50% Ar, com NP2, observa-se um comportamento oscilatório da pressão P2, que será estudado em detalhes mais adiante.

FIGURA 4.23 – Pressão P2 – Vazão – Testes 50% Ar – NP1 e NP2

Embora as medidas iniciais dos níveis de líquido no vaso de expansão sejam aproximadamente iguais nos testes 50% Ar, para NP1 e NP2 (ver TAB. 4.15), observa-se que para a mesma concentração de não-condensável (50% Ar),

são obtidos maiores valores de pressão P2, ao longo dos transitórios, nos testes realizados com maior nível de potência (NP2).

Comparando-se as medidas de pressão P2 ao longo dos transitórios com NP1 e NP2, observa-se que a pressão P2 com NP2 é maior em relação à medida de pressão P2 com NP1, em função do estabelecimento de uma temperatura média do fluido maior na BCN com NP2.

No instante 33.000 s, há um acréscimo de aproximadamente 39 e 37 mmH₂O no nível de líquido no vaso de expansão, respectivamente para NP1 e NP2, sendo que a variação de líquido no vaso de expansão é maior para o teste com NP2, devido à maior expansão volumétrica do fluido no circuito.

A TAB. 4.28 compara as variações nos níveis de líquido nos vasos de expansão, nos testes realizados com menor (25% Ar) e com maior (50% Ar) concentração de não-condensável, para o mesmo nível de potência aplicado.

TABELA 4.28 – Variação no Nível do Vaso de Expansão – 25% Ar e 50% Ar – NP1 e NP2

Nível de Potência	Testes	Variação – Nível do Vaso de Expansão (mm)
NP1	25% Ar	6
NP1	50% Ar	39
NP2	25% Ar	6
NP2	50% Ar	37

As variações entre os níveis finais e iniciais no vaso de expansão são maiores para os experimentos com maior concentração inicial de não-condensável (50% Ar), para o mesmo nível de potência aplicado.

A condição inicial dos testes 50% Ar, com NP1 e NP2 em relação ao sensor de pressão P2, é apresentada na FIG. 4.24. A comparação entre os

valores iniciais calculados e medidos de P2 indica uma diferença de 9 e 16 mmH₂O, respectivamente para NP1 e NP2.

$$\Delta P2_{NP1} = 180 + 839 - 649 = 370 \text{ mm} = \underline{3628 \text{ Pa}}$$

$$\Delta P2_{NP2} = 184 + 839 - 649 = 374 \text{ mm} = \underline{3668 \text{ Pa}}$$

FIGURA 4.24 – Condição Inicial – Sensor de Pressão P2 – NP1 e NP2

Há um desnível de montagem do sensor de pressão P2 em relação ao nível de líquido do vaso de expansão igual a 4 e 11 mmH₂O, respectivamente para NP1 e NP2, considerando-se a precisão do sensor de pressão P2 igual a $\pm 5,0$ mmH₂O (Validyne, 2005).

A comparação entre os testes 25% Ar e 50% Ar, para o mesmo nível de potência aplicado, indicando os desníveis de montagem do sensor de pressão P2 em relação ao nível de líquido do vaso de expansão, são apresentados na TAB. 4.29.

Os valores apresentados dos desníveis de montagem na BCN do sensor de pressão P2 em relação ao nível de líquido do vaso de expansão são bem aceitáveis para os testes 25% Ar e 50% Ar, com NP1 e NP2.

TABELA 4.29 – Desníveis de Montagem – Pressão P2 – Testes 25% Ar e 50% Ar
– NP1 e NP2

Nível de Potência	Testes	Desníveis de Montagem – P2 (mm)
NP1	25% Ar	8
NP1	50% Ar	4
NP2	25% Ar	9
NP2	50% Ar	11

A FIG. 4.25 indica os instantes iniciais das pressões P2 e das vazões, nos testes 50% Ar, com NP1 e NP2.

FIGURA 4.25 – Comportamento Inicial das Pressões P2 e das Vazões – NP1 e NP2

Nos testes 50% Ar, o comportamento da pressão P2 apresenta a mesma tendência da vazão, sendo que há um atraso da pressão P2 em relação à vazão de aproximadamente 112 e 168 s, respectivamente para NP1 e NP2.

A TAB. 4.30 relaciona os valores máximos alcançados pela pressão P2, apresentando também os respectivos instantes em que acontecem nos períodos iniciais dos testes 50% Ar, para NP1 e NP2.

TABELA 4.30 – Valores Iniciais Máximos de Pressão P2 – NP1 e NP2.

Nível de Potência	Testes	Pressão P2 (Pa)	t_{P2} (s)
NP1	50% Ar	3872	959
NP2	50% Ar	4010	714

No período inicial de oscilação, observa-se um maior valor de pressão P2, ocorrendo em menor tempo no transitório, para o teste realizado com maior nível de potência (NP2).

A TAB. 4.31 compara as medidas máximas de pressão P2, no período oscilatório inicial, nos testes realizados com menor (25% Ar) e com maior (50% Ar) concentração de não-condensável, para o mesmo nível de potência aplicado.

TABELA 4.31 – Pressão P2 – Período Oscilatório Inicial – 25% Ar e 50% Ar – NP1 e NP2

Nível de Potência	Testes	Valor Máximo Pressão P2 – Período Oscilatório Inicial (Pa)
NP1	25% Ar	3783
NP1	50% Ar	3872
NP2	25% Ar	3831
NP2	50% Ar	4010

As medidas máximas de pressão P2, no período oscilatório inicial, são maiores para os experimentos com maior concentração inicial de não-condensável (50% Ar), para o mesmo nível de potência aplicado.

A TAB. 4.32 mostra a duração do período oscilatório inicial para as pressões P2, nos testes 50% Ar, com NP1 e NP2 (ver FIG. 4.25).

TABELA 4.32 – Períodos Iniciais de P2 – Testes 50% Ar – NP1 e NP2

Nível de Potência	Testes	Período Inicial de Pressão P2 (s)
NP1	50% Ar	1225
NP2	50% Ar	917

Para um maior nível de potência nos testes (NP2), tem-se um menor período oscilatório para a pressão P2.

A TAB. 4.33 compara as durações dos períodos oscilatórios iniciais para as pressões P2, nos testes realizados com menor (25% Ar) e com maior (50% Ar) concentração de não-condensável, para o mesmo nível de potência aplicado.

TABELA 4.33 – Duração dos Períodos Oscilatórios Iniciais para P2 – 25% Ar e 50% Ar – NP1 e NP2

Nível de Potência	Testes	Duração do Período Oscilatório Inicial – P2 (s)
NP1	25% Ar	889
NP1	50% Ar	1225
NP2	25% Ar	721
NP2	50% Ar	917

As durações dos períodos oscilatórios iniciais para as pressões P2 são maiores para os experimentos com maior concentração inicial de não-condensável (50% Ar), para o mesmo nível de potência aplicado.

Observa-se uma maior taxa de aumento da pressão P2, no período oscilatório inicial, no teste 50% Ar, com NP2, conforme indicado na TAB. 4.34.

TABELA 4.34 – Taxas de Aumento – Pressão P2 – NP1 e NP2.

Nível de Potência	Testes	Taxa de Aumento - Pressão P2 (Pa/s)
NP1	50% Ar	0,35
NP2	50% Ar	0,47

A TAB. 4.35 compara as taxas de aumento da pressão P2, nos períodos oscilatórios iniciais, nos testes realizados com menor (25% Ar) e com maior (50% Ar) concentração de não-condensável, para o mesmo nível de potência aplicado.

TABELA 4.35 – Taxas de Aumento de P2 – Períodos Oscilatórios Iniciais para P2 25% Ar e 50% Ar – NP1 e NP2

Nível de Potência	Testes	Taxas de Aumento– P2 (Pa/s)
NP1	25% Ar	0,17
NP1	50% Ar	0,35
NP2	25% Ar	0,30
NP2	50% Ar	0,47

As taxas de aumento da pressão P2 são maiores, nos períodos oscilatórios iniciais, para os testes com maior concentração inicial de não-condensável (50% Ar), para o mesmo nível de potência aplicado.

Os valores obtidos de pressão P1 e de vazão nos testes 50% Ar, com NP1 e NP2, considerando-se transitórios de 33.000 s, são indicados na FIG. 4.26.

As medidas de pressão P1 do teste 50% Ar, com NP1, foram alteradas a partir do instante 12.500 s até praticamente o final do transitório, correspondendo ao período do teste compreendido entre 13h e 15h30. Essas alterações nas medidas de pressão P1 são semelhantes às ocorridas nos testes 25% Ar, com NP1 e NP2. O motivo dessas alterações e as soluções adotadas foram detalhados nas análises dos testes 25% Ar.

FIGURA 4.26 – Pressão P1 e Vazão – Testes 50% Ar – NP1 e NP2

Embora os resultados obtidos da pressão P1, no teste 50% Ar, com NP1, tenham sido afetados na fase final do transitório, observam-se maiores valores de pressão P1 (41.300 Pa no instante 33.000 s), com um nível maior de potência (NP2), sendo que o comportamento das pressões P1 apresenta a mesma tendência das vazões.

Da mesma forma que a pressão P2, o comportamento da pressão P1 apresenta características oscilatórias, a partir do instante 26.000 s, indicando que há ebulição sub-resfriada no aquecedor elétrico. O comportamento oscilatório das medidas de pressão é devido à formação de bolhas nas regiões próximas das resistências elétricas do aquecedor. Essas bolhas colapsam entrando em contato com o líquido frio das regiões mais distante das resistências. As variações de

volume específico do fluido determinam o comportamento oscilatório nos sensores de pressão P1 e P2.

A FIG. 4.27 apresenta, a partir do instante 26.000 s do transitório, as temperaturas na parede (T_w) na região superior da resistência elétrica do aquecedor elétrico, calculadas a partir do fluxo de calor (q''), que é representado por:

$$q'' = h \cdot \Delta T \quad (4.1)$$

onde h é o coeficiente de transferência de calor entre o fluido e a parede da resistência ($W/m^2/C$) e ΔT ($^{\circ}C$) é diferença entre a temperatura da parede da resistência elétrica (T_w) e a temperatura do fluido (T_f).

FIGURA 4.27 – Temperatura na Parede (T_w) e Coeficiente de Transferência de Calor (W/m^2C) na Resistência Elétrica do Aquecedor Elétrico

Os valores do coeficiente de transferência de calor e da temperatura do fluido foram obtidas da simulação do teste 50% Ar com o código Relap5/mod3.3. A verificação teórica da temperatura da parede (T_w) da resistência elétrica confirma a ocorrência de ebulição sub-resfriada nas proximidades das resistências elétricas do aquecedor elétrico. A partir do instante 25.000 s do transitório, as temperaturas na parede (T_w) alcançaram valores bem próximos da temperatura de saturação do fluido no aquecedor elétrico, que é igual a 107 °C. A correlação de Sellars (1956) foi utilizada para o calculo do coeficiente de transferência de calor, para escoamento laminar.

A comparação dos resultados da pressão P1 e das vazões nos testes 50% Ar, é mostrada na FIG. 4.28, sendo indicados os primeiros 3000 s dos transitórios, para NP1 e NP2.

FIGURA 4.28 – Pressão P1 e Vazão – Testes 50% Ar – NP1 e NP2

As medidas iniciais da pressão P1 são iguais a 40888 Pa (4169 mmH₂O) e 41108 Pa (4192 mmH₂O), respectivamente para NP1 e NP2.

A condição inicial dos testes 50% Ar, com NP1 e NP2, em relação ao sensor de pressão P1, é indicada na FIG. 4.29. A comparação entre os valores iniciais calculados e medidos de P2 indica uma diferença de 41 e 53 mmH₂O, respectivamente para NP1 e NP2.

FIGURA 4.29 – Condição Inicial – Sensor de Pressão P1 – NP1 e NP2

Há um desnível de montagem do sensor de pressão P1, em relação ao nível de líquido do vaso de expansão, igual a aproximadamente 29 e 41 mmH₂O, respectivamente para NP1 e NP2, considerando-se a precisão do sensor de pressão P1 igual a $\pm 12,5$ mmH₂O (Validyne, 2005). Esses valores são considerados excelentes, em função da distância entre a posição de montagem do sensor de pressão P1 e o vaso de expansão na BCN.

A comparação entre os testes 25% Ar e 50% Ar, para o mesmo nível de potência aplicado, indicando os desníveis de montagem do sensor de pressão

P1, em relação ao nível de líquido do vaso de expansão, são apresentados na TAB. 4.36.

Os valores apresentados dos desníveis de montagem na BCN do sensor de pressão P2 em relação ao nível de líquido do vaso de expansão são bem aceitáveis para os testes 25% Ar e 50% Ar, com NP1 e NP2.

TABELA 4.36 – Desníveis de Montagem – Pressão P1 – Testes 25% Ar e 50% Ar – NP1 e NP2

Nível de Potência	Testes	Desníveis de Montagem – P1 (mm)
NP1	25% Ar	27
NP1	50% Ar	29
NP2	25% Ar	42
NP2	50% Ar	41

Nos testes 50% Ar, a partir dos valores iniciais de pressão P1, que são iguais a 40888 Pa (4169 mmH₂O) e 41108 Pa (4192 mmH₂O), respectivamente para NP1 e NP2, a medida de pressão P1 aumenta para 41008 Pa (4182 mmH₂O) e 41236 Pa (4205 mmH₂O), respectivamente para NP1 e NP2. Nesse intervalo de tempo, com a ausência de vazão no circuito, a pressão P1 mede o nível de coluna de fluido na perna quente mais a pressão P2, totalizando uma variação de 13 mmH₂O, tanto para NP1 como para NP2. A seguir, com o aumento da temperatura TC1 na perna quente (fluido mais leve), a pressão P1 diminui para valores iguais a 40838 Pa (4164 mmH₂O) e 41008 Pa (4182 mmH₂O), respectivamente para NP1 e NP2, totalizando uma diminuição no valor da pressão P1 igual a 18 e 23 mmH₂O, respectivamente para NP1 e NP2. Com a queda na temperatura da perna quente (fluido mais pesado), a pressão P1 volta a aumentar e, dando continuidade, os valores de pressão P1 tendem a acompanhar o comportamento de estabilização da temperatura TC1.

Para a mesma concentração de não-condensável (50% Ar), o comportamento da pressão P1 com NP1 apresenta um atraso em relação à pressão P1 com NP2, de aproximadamente 140 s ao longo do transitório.

As temperaturas TC8, TC9, TC10 e TC11 do primário do trocador de calor, ao longo do transitório de 33.000 s, para os testes 50% Ar, com NP1, são apresentadas na FIG. 4.30.

FIGURA 4. 30 – Temperaturas TC8, TC9, TC10 e TC11 – Teste 50% Ar – NP1

A TAB. 4.37 indica os valores de TC8, TC9, TC10 e TC11, no instante 33.000 s, para NP1.

TABELA 4.37 – TC8, TC9, TC10 e TC11 – Testes 50% Ar – 33.000 s – NP1

Nível de Potência	Testes	TC8 (°C)	TC9 (°C)	TC10 (°C)	TC11 (°C)
NP1	50% Ar	39,9	47,0	34,6	33,5

No final do transitório, a temperatura TC8 apresenta valores mais elevados que a temperatura TC10, diferente do que acontece nos testes 25% Ar, para NP1 e NP2 (ver FIG. 4.14). No teste 50% Ar, com NP1, o fluido aquecido

proveniente do aquecedor elétrico, embora apresentando uma vazão mássica bem pequena ($0,014 \text{ kg/s} \approx 14 \text{ g/s}$) escoa, quase que em sua totalidade, através da região inicial do feixe de tubos verticais do primário do trocador de calor, onde está localizado o termopar TC8, indicando uma medida maior de temperatura TC8 em relação à temperatura TC10 (localizada na região central dos tubos verticais do trocador de calor).

A FIG. 4.31 apresenta os 3000 s iniciais do teste 50% Ar, com NP1, para as temperaturas TC8, TC9, TC10 e TC11. Observa-se que a temperatura TC10 é superior a temperatura TC8, no início do transitório.

FIGURA 4. 31 – Início do Transitório – Temperaturas TC8, TC9, TC10 e TC11 –
Teste 50% Ar – NP1

Há um atraso inicial de 602, 651, 651 e 693 s, respectivamente para TC9, TC8, TC10 e TC11, correspondente ao período de convecção natural

(aproximadamente 500 s) que ocorre no aquecedor elétrico, no início do transitório. Observa-se também uma diminuição da temperatura TC9, que varia de 20 °C para aproximadamente 18 °C, decorrente da entrada de líquido frio no tubulão superior do trocador de calor, proveniente da perna quente, com o início da vazão no circuito. As temperaturas TC8, TC9, TC10 e TC11 apresentam os mesmos comportamentos, no início do transitório do teste 50% Ar, com NP1, com a temperatura TC9 alcançando um valor de aproximadamente 45 °C no instante 850 s.

As temperaturas TC8, TC9, TC10 e TC11 do trocador de calor para os testes 50% Ar, com NP2 ao longo do transitório de 33.000 s, são apresentadas na FIG. 4.32.

FIGURA 4.32 – Temperaturas TC8, TC9, TC10 e TC11 – Teste 50% Ar – NP2

A temperatura TC9 diminui de forma suave de 52 °C, no instante 26.000 s, para 47 °C, no instante 33.000 s. A temperatura TC8 apresenta um comportamento crescente alcançando um valor de 46 °C, no instante 33.000 s. A partir do instante 26.000 s, a temperatura TC10 diminui bruscamente de 39 °C para 29 °C, no instante 33.000 s. O teste 50% Ar, com NP2, evidência o aumento da temperatura TC8 em relação à temperatura TC10, ao longo do transitório, indicando que praticamente toda a vazão (0,019 kg/s) escoa pela região inicial do feixe de tubos verticais do trocador de calor, que é o local onde está instalado o termopar TC8.

A FIG. 4.32 mostra as temperaturas TC8, TC9 e TC10, no início do teste 50% Ar, com NP2. As temperaturas TC8 e TC10 são praticamente iguais, sendo que a partir do instante 1750 s, há uma tendência da temperatura TC8 apresentar valores maiores do que a temperatura TC10. A temperatura TC9 alcança um valor máximo de 51 °C em 679 s.

FIGURA 4.33 – Transitório Inicial – TC8, TC9 e TC10 – Teste 50% Ar – NP2

A FIG. 4.34 relaciona as temperaturas TC21, TC24 e TC25 do secundário do trocador de calor, para os testes 50% Ar, com NP1 e NP2. Observa-se que a temperatura de entrada do secundário do trocador de calor (TC21) apresenta um comportamento bem irregular, oscilando em uma faixa de aproximadamente 16 a 22° C, para NP1 e NP2.

FIGURA 4.34 – Temperaturas do Secundário do Trocador de Calor – 50% Ar – NP1 e NP2

No final dos transitórios, as temperaturas TC21, TC24 e TC25 são respectivamente iguais a 18,8 °C, 28,5 °C e 34,9 °C, para NP1 e com a aplicação de NP2, são respectivamente iguais a 20,1 °C, 29 °C e 34,4 °C.

A comparação entre os testes 25% Ar e 50% Ar, para o mesmo nível de potência aplicado, relacionando as temperaturas TC24 e TC25 do secundário do trocador de calor, no instante 33.000 s, são apresentados na TAB. 4.38.

TABELA 4.38 – Comparação de Temperaturas TC24 e TC25 – 33.000 s – Testes 25% Ar e 50% Ar – NP1 e NP2

Nível de Potência	Testes	TC24 (°C)	TC25 (°C)
NP1	25% Ar	30,7	37,3
NP1	50% Ar	28,5	34,9
NP2	25% Ar	28,4	35,8
NP2	50% Ar	29,0	34,4

Os valores da temperatura TC24, nos testes 25% Ar e 50% Ar, são bem próximos, respectivamente para NP1 e NP2. Em relação à temperatura TC25, a situação é semelhante.

A FIG. 4.35 mostra as potências aplicadas e as potências retiradas pelo secundário do trocador de calor, nos testes 50% Ar, com NP1 e NP2.

FIGURA 4.35 – Potência Aplicada e Potência Retirada – 50% Ar – NP1 e NP2

Há uma diferença entre a potência aplicada e a potência retirada, no instante 33.000 s, igual a 120 e 530 W, respectivamente para NP1 e NP2.

A TAB. 4.39 apresenta a comparação entre os testes 25% Ar e 50% Ar, para o mesmo nível de potência aplicado, relacionando as diferenças entre as potências aplicadas e as retiradas, no final dos transitórios.

TABELA 4.39 – Potências Aplicadas e Retiradas – Testes 25% Ar e 50% Ar – NP1 e NP2

Nível de Potência	Testes	Diferença entre as Potências Aplicadas e Retiradas (W)
NP1	25% Ar	52
NP1	50% Ar	120
NP2	25% Ar	209
NP2	50% Ar	530

As diferenças entre as potências aplicadas e retiradas são maiores para os experimentos com maior concentração inicial de não-condensável (50% Ar), para um mesmo nível de potência aplicado.

A FIG. 4.36 apresenta a variação do nível de não-condensável no primário do trocador de calor (f) nos testes 50% Ar, para NP1 e NP2, ao longo dos transitórios de 33.000 s.

O nível inicial de não-condensável no tubulão superior do trocador de calor, nos testes 50% Ar, é igual a 19 e 18 mm, respectivamente para NP1 e NP2 (ver TAB. 4.15). No instante 33.000 s, os valores dos níveis de não-condensável no trocador de calor são iguais a aproximadamente 20,7 e 19,9 mm, respectivamente para NP1 e NP2. Observar que o nível inicial de não-condensável no tubulão superior do trocador de calor é igual a 19 e 18 mm, respectivamente com NP1 e NP2. Há uma variação de 1,7 e 1,9 mm, respectivamente para NP1 e NP2, em relação às condições iniciais dos níveis de não-condensável nos testes 50% Ar.

FIGURA 4.36 – Níveis de Não-Condensáveis – 33.000 s – NP1 e NP2

A variação do nível de não-condensável no primário do trocador de calor (f) nos testes 50% Ar, para NP1 e NP2, nos primeiros 3000 s dos transitórios, é indicada na FIG. 4.37.

FIGURA 4.37 – Níveis de Não-Condensáveis – 3000 s – NP1 e NP2

No início dos experimentos 50% Ar, tem-se para o nível de não-condensável (f), atrasos de 469 e 308 s, respectivamente para NP1 e NP2, correspondente aos atrasos existentes na vazão (ver FIG. 4.22).

As condições finais dos testes 50% Ar, para NP1 e NP2, após resfriamento de 48h, em temperatura ambiente, são apresentadas na TAB. 4.40, sendo que o nível final de não-condensável no trocador de calor e o nível final de líquido no vaso de expansão são iguais aos apresentados nas condições iniciais do testes (ver TAB. 4.15).

TABELA 4.40 – Condições Finais dos Testes 50% Ar – NP1 e NP2

Nível de Potência	Testes	Nível Final de Ar (mmH ₂ O)	Nível Final de Líquido no Vaso de Expansão (mmH ₂ O)	Massa Final de Ar (kg)	Volume Final de Ar (m ³)
NP1	50% Ar	19	180	$7,048 \cdot 10^{-4}$	$6,234 \cdot 10^{-4}$
NP2	50% Ar	18	184	$6,540 \cdot 10^{-4}$	$5,788 \cdot 10^{-4}$

4.3 Testes 75% Ar – NP1 e NP2

O comportamento apresentado pelas variáveis de temperatura, vazão e pressão nos experimentos 75% Ar e 100% Ar é totalmente diferenciado, em relação aos testes 25% Ar e 50% Ar, devido à geometria do circuito e a maior concentração inicial de ar inserida no trocador de calor, conforme esquema apresentado na FIG. 4.38.

Na condição inicial dos testes 75% Ar e 100% Ar, não há uma continuidade (ligação) entre o líquido presente na perna quente e no tubulão superior do trocador de calor, sendo separado pelo não-condensável inserido na BCN.

A TAB. 4.41 apresenta as condições iniciais dos testes 75% Ar com NP1 e NP2, relacionando o nível de potência aplicado, concentração inicial de não-condensável, potência efetivamente aplicada, nível inicial de não-

condensável no tubulão superior do trocador de calor, nível inicial de líquido no vaso de expansão e a massa e o volume iniciais de ar. A massa e volume iniciais de não-condensável são calculados pelo programa computacional *Air_NCL*.

FIGURA 4.38 – Geometria da BCN e Concentração Inicial de Ar

TABELA 4.41 – Condições Iniciais dos Testes 75% Ar – NP1 e NP2

Nível de Potência	Testes	Potência Aplicada (W)	Nível Inicial de Ar (mmH ₂ O)	Nível Inicial de Líquido no Vaso de Expansão (mmH ₂ O)	Massa Inicial de Ar (kg)	Volume Inicial de Ar (m ³)
NP1	75% Ar	1580	29	198	$1,118 \cdot 10^{-3}$	$9,827 \cdot 10^{-4}$
NP2	75% Ar	2596	29	193	$1,117 \cdot 10^{-3}$	$9,827 \cdot 10^{-4}$

As condições finais dos testes 75% Ar, para NP1 e NP2, após resfriamento de 48h, em temperatura ambiente, são apresentadas na TAB. 4.42.

TABELA 4.42 – Condições Finais dos Testes 75% Ar – NP1 e NP2

Nível de Potência	Testes	Nível Final de Ar (mmH ₂ O)	Nível Final de Líquido no Vaso de Expansão (mmH ₂ O)	Massa Final de Ar (kg)	Volume Final de Ar (m ³)
NP1	75% Ar	12	161	$4,090 \cdot 10^{-4}$	$3,614 \cdot 10^{-4}$
NP2	75% Ar	9	172	$2,707 \cdot 10^{-4}$	$2,382 \cdot 10^{-4}$

A análise das condições finais dos testes 75% Ar permite concluir que, tanto para NP1 como para NP2, após a conclusão dos testes, há uma diminuição no nível de não-condensável no trocador de calor, no nível de líquido no vaso de expansão, na massa e no volume de não-condensável na BCN, indicando uma possível liberação de não-condensável para o ambiente. Esse assunto será retomado e detalhado no decorrer do trabalho.

A FIG. 4.39 apresenta as temperaturas TC1 e TC17 e as vazões na BCN para os testes 75% Ar, com NP1 e NP2, sendo que a duração do transitório é de 30.000 s.

FIGURA 4.39 – Temperaturas TC1 e TC17, Vazões– NP1 e NP2

Os resultados obtidos para as temperaturas TC1, TC17 e para as vazões, no final do transitório, são indicados na TAB. 4.43. No final do transitório,

as temperaturas TC1, TC17 e a vazão são maiores para um nível de potência aplicado maior (NP2).

TABELA 4.43 – TC1 e TC17 – Vazões – NP1 e NP2 – 30.000 s

Nível de Potência	Testes	TC1 (°C)	TC17 (°C)	Vazão (kg/s)
NP1	75% Ar	55,4	30	0,015
NP2	75% Ar	62,7	33	0,020

A comparação das temperaturas TC1, TC17 e das vazões, com NP1 e NP2, é apresentada na FIG. 4.40, compreendendo os instantes iniciais dos testes.

FIGURA 4.40 – Transitórios Iniciais – TC1, TC17 e Vazões – Testes 75% Ar – NP1 e NP2

Os atrasos iniciais das vazões, para os testes 75% Ar, com NP1 e NP2, são devidos ao tempo necessário para que o nível de líquido na perna quente

atinga o tubulão superior do trocador de calor, correspondendo à expansão do volume de líquido no interior do aquecedor elétrico e da perna quente, que é decorrente do aumento de temperatura do líquido ocasionado pela aplicação do degrau de potência.

A convecção natural no aquecedor elétrico é observada por meio do comportamento característico da temperatura TC1, em relação à ausência de vazão no circuito, para NP1 e NP2, sendo indicada na FIG. 4.41. O teste 75% Ar, com NP2, apresenta TC1 com menor intervalo de tempo em convecção natural (896 s) em função da maior potência aplicada.

FIGURA 4.41 – Convecção Natural – TC1 e Vazão – 75% Ar – NP1 e NP2

Os registros de vazão foram iniciados em 1400 s e 896 s, respectivamente para NP1 e NP2. Quando o nível de líquido na perna quente atinge o tubulão superior do trocador de calor, estabelece-se uma pequena vazão

na BCN, atingindo um valor máximo de 0,012 kg/s no instante 1547 s e 0,018 kg/s em 1029 s, respectivamente para NP1 e NP2.

Com o estabelecimento da vazão no circuito e, a conseqüente entrada de líquido frio no aquecedor elétrico, as vazões diminuem para aproximadamente 0,003 kg/s e 0,004 kg/s, respectivamente para NP1 e NP2, apresentando um comportamento praticamente estável até o instante 2100 s e 1197 s, respectivamente para NP1 e NP2. O intervalo de tempo do comportamento estável da vazão é de aproximadamente 469 s e 77 s, respectivamente para NP1 e NP2. Observa-se que o intervalo de tempo é menor no teste com maior potência aplicada (NP2).

Com o contínuo fornecimento de potência ao fluido, por intermédio do aquecedor elétrico e com a entrada de uma quantidade muito pequena de líquido frio (perna fria) no aquecedor elétrico, o fluido, no seu interior, alcança a temperatura de saturação, que é aproximadamente 107 °C ($1,3 \cdot 10^5$ Pa), ocorrendo um transitório de mudança de fase. Nesse transitório, com a geração de uma maior quantidade vapor, tem-se um aumento praticamente instantâneo de volume específico no aquecedor elétrico e, as vazões no circuito atingem um valor máximo de 0,09 kg/s, nos instantes 2142 s e 1225 s, respectivamente para NP1 e NP2. Os valores máximos de vazão podem ser bem maiores, pois o fundo de escala do MVM é igual a 0,08 kg/s (Krohne Conaut, 2003).

Durante o transitório com mudança de fase (com duração de aproximadamente 7 s), há a condensação do vapor no trocador de calor, ocasionando uma diminuição na pressão no circuito. Os comportamentos das pressões P1 e P2, no circuito, serão analisados e discutidos mais adiante. Além da condensação do vapor, no trocador de calor, que provoca uma repentina diminuição do volume específico do fluido no trocador de calor, há outro evento, que ocorre praticamente de forma simultânea, que é a entrada de uma maior quantidade de líquido frio (perna fria) no aquecedor elétrico, ocasionada pela alta vazão (pontual) no circuito, que também determina a diminuição do volume específico do fluido no aquecedor elétrico e na perna quente e, a conseqüente diminuição da temperatura do fluido no aquecedor elétrico (TC1).

Após o término do período em convecção natural, o comportamento da temperatura TC1 apresenta uma menor taxa de aumento, em relação ao período de convecção natural, em função de haver vazão no circuito. A taxa de aumento é menor para o teste efetuado com NP1. O comportamento da TC1 apresenta a mesma tendência, tanto para NP1 como para NP2, até alcançar a temperatura de saturação (107 °C). A seguir, a temperatura TC1 apresenta uma abrupta diminuição, atingindo valores iguais a 45 °C, no instante 2457 s, e 55 °C, no instante 1491 s, respectivamente para NP1 e NP2. Na sequência, a temperatura TC1 aumenta para valores iguais a 52 °C, no instante 2898 s, e 61 °C, no instante 1827 s, respectivamente para NP1 e NP2. A seguir, as temperaturas TC1 tendem a se estabilizar, até atingir o regime permanente.

A partir da mudança de fase, a vazão diminui no circuito, decorrente do estabelecimento de uma menor temperatura média no aquecedor elétrico (entrada de líquido frio no aquecedor). Alcançaram-se valores de vazão iguais a 0,010 kg/s, no instante 2394 s, e 0,013 kg/s, no instante 1428 s, respectivamente para NP1 e NP2. A seguir, a vazão aumenta para 0,016 kg/s, no instante 2870 s, e para 0,019 kg/s, no instante 1764 s, respectivamente para NP1 e NP2. Esse aumento se deve a entrada de líquido mais aquecido no aquecedor elétrico (TC17). A partir desse momento, a vazão, para NP1 e NP2, tende a se estabilizar, até atingir o regime permanente.

A temperatura TC17, no período anterior à mudança de fase, aumenta aproximadamente 2 °C e 4 °C, respectivamente para NP1 e NP2, indicando transmissão de calor por condução na tubulação (região inferior do aquecedor elétrico). Após a mudança de fase, a temperatura TC17 aumenta abruptamente (com a entrada de líquido mais aquecido no aquecedor elétrico) para valores iguais a 34 °C, no instante 2500 s e 38 °C, no instante 1500 s, para NP1 e NP2. A seguir, o comportamento da temperatura TC17 se estabiliza, até o estabelecimento do regime permanente.

O intervalo de tempo compreendido entre o início do transitório e o estabelecimento da temperatura de saturação no aquecedor elétrico, para uma mesma concentração inicial de não-condensável (75% Ar), é maior, no teste

realizado com menor potência aplicada (NP1), sendo igual a 2121 s e 1211 s, respectivamente para NP1 e NP2.

O intervalo de tempo entre o início do registro da vazão e o instante em que alcança o seu valor máximo é maior para o teste efetuado com menor potência aplicada (NP1), sendo igual a 742 s e 329 s, respectivamente para NP1 e NP2.

Os instantes iniciais dos testes 75% Ar, até 3000 s, são indicados na FIG. 4.42, comparando as pressões P1 e P2, respectivamente com NP1 e NP2.

FIGURA 4.42 – Transitórios Iniciais – P1 e P2 – Testes 75% Ar – NP1 e NP2

As medidas das pressões P1, no instante inicial do transiente, são iguais a 41.058 Pa (4187 mmH₂O) e 41.163 Pa (4197 mmH₂O), respectivamente

para NP1 e NP2. No instante 3000 s, as pressões P1 são iguais a 40.834 Pa (4164 mmH₂O) e 40.694 Pa (4150 mmH₂O), respectivamente para NP1 e NP2.

Em relação às medidas de pressão P2, no instante inicial do transitório, são iguais a 3900 Pa (398 mmH₂O) e 3854 Pa (393 mmH₂O), respectivamente para NP1 e NP2. No instante 3000 s, as pressões P2 são iguais a 3781 Pa (386 mmH₂O) e 3607 Pa (368 mmH₂O), respectivamente para NP1 e NP2.

A FIG. 4.43 indica a condição inicial dos testes 75% Ar, com NP1 e NP2, em relação ao sensor de pressão P1. A comparação entre os valores iniciais calculados e medidos de P1 indica uma diferença de 40 e 55 mmH₂O, respectivamente para NP1 e NP2.

Considerando a precisão do sensor de pressão P1 é igual a $\pm 12,5$ mmH₂O (Validyne, 2005), há um desnível de montagem do sensor de pressão P2 em relação ao nível de líquido do vaso de expansão igual a 27 e 42 mmH₂O, respectivamente para NP1 e NP2. Os resultados obtidos dos desníveis, em relação ao sensor de pressão P1, são excelentes.

FIGURA 4.43 – Condição Inicial – Sensor de Pressão P1 – 75% Ar – NP1 e NP2

A condição inicial dos testes 75% Ar, com NP1 e NP2, em relação ao sensor de pressão P2, é apresentada na FIG. 4.44. A comparação entre os valores iniciais calculados e medidos de P2 indica uma diferença de 10 mmH₂O, para NP1 e NP2.

Considerando a precisão do sensor de pressão P2 é igual a ± 5 mmH₂O (Validyne, 2005), há um desnível de montagem do sensor de pressão P2 em relação ao nível de líquido do vaso de expansão igual a 5 mmH₂O, para NP1 e NP2. O sensor de pressão P2 indica resultados excelentes, em relação aos resultados dos desníveis.

$$\Delta P2_{NP1} = 198 + 839 - 649 = 388 \text{ mm} = \underline{3805 \text{ Pa}}$$

$$\Delta P2_{NP2} = 193 + 839 - 649 = 383 \text{ mm} = \underline{3756 \text{ Pa}}$$

FIGURA 4.44 – Condição Inicial – Sensor de Pressão P2 – 75% Ar – NP1 e NP2

As FIG. 4.45 e 4.46 representam as comparações das pressões P1 e P2, desde o instante 2000 s até 2250 s e desde o instante 1000 s até 1500 s, respectivamente para NP1 e NP2.

Ao longo do transitório, a pressão P1 aumenta até alcançar o valor de 41.756 Pa (4258 mmH₂O) e 41.917 Pa (4274 mmH₂O), respectivamente para NP1

e NP2. Nos instantes 2135 s e 1218 s, a pressão P1 apresenta uma acentuada diminuição, correspondente à condensação de vapor no trocador de calor, alcançando valores iguais a 30.531 Pa (2135 mmH₂O) e 21.948 (mmH₂O), respectivamente para NP1 e NP2. A seguir, após o transitório de condensação de vapor no trocador de calor, a pressão P1 aumenta para valores iguais a 40.853 Pa (2156 mmH₂O) e 39.563 Pa (1232 mmH₂O), respectivamente para NP1 e NP2.

FIGURA 4.45 – Comparação de Pressões P1 e P2 – Testes 75% Ar – NP1

A pressão P2 aumenta linearmente até alcançar o valor de 4270 Pa (435 mmH₂O), no instante 2114 s, e 4171 Pa (425 mmH₂O), no instante 1197 s, respectivamente para NP1 e NP2. A seguir, a pressão P2 aumenta abruptamente para 4750 Pa (484 mmH₂O), no instante 2121 s e 12.685 Pa (1294 mmH₂O), no instante 1211 s, respectivamente para NP1 e NP2. O aumento acentuado de pressão P2 corresponde ao intervalo de tempo em que há formação de vapor no

aquecedor elétrico (aumento da fração de vazio na coluna quente do sistema), que são iguais a 7 s e 14 s, respectivamente para NP1 e NP2. A seguir, a pressão P2 diminui acentuadamente para valores iguais a 1383 Pa (141 mmH₂O), no instante 2128 s, e 3258 Pa (332 mmH₂O), no instante 1218 s, respectivamente para NP1 e NP2. A diminuição brusca da pressão P2 corresponde ao intervalo de tempo em que há condensação de vapor no trocador de calor, sendo igual a 7 s, para NP1 e NP2. A seguir, a pressão P2 aumenta para valores iguais a 4948 Pa (505 mmH₂O), no instante 2142 s, e 4012 Pa (409 mmH₂O), no instante 1225 s, respectivamente para NP1 e NP2, estabilizando em 3912 Pa (399 mmH₂O), no instante 2250s, e 3627 Pa (370 mmH₂O), no instante 1500 s, respectivamente para NP1 e NP2.

FIGURA 4.46 – Comparação de Pressões P1 e P2 – Testes 75% Ar – NP2

As análises detalhadas das pressões P1 e P2, considerando seus valores iniciais e finais, nos transitórios apresentados, para NP1 e NP2, permitem concluir que uma parte da massa de não-condensável permanece no trocador de calor e uma outra parte da massa de não-condensável, é arrastada do trocador de calor e liberada para o ambiente, pelo vaso de expansão, com a mudança de fase na BCN, conforme mostrado na FIG. 4.47.

FIGURA 4.47 – Esquema de Liberação de Não-Condensável para o Ambiente

Como já citado, o acentuado aumento da pressão P2, a partir do instante 2114 s e 1197 s, respectivamente para NP1 e NP2, indica o intervalo de tempo onde há o aumento da formação de vapor no aquecedor elétrico, fazendo com que a temperatura do não-condensável também aumente no tubulão superior do trocador de calor. O aumento da temperatura do não-condensável determina o aumento do seu volume, que atinge a região inferior do trocador de calor. O abrupto aumento da vazão ($\dot{m}$) do circuito, causado pela expansão do fluido com

o alcance da temperatura de saturação (107 °C) no aquecedor elétrico, arrasta o não-condensável presente na região inferior do trocador de calor, através da perna fria, até atingir a linha de surto, onde o não-condensável é liberado para o ambiente, pelo vaso de expansão.

A FIG. 4.48 indica a variação do não-condensável ao longo do transitório, nos testes 75% Ar, para NP1 e NP2, até o instante antes de ocorrer mudança de fase na BCN. Os valores do nível de não-condensável no trocador de calor foram calculados pelo programa *Air_NCL*.

FIGURA 4.48 – Variação de Não-Condensável no Trocador de Calor – NP1 e NP2

O nível de não-condensável no trocador de calor alcança valores teóricos iguais a 0,675 m, no instante 2135 s, e 0,82 m, no instante 1218 s, respectivamente para NP1 e NP2. Os valores teóricos alcançados do nível de não-condensável, no trocador de calor, justificam a liberação de não-condensável para o ambiente.

Para os testes 75% Ar, o nível teórico de não-condensável é maior (0,82 m) para o teste realizado com uma potência aplicada maior (NP2).

As FIG. 4.49 4.50 apresentam as temperaturas TC8, TC9, TC10 e TC11, para os testes 75% Ar, respectivamente para NP1 e NP2, sendo que a duração do transitório é de 30.000 s.

FIGURA 4.49 – Temperaturas TC8, TC9, TC10 e TC11 – 30.000 s – NP1

FIGURA 4.50 – Temperaturas TC8, TC9, TC10 e TC11 – 30.000 s – NP2

A TAB. 4.44 mostra os valores das temperaturas TC8, TC9, TC10 e TC11, no instante 30.000 s, para NP1 e NP2.

TABELA 4.44 – Temperaturas TC8, TC9, TC10 e TC11 – 30.000 s – NP1 e NP2

Nível de Potência	Testes	TC8 (°C)	TC9 (°C)	TC10 (°C)	TC11 (°C)
NP1	75% Ar	33,9	50,5	37,2	33,0
NP2	75% Ar	34,6	57,3	40,7	36,3

As temperaturas TC8, TC9, TC10 e TC11 são maiores, no instante 30.000 s, no teste realizado com maior potência aplicada (NP2). Nos testes, no instante 30.000 s, as temperaturas TC8 e TC11 apresentam valores bem próximos, sendo que com NP2, o valor da temperatura TC11 supera o da temperatura TC8 em quase 2 °C. Devido à presença de não-condensável, há uma

sensível diminuição de transferência de calor para o secundário do trocador de calor, diminuindo a sua eficiência.

As temperaturas TC8, TC9, TC10, TC11 e vazão, no início do transitório, são indicadas nas FIG. 4.51 e 4.52, respectivamente para NP1 e NP2.

FIGURA 4.51 – Início do Transitório – TC8, TC9, TC10, TC11 e Vazão – NP1

Para o teste, com NP1, as temperaturas TC8, TC9, TC10 e TC11 apresentam o mesmo comportamento da vazão da BCN. No instante 1582 s, a temperatura TC8 alcança valor igual a 33 °C. A seguir, as temperaturas atingem seus valores máximos, no início do transitório, que são iguais a 80 °C, no instante 2128 s, 82 °C, no instante 2135 s, 59 °C, no instante 2128 s e 65 °C, no instante 2135 s, respectivamente para TC8, TC9, TC10 e TC11. No instante 4000 s, os

valores das temperaturas são iguais a 26,3 °C, 43,7 °C, 29 °C e 26,7 °C, respectivamente para TC8, TC9, TC10 e TC11.

FIGURA 4.52 – Início do Transitório – TC8, TC9, TC10, TC11 e Vazão – NP2

As temperaturas TC8, TC9, TC10 e TC11, para NP2, apresentam o mesmo comportamento da vazão da BCN. A temperatura TC8, no instante 1050 s alcança valor igual a 40 °C, sendo superior ao valor alcançado no teste com NP1, que é igual a 33 °C. A seguir, as temperaturas atingem seus valores máximos, que são iguais a 87,5 °C, 93 °C, 60 °C e 68 °C, respectivamente para TC8, TC9, TC10 e TC11, todas no instante 1218 s. No instante 2500 s, os valores das temperaturas são iguais a 28 °C, 51 °C, 32,5 °C e 29,2 °C, respectivamente para TC8, TC9, TC10 e TC11. Os valores de temperaturas TC8, TC9, TC10 e TC11 são maiores para o teste realizado com NP2.

As FIG. 4.53 e 4.54 mostram o comportamento oscilatório das temperaturas TC8, TC9, TC10, respectivamente para NP1 e NP2, durante e após o transitório de mudança de fase.

FIGURA 4.53 – Comportamento Oscilatório de TC8, TC9, TC10 – NP1

Para o teste com NP1, observa-se que as temperaturas TC8, TC9, TC10 e TC11 apresentam um comportamento oscilatório, durante o período de mudança de fase. Os intervalos de tempo das oscilações, para NP1, são iguais a 42 s, 42 s, 49 s e 49 s, respectivamente para TC8, TC9, TC10 e TC11.

No teste realizado com NP2, têm-se períodos de oscilação para as temperaturas TC8, TC9, TC10 e TC11, durante o período de mudança de fase. Os valores dos intervalos de tempo são iguais a 56 s, 42 s, 63 s e 21 s, respectivamente para TC8, TC9, TC10 e TC11.

A oscilação da temperatura TC11 (saída do primário do trocador de calor) indica a entrada de líquido frio, proveniente da perna fria, causada pela abrupta queda de pressão, decorrente da condensação de vapor no trocador de calor. Embora os instrumentos medidores de pressão (P1 e P2) apresentem excelente precisão, não foram suficientemente capazes de registrar a ocorrência de picos de pressão negativa no trocador de calor, em função da condensação de vapor.

FIGURA 4.54 – Comportamento Oscilatório de TC8, TC9 e TC10 – NP2

Há o registro da tendência da temperatura TC11, indicando a entrada de líquido frio no trocador de calor, de acordo com a FIG. 4.55, para NP2, indicando a inversão da vazão na BCN. A temperatura TC11, com NP1, não apresenta registro de inversão de vazão no circuito, em decorrência do tempo adotado para o registro das variáveis na aquisição de dados. O medidor de vazão

magnético não registrou a inversão da vazão no circuito. Embora os sensores de pressão (P1 e P2) apresentem excelente precisão, não foram suficientemente capazes de registrar a ocorrência de picos de pressão negativa no trocador de calor, para os intervalos de tempo de gravação adotados na aquisição de dados.

FIGURA 4.55 – Temperatura TC11 – Saída do Trocador de Calor – NP1 e NP2

A temperatura TC11 diminui aproximadamente 21 °C, no teste com NP2, com a entrada de líquido frio no trocador de calor, por meio da perna fria da BCN.

As temperaturas TC21, TC24 e TC25, do secundário do trocador de calor, são apresentadas na FIG. 4.56, para um transitório de 30.000 s. As temperaturas do secundário do trocador de calor apresentam valores iguais a

35,8 °C, 28, 2 °C e 21 °C, respectivamente para TC21, TC24 e TC25, com NP1 e 35,5 °C, 27,7 °C e 19,7 °C, respectivamente para TC21, TC24 e TC25, com NP2, no instante 30.000 s. Observa-se que as temperaturas do secundário apresentam valores próximos, nos testes realizados com NP1 e NP2.

FIGURA 4.56 – Temperaturas TC21, TC24 e TC25 – NP1 e NP2

A FIG. 4.57 mostra os instantes iniciais do transitório para as temperaturas TC21, TC24 e TC25, com NP1 e NP2. As temperaturas TC24 e TC25 apresentam valores iniciais de aproximadamente 16 °C e permanecem estáveis até o instante 1225 s, quando a temperatura TC25, para NP2, apresenta um acentuado aumento (degrau de temperatura igual a 7 °C), com a elevação das temperaturas do primário do trocador de calor, no instante 1218 s. A partir do instante 1225 s, a temperatura TC24, para NP2, aumenta suavemente. No instante 1855 s, a temperatura TC25, para NP1, aumenta gradualmente, sendo

que, no instante 2128 s, que corresponde à elevação das temperaturas do primário do trocador de calor, para NP1, apresenta um degrau de temperatura de aproximadamente 4 °C. A temperatura TC24, para NP1, aumenta suavemente, a partir do instante 2128 s. As temperaturas TC21, para NP1 e NP2, não se alteram significativamente no início do transitório.

FIGURA 4.57 – Transitório Inicial – TC21, TC24 e TC25 – NP1 e NP2

A FIG. 4.58 representa a comparação entre a potência aplicada na BCN e a potência retirada pelo secundário do trocador de calor, para NP1 e NP2, ao longo do transitório de 30.000 s.

No instante 30.000 s, a diferença entre as potências aplicada e retirada é igual a 340 W e 490 W, respectivamente para NP1 e NP2.

FIGURA 4.58 – Potências Aplicadas e Retiradas – 30.000 s – NP1 e NP2

A TAB. 4.45 apresenta a comparação entre os testes 50% Ar e 75% Ar, para o mesmo nível de potência aplicado, relacionando as diferenças entre as potências aplicadas e as retiradas, no final dos transitórios.

TABELA 4.45 – Potências Aplicadas e Retiradas – Testes 50% Ar e 75% Ar – NP1 e NP2

Nível de Potência	Testes	Diferença entre as Potências Aplicadas e Retiradas (W)
NP1	50% Ar	120
NP1	75% Ar	340
NP2	50% Ar	530
NP2	75% Ar	590

As diferenças entre as potências aplicadas e retiradas são maiores para os experimentos com maior concentração inicial de não-condensável (75% Ar), para um mesmo nível de potência aplicado.

A FIG. 4.59 indica o comportamento inicial das potências aplicada e retirada, para NP1 e NP2.

O comportamento da potência retirada, para NP1 e NP2, apresenta a mesma tendência da temperatura TC25, para NP1 e NP2. Há um degrau de potência retirada de 400 W e 700 W, respectivamente para NP1 e NP2, que corresponde ao elevado aumento de temperatura no primário do trocador de calor, nos instantes 2121 s e 1211 s, respectivamente para NP1 e NP2.

FIGURA 4.59 – Potências Aplicadas e Retiradas – 4000 s – NP1 e NP2

4.4 Testes 100% Ar – NP1 e NP2

A TAB. 4.46 apresenta as condições iniciais dos testes 100% Ar com NP1 e NP2, relacionando o nível de potência aplicado, concentração inicial de não-condensável, potência efetivamente aplicada, nível inicial de não-condensável no tubulão superior do trocador de calor, nível inicial de líquido no vaso de expansão e a massa e o volume iniciais de ar. O programa computacional *Air_NCL* calculou a massa e volume iniciais de não-condensável.

TABELA 4.46 – Condições Iniciais dos Testes 100% Ar – NP1 e NP2

Nível de Potência	Testes	Potência Aplicada (W)	Nível Inicial de Ar (mmH ₂ O)	Nível Inicial de Líquido no Vaso de Expansão (mmH ₂ O)	Massa Inicial de Ar (kg)	Volume Inicial de Ar (m ³)
NP1	100% Ar	1620	38	188	$1,341 \cdot 10^{-3}$	$1,194 \cdot 10^{-3}$
NP2	100% Ar	2445	38	207	$1,358 \cdot 10^{-3}$	$1,194 \cdot 10^{-3}$

A TAB. 4.47 apresenta as condições finais dos testes 100% Ar, para NP1 e NP2, após resfriamento de 48h, em temperatura ambiente.

TABELA 4.47 – Condições Finais dos Testes 100% Ar – NP1 e NP2

Nível de Potência	Testes	Nível Final de Ar (mmH ₂ O)	Nível Final de Líquido no Vaso de Expansão (mmH ₂ O)	Massa Final de Ar (kg)	Volume Final de Ar (m ³)
NP1	100% Ar	8	125	$2,346 \cdot 10^{-4}$	$2,103 \cdot 10^{-4}$
NP2	100% Ar	8	141	$2,374 \cdot 10^{-4}$	$2,103 \cdot 10^{-4}$

Da mesma forma ocorrida com os testes 75% Ar, a comparação das condições iniciais e finais dos testes 100% Ar, permite concluir que, tanto para NP1 como para NP2, há uma diminuição no nível de não-condensável no trocador de calor, no nível de líquido no vaso de expansão, na massa e no volume de não-condensável na BCN, após a conclusão dos testes, indicando que também há

liberação de não-condensável para o ambiente. O assunto será abordado mais adiante.

A FIG. 4.60 apresenta as temperaturas TC1 e TC17 e as vazões na BCN para os testes 100% Ar, com NP1 e NP2, sendo que a duração do transitório é de 30.000 s.

FIGURA 4.60 – Temperaturas TC1 e TC17, Vazões– NP1 e NP2

A TAB. 4.48 mostra os resultados obtidos para as temperaturas TC1, TC17 e para as vazões, no final do transitório, indicando que as temperaturas TC1, TC17 e a vazão são maiores para um nível de potência aplicado maior (NP2). A comparação entre as temperaturas TC1, TC17 e as vazões, nos testes 75% Ar e 100% Ar, com NP1 e NP2, no instante 30.000 s, é apresentada na TAB. 4.49, mostrando valores bem semelhantes para as temperaturas e vazões.

TABELA 4.48 – TC1 e TC17 – Vazões – NP1 e NP2 – 30.000 s

Nível de Potência	Testes	TC1 (°C)	TC17 (°C)	Vazão (kg/s)
NP1	100% Ar	55,2	31,7	0,016
NP2	100% Ar	61,6	33,4	0,020

TABELA 4.49 – TC1, TC17 e de Vazões – 75% Ar e 100% Ar – NP1 e NP2

Nível de Potência	Testes	TC1 (°C)	TC17 (°C)	Vazão (kg/s)
NP1	75% Ar	55,4	30,0	0,015
NP1	100% Ar	55,2	31,7	0,016
NP2	75% Ar	62,7	33,0	0,020
NP2	100% Ar	61,6	33,4	0,020

A FIG. 4.61 apresenta a comparação das temperaturas TC1, TC17 e das vazões, com NP1 e NP2, compreendendo os instantes iniciais dos testes.

FIGURA 4.61 – Transitórios Iniciais – TC1, TC17 e Vazões – Testes 100% Ar – NP1 e NP2

Análogo aos testes 75% Ar, os atrasos das vazões, nos testes 100% Ar, com NP1 e NP2, são devidos ao tempo necessário para que o nível de líquido contido na perna quente atinja o tubulão superior do trocador de calor, correspondendo à expansão do volume de líquido no interior do aquecedor elétrico e da perna quente, que é decorrente do aumento de temperatura do líquido ocasionado pela aplicação do degrau de potência.

Nos testes 100% Ar, a convecção natural no aquecedor elétrico é observada por meio do comportamento característico da temperatura TC1, em relação à ausência de vazão no circuito, para NP1 e NP2, sendo indicada na FIG. 4.62. O teste 100% Ar, com NP2, apresenta TC1 com menor intervalo de tempo em convecção natural (1183 s) em função da maior potência aplicada.

FIGURA 4.62 – Convecção Natural – TC1 e Vazão – 100% Ar – NP1 e NP2

A comparação entre os intervalos de tempo de TC1 em convecção natural, para os testes 75% Ar e 100% Ar, com NP1 e NP2, é apresentada na TAB. 4.50. Para o mesmo nível de potência aplicado e para maior concentração inicial de não-condensável, indica maior intervalo de tempo de TC1 com convecção natural.

TABELA 4.50 – Convecção Natural – 75% Ar e 100% Ar – NP1 e NP2

Nível de Potência	Testes	TC1 com Convecção Natural (s)
NP1	75% Ar	896
NP1	100% Ar	1183
NP2	75% Ar	1400
NP2	100% Ar	1722

Os registros de vazão foram iniciados em 1722 s e 1183 s, respectivamente para NP1 e NP2. Após o nível de líquido na perna quente atingir o tubulão superior do trocador de calor, estabelece-se uma vazão no circuito experimental, atingindo um valor de 0,025 kg/s, no instante 1850 s, e após alcança 0,092 kg/s, no instante 1897 s, para NP1. Para o teste com NP2, a vazão alcança um valor máximo de 0,092 kg/s, no instante 1253 s.

Com a entrada de líquido frio no aquecedor elétrico, as vazões diminuem para aproximadamente 0,007 kg/s, no instante 1939 s e 0,008 kg/s, no instante 1281 s, respectivamente para NP1 e NP2. A seguir, a vazões aumentam para 0,016 kg/s, no instante 1981 s, e 0,034 kg/s, no instante 1309 s, respectivamente para NP1 e NP2.

Após esses eventos, a vazão, para NP1, tende a manter um comportamento estável até 0,014 kg/s, no instante 4000 s, e a vazão, para NP2, diminui para 0,017 kg/s, no instante 1463 s, e, a seguir, tende a se estabilizar em 0,019 kg/s, no instante 4000 s.

No aquecedor elétrico, com o contínuo fornecimento de potência ao sistema, o fluido alcança a temperatura de saturação, que é igual a 107 °C (para $1,3 \cdot 10^5$ Pa), estabelecendo um transitório de mudança de fase. Nesse período, há

a geração de uma maior quantidade vapor, determinando um aumento praticamente instantâneo de volume específico do fluido no aquecedor elétrico. As vazões no circuito alcançam o valor máximo de 0,092 kg/s, nos instantes 1897 s e 1253 s, respectivamente para NP1 e NP2. Os valores máximos de vazão podem ser bem maiores, pois o fundo de escala do MVM é igual a 0,08 kg/s (Krohne Conaut, 2003).

Os testes 75% Ar alcançam valores máximos de vazão, nos instantes 2142 s e 1225 s, respectivamente para NP1 e NP2. A comparação entre os testes 100% Ar e 75 % Ar, indica que as vazões máximas (0,092 kg/s) são atingidas mais rapidamente nos experimentos realizados com menor concentração inicial de não-condensável (75% Ar) e com maior nível de potência (NP2) e com maior concentração de não-condensável (100% Ar) e menor potência aplicada (NP1).

A condensação de vapor no trocador de calor (com duração de aproximadamente 7 s) ocorre de forma semelhante à apresentada na análise dos testes 75 %, determinando a queda de pressão (P1 e P2) na BCN. A condensação do vapor provoca uma acentuada diminuição do volume específico do fluido e a entrada de uma maior quantidade de líquido frio (perna fria) no aquecedor elétrico, ocasionada pela alta vazão (pontual) no circuito, também determina a diminuição do volume específico do fluido no aquecedor elétrico e na perna quente e, a conseqüente diminuição da temperatura do fluido no aquecedor elétrico (TC1).

Após o término do período em convecção natural, o comportamento da temperatura TC1 apresenta uma menor taxa de aumento, em relação ao período de convecção natural, com o estabelecimento de vazão na BCN. A taxa de aumento é menor para o teste efetuado com NP1.

O comportamento da TC1 apresenta a mesma tendência, tanto para NP1 como para NP2, até alcançar a temperatura de saturação (107 °C). A seguir, a temperatura TC1 apresenta uma abrupta diminuição, atingindo valores iguais a 48 °C, no instante 2261 s, e 55 °C, no instante 1512 s, respectivamente para NP1 e NP2. Na seqüência, a temperatura TC1 aumenta para valores iguais a 55 °C, no

instante 2590 s, e 58°C, no instante 1813 s, respectivamente para NP1 e NP2. A seguir, as temperaturas TC1 tendem a se estabilizar, até atingir o regime permanente.

A temperatura TC17, no período anterior à mudança de fase, aumenta aproximadamente 10 °C e 8 °C, respectivamente para NP1 e NP2, indicando transmissão de calor por condução na tubulação (região inferior do aquecedor elétrico).

Após a mudança de fase, a temperatura TC17 aumenta abruptamente (com a entrada de líquido mais aquecido no aquecedor elétrico) para valores iguais a 39 °C, no instante 2037 s e 33 °C, no instante 1561 s, para NP1 e NP2. A seguir, o comportamento da temperatura TC17 apresenta uma suave diminuição (entrada de líquido mais frio da perna fria) e, tende a se estabilizar, até o estabelecimento do regime permanente.

O intervalo de tempo compreendido entre o início do transitório e o estabelecimento da temperatura de saturação no aquecedor elétrico, para uma mesma concentração inicial de não-condensável (100% Ar), é maior, no teste realizado com menor potência aplicada (NP1), sendo igual a 1883 s e 1239 s, respectivamente para NP1 e NP2.

O intervalo de tempo entre o início do registro da vazão e o instante em que alcança o seu valor máximo é maior para o teste efetuado com menor potência aplicada (NP1), sendo igual a 175 s e 70 s, respectivamente para NP1 e NP2.

Os instantes iniciais dos testes 100% Ar, até 3000 s, são indicados na FIG. 4.63, comparando as pressões P1 e P2, respectivamente com NP1 e NP2.

FIGURA 4.63 – Transitórios Iniciais – P1 e P2 – Testes 100% Ar – NP1 e NP2

As medidas das pressões P1, no instante inicial do transitório, são iguais a 41.119 Pa (4193 mmH₂O) e 41.324 Pa (4214 mmH₂O), respectivamente para NP1 e NP2. No instante 3000 s, as pressões P1 são iguais a 40.565 Pa (4136 mmH₂O) e 40.654 Pa (4146 mmH₂O), respectivamente para NP1 e NP2.

Em relação às medidas de pressão P2, no instante inicial do transitório, são iguais a 3858 Pa (393 mmH₂O) e 3983 Pa (406 mmH₂O), respectivamente para NP1 e NP2. No instante 3000 s, as pressões P2 são iguais a 3416 Pa (348 mmH₂O) e 3514 Pa (358 mmH₂O), respectivamente para NP1 e NP2.

A condição inicial dos testes 100% Ar, com NP1 e NP2, em relação ao sensor de pressão P1, é indicada na FIG. 4.64. A comparação entre os valores

iniciais calculados e medidos de P1 indica uma diferença de 51 e 59 mmH₂O, respectivamente para NP1 e NP2.

O desnível de montagem do sensor de pressão P2 em relação ao nível de líquido do vaso de expansão igual a 39 e 47 mmH₂O, respectivamente para NP1 e NP2, considerando que a precisão do sensor de pressão P1 é igual a $\pm 12,5$ mmH₂O (Validyne, 2005). Os resultados obtidos dos desníveis, em relação ao sensor de pressão P1, são excelentes.

$$\Delta P1_{NP1} = 393 - 9 + 3445 + 313 = \underline{4142 \text{ mm}}$$

$$\Delta P1_{NP2} = 406 - 9 + 3445 + 313 = \underline{4155 \text{ mm}}$$

FIGURA 4.64 – Condição Inicial – Sensor de Pressão P1 – 100% Ar – NP1 e NP2

A condição inicial dos testes 100% Ar, com NP1 e NP2, em relação ao sensor de pressão P2, é apresentada na FIG. 4.65. A comparação entre os valores iniciais calculados e medidos de P2 indica uma diferença de 15 mmH₂O e 9 mmH₂O , para NP1 e NP2.

Considerando que a precisão do sensor P2 é igual a ± 5 mmH₂O (Validyne, 2005), há um desnível de montagem do sensor de pressão P2 em relação ao nível de líquido do vaso de expansão igual a 10 mmH₂O e 4 mmH₂O ,

respectivamente para NP1 e NP2. Em relação ao desnível de montagem, o sensor de pressão P2 indica resultados excelentes.

$$\Delta P_{NP1}^{P2} = 188 + 839 - 649 = 378 \text{ mm} = \underline{3707 \text{ Pa}}$$

$$\Delta P_{NP2}^{P2} = 207 + 839 - 649 = 397 \text{ mm} = \underline{3893 \text{ Pa}}$$

FIGURA 4.65 – Condição Inicial – Sensor de Pressão P2 – 100% Ar – NP1 e NP2

As comparações das pressões P1 e P2, desde o instante 2000 s até 2250 s e desde o instante 1000 s até 1500 s, respectivamente para NP1 e NP2, são apresentadas nas FIG. 4.66 e 4.67.

Ao longo do transitório, a pressão P1, aumenta até alcançar o valor de 41.914 Pa (4274 mmH₂O), no instante 1715 s e 42198 Pa (4303 mmH₂O), no instante 1197 s, respectivamente para NP1 e NP2. A formação de vapor no aquecedor elétrico torna o fluido presente na perna quente menos denso, fazendo com que a pressão P1 diminua para 41506 Pa (4232 mmH₂O), no instante 1876 s e 41705 Pa (4253 mmH₂O), no instante 1239 s, respectivamente para NP1 e NP2. Os intervalos de tempo, onde se observam a presença de vapor (fração de vazio) na perna quente, correspondem a 161 s e 42 s, respectivamente para NP1 e NP2. A seguir, a pressão P1 apresenta uma acentuada diminuição, correspondente à condensação de vapor no trocador de calor, alcançando valores iguais a 20.868

Pa (2128 mmH₂O), no instante 1897 s, e 18.183 (1854 mmH₂O), no instante 1253 s, respectivamente para NP1 e NP2. Após o transitório de condensação de vapor no trocador de calor, a pressão P1 aumenta para valores iguais a 40.136 Pa (4093 mmH₂O) e 40.270 Pa (4106 mmH₂O), respectivamente para NP1 e NP2.

FIGURA 4.66 – Comparação de Pressões P1 e P2 – Testes 100% Ar – NP1

A pressão P2 aumenta linearmente até alcançar o valor de 4094 Pa (417 mmH₂O), no instante 1834 s, e 4176 Pa (426 mmH₂O), no instante 1190 s, respectivamente para NP1 e NP2. A seguir, a pressão P2 eleva-se acentuadamente para 7.123 Pa (726 mmH₂O), no instante 1883 s e 14.971 Pa (1527 mmH₂O), no instante 1239 s, respectivamente para NP1 e NP2. O aumento acentuado da pressão P2 corresponde ao intervalo de tempo em que há formação de vapor no aquecedor elétrico (aumento da fração de vazio de vapor na coluna quente do sistema), que são iguais a 49 s, tanto para NP1 como para NP2. A

seguir, a pressão P2 diminui acentuadamente para valores iguais a 3904 Pa (398 mmH₂O), no instante 1890 s, e 4068 Pa (415 mmH₂O), no instante 1260 s, respectivamente para NP1 e NP2. A diminuição brusca da pressão P2 corresponde ao intervalo de tempo em que há condensação de vapor no trocador de calor, sendo igual a 7 s e 21 s, respectivamente para NP1 e NP2. A seguir, a pressão P2 apresenta uma tendência de estabilização em seus valores, registrando 3670 Pa (374 mmH₂O), no instante 2000 s e 3566 Pa (364 mmH₂O), no instante 1500 s, respectivamente para NP1 e NP2.

FIGURA 4.67 – Comparação de Pressões P1 e P2 – Testes 100% Ar – NP2

Da mesma forma que nos testes 75% Ar, as análises detalhadas das pressões P1 e P2, considerando seus valores iniciais e finais, nos transitórios com NP1 e com NP2, permitem concluir que uma parte da massa de não-condensável permanece no trocador de calor e outra parte da massa de não-condensável, é

arrastada do trocador de calor e liberada para o ambiente, pelo vaso de expansão, com a mudança de fase na BCN.

A FIG. 4.68 indica a variação do não-condensável ao longo do transitório, nos testes 100% Ar, para NP1 e NP2, até o instante antes de ocorrer mudança de fase na BCN. Os valores do nível de não-condensável no trocador de calor foram calculados pelo programa *Air_NCL*.

FIGURA 4.68 – Variação de Não-Condensável no Trocador de Calor – NP1 e NP2

O nível de não-condensável no trocador de calor alcança valores teóricos iguais a 0,99 m, no instante 1883 s, e 1,25 m, no instante 1239 s, respectivamente para NP1 e NP2. Os valores teóricos alcançados no nível de não-condensável, no trocador de calor, justificam a liberação de não-condensável para o ambiente. Nos testes 100% Ar, o nível teórico de não-condensável é maior (1,25m) para o teste realizado com uma potência aplicada maior (NP2). Os testes 100% Ar apresentam maiores níveis teóricos de não-condensável (0,99 m para NP1 e 1,25 m para NP2) do que os calculados nos testes 75% Ar (0,675 m para NP1 e 0,82 m para NP2).

As FIG. 4.69 4.70 apresentam as temperaturas TC8, TC9, TC10 e TC11, para os testes 100% Ar, respectivamente para NP1 e NP2, sendo que a duração do transitório é de 30.000 s.

FIGURA 4.69 – Temperaturas TC8, TC9, TC10 e TC11 – 30.000 s – NP1

FIGURA 4.70 – Temperaturas TC8, TC9, TC10 e TC11 – 30.000 s – NP2

Os valores das temperaturas TC8, TC9, TC10 e TC11, no instante 30.000 s, para NP1 e NP2, são mostrados na TAB. 4.51.

TABELA 4.51 – Temperaturas TC8, TC9, TC10 e TC11 – 30.000 s – NP1 e NP2

Nível de Potência	Testes	TC8 (°C)	TC9 (°C)	TC10 (°C)	TC11 (°C)
NP1	100% Ar	35,2	51,5	38,1	34,1
NP2	100% Ar	35,8	57,3	40,3	36,8

As temperaturas TC8, TC9, TC10 e TC11 são maiores, no instante 30.000 s, no experimento realizado com maior potência aplicada (NP2). Da mesma forma que nos testes 75 % Ar, no final dos transitórios, as temperaturas TC8 e TC11 apresentam valores bem próximos, sendo que com NP2, o valor da

temperatura TC11 é maior que a temperatura TC8 em 1 °C. Devido à presença de não-condensável, há uma sensível diminuição de transferência de calor para o secundário do trocador de calor, diminuindo a sua eficiência.

As temperaturas TC8, TC9, TC10 e TC11 e vazão são indicadas nas FIG. 4.71 e 4.72, do instante 1750 s até 2050 s, e do instante 1100 s até o instante 1400 s, respectivamente para NP1 e NP2.

FIGURA 4.71 – Início do Transitório – TC8, TC9, TC10, TC11 e Vazão – NP1

As temperaturas TC8, TC9, TC10 e TC11, no teste com NP1, apresentam o mesmo comportamento da vazão da BCN. A partir do instante 1800 s, com o aumento da vazão, as temperaturas TC8, TC9 e TC11 aumentam, acompanhando o comportamento da vazão. A seguir, as temperaturas atingem seus valores máximos, que são iguais a 83 °C, no instante 1869 s, 91 °C, no

instante 1890 s, 55 °C, no instante 1911 s e 52 °C, no instante 1918 s, respectivamente para TC8, TC9, TC10 e TC11. No instante 4000 s, os valores das temperaturas são iguais a 29 °C, 46 °C, 32 °C e 28 °C, respectivamente para TC8, TC9, TC10 e TC11.

As temperaturas TC9, TC10 e TC11 apresentam um comportamento oscilatório, durante o período de mudança de fase. Os intervalos de tempo das oscilações, para NP1, são iguais a 28 s, 28 s e 21 s, respectivamente para TC9, TC10 e TC11.

FIGURA 4.72 – Início do Transitório – TC8, TC9, TC10, TC11 e Vazão – NP2

As temperaturas TC8, TC9, TC10 e TC11, para NP2, da mesma forma que com NP1, apresentam o mesmo comportamento da vazão da BCN. As temperaturas TC8, TC9, TC10 e TC11, no instante 1246 s, alcançam valores

máximos, respectivamente iguais a 60 °C, 92 °C, 52 °C e 63 °C. No teste 100% Ar, com NP2, as temperaturas TC8, TC9, TC10 e TC11 praticamente não apresentam comportamento oscilatório, pois os transitórios ocorrem mais rapidamente (NP2).

Os testes 100% Ar, com NP1 e NP2, diferente do teste 75% Ar, com NP2, não registraram oscilação na temperatura TC14, que permitiria verificar a entrada de líquido frio no trocador de calor, indicando inversão de vazão no circuito.

Embora os sensores de pressão (P1 e P2) apresentem excelente precisão, não foram suficientemente capazes de registrar a ocorrência de picos de pressão negativa no trocador de calor, em função da condensação de vapor, para os intervalos de tempo de gravação adotados na aquisição de dados.

Da mesma forma que nos testes 75% Ar, o medidor de vazão magnético também não registrou inversão de vazão nos testes 100% Ar, em função do tempo adotado para registros na aquisição de dados.

As temperaturas TC21, TC24 e TC25, do secundário do trocador de calor, são apresentadas na FIG. 4.73, para um transitório de 30.000 s.

No instante 30.000 s, as temperaturas do secundário do trocador de calor apresentam valores iguais a 34,7 °C, 28, 2 °C e 22,3 °C, respectivamente para TC21, TC24 e TC25, com NP1 e 36,9 °C, 30 °C e 21,9 °C, respectivamente para TC21, TC24 e TC25, com NP2. O comportamento das temperaturas apresenta a mesma tendência, ao longo do transitório, e indicam que o regime permanente não foi atingido, para NP1 e NP2. Os valores das temperaturas TC24 e TC25, para o teste realizado com NP2, são superiores aos obtidos com o teste efetuado com NP1.

As temperaturas do secundário, no instante 30.000 s, são semelhantes, nos testes realizados com NP1 e NP2.

FIGURA 4.73 – Temperaturas TC21, TC24 e TC25 – NP1 e NP2

A FIG. 4.74 mostra os instantes iniciais do transitório para as temperaturas TC21, TC24 e TC25, com NP1 e NP2.

As temperaturas TC24 e TC25, com NP1, apresentam valores iniciais de aproximadamente 22 °C e permanecem estáveis até o instante 1932 s, quando a temperatura TC25 apresenta um acentuado aumento (degrau de temperatura igual a 4 °C), com a elevação das temperaturas no primário do trocador de calor, no instante 1890 s. A temperatura TC24, aumenta suavemente, a partir do instante 1932 s. Para NP2, as temperaturas TC24 e TC25 apresentam valores iniciais de aproximadamente 18 °C e permanecem estáveis até o instante 1253 s quando a temperatura TC25 aumenta acentuadamente (degrau de temperatura igual a 5 °C), com o aumento das temperaturas no primário do trocador de calor, no instante 1239 s. A temperatura TC24, com NP2, aumenta gradualmente, a

partir do instante 1239 s. Em relação às temperaturas TC21, para NP1 e NP2, há uma diminuição, ao longo do transitório, de aproximadamente 3 °C.

FIGURA 4.74 – Transitórios Iniciais – TC21, TC24 e TC25 – NP1 e NP2

A comparação entre a potência aplicada na BCN e a potência retirada pelo secundário do trocador de calor, para NP1 e NP2, ao longo do transitório de 30.000 s, é apresentada na FIG. 4.75. No instante 30.000 s, a diferença entre as potências aplicada e retirada é igual a 320 W e 550 W, respectivamente para NP1 e NP2.

A TAB. 4.52 apresenta a comparação entre os testes 50% Ar e 75% Ar, para o mesmo nível de potência aplicado, relacionando as diferenças entre as potências aplicadas e as retiradas, no final dos transitórios. Os resultados obtidos são próximos, para os testes 75% Ar e 100% Ar.

TABELA 4.52 – Potências Aplicadas e Retiradas – Testes 75% Ar e 100% Ar – NP1 e NP2

Nível de Potência	Testes	Diferença entre as Potências Aplicadas e Retiradas (W)
NP1	75% Ar	340
NP1	100% Ar	320
NP2	75% Ar	590
NP2	100% Ar	550

FIGURA 4.75 – Potências Aplicadas e Retiradas – 30.000 s – NP1 e NP2

O comportamento inicial das potências aplicada e retirada, para NP1 e NP2, é mostrado na FIG. 4.76. O comportamento da potência retirada, para NP1 e NP2, apresenta a mesma tendência da temperatura TC25, para NP1 e NP2. Há um degrau de potência retirada de 400 W e 750 W, respectivamente para NP1 e

NP2, que corresponde ao elevado aumento de temperatura no primário do trocador de calor, nos instantes 1904 s e 1253 s, respectivamente para NP1 e NP2.

FIGURA 4.76 – Potências Aplicadas e Retiradas – 4000 s – NP1 e NP2

5 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS E DADOS EXPERIMENTAIS

Para as análises teóricas dos fenômenos termo-hidráulicos que ocorrem nos transitórios impostos na BCN e, principalmente, estudar os efeitos da condensação na presença de alta concentração de não-condensável foi necessário o desenvolvimento de um modelo numérico que simulasse o circuito experimental. Adotou-se o código computacional termo-hidráulico RELAP5/MOD3.3 (R5), utilizado em análise de acidentes, que é baseado em um modelo não-homogêneo, no estado de não-equilíbrio, para duas fases com resolução por um processo numérico parcialmente implícito para permitir o cálculo de transientes termo-hidráulicos e de análise de acidentes de forma que haja rapidez e economia no uso dos recursos computacionais (NUREG/CR-5535-Rev.1, 2001).

Como citado anteriormente, na introdução desse trabalho, observa-se que o desenvolvimento do modelo numérico possibilita avaliar o desempenho e o comportamento do código computacional R5 em simulações com condições de escoamento bifásico e com a presença de não-condensáveis, comparando os resultados com os dados experimentais obtidos na BCN.

O modelo termo-hidráulico do R5 calcula oito equações para oito variáveis primárias dependentes, que são a pressão (P) em Pa, as energias internas específicas das fases gás e líquido (U_g , U_f) em J/kg, fração de vazio de vapor no volume (α_g), velocidades das fases (v_g , v_f) em m/s, qualidade de não-condensável (X_n) e densidade de Boro (ρ_b) em kg/m³. As variáveis independentes são o tempo (t) em s e a distância (x) em m. As variáveis secundárias dependentes usadas nas equações são as densidades das fases (ρ_g , ρ_f) em kg/m³, as temperaturas das fases (T_g , T_f), a temperatura de saturação (T_{sat}) e a qualidade do não-condensável (X_n). A massa de gás não-condensável (M_{nc}) em kg dividida pela massa total da fase gasosa (M_n) em kg, corresponde à qualidade do não-condensável, que é representada por:

$$X_{nc} = M_{nc} / \sum (M_{nc} + M_n) \quad (5.1)$$

onde M_n é a massa de vapor em kg.

As equações diferenciais do transitório unidimensional são as equações de continuidade, as equações de conservação de momento e as equações de energia para as duas fases (líquido e vapor).

No modelo numérico, representou-se detalhadamente a geometria original da BCN. Foram considerados todos os volumes e elevações das tubulações, aquecedor elétrico, trocador de calor, linha de surto e vaso de expansão. Foram consideradas também as estruturas de calor (utilizadas para simular as perdas de calor para o ambiente), representando as resistências elétricas do aquecedor (inox), a parede do aquecedor elétrico (tubo de inox e isolamento térmico), a parede da tubulação (tubo de cobre e isolamento térmico) e a parede do trocador de calor (cobre). A correspondência entre os componentes do código e as respectivas regiões hidráulicas é apresentada na TAB. 5.1. A nodalização da BCN em componentes é apresentada na FIG. 5.1.

TABELA 5.1 – Componentes do Código e Regiões Hidráulicas

Trecho da BCN	Número do Componente	Tipo de Componente
Aquecedor	100	PIPE
Perna Quente	120	PIPE
Primário do Trocador de Calor	140	PIPE
Perna Fria	160	PIPE
	170	BRANCH
	175	BRANCH
	180	PIPE
	190	PIPE
	200	PIPE
Linha de Surto	210	PIPE
	220	PIPE
Vaso de Expansão	225	BRANCH
	230	BRANCH
	240	BRANCH
Secundário do Trocador de Calor	250	PIPE
Entrada – Água de Resfriamento	270	TMDPVOL
Saída – Água de Resfriamento	290	TMDPVOL
Contenção	600	TMDPVOL

FIGURA 5.1 – Nodalização em Componentes da BCN

As correlações empregadas para a determinação dos coeficientes de transferência de calor foram adotadas pelo próprio código, uma vez que no modelo numérico desenvolvido (*Input*), determinou-se a utilização de coeficientes de transferência de calor “*default*”. As correlações são apresentadas na TAB. 5.2.

TABELA 5.2 – Correlações de Transferência de Calor – Relap5/mod3.3

	Laminar	Convecção Natural	Turbulento	Condensação	Ebulição
Opção “Default”	Sellars	Churchill-Chu	Dittus-Boelter	Nusselt (laminar) Chato Shah (turbulento) Colburn-Hougen	Chen

A correlação de Sellars (1956) é utilizada em escoamentos com regime laminar ($Re \leq 2000$) e é representada por:

$$Nu = h.d/k = 4,36 \quad (5.2)$$

onde Nu é o número de Nusselt, h é o coeficiente de película em $W/m^2\text{°C}$, d é o diâmetro hidráulico em m e k é a condutividade térmica do fluido em $W/m\text{°C}$.

A correlação de Churchill-Chu (1975) é utilizada para a convecção natural em volumes verticais e é indicada por:

$$Nu_L = 0,825 + \{0,387(Ra)^{1/6} / [1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{8/27}\}^2 \quad (5.3)$$

onde Nu_L é o número de Nusselt, Ra é o número de Rayleigh ($Gr \cdot Pr$) e Pr é o número de Prandtl.

O código utiliza a correlação de Dittus–Boelter (1930) para escoamentos com regime turbulento ($Re > 2.300$), que é representada por:

$$h = 0,023 (k/d)(Re)^{0,8}(Pr)^n \quad (5.4)$$

onde h é o coeficiente de película em $W/m^2\text{°C}$, d é o diâmetro hidráulico em m, k é a condutividade térmica do fluido em $W/m\text{°C}$, Pr é o número de Prandtl e Re é o número de Reynolds. O valor de n é igual 0,4 quando o fluido é aquecido e igual a 0,3 quando é resfriado.

Na condensação, o código utiliza para tubos verticais, a correlação de Nusselt (laminar) e para tubos horizontais, a correlação de Chato (laminar). A correlação de Nusselt (1916) é dada por:

$$h = k / \{[0,9086(\mu^2 Re / g \rho \Delta \rho)^{1/3}]\} \quad (5.5)$$

onde h é o coeficiente de película em $W/m^2\text{°C}$, k é a condutividade térmica do fluido em $W/m\text{°C}$, μ é a viscosidade dinâmica do fluido em $kg/m.s$, g é a

aceleração da gravidade em m/s^2 , ρ é a densidade do fluido em kg/m^3 e $\Delta\rho$ corresponde a diferença entre a densidade do líquido (ρ_f) e a densidade do vapor (ρ_v). O número de Reynolds (Re) é representado por:

$$Re = 4\Gamma/\mu \quad (5.6)$$

onde Γ é o fluxo de massa de condensado por unidade de largura em $kg/m.s$ e μ é a viscosidade dinâmica do fluido em $kg/m.s$.

O fluxo de massa de condensado por unidade de largura (Γ) é expresso por:

$$\Gamma = m / \pi.d_i \quad (5.7)$$

onde m é a vazão em massa de condensado em kg/s e d_i é o diâmetro interno do tubo em m .

A correlação de Chato (1962), que é utilizada na condensação para tubos horizontais é representada por:

$$h = F[g\rho\Delta\rho h_c k^3 / d\mu(T_{sat} - T_w)]^{1/4} \quad (5.8)$$

onde h é o coeficiente de película em $W/m^2\text{°C}$, k é a condutividade térmica do fluido em $W/m\text{°C}$, μ é a viscosidade dinâmica do fluido em $kg/m.s$, g é a aceleração da gravidade em m/s^2 , ρ é a densidade do fluido em kg/m^3 , $\Delta\rho$ corresponde a diferença entre a densidade do líquido (ρ_f) e a densidade do vapor (ρ_v), h_c é o calor latente em J/kg , d é o diâmetro hidráulico do tubo em m , T_{sat} é a temperatura de saturação baseada na pressão parcial do vapor em °C , T_w é a temperatura na parede do tubo em °C e F é um fator que corrige a área de condensação (baseado no ângulo estabelecido pelo perímetro molhado em relação ao diâmetro do tubo).

A correlação de Shah (1979) é indicada por:

$$h_{Shah} = h_{sf} [1 + (3,8/Z^{0,95})] \quad (5.9)$$

onde h_{Shah} é o coeficiente de película em $W/m^2\text{°C}$, h_{sf} é o coeficiente de transferência de calor superficial em $W/m^2\text{°C}$ e Z é um coeficiente adimensional que engloba a qualidade do vapor e uma relação entre pressões (P_{red}), que é representado por:

$$Z = [(1/x) - 1]^{0,8} P_{red}^{0,4} \quad (5.10)$$

onde x é a qualidade de vapor e P_{red} é a pressão do volume dividida pela pressão crítica.

O coeficiente de transferência de calor superficial (h_{sf}) é expresso por:

$$h_{sf} = h_{liq} (1-x)^{0,8} \quad (5.11)$$

onde h_{liq} é o coeficiente de película da correlação de Dittus-Boelter, assumindo que todo o fluido é líquido.

Para o coeficiente de transferência de calor na condensação (h_c), é interessante observar que o código Relap5/mod3.3 utiliza o maior valor obtido entre a correlação laminar (Nusselt) e a turbulenta (Shah). Dessa forma, o coeficiente de transferência de calor é indicado por:

$$h_c = \text{valor maior } (h_{Shah} ; h_{Nusselt}) \quad (5.12)$$

Para ebulição saturada, o código utiliza a correlação de Chen (1966), que é a soma de dois fatores, um relativo à convecção (macroscópico) e outro relativo à ebulição (microscópico). A correlação de Chen é expressa por:

$$q'' = [h_{mac} (T_w - T_{sat}) F] + [h_{mic} (T_w - T_{sat}) S] \quad (5.13)$$

onde h_{mac} é o coeficiente de película da correlação de Dittus-Boelter em $W/m^2\text{°C}$, T_w é a temperatura da parede em °C , T_{sat} é a temperatura de saturação em °C , F

é um fator de Reynolds, h_{mic} é o coeficiente de película da correlação de Foster e Zuber (1955) em $W/m^2\text{°C}$ e S é o fator de supressão.

O coeficiente de película da correlação de Foster e Zuber é dado por:

$$h_{mic} = 0,00122[(k_f^{0,79} C_p^{0,45} \rho_f^{0,49} g^{0,25}) / (\sigma^{0,5} \mu_f^{0,29} h_{fg}^{0,24} \rho_g^{0,24})] \Delta T_w^{0,24} \Delta P^{0,75} \quad (5.14)$$

onde k_f é a condutividade térmica do líquido em $W/m\text{°C}$, C_p é o calor específico do líquido em $J/kg\text{°C}$, ρ_f é a densidade do líquido em kg/m^3 , g é a aceleração da gravidade em m/s^2 , σ é a tensão superficial do líquido em N/m , μ_f é a viscosidade dinâmica do líquido em $kg/m.s$, h_{fg} é o calor latente em J/kg , ρ_g é a densidade do vapor em kg/m^3 , ΔT_w é a diferença entre a temperatura da parede (T_w) e a temperatura de saturação (T_{sat}) em °C e ΔP é a diferença entre a pressão de saturação (baseada na temperatura da parede) e a pressão total em Pa.

A FIG. 5.2 indica o fator do número de Reynolds (F) em função do inverso do número de Lockhart-Martinelli (1949), que é representado por $1/\chi_{tt}$.

FIGURA 5.2 – Fator F x Inverso do Número de Lockhart-Martinelli ($1/\chi_{tt}$)

O fator do número de Reynolds (F) pode também ser expresso por:

$$F = 2,35 (\chi_{tt}^{-1} + 0,213)^{0,736} \quad (5.15)$$

O inverso do número de Lockhart-Martinelli é expresso por:

$$\chi_{tt}^{-1} = (G_g/G_f)^{0,9} (\rho_f/\rho_g)^{0,5} (\mu_g/\mu_f)^{0,1} \quad (5.16)$$

onde G_g e G_f são os fluxos de massa do vapor e do líquido em $\text{kg/m}^2.\text{s}$, ρ_f e ρ_g são as densidades do líquido e do vapor em kg/m^3 e μ_f e μ_g são as viscosidades dinâmicas do líquido e do vapor em kg/m.s .

Observa-se que o inverso do número de Lockhart-Martinelli é limitado a 100 e, se ele for menor do que 0,1, o valor do fator do número de Reynolds (F) será igual a 1,0.

O fator de supressão (S) é apresentado em função do número de Reynolds para duas fases (Re_{tp}), conforme indicado da FIG. 5.3.

FIGURA 5.3 – Fator de Supressão (S) x Número de Reynolds – duas fases (Re_{tp})

O número de Reynolds para duas fases (Re_{tp}) é dado por:

$$Re_{tp} = 10^{-4} Re_f \cdot F^{1,25} \quad (5.17)$$

onde Re_{tp} é o número de Reynolds para duas fases, Re_f é o número de Reynolds do líquido e F é o fator do número de Reynolds.

O número de Reynolds do líquido (Re_f) é indicado por:

$$Re_f = G_f \cdot D / \mu_f \quad (5.18)$$

onde Re_f é o número de Reynolds do líquido, G_f é o fluxo de massa do líquido em $kg/m^2.s$ e μ_f é a viscosidade dinâmica do líquido em $kg/m.s$.

De acordo com Bjornard e Griffith (1977), o fator de supressão (S) pode ser calculado por:

$$S = (1 + 0,12 Re_{tp})^{-1,14} \Rightarrow Re_{tp} < 32,5 \quad (5.19)$$

$$S = (1 + 0,42 Re_{tp}^{0,78})^{-1} \Rightarrow 32,5 \leq Re_{tp} \leq 70 \quad (5.20)$$

$$S = 0,0797 \Rightarrow Re_{tp} \geq 70 \quad (5.21)$$

No caso do escoamento com a presença de não-condensáveis (argônio, hélio, hidrogênio, nitrogênio, xenônio, criptônio, ar e sf6 – hexafluoreto de enxofre – equipamentos elétricos), o método de difusão de Colburn-Hougen é utilizado para calcular a temperatura na interface líquido/gás na presença de não-condensáveis através de um processo iterativo. A FIG. 5.4 indica o perfil de temperaturas numa mistura de vapor/não-condensável escoando internamente a um tubo vertical. A EQ. (5.21) mostra o fluxo de calor na parede (q''), que é composto por dois componentes: o fluxo de calor na mistura de vapor e gás não-condensável (q''_G) e o fluxo de calor liberado na interface devido à condensação do vapor.

$$q'' = q''_G + \lambda G_C \quad (5.22)$$

onde λ é o calor latente de vaporização em J/kg e G_C é o fluxo de massa (vazão mássica / área da seção transversal do escoamento) do gás em kg/m².s.

FIGURA 5.4 – Método Iterativo de Colburn e Hougen

O código Relap5mod3.3 calcula a temperatura na interface (T_s) entre o vapor e o filme de líquido, baseado no método iterativo de Colburn e Hougen, quando há condensação na presença de gases não-condensáveis.

O fluxo de calor devido a condensação do fluxo em massa de vapor (q_v'') em W/m², escoando em direção à interface vapor/filme de líquido é expressa por:

$$q_v'' = h_{fgb} \cdot j_v \quad (5.23)$$

onde h_{fgb} é a diferença entre as entalpias do vapor e do líquido em J/kg e j_v é o fluxo em massa de vapor em kg/m².s, representado por:

$$j_v = h_m \rho_{vb} \ln\left\{ \frac{1 - (P_{vi} / P)}{1 - (P_{vb} / P)} \right\} \quad (5.24)$$

onde P é a pressão total em Pa, P_{vi} é a pressão parcial de vapor na interface vapor/líquido, h_m é o coeficiente de transferência de massa em m/s e P_{vb} é a pressão parcial do vapor da mistura vapor/líquido em Pa e ρ_{vb} é a densidade do vapor em kg/m^3 , expressa por:

$$\rho_{vb} = (1 - x) \rho_{mb} \quad (5.25)$$

onde x é a qualidade do vapor e ρ_{mb} é a densidade combinada entre o vapor e o gás não-condensável na temperatura da mistura vapor/líquido em kg/m^3 .

Substituindo-se a EQ. 3.23 na EQ. 3.22, tem-se:

$$q_v'' = h_{fgb} h_m \rho_{vb} \ln\left\{\frac{[1 - (P_{vi}/P)]}{[1 - (P_{vb}/P)]}\right\} \quad (5.26)$$

O coeficiente de transferência de massa (h_m) adotado será o de maior valor selecionado entre as correlações de escoamento laminar, turbulento ou de convecção natural.

De acordo com Rohsenow e Choi (1961), para o escoamento turbulento, a correlação utilizada para o cálculo do coeficiente de transferência de massa é expressa por:

$$Sh = 0,023 (Re_v^{0,83}) (Sc^{0,44}) \quad (5.27)$$

onde Sh é o número de Sherwood, Re_v é o número de Reynolds do vapor e Sc é o número de Schmidt.

O número de Sherwood (Sh) é dado por:

$$Sh = h_m \cdot d / D_{vn} \quad (5.28)$$

onde h_m é o coeficiente de transferência de massa para regime turbulento em m/s, d é o diâmetro hidráulico em m e D_{vn} é a difusividade de massa em m^2/s .

O número de Reynolds para o vapor (Re_v) é indicado por:

$$Re_v = \rho_v v_v d / \mu_v \quad (5.29)$$

onde ρ_v é a densidade do vapor em kg/m^3 , v_v é a velocidade do vapor em m/s , d é o diâmetro hidráulico em m e μ_v é a viscosidade dinâmica do vapor em $kg/m.s$.

O número de Schmidt (Sc) é dado por:

$$Sc = \mu_{vb} / (\rho_{vb} D_{vn}) \quad (5.30)$$

onde μ_{vb} é a viscosidade dinâmica do vapor em $kg/m.s$, ρ_{vb} é a densidade do vapor em kg/m^3 e D_{vn} é a difusividade de massa em m^2/s .

A correlação de Rohsenow e Choi (1961) é utilizada para escoamento laminar e é indicada por:

$$h_m . d / D_{vn} = 4 \quad (5.31)$$

onde h_m é o coeficiente de transferência de massa para o escoamento laminar em m/s , d é o diâmetro hidráulico em m e D_{vn} é a difusividade de massa em m^2/s .

Para convecção natural, utiliza-se a correlação de Churchill-Chu (1975), que é dada por:

$$Nu_{ld} = \{0,825 + ((0,387 \cdot Ra_{ld}^{1/6}) / (1 + (0,492 / Sc)^{9/16})^{8/27})\}^2 \quad (5.32)$$

onde Nu_{ld} é o número de Nusselt para transferência de massa, Ra_{ld} é o número de Rayleigh para transferência de massa e Sc é o número de Schmidt.

O número de Nusselt para transferência de massa (Nu_{ld}) é dado por:

$$Nu_{ld} = h_m \cdot L / D_{vn} \quad (5.33)$$

onde h_m é o coeficiente de transferência de massa para convecção natural em m/s, L é a altura em m e D_{vn} é a difusividade de massa em m^2/s .

O número de Rayleigh na transferência de massa (Ra_{ld}) é indicado por:

$$Ra_{ld} = Gr_{ld} \cdot Sc \quad (5.34)$$

onde Gr_{ld} é o número de Grashof na transferência de massa e Sc é o número de Schmidt.

O número de Grashof na transferência de massa (Gr_{ld}) é expresso por:

$$Gr_{ld} = (\rho_{mb}^2 g | \rho_{mw} - \rho_{mb} | L^3) / (\mu_{mb}^2 \rho_{mw}) \quad (5.35)$$

onde ρ_{mb} é a densidade combinada entre o vapor e o gás não-condensável em kg/m^3 , g é aceleração da gravidade em m^2/s , L é a altura em m, μ_{mb} é a viscosidade dinâmica combinada entre o vapor e o gás não-condensável em $kg/m.s$ e ρ_{mw} é a densidade combinada entre o vapor e o gás não-condensável na temperatura da parede (T_w) em kg/m^3 .

De acordo com Nithianandan et al (1986), o coeficiente de difusividade de massa do gás não-condensável no vapor de água (D_{vn}) é calculado por:

$$D_{vn} = 0,0101325 \{ [(1/M_v + 1/M_n)^{1/2} T^{1,75}] / [P (\varepsilon_v^{1/3} + \varepsilon_n^{1/3})^2] \} \quad (5.36)$$

onde M_v é a massa molecular do vapor em kg/mol , M_n é a massa molecular do gás não-condensável em kg/mol , T é a temperatura da mistura vapor/líquido em $^{\circ}C$, ε_v é o volume de difusão atômica do vapor e ε_n é o volume de difusão atômica do gás não-condensável.

O fluxo de calor devido ao filme de líquido na parede do tubo (q_l'') é calculado por:

$$q_l'' = h_c (T_s - T_w) \quad (5.37)$$

onde h_c é o coeficiente de transmissão de calor na condensação, calculado pelas correlações anteriormente apresentadas, em $W/m^2\text{°C}$, T_s é a temperatura na interface vapor/líquido em °C e T_w é a temperatura na parede em °C .

Uma vez adotada a pressão de vapor na interface vapor/líquido (P_{vi}), a correspondente temperatura na interface (T_s) é conhecida, caracterizando a primeira iteração do método por meio do balanço de energia, que é expresso por:

$$q_l'' = q_v'' \quad (5.38)$$

A substituição da EQ. 3.25 e da EQ. 3.36 na EQ. 3.37, resulta:

$$h_c (T_s - T_w) = h_m h_{fgb} \rho_{vb} \ln\{[1 - (P_{vi}/P)] / [1 - (P_{vb}/P)]\} \quad (5.39)$$

Na primeira iteração, o valor inicial adotado da pressão de vapor na interface vapor/líquido é a pressão de saturação baseada na temperatura da parede do tubo (T_w). A seguir são apresentadas as comparações entre os diversos testes realizados e os modelos numéricos desenvolvidos com o R5.

5.1 Testes 25% Ar e 50% Ar – NP1 e NP2

Como já detalhado no capítulo anterior, os testes 25% Ar e 50% Ar, em função da geometria da BCN e da relação existente entre os níveis de não-condensável na perna quente e no tubulão superior do trocador de calor, apresentam um comportamento típico de um sistema de resfriamento de emergência de reatores avançados com escoamento monofásico.

As comparações entre as vazões calculadas nos modelos desenvolvidos no R5 (m R5) e as vazões medidas (m) nos testes 25% Ar e 50% Ar, para NP1 e NP2 são mostradas, respectivamente nas FIG. 5.5 e 5.6, para um transitório de 33.000 s.

FIGURA 5.5 – Vazão: Experimental e R5 – Testes 25% Ar – NP1 e NP2

A TAB. 5.3 apresenta os valores para as vazões medidas e calculadas, no instante 33.000 s, para os testes 25% Ar, com NP1 e NP2.

TABELA 5.3 – Vazões Calculadas e Medidas – 25% Ar – NP1 e NP2 – 33.000 s

Teste	Nível de Potência	Vazão R5 (kg/s)	Vazão Medida (kg/s)
25% Ar	NP1	0,018	0,017
	NP2	0,022	0,021

FIGURA 5.6 – Vazão: Experimental e R5 – Testes 50% Ar – NP1 e NP2

Os valores para as vazões medidas e calculadas, no instante 33.000 s, para os testes 25% Ar, com NP1 e NP2, são apresentados na TAB. 5.4.

TABELA 5.4 – Vazões Calculadas e Medidas – 50% Ar – NP1 e NP2 – 33.000 s

Teste	Nível de Potência	Vazão R5 (kg/s)	Vazão Medida (kg/s)
50% Ar	NP1	0,014	0,014
	NP2	0,017	0,019

O comportamento das vazões calculadas apresenta a mesma tendência das vazões calculadas no modelo no R5. As comparações entre as

simulações numéricas das vazões e as vazões medidas nos experimentos 25% Ar e 50% Ar, com NP1 e NP2, no instante 33.000 s são excelentes. Como as vazões medidas, as vazões calculadas são maiores nos testes realizados maior potência aplicada (NP2).

Para um transitório de 33.000 s, as comparações entre as temperaturas TC1 e TC17 calculadas no R5 (TC1 R5 e TC17 R5) e as temperaturas TC1 e TC17 medidas nos testes 25% Ar e 50% Ar, para NP1 e NP2 são mostradas, respectivamente nas FIG. 5.7 e 5.8.

FIGURA 5.7 – TC1 e TC17: Experimental e R5 – Testes 25% Ar – NP1 e NP2

Os valores para as temperaturas TC1 e TC17 medidas e calculadas, no instante 33.000 s, para os testes 25% Ar, com NP1 e NP2, são apresentados na TAB. 5.5.

TABELA 5.5 – TC1 e TC17 Calculadas e Medidas – 25% Ar – NP1 e NP2 – 33.000 s

Teste	Nível de Potência	TC1 R5 (°C)	TC17 R5 (°C)	TC1 (°C)	TC17 (°C)
25% Ar	NP1	56,7	35,4	54,4	31,4
	NP2	66,2	38,2	61,0	32,8

FIGURA 5.8 – TC1 e TC17: Experimental e R5 – Testes 50% Ar – NP1 e NP2

A TAB. 5.6 apresenta os valores para as vazões medidas e calculadas, no instante 33.000 s, para os testes 50% Ar, com NP1 e NP2.

TABELA 5.6 – TC1 E TC17 Calculadas e Medidas – 50% Ar – NP1 e NP2 – 33.000 s

Teste	Nível de Potência	TC1 R5 (°C)	TC17 R5 (°C)	TC1 (°C)	TC17 (°C)
50% Ar	NP1	58,3	31,9	59,1	31,9
	NP2	71,0	35,5	67,6	37,7

As comparações entre as simulações das temperaturas TC1 R5 e TC17 R5 e as temperaturas TC1 e TC17 medidas nos experimentos 25% Ar e 50% Ar, com NP1 e NP2, no instante 33.000 s são muito boas. O comportamento das temperaturas medidas TC1 e TC17 apresenta a mesma tendência das temperaturas TC1 R5 e TC17 R5 calculadas no modelo numérico.

Da mesma forma que as temperaturas medidas TC1 e TC17, as temperaturas calculadas TC1 R5 e TC17 R5 apresentam maiores valores nos testes com aplicação de maior potência (NP2).

As comparações entre as temperaturas calculadas TC9 R5, TC10 R5 e TC11 R5 (primário do trocador de calor) nos modelos desenvolvidos no R5 e as temperaturas medidas TC9, TC10 e TC11 nos testes 25% Ar e 50% Ar, para NP1 e NP2 são mostradas, respectivamente nas FIG. 5.9 e 5.10, para um transitório de 33.000 s.

Considera-se que a temperatura medida TC11 esteja posicionada na região central do tubulão inferior do trocador de calor da BCN, como é adotada a temperatura TC11 R5 no modelo numérico do R5. Não foi possível a simulação da temperatura TC8, localizada nos tubos verticais do trocador de calor, pois no modelo numérico desenvolvido, o feixe de tubos verticais do trocador de calor foi considerado um único tubo equivalente, com temperatura TC10 R5 em sua região central.

FIGURA 5.9 – TC9, TC10 e TC11: Experimental e R5 – Testes 25% Ar – NP1 e NP2

As temperaturas TC9, TC10 e TC11 medidas e calculadas, no instante 33.000 s, para os testes 25% Ar, com NP1 e NP2, são apresentadas na TAB. 5.7.

TABELA 5.7 – TC9, TC10 e TC11 Calculadas e Medidas – 25% Ar – NP1 e NP2 – 33.000 s

Teste	Nível de Potência	TC9 R5 (°C)	TC10 R5 (°C)	TC11 R5 (°C)	TC9 (°C)	TC10 (°C)	TC11 (°C)
25% Ar	NP1	55,9	44,2	35,9	50,7	38,6	34,0
	NP2	65,0	48,8	38,7	56,4	40,4	35,7

FIGURA 5.10 – TC9, TC10 e TC11: Experimental e R5 – Testes 50% Ar – NP1 e NP2

As temperaturas TC9, TC10 E TC11 medidas e calculadas, no instante 33.000 s, para os testes 50% Ar, com NP1 e NP2, são apresentados na TAB. 5.8.

TABELA 5.8 – TC9, TC10 E TC11 Calculadas e Medidas – 50% Ar – NP1 e NP2
33.000 s

Teste	Nível de Potência	TC9 R5 (°C)	TC10 R5 (°C)	TC11 R5 (°C)	TC9 (°C)	TC10 (°C)	TC11 (°C)
50% Ar	NP1	57,0	41,7	32,4	47,0	34,6	33,5
	NP2	68,2	46,8	36,0	47,3	30,2	38,9

As comparações entre as simulações das temperaturas TC9 R5, TC10 R5 E TC11 R5 e as temperaturas TC9, TC10 E TC11 medidas nos experimentos 25% Ar e 50% Ar, com NP1 e NP2, no instante 33.000 s são consideradas muito boas.

O comportamento das temperaturas TC9 R5, TC10 R5 e TC11 R5 calculadas no modelo numérico apresenta a mesma tendência das temperaturas medidas TC9, TC10 e TC11 nos testes.

Da mesma forma que as temperaturas medidas TC9, TC10 E TC11, com exceção da temperatura TC10 no teste 50% Ar, com NP2, as temperaturas calculadas TC9 R5, TC10 R5 e TC11 R5 apresentam maiores valores nos testes com aplicação de maior potência (NP2).

As comparações entre as temperaturas do secundário do trocador de calor TC23 R5, TC24 R5 e TC25 R5 calculadas no modelo desenvolvido no R5 e as temperaturas TC23, TC24 e TC25 medidas nos testes 25% Ar e 50% Ar, para NP1 e NP2 são apresentadas, respectivamente nas FIG. 5.11 e 5.12, para um transitório de 33.000 s.

As temperaturas TC23, TC24 e TC25 medidas e calculadas, no instante 33.000 s, para os testes 25% Ar, com NP1 e NP2, são apresentadas na TAB. 5.9.

TABELA 5.9 – TC23, TC24 e TC25 Calculadas e Medidas – 25% Ar – NP1 e NP2
33.000 s

Teste	Nível de Potência	TC23 R5 (°C)	TC24 R5 (°C)	TC25 R5 (°C)	TC23 (°C)	TC24 (°C)	TC25 (°C)
25% Ar	NP1	22,4	31,7	37,8	22,5	30,7	37,3
	NP2	21,3	30,5	38,5	21,3	28,4	35,8

FIGURA 5.11 – TC23, TC24 e TC25: Experimental e R5 – Testes 25% Ar – NP1 e NP2

A TAB. 5.10 apresenta as temperaturas TC23, TC24 e TC25 medidas e calculadas, no instante 33.000 s, para os testes 25% Ar, com NP1 e NP2.

TABELA 5.10 – TC23, TC24 e TC25 Calculadas e Medidas – 50% Ar – NP1 e NP2 – 33.000 s

Teste	Nível de Potência	TC23 R5 (°C)	TC24 R5 (°C)	TC25 R5 (°C)	TC23 (°C)	TC24 (°C)	TC25 (°C)
50% Ar	NP1	20,2	28,9	36,2	21,5	28,5	34,9
	NP2	21,4	29,1	37,7	22,3	29,0	34,4

FIGURA 5.12 – TC23, TC24 e TC25: Experimental e R5 – Testes 50% Ar – NP1 e NP2

O comportamento das temperaturas TC23 R5, TC24 R5 e TC25 R5 calculadas no modelo desenvolvido no R5 apresenta a mesma tendência das temperaturas medidas TC23, TC24 e TC25 nos testes.

As comparações entre as simulações das temperaturas TC23 R5, TC24 R5 e TC25 R5 e as temperaturas TC23, TC24 e TC25 medidas nos experimentos 25% Ar e 50% Ar, com NP1 e NP2, no instante 33.000 s são consideradas excelentes.

As temperaturas simuladas TC9 R5, TC10 R5 e TC11 R5 apresentam praticamente os mesmos valores que as temperaturas medidas TC23, TC24 e TC25 nos testes 25% Ar e 50% Ar, com NP1 e NP2.

Para um transitório de 33.000 s, as comparações entre o nível de não-condensável no trocador de calor calculado no R5 (f R5) e o nível de não-condensável calculado pelo modelo *Air_NCL* (f), nos testes 25% Ar e 50% Ar, para NP1 e NP2 são indicados, respectivamente nas FIG. 5.13 e 5.14.

FIGURA 5.13 – Nível de Não-Condensável: *Air_NCL* e R5 – Testes 25% Ar – NP1 e NP2

FIGURA 5.14 – Nível de Não-Condensável: *Air_NCL* e R5 – Testes 50% Ar – NP1 e NP2

A TAB. 5.11 indica os níveis de não-condensável calculados com o R5 e *Air_NCL*, no instante 33.000 s, para os testes 25% Ar, com NP1 e NP2.

TABELA 5.11 – Níveis de Não-Condensável R5 e *Air_NCL* – 25% Ar – NP1 e NP2
33.000 s

Teste	Nível de Potência	Nível R5 (m)	Nível <i>Air_NCL</i> (m)
25% Ar	NP1	0,012	0,010
	NP2	0,013	0,010

Os níveis de não-condensável calculados com o R5 e *Air_NCL*, no instante 33.000 s, para os testes 50% Ar, com NP1 e NP2, são mostrados na TAB. 5.12.

TABELA 5.12 – Níveis de Não-Condensável R5 e *Air_NCL* – 50% Ar – NP1 e NP2
33.000 s

Teste	Nível de Potência	Nível R5 (m)	Nível <i>Air_NCL</i> (m)
50% Ar	NP1	0,026	0,021
	NP2	0,029	0,020

O comportamento do nível de não-condensável calculado com o R5 e do nível de não-condensável calculado com o *Air_NCL* apresenta a mesma tendência ao longo do transitório. O nível de não-condensável calculado com o R5 apresenta valores maiores que os calculados com o modelo *Air_NCL*, tanto para NP1 como para NP2.

A FIG. 5.15 apresenta, para o transitório inicial de 3000 s, a comparação entre a pressão P1 calculada no R5 e a pressão P1 medida nos testes 25% Ar, respectivamente para NP1 e NP2.

No instante inicial do transitório, as diferenças entre as pressões P1 medidas e calculadas são iguais a 291 Pa (30 mmH₂O) e 515 Pa (53 mm₂O), respectivamente para os testes 25% Ar, com NP1, e 25% Ar, com NP2.

O comportamento da pressão P1 calculada apresenta a mesma tendência da pressão P1 medida.

O aumento inicial da pressão P1 calculada no modelo R5 representa um período com ausência de vazão ao longo do circuito (convecção natural no aquecedor elétrico), respectivamente 343 s e 294 s, respectivamente para NP1 e NP2. A pressão P1 calculada pelo R5 apresenta valores iguais a 40.547 Pa e 40.542 Pa, no instante 3000 s, respectivamente para os testes 25% Ar, com NP1 e 25% Ar, com NP2.

FIGURA 5.15 – Pressão P1: Experimental e R5 – Testes 25% Ar – NP1 e NP2

A comparação entre a pressão P2 simulada no modelo desenvolvido com o R5 e a pressão P2 medida nos testes 50% Ar, respectivamente para NP1 e NP2 é apresentada, na FIG. 5.16, para um transitório de 3000 s.

No início do transitório, as pressões P2 medidas e calculadas são praticamente iguais a 3700 Pa e 3800 Pa, respectivamente para os testes 50% Ar, com NP1 e 50% Ar, com NP2. A seguir, as pressões P2 calculadas seguem a mesma tendência da pressão P2 medida, alcançando 4300 Pa e 4630 Pa, no instante 3000 s, respectivamente para os testes 50% Ar, com NP1 e 50% Ar, com NP2.

FIGURA 5.16 – Pressão P2: Experimental e R5 – Testes 50% Ar – NP1 e NP2

As FIG. 5.17 e 5.18 indicam, para o transitório de 33.000 s, a comparação entre a potência retirada no secundário do trocador de calor (Q_{secR5}), calculada com modelo desenvolvido no R5 e a potência retirada (Q_{sec}), calculada por balanço de energia, no secundário do trocador de calor, respectivamente para os testes 25% Ar, com NP1 e NP2 e 50% Ar, com NP1 e NP2.

A potência retirada (Q_{secR5}) calculada com o modelo R5 apresenta um comportamento mais estável, nos testes 25% Ar, com NP1 e NP2, alcançando um

valor igual a 1500 W e 2400 W, respectivamente para NP1 e NP2, no instante 33.000 s.

A potência retirada (Q_{sec}), calculada por balanço de energia, se aproxima da potência retirada (Q_{secR5}), calculada com o R5, no fim do transitório, para o teste 25% Ar, com NP1.

FIGURA 5.17 – Potência Retirada no Trocador de Calor: Experimental e R5 – Testes 25% Ar – NP1 e NP2

As potências retiradas calculadas pelo R5 (Q_{secR5}), em relação às calculadas por balanço de energia (Q_{sec}) para os testes 50% Ar, com NP1 e NP2,

apresentam um comportamento mais estável, da mesma forma que nos testes 25% Ar, com NP1 e NP2, e alcançam um valor igual a 1450 W e 2400 W, respectivamente para os testes 50% Ar, com NP1 e NP2, no instante 33.000 s.

No teste 50% Ar, com NP2, há uma diferença de 400 W, entre a potência retirada, calculada com o R5 (Q_{secR5}) e a potência retirada, calculada por balanço de energia (Q_{sec}), no instante 33.000 s. No teste 50% Ar, com NP1, as potências retiradas são praticamente iguais no final do transitório.

FIGURA 5.18 – Potência Retirada no Trocador de Calor: Experimental e R5 – Testes 50% Ar – NP1 e NP2

5.2 Testes 75% Ar e 100% Ar – NP1 e NP2

As simulações dos testes 75% Ar e 100% Ar são totalmente diferenciadas das simulações dos testes 25% Ar e 50% Ar, em decorrência da maior concentração de não-condensável no trocador de calor da BCN.

As vazões calculadas nos modelos desenvolvidos com o R5 (m R5) e as vazões medidas (m) nos testes 75% Ar e 100% Ar, para NP1 e NP2 são indicadas, respectivamente nas FIG. 5.19 e 5.20, para um transitório de 3000 s.

FIGURA 5.19 – Vazão: Experimental e R5 – Testes 75% Ar – NP1 e NP2

FIGURA 5.20 – Vazão: Experimental e R5 – Testes 100% Ar – NP1 e NP2

Na simulação dos testes 75% Ar, as vazões (m R5) apresentam escoamento monofásico ao longo de todo o transitório, em função da geometria adotada da BCN, para a simulação no R5, de acordo com a FIG. 5.21.

**Tubulão - Trocador de Calor
(Situação Real)**

Simulação - R5

FIGURA 5.21 – Esquema de Simulação – Tubulão Superior do Trocador de Calor

As vazões dos testes 75% Ar, no instante 3000 s, apresentam valores iguais a 0,016 kg/s e 0,022 kg/s, respectivamente para NP1 e NP2. As vazões, no testes 100% Ar, apresentam valores máximos iguais a 0,012 kg/s, no instante 1506 s, e 0,015 kg/s, no instante 1083 s, respectivamente para NP1 e NP2. As vazões máximas calculadas no R5, para os testes 100% Ar, apresentam um comportamento mais adiantado, em relação às vazões máximas medidas nos testes, da ordem de 398 s e 184 s, respectivamente para NP1 e NP2. O comportamento adiantado das vazões reflete a condição unidimensional (x) do código computacional R5. Em um sistema real, os volumes dos fluidos são calculados tridimensionalmente (em x, y e z).

As temperaturas TC1 R5 e T17 R5 calculadas nos modelos desenvolvidos com o R5 e as temperaturas TC1 e TC17 medidas nos testes 100% Ar, para NP2 são indicadas na FIG. 5.22, para um transitório de 3000 s.

FIGURA 5.22 – TC1 e TC17: Experimental e R5 – Testes 100% Ar – NP2

A temperatura TC1 R5 atinge a saturação (107 °C) em dois instantes distintos, iguais a 999 s e 1083 s, no teste 100% Ar, com NP2. O código computacional R5 não representa corretamente a “convecção natural”, em função de ser um programa unidimensional (x).

As temperaturas do primário do trocador de calor, TC9 R5, TC10 R5 e TC11 R5 são comparadas com as temperaturas TC9, TC10 e TC11 medidas nos experimentos 100% Ar, com NP1 e NP2, no início dos transitórios, e são apresentadas na FIG. 5.23.

FIGURA 5.23 – TC9, TC10 e TC11: Experimental e R5 – Testes 100% Ar – NP1 e NP2

O comportamento das temperaturas TC9 R5, TC10 R5 e TC11 R5 calculadas com o R5, apresentam a mesma tendência das temperaturas TC9, TC10 e TC11, medidas experimentalmente nos testes.

Da mesma forma que as vazões, as temperaturas TC9 R5, TC10 R5 e TC11 R5 são adiantadas em relação às temperaturas TC9, TC10 e TC11, ao longo do transitório, em aproximadamente 360 s e 164 s, respectivamente para NP1 e NP2.

A FIG. 5.24 apresenta a comparação das temperaturas do secundário do trocador de calor TC23 R5, TC24 R5 e TC25 R5, calculadas com o R5, com as temperaturas TC9, TC10 e TC11 medidas nos experimentos 75% Ar%, com NP1 e NP2, ao longo do transitório de 30.000 s.

FIGURA 5.24 – TC23, TC24 e TC25: Experimental e R5 – Testes 75% Ar – NP1 e NP2

Os valores das temperaturas TC23 R5, TC24 R5 e TC25 R5, calculadas com o R5, são iguais a 22,2 °C, 28,9 °C e 34,6 °C e 21,4 °C, 30 °C e 37,4 °C, respectivamente para NP1 e NP2. O teste 75% Ar, com NP2, apresentam temperaturas do secundário, calculadas com o R5, maiores que o teste 75% Ar, com NP1. Para NP1 e NP2, as temperaturas TC23 R5, TC24 R5 e TC25 R5 seguem a mesma tendência das temperaturas TC23, TC24 e TC25.

A FIG. 5.25 mostra, no início do transitório, as comparações entre o nível de não-condensável no trocador de calor calculado no R5 e o nível de não-condensável calculado pelo modelo *Air_NCL*, nos testes 100% Ar, com NP1 e NP2.

FIGURA 5.25 – Nível: *Air_NCL* e R5 – Testes 100% Ar – NP1 e NP2

O nível de não-condensável calculado com o R5 alcança valores iguais a 0,8 m e 0,62 m, respectivamente para NP1 e NP2. Da mesma forma que a vazão e as temperaturas, o nível de não-condensável calculado com o R5, é mais adiantado, que o nível calculado com o *Air_NCL*, em relação ao transitório, correspondendo a 394 s e 178 s, respectivamente para NP1 e NP2.

A FIG. 5.26 apresenta, para o transitório inicial de 3000 s, a comparação entre a pressão P2 calculada no R5 e a pressão P2 medida nos testes 100% Ar, respectivamente para NP1 e NP2.

FIGURA 5.26 – Pressão P2: Experimental e R5 – Testes 100% Ar – NP1 e NP2

As pressões P2 máximas atingem valores iguais a 12.333 Pa e 16.520 Pa, respectivamente para NP1 e NP2. Na simulação do teste 100% Ar, com NP1, a pressão P2 R5 registra um valor mínimo igual a 1023 Pa, no instante 1533 s. O comportamento das pressões P2 R5 é mais adiantado, em relação às pressões medidas experimentalmente, ao longo do transitório, correspondendo a 375 s e 160 s, respectivamente para NP1 e NP2.

A FIG. 5.27 mostra a potência retirada pelo trocador de calor (Q_{secR5}), calculada com o R5 e a potência retirada (Q_{sec}), calculada por balanço de energia, para os testes 100% Ar, com NP1 e NP2, para o transitório de 30.000 s.

FIGURA 5.27 – Q_{secR5} e Q_{sec} : R5 e Balanço de Energia – 100% Ar – NP1 e NP2

Os valores alcançados pelas Q_{sec} R5 são iguais a 7.500 W, no instante 1529 s, e 8.300 W, no instante 1803 s, respectivamente para NP1 e NP2. As Q_{sec} apresentam valores iguais a 1300 W e 1800 W, no instante 3000 s, respectivamente para NP1 e NP2.

O cálculo da fração de vazio (*void*) nos volumes 170010000 (saída do primário do trocador de calor), 180010000 (volume após a linha de surto na perna fria), 180050000 (volume no final da perna fria horizontal superior) e 210010000 (volume correspondente a linha de surto do vaso de expansão), possibilitou compreender o fenômeno da liberação parcial de não-condensável, contido inicialmente no trocador de calor, para o ambiente, instantes antes da mudança de fase na BCN, para os testes 75% Ar e 100% Ar.

A simulação dos testes 75% Ar com o R5, não indicaram a liberação parcial do não-condensável para o ambiente, em função da relação nível inicial de não-condensável no trocador de calor e geometria da BCN (ver FIG. 5.21).

Nos testes 75% Ar, a constatação da liberação parcial de não-condensável para o ambiente foi feita medindo-se a diferença entre o nível final no tubulão superior do trocador de calor (após teste com resfriamento de 48 h) e o nível de não-condensável inserido inicialmente no teste.

As FIG. 5.28 e 5.29 representam as frações de vazio nos volumes 170010000, 180010000, 180050000 e 210010000 nos testes 100% Ar, no início dos transitórios, respectivamente para NP1 e NP2.

Para as simulações dos testes 100% Ar, com NP1 e NP2, há a passagem de não-condensável pelos volumes 17001000, 18001000 e 210010000 (saída para o ambiente). Uma parte do não-condensável que foi arrastada pela vazão, é liberada para o ambiente, pela linha de surto e, a outra parte, distribui-se na região da perna fria horizontal superior, sendo que em maior quantidade na região final da perna fria horizontal superior (volume 180050000).

FIG. 5.28 – Fração de Vazio – 100% Ar – NP1

FIGURA 5.29 – Fração de Vazio – 100% Ar – NP2

6 CONCLUSÕES

Os objetivos do trabalho foram plenamente atingidos, pois os resultados experimentais e teóricos apresentados indicam os efeitos da presença de altas concentrações de não-condensáveis no processo de condensação em um circuito de circulação natural, em condições de escoamento bifásico, de forma análoga a um sistema passivo de remoção de calor de emergência (*PEHRS*) de um reator nuclear avançado.

O conjunto de dados obtidos experimentalmente na BCN foi registrado digitalmente, sendo divididos em oito testes, que foram relacionados para dois níveis de potência aplicada ao circuito e, apresentando diferentes concentrações iniciais de gás não-condensável (ar) no tubulão superior do trocador de calor, possibilitando a geração de um banco de dados (*benchmark*), que está disponível para consulta de especialistas da área e de alunos interessados no assunto tratado no trabalho.

Os resultados experimentais obtidos poderão contribuir na pesquisa e no desenvolvimento de trocadores de calor para sistemas de resfriamento de reatores avançados resfriados a água leve de III geração (AP 600 e o AP 1000 da Westinghouse), considerando-se as tensões nas paredes dos tubos do trocador de calor e da tubulação da perna quente, quando há elevadas variações de pressão, decorrentes da condensação de vapor.

Os resultados obtidos nos testes realizados na BCN foram suficientes para demonstrar que o circuito é adequado para os propósitos experimentais a que foi projetado, considerando que a potência do aquecedor em conjunto com a altura total do circuito e o diâmetro da tubulação, são adequados para a obtenção de vazões facilmente mensuráveis na faixa especificada para o medidor de vazão magnético e para garantir um aumento da fração de vazio na perna quente, possibilitando a operação em condições de escoamento bifásico.

As análises dos dados experimentais obtidos permitem concluir que a presença de não-condensável em um circuito operando em circulação natural, diminui a taxa de transferência de calor para o secundário do trocador de calor. Elevadas concentrações presentes de não-condensável, determinam um baixo desempenho do trocador de calor.

Os dados obtidos permitiram observar os efeitos de altas concentrações de não-condensável na condensação de vapor no trocador de calor, que causam maiores diferenças de pressão, praticamente de forma instantânea no circuito e, conseqüentemente, determinam a inversão da vazão no circuito.

A relação existente entre a concentração inicial de não-condensável e a geometria do circuito, entre a saída da perna quente e entrada do tubo superior do trocador de calor, determina o estabelecimento de transitórios com escoamento bifásico.

Os modelos numéricos desenvolvidos no código computacional de Análise de Acidentes e de Termo-Hidráulica RELAP5/MOD3.3, com pequenas concentrações de não-condensável (25% Ar e 50% Ar), com os dois níveis de potência aplicados, apresentaram boa concordância entre os resultados obtidos e os dados experimentais.

Os modelos desenvolvidos com o RELAP5/MOD3.3 para elevadas concentrações de não-condensável (75% Ar) não apresentaram boa concordância com os dados obtidos, em função da geometria do circuito.

As simulações dos testes 100% Ar com o RELAP5/MOD3.3 apresentaram a mesma tendência dos dados, só que de forma “adiantada” em relação ao tempo do transitário, pois o código RELAP5/MOD3.3 é unidimensional (x) e o volume do fluido nos testes é tridimensional (x, y e z).

O código RELAP5/MOD3.3, sendo unidimensional (x), não representa satisfatoriamente a convecção natural existente no aquecedor elétrico, no início

dos transitórios. Após o transitório de mudança de fase, com o alcance da temperatura de saturação do fluido no circuito, os resultados demonstram boa concordância com os dados obtidos.

O código computacional RELAP5/MOD3.3, embora tenha sido desenvolvido para simulação de transitórios em plantas nucleares, com tubulações de grandes diâmetros, demonstrou ser uma excelente ferramenta por prever com precisão, a evolução transitória do fenômeno de circulação natural, mesmo num sistema de pequeno porte.

A metodologia desenvolvida para o circuito experimental operar adequadamente em condições de escoamento bifásico, com a presença de não-condensável, a utilização em bancadas experimentais de sensores de pressão com indutância variável e medidor de vazão magnético, a obtenção de dados experimentais para diversas concentrações de ar com dois níveis de potência e a comparação entre os resultados obtidos e as simulações dos testes, com diversas concentrações de não-condensável, com o código computacional RELAP5/MOD3.3, conferem originalidade a este trabalho.

Trabalhos futuros devem ser realizados visando a análise de similaridade entre o modelo, a BCN e o protótipo, um *PEHRS* de um reator avançado como o AP 600 ou AP 1000.

A determinação da fração de vazio na perna quente e no trocador de calor pode ser desenvolvida, por meio de técnicas de raios x de alta intensidade com detector, que é amplamente utilizada e, mais recente, por meio de ultra-som.

A inserção controlada de não-condensável, por intermédio de um compressor, na conexão localizada na saída do aquecedor elétrico com o circuito experimental operando em circulação natural é outro estudo interessante, que permitirá avaliar o comportamento e o desempenho do trocador de calor, em relação à variação da concentração de não-condensável e com o aumento da velocidade do fluido na perna quente.

O desenvolvimento de um modelo numérico homogêneo, baseado nas equações da continuidade, da quantidade de movimento e de conservação de energia, pode ser desenvolvido e validado com os dados experimentais obtidos.

APÊNDICE A – Calibração do Sinal de Potência

Para se medir a potência aplicada na BCN, utiliza-se um sinal de tensão (V_a) gerado por meio da interface LabVIEW 6.1 (National, 2000) no PC, que é enviado ao controlador de potência através da placa de aquisição de dados da National Instruments, modelo AT-MIO-16E (National, 1995), conforme esquema mostrado na FIG. ApA.1.

FIGURA ApA.1 – Esquema do Sinal de Tensão (V_a) – Potência no Aquecedor

Esse sinal não é linear e deve ser calibrado. A calibração foi realizada de duas formas distintas. A primeira consistiu de balanço térmico no aquecedor elétrico em regime permanente, de acordo com o esquema na FIG. ApA.2. A vazão (Q) é estabelecida na BCN por meio de uma caixa de água elevada, sendo medida no rotâmetro calibrado e controlada por um conjunto de válvulas localizadas na perna fria do circuito. A relação em l/h entre a vazão calibrada (Q_{cal}) e a vazão (Q) no circuito é dada por:

$$Q_{cal} = 0,97.Q + 0,36 \quad (\text{ApA.1})$$

As temperaturas de entrada e de saída do aquecedor elétrico são registradas, respectivamente pelos termopares TC17 e TC1 (Macedo, 2001).

FIGURA ApA.2 – Esquema para Calibração do Sinal de Tensão (V_a) por Balanço Térmico no Aquecedor Elétrico

No total foram realizados sete testes, sendo que para cada teste, regulava-se a vazão (Q) por meio da válvula de esfera E e variava-se o sinal de tensão (V_a), de 3 a 7,5 V. Após a constatação de regime permanente, registravam-se as temperaturas de entrada (TC17) e de saída (TC1) do aquecedor elétrico, permitindo o cálculo das entalpias do fluido na entrada e na saída do aquecedor elétrico e, conseqüentemente, determinava-se a potência térmica (Q_t).

A TAB. ApA.1 mostra os testes efetuados, relacionando-os com as tabelas de resultados que são apresentadas a seguir, que indicam para cada teste, as vazões estabelecidas (Q) em l/h, as vazões calibradas (Q_{cal}) em l/h, as vazões mássicas (m) em kg/s, o sinal de tensão (V_a) aplicado, a diferença de

temperatura entre a saída (TC1) e entrada (TC17) do aquecedor elétrico (ΔT_{aq}) obtida em regime permanente e os valores calculados da potência térmica (Q_t).

TABELA ApA.1 – Testes e Tabelas de Resultados

Teste	Tabelas
1	ApA.2
2	ApA.3
3	ApA.4
4	ApA.5
5	ApA.6
6	ApA.7
7	ApA.8

TABELA ApA.2 – Resultados para Teste 1

Vazão Q (l/h)	Vazão Calibrada Q_{cal} (l/h)	Vazão Mássica m (kg/s)	Sinal de Tensão V_a (V)	Diferença de Temperatura ΔT_{aq} (°C)	Potência Térmica Q_t (W)
105	102,21	0,028	3,0	4,42	517,32
106	103,18	0,029	4,0	10,28	1.245,55
105	102,21	0,028	5,0	16,97	1.984,74
105	102,21	0,028	6,0	25,23	2.949,39
105	102,21	0,028	7,0	33,11	3.869,63
105	102,21	0,028	7,5	35,77	4.180,51
106	103,18	0,029	6,5	29,63	3.586,60
109	106,09	0,029	5,5	24,53	2.606,74
109	106,09	0,029	4,5	13,66	1.654,68
110	107,06	0,030	3,5	7,16	897,65

TABELA ApA.3 – Resultados para Teste 2

Vazão Q (l/h)	Vazão Calibrada Q_{cal} (l/h)	Vazão Mássica m (kg/s)	Sinal de Tensão V_a (V)	Diferença de Temperatura ΔT_{aq} (°C)	Potência Térmica Q_t (W)
111	108,03	0,030	3,0	4,94	619,33
106	103,18	0,029	4,0	11,33	1.372,11
107	104,15	0,029	5,0	18,76	2.271,37
105	102,21	0,028	6,0	26,90	3.143,86
105	102,21	0,028	7,0	33,66	3.933,91
109	106,09	0,029	7,5	36,57	4.426,65
105	102,21	0,028	6,5	30,73	3.591,48
106	103,18	0,029	5,5	22,85	2.765,90
109	106,09	0,029	4,5	14,33	1.735,42
106	103,18	0,029	3,5	7,69	931,51

TABELA ApA.4 – Resultados para Teste 3

Vazão Q (l/h)	Vazão Calibrada Q _{cal} (l/h)	Vazão Mássica m (kg/s)	Sinal de Tensão V _a (V)	Diferença de Temperatura ΔT _{aq} (°C)	Potência Térmica Q _t (W)
129	125,49	0,035	3,0	3,37	493,15
130	126,46	0,035	4,0	8,06	1.178,61
127	123,55	0,034	5,0	14,36	2.039,38
130	126,46	0,035	6,0	20,36	2.975,82
130	126,46	0,035	7,0	25,66	3.749,57
129	125,49	0,035	7,5	28,08	4.102,21
129	125,49	0,035	6,5	23,74	3.469,00
132	136,44	0,038	5,5	17,11	2.715,15
130	126,46	0,035	4,5	11,29	1.650,54
130	126,46	0,035	3,5	5,86	857,11

TABELA ApA.5 – Resultados para Teste 4

Vazão Q (l/h)	Vazão Calibrada Q _{cal} (l/h)	Vazão Mássica m (kg/s)	Sinal de Tensão V _a (V)	Diferença de Temperatura ΔT _{aq} (°C)	Potência Térmica Q _t (W)
90	87,66	0,024	3,0	5,06	507,62
91	88,63	0,025	4,0	11,27	1.176,87
91	88,63	0,025	5,0	19,65	2.051,46
92	89,60	0,025	6,0	29,23	3.050,15
92	89,60	0,025	7,0	37,08	3.869,30
92	89,60	0,025	7,5	40,55	4.231,39
90	87,66	0,024	6,5	34,17	3.423,00
90	87,66	0,024	5,5	25,34	2.539,00
90	87,66	0,024	4,5	16,37	1.640,67
90	87,66	0,024	3,5	8,69	871,36

TABELA ApA.6 – Resultados para Teste 5

Vazão Q (l/h)	Vazão Calibrada Q _{cal} (l/h)	Vazão Mássica m (kg/s)	Sinal de Tensão V _a (V)	Diferença de Temperatura ΔT _{aq} (°C)	Potência Térmica Q _t (W)
89	86,69	0,024	3,0	4,99	500,48
90	87,66	0,024	4,0	11,53	1.155,86
90	87,66	0,024	5,0	19,84	1.988,44
92	89,60	0,025	6,0	29,08	3.034,50
92	89,60	0,025	7,0	38,04	3.969,47
92	89,60	0,025	7,5	41,60	4.340,96
92	89,60	0,025	6,5	34,74	3.625,12
92	89,60	0,025	5,5	25,60	2.672,00
92	89,60	0,025	4,5	16,15	1.686,10
90	87,66	0,024	3,5	9,07	909,25

TABELA ApA.7 – Resultados para Teste 6

Vazão Q (l/h)	Vazão Calibrada Q_{cal} (l/h)	Vazão Mássica m (kg/s)	Sinal de Tensão V_a (V)	Diferença de Temperatura ΔT_{aq} (°C)	Potência Térmica Q_t (W)
150	145,86	0,041	3,0	2,99	499,81
145	141,01	0,039	4,0	7,22	1.176,44
149	144,89	0,040	5,0	12,21	2.040,00
145	141,01	0,039	6,0	17,89	2.913,64
149	144,89	0,040	7,0	22,65	3.782,55
146	141,98	0,039	7,5	24,61	4.007,12
148	143,92	0,040	6,5	20,89	3.488,63
149	144,89	0,040	5,5	15,18	2.535,67
150	145,86	0,041	4,5	9,83	1.642,40
149	144,89	0,040	3,5	5,18	865,68

TABELA ApA.8 – Resultados para Teste 7

Vazão Q (l/h)	Vazão Calibrada Q_{cal} (l/h)	Vazão Mássica m (kg/s)	Sinal de Tensão V_a (V)	Diferença de Temperatura ΔT_{aq} (°C)	Potência Térmica Q_t (W)
204	198,24	0,055	3,0	2,43	558,52
205	199,21	0,055	4,0	4,94	1.135,16
200	194,36	0,054	5,0	8,54	1.925,80
196	190,48	0,053	6,0	14,39	3.184,15
190	184,66	0,051	7,0	18,59	3.957,33
194	188,54	0,052	7,5	19,18	4.162,98
199	193,39	0,054	6,5	16,14	3.638,76
190	184,66	0,051	5,5	12,39	2.638,14
187	181,75	0,050	4,5	7,95	1.659,96
190	184,66	0,051	3,5	4,33	922,41

Para cada sinal de tensão (V_a), são calculados o valor médio da potência térmica (Q_t médio) e o respectivo desvio padrão (2σ) para um nível de confiança de 95,45 %, conforme mostrado na TAB. ApA.9.

TABELA ApA.9 – Médias e Desvios Padrão – Potência Térmica

Sinal de Tensão V_a (V)	Potência Térmica Média Q_t média (W)	Desvio Padrão $\pm 2\sigma$ (W)	Sinal de Tensão V_a (V)	Potência Térmica Média Q_t média (W)	Desvio Padrão $\pm 2\sigma$ (W)
3,0	528,03	91,58	5,5	2.638,94	172,64
3,5	893,57	58,50	6,0	3.035,93	199,80
4,0	1.205,80	161,58	6,5	3.546,08	169,18
4,5	1.667,11	67,42	7,0	3.875,97	170,30
5,0	2.043,03	219,62	7,5	4.207,40	283,26

A segunda calibração foi feita pela verificação do sinal da saída (V_t) no transformador (entrada das resistências elétricas do aquecedor) com um multímetro digital marca HP modelo 34401A em relação a um sinal de tensão (V_a) gerado no PC por intermédio da interface LabVIEW 6.1. A TAB. ApA.10 apresenta o sinal de tensão (V_a) aplicado em V, três medidas de tensão (V_t) efetuadas na entrada das resistências elétricas do aquecedor em V, a média do sinal de tensão na entrada das resistências ($V_{t \text{ média}}$) em V, o desvio padrão (2σ) em V para um nível de confiança de 95,45 % e a potência elétrica (Q_e) em W.

Observa-se que quando o sinal de tensão (V_a) aplicado é igual a zero, o valor da tensão nas resistências elétricas (V_t) é igual a 0,33 V, indicando que o do transformador apresenta um “offset”. Nota-se também que a partir de um sinal de tensão aplicado maior que 7,5 V, há a saturação do sistema, devido às limitações do controlador de potência.

A FIG. ApA.3 apresenta a disposição das duas resistências (14,52 Ω) em paralelo e a resistência equivalente no aquecedor elétrico.

FIGURA ApA.3 – Esquema de Resistências no Aquecedor Elétrico

A potência elétrica (Q_e) em W pode ser calculada por:

$$Q_e = V_t^2 / 7,26 \quad (\text{ApA.2})$$

TABELA ApA.10 – Tensão V_a – Tensão V_t – Potência Elétrica (Q_e)

Sinal de Tensão V_a (V)	Tensão nas Resistências V_t			Média V_t média (V)	Desvio Padrão $\pm 2\sigma$ (V)	Potência Elétrica Q_e (W)
	1ª medida (V)	2ª medida (V)	3ª medida (V)			
0,0	0,33	0,33	0,33	0,33	0,00	0,02
0,1	0,71	0,70	0,71	0,71	0,01	0,07
0,2	1,30	1,30	1,31	1,30	0,01	0,23
0,3	2,20	2,20	2,20	2,20	0,00	0,67
0,4	3,20	3,21	3,20	3,20	0,01	1,41
0,5	4,34	4,34	4,35	4,34	0,01	2,59
0,6	5,76	5,76	5,76	5,76	0,00	4,57
0,7	7,25	7,25	7,26	7,25	0,01	7,24
0,8	9,15	9,16	9,15	9,15	0,01	11,53
0,9	10,75	10,75	10,75	10,75	0,00	15,92
1,0	12,82	12,82	12,83	12,82	0,01	22,64
2,0	36,70	36,71	36,72	36,71	0,02	185,62
2,5	51,20	51,20	51,21	51,20	0,01	361,08
3,0	65,80	65,80	65,80	65,80	0,00	596,37
3,5	81,30	81,30	81,29	81,30	0,01	910,43
4,0	96,40	96,39	96,40	96,40	0,01	1280,02
4,5	111,00	111,00	110,99	111,00	0,01	1697,11
5,0	125,10	125,10	125,09	125,10	0,01	2155,65
5,5	138,30	138,29	138,30	138,30	0,01	2634,56
6,0	150,80	150,79	150,80	150,80	0,01	3132,32
6,5	160,80	160,79	160,80	160,80	0,01	3561,52
7,0	168,90	168,90	168,91	168,90	0,01	3929,37
7,5	175,20	175,20	175,20	175,20	0,00	4227,97
8,0	175,20	175,20	175,20	175,20	0,00	4227,97
9,0	175,20	175,20	175,20	175,20	0,00	4227,97
10,0	175,20	175,20	175,20	175,20	0,00	4227,97

A TAB. ApA.11 mostra a potência térmica (Q_t) e a potência elétrica (Q_e) para cada sinal de tensão aplicado, indicando o erro relativo entre os resultados.

TABELA ApA.11 – Comparação entre Potências Térmica e Elétrica

Sinal V_a (V)	Potência Térmica (W)	Potência Elétrica (W)	Erro Relativo (%)	Sinal V_a (V)	Potência Térmica (W)	Potência Elétrica (W)	Erro Relativo (%)
3,0	528,03	596,37	11,46	5,5	2.638,94	2634,56	0,17
3,5	893,57	910,43	1,85	6,0	3.035,93	3132,32	3,08
4,0	1.205,80	1280,02	5,80	6,5	3.546,08	3561,52	0,43
4,5	1.667,11	1697,11	1,77	7,0	3.875,97	3929,37	1,36
5,0	2.043,03	2155,65	5,22	7,5	4.207,40	4227,97	0,49

Os erros relativos são bem pequenos, com exceção do relacionado ao sinal de tensão igual a 3,0 V, que apresenta valor igual a 11,46 %. Esse fato se deve ao método utilizado no cálculo da potência térmica, que foi o balanço de energia no aquecedor elétrico, representado por:

$$Q_t = m \cdot \Delta h \quad (\text{ApA.3})$$

onde Q_t é a potência térmica em W, m é a vazão mássica em kg/s e Δh é a diferença de entalpia no aquecedor elétrico em J/kg, baseada nas temperaturas de entrada (TC17) e saída (TC1) do aquecedor elétrico. Nos testes efetuados, observa-se que para o sinal de tensão igual a 3,0 V, a potência térmica calculada apresenta valores relativamente pequenos. A variação de entalpia no aquecedor também é pequena, uma vez que a diferença entre as temperaturas de saída e de entrada no aquecedor elétrico também apresenta valores mínimos, considerando-se a calibração dos termopares para os registros das medidas de temperatura.

As curvas de potência calculadas de forma elétrica (Q_e) e térmica (Q_t) em função do sinal aplicado (V_a) são mostradas na FIG. ApA.4.

FIGURA ApA.4 – Curvas de Potência Elétrica e Térmica – Sinal de Tensão

Não foram representadas barras de desvio na curva de potência elétrica, pois apresentam valores muito pequenos quando comparados com a escala de potência do gráfico (ver TAB. ApA.10).

Com boa precisão, para representar a calibração do sinal aplicado (V_a), adotou-se a curva de potência elétrica (Q_e), que foi utilizada no programa de aquisição de dados, desenvolvido no LabVIEW 6.1, para a determinação da potência fornecida à BCN pelo aquecedor elétrico.

A curva de potência elétrica para um sinal de tensão variando de 0 a 7,5 V é representada por:

$$Q_e = 0,05V_a^5 - 3,98V_a^4 + 40,05V_a^3 - 21,34V_a^2 + 7,10V_a + 0,02 \quad (\text{ApA.4})$$

APÊNDICE B – Aferição do Medidor de Vazão Magnético

Para efeito da verificação do comportamento do medidor de vazão magnético Krohne Conaut (MVM), após a sua instalação no circuito, foram realizadas duas aferições da calibração do instrumento, uma feita com fluido frio (temperatura média igual a 25 °C) e a outra com o fluido quente (temperatura média igual a 42 °C). A temperatura média do fluido foi medida pelo termopar TC11, cuja localização é mostrada na FIG. 3.15.

O esquema da BCN para a realização da aferição da calibração é indicado na FIG. ApB.1. A vazão medida no rotâmetro calibrado (Macedo, 2001) foi comparada com a vazão registrada no MVM. As TAB. ApB.1 e TAB. ApB.2 indicam, respectivamente a comparação das vazões para o fluido frio e para o fluido quente.

FIGURA ApB.1 – Esquema da BCN para Aferição da Calibração do MVM

TABELA ApB.1 – Comparação das Vazões com Fluido Frio (25 °C)

Vazão Rotâmetro Q_{rot} (l/h)	Vazão Rotâmetro Corrigida $Q_{rot\ corr}$ (l/h)	Vazão Média MVM $Q_{MVM\ média}$ (l/h)	Número de Leituras Registradas para o MVM	Desvio Padrão $\pm \sigma$ (l/h)
0,00	0,00	0,00	22	0,00
26	25,58	26,26	43	0,46
29	28,49	29,35	61	0,59
38	37,22	39,00	18	0,30
51	49,83	51,30	33	0,78
62	60,50	61,06	15	1,26
70	68,26	69,22	9	0,94
85	82,81	84,70	11	0,48
101	98,33	101,86	6	0,36
110	107,06	109,75	9	0,68
120	116,76	120,41	10	1,25
132	128,40	131,36	8	0,46
143	139,07	142,68	13	0,81
150	145,86	151,43	24	1,43
160	155,56	162,04	15	0,62
171	166,23	172,24	9	0,79
186	180,78	186,23	9	0,42

TABELA ApB.2 – Comparação das Vazões com Fluido Quente (42 °C)

Vazão Rotâmetro Q_{rot} (l/h)	Vazão Rotâmetro Corrigida $Q_{rot\ corr}$ (l/h)	Vazão Média MVM $Q_{MVM\ média}$ (l/h)	Número de Leituras Registradas para o MVM	Desvio Padrão $\pm \sigma$ (l/h)
0,00	0,00	0,00	10	0,00
26	25,58	25,91	23	0,46
51	49,83	50,57	26	0,67
70	68,26	68,35	26	0,81
110	107,06	107,23	32	0,56
132	128,40	129,14	32	0,93
171	166,23	168,24	29	1,63
188	182,72	185,35	31	1,45

As FIG. ApB.2 e FIG. ApB.3 indicam, respectivamente as aferições do MVM para um nível de confiança igual a 95,45 % (2σ) para o fluido frio e quente. Os resultados obtidos são muito bons, mesmo não considerando a correção da densidade do fluido na medida do MVM.

FIGURA ApB.2 – Aferição do MVM para Fluido Frio (25 °C)

FIGURA ApB.3 – Aferição do MVM para Fluido Quente (42 °C)

APÊNDICE C – Calibração dos Sensores de Pressão P1 e P2

Os sensores de pressão diferencial P1 e P2 utilizados na BCN são da marca Validyne, modelo DP 15 e com sinal de saída de ± 10 V (Validyne, 2005).

Os sensores P1 e P2 foram calibrados, respectivamente para uma faixa de pressão de 0 a 49 kPa (0 a 5.000 mmH₂O) e de 0 a 19,6 kPa (0 a 2.000 mmH₂O). A FIG. ApC.1 mostra o timoneiro utilizado nas calibrações destes sensores, bem como o calibrador microprocessado Cappel Plus (Ecil, 2007) e o multímetro HP, modelo 34401A usado para medir o sinal de saída de 0 a 10 V.

As curvas de calibração dos sensores de pressão P1 e P2 foram utilizadas no programa LabVIEW™ 6.1 para a correção das medidas de pressão na BCN.

FIGURA ApC.1 – Bancada de Calibração – Sensores de Pressão P1 e P2

A TAB. ApC.1 indica a relação do padrão calibrado para a pressão (mmH₂O) com os resultados de quatro medidas do sinal de saída do sensor P1, considerando-se também o sinal médio e o desvio padrão.

TABELA ApC.1 – Medidas do Sinal do Sensor P1 – Média e Desvio Padrão

Padrão	1ª Medida	2ª Medida	3ª medida	4ª Medida	Média	Desvio Padrão
(mmH ₂ O)	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	$V_m=(V_1+V_2+V_3+V_4)/4$	σ
	(V)	(V)	(V)	(V)	(V)	(V)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1250	2,48	2,48	2,51	2,51	2,5	0,01
2500	4,98	4,98	5,01	5,01	4,99	0,02
3750	7,48	7,48	7,51	7,51	7,49	0,02
5000	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	0,00

A curva de calibração do sensor P1 para um nível de confiança de 95,45 % (2σ) é mostrada na FIG. ApC.2. Os desvios dos sinais de saída dos sensores P1 e P2 não foram representados na forma de barras nas curvas de calibração, pois são muito pequenos em relação à escala de 0 a 10 V, sendo, portanto, detalhados em anexo nas curvas de calibração apresentadas.

FIGURA ApC.2 – Curva de Calibração P1

A TAB. ApC.2 indica a relação do padrão calibrado (mmH₂O) com os resultados de quatro medidas do sinal de saída do sensor P2, considerando ainda o sinal médio e o desvio padrão.

TABELA ApC.2 – Medidas do Sinal do Sensor P2 – Média e Desvio Padrão

Padrão	1ª Medida	2ª Medida	3ª medida	4ª Medida	Média	Desvio Padrão
(mmH ₂ O)	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	$V_m=(V_1+V_2+V_3+V_4)/4$	$\pm \sigma$
	(V)	(V)	(V)	(V)	(V)	(V)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
500	2,49	2,49	2,51	2,51	2,50	0,01
1000	4,99	4,99	5,00	5,00	5,00	0,01
1500	7,49	7,49	7,50	7,50	7,50	0,01
2000	10,00	10,00	9,98	9,98	9,99	0,01

A FIG. ApC.3 mostra a curva de calibração do sensor P2 para um nível de confiança de 95,45 % (2σ).

FIGURA ApC.3 – Curva de Calibração P2

APÊNDICE D – Calibração de Termopares

São apresentados os procedimentos de calibração de 12 termopares do tipo K (Cromel – Alumel), da marca IOPE com 1,5 mm de diâmetro, respectivamente os termopares TC6, TC7, TC8, TC9, TC10, TC11, TC12, TC18, TC23, TC24, TC25 e TC26. Estes termopares foram calibrados para uma faixa de 20 a 95°C. A bancada de calibração de termopares é mostrada na FIG. ApD.1. A temperatura ambiente na sala de calibração era igual a 19 °C, mantida praticamente constante por meio de condicionamento de ar.

As curvas de calibração dos termopares foram utilizadas no programa LabVIEW™ 6.1 para a correção das medidas de temperatura na BCN.

FIGURA ApD.1 – Bancada de Calibração

Para a calibração destes termopares foi utilizado o forno Isocal 6 Vênus 2125B (Isotech, 2007), que produz banho térmico de água com temperatura controlada. O padrão de comparação é um *Resistance Temperature Detector* – RTD (PT100) calibrado. Um multímetro digital HP 34401A foi usado para medir a resistência do PT100 e um calibrador microprocessado Cappel 10 para medir o sinal de temperatura dos termopares em mV (Ecil, 2007).

Com o auxílio de uma tabela de conversão (Ecil, 2007), as medidas obtidas pelo PT100 em Ohms (Ω), bem como as dos termopares em mV, foram transformadas em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$). Para cada valor de temperatura do forno (20, 40, 60, 80, 90 e 95°C) foram feitas quatro medidas para o sinal de temperatura do termopar, resultando em uma média que foi comparada com a média do padrão (PT100).

A TAB. ApD.1 apresenta a relação de tabelas e figuras que serão exibidas na seqüência, relacionando o número do termopar calibrado com os valores para o padrão PT100 de acordo com a temperatura do forno e, também com as medidas obtidas para o termopar, indicando sua comparação com padrão PT100, e a apresentação da curva de calibração para um nível de confiança de 95,45 % (2σ). Não foram indicadas barras de desvio nas curvas de calibração para as medidas de temperaturas dos termopares calibrados, pois apresentam valores muito pequenos quando comparados com a escala de temperatura dos gráficos. Os desvios foram calculados e são apresentados nas curvas de calibração.

TABELA ApD.1 – Relação de Tabelas e Figuras

Número do Termopar	Medidas do PT100	Medidas dos Termopares	Comparação do Termopar com o PT100	Curva de Calibração
TC6	TAB. Apd.2	TAB. ApD.3	TAB. ApD.4	FIG. ApD.2
TC7	TAB. ApD.2	TAB. ApD.5	TAB. ApD.6	FIG. ApD.3
TC8	TAB. ApD.11	TAB. ApD.12	TAB. ApD.13	FIG. ApD.6
TC9	TAB. ApD.11	TAB. ApD.14	TAB. ApD.15	FIG. ApD.7
TC10	TAB. ApD.11	TAB. ApD.16	TAB. ApD.17	FIG. ApD.8
TC11	TAB. ApD.2	TAB. ApD.7	TAB. ApD.8	FIG. ApD.4
TC12	TAB. ApD.2	TAB. ApD.9	TAB. ApD.10	FIG. ApD.5
TC18	TAB. ApD.20	TAB. ApD.21	TAB. ApD.22	FIG. ApD.10
TC23	TAB. ApD.20	TAB. ApD.23	TAB. ApD.24	FIG. ApD.11
TC24	TAB. ApD.11	TAB. ApD.18	TAB. ApD.19	FIG. ApD.9
TC25	TAB. ApD.20	TAB. ApD.25	TAB. ApD.26	FIG. ApD.12
TC26	TAB. ApD.20	TAB. ApD.27	TAB. ApD.28	FIG. ApD.13

TABELA ApD.2 – Padrão PT100 para TC6, TC7, TC11 e TC12

Forno (°C)	Padrão (PT100)					
	1ª Medida (Ω)	2ª Medida (Ω)	3ª Medida (Ω)	4ª Medida (Ω)	Média (1ª+2ª+3ª+4ª)/4 (Ω)	T _{PT100} (°C)
20	107,7330	107,7476	107,7561	107,7663	107,75	19,9
40	115,5717	115,5719	115,5717	115,5705	115,57	40,08
60	123,2990	123,2959	123,2943	123,2962	123,30	60,15
80	130,9533	130,9527	130,9525	130,9541	130,95	80,13
90	134,7550	134,7540	134,7527	134,7546	134,75	90,11
95	136,6132	136,6134	136,6131	136,6135	136,61	95,00

TABELA ApD.3 – Medidas do Sinal de Temperatura do TC6

Termopar TC6							
1ª medida		2ª medida		3ª medida		4ª medida	
mV	T _{1a} (°C)	mV	T _{2a} (°C)	mV	T _{3a} (°C)	mV	T _{4a} (°C)
0,79145	19,83625	0,79265	19,86625	0,79345	19,88625	0,79481	19,92025
1,60815	39,9061	1,60807	39,90415	1,60765	39,8939	1,60777	39,89683
2,43529	59,98269	2,43487	59,97244	2,43512	59,97854	2,43501	59,97585
3,2717	80,11463	3,27156	80,11122	3,27122	80,10293	3,27134	80,10585
3,69127	90,2261	3,69136	90,22829	3,69147	90,23097	3,69151	90,23195
3,88592	95,14297	3,88593	95,14322	3,88589	95,14224	3,88597	95,1442

TABELA ApD.4 – Comparação do TC6 com o Padrão PT100

T _{PT100} (°C)	Termopar TC6		
	Média das Medidas T _m = (T _{1a} + T _{2a} + T _{3a} + T _{4a})/4 (°C)	Desvio (T _{PT100} - T _m) (°C)	Erro Relativo T _{PT100} e T _m (%)
19,89	19,82	0,07	0,35
40,20	39,66	0,54	1,34
60,27	59,81	0,46	0,77
80,14	80,18	0,04	0,05
90,00	90,41	0,41	0,46
94,83	95,14	0,31	0,33

TABELA ApD.5 – Medidas do Sinal de Temperatura do TC7

Termopar TC7							
1ª medida		2ª medida		3ª medida		4ª medida	
mV	T _{1a} (°C)	mV	T _{2a} (°C)	mV	T _{3a} (°C)	mV	T _{4a} (°C)
0,79263	19,86575	0,79193	19,84825	0,79281	19,87025	0,79391	19,89775
1,60715	39,88171	1,6072	39,88293	1,60686	39,87463	1,60696	39,87708
2,43432	59,95902	2,43419	59,95586	2,43403	59,95195	2,43411	59,9539
3,27064	80,08878	3,2709	80,09512	3,27082	80,09317	3,2709	80,09512
3,69045	90,20609	3,69041	90,20512	3,69068	90,21171	3,69054	90,2083
3,89005	95,24356	3,89004	95,24332	3,89007	95,24405	3,89001	95,24259

TABELA ApD.6 – Comparação do TC7 com o Padrão PT100

T _{PT100} (°C)	Termopar TC7		
	Média das Medidas $T_m = (T_{1a} + T_{2a} + T_{3a} + T_{4a})/4$ (°C)	Desvio $ (T_{PT100} - T_m) $ (°C)	Erro Relativo T _{PT100} e T _m (%)
19,89	19,81	0,08	0,42
40,20	39,64	0,56	1,39
60,27	59,79	0,48	0,80
80,14	80,16	0,02	0,02
90,00	90,38	0,38	0,42
94,83	95,24	0,41	0,43

TABELA ApD.7 – Medidas do Sinal de Temperatura do TC11

Termopar TC11							
1ª medida		2ª medida		3ª medida		4ª medida	
mV	T _{1a} (°C)	mV	T _{2a} (°C)	mV	T _{3a} (°C)	mV	T _{4a} (°C)
0,79073	19,81825	0,79194	19,8485	0,79292	19,873	0,794	19,9
1,60453	39,8178	1,60435	39,81342	1,60433	39,81293	1,60426	39,81122
2,42829	59,81195	2,42835	59,81342	2,42849	59,81683	2,42855	59,81829
3,26259	79,895	3,26244	79,89143	3,26218	79,88524	3,26226	79,88714
3,6804	89,9619	3,680423	89,96246	3,68056	89,96571	3,68042	89,96238
3,88892	95,21604	3,88893	95,21629	3,88895	95,21677	3,88892	95,21604

TABELA ApD.8 – Comparação do TC11 com o Padrão PT100

T_{PT100} (°C)	Termopar TC11		
	Média das Medidas $T_m = (T_{1a} + T_{2a} + T_{3a} + T_{4a})/4$ (°C)	Desvio $ (T_{PT100} - T_m) $ (°C)	Erro Relativo T_{PT100} e T_m (%)
19,89	19,80	0,09	0,47
40,20	39,58	0,62	1,55
60,27	59,65	0,62	1,03
80,14	79,96	0,18	0,22
90,00	90,14	0,14	0,15
94,83	95,22	0,39	0,41

TABELA ApD.9 – Medidas do Sinal de Temperatura do TC12

Termopar TC12							
1ª medida		2ª medida		3ª medida		4ª medida	
mV	T_{1a} (°C)	mV	T_{2a} (°C)	mV	T_{3a} (°C)	mV	T_{4a} (°C)
0,78977	19,79425	0,79113	19,82825	0,79204	19,851	0,79323	19,88075
1,6002	39,7122	1,60016	39,71122	1,60001	39,70756	1,59987	39,70415
2,41979	59,60463	2,42002	59,61024	2,41982	59,60537	2,41989	59,60707
3,24976	79,58952	3,24978	79,59	3,24948	79,58286	3,24951	79,58357
3,66537	89,60405	3,66547	89,60642	3,66567	89,61119	3,66565	89,61071
3,889	95,21799	3,889	95,21799	3,889	95,21799	3,889	95,21799

TABELA ApD.10 – Comparação do TC12 com o Padrão PT100

T_{PT100} (°C)	Termopar TC12		
	Média das Medidas $T_m = (T_{1a} + T_{2a} + T_{3a} + T_{4a})/4$ (°C)	Desvio $ (T_{PT100} - T_m) $ (°C)	Erro Relativo T_{PT100} e T_m (%)
19,89	19,77	0,12	0,61
40,20	39,46	0,74	1,83
60,27	59,42	0,85	1,41
80,14	79,63	0,51	0,64
90,00	89,76	0,24	0,27
94,83	95,22	0,39	0,41

FIGURA ApD.2 – Curva Ajustada TC6

FIGURA ApD.3 – Curva Ajustada TC7

FIGURA ApD.4 – Curva Ajustada TC11

FIGURA ApD.5 – Curva Ajustada TC12

TABELA ApD.11 – Padrão PT100 para TC8, TC9, TC10 e TC24

Forno (°C)	Padrão (PT100)					
	1ª Medida (Ω)	2ª Medida (Ω)	3ª Medida (Ω)	4ª Medida (Ω)	Média (1ª+2ª+3ª+4ª)/4 (Ω)	T _{PT100} (°C)
20	107,7826	107,7797	107,7764	107,7750	107,78	19,97
40	115,5802	115,5746	115,5746	115,5744	115,58	40,21
60	123,2954	123,2948	123,2951	123,2938	123,29	60,26
80	130,9524	130,9530	130,9546	130,9525	130,95	80,14
90	134,7528	134,7525	134,7520	134,7529	134,75	90,01
95	136,6144	136,6145	136,6142	136,6143	136,61	94,84

TABELA ApD.12 – Medidas do Sinal de Temperatura do TC8

Termopar TC8							
1ª medida		2ª medida		3ª medida		4ª medida	
mV	T _{1a} (°C)	mV	T _{2a} (°C)	mV	T _{3a} (°C)	mV	T _{4a} (°C)
0,79356	19.889	0,79364	19.891	0,79319	19.87975	0,79318	19.8795
1,60505	39.83049	1,60504	39.83024	1,60496	39.82829	1,60478	39.8239
2,43024	59.85951	2,43038	59.86293	2,43026	59.86	2,43013	59.85683
3,26636	79.98476	3,26614	79.97952	3,2667	79.99286	3,26621	79.98119
3,685	90.07317	3,68561	90.08805	3,6855	90.08537	3,68485	90.06951
3,87992	94,99684	3,87993	94,99709	3,87994	94,99733	3,87995	94,99757

TABELA ApD.13 – Comparação do TC8 com o Padrão PT100

T _{PT100} (°C)	Termopar TC8		
	Média das Medidas T _m = (T _{1a} + T _{2a} + T _{3a} + T _{4a})/4 (°C)	Desvio (T _{PT100} - T _m) (°C)	Erro Relativo T _{PT100} e T _m (%)
19,97	19,82	0,15	0,75
40,21	39,59	0,62	1,55
60,26	59,69	0,57	0,94
80,14	80,05	0,09	0,11
90,01	90,26	0,25	0,27
94,84	95,00	0,16	0,17

TABELA ApD.14 – Medidas do Sinal de Temperatura do TC9

Termopar TC9							
1ª medida		2ª medida		3ª medida		4ª medida	
mV	T _{1a} (°C)	mV	T _{2a} (°C)	mV	T _{3a} (°C)	mV	T _{4a} (°C)
0,79456	19,914	0,7944	19,91	0,79413	19,90325	0,79426	19,9065
1,60695	39,87683	1,60687	39,87488	1,60687	39,87488	1,60671	39,87098
2,43275	59,92073	2,43269	59,91927	2,43255	59,91585	2,43228	59,90927
3,26855	80,0378	3,26865	80,04025	3,2686	80,04	3,26845	80,03537
3,68707	90,12366	3,68687	90,11878	3,68627	90,10415	3,68639	90,10707
3,8901	95,24477	3,89015	95,24599	3,89012	95,24526	3,89011	95,24502

TABELA ApD.15 – Comparação do TC9 com o Padrão PT100

T _{PT100} (°C)	Termopar TC9		
	Média das Medidas T _m = (T _{1a} + T _{2a} + T _{3a} + T _{4a})/4 (°C)	Desvio (T _{PT100} - T _m) (°C)	Erro Relativo T _{PT100} e T _m (%)
19,97	19,85	0,12	0,60
40,21	39,64	0,57	1,42
60,26	59,75	0,51	0,85
80,14	80,11	0,03	0,04
90,01	90,29	0,28	0,31
94,84	95,25	0,41	0,43

TABELA ApD.16 – Medidas do Sinal de Temperatura do TC10

Termopar TC10							
1ª medida		2ª medida		3ª medida		4ª medida	
mV	T _{1a} (°C)	mV	T _{2a} (°C)	mV	T _{3a} (°C)	mV	T _{4a} (°C)
0,79439	19,90975	0,79412	19,903	0,79392	19,898	0,79413	19,90325
1,60508	39,83122	1,60487	39,8261	1,60472	39,82244	1,60463	39,82024
2,42967	59,84561	2,42942	59,83951	2,42924	59,83512	2,42932	59,83707
3,2642	79,93333	3,264	79,92857	3,26412	79,93143	3,26404	79,92953
3,6825	90,01219	3,8295	90,02317	3,68296	90,02341	3,68285	90,02073
3,88788	95,19071	3,88787	95,19047	3,88785	95,18998	3,88782	95,18925

TABELA ApD.17 – Comparação do TC10 com o Padrão PT100

T_{PT100} (°C)	Termopar TC10		
	Média das Medidas $T_m = (T_{1a} + T_{2a} + T_{3a} + T_{4a})/4$ (°C)	Desvio $ (T_{PT100} - T_m) $ (°C)	Erro Relativo T_{PT100} e T_m (%)
19,97	19,84	0,13	0,65
40,21	39,59	0,62	1,54
60,26	59,67	0,59	0,98
80,14	80,00	0,14	0,17
90,01	90,20	0,19	0,21
94,84	95,19	0,35	0,37

TABELA ApD.18 – Medidas do Sinal de Temperatura do TC24

Termopar TC24							
1ª medida		2ª medida		3ª medida		4ª medida	
mV	T_{1a} (°C)	mV	T_{2a} (°C)	mV	T_{3a} (°C)	mV	T_{4a} (°C)
0,79567	19,94175	0,79543	19,93575	0,79509	19,92725	0,79529	19,93225
1,60709	39,88025	1,60725	39,88415	1,60695	39,87683	1,60686	39,87463
2,43274	59,92049	2,43257	59,91634	2,43234	59,91073	2,43221	59,90756
3,26778	80,01903	3,26788	80,02146	3,26794	80,02293	3,26799	80,02415
3,68691	90,11975	3,68729	90,12902	3,6871	90,12439	3,68654	90,11073
3,87991	94,9966	3,87992	94,99684	3,8799	94,99635	3,87998	94,99831

TABELA ApD.19 – Comparação do TC24 com o Padrão PT100

T_{PT100} (°C)	Termopar TC24		
	Média das Medidas $T_m = (T_{1a} + T_{2a} + T_{3a} + T_{4a})/4$ (°C)	Desvio $ (T_{PT100} - T_m) $ (°C)	Erro Relativo T_{PT100} e T_m (%)
19,97	19,87	0,10	0,50
40,21	39,64	0,57	1,43
60,26	59,74	0,52	0,86
80,14	80,09	0,05	0,07
90,01	90,30	0,29	0,32
94,84	95,00	0,16	0,17

FIGURA ApD.6 – Curva Ajustada TC8

FIGURA ApD.7 – Curva Ajustada TC9

FIGURA ApD.8 – Curva Ajustada TC10

FIGURA ApD.9 – Curva Ajustada TC24

TABELA ApD.20 – Padrão PT100 para TC18, TC23, TC25 e TC26

Forno (°C)	Padrão (PT100)					T _{PT100} (°C)
	1ª Medida (Ω)	2ª Medida (Ω)	3ª Medida (Ω)	4ª Medida (Ω)	Média (1ª+2ª+3ª+4ª)/4 (Ω)	
20	107,8116	107,8097	107,8108	107,8102	107,81	20,05
40	115,5767	115,5761	115,5763	115,5754	115,58	40,22
60	123,2632	123,2627	123,2605	123,2603	123,26	60,17
80	130,9146	130,9113	130,9112	130,9117	130,91	80,04
90	134,7144	134,7148	134,7151	134,7139	134,71	89,91
95	136,6122	136,6124	136,613	136,6124	136,61	94,84

TABELA ApD.21 – Medidas do Sinal de Temperatura do TC18

Termopar TC18							
1ª medida		2ª medida		3ª medida		4ª medida	
mV	T _{1a} (°C)	mV	T _{2a} (°C)	mV	T _{3a} (°C)	mV	T _{4a} (°C)
0,79626	19,9565	0,79623	19,95575	0,79617	19,95425	0,79627	19,95675
1,60205	39,75732	1,60203	39,75683	1,60212	39,75903	1,60201	39,75634
2,42071	59,62708	2,42081	59,62951	2,4204	59,61951	2,42067	59,6261
3,25226	79,64905	3,25224	79,64857	3,25216	79,64667	3,25226	79,64905
3,66984	89,71048	3,67004	89,71523	3,66992	89,71238	3,66945	89,70119
3,89012	95,24526	3,89015	95,24599	3,89011	95,24502	3,89012	95,24526

TABELA ApD.22 – Comparação do TC18 com o Padrão PT100

T _{PT100} (°C)	Termopar TC18		
	Média das Medidas T _m = (T _{1a} + T _{2a} + T _{3a} + T _{4a})/4 (°C)	Desvio (T _{PT100} - T _m) (°C)	Erro Relativo T _{PT100} e T _m (%)
20,05	19,89	0,16	0,79
40,22	39,52	0,70	1,73
60,17	59,46	0,71	1,18
80,04	79,71	0,33	0,41
89,91	89,88	0,03	0,03
94,84	95,25	0,41	0,43

TABELA ApD.23 – Medidas do Sinal de Temperatura do TC23

Termopar TC23							
1ª medida		2ª medida		3ª medida		4ª medida	
mV	T _{1a} (°C)	mV	T _{2a} (°C)	mV	T _{3a} (°C)	mV	T _{4a} (°C)
0,79688	19,972	0,79702	19,9755	0,79696	19,974	0,79709	19,97725
1,60534	39,83756	1,60532	39,83707	1,60534	39,83756	1,60535	39,83781
2,42645	59,76707	2,42654	59,76926	2,42626	59,76244	2,42647	59,76756
3,26053	79,84595	3,26068	79,84953	3,26071	79,85023	3,26047	79,84452
3,67997	89,95167	3,67963	89,94357	3,68012	89,95524	3,67938	89,93761
3,88762	95,18438	3,88765	95,1851	3,88761	95,18414	3,8876	95,18389

TABELA ApD.24 – Comparação do TC23 com o Padrão PT100

T _{PT100} (°C)	Termopar TC23		
	Média das Medidas $T_m = (T_{1a} + T_{2a} + T_{3a} + T_{4a})/4$ (°C)	Desvio $ (T_{PT100} - T_m) $ (°C)	Erro Relativo T _{PT100} e T _m (%)
20,05	19,91	0,14	0,69
40,22	39,60	0,62	1,53
60,17	59,60	0,57	0,95
80,04	79,91	0,13	0,16
89,91	90,12	0,21	0,24
94,84	95,18	0,34	0,36

TABELA ApD.25 – Medidas do Sinal de Temperatura do TC25

Termopar TC25							
1ª medida		2ª medida		3ª medida		4ª medida	
mV	T _{1a} (°C)	mV	T _{2a} (°C)	mV	T _{3a} (°C)	mV	T _{4a} (°C)
0,79791	19,99775	0,79809	20,00225	0,79794	19,9985	0,7981	20,0025
1,60697	39,87732	1,60704	39,87902	1,60707	39,87976	1,60708	39,88
2,42902	59,82975	2,42893	59,82756	2,42884	59,82536	2,4289	59,82683
3,26387	79,92548	3,26398	79,92809	3,26403	79,92928	3,26342	79,91476
3,68356	90,03805	3,6833	90,03171	3,68374	90,04243	3,68403	90,04951
3,87956	94,98808	3,8796	94,98905	3,87965	94,99027	3,87961	94,9893

TABELA ApD.26 – Comparação do TC25 com o Padrão PT100

T_{PT100} (°C)	Termopar TC25		
	Média das Medidas $T_m = (T_{1a} + T_{2a} + T_{3a} + T_{4a})/4$ (°C)	Desvio $ (T_{PT100} - T_m) $ (°C)	Erro Relativo T_{PT100} e T_m (%)
20,05	19,94	0,11	0,57
40,22	39,64	0,58	1,44
60,17	59,66	0,51	0,85
80,04	79,99	0,05	0,06
89,91	90,22	0,31	0,34
94,84	94,99	0,15	0,16

TABELA ApD.27 – Medidas do Sinal de Temperatura do TC26

Termopar TC26							
1ª medida		2ª medida		3ª medida		4ª medida	
mV	T_{1a} (°C)	mV	T_{2a} (°C)	mV	T_{3a} (°C)	mV	T_{4a} (°C)
0,79754	19,9885	0,79754	19,9885	0,79732	19,983	0,7975	19,9875
1,60643	39,86415	1,6064	39,86341	1,60652	39,86634	1,60639	39,86317
2,42837	59,8139	2,42842	59,81512	2,42821	59,81	2,42846	59,81609
3,26347	79,91595	3,26355	79,91786	3,26341	79,91453	3,26351	79,91691
3,68338	90,03365	3,68319	90,02903	3,68348	90,03609	3,6824	90,00976
3,88872	95,21117	3,88875	95,2119	3,88871	95,21092	3,88876	95,21214

TABELA ApD.28 – Comparação do TC26 com o Padrão PT100

T_{PT100} (°C)	Termopar TC26		
	Média das Medidas $T_m = (T_{1a} + T_{2a} + T_{3a} + T_{4a})/4$ (°C)	Desvio $ (T_{PT100} - T_m) $ (°C)	Erro Relativo T_{PT100} e T_m (%)
20,05	19,92	0,13	0,63
40,22	39,63	0,59	1,47
60,17	59,64	0,53	0,88
80,04	79,98	0,06	0,07
89,91	90,20	0,29	0,33
94,84	95,21	0,37	0,39

FIGURA ApD.10 – Curva Ajustada TC18

FIGURA ApD.11 – Curva Ajustada TC23

FIGURA ApD.12 – Curva Ajustada TC25

FIGURA ApD.13 – Curva Ajustada TC26

APÊNDICE E – PROGRAMA “AIR_NCL”

Com o objetivo de simular as condições iniciais e finais dos experimentos 25% Ar, 50% Ar, 75% Ar e 100% Ar, para NP1 e NP2, o programa computacional “Air_NCL” foi desenvolvido no ambiente EES para os calcular os volumes internos das tubulações, do aquecedor elétrico, do trocador de calor e as massas de ar e de líquido presentes na BCN.

Para os experimentos 25% Ar e 50% Ar, o programa “Air_NCL” é apresentado a seguir.

{CONDIÇÕES INICIAIS E FINAIS DOS TESTES 25% E 50% DE AR NO TUBULÃO SUPERIOR DO TROCADOR DE CALOR - BCN}

FUNCTION vol (f;r1;r2;fi_1;fi_2;fi_3;d1;d2;L1;L2)

IF f = 9 THEN v:= ((0,5)*(r1^2)*(((PI*fi_1)/180) - sin(fi_1)))*(L1/1e+9) {vol_25%_1}
+ ((0,5)*(r2^2)*(((PI*fi_2)/180) - sin(fi_2)))*(L2/1e+9) {vol_25%_2} ELSE

IF f = 19,05 THEN v:= ((PI*(d1^2))/8)*(L1/1e+9) {vol_50%_1} + (((PI*d2^2)/4) -
((0,5)*((d2-f)^2)*(((PI*fi_3)/180) - sin(fi_3)))*(L2/1e+9) {vol_50%_2}

ENDIF

vol := v

END

{DADOS FÍSICOS DA TUBULAÇÃO}

d_aq = 62,71 {mm - diâmetro interno aquecedor elétrico}

dr = 15 {mm - diâmetro da resistência elétrica}

dt = 20,8 {mm - diâmetro tubulação de cobre}

dt_3/8 = 7,945 {mm - tubos de cobre 3/8"}

dv = 101,6 {mm - diâmetro vaso de expansão - 4"}

$$d1 = 38,1 \text{ {mm}}$$

$$r1 = d1/2$$

$$L1 = 991 \text{ {mm}}$$

$$d2 = 20,8 \text{ {mm}}$$

$$r2 = d2/2$$

$$L2 = 172,4 \text{ {mm}}$$

$$v = \text{vol}(f; r1; r2; fi_1; fi_2; fi_3; d1; d2; L1; L2)$$

$$\{f = 9\} \text{ {mm - ATÉ 20,8 mm}}$$

$$\cos(fi_1/2) = (r1-f)/r1$$

$$\cos(fi_2/2) = (r2-f)/r2$$

$$\cos(fi_3/2) = (r2 - (d2-f))/r2$$

$$\text{vol_25\%}_1 = ((0,5)*(r1^2)*(((PI*fi_1)/180) - \sin(fi_1)))*(L1/1e+9) \text{ {m3}}$$

$$\text{vol_25\%}_2 = ((0,5)*(r2^2)*(((PI*fi_2)/180) - \sin(fi_2)))*(L2/1e+9) \text{ {m3}}$$

$$\text{vol_50\%}_1 = ((PI*(d1^2))/8)*(L1/1e+9) \text{ {m3}}$$

$$\text{vol_50\%}_2 = (((PI*d2^2)/4) - ((0,5)*((d2-f)^2)*(((PI*fi_3)/180) - \sin(fi_3))))*(L2/1e+9) \text{ {m3}}$$

$$\text{Volume_ar} = v \text{ {m3}}$$

{CÁLCULO DA MASSA DE AR INICIAL E FINAL - BCN}

$$R = 286,9$$

$$\{P_{\text{tubulão_superior}} = 94888\} \text{ {Pa}}$$

$$\{T_{\text{ar}} = 19,81\} \text{ {°C}}$$

$$T_{\text{média_ar_k}} = T_{\text{ar}} + 273,15$$

$$ro_{\text{ar}} = P_{\text{tubulão_superior}}/(R*T_{\text{média_ar_k}}) \text{ {kg/m3}}$$

$$\text{Massa_ar} = ro_{\text{ar}} * \text{Volume_ar} \text{ {kg}}$$

{TEMPERATURAS INICIAIS POR REGIÃO - VER DADOS - TABELA DE TESTE
*.DAT}

{Ti[1] = 17,9 {°C}
Ti[2] = 18,6 {°C}
Ti[3] = 20,1 {°C}
Ti[4] = 20,3 {°C}
Ti[5] = 19,6 {°C}
Ti[6] = 19,4 {°C}
Ti[7] = 18,8 {°C}
Ti[8] = 17,5 {°C}
Ti[9] = 17,4 {°C}}

{PRESSÕES INICIAIS POR REGIÃO - VER DADOS - RELAP5}

{Pi[1] = 137 {kPa}
Pi[2] = 111 {kPa}
Pi[3] = 95 {kPa}
Pi[4] = 98 {kPa}
Pi[5] = 100 {kPa}
Pi[6] = 100 {kPa}
Pi[7] = 125 {kPa}
Pi[8] = 147 {kPa}
Pi[9] = 93 {kPa}}

{CÁLCULO DA DENSIDADE INICIAL E FINAL DA ÁGUA POR REGIÃO}

Duplicate j=1;9

ro_H2O_[j] = DENSITY(Steam_IAPWS;T=Ti[j];P=Pi[j]) {kg/m3}

End

{CÁLCULO DO VOLUME INICIAL E FINAL DA ÁGUA POR REGIÃO}

$$\text{Vol_a_1} = ((\text{PI}*((\text{d_aq})^2)/4) - (7*(\text{PI}*(\text{dr}^2)/4)))*(1700/1\text{e}+9) \quad \{\text{m3}\}$$

$$\text{Vol_a_2} = (\text{PI}*((\text{d_aq})^2)/4)*(150/1\text{e}+9) \quad \{\text{m3}\}$$

$$\text{Vol_água_}[1] = \text{Vol_a_1} + \text{Vol_a_2} \quad \{\text{m3}\}$$

$$\text{Vol_b_1} = (\text{PI}*(\text{dt}^2)/4)*(3445 - (\text{dt}/2))/1\text{e}+9 \quad \{\text{m3}\}$$

$$\text{Vol_b_2} = (\text{PI}*(\text{dt}^2)/4)*(L2/1\text{e}+9) - \text{vol_25\%_2} \quad \{\text{m3}\}$$

$$\text{Vol_água_}[2] = \text{Vol_b_1} + \text{Vol_b_2} \quad \{\text{m3}\}$$

$$\text{Vol_água_}[3] = (\text{PI}*(\text{d1}^2)/4)*(L1/1\text{e}+9) - \text{vol_25\%_1} \quad \{\text{m3}\}$$

$$\text{Vol_água_}[4] = (18*(\text{PI}*((\text{dt_3}/8)^2)/4))*(601/1\text{e}+9) \quad \{\text{m3}\}$$

$$\text{Vol_água_}[5] = (\text{PI}*(\text{d1}^2)/4)*(L1/1\text{e}+9) \quad \{\text{m3}\}$$

$$\text{Vol_água_}[6] = (\text{PI}*(\text{dt}^2)/4)*(2940 + (\text{dt}/2))/1\text{e}+9 \quad \{\text{m3}\}$$

$$\text{Vol_água_}[7] = (\text{PI}*(\text{dt}^2)/4)*(4638 - \text{dt})/1\text{e}+9 \quad \{\text{m3}\}$$

$$\text{Vol_água_}[8] = (\text{PI}*(\text{dt}^2)/4)*(4868 + (\text{dt}/2))/1\text{e}+9 \quad \{\text{m3}\}$$

$$\text{Vol_água_}[9] = ((\text{PI}*(\text{dt}^2)/4)*(839) + (\text{PI}*(\text{dv}^2)/4)*h)/1\text{e}+9 \quad \{\text{m3}\}$$

{CÁLCULO DA SOMA DO VOLUME INICIAL E FINAL DA ÁGUA - BCN}

$$\text{Volume_água} = (\text{SUM}(\text{Vol_água_}[1..9])) \quad \{\text{m3}\}$$

{CÁLCULO DA MASSA INICIAL E FINAL DA ÁGUA POR REGIÃO}

Duplicate j=1;9

$$\text{Massa_água_}[j] = (\text{ro_H2O_}[j])*(\text{Vol_água_}[j]) \quad \{\text{kg}\}$$

End

{CÁLCULO DA SOMA DA MASSA INICIAL E FINAL DA ÁGUA - BCN}

$$\text{Massa_água} = (\text{SUM}(\text{Massa_água_}[1..9])) \quad \{\text{kg}\}$$

{CÁLCULO DO ERRO RELATIVO ENTRE P2_v2 e P2_calc}

$$P2_calc = (h+839) - (9+639) \text{ {mm}}$$

$$P2_v2 = (P_tubul\tilde{a}o_superior - 0,912e+5)/9,8067 \text{ {mm}}$$

$$Erro_relativo_P2 = ABS(((P2_calc - P2_v2)/P2_calc))*100 \text{ {%}}$$

{CÁLCULO DO ERRO RELATIVO ENTRE P1_v2 e P1_calc}

$$P1_calc = (h+839) - (9+639+9) + 3445 + 313 \text{ {mm}}$$

$$Erro_relativo_P1 = ABS(((P1_v1 - P1_calc)/P1_v1))*100 \text{ {%}}$$

{CÁLCULO DO DESNÍVEL - BCN}

$$P2_v2_maior = P2_v2 + 5 \text{ {mm}}$$

$$P2_v2_menor = P2_v2 - 5 \text{ {mm}}$$

$$DN_v2 = P2_calc - P2_v2_maior \text{ {mm}}$$

$$P1_v1_maior = P1_v1 + 12,5 \text{ {mm}}$$

$$P1_v1_menor = P1_v1 - 12,5 \text{ {mm}}$$

$$DN_v1 = P1_v1_menor - P1_calc \text{ {mm}}$$

{CÁLCULO DO VOLUME INICIAL E FINAL TOTAL - BCN}

$$Volume_total_fluido = Volume_água + Volume_ar \text{ {m}^3}$$

{CÁLCULO DA MASSA DE FLUIDO INICIAL E FINAL TOTAL - BCN}

$$Massa_total_fluido = Massa_ar + Massa_água \text{ {kg}}$$

A seguir, para os experimentos 75% Ar e 100% Ar, o programa “Air_NCL” é apresentado.

{CONDIÇÕES INICIAIS E FINAIS DOS TESTES 75% E 100% DE AR NO TUBULÃO SUPERIOR DO TROCADOR DE CALOR - BCN}

FUNCTION vol (f;r1;r2;fi_1;fi_3;d1;d2;L1;L2;d3)

IF f = 29 THEN v:= ((PI*(d1^2)/4) - ((0,5)*(r1^2)*(((PI*fi_1)/180) - sin(fi_1))))*(L1/1e+9) {vol_75%_1} + (PI*(d2^2)/4)*(L2/1e+9) {vol_75%_2} + (PI*(d3^2)/4)*((f - 20,8)/1e+9) {vol_75%_3} ELSE

IF f = 38,1 THEN v:= ((PI*(d1^2))/4)*(L1/1e+9) {vol_100%_1} + ((PI*(d2^2))/4)*(L2/1e+9) {vol_100%_2} + (PI*(d3^2)/4)*((f - 20,8)/1e+9) {vol_100%_3}

ENDIF

vol := v

END

{DADOS FÍSICOS DA TUBULAÇÃO}

d_aq = 62,71 {mm - diâmetro interno aquecedor elétrico}

dr = 15 {mm - diâmetro da resistência elétrica}

dt = 20,8 {mm - diâmetro tubulação de cobre}

dt_3/8 = 7,945 {mm - tubos de cobre 3/8"}

dv = 101,6 {mm - diâmetro vaso de expansão - 4"}

d1 = 38,1 {mm}

r1 = d1/2

L1 = 991 {mm}

d2 = 20,8 {mm}

r2 = d2/2

$$L2 = 172,4 \text{ {mm}}$$

$$d3 = 20,8 \text{ {mm - diâmetro tubulação perna quente}}$$

$$v = \text{vol}(f; r1; r2; fi_1; fi_3; d1; d2; L1; L2; d3)$$

$$\{f = 9\} \text{ {mm - ATÉ 20,8 mm}}$$

$$\cos(fi_1/2) = (r1 - (d1-f))/r1$$

$$\cos(fi_3/2) = (r2 - (d2-f))/r2$$

$$\text{vol_75\%_1} = ((PI*(d1^2)/4) - ((0,5)*(r1^2)*(((PI*fi_1)/180) - \sin(fi_1))))*(L1/1e+9) \text{ {m3}}$$

$$\text{vol_75\%_2} = (PI*(d2^2)/4)*(L2/1e+9) \text{ {m3}}$$

$$\text{vol_75\%_3} = (PI*(d3^2)/4)*((f - 20,8)/1e+9) \text{ {m3}}$$

$$\text{vol_100\%_1} = ((PI*(d1^2))/4)*(L1/1e+9) \text{ {m3}}$$

$$\text{vol_100\%_2} = ((PI*(d2^2))/4)*(L2/1e+9) \text{ {m3}}$$

$$\text{vol_100\%_3} = (PI*(d3^2)/4)*((f - 20,8)/1e+9) \text{ {m3}}$$

$$\text{Volume_ar} = v \text{ {m3}}$$

{CÁLCULO DA MASSA DE AR INICIAL E FINAL - BCN}
{25% DE AR}

$$R = 286,9$$

$$\{P_{\text{tubulão_superior}} = 94888\} \text{ {Pa}}$$

$$\{T_{\text{ar}} = 19,81\} \text{ {°C}}$$

$$T_{\text{média_ar_k}} = T_{\text{ar}} + 273,15$$

$$\rho_{\text{ar}} = P_{\text{tubulão_superior}} / (R * T_{\text{média_ar_k}}) \text{ {kg/m3}}$$

$$\text{Massa_ar} = \rho_{\text{ar}} * \text{Volume_ar} \text{ {kg}}$$

{TEMPERATURAS INICIAIS POR REGIÃO - VER DADOS - TABELA DE TESTE
*.DAT}

{Ti[1] = 17,9 {°C}
Ti[2] = 18,6 {°C}
Ti[3] = 20,1 {°C}
Ti[4] = 20,3 {°C}
Ti[5] = 19,6 {°C}
Ti[6] = 19,4 {°C}
Ti[7] = 18,8 {°C}
Ti[8] = 17,5 {°C}
Ti[9] = 17,4 {°C}}

{PRESSÕES INICIAIS POR REGIÃO - VER DADOS - RELAP5}

{Pi[1] = 137 {kPa}
Pi[2] = 111 {kPa}
Pi[3] = 95 {kPa}
Pi[4] = 98 {kPa}
Pi[5] = 100 {kPa}
Pi[6] = 100 {kPa}
Pi[7] = 125 {kPa}
Pi[8] = 147 {kPa}
Pi[9] = 93 {kPa}}

{CÁLCULO DA DENSIDADE INICIAL E FINAL DA ÁGUA POR REGIÃO}

Duplicate j=1;9

ro_H2O_[j] = DENSITY(Steam_IAPWS;T=Ti[j];P=Pi[j]) {kg/m3}

End

{CÁLCULO DO VOLUME INICIAL E FINAL DA ÁGUA POR REGIÃO}

Vol_a_1 = ((PI*((d_aq)^2)/4) - (7*(PI*(dr^2)/4)))*(1700/1e+9) {m3}

$$\text{Vol_a_2} = (\text{PI} * ((\text{d_aq})^2) / 4) * (150 / 1\text{e}+9) \quad \{\text{m3}\}$$

$$\text{Vol_água_}[1] = \text{Vol_a_1} + \text{Vol_a_2} \quad \{\text{m3}\}$$

$$\text{Vol_água_}[2] = (\text{PI} * (\text{dt}^2) / 4) * (3445 - (\text{dt} / 2) - (\text{f} - 20,8)) / 1\text{e}+9 \quad \{\text{m3}\}$$

$$\text{Vol_água_}[3] = (\text{PI} * (\text{d1}^2) / 4) * (\text{L1} / 1\text{e}+9) - \text{vol_75\%_1} \quad \{\text{m3}\}$$

$$\text{Vol_água_}[4] = (18 * (\text{PI} * ((\text{dt_3} / 8)^2) / 4)) * (601 / 1\text{e}+9) \quad \{\text{m3}\}$$

$$\text{Vol_água_}[5] = (\text{PI} * (\text{d1}^2) / 4) * (\text{L1} / 1\text{e}+9) \quad \{\text{m3}\}$$

$$\text{Vol_água_}[6] = (\text{PI} * (\text{dt}^2) / 4) * (2940 + (\text{dt} / 2)) / 1\text{e}+9 \quad \{\text{m3}\}$$

$$\text{Vol_água_}[7] = (\text{PI} * (\text{dt}^2) / 4) * (4638 - \text{dt}) / 1\text{e}+9 \quad \{\text{m3}\}$$

$$\text{Vol_água_}[8] = (\text{PI} * (\text{dt}^2) / 4) * (4868 + (\text{dt} / 2)) / 1\text{e}+9 \quad \{\text{m3}\}$$

$$\text{Vol_água_}[9] = ((\text{PI} * (\text{dt}^2) / 4) * (839) + (\text{PI} * (\text{dv}^2) / 4) * \text{h}) / 1\text{e}+9 \quad \{\text{m3}\}$$

{CÁLCULO DA SOMA DO VOLUME INICIAL E FINAL DA ÁGUA - BCN}

$$\text{Volume_água} = (\text{SUM}(\text{Vol_água_}[1..9])) \quad \{\text{m3}\}$$

{CÁLCULO DA MASSA INICIAL E FINAL DA ÁGUA POR REGIÃO}

Duplicate j=1;9

$$\text{Massa_água_}[j] = (\text{ro_H2O_}[j]) * (\text{Vol_água_}[j]) \quad \{\text{kg}\}$$

End

{CÁLCULO DA SOMA DA MASSA INICIAL E FINAL DA ÁGUA - BCN}

$$\text{Massa_água} = (\text{SUM}(\text{Massa_inicial_água_}[1..9])) \quad \{\text{kg}\}$$

{CÁLCULO DO ERRO RELATIVO ENTRE P2_v2 e P2_calc}

$$\text{P2_calc} = (\text{h} + 839) - (9 + 639) \quad \{\text{mm}\}$$

$$\text{P2_v2} = (\text{P_tubulão_superior} - 0,912\text{e}+5) / 9,8067 \quad \{\text{mm}\}$$

$$\text{Erro_relativo_P2} = \text{ABS}(((\text{P2_calc} - \text{P2_v2}) / \text{P2_calc})) * 100 \quad \{\%\}$$

{CÁLCULO DO ERRO RELATIVO ENTRE P1_v2 e P1_calc}

$$P1_calc = (h+839) - (9+639+9) + 3445 + 313 \text{ {mm}}$$

$$\text{Erro_relativo_P1} = \text{ABS}(((P1_v1 - P1_calc)/P1_v1))*100 \text{ \%}$$

{CÁLCULO DO DESNÍVEL - BCN}

$$P2_v2_maior = P2_v2 + 5 \text{ {mm}}$$

$$P2_v2_menor = P2_v2 - 5 \text{ {mm}}$$

$$DN_v2 = P2_calc - P2_v2_maior \text{ {mm}}$$

$$P1_v1_maior = P1_v1 + 12,5 \text{ {mm}}$$

$$P1_v1_menor = P1_v1 - 12,5 \text{ {mm}}$$

$$DN_v1 = P1_v1_menor - P1_calc \text{ {mm}}$$

{CÁLCULO DO VOLUME INICIAL E FINAL TOTAL - BCN}

$$\text{Volume_total_fluido} = \text{Volume_água} + \text{Volume_ar} \text{ {m}^3}$$

{CÁLCULO DA MASSA DE FLUIDO INICIAL E FINAL TOTAL - BCN}

$$\text{Massa_total_fluido} = \text{Massa_ar} + \text{Massa_água} \text{ {kg}}$$

APÊNDICE F – Aferição dos Sensores de Pressão P1 e P2

Com o objetivo de avaliar o comportamento dos sensores de pressão Validyne P1 e P2, em condições de fluido estacionário na BCN, foram realizadas duas comparações, uma para o sensor P1 e a outra, para o sensor P2, relacionando as pressões medidas no início dos testes, sem aplicação de potência no aquecedor elétrico, e no final do testes, após 48 horas de resfriamento do circuito, em mmH₂O, comparando-as com as pressões calculadas ($\Delta P1$ e $\Delta P2$), determinadas pela diferença entre a posição de montagem dos sensores P1 e P2 e o nível de água no vaso de expansão da BCN em mmH₂O.

A TAB. ApF.1 indica os testes realizados, relacionando as pressões medidas pelo sensor P1, com o fluido em repouso, antes da aplicação de potência, em mmH₂O e as pressões calculadas ($\Delta P1$) pela diferença entre a posição de montagem do sensor P1 e o nível de água no vaso de expansão em mmH₂O, para os testes de primeiro nível de potência aplicada (NP1).

TABELA ApF.1 – Pressões Iniciais Medidas e Calculadas para P1 – NP1

Testes	Pressão Inicial Medida P1 (mmH ₂ O)	Pressão Calculada $\Delta P1$ (mmH ₂ O)
25% Ar	4163	4133
50% Ar	4169	4140
75% Ar	4187	4158
100% Ar	4192	4148

Os testes realizados relacionando as pressões medidas pelo sensor P1, com o circuito resfriado e em repouso, após 48h da aplicação do transitório de potência, em mmH₂O e as pressões calculadas ($\Delta P1$) pela diferença entre a posição de montagem do sensor P1 e o nível de água no vaso de expansão em mmH₂O, para os testes de primeiro nível de potência aplicada (NP1) são mostrados na TAB. ApF.2.

TABELA ApF.2 – Pressões Finais Medidas e Calculadas para P1 – NP1

Testes	Pressão Final Medida P1 (mmH ₂ O)	Pressão Calculada $\Delta P1$ (mmH ₂ O)
25% Ar	4164	4133
50% Ar	4170	4140
75% Ar	4157	4121
100% Ar	4131	4085

A TAB. ApF.3 mostra os testes realizados, relacionando as pressões medidas pelo sensor P1, com o fluido em repouso, antes da aplicação de potência, em mmH₂O e as pressões calculadas ($\Delta P1$) pela diferença entre a posição de montagem do sensor P1 e o nível de água no vaso de expansão em mmH₂O, para os testes de segundo nível de potência aplicada (NP2).

TABELA ApF.3 – Pressões Iniciais Medidas e Calculadas para P1 – NP2

Testes	Pressão Inicial Medida P1 (mmH ₂ O)	Pressão Calculada $\Delta P1$ (mmH ₂ O)
25% Ar	4179	4133
50% Ar	4191	4144
75% Ar	4197	4153
100% Ar	4214	4167

Os testes realizados relacionando as pressões medidas pelo sensor P1, com o circuito resfriado e em repouso, após 48h da aplicação do transitório de potência, em mmH₂O e as pressões calculadas ($\Delta P1$) pela diferença entre a posição de montagem do sensor P1 e o nível de água no vaso de expansão em mmH₂O, para os testes de primeiro nível de potência aplicada (NP1) são mostrados na TAB. ApF.4.

TABELA ApF.4 – Pressões Finais Medidas e Calculadas para P1 – NP2

Testes	Pressão Final Medida P1 (mmH ₂ O)	Pressão Calculada $\Delta P1$ (mmH ₂ O)
25% Ar	4180	4133
50% Ar	4192	4144
75% Ar	4177	4132
100% Ar	4150	4101

A FIG. ApF.1 mostra a comparação das pressões medidas do sensor P1 em mmH₂O com as pressões calculadas P1, antes e depois dos experimentos realizados, com o fluido em repouso, para NP1 e NP2.

FIGURA ApF.1 – Comparação das Pressões Medidas e Calculadas P1

A curva de ajuste da pressão medida P1 em função da pressão calculada P1 é dada por:

$$P_{\text{medida P1}} = 0,93 P_{\text{calculada P1}} + 330,75 \quad (\text{ApF.1})$$

O coeficiente da EQ. ApF.1 (0,93) é bem próximo da unidade, indicando uma boa concordância entre os valores medidos e calculados para P1, da ordem de 1%, no intervalo de 4085 a 4167 mmH₂O. Os valores da pressão medida pelo sensor P1 são sempre maiores que os valores calculados de P1.

A TAB. ApF.5 indica os testes realizados, relacionando as pressões medidas pelo sensor P2, com o fluido em repouso, antes da aplicação de potência, em mmH₂O e as pressões calculadas (ΔP_2) pela diferença entre a posição de montagem do sensor P2 e o nível de água no vaso de expansão em mmH₂O, para os testes de primeiro nível de potência aplicada (NP1).

TABELA ApF.5 – Pressões Iniciais Medidas e Calculadas para P2 – NP1

Testes	Pressão Inicial Medida P2 (mmH ₂ O)	Pressão Calculada ΔP_2 (mmH ₂ O)
25% Ar	376	384
50% Ar	379	391
75% Ar	398	409
100% Ar	394	399

Os testes realizados relacionando as pressões medidas pelo sensor P2, com o circuito resfriado e em repouso, após 48h da aplicação do transitório de potência, em mmH₂O e as pressões calculadas (ΔP_2) pela diferença entre a posição de montagem do sensor P2 e o nível de água no vaso de expansão em mmH₂O, para os testes de primeiro nível de potência aplicada (NP1) são mostrados na TAB. ApF.6.

TABELA ApF.6 – Pressões Finais Medidas e Calculadas para P2 – NP1

Testes	Pressão Final Medida P2 (mmH ₂ O)	Pressão Calculada ΔP_2 (mmH ₂ O)
25% Ar	377	384
50% Ar	380	391
75% Ar	368	372
100% Ar	333	336

A TAB. ApF.7 mostra os testes realizados, relacionando as pressões medidas pelo sensor P2, com o fluido em repouso, antes da aplicação de potência, em mmH₂O e as pressões calculadas (ΔP_2) pela diferença entre a posição de montagem do sensor P2 e o nível de água no vaso de expansão em mmH₂O, para os testes de segundo nível de potência aplicada (NP2).

TABELA ApF.7 – Pressões Iniciais Medidas e Calculadas para P2 – NP2

Testes	Pressão Inicial Medida P2 (mmH ₂ O)	Pressão Calculada ΔP_2 (mmH ₂ O)
25% Ar	376	384
50% Ar	390	395
75% Ar	393	404
100% Ar	406	418

Os testes realizados relacionando as pressões medidas pelo sensor P2, com o circuito resfriado e em repouso, após 48h da aplicação do transitório de potência, em mmH₂O e as pressões calculadas (ΔP_2) pela diferença entre a posição de montagem do sensor P1 e o nível de água no vaso de expansão em mmH₂O, para os testes de primeiro nível de potência aplicada (NP2) são mostrados na TAB. ApF.8.

TABELA ApF.8 – Pressões Finais Medidas e Calculadas para P2 – NP2

Testes	Pressão Final Medida P2 (mmH ₂ O)	Pressão Calculada ΔP_2 (mmH ₂ O)
25% Ar	377	384
50% Ar	390	395
75% Ar	373	383
100% Ar	341	352

A FIG. ApF.2 mostra a comparação das pressões medidas do sensor P2 em mmH₂O com as pressões calculadas P2, antes e depois dos experimentos realizados, com o fluido em repouso, para NP1 e NP2.

FIGURA ApF.2 – Comparação das Pressões Medidas e Calculadas P2

A curva de ajuste da pressão medida P2 em função da pressão calculada P2 é dada por:

$$P_{\text{medida P2}} = 0,94 P_{\text{calculada P2}} + 16,71 \quad (\text{ApF.2})$$

Os valores da pressão medida pelo sensor P2 são sempre menores que os valores calculados de P2, da ordem de 2%, entretanto o coeficiente da EQ. ApF.2 (0,94) é bem próximo da unidade, indicando que os valores medidos e calculados para P2 apresentam boa concordância, no intervalo de 336 a 418 mmH₂O.

APÊNDICE G – DADOS DE ENTRADA – “INPUT” – RELAP5

Os dados de entrada (*Input*) para a simulação do teste 100% Ar para NP2 na BCN com o código computacional termo-hidráulico e de análise de acidentes Relap5/mod3.3 é apresentado a seguir.

O *Input* 100% Ar NP2 é composto pelos dados hidrodinâmicos dos componentes, estruturas de troca de calor, propriedades térmicas dos materiais e tabela de potência aplicada. Não foram apresentadas as variáveis de controle utilizadas, que permitem representar numericamente as variáveis e funções não calculadas diretamente pelo código.

```
=r5m33 bcn
*****
* tese de doutorado - luiz alberto macedo *
* *
* bancada de circulacao natural - bcn - escoamento bifasico + ar *
* *
* potencia p= 2445 w *
* *
* 100 % de ar no tubulao superior tc *
* *
* vazao secundario corrigida ms= 3.443e-02 (123.95 l/h) transiente= 35959.0 s *
* *
* t amb inicial = 17.21 c (290.36 k) *
* *
* fator analise de sensibilidade = 1. *
* *
* volumes 12011 sem isolamento termico - perna quente *
* *
* controle geral *
*****
100 new transnt
101 run
102 si si
110 air
115 1.0
120 100010000 0.17 h2o primario
* *
* controle do tempo *
*
*201 950.0 1.0e-8 0.07 00003 100 1000 10000
```

*202 1100.0 1.0e-8 0.01 00003 100 1000 10000

203 80000.0 1.0e-8 0.07 00003 100 1000 10000

*

* variaveis adicionais

*

20800001 htmode 100000101	* 100010000 - resistência
20800002 htmode 100000301	* 100030000 - resistência
20800003 htmode 100000501	* 100050000 - resistência
20800004 htmode 600200100	* 100060000 - tubo inox (saída aquecedor)
20800005 htmode 600300100	* 120010000 - perna quente
20800006 htmode 600300600	* 120060000 - perna quente
20800007 htmode 600301000	* 120100000 - perna quente
20800008 htmode 602000100	* 120110000 - perna quente
20800009 htmode 140000100	* 140010000 - tubulão superior TC - primário
20800010 htmode 142000100	* 140020000 - tubos 3/8" TC - primario
20800011 htmode 142000200	* 140030000 - tubos 3/8" TC - primario
20800012 htmode 142000300	* 140040000 - tubos 3/8" TC - primario
20800013 htmode 142000400	* 140050000 - tubos 3/8" TC - primario
20800014 htmode 142000500	* 140060000 - tubos 3/8" TC - primario
20800015 htmode 144000100	* 140070000 - tubulão inferior TC - primário
20800017 htmode 210100100	* 210010000 - linha de surto
20800018 htmode 210100200	* 210020000 - linha de surto
20800041 htmode 600301100	* 160010000 - saída trocador de calor
20800042 htmode 600301900	* 180050000 - perna fria
20800043 htmode 600302400	* 190050000 - perna fria
20800044 htmode 600303400	* 200050000 - perna fria
20800045 htmode 600303700	* 200080000 - perna fria
20800046 htmode 600303800	* 200090000 - perna fria
20800050 viscf 140010000	* 140010000 - tubulão superior TC - primário -
viscosidade fluido	
20800051 viscf 140020000	* 140020000 - tubos 3/8" verticais - primário -
viscosidade fluido	
20800052 viscf 140030000	* 140030000 - tubos 3/8" verticais - primário -
viscosidade fluido	
20800053 viscf 140040000	* 140040000 - tubos 3/8" verticais - primário -
viscosidade fluido	
20800054 viscf 140050000	* 140050000 - tubos 3/8" verticais - primário -
viscosidade fluido	
20800055 viscf 140060000	* 140060000 - tubos 3/8" verticais - primário -
viscosidade fluido	
20800056 viscf 140070000	* 140070000 - tubulão inferior TC - primário -
viscosidade fluido	
20800060 hif 100010000	* 100010000 - resistência
20800061 hif 100030000	* 100030000 - resistência
20800062 hif 100050000	* 100050000 - resistência
20800063 hif 100060000	* 100060000 - tubo inox (saída aquecedor)
20800064 hif 120010000	* 120010000 - perna quente
20800065 hif 120060000	* 120060000 - perna quente
20800066 hif 120100000	* 120100000 - perna quente
20800067 hif 120110000	* 120110000 - perna quente

20800068	hif	140010000	* 140010000 - tubulão superior TC - primário
20800069	hif	140020000	* 140020000 - tubos 3/8" TC - primario
20800070	hif	140030000	* 140030000 - tubos 3/8" TC - primario
20800071	hif	140040000	* 140040000 - tubos 3/8" TC - primario
20800072	hif	140050000	* 140050000 - tubos 3/8" TC - primario
20800073	hif	140060000	* 140060000 - tubos 3/8" TC - primario
20800074	hif	140070000	* 140070000 - tubulão inferior TC - primário
20800080	hig	100010000	* 100010000 - resistência
20800081	hig	100030000	* 100030000 - resistência
20800082	hig	100050000	* 100050000 - resistência
20800083	hig	100060000	* 100060000 - tubo inox (saída aquecedor)
20800084	hig	120010000	* 120010000 - perna quente
20800085	hig	120060000	* 120060000 - perna quente
20800086	hig	120100000	* 120100000 - perna quente
20800087	hig	120110000	* 120110000 - perna quente
20800088	hig	140010000	* 140010000 - tubulão superior TC - primário
20800089	hig	140020000	* 140020000 - tubos 3/8" TC - primario
20800090	hig	140030000	* 140030000 - tubos 3/8" TC - primario
20800091	hig	140040000	* 140040000 - tubos 3/8" TC - primario
20800092	hig	140050000	* 140050000 - tubos 3/8" TC - primario
20800093	hig	140060000	* 140060000 - tubos 3/8" TC - primario
20800094	hig	140070000	* 140070000 - tubulão inferior TC - primário
* Numero de Peclet - volume			
20800100	pecltv	100010000	* 100010000 - resistência
20800101	pecltv	100030000	* 100030000 - resistência
20800102	pecltv	100050000	* 100050000 - resistência
20800103	pecltv	100060000	* 100060000 - tubo inox (saída aquecedor)
20800104	pecltv	120010000	* 120010000 - perna quente
20800105	pecltv	120060000	* 120060000 - perna quente
20800106	pecltv	120100000	* 120100000 - perna quente
20800107	pecltv	120110000	* 120110000 - perna quente
20800108	pecltv	140010000	* 140010000 - tubulão superior TC - primário
20800109	pecltv	140020000	* 140020000 - tubos 3/8" TC - primario
20800110	pecltv	140030000	* 140030000 - tubos 3/8" TC - primario
20800111	pecltv	140040000	* 140040000 - tubos 3/8" TC - primario
20800112	pecltv	140050000	* 140050000 - tubos 3/8" TC - primario
20800113	pecltv	140060000	* 140060000 - tubos 3/8" TC - primario
20800114	pecltv	140070000	* 140070000 - tubulão inferior TC - primário
* Numero de Peclet - estrutura de calor			
20800120	pecl	100000101	* 100010000 - resistência
20800121	pecl	100000301	* 100030000 - resistência
20800122	pecl	100000501	* 100050000 - resistência
20800123	pecl	600200100	* 100060000 - tubo inox (saída aquecedor)
20800124	pecl	600300100	* 120010000 - perna quente
20800125	pecl	600300600	* 120060000 - perna quente
20800126	pecl	600301000	* 120100000 - perna quente
20800127	pecl	602000100	* 120110000 - perna quente
20800128	pecl	140000100	* 140010000 - tubulão superior TC - primário
20800129	pecl	142000100	* 140020000 - tubos 3/8" TC - primario
20800130	pecl	142000200	* 140030000 - tubos 3/8" TC - primario

20800131 pecl 142000300 * 140040000 - tubos 3/8" TC - primario
 20800132 pecl 142000400 * 140050000 - tubos 3/8" TC - primario
 20800133 pecl 142000500 * 140060000 - tubos 3/8" TC - primario
 20800134 pecl 144000100 * 140070000 - tubulão inferior TC - primário
 * Numero de Stanton
 20800140 stant 100000101 * 100010000 - resistência
 20800141 stant 100000301 * 100030000 - resistência
 20800142 stant 100000501 * 100050000 - resistência
 20800143 stant 600200100 * 100060000 - tubo inox (saída aquecedor)
 20800144 stant 600300100 * 120010000 - perna quente
 20800145 stant 600300600 * 120060000 - perna quente
 20800146 stant 600301000 * 120100000 - perna quente
 20800147 stant 602000100 * 120110000 - perna quente
 20800148 stant 140000100 * 140010000 - tubulão superior TC - primário
 20800149 stant 142000100 * 140020000 - tubos 3/8" TC - primario
 20800150 stant 142000200 * 140030000 - tubos 3/8" TC - primario
 20800151 stant 142000300 * 140040000 - tubos 3/8" TC - primario
 20800152 stant 142000400 * 140050000 - tubos 3/8" TC - primario
 20800153 stant 142000500 * 140060000 - tubos 3/8" TC - primario
 20800154 stant 144000100 * 140070000 - tubulão inferior TC - primário
 *

* edicoes menores

*

301 tempf 120010000
 302 tempf 120110000
 303 tempf 160010000
 304 tempf 200080000
 305 tempf 250070000
 306 mflowj 180040000
 *

* controle dos trips

*

501 time 0 ge null 0 35959.00 | * fim do transiente (35959.0 s)
 600 501
 *

* * * * *
 * DADOS HIDRODINÂMICOS DOS COMPONENTES *
 * * * * *
 * CIRCUITO PRIMÁRIO *
 * * * * *
 *

* componente 100 - aquecedor

*

1000000 aque pipe
 1000001 6
 1000101 1.852e-3 5 * tubo inox 2 1/2" sch.40 - de=73.03 mm p=5.16 mm
 1000102 3.089e-3 6 * tubo inox 2 1/2" sch.40 - de=73.03 mm p=5.16 mm
 1000301 0.34 5
 1000302 0.15 6
 1000601 90.0 6

```

1000801 3.75e-5 1.406e-02 5
1000802 3.75e-5 6.271e-02 6
1000901 0.0 0.0 5
1001001 0000000 6
1001101 00000000 5
1001201 003 1.45394e+05 290.93 0. 0. 0. 1
1001202 003 1.42064e+05 290.95 0. 0. 0. 2
1001203 003 1.38735e+05 291.01 0. 0. 0. 3
1001204 003 1.35405e+05 291.06 0. 0. 0. 4
1001205 003 1.32076e+05 291.12 0. 0. 0. 5
1001206 003 1.29676e+05 291.17 0. 0. 0. 6
1001300 1
1001301 0.0 0.0 0. 5
*
* componente 110
*
1100000 jun-1 sngljun
1100101 100060002 120010001 0.0 1.69 1.69 00000000 * pressure drop 1
1100201 1 0.0 0.0 0.0
*
* componente 120 - perna quente
*
1200000 pq pipe
1200001 11
1200101 3.398e-4 11
1200301 0.192 1
1200302 0.356 2
1200303 0.34 3
1200304 0.339 4
1200305 0.356 5
1200306 0.35 9
1200307 0.462 10
1200308 0.162 11
1200601 90.0 8
1200602 90.0 10
1200603 0.0 11
1200801 3.75e-5 2.08e-2 11
1200901 0.62 0.62 2 * pressure drop 2 - tee
1200902 0.62 0.62 5 * pressure drop 2 - tee
1200903 0.0 0.0 10 * pressure drop 3 - curva
1201001 0000000 11
1201101 00000000 9
1201102 00000100 10
1201201 003 1.28001e+05 291.23 0. 0. 0. 1
1201202 003 1.25318e+05 291.28 0. 0. 0. 2
1201203 003 1.21910e+05 291.34 0. 0. 0. 3
1201204 003 1.18585e+05 291.38 0. 0. 0. 4
1201205 003 1.15182e+05 291.41 0. 0. 0. 5
1201206 003 1.11725e+05 291.44 0. 0. 0. 6
1201207 003 1.08298e+05 291.50 0. 0. 0. 7

```

1201208 003 1.04870e+05 291.55 0. 0. 0. 8
 1201209 003 1.01443e+05 291.60 0. 0. 0. 9
 1201210 004 9.76675e+04 291.66 5.025e-5 0. 0. 10 * 19.05 mm de ar
 1201211 004 9.52053e+04 291.72 1.0 0. 0. 11 * 20.8 mm de ar
 1201300 1
 1201301 0.0 0.0 0.0 10

*

* componente 130

*

1300000 jun-2 sngljun

1300101 120110002 140010001 0.0 0.0 0.0 00000100 * pressure drop 4

1300201 1 0.0 0.0 0.0

*

* componente 140 - trocador de calor - primario

*

1400000 ptroc pipe

1400001 7

1400101 1.14e-3 1

1400102 8.924e-4 6

1400103 1.14e-3 7

1400301 0.991 1 * 991 mm

1400302 0.1314 6

1400303 0.991 7 * 991 mm

1400601 0.0 1

1400602 -90.0 6

1400603 0.0 7

1400801 3.75e-5 3.81e-2 1

1400802 3.75e-5 7.945e-3 6

1400803 3.75e-5 3.81e-2 7

1400901 0.0 0.0 1 * pressure drop 5

1400902 100.0 100.0 6 * pressure drop 6

1401001 0000000 7

1401101 00000100 1

1401102 00000000 5

1401103 00000100 6

1401201 004 9.52053e+04 291.72 1.0 0. 0. 1 * 38.1 mm de ar

1401202 004 9.58487e+04 291.68 1.944e-4 0. 0. 2 * 19.05 mm de ar

1401203 003 9.71355e+04 291.68 0. 0. 0. 3

1401204 003 9.84223e+04 291.68 0. 0. 0. 4

1401205 003 9.97091e+04 291.68 0. 0. 0. 5

1401206 003 1.00995e+05 291.68 0. 0. 0. 6

1401207 003 1.01639e+05 291.49 0. 0. 0. 7

1401300 1

1401301 0.0 0.0 0.0 6

*

* componente 150

*

1500000 jun-5 sngljun

1500101 140070002 160010001 0.0 1.41 1.41 00000000 * pressure drop 7

1500201 1 0.0 0.0 0.0

*

* componente 160 - perna fria 1

*

```

1600000 pernfri1 pipe
1600001 2
1600101 3.398e-4 2
1600301 0.14 2
1600601 0.0 2
1600801 3.75e-5 0.0208 2
1600901 0.0 0.0 1
1601001 0000000 2
1601101 00000000 1
1601201 003 1.01639e+05 291.49 0. 0. 0. 1
1601202 003 1.01639e+05 291.49 0. 0. 0. 2
1601300 1
1601301 0.0 0.0 0. 1

```

*

* componente 170 - conexao para a linha de surto - entrada

*

```

1700000 clsentr branch
1700001 3 1
1700101 3.398e-4 0.15 0.0 0.0 0.0 0.0 3.75e-5 0.0208 0000000
1700200 003 1.01639e+05 291.49
1701101 160020002 170010001 0.0 0.0 0.0 0000000
1702101 170010002 175010001 0.0 0.57 0.57 0000000 * pressure drop 10
1703101 170010002 210010001 0.0 4.16 4.16 0000000 * pressure drop 10
1701201 0. 0. 0.
1702201 0. 0. 0.
1703201 0. 0. 0.

```

*

* componente 175 - conexão linha de surto - saída

*

```

1750000 clsaida branch
1750001 2 1
1750101 3.398e-4 0.15 0.0 0.0 0.0 0.0 3.75e-5 0.0208 0000000
1750200 003 1.01639e+05 291.49
1751101 175010002 180010001 0.0 0.0 0.0 0000000
1752101 210010001 175010001 0.0 4.16 4.16 0000000 * pressure drop 10
1751201 0. 0. 0.
1752201 0. 0. 0.

```

*

* componente 180 - perna fria 3

*

```

1800000 pernfri3 pipe
1800001 5
1800101 3.398e-4 5
1800301 0.45 1
1800302 0.5 3
1800303 0.42 4
1800304 0.49 5

```

```

1800601 0.0      5
1800801 3.75e-5 0.0208 5
1800901 2.33 2.33      3 * pressure drop 9 contração (20,8 mm x 10 mm)
expansão(10 mm x 20,8 mm)
1800902 0.0 0.0      4
1801001 0000000      5
1801101 00000000      4
1801201 003 1.01639e+05 291.49 0. 0. 0. 1
1801202 003 1.01639e+05 291.49 0. 0. 0. 2
1801203 003 1.01639e+05 291.49 0. 0. 0. 3
1801204 003 1.01639e+05 291.49 0. 0. 0. 4
1801205 003 1.01639e+05 291.49 0. 0. 0. 5
1801300 1
1801301 0.0 0.0 0. 4
*
* componente 185
*
1850000 jun-7  sngljun
1850101 180050002 190010001 0.0 2.76 2.76 00000000 * pressure drop 3 -
curva
1850201 1 0.0 0.0 0.
*
* componente 190 - perna fria 4
*
1900000 pernfri4 pipe
1900001 10
1900101 3.398e-4 10
1900301 0.55      3
1900302 0.516      4
1900303 0.472      5
1900304 0.39      6
1900305 0.16      7
1900306 0.55      8
1900307 0.53      9
1900308 0.37      10
1900601 -90.0      10
1900801 3.75e-5 0.0208 10
1900901 0.62 0.62 5 * pressure drop 2 - tee
1900902 0.62 0.62 8 * pressure drop 2 - tee
1900903 0.62 0.62 9 * pressure drop 2 - tee
1901001 0000000      10
1901101 00000000      9
1901201 003 1.04332e+05 291.47 0. 0. 0. 1
1901202 003 1.09718e+05 291.41 0. 0. 0. 2
1901203 003 1.15104e+05 291.34 0. 0. 0. 3
1901204 003 1.20324e+05 291.29 0. 0. 0. 4
1901205 003 1.25161e+05 291.26 0. 0. 0. 5
1901206 003 1.29382e+05 291.20 0. 0. 0. 6
1901207 003 1.32076e+05 291.14 0. 0. 0. 7
1901208 003 1.35552e+05 291.07 0. 0. 0. 8

```

1901209 003 1.40840e+05 291.00 0. 0. 0. 9
 1901210 003 1.45247e+05 290.93 0. 0. 0. 10
 1901300 1
 1901301 0.0 0.0 0. 9

*

* componente 195

*

1950000 jun-8 sngljun

1950101 190100002 200010001 0.0 2.76 2.76 00000000 * pressure drop 3 -
 curva

1950201 1 0.0 0.0 0.

*

* componente 200 - perna fria 5

*

2000000 pernfri5 pipe

2000001 9

2000101 3.398e-4 9

2000301 0.16 1

2000302 0.28 2

2000303 0.965 5

2000304 0.963 6

2000305 0.20 8

2000306 0.17 9

2000601 0.0 7

2000602 0.0 9

2000801 3.75e-5 0.0208 9

2000901 5.52 5.52 7 * pressure drop 3 - 2 curvas

2000902 0.0 0.0 8

2001001 0000000 9

2001101 00000000 8

2001201 003 1.47059e+05 290.89 0. 0. 0. 1

2001202 003 1.47059e+05 290.89 0. 0. 0. 2

2001203 003 1.47059e+05 290.89 0. 0. 0. 3

2001204 003 1.47059e+05 290.89 0. 0. 0. 4

2001205 003 1.47059e+05 290.89 0. 0. 0. 5

2001206 003 1.47059e+05 290.89 0. 0. 0. 6

2001207 003 1.47059e+05 290.89 0. 0. 0. 7

2001208 003 1.47059e+05 290.89 0. 0. 0. 8

2001209 003 1.47059e+05 290.89 0. 0. 0. 9

2001300 1

2001301 0.0 0.0 0. 8

*

* componente 205

*

2050000 jun-9 sngljun

2050101 200090002 100010001 0.0 0.5 0.5 00000000 * pressure drop 10

2050201 1 0.0 0.0 0.

*

* componente 210

*

```

2100000 surto1 branch
2100001 2 1
2100101 3.398e-4 0.429 0.0 0.0 90.0 0.429 3.75e-5 0.0208 0000000
2100200 003 9.95387e+04 290.66
2101101 210010002 220010001 0.0 0.0 0.0 0000000
2102101 220010001 210010002 0.0 0.0 0.0 0000000
2101201 0. 0. 0.
2102201 0. 0. 0.
*
* componente 220
*
2200000 surto2 branch
2200001 2 1
2200101 3.398e-4 0.430 0.0 0.0 90.0 0.430 3.75e-5 0.0208 0000000
2200200 003 9.53326e+04 290.66
2201101 220010002 225010001 3.398e-4 0.0 0.0 0000000
2202101 225010001 220010002 0.0 0.0 0.0 0000000
2201201 0. 0. 0.
2202201 0. 0. 0.
*
* componente 225 - base vaso de expansão
*
2250000 bvaso branch
2250001 1 1
2250101 8.107e-03 0.1 0.0 0.0 90.0 0.1 0.0 1.016e-1 0000000
2250200 003 9.27375e+04 290.66
2251101 225010002 230010001 8.107e-03 0.0 0.0 0000000
2251201 0. 0. 0.
*
* componente 230 - tanque de expansao parte intermediaria
*
2300000 mvaso branch
2300001 1 1
2300101 8.107e-03 0.1 0.0 0.0 90.0 0.1 0.0 1.016e-1 0100000
2300200 003 9.17582e+04 290.66
2301101 230010002 240010001 8.107e-03 0.0 0.0 0000000
2301201 0. 0. 0.
*
* componente 240 - tanque de expansao parte superior
*
2400000 avaso branch
2400001 1 1
2400101 8.107e-03 0.58 0.0 0.0 90.0 0.58 0.0 1.016e-1 0100000
2400200 004 0.912e+05 290.36 8.231e-02 * nível = 7 mm de água - 573
mm de ar
2401101 240010000 600000000 1.131e-04 0.0 0.0 0000000 * boca do vaso de
expansão - 12 mm (1.131e-04 m2)
2401201 0. 0. 0.
*
* componente 700 - linha de desvio superior

```

*

```

7000000 pq      pipe
7000001 8
7000101 3.398e-4 8
7000301 0.825 1
7000302 0.527 2
7000303 0.528 3
7000304 0.658 8
7000601 0.0 1
7000602 -90.0 3
7000603 0.0 8
7000801 3.75e-5 2.08e-2 8
7000901 2.72 2.72 1 * 2 curvas 20.8 mm
7000902 4.2 4.2 3
7000903 1000. 1000. 7
7001001 0000000 8
7001101 00000000 7
7001201 003 1.15182e+05 291.41 0. 0. 0. 1 * 0.0 mm de ar - ligado ao
120050000
7001202 003 1.17762e+05 291.41 0. 0. 0. 2 * 0.0 mm de ar
7001203 003 1.22927e+05 291.41 0. 0. 0. 3 * 0.0 mm de ar
7001204 003 1.25513e+05 291.41 0. 0. 0. 8
7001300 1
7001301 0.0 0.0 0.0 7

```

*

* componente 701

*

```

7010000 jun-20  sngljun
7010101 120050004 700010001 0.0 4.2 4.2 00000000
7010201 1 0.0 0.0 0.

```

*

* componente 702 - tubo fixador do Validyne 1 (P1)

*

```

7020000 pq      pipe
7020001 2
7020101 3.398e-4 2
7020301 0.250 1
7020302 0.250 2
7020401 8.495000e-5 1
7020402 8.495000e-5 2
7020601 0.0 2
7020801 3.75e-5 2.08e-2 2
7020903 0. 0. 1
7021001 0000000 2
7021101 00000000 1
7021201 003 1.32076e+05 291.12 0. 0. 0. 1 * 0.0 mm de ar - ligado ao
volume 100050000
7021202 003 1.32076e+05 291.12 0. 0. 0. 2 * 0.0 mm de ar
7021300 1
7021301 0.0 0.0 0.0 1

```

*

* componente 703

*

7030000 jun-25 sngljun

7030101 100060004 702010001 0.0 0.62 0.62 00000000 * pressure drop 2 - tee

7030201 1 0.0 0.0 0.

*

* componente 710 - linha de desvio inferior

*

7100000 pq pipe

7100001 2

7100101 3.398e-4 2

7100301 0.412 1

7100302 0.413 2

7100601 0.0 2

7100801 3.75e-5 2.08e-2 2

7100901 1000.0 1000.0 1

7101001 0000000 2

7101101 00000000 1

7101201 003 1.25318e+05 291.28 0. 0. 0. 2 * 0.0 mm de ar - ligado ao
120020000

7101300 1

7101301 0.0 0.0 0.0 1

*

* componente 711

*

7110000 jun-27 sngljun

7110101 120020004 710010001 0.0 0.62 0.62 00000000 * pressure drop 2 - tee

7110201 1 0.0 0.0 0.

*

* CIRCUITO SECUNDÁRIO *

*

* componente 250 - secundario do trocador de calor

*

2500000 stroc pipe

2500001 7

2500101 1.732e-02 1

2500102 4.839e-01 6

2500103 1.684e-02 7

2500301 0.991 1

2500302 0.1314 6

2500303 0.991 7

2500601 0.0 1

2500602 90.0 6

2500603 0.0 7

2500801 0.0 0.111 1

2500802 0.0 0.663 6

2500803 0.0 0.109 7

2500901	0.0	0.0	6						
2501001	0000000		7						
2501101	00000000		6						
2501201	003	9.94577e+04	291.49	0.	0.	0.	0.	1	
2501202	003	9.80970e+04	291.73	0.	0.	0.	0.	2	
2501203	003	9.68956e+04	291.73	0.	0.	0.	0.	3	
2501204	003	9.56942e+04	291.73	0.	0.	0.	0.	4	
2501205	003	9.44927e+04	291.73	0.	0.	0.	0.	5	
2501206	003	9.32913e+04	291.73	0.	0.	0.	0.	6	
2501207	003	9.19453e+04	291.68	0.	0.	0.	0.	7	
2501300	1								
2501301	0.0	0.0	0.0	6					

*

* componente 900 - agua de resfriamento (entrada)

*

9000000	agureen	tmdpvol	* 20.0 m	coluna de agua					
9000101	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0000000
9000200	3								
9000201	0.0		2.053e+05	291.334					
9000202	105.0		2.053e+05	291.232					
9000203	1001.0		2.053e+05	290.09					
9000204	2002.0		2.053e+05	289.617					
9000205	3003.0		2.053e+05	289.536					
9000206	5005.0		2.053e+05	289.826					
9000207	7000.0		2.053e+05	290.311					
9000208	7007.0		2.053e+05	290.337					
9000209	9002.0		2.053e+05	290.799					
9000210	10003.0		2.053e+05	291.023					
9000211	12005.0		2.053e+05	291.474					
9000212	14000.0		2.053e+05	292.099					
9000213	16002.0		2.053e+05	292.737					
9000214	16996.0		2.053e+05	293.18					
9000215	18004.0		2.053e+05	293.567					
9000216	18501.0		2.053e+05	293.817					
9000217	19005.0		2.053e+05	293.736					
9000218	19502.0		2.053e+05	293.689					
9000219	20006.0		2.053e+05	293.835					
9000220	20503.0		2.053e+05	293.981					
9000221	21000.0		2.053e+05	294.254					
9000222	21497.0		2.053e+05	294.547					
9000223	22001.0		2.053e+05	294.557					
9000224	23002.0		2.053e+05	294.726					
9000225	24003.0		2.053e+05	295.045					
9000226	24500.0		2.053e+05	295.087					
9000227	24997.0		2.053e+05	294.771					
9000228	25501.0		2.053e+05	294.521					
9000229	26005.0		2.053e+05	294.472					
9000230	26999.0		2.053e+05	294.419					
9000231	28000.0		2.053e+05	294.637					
9000232	29001.0		2.053e+05	294.726					

9000233	29498.0	2.053e+05	294.724
9000234	30002.0	2.053e+05	295.017
9000235	31003.0	2.053e+05	296.546
9000236	31500.0	2.053e+05	296.301
9000237	32004.0	2.053e+05	295.91
9000238	32501.0	2.053e+05	295.191
9000239	33005.0	2.053e+05	294.616
9000240	34006.0	2.053e+05	293.92
9000241	35000.0	2.053e+05	293.777
9000242	35959.0	2.053e+05	293.827

*

* componente 270 - agua de resfriamento

*

2700000 jun-12 tmdpjun

2700101 900000000 250010001 3.398e-04

2700200 1 0

2700201 80000.0 3.443e-02 0.0 0.0 * 123.95 l/h - rotâmetro corrigido

*

* componente 280

*

2800000 jun-13 sngljun

2800101 250070002 290000000 3.398e-04 0.0 0.0 00000000

2800201 1 0. 0. 0.

*

* componente 290 - agua de resfriamento (saida)

*

2900000 aguresa tmdpvul

2900101 1.0 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0000000

2900200 003

2900201 80000.0 9.12e+04 293.15

*

* componente 600 - ambiente loop 70

*

6000000 contain tmdpvul

6000101 72.0 12.0 864.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0000000

6000200 004

6000201 0.0 9.12e+04 290.422 1.0

6000202 105.0 9.12e+04 290.312 1.0

6000203 504.0 9.12e+04 290.489 1.0

6000204 1001.0 9.12e+04 290.329 1.0

6000205 2002.0 9.12e+04 290.417 1.0

6000206 5005.0 9.12e+04 290.819 1.0

6000207 7000.0 9.12e+04 291.16 1.0

6000208 9002.0 9.12e+04 291.457 1.0

6000209 10003.0 9.12e+04 291.6 1.0

6000210 11004.0 9.12e+04 291.677 1.0

6000211 12999.0 9.12e+04 292.202 1.0

6000212 15001.0 9.12e+04 292.713 1.0

6000213 17003.0 9.12e+04 293.529 1.0

6000214 20006.0 9.12e+04 294.463 1.0


```

6000215 24003.0 9.12e+04 295.576 1.0
6000216 25004.0 9.12e+04 295.94 1.0
6000217 25998.0 9.12e+04 296.097 1.0
6000218 27006.0 9.12e+04 296.145 1.0
6000219 30002.0 9.12e+04 296.442 1.0
6000220 31003.0 9.12e+04 296.596 1.0
6000221 32004.0 9.12e+04 296.646 1.0
6000222 33005.0 9.12e+04 296.591 1.0
6000223 34006.0 9.12e+04 296.477 1.0
6000224 35000.0 9.12e+04 296.171 1.0
6000225 35959.0 9.12e+04 295.738 1.0

```

*

* ESTRUTURAS DE TROCA DE CALOR *

*

* estrutura de troca de calor 100 - aquecedor

*

```

11000000 5 6 2 0 0.0
11000100 0 1
11000101 5 0.0075
11000201 6 4 * material 6 (oxido de magnesio) - 4 intervalos
11000202 1 5 * material 1 (aço inox 316) - 1 intervalos
11000301 1.0 1
11000302 0.0 5
11000400 0
11000401 291.15 6
11000501 0 0 0 1 0 5
11000601 100010000 0 101 1 1.36 1
11000602 100020000 0 101 1 1.36 2
11000603 100030000 0 101 1 1.36 3
11000604 100040000 0 101 1 1.36 4
11000605 100050000 0 101 1 1.36 5
11000701 10 0.2 0 0 1
11000702 10 0.2 0 0 2
11000703 10 0.2 0 0 3
11000704 10 0.2 0 0 4
11000705 10 0.2 0 0 5
11000800 1
11000801 0.0 100. 100. 0. 0. 0. 0. 1.0 0. 1.1 1. 5
11000900 1
11000901 3.93e-02 100. 100. 0. 0. 0. 0. 1.0 1.36 1.1 1. 1
11000902 3.93e-02 100. 100. 0. 0. 0. 0. 1.0 1.36 1.1 1. 5

```

*

* estrutura de troca de calor 140 - tubulão superior - trocador de calor - primario

*

```

11400000 1 3 2 0 0.01905
11400100 0 1
11400101 2 0.022225
11400201 2 2

```

```

11400301 0.0 2
11400400 0
11400401 291.15 3
11400501 140010000 0 101 1 0.991 1
11400601 250070000 0 101 1 0.991 1
11400701 0 0 0 0 1
11400800 1
11400801 3.81e-02 100. 100. 0. 0. 0. 0. 1.0 0. 1.1 1. 1
11400900 1
11400901 4.811e-01 100. 100. 0. 0. 0. 0. 1.0 0. 1.1 1. 1

```

*

* estrutura de troca de calor 140 - tubos 3/8 trocador de calor - primario

*

```

11420000 5 3 2 0 3.9725e-03
11420100 0 1
11420101 2 4.7625e-03
11420201 2 2
11420301 0.0 2
11420400 0
11420401 291.15 3
11420501 140020000 10000 101 1 2.3652 5
11420601 250060000 -10000 101 1 2.3652 5
11420701 0 0 0 0 5
11420800 1
11420801 7.945e-03 100. 100. 0. 0. 0. 0. 1.0 0.0 1.1 1. 5
11420900 1
11420901 4.311 100. 100. 0. 0. 0. 0. 1.0 0.0 1.1 1. 5

```

*

* estrutura de troca de calor 140 - tubulao inferior trocador de calor - primario

*

```

11440000 1 3 2 0 0.01905
11440100 0 1
11440101 2 0.022225
11440201 2 2
11440301 0.0 2
11440400 0
11440401 291.15 3
11440501 140070000 0 101 1 0.991 1
11440601 250010000 0 101 1 0.991 1
11440701 0 0 0 0 1
11440800 1
11440801 3.81e-02 100. 100. 0. 0. 0. 0. 1.0 0. 1.1 1. 1
11440900 1
11440901 0.495 100. 100. 0. 0. 0. 0. 1.0 0. 1.1 1. 1

```

*

* estrutura de troca de calor 600/5 - parede inferior do trocador de calor 250 - secundario

*

```

16005000 1 5 2 0 0.0775
16005100 0 1

```

```

16005101 2 0.080675 2 0.105675
16005201 2 2 3 4
16005301 0.0 4
16005400 0
16005401 291.15 5
16005501 250010000 0 101 1 0.991 1
16005601 600010000 0 4300 1 0.991 1
16005701 0 0 0 0 1
16005800 1
16005801 0.142 100. 100. 0. 0. 0. 0. 1.0 0. 1.1 1. 1
16005900 1
16005901 0.0 100. 100. 0. 0. 0. 0. 1.0 0. 1.1 1. 1

```

*

* estrutura de troca de calor 600/10 - parede do trocador de calor 250 - secundario

*

```

16010000 5 5 2 0 0.393
16010100 0 1
16010101 2 0.396175 2 0.421175
16010201 2 2 3 4
16010301 0.0 4
16010400 0
16010401 291.15 5
16010501 250020000 10000 101 1 0.1314 5
16010601 600010000 0 4300 1 0.1314 5
16010701 0 0 0 0 5
16010800 1
16010801 0.784 100. 100. 0. 0. 0. 0. 1.0 0. 1.1 1. 5
16010900 1
16010901 0.0 100. 100. 0. 0. 0. 0. 1.0 0. 1.1 1.0 5

```

*

* estrutura de troca de calor 600/14 - parede superior do trocador de calor 250 - secundario

*

```

16014000 1 5 2 0 0.0765
16014100 0 1
16014101 2 0.079675 2 0.104675
16014201 2 2 3 4
16014301 0.0 4
16014400 0
16014401 291.15 5
16014501 250070000 0 101 1 0.991 1
16014601 600010000 0 4300 1 0.991 1
16014701 0 0 0 0 1
16014800 1
16014801 0.140 100. 100. 0. 0. 0. 0. 1.0 0. 1.1 1. 1
16014900 1
16014901 0.0 100. 100. 0. 0. 0. 0. 1.0 0. 1.1 1.0 1

```

*

* estrutura de troca de calor 210 - parede da linha de surto

*

12101000 2 5 2 0 0.0104
 12101100 0 1
 12101101 2 0.011 2 0.036
 12101201 2 2 3 4
 12101301 0.0 4
 12101400 0
 12101401 291.15 5
 12101501 210010000 0 101 1 0.430 1
 12101502 220010000 0 101 1 0.429 2
 12101601 600010000 0 4300 1 0.430 1
 12101602 600010000 0 4300 1 0.429 2
 12101701 0 0 0 0 2
 12101800 1
 12101801 0.0208 100. 100. 0. 0. 0. 0. 1.0 0. 1.1 1.0 2
 12101900 1
 12101901 0. 100. 100. 0. 0. 0. 0. 1.0 0. 1.1 1.0 2

*

* estrutura de troca de calor 600/1 - parede do aquecedor - resistências

*

16001000 5 5 2 0 0.034405
 16001100 0 1
 16001101 2 0.0365150 2 0.089
 16001201 4 2 3 4
 16001301 0.0 4
 16001400 0
 16001401 291.15 5
 16001501 100010000 10000 101 1 0.34 5
 16001601 600010000 0 4300 1 0.34 5
 16001701 0 0 0 0 5
 16001800 1
 16001801 3.76e-02 100. 100. 0. 0. 0. 0. 1.0 0. 1.1 1.0 5
 16001900 1
 16001901 0. 100. 100. 0. 0. 0. 0. 1.0 0. 1.1 1.0 5

*

* estrutura 600/2 - parede do aquecedor - saída tubo inox 2 1/2" sch.40

*

16002000 1 5 2 0 0.034405
 16002100 0 1
 16002101 2 0.0365150 2 0.089
 16002201 4 2 3 4
 16002301 0.0 4
 16002400 0
 16002401 291.15 5
 16002501 100060000 0 101 1 0.15 1
 16002601 600010000 0 4300 1 0.15 1
 16002701 0 0 0 0 1
 16002800 1
 16002801 6.271e-02 100. 100. 0. 0. 0. 0. 1.0 0. 1.1 1.0 1
 16002900 1

16002901 0. 100. 100. 0. 0. 0. 0. 1.0 0. 1.1 1.0 1

*

* estrutura de troca de calor 600/3 - parede da tubulacao com isolamento termico

*

16003000 38 5 2 0 0.01040

16003100 0 1

16003101 2 0.011 2 0.036

16003201 2 2 3 4

16003301 0.0 4

16003400 0

16003401 291.15 5

16003501 120010000 0 101 1 0.192 1

16003502 120020000 0 101 1 0.356 2

16003503 120030000 0 101 1 0.340 3

16003504 120040000 0 101 1 0.339 4

16003505 120050000 0 101 1 0.356 5

16003506 120060000 0 101 1 0.350 6

16003507 120070000 0 101 1 0.350 7

16003508 120080000 0 101 1 0.350 8

16003509 120090000 0 101 1 0.350 9

16003510 120100000 0 101 1 0.462 10

16003511 160010000 0 101 1 0.14 11

16003512 160020000 0 101 1 0.14 12

16003513 170010000 0 101 1 0.15 13

16003514 175010000 0 101 1 0.15 14

16003515 180010000 0 101 1 0.45 15

16003516 180020000 0 101 1 0.5 16

16003517 180030000 0 101 1 0.5 17

16003518 180040000 0 101 1 0.42 18

16003519 180050000 0 101 1 0.49 19

16003520 190010000 0 101 1 0.55 20

16003521 190020000 0 101 1 0.55 21

16003522 190030000 0 101 1 0.55 22

16003523 190040000 0 101 1 0.516 23

16003524 190050000 0 101 1 0.472 24

16003525 190060000 0 101 1 0.39 25

16003526 190070000 0 101 1 0.16 26

16003527 190080000 0 101 1 0.55 27

16003528 190090000 0 101 1 0.53 28

16003529 190100000 0 101 1 0.37 29

* original = 0.37 m

16003530 200010000 0 101 1 0.16 30

16003531 200020000 0 101 1 0.28 31

16003532 200030000 0 101 1 0.965 32

16003533 200040000 0 101 1 0.965 33

16003534 200050000 0 101 1 0.965 34

16003535 200060000 0 101 1 0.963 35

16003536 200070000 0 101 1 0.28 36

16003537 200080000 0 101 1 0.20 37

16003538 200090000 0 101 1 0.17 38

16003601 600010000 0 4300 1 0.192 1

16003602	600010000	0	4300	1	0.356	2
16003603	600010000	0	4300	1	0.340	3
16003604	600010000	0	4300	1	0.339	4
16003605	600010000	0	4300	1	0.356	5
16003606	600010000	0	4300	1	0.350	6
16003607	600010000	0	4300	1	0.350	7
16003608	600010000	0	4300	1	0.350	8
16003609	600010000	0	4300	1	0.350	9
16003610	600010000	0	4300	1	0.462	10
16003611	600010000	0	4300	1	0.14	11
16003612	600010000	0	4300	1	0.14	12
16003613	600010000	0	4300	1	0.15	13
16003614	600010000	0	4300	1	0.15	14
16003615	600010000	0	4300	1	0.45	15
16003616	600010000	0	4300	1	0.5	16
16003617	600010000	0	4300	1	0.5	17
16003618	600010000	0	4300	1	0.42	18
16003619	600010000	0	4300	1	0.49	19
16003620	600010000	0	4300	1	0.55	20
16003621	600010000	0	4300	1	0.55	21
16003622	600010000	0	4300	1	0.55	22
16003623	600010000	0	4300	1	0.516	23
16003624	600010000	0	4300	1	0.472	24
16003625	600010000	0	4300	1	0.39	25
16003626	600010000	0	4300	1	0.16	26
16003627	600010000	0	4300	1	0.55	27
16003628	600010000	0	4300	1	0.53	28
16003629	600010000	0	4300	1	0.37	29
16003630	600010000	0	4300	1	0.16	30
16003631	600010000	0	4300	1	0.28	31
16003632	600010000	0	4300	1	0.965	32
16003633	600010000	0	4300	1	0.965	33
16003634	600010000	0	4300	1	0.965	34
16003635	600010000	0	4300	1	0.963	35
16003636	600010000	0	4300	1	0.28	36
16003637	600010000	0	4300	1	0.20	37
16003638	600010000	0	4300	1	0.17	38
16003701	0 0 0 0	38				
16003800	1					
16003801	0.0208 100. 100. 0. 0. 0. 0. 0.	1.0 0. 1.1 1.0 1				
16003802	0.0208 100. 100. 0. 0. 0. 0. 0.	1.0 0. 1.1 1.0 2				
16003803	0.0208 100. 100. 0. 0. 0. 0. 0.	1.0 0. 1.1 1.0 3				
16003804	0.0208 100. 100. 0. 0. 0. 0. 0.	1.0 0. 1.1 1.0 4				
16003805	0.0208 100. 100. 0. 0. 0. 0. 0.	1.0 0. 1.1 1.0 5				
16003806	0.0208 100. 100. 0. 0. 0. 0. 0.	1.0 0. 1.1 1.0 6				
16003807	0.0208 100. 100. 0. 0. 0. 0. 0.	1.0 0. 1.1 1.0 7				
16003808	0.0208 100. 100. 0. 0. 0. 0. 0.	1.0 0. 1.1 1.0 8				
16003809	0.0208 100. 100. 0. 0. 0. 0. 0.	1.0 0. 1.1 1.0 9				
16003810	0.0208 100. 100. 0. 0. 0. 0. 0.	1.0 0. 1.1 1.0 10				
16003811	0.0208 100. 100. 0. 0. 0. 0. 0.	1.0 0. 1.1 1.0 38				

16003900 1
 16003901 0. 100. 100. 0. 0. 0. 0. 1.0 0. 1.1 1.0 38

*

* estrutura de troca de calor 600/4 - parede do vaso de expansao

*

16004000 3 3 2 0 0.0508
 16004100 0 1
 16004101 2 0.0588
 16004201 5 2
 16004301 0.0 2
 16004400 0
 16004401 291.15 3
 16004501 225010000 0 101 1 0.1 1
 16004502 230010000 0 101 1 0.1 2
 16004503 240010000 0 101 1 0.58 3
 16004601 600010000 0 4300 1 0.1 1
 16004602 600010000 0 4300 1 0.1 2
 16004603 600010000 0 4300 1 0.58 3
 16004701 0 0 0 0 3
 16004800 1
 16004801 1.016e-01 100. 100. 0. 0. 0. 0. 1.0 0. 1.1 1.0 3
 16004900 1
 16004901 0. 100. 100. 0. 0. 0. 0. 1.0 0. 1.1 1.0 3

*

* estrutura de troca de calor 600/20 - parede da tubulacao sem isolamento termico

*

16020000 1 3 2 0 0.01040
 16020100 0 1
 16020101 2 0.011
 16020201 2 2
 16020301 0.0 2
 16020400 0
 16020401 291.15 3
 16020501 120110000 0 101 1 0.162 1
 16020601 600010000 0 4300 1 0.162 1
 16020701 0 0 0 0 1
 16020800 1
 16020801 0.0208 100. 100. 0. 0. 0. 0. 1.0 0. 1.1 1.0 1
 16020900 1
 16020901 0. 100. 100. 0. 0. 0. 0. 1.0 0. 1.1 1.0 1

*

* estrutura de troca de calor 600/25 - parede do tubo da linha de desvio superior

*

16025000 8 3 2 0 0.01040
 16025100 0 1
 16025101 2 0.011
 16025201 2 2
 16025301 0.0 2
 16025400 0

16027801 0.0208 100. 100. 0. 0. 0. 0. 1.0 0. 1.1 1.0 2
 16027900 1
 16027901 0. 100. 100. 0. 0. 0. 0. 1.0 0. 1.1 1.0 2

*

* PROPRIEDADES TERMICAS DOS MATERIAIS *

*

*

*crdno	mtl.type	th.con	ht.cap
20100100	tbl/fctn	1	1 * inox 316
20100200	tbl/fctn	1	1 * cobre
20100300	tbl/fctn	1	1 * isolante termico
20100400	tbl/fctn	1	1 * tubo de inox 304
20100500	tbl/fctn	1	1 * pvc
20100600	tbl/fctn	1	1 * oxido de magnesio
20100700	tbl/fctn	1	1 * cromo niquel
20100800	tbl/fctn	1	1 * fouling nas resistencias
20100900	tbl/fctn	1	1 * oxido de magnesio 1

*

* condutividade termica do inox 316 - w/mk

*

*crdno	temp	th.con.
20100101	273.15	12.92
20100102	373.15	14.72
20100103	473.15	16.33
20100104	573.15	17.88
20100105	673.15	19.36
20100106	873.15	22.3
20100107	1073.15	25.3
20100108	1273.15	28.3

*

* capacidade de calor volumetrica do inox 316 - j/m^3k

*

*crdno	temp	ht.cap.
20100151	273.15	3.780e+06
20100152	373.15	4.059e+06
20100153	473.15	4.254e+06
20100154	573.15	4.419e+06
20100155	673.15	4.521e+06
20100156	873.15	4.675e+06
20100157	1073.15	4.823e+06
20100158	1273.15	4.965e+06

*

* condutividade termica do cobre - w/mk

*

*crdno	temp	th.con.
20100201	273.15	404.2
20100202	373.15	395.1
20100203	473.15	387.9

20100204	573.15	380.9
20100205	673.15	374.2
20100206	873.15	360.9
20100207	1073.15	347.2

*

* capacidade de calor volumetrica do cobre - $\text{j/m}^3\text{k}$

*

*crdno	temp	ht.cap.
20100251	273.15	3.374e+06
20100252	373.15	3.505e+06
20100253	473.15	3.579e+06
20100254	573.15	3.647e+06
20100255	673.15	3.701e+06
20100256	873.15	3.802e+06
20100257	1073.15	3.941e+06

*

* condutividade termica do isolante termico - w/mk

*

*crdno	temp	th.con.
20100301	273.15	0.04
20100302	2273.15	0.04

*

* capacidade de calor volumetrica do isolante termico - $\text{j/m}^3\text{k}$

*

*crdno	temp	ht.cap.
20100351	273.15	1.34e+05
20100352	2273.15	1.34e+05

*

* condutividade termica do tubo inox 304 - w/mk

*

*crdno	temp	th.con.
20100401	273.15	14.28
20100402	373.15	16.14
20100403	473.15	17.77
20100404	573.15	19.37
20100405	673.15	20.82
20100406	873.15	23.62
20100407	1073.15	26.35
20100408	1273.15	28.9

*

* capacidade de calor volumetrica do tubo de inox 304 - $\text{j/m}^3\text{k}$

*

*crdno	temp	ht.cap.
20100451	273.15	3.613e+06
20100452	373.15	3.974e+06
20100453	473.15	4.154e+06
20100454	573.15	4.296e+06
20100455	673.15	4.387e+06
20100456	873.15	4.538e+06
20100457	1073.15	4.701e+06

20100458 1273.15 4.856e+06

*

* condutividade termica do pvc - w/mk

*

*crdno temp th.con.

20100501 273.15 0.21

20100502 2273.15 0.21

*

* capacidade de calor volumetrica do pvc - j/m^3k

*

*crdno temp ht.cap.

20100551 273.15 1.809e+06

20100552 2273.15 1.809e+06

*

* condutividade termica do oxido de magnesio - w/mk

*

*crdno temp th.con.

20100601 200.0 75.0

20100602 300.0 48.0

20100603 400.0 36.0

20100604 500.0 27.0

20100605 600.0 21.0

20100606 800.0 13.0

20100607 1000.0 10.0

20100608 1200.0 8.0

20100609 1400.0 7.0

*

* capacidade de calor volumetrica do oxido de magnesio - j/m^3k

*

*crdno temp ht.cap.

20100651 273.15 3.4e+06

20100652 1273.15 3.4e+06

*

* condutividade termica do cromo niquel - w/mk

*

*crdno temp th.con.

20100701 273.15 9.52

20100702 333.33 10.56

20100703 611.11 15.58

20100704 833.33 19.56

20100705 1000.0 22.5

20100706 1111.11 24.4

20100707 1222.22 26.48

20100708 2322.22 28.48

*

* capacidade de calor volumetrica do cromo niquel - j/m^3k

*

*crdno temp ht.cap.

20100751 273.15 3.1e+05

20100752 366.33 6.6e+05

20100753	644.00	1.2e+06
20100754	811.00	1.3e+06
20100755	2500.0	1.4e+06

*

* condutividade termica do fouling - w/mk

*

*crdno	temp	th.con.
--------	------	---------

20100801	273.15	0.001453 * 0.0008 m ² .h.°C/kcal
20100802	2273.15	0.001453 * 0.0008 m ² .h.°C/kcal

*

* capacidade de calor volumetrica do fouling - j/m³k

*

*crdno	temp	ht.cap.
--------	------	---------

20100851	273.15	1.34e+05
20100852	2273.15	1.34e+05

*

* condutividade termica do oxido de magnesio 1 - w/mk

*

*crdno	temp	th.con.
--------	------	---------

20100901	273.15	48.0
20100902	2273.15	48.0

*

* capacidade de calor volumetrica do oxido de magnesio 1 - j/m³k

*

*crdno	temp	ht.cap.
--------	------	---------

20100951	273.15	3.427e+06
20100952	2273.15	3.427e+06

*

*

TABELA DE POTÊNCIA

*

*

20201000 power

*

t [s]	potencia [w]
-------	--------------

*

20201001	0.0	1976.676
20201002	105.0	2081.951
20201003	203.0	2099.361
20201004	301.0	2105.336
20201005	399.0	2111.060
20201006	504.0	2127.980
20201007	602.0	2141.466
20201008	700.0	2147.280
20201009	805.0	2147.824
20201010	903.0	2146.838
20201011	1001.0	2153.202
20201012	1099.0	2155.008
20201013	1204.0	2148.916
20201014	1302.0	2152.658
20201015	1400.0	2159.068

20201016	1505.0	2161.145
20201017	1603.0	2169.839
20201018	1701.0	2163.268
20201019	1799.0	2177.042
20201020	1904.0	2175.666
20201021	2002.0	2182.56
20201022	3003.0	2204.865
20201023	5005.0	2249.86
20201024	5999.0	2214.305
20201025	7000.0	2265.317
20201026	8001.0	2271.554
20201027	9002.0	2289.503
20201028	11004.0	2299.694
20201029	13006.0	2293.985
20201030	15001.0	2319.375
20201031	17003.0	2321.253
20201032	19005.0	2349.246
20201033	21000.0	2362.45
20201034	22001.0	2368.421
20201035	23002.0	2401.257
20201036	23996.0	2406.948
20201037	25004.0	2406.093
20201038	25998.0	2418.7
20201039	26502.0	2429.948
20201040	27006.0	2439.531
20201041	27503.0	2446.62
20201042	28000.0	2448.259
20201043	29001.0	2422.765
20201044	30002.0	2405.788
20201045	31003.0	2408.096
20201046	32004.0	2449.335
20201047	33005.0	2445.432
20201048	34006.0	2447.242
20201049	35000.0	2452.81
20201050	35959.0	2408.453

*

* TABELA DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR – AR *

*

20230000	htc-temp	
*	temp [k]	h [w/m^2k]
20230001	200.0	10.0
20230002	300.0	10.0
20230003	400.0	10.0
20230004	500.0	10.0

*

* fim do programa

*

.

ANEXO A – Princípio de Funcionamento do Medidor de Vazão Magnético

O medidor de vazão magnético é da marca Krohne Conaut, modelo IFS4000W/6, com diâmetro 10 mm, calibrado para uma faixa de vazão máxima de 300 l/h (0,08 kg/s) e com sinal de saída de 4 a 20 mA. Uma resistência de 250 Ω foi associada em série ao sinal de saída do medidor de vazão magnético, modificando-o para 1 a 5 V. Conforme Krohne Conaut (2003), a precisão do medidor de vazão magnético é $\pm 0,33$ l/h ($9 \cdot 10^{-5}$ kg/s).

O princípio de funcionamento de um medidor de vazão magnético é baseado na Lei de Faraday-Neumann-Lenz ou Lei da Indução Eletromagnética (Martins, 1975), que quantifica a indução eletromagnética, que é o efeito da produção de corrente elétrica em um circuito colocado sob efeito de um campo magnético.

A FIG. AnA.1 mostra um condutor elétrico, neste caso um fluido eletricamente condutivo, escoando através de um campo magnético.

FIGURA AnA.1 – Princípio de Funcionamento do Medidor de Vazão Magnético

A tensão induzida (ΔV) neste meio é diretamente proporcional à velocidade média do escoamento (v_m).

$$\Delta V = K \cdot B \cdot d \cdot v_m \quad (\text{A.1})$$

onde ΔV é a tensão induzida (V), K é a constante do instrumento, B é a intensidade do campo magnético (T^1), d é o diâmetro interno do medidor de vazão magnético (m) e v_m é a velocidade média do fluido (m/s).

A vazão volumétrica pode ser calculada de acordo com:

$$Q = v_m \cdot \pi \cdot d^2 / 4 \quad (\text{A.2})$$

onde Q é a vazão volumétrica (m^3/s), v_m é a velocidade média do escoamento (m/s) e d é o diâmetro interno do medidor de vazão magnético (m).

Da Eq. A.1 tem-se que a velocidade média do fluido (v_m) é:

$$v_m = \Delta V / K \cdot B \cdot d \quad (\text{A.3})$$

Substituindo-se a Eq. A.3 na Eq. A.2 tem-se:

$$Q = (\Delta V \cdot \pi \cdot d) / (4 \cdot K \cdot B) \quad (\text{A.4})$$

A medição da vazão é independente do perfil do escoamento e de outras propriedades do meio, tais como a pressão, temperatura, viscosidade, densidade, condutividade elétrica e a contaminação do eletrodo. O sensor do medidor de vazão magnético é revestido internamente com isolante (TeflonTM) para assegurar que não ocorra curto-circuito produzido pela tensão induzida (ΔV).

¹Tesla (T) é a unidade de medida da indução magnética, que é a indução de um campo magnético uniforme e invariável que, sobre um condutor retilíneo normal à direção do campo e conduzindo uma corrente de intensidade invariável igual a um Ampère, exerce uma força igual a um Newton por metro de comprimento do referido condutor.

ANEXO B – Sensor de Pressão Diferencial com Indutância Variável

O sensor de pressão marca Validyne, modelo DP 15 (Validyne, 2005), com indutância variável consiste de um diafragma em aço inox, fixado por meio de parafusos entre dois blocos de aço inox. Em cada bloco há uma bobina (L1 e L2), vedada por um disco com a superfície resistente à corrosão. Na posição de repouso, o diafragma é centrado, estabelecendo dois *gaps* de igual medida linear (0,13 mm), como mostrado na FIG. AnB.1.

FIGURA AnB.1 – Esquema do Sensor de Pressão com Indutância Variável

A FIG. AnB.2 indica o funcionamento do sensor de pressão que está baseado na variação da indutância nas bobinas L1 e L2, quando da deflexão (x) do diafragma sob a ação de uma diferença de pressão entre P1 e P2 (ΔP).

Para permitir os ajustes necessários do “zero” e do “span” (conjunto de valores permitidos entre um mínimo e o máximo – amplitude do sinal) do sensor de pressão, utilizou-se um demodulador marca Validyne, modelo CD 15 (Validyne, 2005). Além das principais funções já citadas, o demodulador também é responsável pelo fornecimento de energia para o sensor de pressão e para que o sinal de saída seja amplificado, filtrado e apresente respostas dinâmicas rápidas e precisas. O esquema elétrico do conjunto sensor de pressão – demodulador é

indicado na FIG. AnB.3. A baixa impedância nos circuitos integrados do demodulador permite a operação do sensor de pressão instalado até uma distância de 30 m.

FIGURA AnB.2 – Princípio de Funcionamento do Sensor de Pressão

FIGURA AnB.3 – Esquema do Circuito Elétrico – Sensor de Pressão e Demodulador

Uma das principais características dos sensores de pressão Validyne DP15 é a intercâmbio de diafragmas, permitindo medir-se um intervalo de pressão de 552 Pa (0,08 PSI) até 22.000 kPa (3.200 PSI). A TAB. AnB.1 relaciona o valor da pressão diferencial a ser medida e os correspondentes diafragmas a serem utilizados. Conforme apresentado na FIG. 3.1, na BCN foram utilizados o sensor de pressão P1, localizado na saída do aquecedor elétrico, para um pressão máxima de 49 kPa (5.000 mmH₂O) e o sensor de pressão P2, instalado no tubulão inferior do trocador de calor, para uma pressão máxima de 19,6 kPa (2.000 mmH₂O).

TABELA AnB.1 – Relação de Diafragmas e Pressão Diferencial

Número do Diafragma	Pressão Diferencial (kPa)
18	0,55
20	0,86
22	1,40
24	2,20
26	3,50
28	5,50
30	8,60
32	14
34 (usado no sensor P2)	22
36	35
38 (usado no sensor P1)	55
40	86
42	140
44	220
46	350
48	550
50	860
52	1.400
54	2.200
56	3.500
58	5.500
60	8.600
62	14.000
64	22.000

As principais vantagens na utilização do sensor de pressão são o projeto compacto e robusto, além da rapidez no tempo de resposta nas variações de pressão, proporcionada pelo pequeno volume da cavidade de pressão do instrumento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKERS, W. W., DAVIS JR., S. H., CRAWFORD, J. E., **“Condensation of a Vapor in the Presence of a Noncondensing Gas”**, Chem. Engineering Prog. Symp., Series no. 30 56, pp. 139-144, 1960.

AL-DIWANY, H. K., ROSE, J. W., **“Free Convection Film Condensation of Steam in the Presence of Non-Condensing Gases”**, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 16, pp. 1359-1369, 1973.

BAJS, T., GRGIC, D., SEGON, V., ORIANI, L., CONWAY, L. E., **Development of Relap5 Nodalization for IRIS Non-LOCA Transient Analyses**, Nuclear Mathematical and Computational Sciences: A Century in Review, Gatlinburg, Tennessee, April 6 – 11, American Nuclear Society, USA, 2003.

BAPTISTA FILHO, B. D., MACEDO, L. A., **“Controle de Sistemas Passivos em Circulação Natural por Meio de Linhas de Desvio”**, 13º National Meeting of Reactors Physics and Thermal Hydraulics – ENFIR 2002, Rio de Janeiro, Brasil, 11 a 16 ago., 2002.

BIRD, R. B., STEWART, W. E., LIGHFOOT, E. N., **“Transport Phenomena”**, John Wiley and Sons, New York, 1960.

BJORNARD, T. A., GRIFFITH, P., **“PWR Blowdown Heat Transfer”**, Thermal and Hydraulic Aspects of Nuclear Reactor Safety, Vol. 1, American Society of Mechanical Engineers, New York, pp.17-41, 1977.

BLANGETTI, F., KERBS, R., SCHLUNDER, E. U., **“Condensation in Vertical Tubes – Experimental Results and Modeling”**, Chem. Eng. Fundamentals, Vol. 1, pp.20-63, 1982.

BORISHANSKY, V. M., VOLKOV, D. I., IVASHCHENKO, N. I., **“Effects of Noncondensable Gas Content on Heat Transfer in Steam Condensation in a Vertical Tube”**, Heat Transfer – Sov. Res., Vol. 9, pp. 35-42, 1977.

CARELLI, M. D., CONWAY, L. E., ORIANI, L., PETROVIC, B., LOMBARDI, C. V., RICOTTI, M. E., BARROSO, A. C. O., COLLADO, J. M., CINOTTI, L., TODREAS, N. E., GRGIC, D., MORAES, M. M., BOROUGHS, R. D., NINOKATA, H., INGERSOLL, D. T., ORIOLO, F., **The Design and Safety Features of the IRIS Reactor**, Nuclear Engineering and Design, Vol. 230, pp. 151 – 167, 2002.

CARELLI, M. D., **IRIS: A Global Approach to Nuclear Power Renaissance**, 2003. Disponível em: <[http://131.175.67.61/irisdocs/IRIS NuclearNews 2003-9-3.pdf](http://131.175.67.61/irisdocs/IRIS_NuclearNews_2003-9-3.pdf)>. Acesso em 15 jan. 2005.

CHATO, J. C., **“Laminar Condensation Inside Horizontal and Inclined Tubes”**, American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineering Journal, Vol. 4, pp. 52-60, 1962.

CHEN, J. C., **“A Correlation for Boiling Heat Transfer to Saturated Fluids in Convective Flow”**, Process Design and Development, Vol. 5, pp. 322-327, 1966.

CHUNG, B. J., KIM, S., KIM, M. C., **“Experimental Comparison of Film-Wise and Drop-Wise Condensation of Steam on Vertical Flat Plates with the Presence of Air”**, Int. Comm. Mass Transfer, Vol. 31, n. 8, pp. 1067-1074, 2004.

CHUNG, Y. J., YANG, S. H., KIM, H. C., ZEE, S. Q., **Thermal Hydraulic Calculation in a Passive Residual Heat Removal System of the SMART-P Plant for Forced and Natural Convection Conditions**, Nuclear Engineering and Design, Vol. 232, pp. 277-288, 2004.

CHURCHILL, S. W., CHU, H. H. S., **“Correlating Equations for Laminar and Turbulent Free Convection From a Vertical Plate”**, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 18, pp. 1323-1329, 1975.

COLBURN, A. P., HOUGEN, O. A., **“Design of Cooler Condensers for Mixtures of Vapors with Noncondensing Gases”**, Ind. Engineering Chem., Vol. 26, pp. 1178-1182, 1934.

DEHBI, A. A., GOLAY, M. W., KAZIMI, M. S., **“The Effects of Noncondensable Gases on the Steam Condensation under Turbulent Natural Convection Conditions”**, Report no. MIT-ANP-TR-004, 1990.

DEHBI, A., GUENTAY, S., **“A Model for the Performance of a Vertical Tube Condenser in the Presence of Noncondensable Gases”**, Nuclear Engineering and Design, Vol. 177, pp. 41-52, 1997.

DEL NEVO, A., ORIANI, L., CONWAY, L., **Transients and Accidents for the International Reactor Innovative and Secure (IRIS)**, Westinghouse – Preliminary IRIS Safety Analyses, USA, 2002.

DENNY, V. E., JUSIONIS, V. J., **“Effects of Noncondensable Gas and Forced Flow on Laminar Film Condensation”**, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 15, pp. 315-326, 1972.

DITTUS, F. W., BOELTER, L. M. K., **“Heat Transfer in Automobile Radiators of the Tubular Type”**, Publications in Engineering, Vol. 2, University of California, Berkeley, pp. 443-461, 1930.

ECIL TEMPERATURA INDUSTRIAL, **Sensores de Temperatura – Termopares**, 2007. Disponível em: <<http://www.ecil.com.br>>. Acesso em 6 ago. 2007.

EDWARDS, D. K., DENNY, V. E., MILLS, A. F., **“Transfer Processes”**, Hemisphere, New York, 2nd Edition, 1979.

EES, **“Engineering Equation Solver”**, Versão 6.352, USA, 2001.

ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, **World Energy and Economic Outlook – Chapter 1**, 2007. Disponível em: <<http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/pdf/world.pdf>> . Acesso em 18 jul. 2007.

FORSTER, H. K., ZUBER, N., “**Dynamics of Vapor Bubbles and Boiling Heat Transfer**”, AIChE Journal, Vol. 1, n.4, pp. 531-535, 1955.

GE NUCLEAR ENERGY, “**SBWR Standard Safety Analysis Report**”, Report n. 25A5113 Rev. A., 1992.

GOODYKOONTZ, J. H., DORSCH, D. G., “**Local Heat Transfer Coefficients for Condensation of Steam in Vertical Downflow within a 5/8 inch Diameter Tube**”, NASA Report, TND-3326, 1966.

HASANEIN, H. A., KAZIMI, M. S., GOLAY, M. W., **Forced Convection In-Tube Steam Condensation in the Presence of Noncondensable Gases**, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 39, No. 13, pp. 2625-2639, 1996.

HASSAN, Y. A., BANERJEE, S., “**Implementation of a Noncondensable Model in Relap5/Mod3**”, Nuclear Engineering and Design, Vol. 162, pp. 281-300, 1996.

HETSRONI, G., “**Handbook of Multiphase System**”, pp. 2.64 e 2.71, Hemisphere, Washington, DC, 1982.

HEWITT, G. F., “**Annular Two Phase Flow**”, In Two Phase Flow and Heat Transfer with Application to Nuclear Reactor Problems, pp 49-66, Hemisphere, Washington, DC, 1978.

HIJIKATA, K., CHEN, S. J., TIEN, C. L., “**Non-Condensable Gas Effect on Condensation in a Two-Phase Closed Thermosyphon**”, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 27, No. 8, pp. 1319-1325, 1984.

IOPE – INSTRUMENTOS DE PRECISÃO, **Manual de Termopares**, 2005. Disponível em: <<http://www.iope.com.br>>. Acesso em 14 set. 2005.

ISOTECH – TEMPERATURE CALIBRATION EQUIPMENT AND SERVICES, **Portable Liquids Baths**, 2007. Disponível em: <<http://www.isotech.co.uk>>. Acesso em 2 jul. 2007.

JAKOB, M., “**Heat Transfer in Vaporization and Condensation – II**”, Mech. Eng., Vol. 58, pp. 729-740, 1936.

KAGEYAMA, T., PETERSON, P. F., SCHROCK, V. E., “**Diffusion Layer Modeling for Condensation in Vertical Tubes with Noncondensable Gases**”, Nuclear Engineering and Design, Vol. 141, pp. 289-302, 1993.

KANG, S. W., GRIFFITH, P., “**Pool Heat Transfer in a Simulated PWR Pressurizer**”, Trans. Am. Nuclear Soc., Vol.46, pp. 845-847, 1984.

KROHNE – CONAUT, **“Manual de Medidores Magnéticos Indutivos de Vazão”**, Ver. 03/02, 24 p., São Paulo, SP, 2003.

KUHN, S. Z., SCHROCK, V. E., PETERSON, P. F., **“An Investigation of Condensation from Steam-Gas Mixtures Flowing Downward Inside a Vertical Tube”**, Nuclear Engineering and Design, Vol. 177, pp. 53-69, 1997.

KUHN, S. Z., SCHROCK, V. E., PETERSON, P. F., **“An Investigation of Condensation from Steam-Gas Mixtures Flowing Downward Inside a Vertical Tube”**, Proc. NURETH-7, Saratoga Springs, 1995.

LAKE, J. A., **The Fourth generation of Nuclear Power**, 2000, Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, USA. Disponível em: <<http://www.inl.gov/technicalpublications/Documents/2809241.pdf>>. Acesso em 03 jun. 2007.

LAKE, J. A., **The Renaissance of Nuclear Energy**, 2006, International Information Programs – Eletronic Journal, USA. Disponível em: <<http://www.usinfo.state.gov/journals/ites/0706/ijee/lake.htm>>. Acesso em 15 out. 2007.

Lima, A. C, Mello, P. J. S., Barbosa, A. T., Martins, M. G., Rodrigues, J. M., **Trabalho de Processos Unitários da Indústria Química I**, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ; Novembro, 1996.

LOCKHART, R. W., MARTINELLI, R. C., **“Proposed Correlation of Data for Isothermal Two-Phase - Two Component Flow in Pipes.”**, Chemical Engineering Progress, Vol. 45, p. 39, 1949.

MACEDO, L. A., **“Controle de Sistemas Passivos de Resfriamento de Emergência de Reatores Nucleares por Meio de Linhas de Desvio”**, Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2001.

MACEDO, L. A., BAPTISTA FILHO, B. D., **Circuito Experimental com Escoamento Bifásico e com Alta Concentração de Não-Condensáveis para Pesquisa e Desenvolvimento de Sistemas de Resfriamento de Emergência de Reatores Nucleares Avançados**, 11º Congresso Brasileiro de Ciências Térmicas e Engenharia – ENCIT 2006, Curitiba, Brasil, 5 a 8 dez. 2006.

MACEDO, L. A., BAPTISTA FILHO, B. D., SABUNDJIAN, G., **“Simulação de um Transitório com Escoamento Monofásico em Circulação Natural Usando os Programas *Engineering Equation Solver (EES)* e o *Relap5/mod3.2*”**, 10º Congresso Brasileiro de Ciências Térmicas e Engenharia – ENCIT 2004, Rio de Janeiro, Brasil, 29 nov. – 03 dez., 2004.

MAHESHWARI, N. K., SAHA, D., SINHA, R. K., ARITOMI, M., **“Experimental Studies on Condensation of Steam Inside Vertical Tubes with Noncondesable Gas and Natural Convection Outside the Pool”**, Submitted in KernTechnik, 2003.

MAHESHWARI, N. K., SAHA, D., SINHA, R. K., ARITOMI, M., **“Investigation on Condensation in Presence of a Noncondensable Gas for a Wide Range of Reynolds Number”**, Nuclear Engineering and Design, Vol. 227, pp. 219-238, 2004.

McADAMS, W. H., **“Heat Transmission”**, 3rd Edition, McGraw-Hill, New York, 1954.

MILLS, A. F., **“Heat and Mass Transfer”**, Chapter 10, University of California at Los Angeles, 1995.

MINKOWYCZ, W. J., SPARROW, E. M., **“Condensation Heat Transfer in the Presence of Noncondensables, Interfacial Resistance, Superheating, Variable Properties and Diffusion”**, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 9, pp. 1125-1144, 1966.

MOODY, L. F., **“Friction Factors for Pipe Flow”**, Trans. Am. Soc. Mech. Eng., 1944.

MUÑOZ-COBO, J. L., HERRANTZ, L., SANCHO, J., TKACHENKO, I., VERDÚ, G., **“Turbulent Vapor Condensation with Noncondensable Gases in Vertical Tubes”**, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 39, no. 15, pp 3249-3260, 1996.

NATIONAL INSTRUMENTS, **“Instrumentation Reference and Catalogue - Test and Measurement Process Monitoring and Control”**, May Edition, USA, 1995.

NATIONAL INSTRUMENTS, **“LabVIEW User Manual”**, July Edition, USA, 2000.

NITHIANANDAN, C. K. ET AL., **“RELAP5/MOD2 Model for Surface Condensation in the Presence of Noncondensable Gases”**, Proceedings of 8th International Heat Transfer Conference, San Francisco, CA, pp. 17-22, Vol. 4, pp. 1627-1633, 1986.

NO, H. C., PARK, H. S., **“Non-Iterative Condensation Modeling for Steam Condensation with noncondensable Gas in a Vertical Tube”**, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 45, pp.845-854, 2002.

NUREG/CR-5535-Rev.1, **“U. S. Nuclear Regulatory Research”**, Vol. 1-8, 2001.

NUSSELT. , W., **“Die Oberflächenkondensation des Wasserdampfes”**, Ver. Deutsch. Ing. 6, 1916.

OGG, D. G., **“Vertical Downflow Condensation Heat Transfer in Gas-Steam Mixtures”**, MSc. Thesis, Department of Nuclear Engineering, University of California, Berkeley, 1991.

OH, S., REVANKAR, S. T., **“Effect of Noncondensable Gas in a Vertical Tube Condenser”**, Nuclear Engineering and Design, 2005.

OMEGA ENGINEERING, INC., **“Temperature Measurement Handbook and Encyclopedia”**, Printed in USA, 1987.

PARK, H. S., NO, H. C., **“A Condensation Experiment in the Presence of Noncondensables in a Vertical Tube of Passive Containment Cooling System and Its Assessment with Relap5/mod3.2”**, Nuclear Technology, Vol. 127, pp.160-169, 1999.

PETERSON, P. F., SCHROCK, V. E., KAGEYAMA, T., **“Diffusion Layer Theory for Turbulent Vapor Condensation with Noncondensable Gases”**, Nat. Heat Transfer Conf., San Diego, 1992.

PETERSON, P. F., SCHROCK, V. E., KAGEYAMA, T., **“Diffusion Layer Theory for Turbulent Vapor Condensation with Noncondensable Gases”**, J. Heat Transfer, Vol. 115, pp. 998-1003, 1993.

REVANKAR, S. T., POLLOCK, D., **“Laminar Film Condensation in a Vertical Tube in the Presence of Noncondensable Gas”**, Applied Mathematical Modeling, Vol. 29, pp. 341-359, 2005.

RICOTTI, M. E., CAMMI, A., CIONCOLINI, A., CIPOLLARO, A., ORIOLO, F., LOMBARDI, C., CONWAY, L. E., BARROSO, A. C., **Preliminary Safety Analysis of the IRIS Reactor**, 10th International Conference on Nuclear Engineering - ICONE, Arlington, Virginia, USA, 14 – 18 April, 2002.

ROHSENOW, W. M., CHOI, Y. H., **“Heat Mass and Momentum Transfer”**, New Jersey, Prentice-Hall, 1961.

ROSE, J. W., **“Condensation of Vapour in the Presence of a Non-Condensing Gas”**, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 12, pp. 233-237, 1969.

SELLARS, J. R., TRIBUS, M., KLEIN, J. S., **“Heat Transfer to Laminar Flows in a Round Tube or Flat Conduit: The Graetz Problem Extended”**, Transactions American Society of Mechanical Engineers, Vol. 78, p. 441, 1956.

SHAH, M. M., **“A General Correlation for Heat Transfer during Film Condensation Inside Pipes”**, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 22, pp. 547-556, 1979.

SIDDIQUE, M., **“The Effects of Noncondensable Gases on Steam Condensation under Forced Convection Condition”**, Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1992.

SIDDIQUE, M., GOLAY, M. W., KAZIMI, M. S., **“Local Heat Transfer Coefficients for Forced-Convection Condensation of Steam in a Vertical Tube in the Presence of a Noncondensable Gas”**, Nuclear Technology, Vol. 102, pp. 358-402, June, 1993.

SIDDIQUE, M., GOLAY, M. W., KAZIMI, M. S., **“The Effect of Noncondensable Gases on Steam Condensations under Forced Convection Conditions”**, MIT-

TR-010, Department of Nuclear Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 1992.

SIDDIQUE, M., GOLAY, M. W., KAZIMI, M. S., **“Theoretical Modeling of Forced Convection Condensation of Steam in a Vertical Tube in the Presence of a Noncondensable Gas”**, Nuclear Technology, Vol. 106, 1994.

SPARROW, E. M., MINKOWYCZ, W. J., SADDY, M., **“Forced Convection Condensation in the Presence of Noncondensables and Interfacial Resistance”**, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 10, pp. 1829-1845, 1967.

TANNER, D. W., POTTER, C. J., POPE, D., WEST, D., **“Heat Transfer in Dropwise Condensation – Part I: The Effects of Heat Flux, Steam Velocity and Non-Condensable Gas Concentration”**, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 8, pp. 419-426, 1965.

TANRIKUT, A., YESIN, O., **“Experimental Research on In-Tube Condensation in the Presence of Air”**, In: Proc. Of Technical Committee Meeting, IAEA TECDOC- 1149, Switzerland, pp. 14-17, 1998.

UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, **NRC Certifies Westinghouse Electric Company’s AP 600 Reactor**, 1999. Disponível em: <<http://nrc.gov/reading-rm/doc-collections/news/1999/99-263.html>>. Acesso em 01 out. 2007.

URANIUM INFORMATION CENTER, **Generation IV Nuclear Reactors**, 2007. Disponível em: <<http://www.uic.com.au/nip77.htm>>. Acesso em 01 set. 2007.

VALIDYNE ENGINEERING, INC., **Pressure Transducers, Transmitters and Sensors Manual**, 2005. Disponível em: <<http://www.validyne.com.br>>. Acesso em 14 set. 2005.

VAN WYLEN, G. J., SONNTAG, R. E., **“Fundamentos da Termodinâmica Clássica”**, tradução da 2.a edição americana, Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo, SP, 1976.

VIEROW, K. M., **“Behavior of Steam-Air Systems Condensing in Cocurrent Vertical Downflow”**, MSc Thesis, Department of Nuclear Engineering, University of California at Berkeley, 1990.

VIEROW, K. M., SCHROCK, V. E., **“Condensation Heat Transfer in Natural Circulation with Noncondensable Gas”**, Report for General Electric Nuclear Energy UCB-NE 4170, Department of Nuclear Engineering, University of California at Berkeley, 1990.

VIEROW, K. M., SCHROCK, V. E., **“Condensation in a Natural Circulation Loop with Noncondensable Gases”**, Part – I Heat Transfer, In Proc. Conf. Multiphase Flows, Tsukuba, Japan, 1991.

WALLIS, G. B., **“One Dimensional Two Phase Flow”**, McGraw-Hill, New York, 1969.

WANG, C. Y., TU, C. J., **“Effects of Non-Condensable Gas on Laminar Film Condensation in a Vertical Tube”**, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 32, pp. 2339-2345, 1988.

WESTINGHOUSE ELECTRIC COMPANY, **Passive Safety Features**, 2007. Disponível em: <<http://www.ap600.westinghousenuclear.com/A7.asp>>. Acesso em 16 out. 2007.

WESTINGHOUSE ELECTRIC COMPANY, **Passive Safety Features**, 2007. Disponível em: <<http://www.ap600.westinghousenuclear.com/A7.asp>>. Acesso em 3 ago. 2007.

WESTINGHOUSE ELECTRIC COMPANY, **Public Safety and Licensing**, 2007. Disponível em: <<http://westinghousenuclear.com/AP1000>>. Acesso em 16 out. 2007.

WHALLEY, P. B., HEWITT, G. F., **“The Correlation of Liquid Entrainment Fraction and Entrainment Rate in Annular Two Phase Flow”**, Report AERE R9187, UKAEA, 1978.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, **Advanced Nuclear Power Reactors**, 2007. Disponível em: <<http://www.world-nuclear.org/info/inf08.html>>. Acesso em 28 set. 2007.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, **Nuclear Power in the World Today**, 2007. Disponível em: <<http://www.world-nuclear.org/info/inf01.html>>. Acesso em 28 set. 2007.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, **World Energy Needs and Nuclear Power**, 2007. Disponível em: <<http://www.world-nuclear.org/info/inf16.html>>. Acesso em 28 set. 2007.

WU, T., VIEROW, K., **“Local Heat Transfer Measurements of Steam/Air Mixtures in Horizontal Condenser Tubes”**, Int. Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 49, pp. 2491-2501, 2006.

YAO, G. F., GHIAASIAAN, S. M., EGHBALI, D. A., **“Semi-Implicit Modeling of Condensation in the Presence of Noncondensables in the Relap5/mod3 Computer Code”**, Nuclear Engineering and Design, Vol. 166, pp. 277-291, 1996.