



SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM CIRCUITO DE CIRCULAÇÃO
NATURAL UTILIZANDO CÓDIGO RELAP5

Pedro Andrade Maia Vinhas

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Nuclear, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção título de Mestre em Engenharia Nuclear.

Orientador: Su Jian

Rio de Janeiro

Março de 2018

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM CIRCUITO DE CIRCULAÇÃO
NATURAL UTILIZANDO CÓDIGO RELAP5

Pedro Andrade Maia Vinhas

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR.

Examinada por:

Prof. Su Jian, D.Sc.

Prof. Antônio Carlos Marquês Alvim, Ph.D.

Dr. Pedro Luiz da Cruz Saldanha, D.Sc

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2018

Vinhas, Pedro Andrade Maia

Simulação Computacional de um Circuito de Circulação Natural utilizando o código RELAP5/Pedro Andrade Maia Vinhas. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XVIII, 93 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Su Jian

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Nuclear, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 89-93.

1. Circulação Natural. 2. Transferência de Calor. 3. Sistema Passivo. 4. RELAP5. I. Jian, Su. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

Ao meu pai, Paulo Cesar (*in memoriam*),
à minha mãe, Marcia,
aos meus irmãos, Matheus e Fábio,
e à minha esposa, Thainan.

Agradecimentos

Agradeço a Deus pelas oportunidades a mim oferecidas. Agradeço a minha família por todo apoio. A minha querida esposa Thainan sem qual, com sua paciência e incentivo, teriam tornado impossível chegar até aqui

Ao Professor Su Jian, orientador desta dissertação, pela confiança, paciência e por todos os seus esforços para que o melhor sempre fosse alcançado e por todo apoio ao longo desses 3 anos. Aos professores e funcionários do PEN/COPPE da UFRJ que muito auxiliaram nessa trajetória.

Aos colegas do LASME pelos auxílios fornecidos para a realização deste trabalho.

A AMAZUL/S.A. pela oportunidade da qualificação profissional. E aos colegas da Divisão de Análise de Segurança do Centro Tecnológico da Marinha em São paulo, pelo apoio para viabilizar a conclusão do curso.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM CIRCUITO DE CIRCULAÇÃO
NATURAL UTILIZANDO CÓDIGO RELAP5

Pedro Andrade Maia Vinhas

Março/2018

Orientador: Su Jian

Programa: Engenharia Nuclear

O uso de sistemas passivos baseados na circulação natural para resfriamento do núcleo do reator é um importante conceito de segurança, pois tem como sua principal vantagem não depender de nenhum equipamento externo, apenas das leis da física. Os códigos da família RELAP tem sido amplamente utilizados pela literatura para simular transientes e acidentes que podem ocorrer em reatores de água leve (*LWR*). O objetivo deste trabalho é estudar a influência dos parâmetros operacionais no comportamento do fenômeno de circulação natural utilizando o código computacional RELAP5/MOD3.2 . Como base da modelagem foi utilizado o Circuito de Circulação Natural (CCN) do Laboratório de Termo-hidráulica Experimental do Instituto de Engenharia Nuclear da Comissão Nacional de Energia Nuclear (LTE/IEN/CNEN). Trinta e duas simulações termo-hidráulicas foram realizadas para combinações de quatro potências de aquecimento e oito vazões de resfriamento do CCN. Os resultados mostram que a nodalização utilizada era representativa do sistema, e que o código é capaz de prever de forma geral o comportamento do escoamento, tanto monofásico quanto bifásico, porém as instabilidades características da circulação não são bem representadas devidas principalmente aos métodos numéricos utilizados.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.).

COMPUTATIONAL SIMULATION OF A NATURAL CIRCULATION CIRCUIT
USING CODE RELAP5

Pedro Andrade Maia Vinhas

March/2018

Advisor: Su Jian

Department: Nuclear Engineering

The use of passive systems such as natural circulation for cooling of nuclear reactor core is an important safety concept. The main advantage of passive systems is that, as they just rely on law of physics, they do not depend on external equipments. RELAP5 code has been widely used in literature for transient and accident simulation that may occur in Light Water Reactors (LWR). Therefore, the main objective of this work is to analyze the influence of operational parameters in natural circulation phenomenon behavior by using the computational code RELAP. The circuit implemented in RELAP5 corresponds to the Natural Circulation Circuit (CCN) of the Laboratório de Termohidráulica Experimental of the Instituto de Engenharia Nuclear of the Comissão Nacional de Energia Nuclear (LTE/IEN/CNEN). Several simulations with different combinations of power and cooling water flow rate have been performed. Results show that the nodalization used in such simulations represents the system fairly well and that the code is capable of predicting both single-phase and two-phase flow behavior. However, characteristic circulation instabilities have not been well represented due to the numerical methods used by the computational code.

Sumário

Dedicatória	iv
Agradecimento	v
Resumo	vi
Abstract	vii
Índice de Figuras	x
Índice de Tabelas	xv
Lista de Símbolos	xvi
1 Introdução	1
1.1 Circulação Natural	4
1.2 Objetivo	7
1.3 Organização do Trabalho	7
2 Revisão Bibliográfica	8
3 Código Computacional RELAP5/MOD3.2	20
3.1 Modelos Físicos	20
3.2 Relações de Fechamento	22
3.3 Modelo numérico	30
3.4 Dados de Entrada	30

4	Resultados e Discussões	33
4.1	Aparato Experimental - CCN do IEN/CNEN	33
4.2	Nodalização do RELAP5/MOD3.2	40
4.2.1	Geometria	40
4.2.2	Estrutura de Calor	43
4.3	Verificação do comportamento do Circuito de Circulação Natural	44
4.4	Validação do modelo	61
4.5	Conjunto de Simulações	61
4.5.1	Simulações Monofásica	67
4.5.2	Simulações Bifásicas	80
5	Conclusões e Sugestões	87
	Referências Bibliográficas	89

Lista de Figuras

1.1	Fenômeno de Circulação Natural.	4
1.2	Mapas de instabilidade.(International Atomic Energy, 2005)	7
2.1	Montagem experimental e representação no RELAP5 (Misale et al., 1999).	10
2.2	Vazão para canais paralelos com a mesma potência (Lakshmanan e Pandey, 2010).	11
2.3	Vazão para canais paralelos com potências diferentes (Lakshmanan e Pandey, 2010).	11
2.4	Montagem experimental (Martin e Taylor, 1992).	13
2.5	(A) nodalização <i>slice</i> e (B) nodalização não- <i>slice</i> (Bajs et al., 2000).	16
2.6	Comparação entre os resultados experimentais e do RELAP5 (Mousavian et al., 2004).	17
2.7	Nodalização do RELAP5 (Zhou et al., 2013).	18
3.1	Mapa de escoamento gás-líquido vertical.(Fletcher e Schultz, 1995a)	23
3.2	Mapa de escoamento gás-líquido horizontal.(Fletcher e Schultz, 1995a)	24
3.3	Mapa de mistura para bomba. (Fletcher e Schultz, 1995a)	24
3.4	Mapa de mistura para pontos de injeção.(Fletcher e Schultz, 1995a)	25
3.5	Curva de regime de transferência de calor.(Fletcher e Schultz, 1995a)	29
3.6	Elementos característicos do código RELAP5.(Reis, 2009)	32
4.1	Representação do Circuito de Circulação Natural.	34
4.2	Geometria do Circuito de Circulação Natural (CCN).	35
4.3	Geometria do Aquecedor.	36

4.4	Trocador de Calor.	38
4.5	Localização dos termopares no CCN.	39
4.6	Nodalização do CCN.	41
4.7	Vazão do pleno superior.	44
4.8	Nodalização do pleno superior.	45
4.9	Nodalização do pleno superior sem o volume 25.	45
4.10	Comparação da temperatura no pleno superior para as duas nodalizações.(Potência elétrica: 800W; Vazão de resfriamento: 15l/h)	46
4.11	Vazão de entrada no Tanque de Expansão.	46
4.12	Influência da circulação natural do Tanque de Expansão nas vazões dos volumes da Perna Fria.(Potência elétrica: 800W; Vazão de resfriamento: 15l/h)	47
4.13	Comparação entre as vazões para diferentes perda de carga.(Potência: 800W; Vazão de resfriamento: 15l/h)	48
4.14	Potência térmica.(Potência elétrica: 800W; Vazão de resfriamento: 15l/h)	49
4.15	Temperatura do centro e do revestimento das resistências.(Potência elétrica: 800W; Vazão de resfriamento: 15l/h)	50
4.16	Pressão do Circuito.(Potência elétrica: 800W; Vazão de resfriamento: 15l/h)	51
4.17	Comportamento da potência retirada pelo Trocador de Calor.(Potência elétrica: 800W; Vazão de resfriamento: 15l/h)	52
4.18	Temperatura da tubulação do Trocador de Calor.(Potência elétrica: 800W; Vazão de resfriamento: 15l/h)	53
4.19	Diferença entre a potência inserida pelas resistências no Aquecedor e a retirada pelo Trocador de Calor.(Potência elétrica: 800W; Vazão de resfriamento: 15l/h)	53
4.20	Diferença entre a temperatura com e sem as estruturas passivas de calor.(Potência elétrica: 800W; Vazão de resfriamento: 15l/h)	54
4.21	Comportamento da temperatura na Perna Quente.(Potência elétrica: 800W; Vazão de resfriamento: 15l/h)	55

4.22	Comportamento da temperatura na Perna Fria.	55
4.23	Comportamento da temperatura no cilindro externo do Trocador de Calor.(Potência elétrica: 800W; Vazão de resfriamento: 15l/h)	56
4.24	Comportamento da temperatura no cilindro externo do Aquecedor.(Potência elétrica: 800W; Vazão de resfriamento: 15l/h)	57
4.25	Comportamento da temperatura no cilindro interno do Aquecedor.(Potência elétrica: 800W; Vazão de resfriamento: 15l/h)	58
4.26	Comportamento da transferência de calor no cilindro interno do Aquecedor.(Potência elétrica: 800W; Vazão de resfriamento: 15l/h)	59
4.27	Diferença de temperatura entre a entrada e saída do <i>downcomer</i> .(Potência elétrica: 800W; Vazão de resfriamento: 15l/h)	59
4.28	Temperatura da parte inativa das resistências.(Potência elétrica: 800W; Vazão de resfriamento: 15l/h)	60
4.29	Temperatura na entrada da perna fria.(Potência elétrica: 800W; Vazão de resfriamento: 15l/h)	61
4.30	Temperatura no <i>downcomer</i> .(Potência elétrica: 800W; Vazão de resfriamento: 15l/h)	62
4.31	Temperatura no pleno inferior. (Potência elétrica: 800W; Vazão de resfriamento: 15l/h)	63
4.32	Temperatura na entrada da perna quente. (Potência elétrica: 800W; Vazão de resfriamento: 15l/h)	64
4.33	Temperatura em 1/3 da perna quente. (Potência elétrica: 800W; Vazão de resfriamento: 15l/h)	65
4.34	Temperatura na entrada do trocador de calor.	65
4.35	Vazão volumétrica na perna fria. (Potência elétrica: 800W; Vazão de resfriamento: 15l/h)	66
4.36	Temperatura na entrada do <i>downcomer</i> (TC1): (a) 600W, (b) 800W, (c) 1000W e (d) 1100W para os casos monofásicos.	68
4.37	Temperatura na entrada do Pleno inferior(TC11): (a) 600W, (b) 800W, (c) 1000W e (d) 1100W para os casos monofásicos.	69

4.38	Temperatura na parede da entrada da Perna Quente(TC2): (a) 600W, (b) 800W, (c) 1000W e (d) 1100W para os casos monofásicos.	70
4.39	Temperatura na entrada da Perna Quente(TC3): (a) 600W, (b) 800W, (c) 1000W e (d) 1100W para os casos monofásicos.	71
4.40	Temperatura na parede em 1/3 da Perna Quente(TC4): (a) 600W, (b) 800W, (c) 1000W e (d) 1100W para os casos monofásicos.	72
4.41	Temperatura em 1/3 da Perna Quente(TC5): (a) 600W, (b) 800W, (c) 1000W e (d) 1100W para os casos monofásicos.	73
4.42	Temperatura na parede da entrada do Trocador de Calor(TC6): (a) 600W, (b) 800W, (c) 1000W e (d) 1100W para os casos monofásicos.	74
4.43	Temperatura na entrada do Trocador de Calor(TC7): (a) 600W, (b) 800W, (c) 1000W e (d) 1100W para os casos monofásicos.	75
4.44	Temperatura na parede da saída do Trocador de Calor(TC8): (a) 600W, (b) 800W, (c) 1000W e (d) 1100W para os casos monofásicos.	76
4.45	Temperatura na saída do Trocador de Calor(TC9): (a) 600W, (b) 800W, (c) 1000W e (d) 1100W para os casos monofásicos.	77
4.46	Temperatura na entrada da água de resfriamento(TC10): (a) 600W, (b) 800W, (c) 1000W e (d) 1100W para os casos monofásicos.	78
4.47	Temperatura na saída da água de resfriamento(TC12): (a) 600W, (b) 800W, (c) 1000W e (d) 1100W para os casos monofásicos.	79
4.48	Vazão na Perna Fria do lado primário: (a) 600W, (b) 800W, (c) 1000W e (d) 1100W para os casos monofásicos.	80
4.49	Temperatura na entrada do <i>downcomer</i> (TC1): (a) 600W, (b) 800W, (c) 1000W e (d) 1100W para os casos bifásico.	81
4.50	Temperatura na entrada do Pleno Inferior(TC11): (a) 600W, (b) 800W, (c) 1000W e (d) 1100W para os casos bifásico.	82
4.51	Temperatura na parede da entrada da Perna Quente(TC2): (a) 600W, (b) 800W, (c) 1000W e (d) 1100W para os casos bifásico.	83
4.52	Temperatura na parede da entrada do Trocador de Calor(TC6): (a) 600W, (b) 800W, (c) 1000W e (d) 1100W para os casos bifásico.	84

4.53	Temperatura na parede da saída do Trocador de Calor(TC8): (a) 600W, (b) 800W, (c) 1000W e (d) 1100W para os casos bifásico. . . .	85
4.54	Vazão na Perna Fria do lado primário: (a) 600W, (b) 800W, (c) 1000W e (d) 1100W para os casos bifásico.	86

Lista de Tabelas

2.1	Comparação entre os regimes de escoamento do RELAP em comparação a resultados experimentais (Sabundjian et al., 2007).	8
4.1	Regimes de escoamento em função do potência de aquecimento e vazão de resfriamento	67

Lista de Símbolos

A	Área transversal total do escoamento
B_x	força de inércia na direção x
B_y	força de inércia na direção y
C	Coefficiente de massa virtual
D	Diâmetro hidráulico
$DISS_k$	Efeito de fricção das bombas e da parede
DWO	Onda de densidade de oscilatória
f	Indicador da fase líquida
FWF	Coefficiente de arrasto do líquido na parede
FWG	Coefficiente de arrasto do vapor na parede
FIF	Coefficiente de arrasto do fluido na interface
FIG	Coefficiente de arrasto do vapor na interface
F_{ik}	Magnitude da força de fricção interfacial por unidade de volume da fase k
g	Indicador da fase vapor
h_k	Coefficiente de transferência de calor para fase k
i	Indicativo de interface

k	Indicativo de fase
m	Indicador de mistura
P	Pressão do sistema
p	perímetro molhado da mistura
p_k	perímetro molhado da fase k
Q	Taxa de transferência de calor volumétrica total
Q_i	Transferência de calor na interface
Q_k	Taxa de transferência de calor volumétrica na fase k
Re	Número de Reynolds
t	Tempo
TC	Termopar
T_{refk}	Temperatura de referência da fase k
T_w	Temperatura da parede
U_k	Energia interna da fase k
v_k	Velocidade da fase k
x	Dimensão no eixo x
y	Dimensão no eixo y
w	Indicativo de parede
α	Fração de vazio
α_k	Fração volumétrica da fase k
α_{kw}	Fração da fase na parede
ϵ	Rugosidade da superfície

ϕ_S	Fator de forma para canais não circulares
Γ	Coefficiente de transferência de massa entre fases
Γ_i	Massa trocada na interface
Γ_w	Energia referente ao vapor gerado na parede
ϕ_k	Multiplicador <i>Darcy-Weisbach</i> para fricção de duas fases
$\lambda_{L,Re}$	Fator de fricção laminar para determinado Re
$\lambda_{T,Re}$	Fator de fricção turbulento para determinado Re
θ	Solução da Equação 3.20
ρ_k	Densidade da fase k

Capítulo 1

Introdução

A relevância da indústria nuclear no cenário mundial aumentou nos últimos anos com a notória necessidade de explorar cada vez mais fontes de energia, devido à crescente demanda e aos efeitos das mudanças climáticas. Entre as energias alternativas a nuclear demonstra maior capacidade como fonte de energia de base, pois independe do clima, ocupa pequena área territorial, e gera menor quantidade de poluentes atmosféricos em relação às termoelétricas tradicionais, possuindo também uma tecnologia já avançada em relação a outras fontes alternativas como a eólica e a solar.

A segurança nuclear é uma das áreas mais estudadas pela comunidade científica em todo o mundo. E tem no uso de sistemas passivos, como a circulação natural para resfriamento do núcleo do reator, um importante conceito de segurança, pois são dependentes apenas das leis físicas imutáveis e de fenômenos naturais, simplificando sistemas e diminuindo a dependência de sistemas elétricos e mecânicos, como bombas, por exemplo. Pelo uso desse conceito, os reatores avançados e inovadores são apresentados como soluções para a garantia de segurança, devido a redução de probabilidade de acidentes, a não emissão de radioatividade e a não contaminação da fauna e flora (International Atomic Energy, 2005).

A circulação natural é resultado da força de flutuação, que ocorre pela diferença de densidade induzida termicamente pela transferência de calor entre uma fonte quente e uma fonte fria, localizada em uma cota mais elevada em relação à fonte quente. As mudanças de densidade podem ser induzidas em função da temperatura,

circulação natural monofásica, ou por mudança de fase (vapor/líquido), circulação natural bifásica. A função primária da circulação natural é transportar o calor da fonte quente para fonte fria, e sua principal vantagem é que não depende de nenhum equipamento externo, trabalha sempre na eficiência máxima do sistema, sendo limitada apenas pela soma das resistências dos componentes e tubulação (International Atomic Energy, 2012). Este sistema está incorporado ao reator avançado de água pressurizada (APWR) como dispositivo de segurança, para operar em condição de subcriticalidade na parada programada ou em emergência, em geral, quando a impossibilidade do uso da circulação forçada por falta de alimentação elétrica ou na fase final de resfriamento. O sistema passivo de remoção de calor residual é composto por um trocador de calor, instalado no tanque de armazenamento de água, ligado a por tubulações a perna quente e perna fria do reator. Para o adequado funcionamento deste circuito, a parte inferior do trocador de calor deve situar-se em posição acima do circuito primário, de modo a que possa surgir uma vazão de circulação natural necessária ao resfriamento do núcleo. O trocador de calor do tanque de armazenamento entra em operação, a partir do desligamento da bomba primária de resfriamento do núcleo (Lemos, 2014).

Os sistemas de circulação natural são mais suscetíveis às instabilidades que os sistemas de circulação forçada, pois qualquer perturbação no equilíbrio de forças os levará a um comportamento oscilatório, mesmo nos casos em que eventualmente um estado estável é novamente esperado. Como resultado, tanto a circulação natural monofásica quanto a bifásica apresentam instabilidade, oriundas das combinações de parâmetros geométricos e operacionais, tais como a altura e o comprimento do circuito, bem como a potência térmica e o fator de atrito do sistema (International Atomic Energy, 2005).

Algumas dessas instabilidades têm sido estudadas pela comunidade científica em todo o mundo, tanto pela importância para projetos de equipamentos para a transferência de calor, como pelo interesse em aspectos físicos e matemáticos envolvidos na previsão do comportamento instável do transiente. Ao longo de décadas experimentos são realizados em instalações experimentais, que apresentam características de similaridade e escalonamento em relação às instalações nucleares inte-

grais, fazendo uso de fontes de diferentes valores de potência elétrica, de geometrias de circuitos e de volumes de fluido.

Com a evolução dos computadores, a aplicação dos métodos numéricos reduziu muito o tempo de resposta dos resultados, e a tendência é diminuir mais ainda, na medida em que os computadores e processadores evoluem, tornando viável a utilização de programação em simulações de acidentes e de transferência de calor em reatores. Alguns dos mais complexos problemas atualmente em estudo envolvem o transporte de massa, impulso e energia nos sistemas contendo múltiplas fases (gás, líquido e sólidos) durante o regime de circulação natural.

Diversos programas foram desenvolvidos pela comunidade científica internacional com o intuito prever o comportamento de plantas nucleares e modelar seus fenômenos característicos. Entre esses programas computacionais os códigos da família RELAP mostram-se adequado para simular o fenômeno de circulação natural, pois foi um programa originalmente desenvolvido para estudar acidentes de perda de refrigerante do reator, sendo propício a simular fenômenos termo-hidráulicos a baixa pressão e vazão, condições afeitas à circulação natural.

Os códigos RELAP tem sido amplamente utilizado pela literatura para simular transientes e acidentes que podem ocorrer em reatores *LWR* (*Light Water Reactor* - Reatores de Água Leve), tais como: perda de refrigerante por pequena ou grande ruptura, perda de água de alimentação dos GVs, perda de potência elétrica externa, redução da vazão de resfriamento do reator e transientes previstos sem o desligamento do reator (Fletcher e Schultz, 1995a)

O versão RELAP5/MOD3.2 emprega o modelo de dois fluidos para descrever a termo-hidráulica do escoamento bifásico. Esse modelo é baseado em conjunto de volumes de controle conectados entre si por junções representando o escoamento do fluido. Para esse conjunto é resolvido numericamente um sistema de 6 equações diferenciais unidimensionais para conservação de massa, momento e energia das fases líquido e vapor, além de uma equação para o boro solúvel e outra para os gases não condensáveis. As relações constitutivas utilizadas no RELAP5 / MOD3.2 incluem modelos para determinar os regimes de escoamento e modelos relacionados com cisalhamento interfase, troca de calor e transferência de massa, fricção da parede

entre outros fenômenos (Fletcher e Schultz, 1995a).

1.1 Circulação Natural

A circulação natural de um fluido ocorre basicamente pela diferença de densidades entre uma camada mais quente que sobe e outra mais fria que desce. Apenas as leis da física fornecem o mecanismo necessário para a movimentação do fluido. Em um sistema de circulação natural conforme mostrado na Figura 1.1, a presença das fontes quente e fria causam uma diferença de densidade entre as pernas verticais do sistema e conseqüentemente uma diferença de pressão entre os pontos a e b.

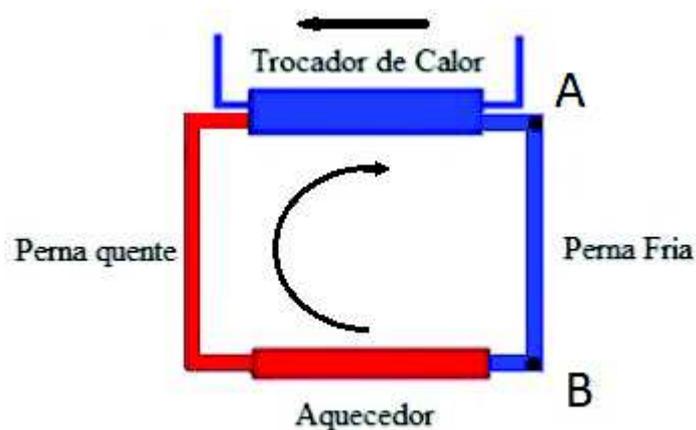


Figura 1.1: Fenômeno de Circulação Natural.

Quanto às características do escoamento, verifica-se que a vazão aumenta com a potência do sistema e conseqüente maior será a retirada de calor. As perdas de carga nos sistemas de circulação natural também desempenham um papel vital nos estados estacionário e transiente, interferindo na vazão e na estabilidade do sistema. Um fator importante que afeta a perda de pressão é a geometria e em um reator nuclear, temos que lidar com várias formas geométricas básicas (tubos circulares, válvulas, etc.) e uma série de dispositivos especiais, como feixes de varetas, trocadores de calor, válvulas, bombas, etc.

A natureza do escoamento em relação ao estado do fluido (monofásico ou bifásico e laminar ou turbulento), e também o padrão de escoamento (bolha, pistonado,

anular, etc) são características que influenciam diretamente no desempenho termo-hidráulico da circulação.

A principal vantagem de um sistema de circulação natural é a simplicidade. A eliminação de alguns componentes pode simplificar bastante a construção, operação e manutenção do sistema. Além disso, a não utilização das bombas e da diminuição da quantidade de tubulação necessária também eliminam cenários de acidentes associados à perda de vazão, acidentes de ruptura da vedação da bomba e reduz as chances de um acidente de perda de refrigerante por ruptura da tubulação.

Outra vantagem é que a distribuição da vazão em núcleos com canais paralelos é muito mais uniforme do que em um sistema de circulação forçada. Além disso, as características da vazão em função da potência também são melhores em um sistema de circulação natural, com a vazão aumentando em função da potência mesmo em sistemas bifásicos. Enquanto em um sistema bifásico de circulação forçada, a vazão diminui com o aumento de potência.

A principal desvantagem desses sistemas é a baixa energia cinética associada. Para aumentar a vazão com uma potência fixa, se exigiria um aumento na altura do circuito ou uma diminuição na perda de carga total, sendo que qualquer um dos quais pode aumentar os custos da planta. Em geral, o fluxo de massa através de um núcleo refrigerado por circulação natural é baixo. Como resultado, a potência máxima permitida é menor, necessitando-se de um volume maior do núcleo em comparação com sistema de uma circulação forçada com a mesma potência. Além disso, núcleos com grandes volumes podem resultar em problemas para controlar a estabilidade do sistema.(International Atomic Energy, 2005)

Embora a instabilidade seja comum aos sistemas de circulação forçada e natural, o último é menos estável. Isto é atribuível à natureza não-linear do fenômeno, com ocorrência de múltiplas soluções estáveis onde qualquer alteração na força motriz afeta a vazão que por sua vez afeta a força motriz que pode levar a um comportamento oscilatório cíclico ou não-cíclico.(International Atomic Energy, 2012)

As características e o comportamento das instabilidades de escoamentos em circulação natural dependem de vários fatores, como geometria do sistema, condi-

ções iniciais de operação, parâmetros de controle, etc. Os fenômenos de instabilidade mais abordados em geral são as instabilidades de *Ledinegg* e as de ondas de densidade (International Atomic Energy, 2005). Estes são tipos de instabilidade que são determinadas pela relação entre a vazão e perda de carga do circuito. Como a perda de carga de um sistema é influenciada pela densidade do fluido, mudanças na densidade ao longo do sistema, alteram a relação de equilíbrio estabelecida, levando a um comportamento instável.

Uma onda de densidade é uma perturbação na densidade do fluido, que viaja ao longo de um canal aquecido com uma velocidade diferente do meio. Segundo Bergles et al. (1981), são as instabilidades mais comuns em sistemas bi-fásicos. As mudanças na densidade ao longo do sistema alteram as relações de equilíbrio o que leva a um comportamento oscilatório ao longo do circuito. O período destas oscilações é da mesma ordem de grandeza do tempo que o fluido leva para atravessar o sistema. A instabilidade de *Ledinegg*, é dada em homenagem ao pesquisador que a registrou pela primeira vez. Esta instabilidade envolve uma mudança súbita na vazão mássica, a qual pode ocorrer por exemplo após um repentino aumento na fração de vazio induzido pelo fluxo crítico de calor.

As instabilidades de escoamento bifásico também podem ser classificadas como cíclicas ou não cíclicas, segundo Tong e Weisman (1979) . As cíclicas apresentam um comportamento que começa com o aumento da fração de vazio, que em consequência diminui a perda de pressão. Esta redução da perda de pressão, por sua vez, produzirá um aumento da vazão e uma posterior redução da fração de vazio e o ciclo se repetirá. As instabilidades aperiódicas são equivalentes às instabilidades de *Ledinegg*. Mapas de estabilidade semelhantes aos apresentados na Figura 1.2 são úteis para avaliar a instabilidade de um sistema.

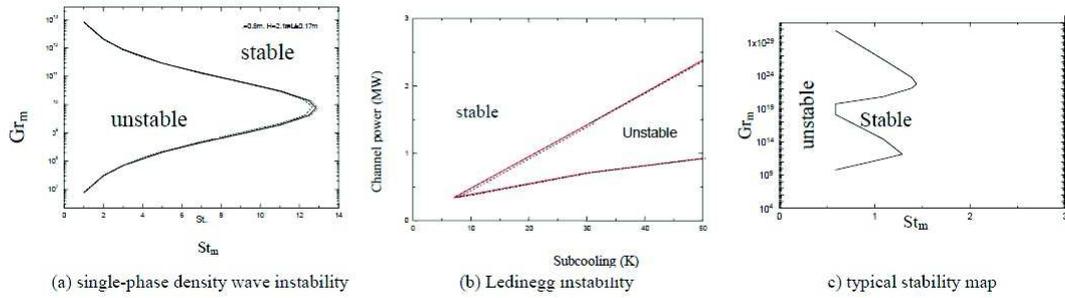


Figura 1.2: Mapas de instabilidade.(International Atomic Energy, 2005)

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é modelar o Circuito de Circulação Natural (CCN) do Laboratório de Termo-hidráulica Experimental do Instituto de Engenharia Nuclear da Comissão Nacional de Energia Nuclear (LTE/IEN/CNEN) utilizando o código computacional RELAP5/MOD3.2 e estudar a influência dos parâmetros operacionais no seu comportamento.

A modelagem do CCN no RELAP5/MOD3.2 foi realizada de tal forma a permitir que os parâmetros de entrada potência térmica e vazão de resfriamento fossem alterados gerando uma gama de combinações possíveis. Tais resultados serão comparados com dados experimentais da própria instalação, visando também avaliar possíveis instabilidades oriundas dos métodos numéricos empregados.

1.3 Organização do Trabalho

O trabalho está organizado da seguinte forma. No Capítulo 2 apresenta-se uma revisão da literatura sobre a utilização do código RELAP5 na simulação de circulação natural. Já no Capítulo 3 são mostrados os conceitos básicos do código RELAP5/MOD3.2. O Capítulo 4 apresenta a instalação experimental, a descrição do modelo empregado para simulação, e são apresentados os resultados obtidos pelos métodos experimentais e teóricos, e as discussões destes resultados. O capítulo 5 apresenta as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Neste capítulo serão abordados os estudos realizados em artigos da literatura para circulação natural em regimes monofásico e bifásicos utilizando código computacional RELAP5.

Sabundjian et al. (2007) estudaram fenômenos de circulação natural em regimes de uma e duas fases usando o código RELAP5. Eles apresentaram a comparação entre os resultados teóricos e experimentais para o regime de uma e duas fases. A comparação entre os resultados mostra uma boa concordância, Figura 2.1, entre os resultados experimentais e os resultados oriundos do RELAP5

Tabela 2.1: Comparação entre os regimes de escoamento do RELAP em comparação a resultados experimentais (Sabundjian et al., 2007).

Tempo (s)	RELAP5	Experimental
4640	Pistonado	Bolha
4653	Anular disperso	Transição bolha de alta mistura/disperso
4660	Pistonado	Transição bolha de alta mistura/disperso
4664	Anular disperso	Intermitente agitado
4665	Transição Anular/Pistonado	Anular
4666	Transição Anular/Pistonado	Intermitente agitado
4674	Transição Pistonado/Anular	Intermitente
4682	Pistonado	Intermitente
4683	Pistonado	Transição Intermitente /Bolha

D'Auria et al. (1997) discutiram a capacidade do código em prever a instabilidade na circulação natural monofásica. Um circuito experimental foi construído e uma série de experimentos para diferentes faixas de potência foi realizado a fim de analisar a instabilidade. Os resultados dos experimentos foram comparados com resultados obtidos pelo modelo do circuito do RELAP5/MOD3.2. Concluiu-se que o código foi capaz de calcular a vazão para a circulação natural monofásica, principalmente quando o regime atinge a condição estacionária. Em relação às oscilações, o código não obteve boa concordância e o mapa de estabilidade oriundo do código não foi condizente com o mapa de estabilidade experimental. A estabilidade da circulação natural é fortemente afetada pelas condições iniciais e pela dinâmica geral do sistema.

Ambrosini e Ferreri (1998) e Ambrosini e Ferreri (2003) discutiram o efeito do erro de truncamento na estabilidade linear da circulação monofásica em simulações numéricas. Eles realizaram diversas simulações com RELAP5/MOD3.2 e compararam com dados experimentais. Concluíram que os erros de truncamento afetam fortemente a estabilidade para determinados problemas de circulação natural, sendo influenciados pela discretização espacial e pelo passo de tempo adotado. Também concluíram que, conforme esperado, métodos de segunda ordem se comportam muito melhor que o de primeira ordem, apresentando efeitos numéricos mais fracos e uma convergência mais rápida. O código RELAP5 mostrou-se propenso a problemas provocados pela instabilidade numérica em situações de instabilidade de fluxo.

Misale et al. (1999) realizaram experimentos, Figura 2.1 para circulação natural monofásica em dois diferentes códigos computacionais, *CATHARE* e RELAP5. Os resultados foram analisados e comparados com dados experimentais obtidos pelo *MTT-1 loop*, um circuito de circulação natural retangular realizado pela *DITEC* na universidade de Genova. Os códigos *CATHARE* e RELAP5, em termos absolutos, apresentaram fraca concordância com os dados experimentais. O código *CATHARE* mostrou capacidade de prever o estado estacionário após o transiente inicial, mas não foi capaz de prever as instabilidades. O código RELAP5 conseguiu prever algumas instabilidades mas não no mesmo nível dos apresentados pelos experimentos. Mesmo com os problemas apresentados, devido ao fato desses fenômenos

não poderem ser analisados por modelos simples, o uso dos códigos termo-hidráulicos ainda é incentivado pelos autores para análise de circulação natural monofásica.

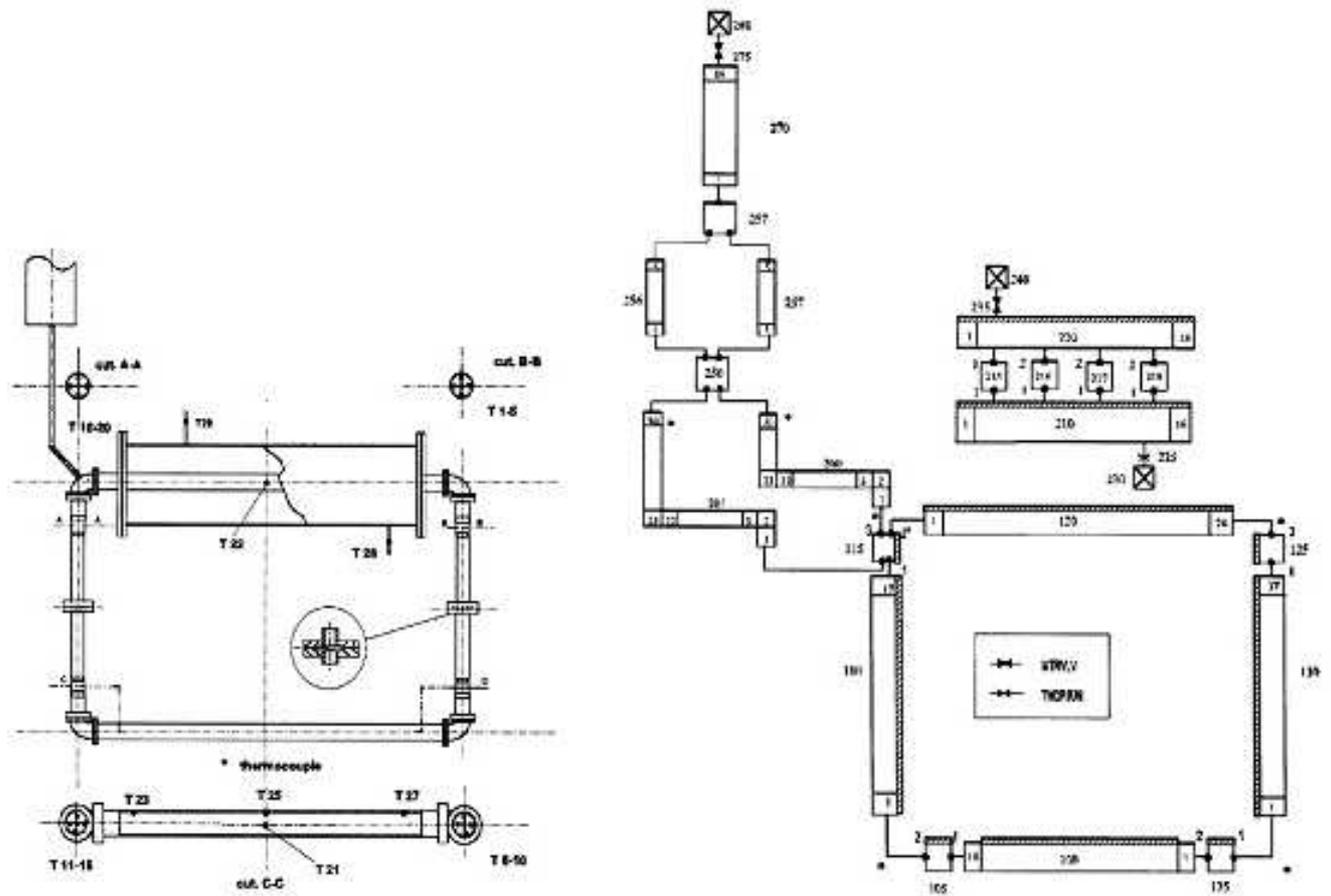


Figura 2.1: Montagem experimental e representação no RELAP5 (Misale et al., 1999).

Lakshmanan e Pandey (2010) utilizaram o RELAP5 para estudar numericamente o comportamento da circulação natural em canais paralelos sob baixas potência e pressão e compararam os resultados com um modelo em escala de um *BWR*. Foram realizadas simulações em condições iguais de potência em ambos os canais e também com condição de potência diferente em cada um dos canais. Para situação de potências iguais, observou-se que as oscilações estavam em fase, Figura 2.2, porém quando havia uma diferença entre as potências dos canais foi possível perceber pela simulação, Figura 2.3, a diferença de fase para oscilação da vazão de cada canal.

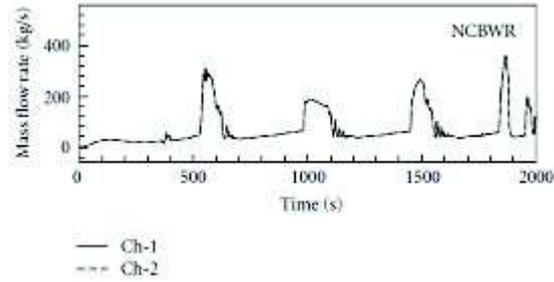


Figura 2.2: Vazão para canais paralelos com a mesma potência (Lakshmanan e Pandey, 2010).

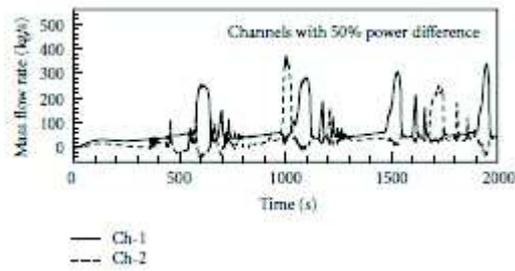


Figura 2.3: Vazão para canais paralelos com potências diferentes (Lakshmanan e Pandey, 2010).

Vileiniskis e Kaliatka (2003) discutiram sobre a análise de incertezas e de sensibilidade para um evento da perda das bombas principais da planta nuclear de Ignalina. As oito bombas principais são utilizadas para fazer a circulação forçada da água de resfriamento em reatores do tipo RBMK. A análise termo-hidráulica deste evento foi realizada usando o código *Best-Estimate* RELAP5/MOD3.3. Uma análise de incerteza e sensibilidade em diferentes partes do circuito principal foi realizada e permitiu verificar a influência dos parâmetros separadamente nos resultados. Análise indicou que a circulação natural proporciona um resfriamento adequado no caso de perda de todas as bombas, e que o reator é resfriado de forma segura.

Martin e Taylor (1992) apresentaram uma comparação entre resultados experimentais e os obtidos com o código RELAP5/MOD3 para condição de baixa vazão em circulação natural. O código RELAP5/MOD3 foi avaliado em relação aos dados de uma seção de teste de 12,50 polegadas composta por dois tubos concêntricos verticais com água que fluindo verticalmente para cima em ambos os tubos, Figura 2.4. O tubo interno era de aço inoxidável e aquecido uniformemente. O tubo exterior era policarbonato transparente e não aquecido. O procedimento experimental realizou uma matriz de 24 testes, com condições de circulação forçada e natural, com fluido aquecido e não aquecido, os testes também foram realizados em diferentes pressões. Nove dos testes representativos das condições dos experimentos foram analisados usando o código RELAP5/MOD3. A análise dos testes resultou de modo geral boa concordância com a experiência em relação a vazão. No entanto, uma série de problemas foram observados durante as simulações com o RELAP5/MOD3. Estes problemas estão ligados à geometria, à perda de dimensão e aos fatores de forma.

Arne et al. (1993) apresentaram uma avaliação do RELAP5/MOD2 em comparação os dados do Teste de Circulação Natural da *Yong-Unidade Gwang 2*. Os resultados da comparação revelaram que o código prevê de maneira adequada os comportamentos macroscópicos dos parâmetros hidráulicos no sistema primário e secundário. No trabalho também foi realizado um estudo de sensibilidade. Verificou-se o efeito da taxa de descarga de vapor no primário na temperatura do circuito primário. Durante o processo de circulação natural a temperatura mostrou-se muito

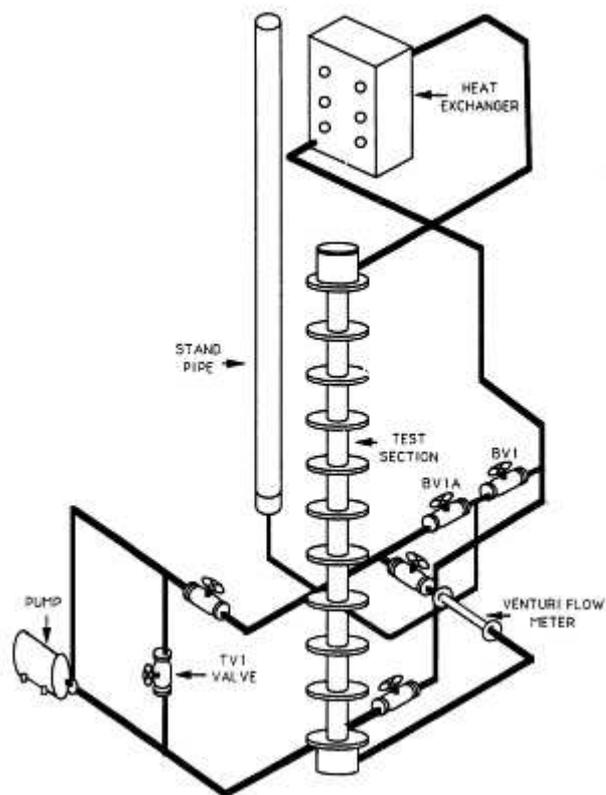


Figura 2.4: Montagem experimental (Martin e Taylor, 1992).

sensível a esta taxa.

Mangal et al. (2012) realizou uma averiguação sobre a aplicabilidade do código RELAP5 para simular sistemas de circulação natural e conclui que sua aplicação ainda é limitada. O código foi capaz de prever o comportamento da circulação natural, mas por outro lado as observações acerca da instabilidade ainda não são satisfatórias. Para estudar a aplicabilidade do código RELAP5 para simular a circulação natural foram realizadas diversas simulações para situações monofásicas e bifásicas, comparando os resultados com dados experimentais de duas instalações. Uma é o *High Pressure Natural Circulation Loop* (HPNCL) com um único canal aquecido e a outra é o *Parallel Channel Loop* (PCL). Simulações foram feitas para a condição de circulação natural monofásica e bifásica para uma ampla gama de condição de pressão e potência. Os erros entre os resultados do código e os dados experimentais para condição de vazão constante durante a circulação natural, foram utilizados para chegar uma distribuição de erros. A comparação entre a frequência de oscilação e a amplitude também foram utilizadas. Os autores concluíram que simulações utilizando o código RELAP5 são dependes principalmente da nodalização adotada. Sendo assim o código pode ser utilizado para prever as oscilações para uma determinada geometria e condições iniciais, mas uma mudança nessas condições contribui fortemente para possíveis discrepâncias.

Guozhi et al. (2013) realizaram um estudo de circulação natural bifásica utilizando o código RELAP5/MOD3, para situação pós-acidente de perda de refrigerante. A simulação foi realizada para diferentes pressões da contenção e potência de calor do *corium*. Além disso, o efeito de parâmetros termo-hidráulicos como a pressão da contenção, potência do *corium* na superfície interna superior, condição de sub-resfriamento e nível da água são avaliados. Resultados obtidos por uso de fórmulas empíricas e cálculo numérico foram utilizados comparar com os resultados obtidos pelo RELAP5/MOD3. E os resultados obtidos foram razoáveis. As informações obtidas podem ser úteis para os projetistas e operadores para avaliação de circulação natural bifásica pós-acidente.

Kozmenkov et al. (2012) desenvolveu um modelo realista em RELAP5 da instalação CIRCUS e a validação foi realizada através de comparação com dados experi-

mentais. Três testes CIRCUS a baixa pressão ($\approx 1\text{bar}$) com instabilidade induzidas foram simulados com o código RELAP5. Os autores chegaram ao seguintes comentários e conclusões. Os cálculos realizados demonstram a habilidade do RELAP5 para simular instabilidades induzidas na circulação natural em sistemas de baixa pressão. Uma modelagem mais detalhada da geometria da instalação do CIRCUS melhora a concordância dos resultados. Apesar do comportamento da estabilidade ser dominado pelos fenômenos de aquecimento e da tubulação de ascensão, pequenas mudanças de temperatura e pressão são determinadas pelo comportamento do circuito inteiro.

Rabiee et al. (2016) estudaram a estabilidade da vazão da circulação natural circuito experimental SHUNCL que foi projetado e construído na Universidade de Shiraz, tendo investigado o efeito da variação da vazão devido as mudanças de fluxo de calor. Além disso, a dependência em relação a alguns parâmetros como pressão do sistema, grau de sub-resfriamento, comprimento da chaminé e diâmetro do orifício foram avaliados com base no código RELAP5/MOD3.2, que foi validado e ajustado através de dados experimentais. É notável que o comportamento do sistema e, em particular, vazão mássica, mostra uma sensibilidade significativa em relação ao fluxo de calor. Em relação aos outros parâmetros constatou-se que em baixas pressões o sistema é mais instável devido a mudanças de densidade consideráveis. A diminuição do sub-resfriamento leva ao crescimento da fração de vazio reduzindo também a estabilidade do sistema. Reduzindo o comprimento da chaminé, a vazão aumenta, o que leva à instabilidade mais rapidamente. Ao aumentar o diâmetro do orifício a vazão, tornando o sistema mais instável.

Bajs et al. (2000) nodalizaram a instalação BETHSY usando a chamada abordagem *slice* e utilizaram o código RELAP5/MOD3.2. E compararam os resultados com dados experimentais e com resultados de nodalização desenvolvida anteriormente para o código RELAP5/MOD2. A nodalização *slice* tem 3 vezes mais *nós* do que a nodalização desenvolvida anteriormente e utilizou aproximadamente 3,5 vezes o tempo de CPU para a solução do mesmo transiente. Os resultados mostram que a utilização fornece informações mais detalhadas. Porém a nodalização não forneceu resultados qualitativamente melhores do que adotados pela nodalização

RELAP5/MOD2. Uma das possíveis razões para tal resultado, poder ser a baixa contribuição dos efeitos da gravidade durante os transientes. O desenvolvimento da nodalização *slice* provou ser um bom exercício para o treinamento pela IAEA, que abordaram tópicos relacionados ao desenvolvimento da nodalização e qualificação.

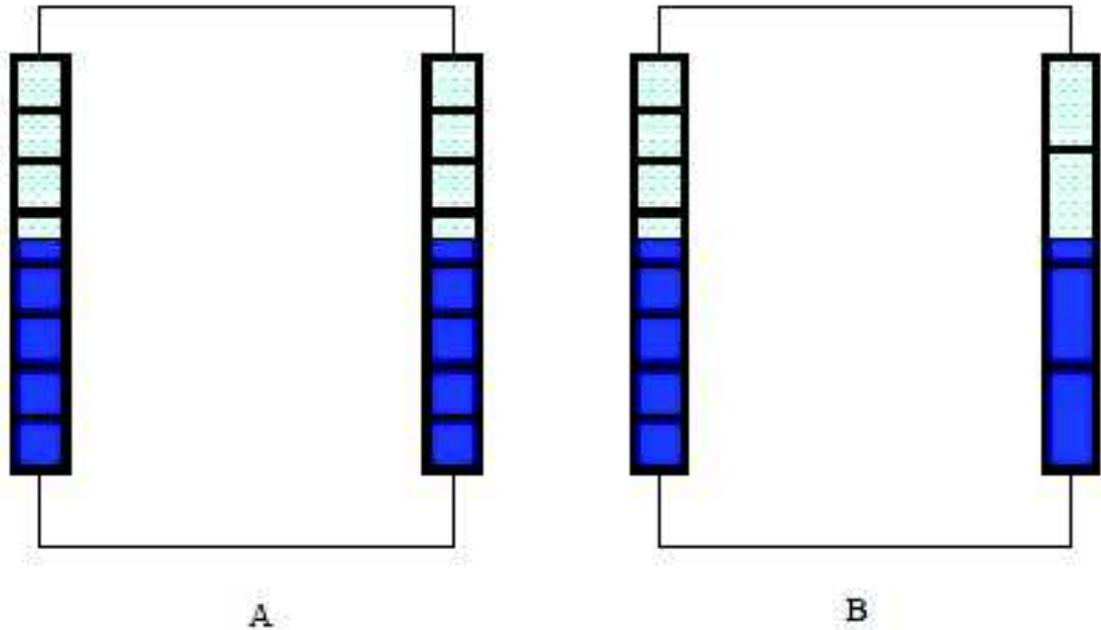


Figura 2.5: (A) nodalização *slice* e (B) nodalização não-*slice* (Bajs et al., 2000).

Mousavian et al. (2004) realizaram 3 modelagens diferentes para um circuito fechado de circulação natural retangular, a primeira através do método de diferenças finitas (análise não-linear), outra através da aplicação do método de perturbação (análise linear) e por último utilizando o código RELAP5. Os resultados dos diferentes métodos foram comparados entre si, e com dados experimentais do *Genoa loop* (*LOOP #1*). Os resultados da análise numérica e do código do sistema RELAP5 mostraram que um bom acordo com dados experimentais de *LOOP#1*, Figura 2.6.

Zhou et al. (2013) realizaram extensas simulações, Figura 2.7 para estudar a aplicabilidade do código RELAP5 para simular as oscilações de ondas de densidade (DWO) em canais retangulares estreitos, comparando os resultados com dados experimentais. Foram utilizadas duas seções de teste: à primeira são apenas duas seções retangulares estreitas e a outra apresenta dois canais retangulares, porém com um

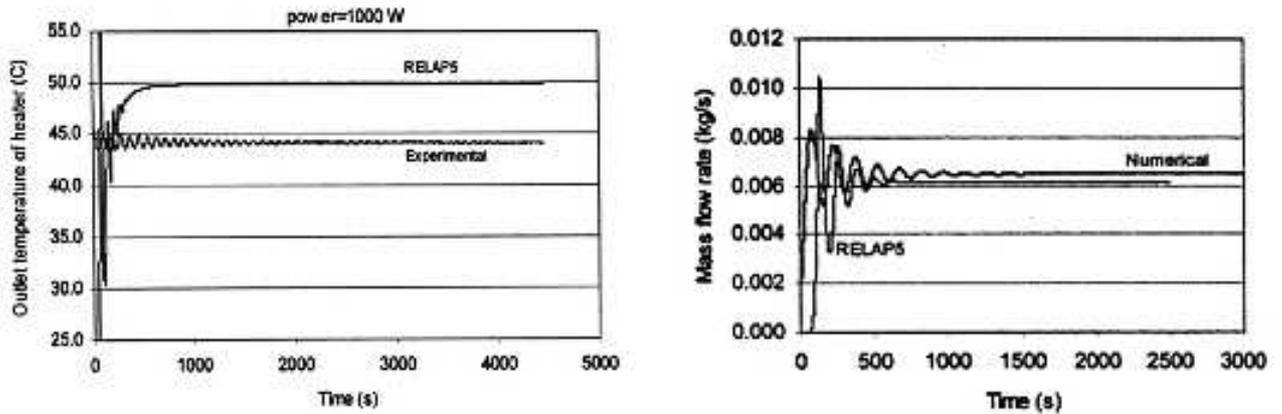


Figura 2.6: Comparação entre os resultados experimentais e do RELAP5 (Mousavian et al., 2004).

grande canal de desvio. As simulações foram feitas para avaliar o comportamento termo-hidráulico e os limites da instabilidade da vazão para uma ampla gama de pressão, grau de resfriamento e condições de fluxo de calor. Os erros entre os resultados do código e os dados experimentais para os limites de instabilidade para diversas condições operacionais possibilitou chegar a uma estimativa de erro para o código. A condição de DWO para dois canais estreitos e para os dois canais com o desvio estão razoavelmente de acordo com os dados experimentais. A previsão de instabilidade pelo RELAP5 está em $\pm 20\%$ de erro, o que é um resultado razoável de predição. Contudo, o erro entre o valor estimado pelo RELAP e os dados experimentais torna-se mais elevado sob condições de baixa pressão com sub-resfriamento alto e a baixa vazão com alta pressão. Nesse sentido, os resultados RELAP5 são satisfatórios em sistemas simples. As diferenças entre resultados do RELAP5 e dos resultados experimentais sugerem mais trabalhos de pesquisa sobre o assunto.

Da literatura revista, observa-se que apesar de alguns pesquisadores concluírem que as diferentes versões do código RELAP5 são capazes de prever o comportamento do fenômeno de circulação natural, o código ainda apresenta deficiências em prever as instabilidade inerentes do fenômeno, principalmente em regime bifásico. Por outro lado, os resultados do RELAP5 mostraram por diversas vezes boa concordância dos parâmetros termo-hidráulicos dos códigos em relação aos dados experimentais

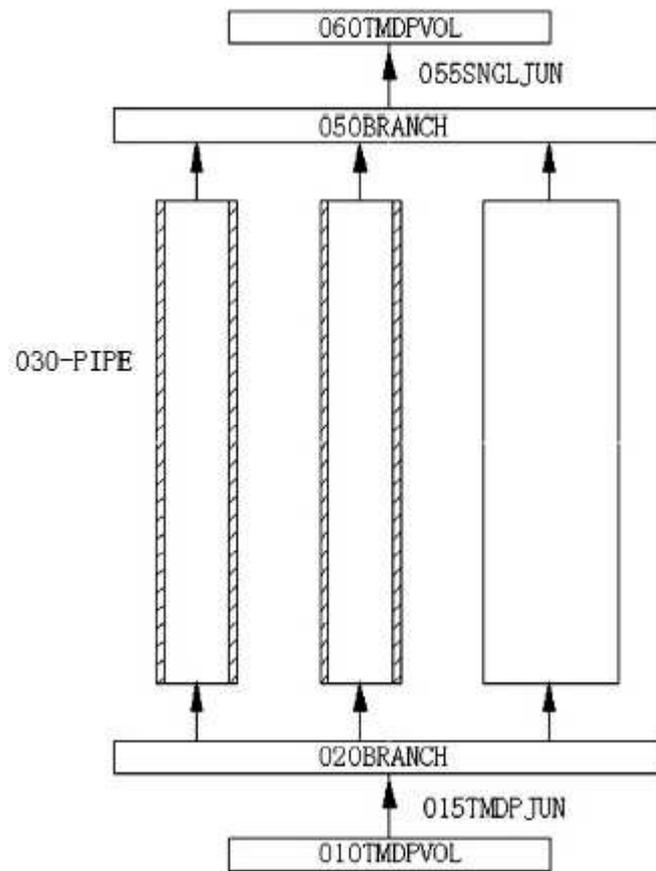


Figura 2.7: Nodalização do RELAP5 (Zhou et al., 2013).

em situações de estabilidade. Por fim, a capacidade do código RELAP5 em simular a circulação natural ainda não estão estabelecidas, principalmente em sistemas complexos, necessitando de mais estudos.

Estudar o Circuito de Circulação Natural do IEN, utilizando o código RELAP5/MOD3.2, está em consonância com a literatura apresentada. E também alinhada aos objetivos do projeto do CCN que consistem estudar o fenômeno de circulação natural e validar modelos computacionais através de comparação com dados experimentais, para uma possível utilização deste modelo no auxílio ao licenciamento de novas centrais nucleares.

Capítulo 3

Código Computacional

RELAP5/MOD3.2

O código computacional de análise de transientes para reatores de reator de água leve (LWR), RELAP5, foi desenvolvido no Idaho Laboratório Nacional de Engenharia (INEL) para a Comissão de Regulamentação Nuclear dos EUA (NRC). O código inclui as ferramentas necessárias para desenvolver estratégias de avaliação e mitigação de acidentes, ações do operador e licenciamento da instalação. O código inclui muitos modelos de componentes genéricos a partir dos quais sistemas complexos podem ser simulados. Os modelos de componentes incluem bombas, válvulas, tubos, estruturas de calor, cinética pontual, aquecedores elétricos, turbinas entre outros. Sistemas de controle podem também ser simulados. Estes processos podem ser definidos através de operações algébricas ou lógicas.

3.1 Modelos Físicos

O modelo hidrodinâmico é baseado em volumes de controle, que podem ser considerados como tubos de corrente com junções de entrada e saída. Propriedades escalares como pressão, energia, densidade e fração de vazio são representadas pela média dentro do volume de controle e são localizadas no ponto central do mesmo. Por outro lado, propriedades vetoriais, tais como, as velocidades são localizadas nas junções. (Sabundjian et al., 2007)

O RELAP5 utiliza um modelo de escoamento bifásico, não homogêneo e de não equilíbrio. Este modelo é baseado numa formulação unidimensional de tubos de corrente na quais as propriedades do escoamento são assumidas constantes sobre a seção transversal. O modelo termo-hidráulico do RELAP5 resolve 6 equações de campo para as 6 variáveis dependentes, a pressão (P), as energias internas específica de cada fase (U_g, U_f), fração de vazão (α_g e α_f), velocidades das fases (v_g, v_f), onde os índices indicam a fase gasosa (g) e líquida (f) respectivamente. As variáveis independentes são tempo (t) e distância (x). As equações básicas para o modelo de não equilíbrio de dois fluidos consistem nas equações de continuidade (Eq.3.1 e Eq.3.2), momento (Eq.3.3 e Eq.3.4) e energia (Eq.3.5 e Eq.3.6) para cada uma das fases consideradas. (Fletcher e Schultz, 1995a)

Equações de continuidade

$$\frac{\partial \alpha_g \rho_g}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial \alpha_g \rho_g v_g A}{\partial x} = -\Gamma_g. \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial \alpha_f \rho_f}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial \alpha_f \rho_f v_f A}{\partial x} = -\Gamma_f. \quad (3.2)$$

Equações de momento

$$\begin{aligned} \alpha_g \rho_g A \frac{\partial v_g}{\partial t} + \frac{1}{2} \alpha_g \rho_g A \frac{\partial v_g^2}{\partial x} = & -\alpha_g A \frac{\partial P}{\partial x} + \alpha_g \rho_g B_x A - \alpha_g \rho_G A F W G(v_g) \\ & + \Gamma_g A (v_g - v_f) - \alpha_g \rho_g A F I G(v_g - v_f) \\ & - C \alpha_g \alpha_f \rho_m A \left[\frac{\partial (v_f - v_g)}{\partial t} + v_f \frac{\partial v_g}{\partial x} - v_g \frac{\partial v_f}{\partial x} \right]. \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \alpha_f \rho_f A \frac{\partial v_f}{\partial t} + \frac{1}{2} \alpha_f \rho_f A \frac{\partial v_f^2}{\partial x} = & -\alpha_f A \frac{\partial P}{\partial x} + \alpha_f \rho_f B_x A - \alpha_f \rho_F A F W F(v_f) + \\ & \Gamma_f A (v_f - v_g) - \alpha_f \rho_f A F I F(v_f - v_g) \\ & - C \alpha_f \alpha_g \rho_m A \left[\frac{\partial (v_f - v_g)}{\partial t} + v_g \frac{\partial v_f}{\partial x} - v_f \frac{\partial v_g}{\partial x} \right]. \end{aligned} \quad (3.4)$$

Equações de energia

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha_g \rho_g U_g}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial \alpha_g \rho_g U_g v_g A}{\partial x} = -P \frac{\partial \alpha_g}{\partial t} - \frac{P}{A} \frac{\partial}{\partial x} (\alpha_g v_g A) \\ + Q_{wg} + Q_{ig} + \Gamma_{ig} h_g + \Gamma_W h_g + DISS_g. \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha_f \rho_f U_f}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial \alpha_f \rho_f U_f v_f A}{\partial x} = -P \frac{\partial \alpha_g}{\partial t} - \frac{P}{A} \frac{\partial}{\partial x} (\alpha_f v_f A) + Q_{wf} \\ + Q_{if} + \Gamma_{if} h_f + \Gamma_w h_f + DISS_f. \end{aligned} \quad (3.6)$$

onde ρ_f , ρ_g e ρ_m são respectivamente as densidades da fase líquida, da fase gasosa e da mistura, Γ é o coeficiente de transferência de massa entre as fases, A indica a área de escoamento, B_x representa a força inércia na direção x e C é coeficiente de massa virtual (Andersen et al., 1977). Os termos FWG , FIG , FWF e FIF , são parte do coeficiente de arraste da interface e variam conforme o regime de escoamento, $DISS_g$ e $DISS_f$ são as somas dos efeitos de fricção das bomba e da parede. Q_{wg} e Q_{wf} são as taxas de transferência de calor volumétrica por fase e Q é a taxa volumétrica total. Os coeficientes Γ_I , Γ_W e Q_I representam respectivamente a massa trocada entre as fases, o vapor gerado na parede, e a troca de calor na interface.

3.2 Relações de Fechamento

As relações de fechamento incluem mapas de regime de escoamentos baseados nos trabalhos de Barnea et al. (1980) e Barnea et al. (1985), que são utilizados para calcular o arrasto e cisalhamento, transferência de calor entre as fases e coeficiente de massa virtual. Os mapas de regime são baseados no volumes hidrodinâmicos ou nas junções, e são utilizados para controlar as relações constitutivas, como transferência de calor e massa e a fricção na parede. São utilizados quatro mapas, horizontal para escoamento em tubos, vertical para escoamento em tubos e feixes, mapa de mistura para bombas e mapa de mistura perto de pontos de injeção.

Mapa de regime para escoamento vertical

O mapa vertical, Figura 3.2 é utilizado para ângulos entre 45° e 90° , e possui nove regimes escoamento, quatro para *pre-CHF*, quatro pos-CHF e um para estratificado. Os *pre-CHF* são escoamento em bolhas, *slug*, anular e gotículas.

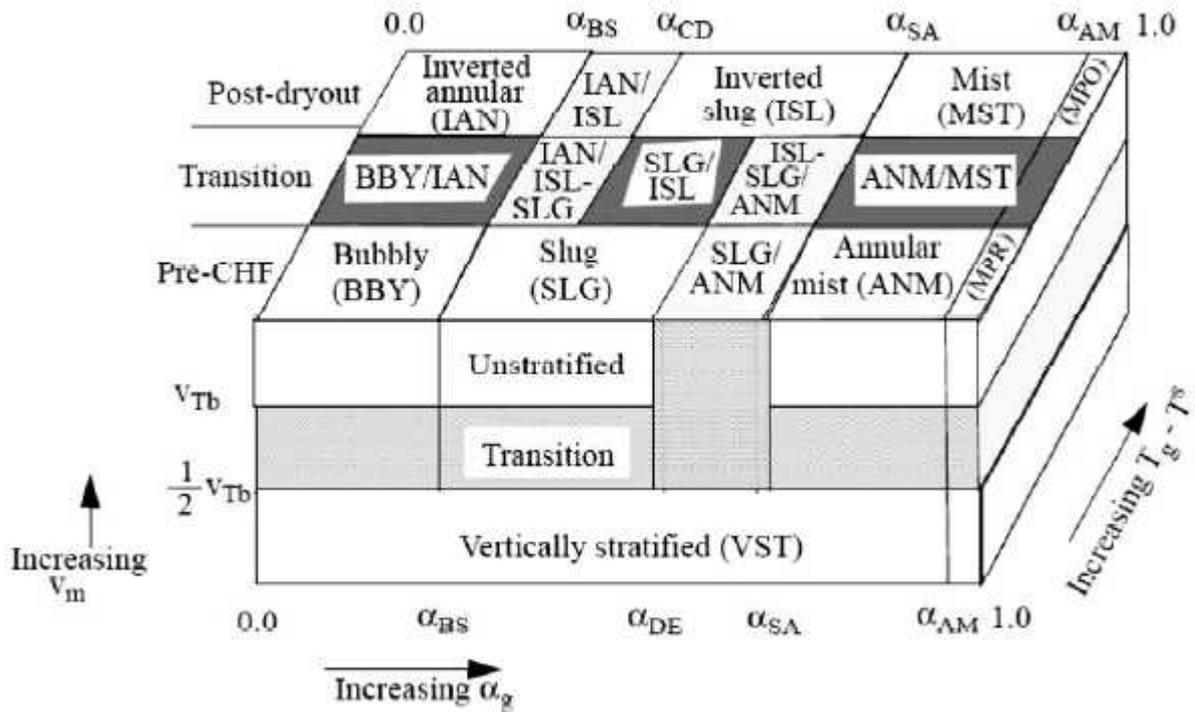


Figura 3.1: Mapa de escoamento gás-líquido vertical.(Fletcher e Schultz, 1995a)

Mapa de regime para escoamento horizontal

O mapa horizontal é semelhante ao vertical, mas usado para ângulos inferiores a 45° , e não está incluído o regime pos-CHF. Os tipos de escoamento são, estratificação horizontal, escoamento em bolha, *slug*, anular, goticulado *pre-CHF*.

Mapa de regime para alta mistura

O mapa de fluxo de alta mistura, Figura 3.3 utilizados em bombas é baseado na fração de vazio e consiste em regime de bolha para $\alpha < 0.5$, goticulado para

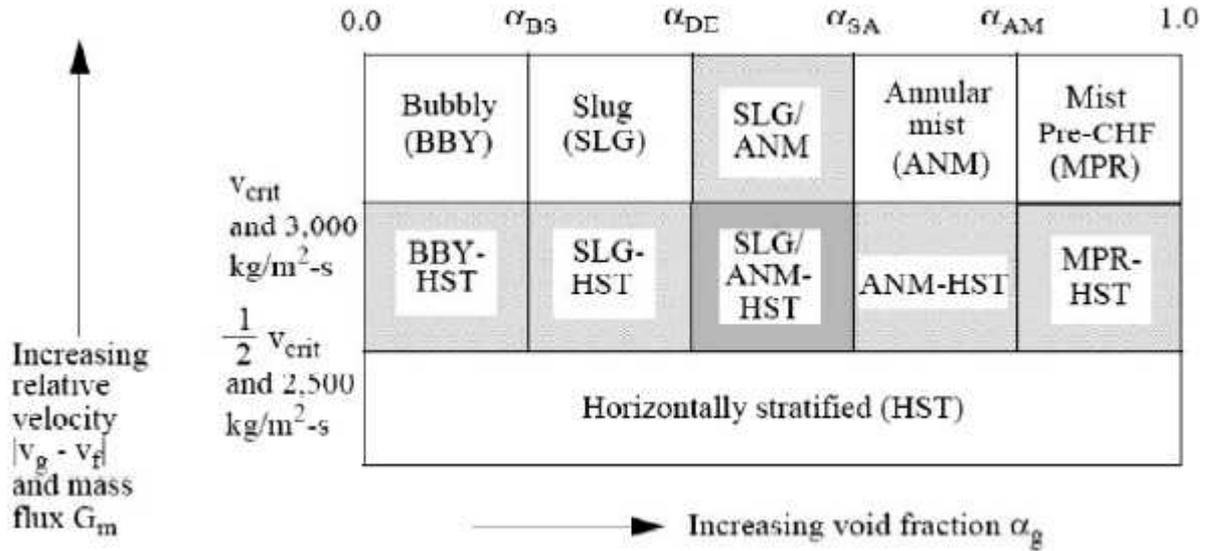


Figura 3.2: Mapa de escoamento gás-líquido horizontal.(Fletcher e Schultz, 1995a)

$\alpha > 0.95$ e um regime de transição para $0.5 < \alpha < 0.95$.

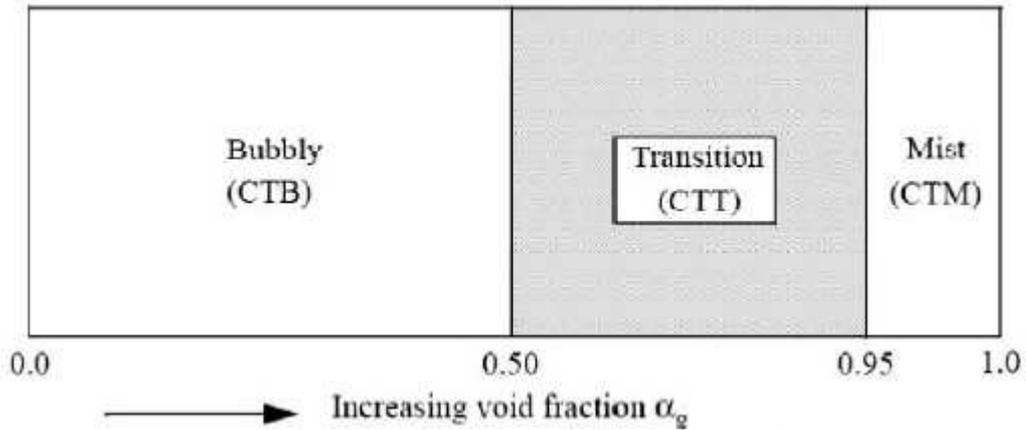


Figura 3.3: Mapa de mistura para bomba. (Fletcher e Schultz, 1995a)

mapa de regime para pontos de injeção

Nenhum dos três mapas contempla porém, o processo de condensação que ocorre nos pontos de injeção da água de emergência, sendo necessário um quarto mapa, Figura 3.4

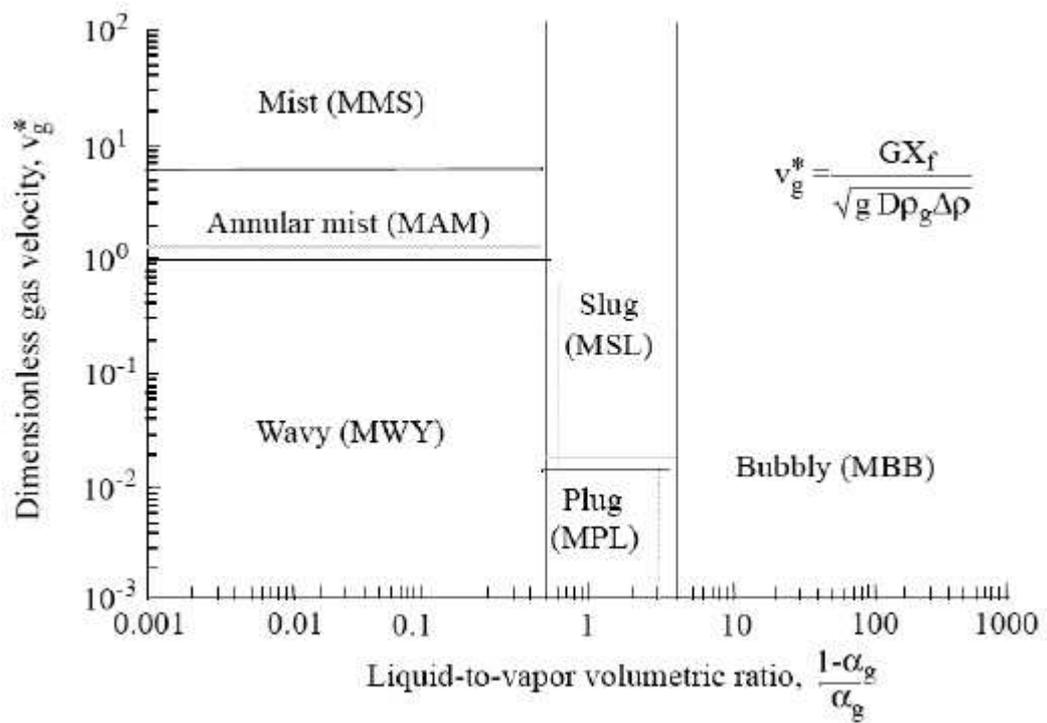


Figura 3.4: Mapa de mistura para pontos de injeção.(Fletcher e Schultz, 1995a)

Fator de Fricção na Interface

O fator de fricção na interface, F_{ig} para o vapor e F_{if} para o líquido utilizado nas equações de momento são expressos em termos da coeficiente de fricção entre as fases de acordo com as Equações 3.7 e 3.8. O RELAP5/MOD3.2 utiliza dois diferentes modelos de fricção na interface, o método *drift flux* e o método *drag coefficient*. O *drift flux* é utilizado nos escoamentos de bolha e *slug*, para escoamento vertical. E o *drag coefficient* em todos os outros regimes.

$$F_{ig} = \alpha_g \rho_g F_{IG}(v_g - v_f), \quad (3.7)$$

$$F_{if} = \alpha_f \rho_f F_{IF}(v_f - v_g). \quad (3.8)$$

Coeficiente de massa virtual

O coeficiente de massa virtual é determinado pelo regime de escoamento nas junções, para $C > 1/2$ é apropriado para escoamento em bolhas ou disperso, e $C = 0$ para escoamentos estratificados. Mas atualmente no RELAP5/MOD3.2 um valor de $C > 1/2$ é utilizado em todos os escoamentos.

$$C = \frac{1}{2} \frac{(3 - 2\alpha_g)}{\alpha_g}. \quad (3.9)$$

Fator de Fricção na Parede

O fator de fricção na parede é determinado baseado no mapa de regime para os volumes. Apenas o efeito cisalhante é considerado e os efeitos de mudanças de áreas abruptas são modelados através de modelos específicos de perda mecânica, mas processos mais complexos necessitam de informações do usuário, através do *input*. Para calcular os fatores de fricção, primeiro é necessário determinar os coeficientes multiplicadores (ϕ_g e ϕ_f) através das Equações 3.10, 3.11, 3.12 e 3.13

$$\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)_{2\phi} = \phi_f^2 \left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)_f, \quad (3.10)$$

$$\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)_{2\phi} = \phi_g^2 \left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)_g, \quad (3.11)$$

$$\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)_f = \frac{\lambda(Re'_f)M_f^2}{2D\rho_f A^2}, \quad (3.12)$$

$$\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)_g = \frac{\lambda(Re'_g)M_g^2}{2D\rho_g A^2}. \quad (3.13)$$

Para implementar os efeitos do escoamento bifásico no cálculo de fricção, deve-se considerar a fração de vazio na parede de acordo com as Equações 3.14 e 3.15.

$$\frac{p_f}{p} = \alpha_{fw}, \quad (3.14)$$

$$\frac{p_g}{p} = \alpha_{gw}, \quad (3.15)$$

onde p_f, p_g , e p são os perímetros molhados de líquido, vapor e mistura. Para o regime de bolhas são utilizadas as Equações 3.16 e 3.17

$$\alpha_{fw} = \alpha_f, \quad (3.16)$$

$$\alpha_{gw} = \alpha_g, \quad (3.17)$$

Para escoamento horizontal estratificado utilizam-se as seguintes Equações 3.18 e 3.19

$$\alpha_{fw} = 1 - \frac{\theta}{\alpha}. \quad (3.18)$$

$$\alpha_{gw} = \frac{\theta}{\alpha}, \quad (3.19)$$

Os parâmetros α_{gw} e α_{fw} são a fração das fases na parede, o parâmetro θ é dado pela Equação 3.20, em que B_y é a força força de inércia na direção y .

$$- \left(\frac{\rho_m}{\rho_f \rho_g}\right)(\rho_f - \rho_g) \left(\frac{\pi D B_y}{4 \sin \theta} \frac{\partial \alpha_g}{\partial x}\right), \quad (3.20)$$

Sendo que θ é relacionado com a fração de vazio usado na Equação 3.21

$$\alpha_g \pi = \theta - \sin \theta \cos \theta, \quad (3.21)$$

Os fatores de fricção são calculados, por correlações para escoamentos laminar, Equação 3.22 ou turbulento, Equação 3.23 com interpolações para regimes de transição, Equação 3.24.

$$\lambda_L = \frac{64}{Re\phi_S}, \quad (3.22)$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_T}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re} \left(1.14 - 2 \log_{10} \left(\frac{\epsilon}{D} - \frac{2.51}{Re} \right) \right) \right), \quad (3.23)$$

$$\lambda_{L,T} = \left(3.75 - \frac{8250}{Re} \right) (\lambda_{T,3000} - \lambda_{L,2200}) + \lambda_{L,2200}, \quad (3.24)$$

onde Re é o número de Reynolds, ϕ_S é um fator de forma para canais não circulares. O parâmetro ϵ é a rugosidade da parede, D o diâmetro hidráulico, λ_L , fator de fricção laminar e λ_T fator de fricção turbulento.

Transferência de calor na parede

O modelo de transferência de calor também é baseado numa aproximação unidimensional para o cálculo das temperaturas e fluxos de calor. Os condutores de calor são conectados aos volumes hidrodinâmicos simulando o fluxo de calor perpendicular ao escoamento. A estrutura de calor é termicamente conectada ao volume hidrodinâmico através de um fluxo de calor que é calculado através de uma correlação de transferência de calor por convecção. As capacidades de modelagem das estruturas de calor são gerais e incluem combustível tipo vareta ou placas com aquecimento nuclear ou elétrico, transferência de calor através de tubos do gerador de vapor e transferência de calor em paredes de tubos e vasos. São representadas pela condução de calor unidimensional em geometria retangular, cilíndrica ou esférica. Fatores de multiplicação de superfície são usados para converter a superfície unitária do cálculo unidimensional para a superfície real da estrutura. As condutividades e capacidades térmicas dos materiais utilizados são fornecidas em forma de tabela ou de função do tempo pelo usuário. A fonte de calor pode variar espacialmente para cada intervalo da malha e temporalmente através da potência nuclear fornecida pela equação de cinética pontual ou através de tabela de potência pelo tempo. As

relações de fechamento incluem a condição de simetria, ou condições adiabáticas além de um pacote de correlações para transferência de calor por convecção, que abrange diferentes regimes de fluxo de calor, como, por exemplo, convecção em uma ou duas fases, ou regimes de transição como ebulição e condensação. O fluxo de calor total na parede é definida pela seguinte Equação 3.25.

$$q'' = h_g(T_w - T_{refg}) + h_f(T_w - T_{reff}), \quad (3.25)$$

com h_g e h_f os coeficientes de transferência de calor de vapor e líquido respectivamente, T_w é a temperatura da parede e T_{refg} e T_{reff} são as temperaturas de referência do vapor e líquido. A seguinte curva, Figura 3.5 é utilizada para definir-se qual correlação é a governante. Muitos fatores são considerados para decidir qual

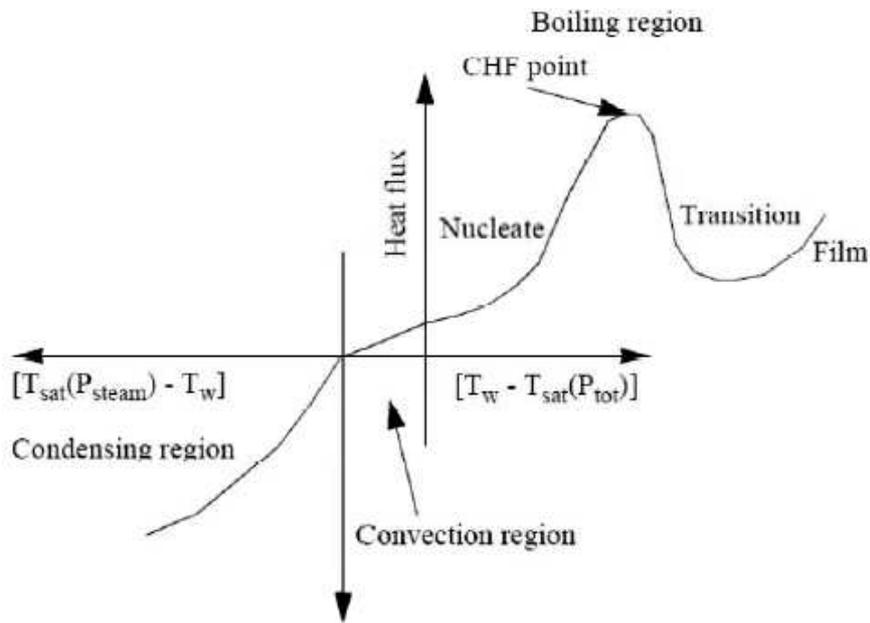


Figura 3.5: Curva de regime de transferência de calor.(Fletcher e Schultz, 1995a)

o coeficiente de transferência de calor é o mais adequado, como por exemplo, a pressão do volume em relação a pressão crítica, temperatura da parede em relação temperatura de saturação, se é um gás não condensável, se é líquido, vapor ou uma mistura.

3.3 Modelo numérico

A solução numérica utilizada pelo RELAP5 tanto para solução das equações de campo como para as de transferência de calor é conhecida como solução semi-implícita, na qual a equação diferencial é resolvida, utilizando as propriedades físicas do passo de tempo anterior, acopladas com informações do passo de tempo atual. Esse método permite uma economia de cálculo, nas simulações de transientes. Porém esse esquema agrega instabilidades numéricas geradas em funções da nodalização, requerendo uma análise de sensibilidade.(Mangal et al., 2012) Tal característica dificulta uma análise de instabilidades hidrodinâmicas, pois filtros numéricos utilizados pelo código podem interferir em fenômenos físicos que apresentam resultados com altas frequências de oscilações. Como é o caso do modelo de *Water packing*, que atua para amenizar os erros numéricos oriundos de trocas rápidas e constantes na fração de vazio nos volumes hidrodinâmicos. Tal filtro ameniza as oscilações, atuando na Pressão calculada semi-implicitamente, mas tal interferência pode esconder oscilações físicas reais de um circuito de circulação natural atuando num regime bifásico com alta frequência de instabilidade devido a ondas de densidade ou instabilidade de *Ledinegg*.(No, 1985)

Devido a isso, um estudo de sensibilidade dos filtros numéricos juntamente ao estudo da sensibilidade geométrica são importantes na avaliação deste tipo de circuito.

3.4 Dados de Entrada

Os dados de entrada necessários à simulação de um sistema complexo, tal como um sistema termonuclear, podem abranger 4 áreas distintas:

Hidrodinâmica

Para modelar os componentes hidrodinâmicos são necessárias todas as áreas e comprimentos de escoamentos e as orientações angulares dos componentes. Além das características da rugosidade do material e interface fluido/parede. E informações

suficientes para calcular a perda de carga (geometria curvas, expansão de área, geometria de válvulas e perda de carga localizada). A Figura 3.6 apresenta os principais componentes utilizados para realizar as modelagens.

Estruturas de Calor

A modelagem das estruturas de calor é definida pela massa e geometria dos componentes, com seus tipos de materiais e propriedades termo físicas (ex. condutividade térmica e calor específico). Também é necessário informar a localização das fontes quentes, a distribuição de temperatura inicial e o tipo de condição de contorno em cada face.

Variáveis Lógicas e de Controle

O sistema de controle dos modelos possui variáveis lógicas ou de controle. As variáveis lógicas são definidas através de relação simples de maior ou menor em relação a parâmetros previamente informados ou a variáveis de controle definidas. As variáveis de controle são definidas por informações de filtros, limites de saturação, tempos de abertura e fechamento de válvulas etc.

Neutrônica

O RELAP5 resolve a equação de cinética pontual necessitando da reatividade inicial, dados sobre a exposição e informações sobre a fração de nêutrons atrasados, fração de produto de fissão, etc.

Neste trabalho apenas os 3 primeiros grupos serão utilizados

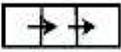
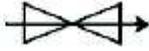
Componente	Identificador	Esquema na nodalização	Uso Principal
Volume simples (<i>single-volume</i>)	SNGLVOL		Representa um segmento de fluxo que não requer um tubo (pipe) ou um extensor (branch).
Tubo (<i>pipe</i>)	PIPE		Representa um canal no sistema, pode ter de 1 a 100 volumes. Quando existe mais de um volume, junções internas conectam os sub-volumes.
Extensor (<i>branch</i>)	BRANCH		Representa um canal que pode ter até 10 junções conectadas a ele.
Junção simples (<i>single-junction</i>)	SNGLJUN		Conecta um componente a outro.
Válvula	VALVE		Simula a presença e o comportamento de seis tipos diferentes de válvulas.
Junção dependente do tempo (<i>time dependent junction</i>)	TMDPJUN		Conecta um componente a outro especificando condições de contorno.

Figura 3.6: Elementos característicos do código RELAP5.(Reis, 2009)

Capítulo 4

Resultados e Discussões

Neste capítulo será descrito o aparato experimental utilizado como referência, a descrição da nodalização do CCN modelado no RELAP5/MOD3.2. E também serão apresentados resultados de temperatura e vazão obtidos de um conjunto de 32 simulações realizadas com a combinação de potência inicial com a vazão do lado secundário.

4.1 Aparato Experimental - CCN do IEN/CNEN

O circuito a ser simulado consiste de 3 partes: aquecedor, trocador de calor e tanque de expansão, como representado na Figura 4.1, e encontra-se no Instituto de Engenharia Nuclear (IEN), no Laboratório de Termo-Hidráulica Experimental (LTE). No projeto e construção do Circuito de Circulação Natural (CCN), foi de vital importância a utilização de parâmetros de similaridade e escala para compatibilização do sistema passivo de remoção de calor residual em PWR de Baixa Energia. Esta instalação experimental foi construída em escala reduzida de 1 : 10 em altura em relação ao AP600.

No início do fenômeno o fluido sai do aquecedor e entra na perna quente, que leva a água para o trocador de calor que possui tubos em seu interior com água a temperatura ambiente para realizar o resfriamento da água vinda do aquecedor.

A água resfriada entra na perna fria que possui uma ligação com um tanque de expansão responsável por proteger o circuito de grandes aumentos de pressão. Na



Figura 4.1: Representação do Circuito de Circulação Natural.

saída da perna fria o fluido retorna ao aquecedor. O processo continuará ocorrendo e a temperatura do circuito tenderá a uma constante com o tempo. O circuito experimental, mostrado na Figura 4.2, é composto pelas seções do aquecedor, trocador de calor, tubulação da perna quente, tubulação da perna fria e tanque de expansão.

O aquecedor funciona de forma análoga ao núcleo do reator AP600, cuja potência térmica gerada equivale em escala à potência de decaimento das reações nucleares no núcleo do reator, em condição de sub-criticalidade. A potência térmica é gerada no aquecedor por 52 resistores elétricos de aquecimento de imersão, com diâmetro externo de $9,5\text{mm}$ e altura total de $1,0984\text{m}$, conforme mostrado na Figura 4.3.

A geometria do aquecedor consiste de um cilindro externo com $0,1413\text{m}$ com $1,1\text{m}$ de altura e outro interno com $0,1143\text{m}$ de diâmetro e $0,712\text{m}$ de altura. Na parte interna do aquecedor, encontram-se as subseções denominadas de *downcomer*, pleno inferior e pleno superior. O *downcomer* é um canal vertical com altura de $0,61\text{m}$, posicionado entre os cilindros interno e o externo do aquecedor. Esta região corresponde à descida do escoamento do fluido primário proveniente da saída da perna fria. O fluido primário escoado pelo *downcomer* é direcionado à entrada do feixe de aquecimento. Esta entrada é denominada de pleno inferior cuja altura é de $0,10\text{m}$.

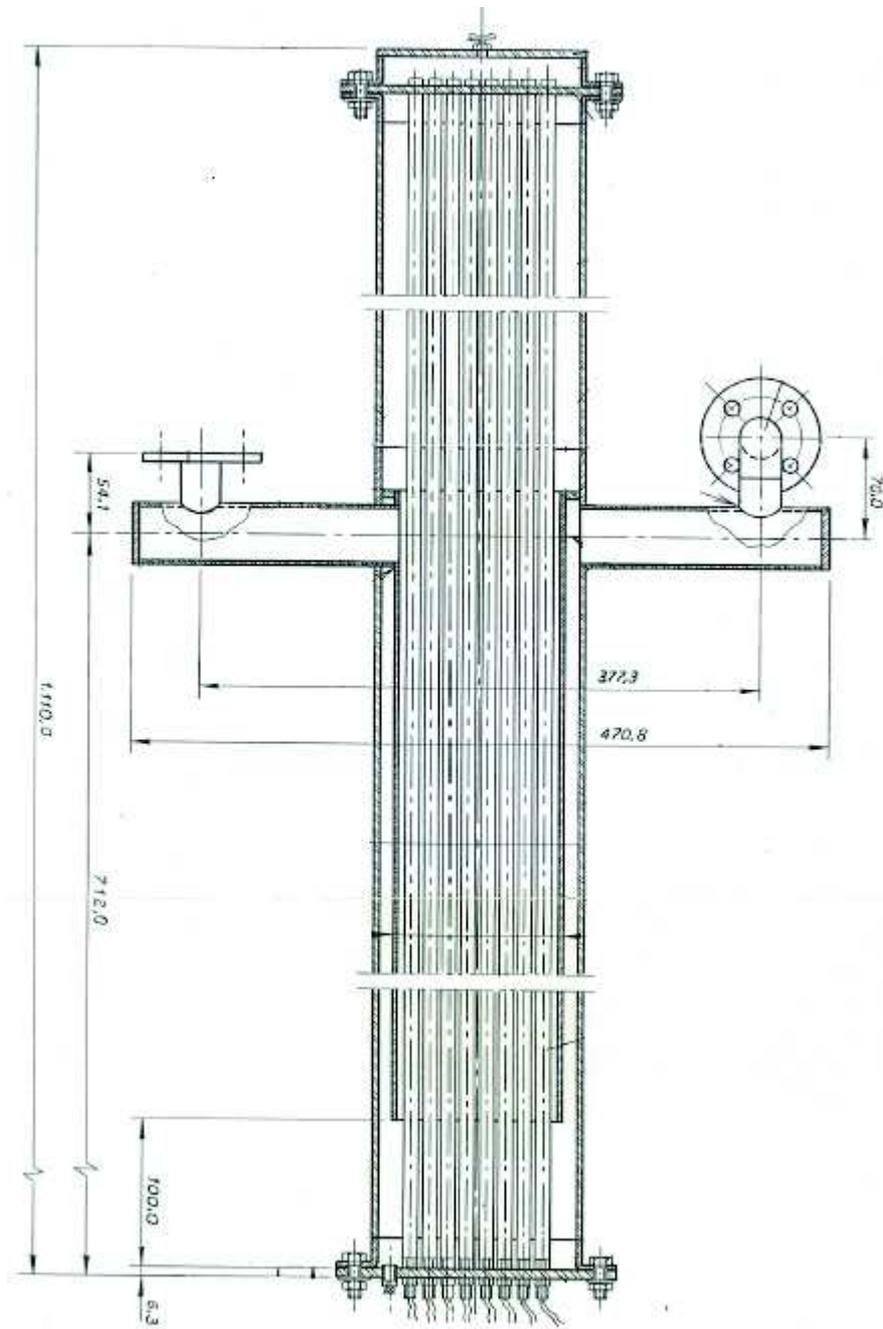


Figura 4.3: Geometria do Aquecedor.

A perna quente é formada por 3 seções flangeadas de tubos com $0,302m$ de comprimento, fabricado em aço inoxidável com diâmetro interno de $0,0234m$. A perna quente tem origem no aquecedor e destina-se à entrada do trocador de calor.

O trocador de calor representa o conjunto trocador-reservatório de recarga de combustível do protótipo de remoção passiva de calor residual (PRHR-HX) (Lemos, 2014). O trocador de calor com altura de $0,60m$, encontra-se situado a $0,644m$ acima da seção ativa de aquecimento, sendo composto por 7 tubos retos verticais de aço inoxidável com $0,031m$ de diâmetro interno, conforme mostrado na Figura 4.4. Os tubos estão montados, internamente, em outro cilindro de $0,40m$ de diâmetro interno, por onde circula a vazão de resfriamento secundário. O trocador de calor é o responsável pela retirada de calor do fluido do sistema primário, através de circulação de água de resfriamento secundário.

Na saída do trocador de calor tem origem a perna fria, que por sua vez leva à entrada do *downcomer*. As tubulações das pernas quente e fria têm diâmetros internos que atendem ao critério de similaridade em relação ao fator de fricção global. Um tubo cilíndrico de aço na posição vertical, denominado de coluna de expansão, com diâmetro interno de $0,20m$ interliga a perna fria ao tanque de expansão, que tem como função absorver as variações de volume do fluido primário circulante e atuar como um pressurizador, encontrando-se parcialmente preenchido com água. Uma válvula de alívio de pressão encontra-se instalada no topo do tanque de expansão, com a função de eliminar sobrepressões advindas de acúmulo de gás e vapor no sistema primário. O tanque de expansão está posicionado a cerca de $2,17m$ a partir da parte inferior da seção do aquecedor.

O sistema primário está termicamente isolado do ambiente do laboratório, por uma camada de lã de vidro de 1 cm de espessura, para revestimento do cilindro do trocador de calor. O circuito secundário do Circuito de Circulação Natural tem sua alimentação de água, através da rede predial. O secundário possui um controlador de vazão no início do circuito. Após a troca de calor entre o sistema primário e secundário a água de resfriamento do sistema secundário é drenada para a rede de esgoto do prédio. A circulação da água de resfriamento no lado secundário do trocador de calor encontra-se na mesma temperatura do ambiente do laboratório.

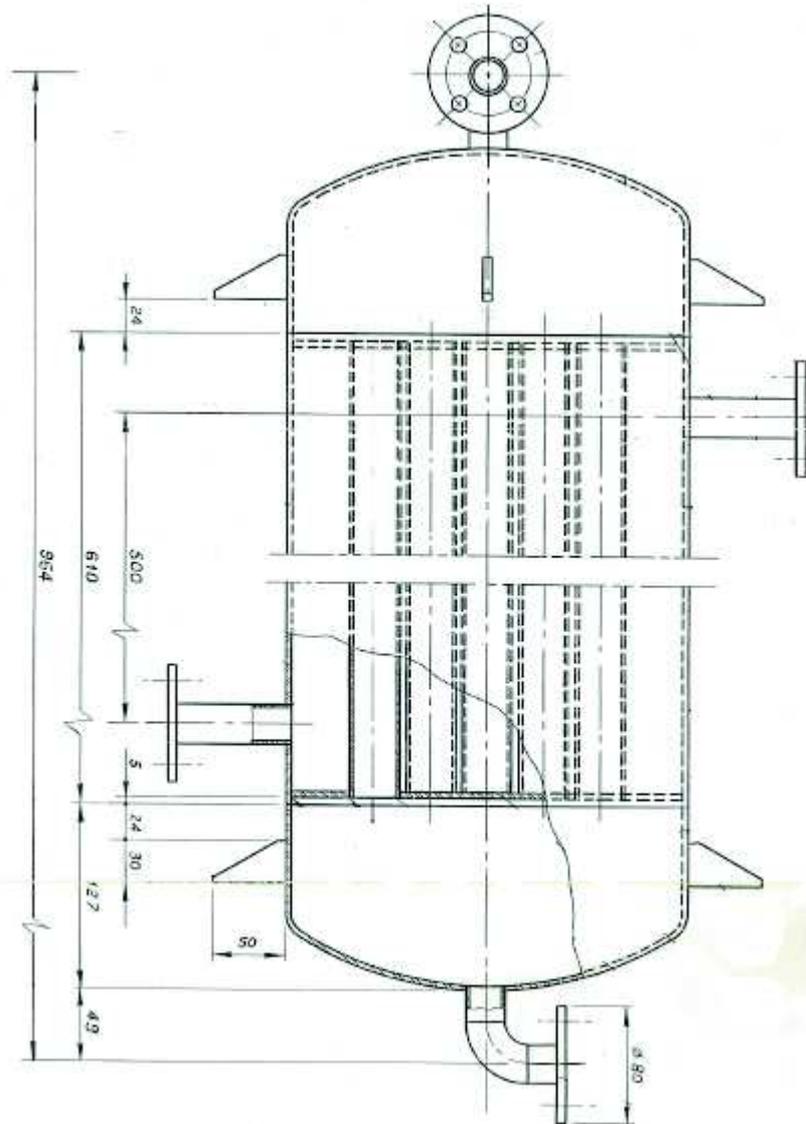


Figura 4.4: Trocador de Calor.

As vazões na perna fria são medidas através de medidor de vazão eletromagnético, posicionado próximo à saída do trocador de calor. As medições de temperaturas do circuito termo-hidráulico são executadas por doze termopares, conforme mostrado na Figura 3.13, que tem como função a medição de temperatura nas regiões de fluido e parede.

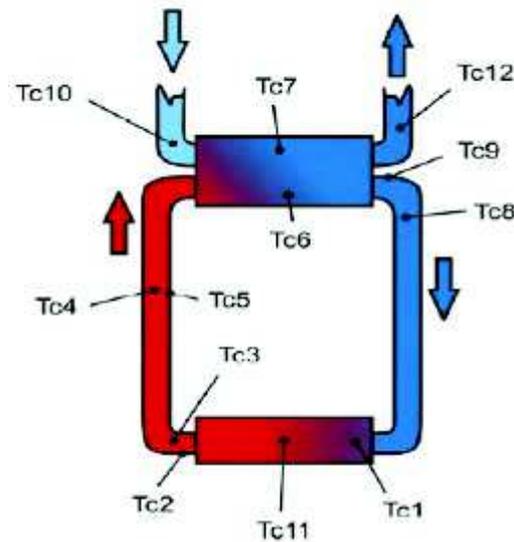


Figura 4.5: Localização dos termopares no CCN.

O termopar $TC1$ mede a temperatura do fluido no *downcomer*. O termopar $TC2$ mede a temperatura da parede na região correspondente à saída do aquecedor e entrada da perna quente. O termopar $TC3$ mede a temperatura do fluido na região correspondente à saída do aquecedor e entrada da perna quente. O termopar $TC4$ mede a temperatura do fluido na região correspondente à $1/3$ do comprimento da perna quente. O termopar $TC5$ mede a temperatura da parede na região correspondente à $1/3$ do comprimento da perna quente. O termopar $TC6$ mede a temperatura do fluido primário, que circula na tubulação, no interior do trocador de calor. O termopar $TC7$ mede a temperatura da parede da tubulação, no interior do trocador de calor, correspondendo à temperatura na interface entre exterior da parede da tubulação do fluido primário e o fluido secundário, próximo à parede da tubulação. O termopar $TC8$ mede a temperatura do fluido primário na região correspondente à saída do trocador de calor e a entrada da perna fria. O termopar $TC9$ mede a

temperatura da parede na região correspondente à saída do trocador de calor e a entrada da perna fria. O termopar $TC10$ mede a temperatura do fluido, do sistema secundário, na entrada do trocador de calor. O termopar $TC11$ mede a temperatura do fluido primário, no pleno inferior, na região correspondente à entrada do aquecedor. O termopar $TC12$ mede a temperatura do fluido secundário, na região correspondente à saída do trocador de calor.

4.2 Nodalização do RELAP5/MOD3.2

Para modelar o circuito de circulação natural pela primeira vez, foi utilizado o conceito de nodalização estruturada (*slice nodalization technique*) a fim de melhorar a capacidade do código de simular o fenômeno de circulação natural. A técnica consiste em que cada corte horizontal feito na nodalização possua volumes na mesma cota Bajs et al. (2000). A diferença de altura entre o aquecedor e o trocador de calor foi mantida em $0,644m$, com uma massa total de água igual a $45Kg$ (Vianna et al., 2017). O esquema geral da nodalização do modelo utilizado no código RELAP5/MOD3.2 para simular o Circuito acima descrito é mostrado na Figura 4.6

4.2.1 Geometria

O aquecedor foi modelado utilizando 17 componentes do número 10 ao 26. Os componentes 10, 11 e 12 são *branches* que formam o bocal de entrada do aquecedor, o componente 12 está ligado ao componente 13 que é um *Annulus* e representa a entrada do downcomer do aquecedor, o componente 13 é dividido em 10 volumes que correspondem à região anular entre o cilindro interno e externo do aquecedor. O fim do *downcomer* é representado pelo componente 14, que é um *branch* e se liga diretamente ao pleno inferior representado pelos *branches* 15 e 16. O volume 15 é a região mais baixa de todo circuito e o componente 16 funciona como a região de distribuição para região aquecida. A região aquecida foi dividida em dois *pipes*, o componente 17 representa apenas um único subcanal, o componente 18 representa o resto da área de escoamento do núcleo do aquecedor. Ambos os componentes foram divididos em 8 partes, com os volumes de 2 a 7 representando a região aquecida.

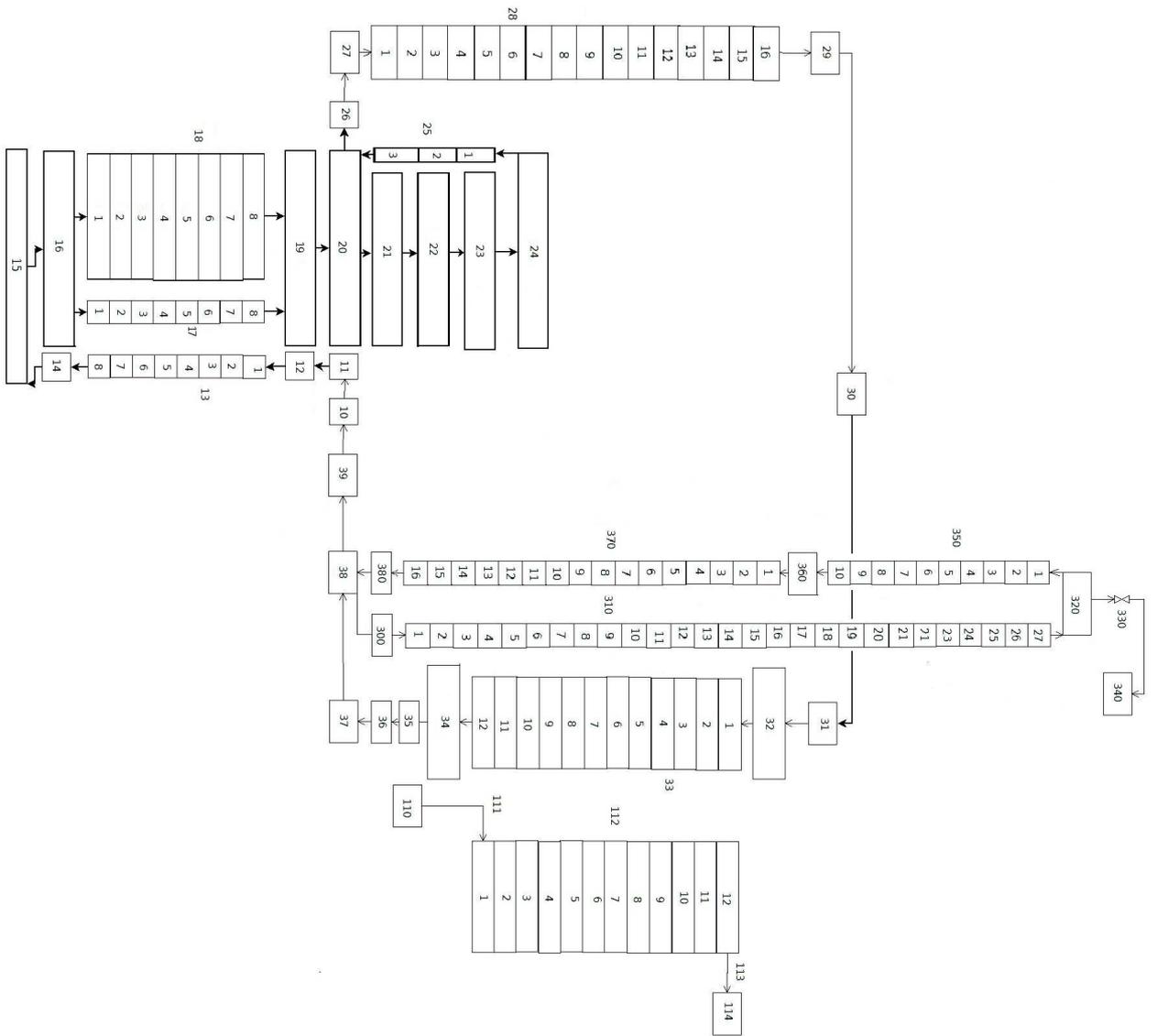


Figura 4.6: Nodalização do CCN.

Essa divisão permite uma avaliação sobre o comportamento nas imediações de uma única vareta assim como seu comportamento. Os volumes de 20 a 25 são *branches* e representam o pleno superior. As áreas de escoamento do aquecedor foram calculadas desconsiderando a área ocupada pelas 52 resistências. A nodalização foi desenvolvida para permitir uma possível circulação no topo do núcleo. O componente 26 é um *branch* e representa o bocal de saída. Os componentes 27 ao 31 representam a Perna Quente. O componente 27 é um *branch* e representa a região horizontal inferior, o componente 28 é um *pipe* dividido em 16 volumes compondo a região ascendente, e os componentes 29 e 30 são *branches* fazendo parte da região horizontal superior. O *branch* 31 é aligação entre a perna quente e o trocador de calor. O trocador de calor do lado primário foi dividido em 3 componentes. Os *branches* 32 e 34, são respectivamente a região de entrada e saída do trocador de calor. A região de troca de calor foi definida pelo *pipe* 33 e dividido em 12 volumes, com área de escoamento equivalente a 7 tubos. A forma do RELAP entender que o escoamento ocorrerá distribuído por 7 tubos, é através dos diâmetros hidráulico dos volumes. Os componentes 110 a 114 formam o lado secundário do trocador de calor. O componente 110 é um volume de controle (*time depend volume*) mantido a temperatura e pressão constantes, o componente 111 é uma junção dependente do tempo (*time depend junction*) e através dela que a vazão do lado secundário é mantida. O volume 112 é um *pipe* e representa o lado *casco* do trocador de calor e é dividido em 12 volumes de forma equivalente ao volume 33. Os componentes 113 e 114 são respectivamente uma *junction* e um volume de controle. Do volume 35 ao 39 são *branches* e representam a perna fria. Ligado à perna fria está o tanque de expansão, representado pelos volumes 300 a 380. A nodalização dele foi realizada a fim de que possa existir circulação natural por ele quando necessário. Os componentes 300 (*branch*) e 310 (*pipe*) representam uma fração do tubo de ascensão, ligada diretamente ao topo do tanque de expansão, que foi representado pelo volume 320 (*branch*). O componente 310 foi dividido em 27 volumes. O componente 330 é uma válvula ligada do topo do tanque ao volume 340, que representa a atmosfera. A válvula se abre com a pressão de 1,4 bar. O componente 350 é o tanque de expansão em si, dividido em 10 volumes. Os componente 360 (*branch*), 370 (*pipe*) e

380 (*branch*) representam a tubulação principal que liga a perna fria ao tanque de expansão, o componente 370 foi dividido em 16 volumes.

Coefficientes de perda de carga localizadas iguais a 1,5 foram inseridos em todas as junções ao longo do circuito.

4.2.2 Estrutura de Calor

As resistências elétricas foram modeladas em 3 regiões radiais, com uma resistência de cobre ao centro, revestido por um material isolante e encapsulado por aço. Foram utilizadas duas estruturas; uma para modelar apenas uma vareta, e a outra para modelar as 51 varetas restantes. A diferença entre elas consiste apenas na área de aquecimento. Cada uma das estrutura de calor, foi dividida em 5 regiões axiais e estão conectadas por troca de calor ao volumes correspondentes à região de aquecimento, volumes 2 a 7 dos componentes 17 e 18 respectivamente. A potência elétrica total foi dividida de maneira proporcional.

O trocador de calor foi modelado através de uma única estrutura, sendo a condição de contorno do lado interno a temperatura do fluido primário e do lado externo a temperatura do fluido secundário.

As partes não ativas das resistências foram modeladas com duas componentes radiais, com material isolante ao centro revestido de aço; elas estão ligadas por troca de calor aos componentes do núcleo. Toda as paredes do Circuito foram modeladas como estruturas de aço de tal forma a serem sumidouros de calor. No aquecedor o cilindro interno possui $0,00211m$ de espessura, o cilindro externo $0,00277m$, todo o resto da tubulação possui espessura de $0,00165m$. O tanque externo do trocador de calor tem espessura de $0,0034m$. As regiões externas das paredes foram mantidas à temperatura constante de $25^{\circ}C$, as paredes internas estão conectadas ao componentes correspondentes, tendo transferência de calor por convecção como condição de contorno.

4.3 Verificação do comportamento do Circuito de Circulação Natural

A nodalização foi realizada de tal forma que fosse possível observar diferentes parâmetros termo-hidráulicos como pressão, temperatura e vazão, como também fenômenos físicos característicos do CCN. O comportamento do Circuito será avaliado com a potência elétrica de $800W$ e $15l/h$. Tais valores foram escolhidos pois essa combinação permanece na região monofásica durante toda a simulação.

A nodalização apresentada na Figura 4.6, foi realizada de tal forma que pudesse haver circulação, no topo do núcleo, Figura 4.7, com a água quente subindo através dos componentes 20,21,22 e 23 até o componente 24, Figura 4.8 e retorne ao bocal pelo componente 25.

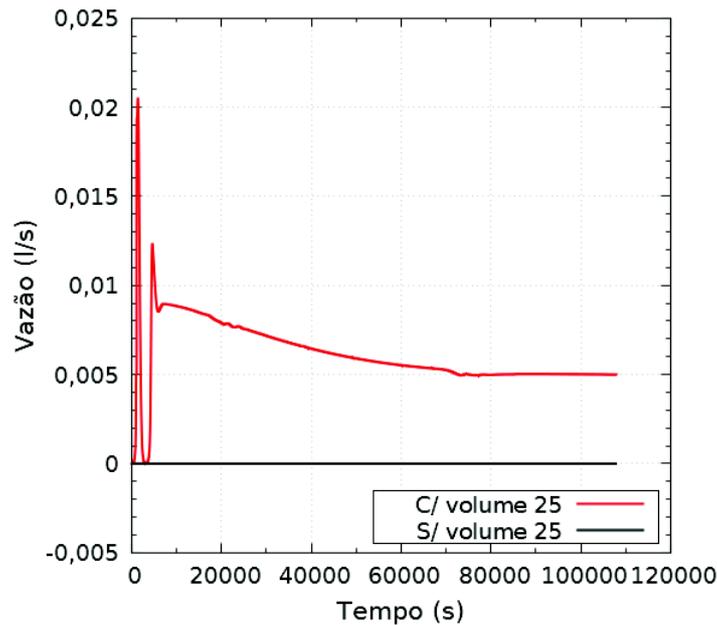


Figura 4.7: Vazão do pleno superior.

Essa nodalização apesar de propiciar apenas uma pequena vazão nos volumes do pleno superior é essencial para permitir que a água quente suba e se estabeleça a circulação. Pois ao adotar a nodalização apresentada na Figura 4.9 podemos obser-

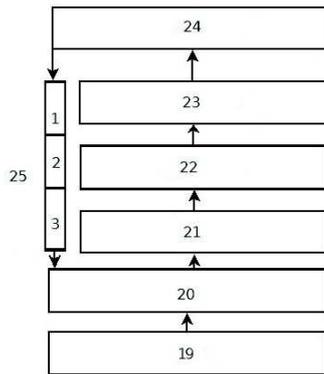


Figura 4.8: Nodalização do pleno superior.

var que além de não haver circulação, a água fica estagnada mantendo a temperatura praticamente constante, ver Figura 4.10.

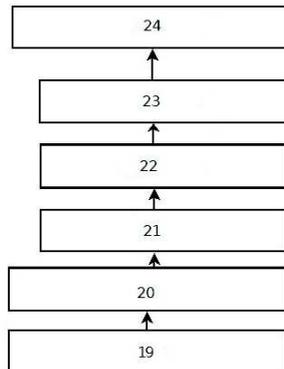


Figura 4.9: Nodalização do pleno superior sem o volume 25.

Da mesma forma é possível verificar que apesar da baixa vazão no Tanque de Expansão, Figura 4.11, ela influencia na medição da vazão na Perna fria, Figura 4.12, comparando as vazões entre o volume 38, onde está a ligação entre a Perna Fria e o Tanque com a registrada no volume 39, que é o volume seguinte a ligação.

A perda de carga da nodalização do circuito foi ajustada pela vazão experimental para potência elétrica de $800W$ e com vazão do secundário de $15l/h$. Por escolha de modelagem, optou-se por impor a mesma perda de carga localizada a

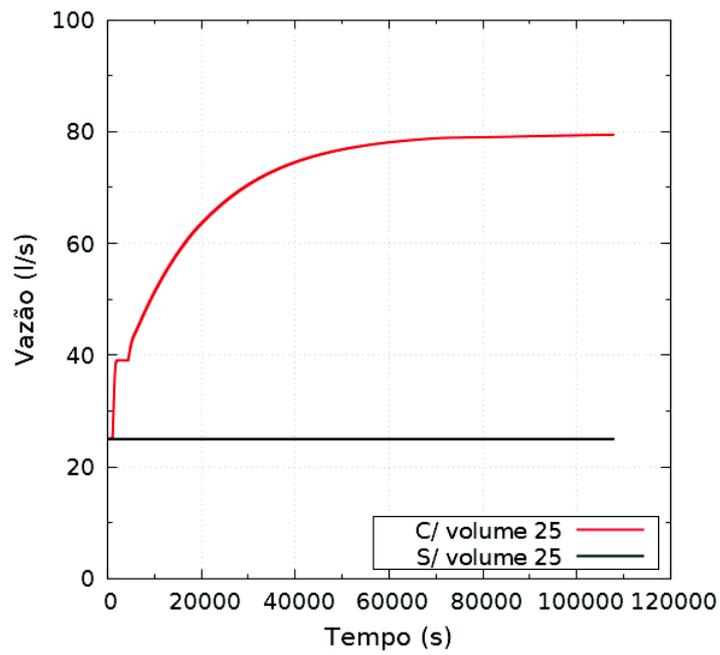


Figura 4.10: Comparação da temperatura no pleno superior para as duas nodalizações. (Potência elétrica: $800W$; Vazão de resfriamento: $15l/h$)

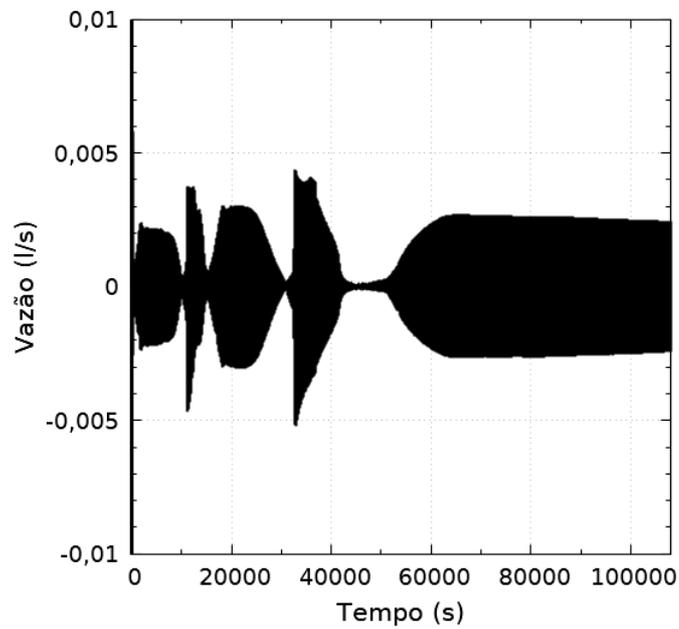


Figura 4.11: Vazão de entrada no Tanque de Expansão.

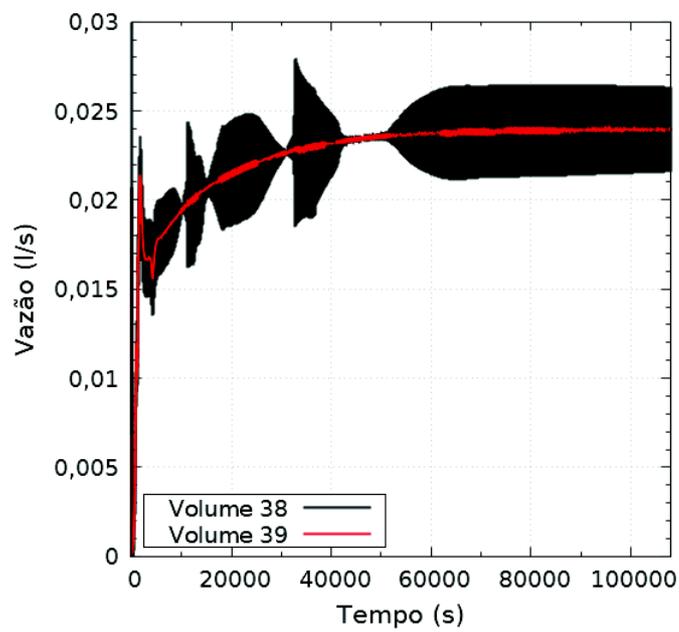


Figura 4.12: Influência da circulação natural do Tanque de Expansão nas vazões dos volumes da Perna Fria.(Potência elétrica: 800W; Vazão de resfriamento: 15l/h)

todas as junções do circuito principal, Aquecedor, Perna Quente, Trocador de Calor lado primário e Perna Fria, a exceção o volume 25, por possuir uma área reduzida em comparações aos outros volumes. A escolha por esse tipo de modelagem da perda de carga, ocorre devido à dificuldade de se determinar as perdas de carga locais com exatidão. Então, para evitar distorções devido a uma grande perda de carga aplicada em um único ponto, optou-se por essa abordagem. A Figura 4.13 apresenta uma comparação entre 4 dos valores testados. O valor de $k = 1,2$ foi considerado o que melhor representa o comportamento do CCN.

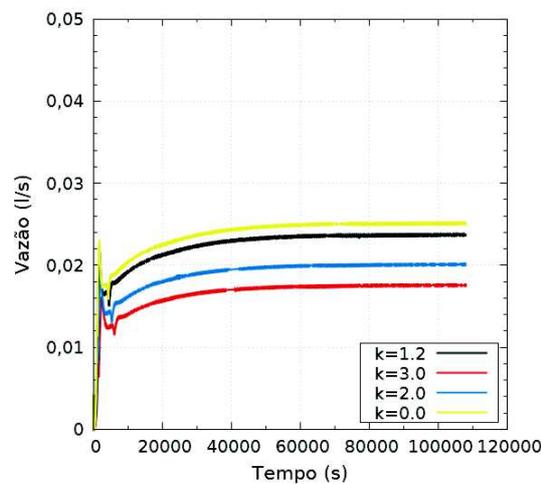


Figura 4.13: Comparação entre as vazões para diferentes perda de carga. (Potência: 800W; Vazão de resfriamento: 15l/h)

As estruturas de calor necessitam para sua modelagem informar valores para coeficiente de transferência de calor e capacidade térmica para cada material considerado. As estruturas do CCN foram modeladas como aço inox, exceção feita à região interior das resistências, onde foi considerado um fio de *NiCr* revestido por um isolante térmico (*Al2O3*).

Na região ativa do aquecedor a potência térmica corresponde aproximadamente metade da potência elétrica, Figura 4.14, sendo o restante da energia responsável pelo aquecimento da resistência, Figura 4.15.

No topo do Tanque de Expansão foi modelada uma válvula de alívio, que abre

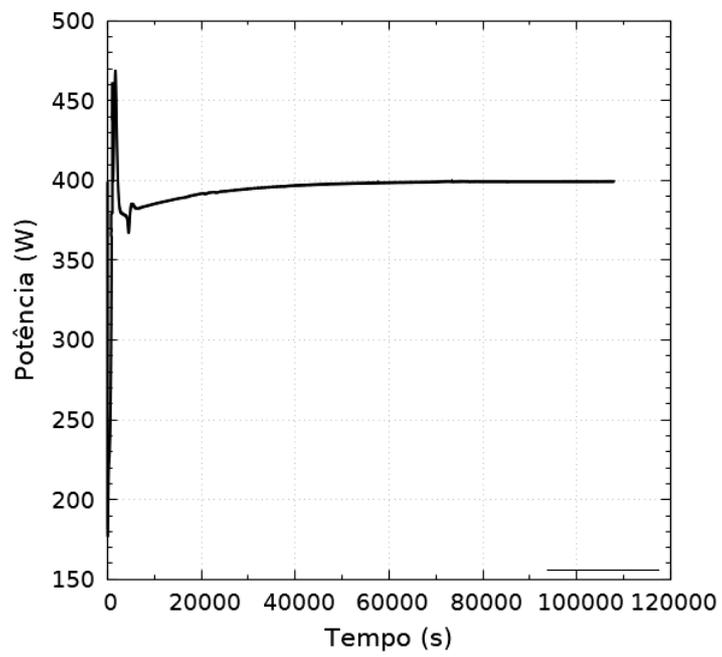


Figura 4.14: Potência térmica.(Potência elétrica: 800W; Vazão de resfriamento: 15l/h)

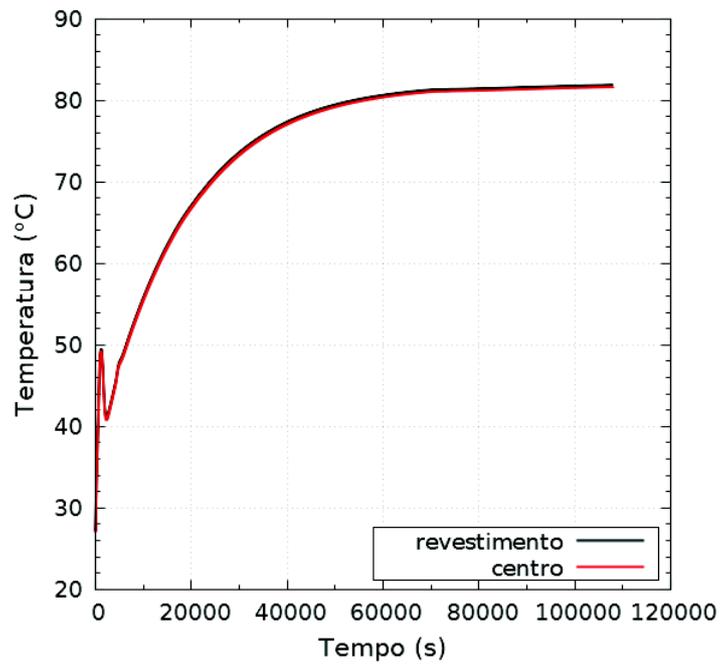


Figura 4.15: Temperatura do centro e do revestimento das resistências.(Potência elétrica: $800W$; Vazão de resfriamento: $15l/h$)

em $1,4\text{bar}$. Com isso podemos observar um aumento de pressão até o momento de abertura desta válvula, Figura 4.16.

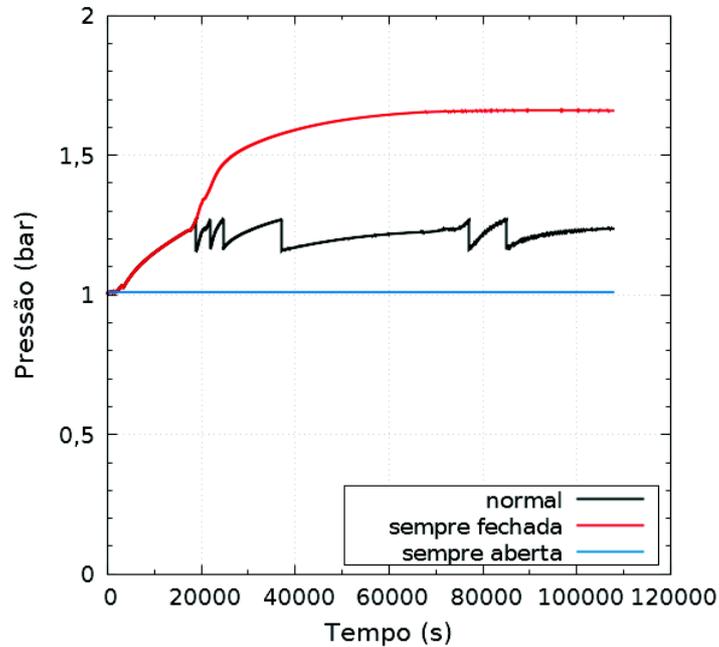


Figura 4.16: Pressão do Circuito.(Potência elétrica: $800W$; Vazão de resfriamento: $15l/h$)

No Trocador de Calor, é relevante notar que 67% da energia é retirada no primeiro volume ativo, Figura 4.17, essa característica também foi observada na simulação em CFD apresentada por Elias (2014). A temperatura da tubulação do Trocador de Calor fica próxima à média entre a temperatura do lado primário e secundário, Figura 4.18

Conforme esperado a região permanente é atingida quando o calor inserido pelas resistências é igual ao retirado no trocador, conforme pode ser observado na Figura 4.19.

Também foram considerados na simulação as estruturas metálicas não ativas, tais estruturas influenciam na região do transiente. Atenuando o aquecimento da água, fazendo com que o circuito demore mais tempo para estabilizar em relação a simulação onde elas não consideradas, Figura 4.20. Na mesma Figura é possível

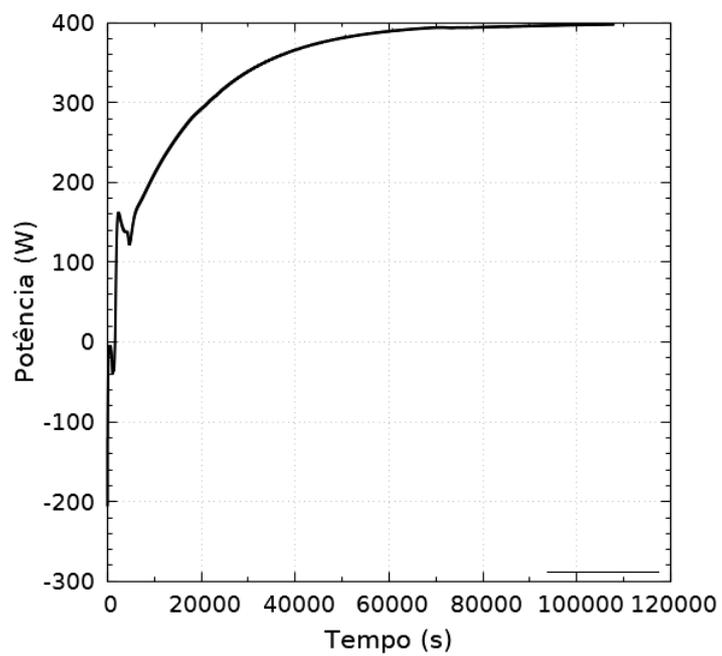


Figura 4.17: Comportamento da potência retirada pelo Trocador de Calor.(Potência elétrica: $800W$; Vazão de resfriamento: $15l/h$)

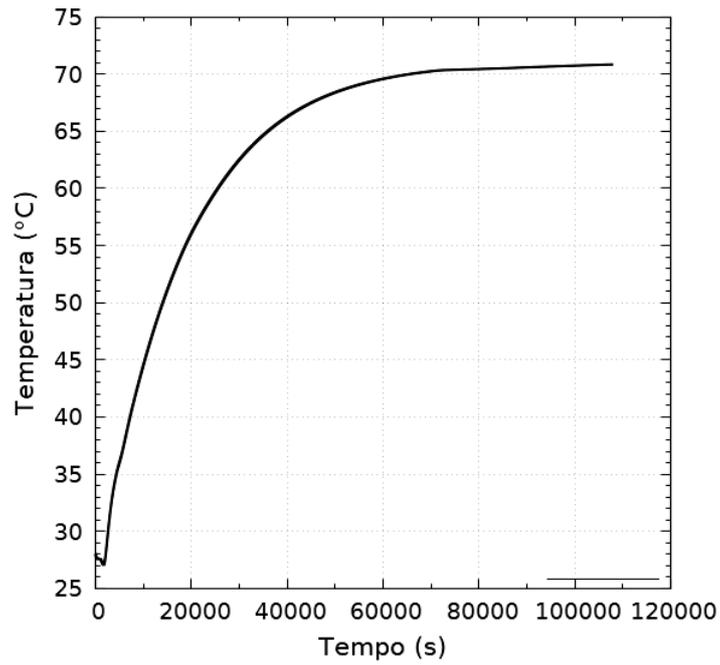


Figura 4.18: Temperatura da tubulação do Trocador de Calor.(Potência elétrica: 800W; Vazão de resfriamento: 15l/h)

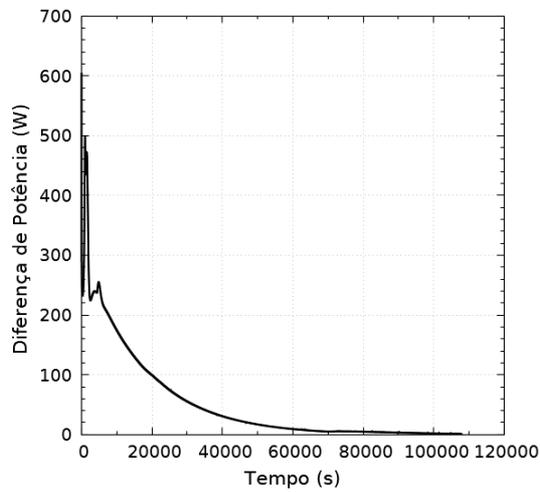


Figura 4.19: Diferença entre a potência inserida pelas resistências no Aquecedor e a retirada pelo Trocador de Calor.(Potência elétrica: 800W; Vazão de resfriamento: 15l/h)

observar que o regime permanente não é significativamente afetada pelas estruturas passivas.

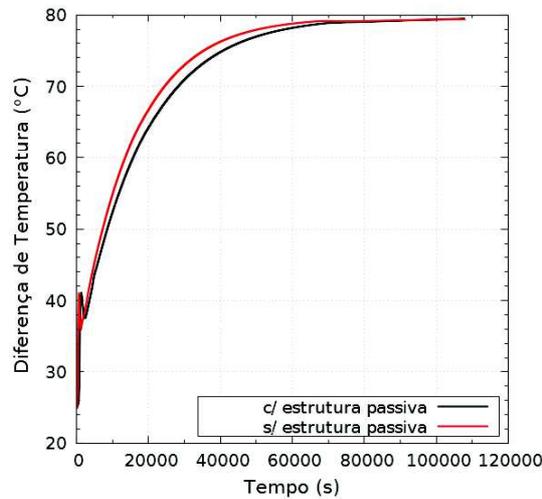


Figura 4.20: Diferença entre a temperatura com e sem as estruturas passivas de calor.(Potência elétrica: 800W; Vazão de resfriamento: 15l/h)

Entre as estruturas passivas consideradas, estão a tubulação de todo circuito, incluindo as Pernas Quente e Fria, o cilindro externo do Trocador de Calor, e os cilindros externos e internos do aquecedor. As tubulações e os cilindros externos apresentaram comportamentos muito próximos ao do fluido na sua fronteira, conforme Figura 4.21, Figura 4.22, 4.24 e 4.23.

O comportamento da estrutura do cilindro interno é próximo a média da temperatura da região ativa do Aquecedor e da temperatura do *downcomer*, Figura 4.25. Porém, devido a grande diferença de temperatura entre a saída da região aquecida e a entrada do *downcomer*, ocorre uma considerável transferência de calor no início da descida do fluido Figura 4.26. Essas transferência ocasiona um aumento da temperatura ao longo do *downcomer*, fazendo com que o fluido entre na região do Aquecedor aproximadamente $5^{\circ}C$ mais quente do que a saída da perna fria, neste caso analisado, Figura 4.27.

Também foram modeladas as estruturas de calor passivas dentro aquecedor. O comportamento da temperatura pode ser visto na Figura 4.28.

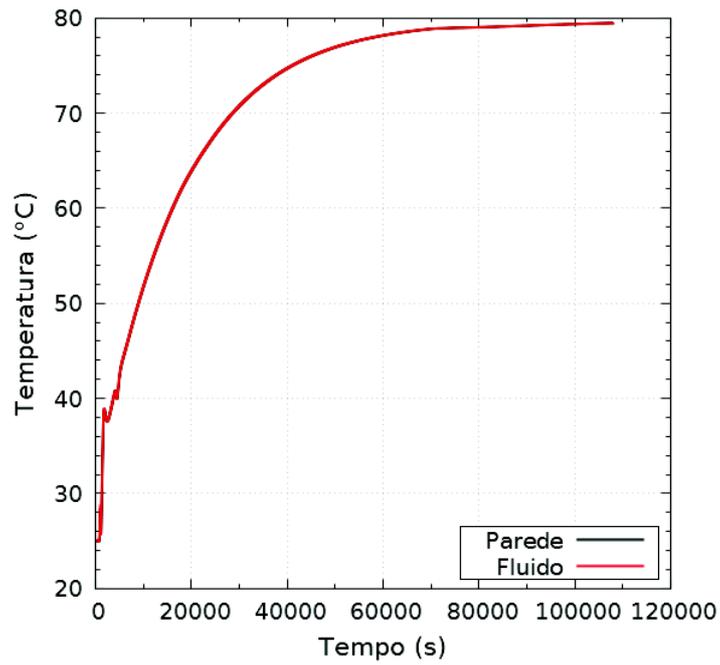


Figura 4.21: Comportamento da temperatura na Perna Quente.(Potência elétrica: 800W; Vazão de resfriamento: 15l/h)

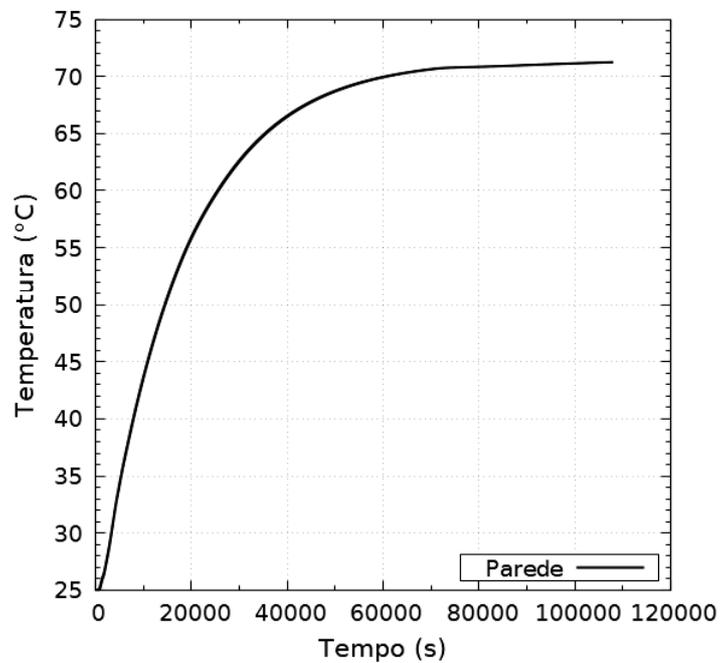


Figura 4.22: Comportamento da temperatura na Perna Fria.

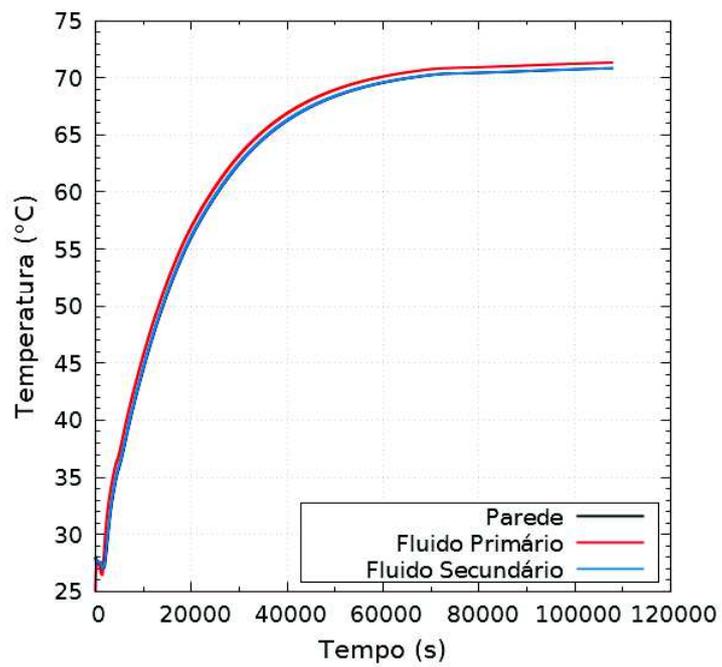


Figura 4.23: Comportamento da temperatura no cilindro externo do Trocador de Calor.(Potência elétrica: 800W; Vazão de resfriamento: 15l/h)

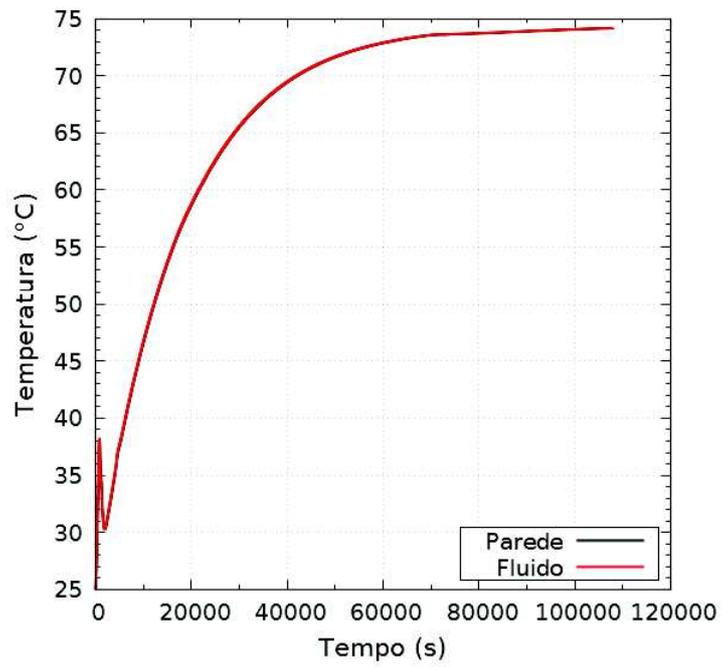


Figura 4.24: Comportamento da temperatura no cilindro externo do Aquecedor.(Potência elétrica: $800W$; Vazão de resfriamento: $15l/h$)

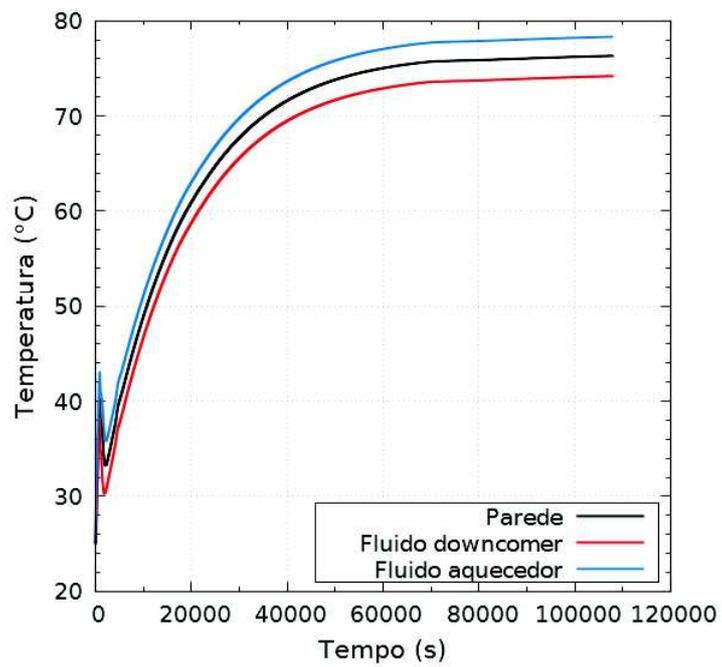


Figura 4.25: Comportamento da temperatura no cilindro interno do Aquecedor. (Potência elétrica: $800W$; Vazão de resfriamento: $15l/h$)

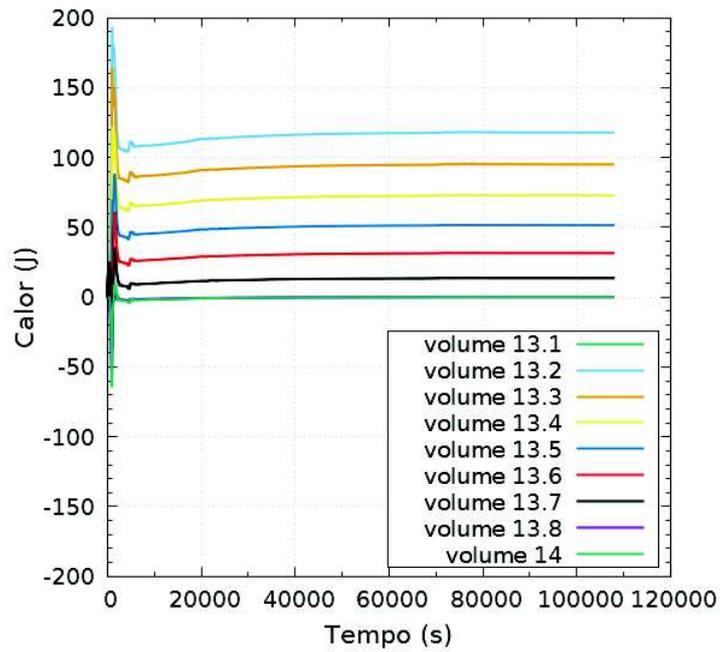


Figura 4.26: Comportamento da transferência de calor no cilindro interno do Aquecedor. (Potência elétrica: $800W$; Vazão de resfriamento: $15l/h$)

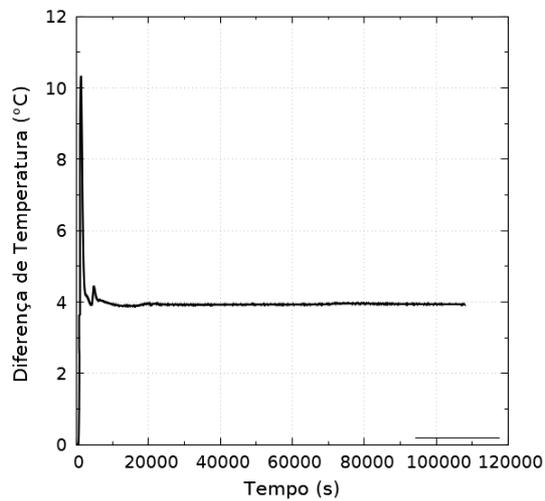


Figura 4.27: Diferença de temperatura entre a entrada e saída do *downcomer*. (Potência elétrica: $800W$; Vazão de resfriamento: $15l/h$)

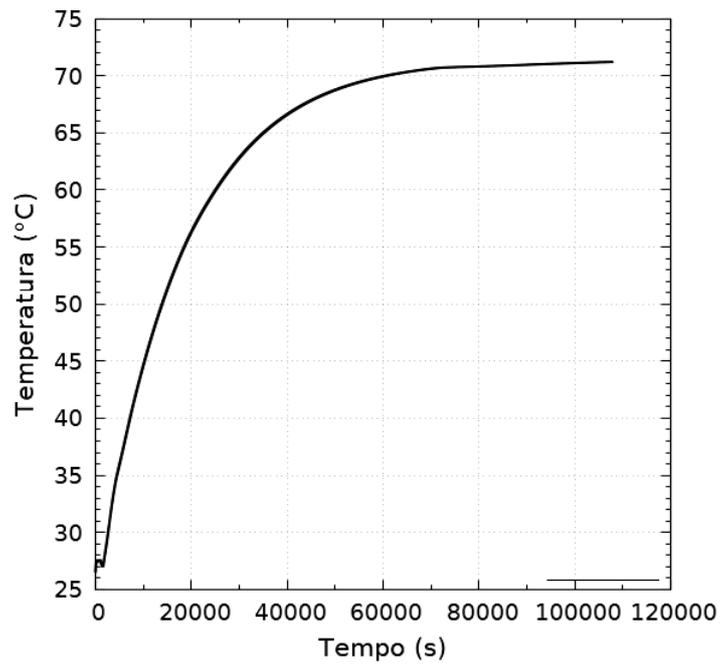


Figura 4.28: Temperatura da parte inativa das resistências.(Potência elétrica: 800W;
Vazão de resfriamento: 15l/h)

4.4 Validação do modelo

Para qualificar e validar foi realizada uma comparação com resultados experimentais e resultados de simulações em CFD, obtidas do trabalho de Veríssimo (2011). E os resultados para temperaturas ao longo do circuito, Figuras 4.29,4.30, 4.31, 4.32, 4.33, 4.34 ao longo do circuito e a vazão volumétrica na perna fria, Figuras 4.35, mostram que a nodalização do circuito é representativa

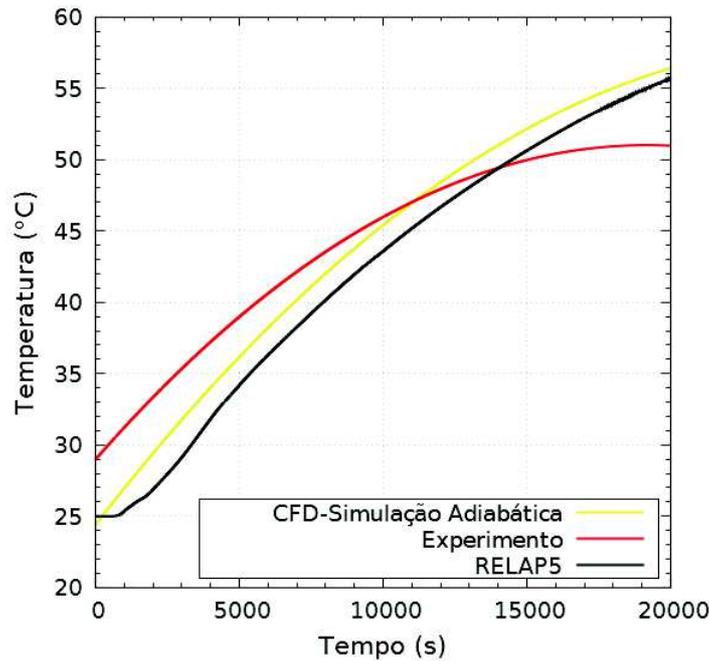


Figura 4.29: Temperatura na entrada da perna fria.(Potência elétrica: 800W; Vazão de resfriamento: 15l/h)

4.5 Conjunto de Simulações

Uma matriz de 32 simulações foram realizadas para comparar o comportamento da vazão e temperatura ao longo do circuito. Foram utilizados como referência a localização do termopares conforme apresentado na Figura 4.5 e a vazão volumétrica na perna fria. Os resultados foram divididos entre monofásicos e bifásicos, conforme Tabela 4.1.

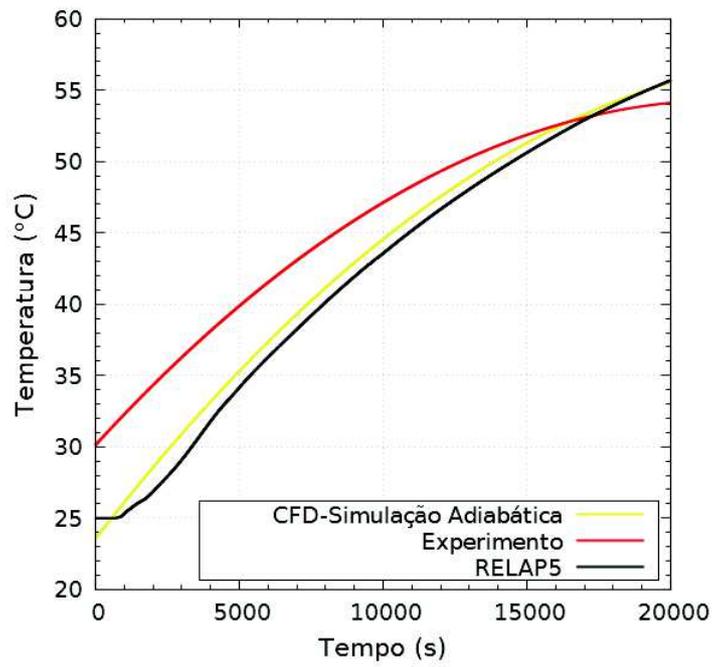


Figura 4.30: Temperatura no *downcomer*. (Potência elétrica: 800W; Vazão de resfriamento: 15l/h)

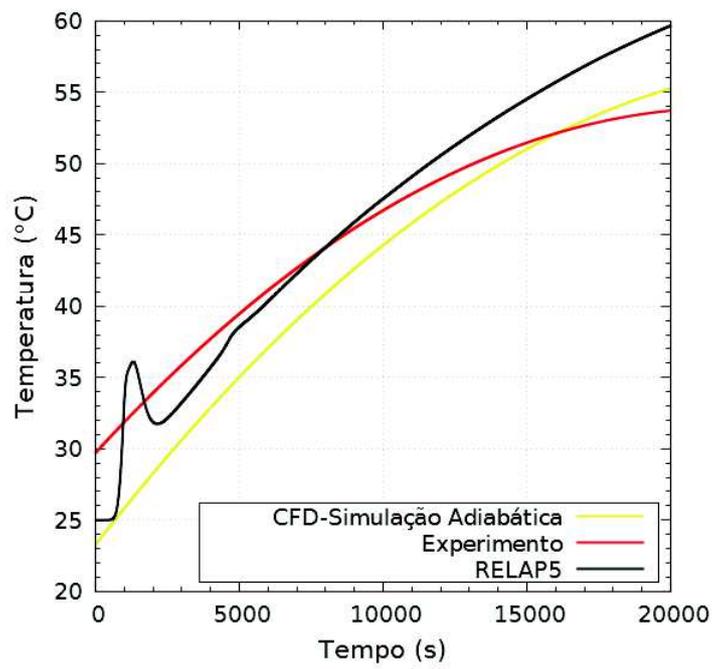


Figura 4.31: Temperatura no pleno inferior. (Potência elétrica: 800W; Vazão de resfriamento: 15l/h)

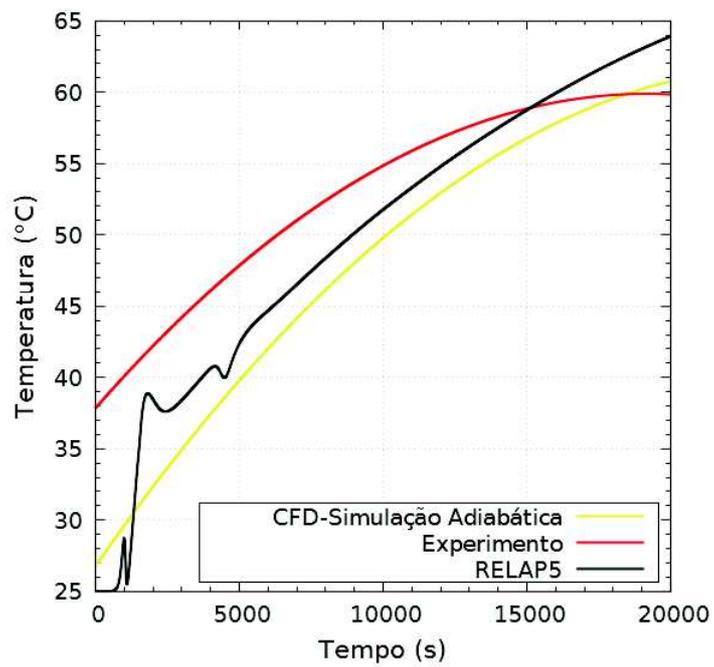


Figura 4.32: Temperatura na entrada da perna quente. (Potência elétrica: 800W; Vazão de resfriamento: 15l/h)

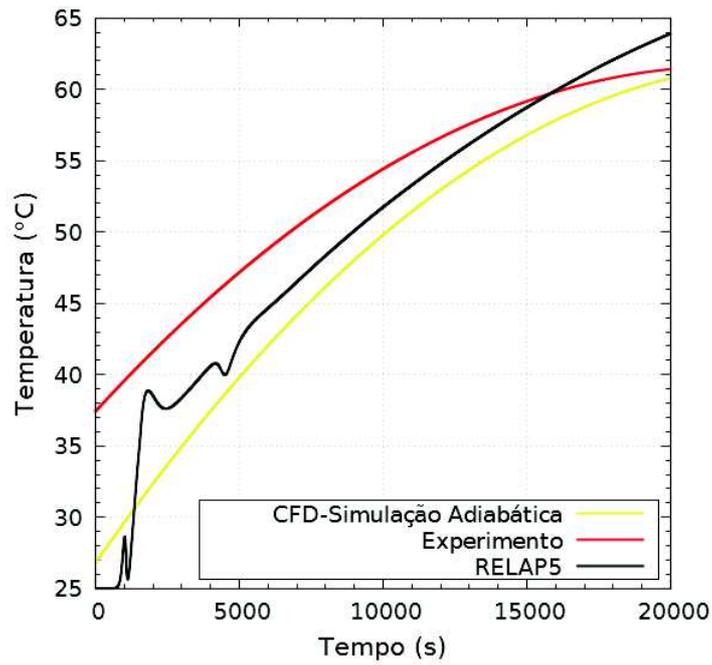


Figura 4.33: Temperatura em 1/3 da perna quente. (Potência elétrica: 800W; Vazão de resfriamento: 15l/h)

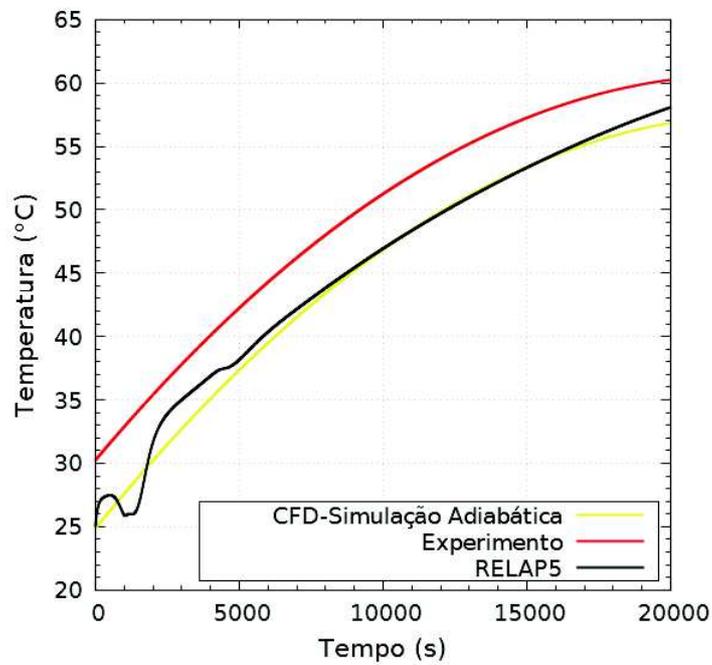


Figura 4.34: Temperatura na entrada do trocador de calor.

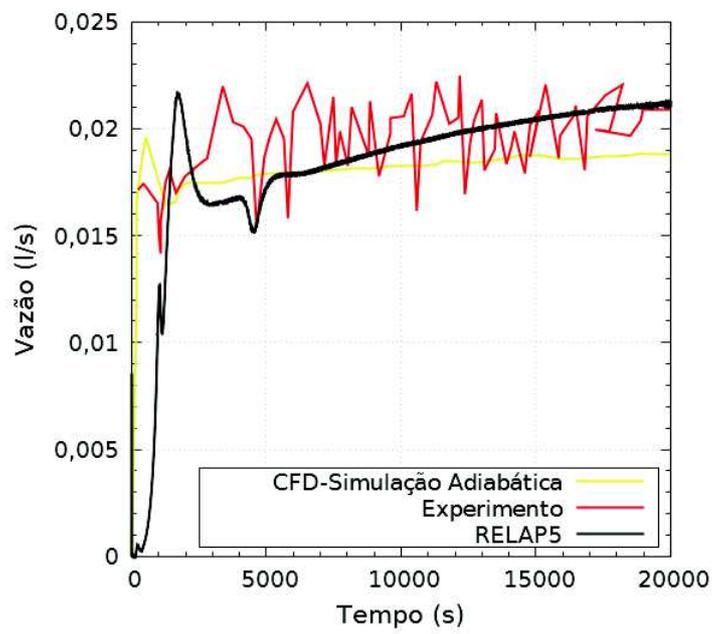


Figura 4.35: Vazão volumétrica na perna fria. (Potência elétrica: 800W; Vazão de resfriamento: 15l/h)

Tabela 4.1: Regimes de escoamento em função do potência de aquecimento e vazão de resfriamento

Potência (W)	600	800	1000	1100
Vazão (l/h)				
3	Bifásico	Bifásico	Bifásico	Bifásico
6	Bifásico	Bifásico	Bifásico	Bifásico
8	Monofásico	Bifásico	Bifásico	Bifásico
9	Monofásico	Bifásico	Bifásico	Bifásico
10	Monofásico	Bifásico	Bifásico	Bifásico
12	Monofásico	Monofásico	Bifásico	Bifásico
15	Monofásico	Monofásico	Monofásico	Monofásico
18	Monofásico	Monofásico	Monofásico	Monofásico

4.5.1 Simulações Monofásica

As combinações que acarretaram em circulação natural monofásica, apresentaram um bom comportamento e coerência entre os resultados, que serão apresentados de acordo com a potência utilizada. A Figura 4.36 apresenta a temperatura equivalente ao $TC1$, na entrada do *downcomer* para as diferentes potências e vazões

Da mesma forma a Figura 4.37 apresenta as temperatura na região do pleno inferior. É possível notar que a diferença de temperatura entre o $TC1$ e o $TC11$ é praticamente a mesma em todas as simulações devido ao aquecimento ocasionado pela transferência de calor através do cilindro interno.

As Figuras 4.39 e 4.40 apresentam as temperaturas dos fluidos na saída do Aquecedor e na altura de 1/3 da Perna Quente, onde não há diferenças significativas entre elas. Os termopares correspondentes às paredes destas regiões apresentam comportamento similares, Figuras 4.38 e 4.41.

Os termopares $TC6$, $TC7$, $TC8$ e $TC9$ medem as temperaturas do fluido de entrada do trocador de calor, da parede na região de entrada do Trocador de Calor, do fluido de saída do Trocador de Calor e na parede da região de saída do Trocador de Calor. O comportamento da temperaturas nessas regiões podem ser observados nas Figuras 4.42, 4.43 , 4.44 e 4.45.

No lado secundário os termopares $TC10$ e $TC12$, apresentam as temperaturas

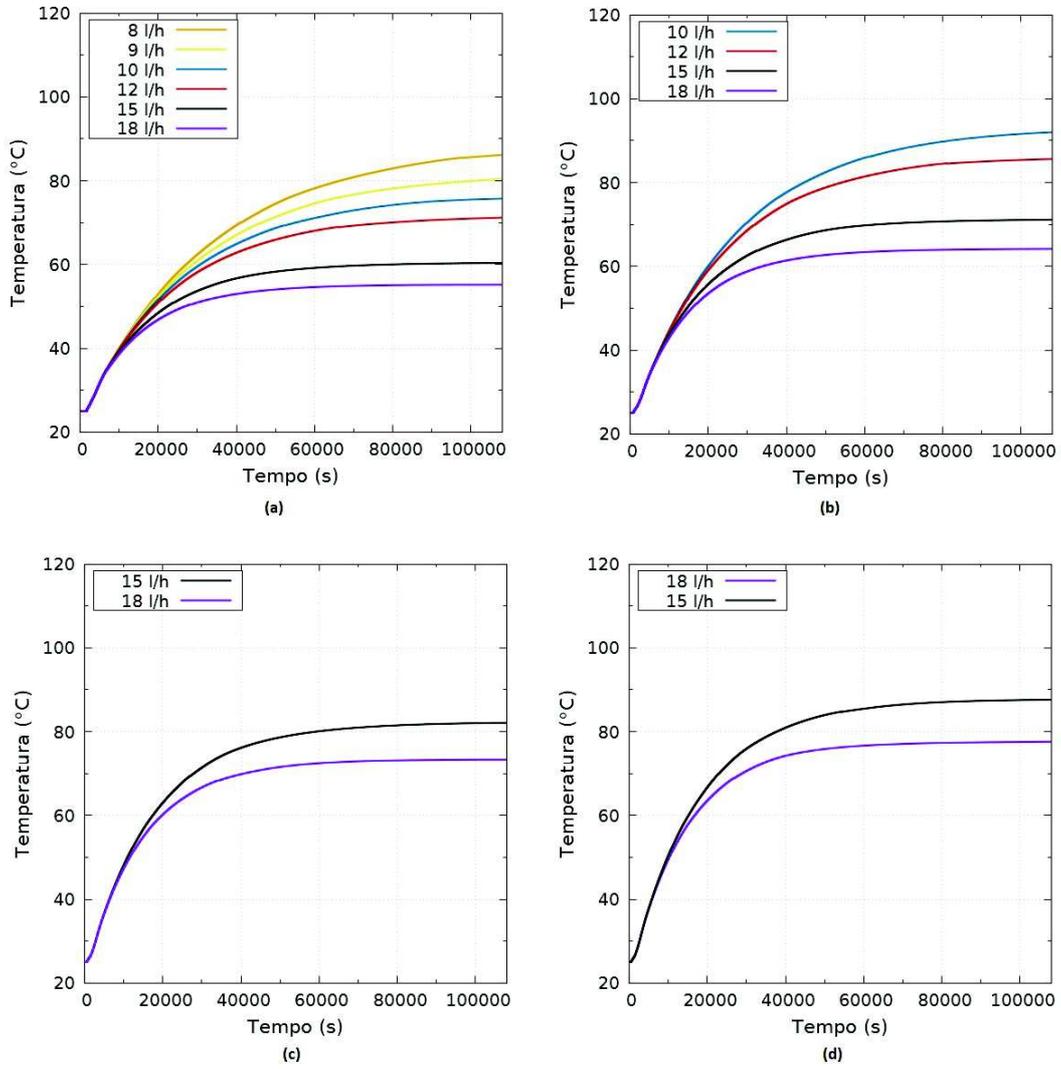


Figura 4.36: Temperatura na entrada do *downcomer*(TC1): (a) 600W, (b) 800W, (c) 1000W e (d) 1100W para os casos monofásicos.

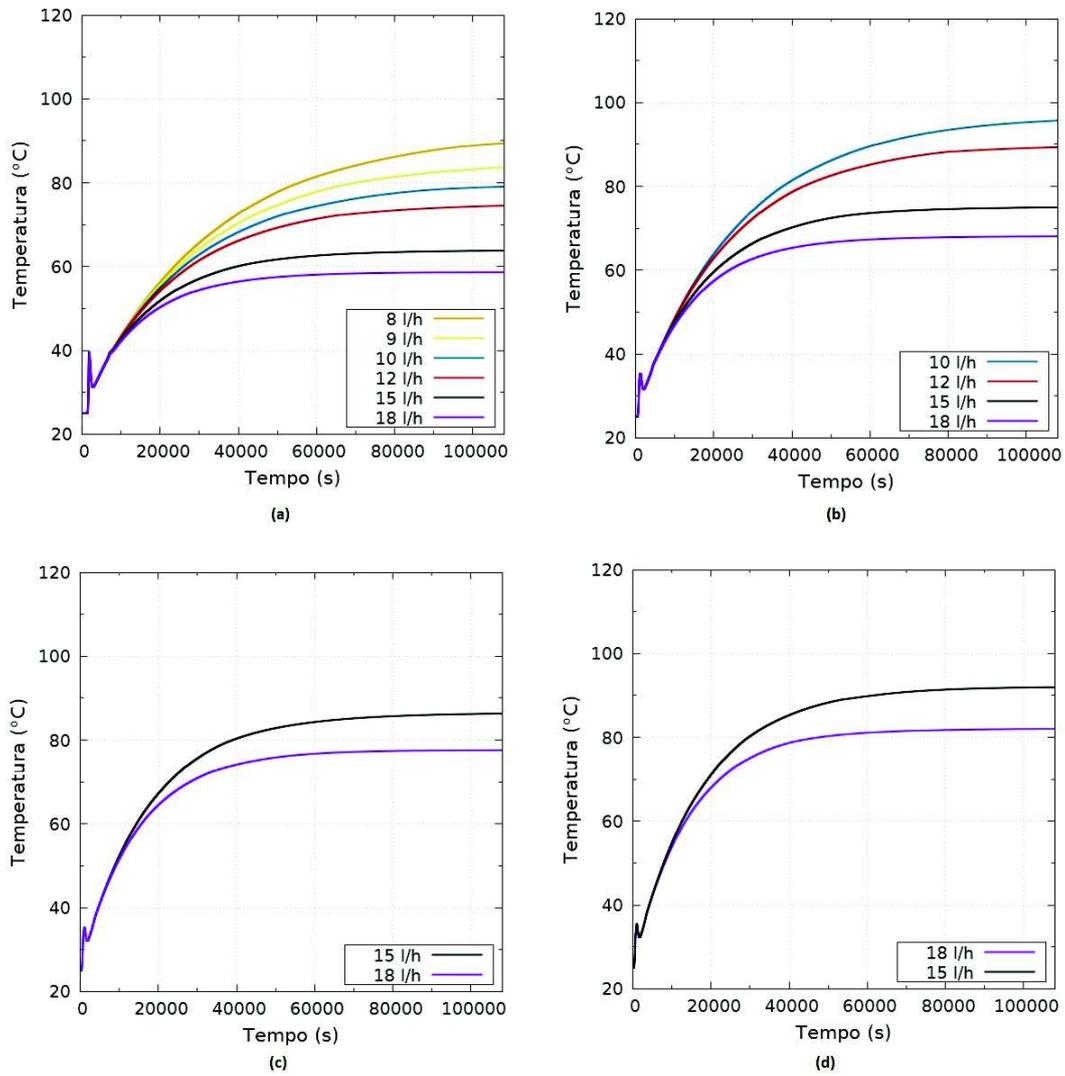


Figura 4.37: Temperatura na entrada do Pleno inferior(TC11): (a) 600W, (b) 800W, (c) 1000W e (d) 1100W para os casos monofásicos.

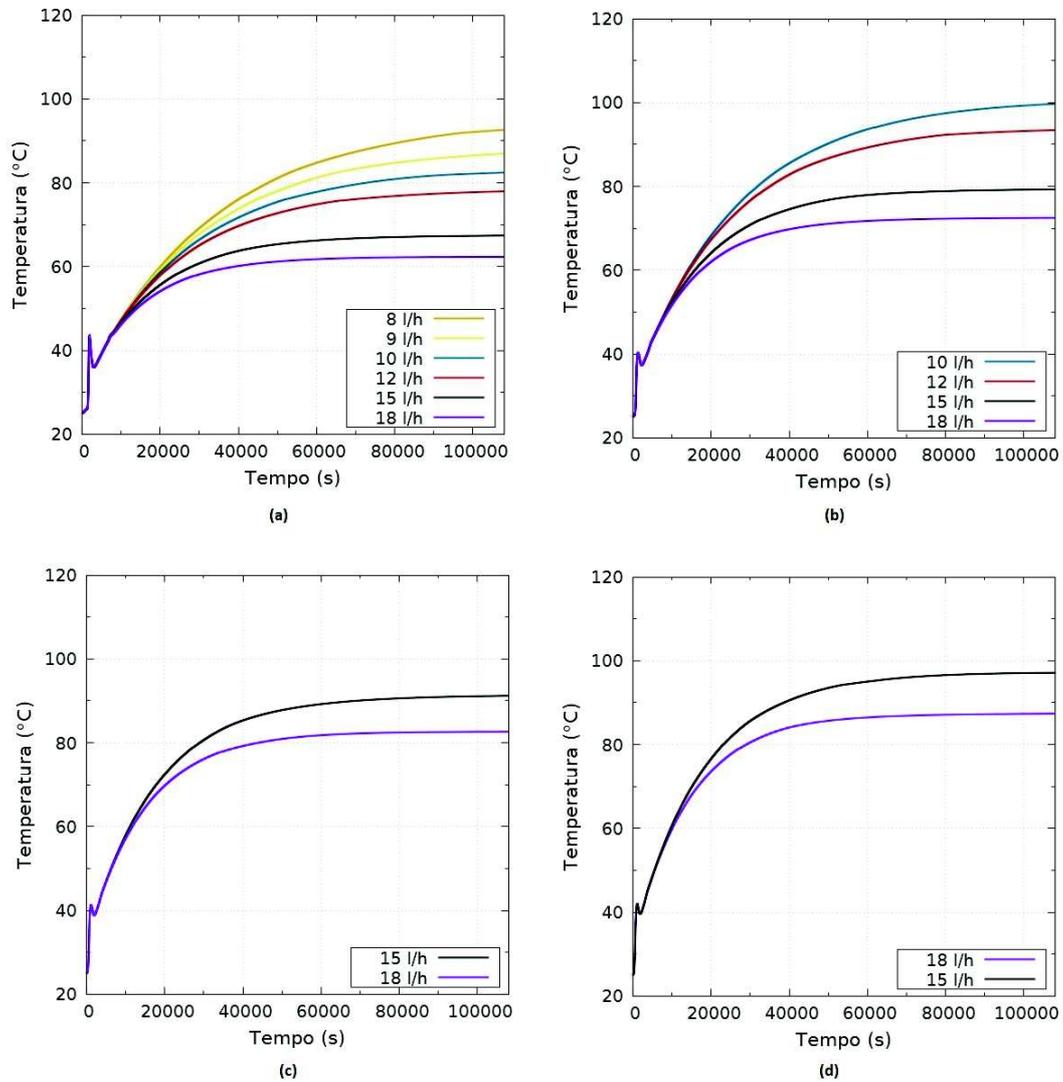


Figura 4.38: Temperatura na parede da entrada da Perna Quente(TC2): (a) 600W, (b) 800W, (c) 1000W e (d) 1100W para os casos monofásicos.

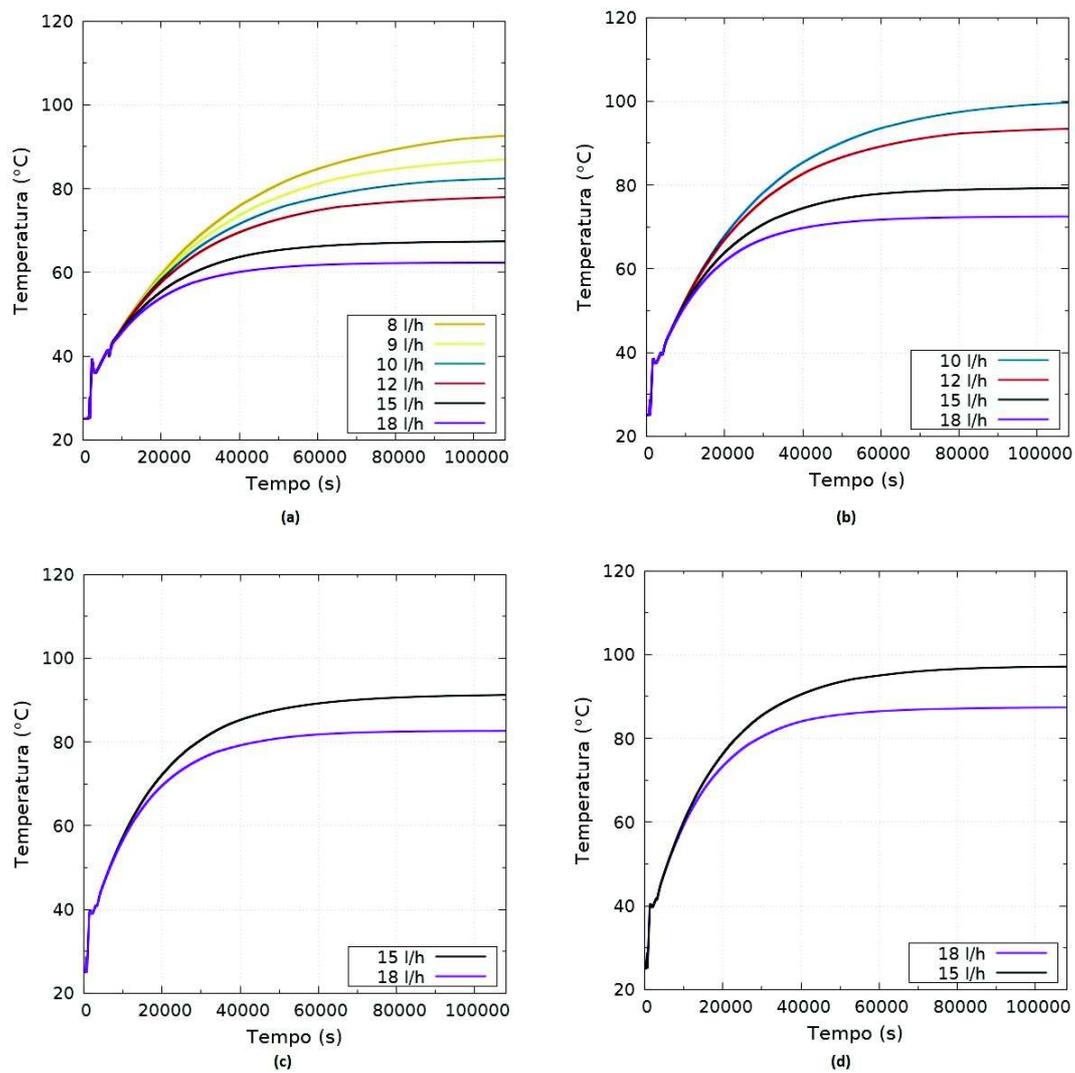


Figura 4.39: Temperatura na entrada da Perna Quente(TC3): (a) 600W, (b) 800W, (c) 1000W e (d) 1100W para os casos monofásicos.

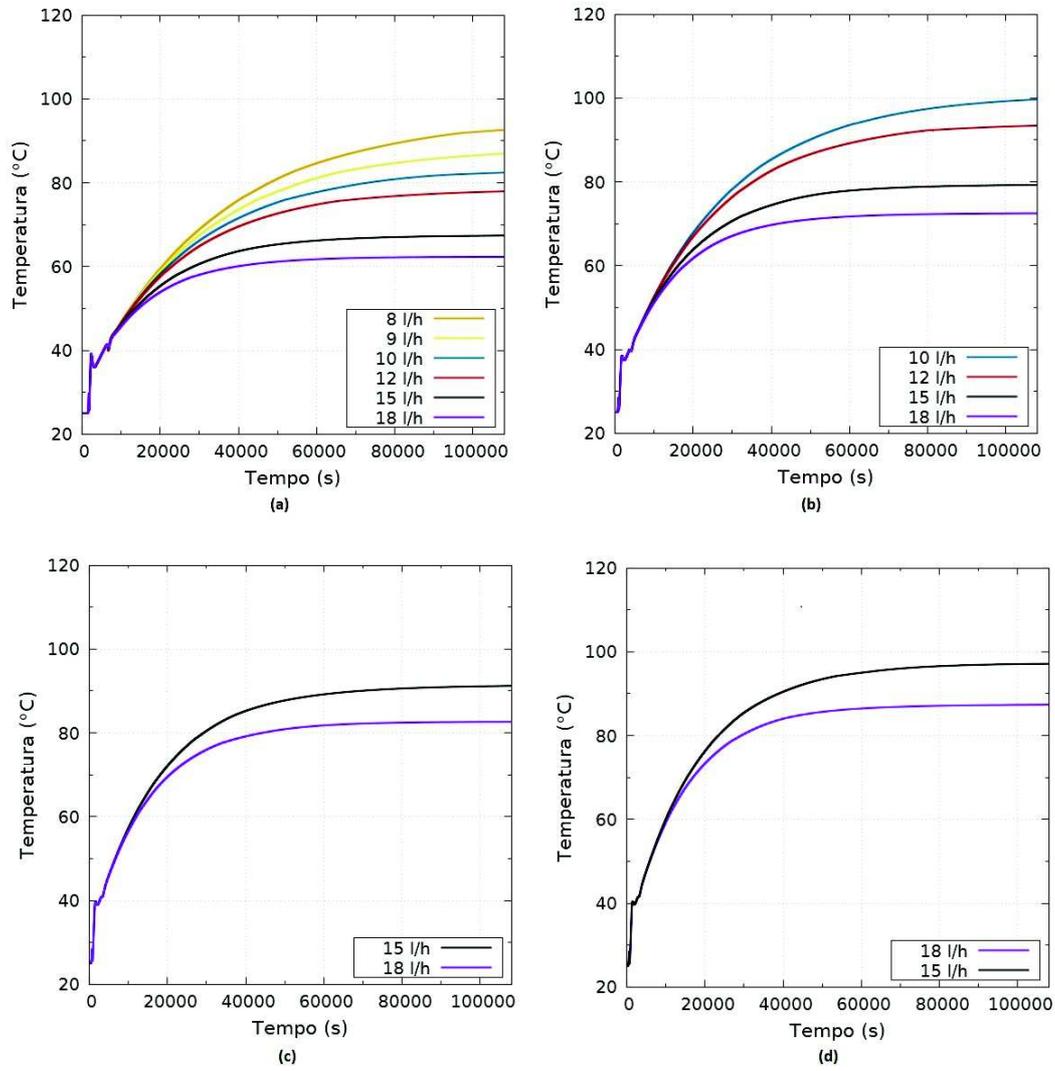


Figura 4.40: Temperatura na parede em 1/3 da Perna Quente(TC4): (a) 600W, (b) 800W, (c) 1000W e (d) 1100W para os casos monofásicos.

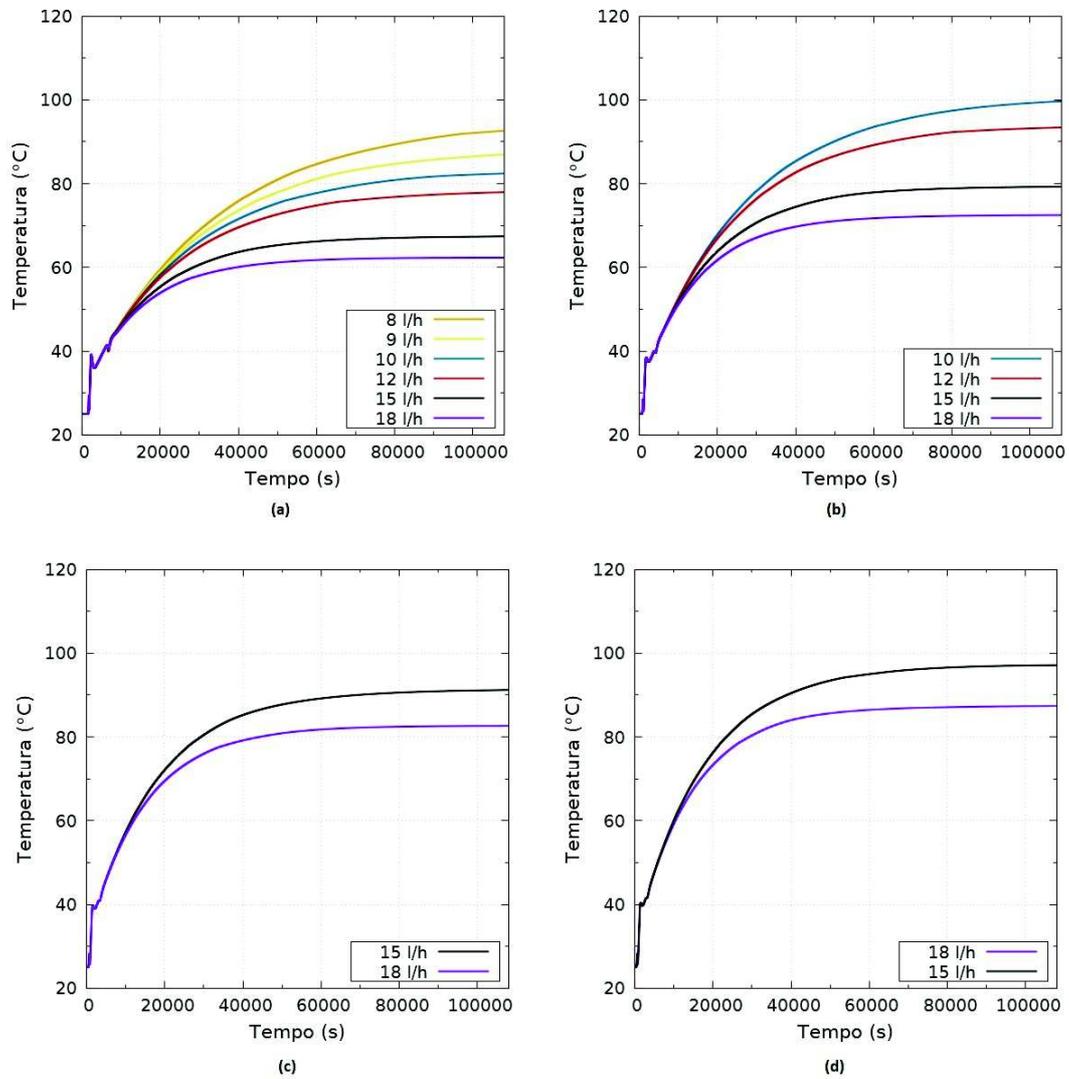


Figura 4.41: Temperatura em 1/3 da Perna Quente(TC5): (a) 600W, (b) 800W, (c) 1000W e (d) 1100W para os casos monofásicos.

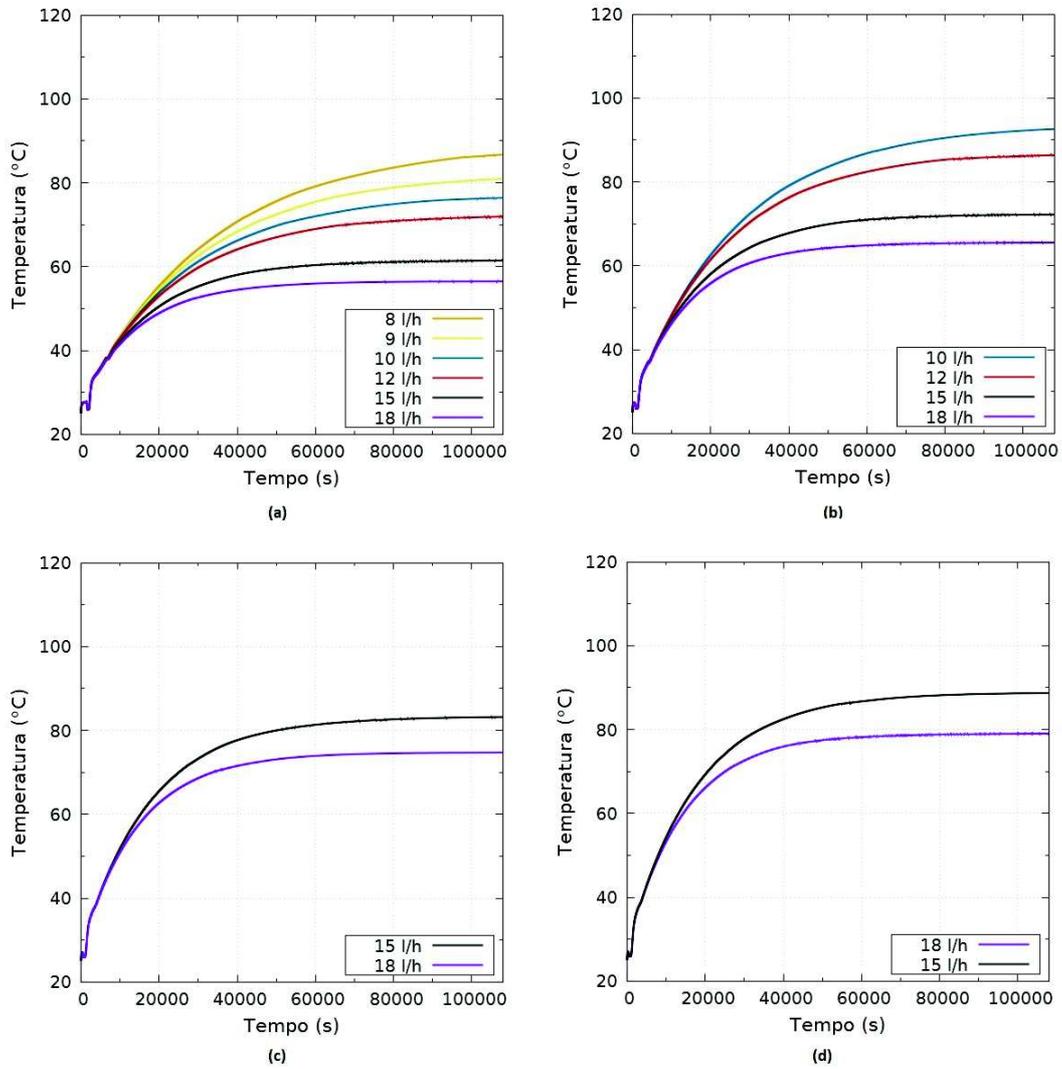


Figura 4.42: Temperatura na parede da entrada do Trocador de Calor(TC6): (a) 600W, (b) 800W, (c) 1000W e (d) 1100W para os casos monofásicos.

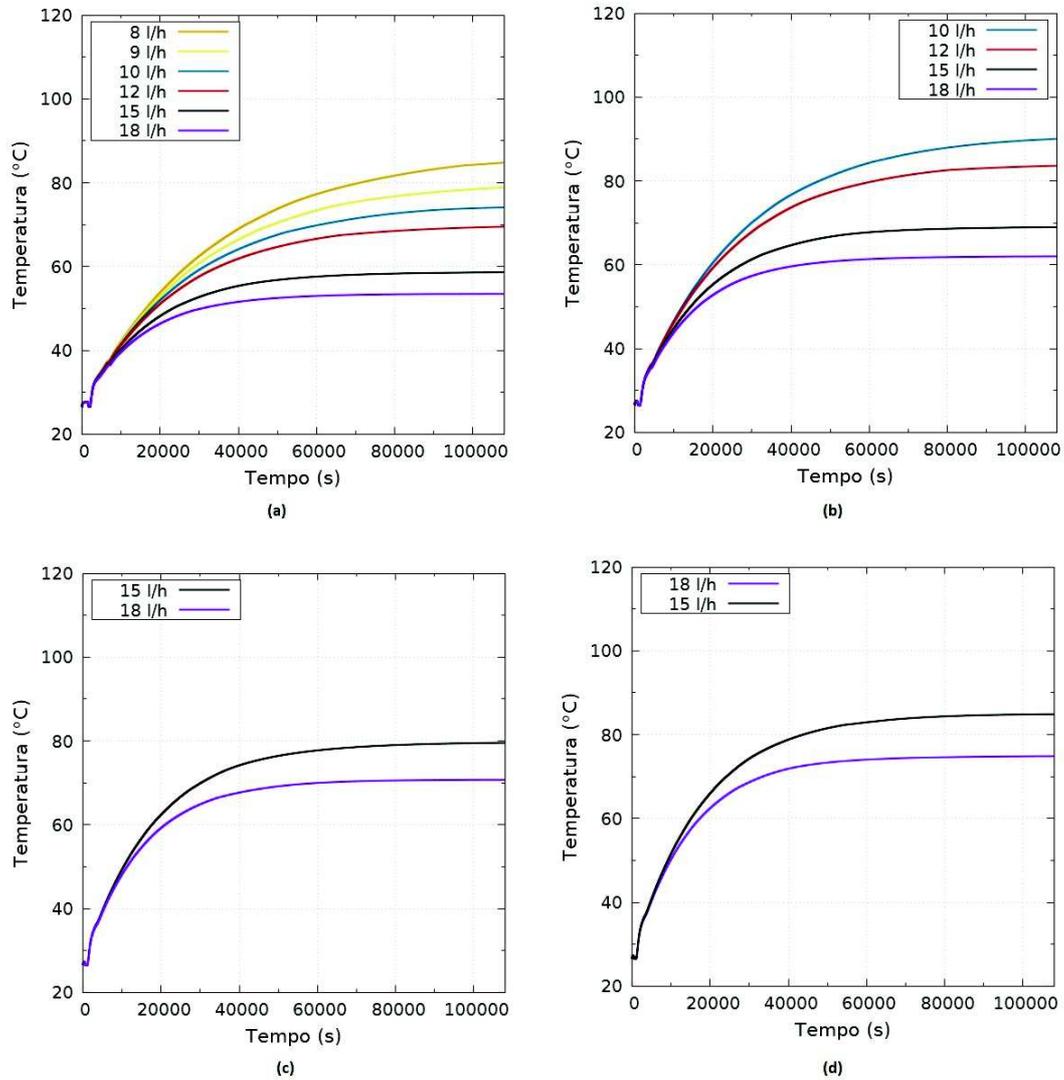


Figura 4.43: Temperatura na entrada do Trocador de Calor(TC7): (a) 600W, (b) 800W, (c) 1000W e (d) 1100W para os casos monofásicos.

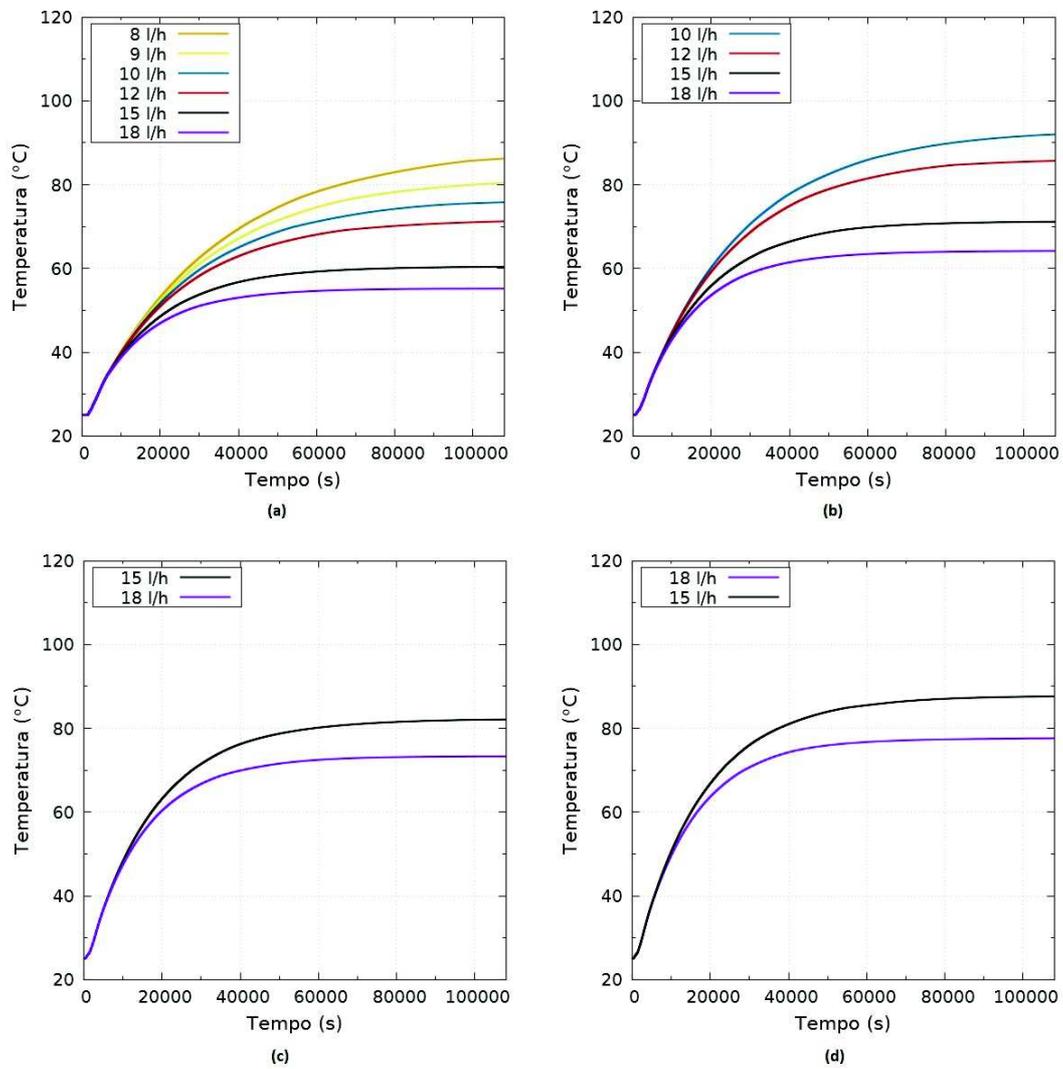


Figura 4.44: Temperatura na parede da saída do Trocador de Calor(TC8): (a) 600W, (b) 800W, (c) 1000W e (d) 1100W para os casos monofásicos.

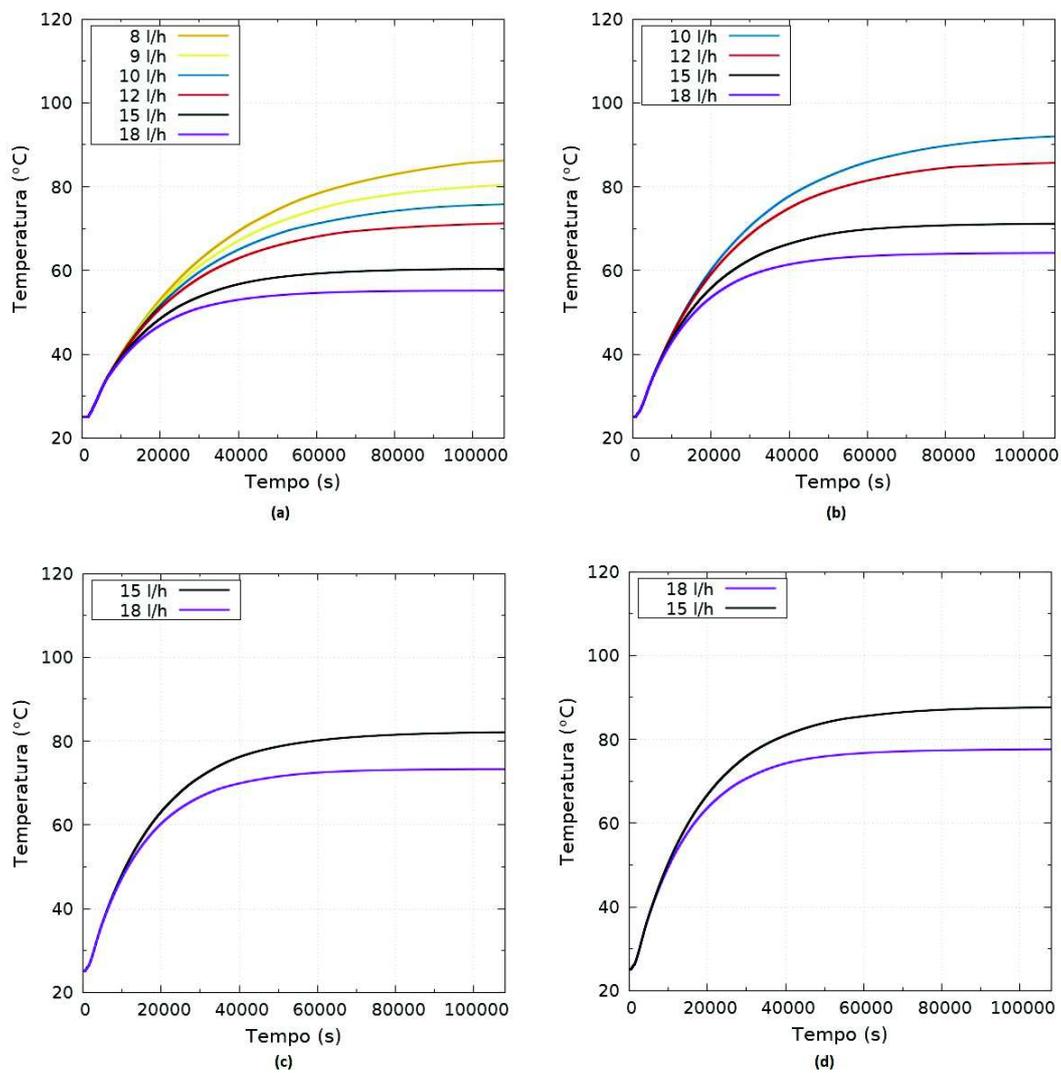


Figura 4.45: Temperatura na saída do Trocador de Calor(TC9): (a) 600W, (b) 800W, (c) 1000W e (d) 1100W para os casos monofásicos.

da entrada e saída da água de resfriamento, Figuras 4.46 e 4.47.

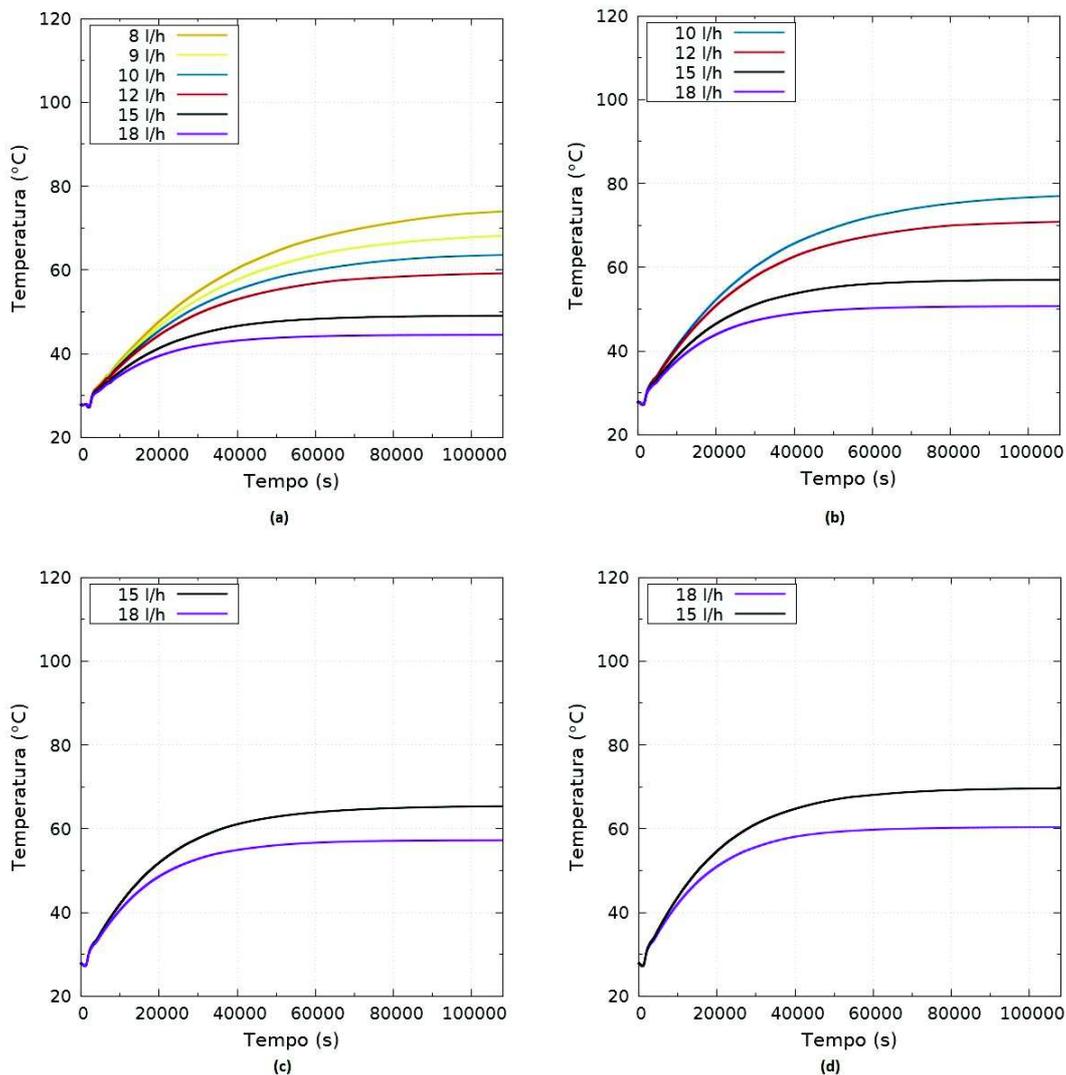


Figura 4.46: Temperatura na entrada da água de resfriamento(TC10): (a) 600W, (b) 800W, (c) 1000W e (d) 1100W para os casos monofásicos.

É notável que tanto do lado primário quanto do lado secundário, as diferenças de temperaturas são similares para todos os casos monofásicos. Para tal comportamento da temperatura ao longo do circuito em todos os casos analisados, é necessário que a vazão varie consideravelmente para compensar o balanço térmico necessário para que a circulação atinja o regime permanente. A análise da Figura 4.48 permite verificar que, conforme esperado, a vazão se comporta de maneira proporcional ao aumento de potência e inversamente proporcional ao aumento de vazão

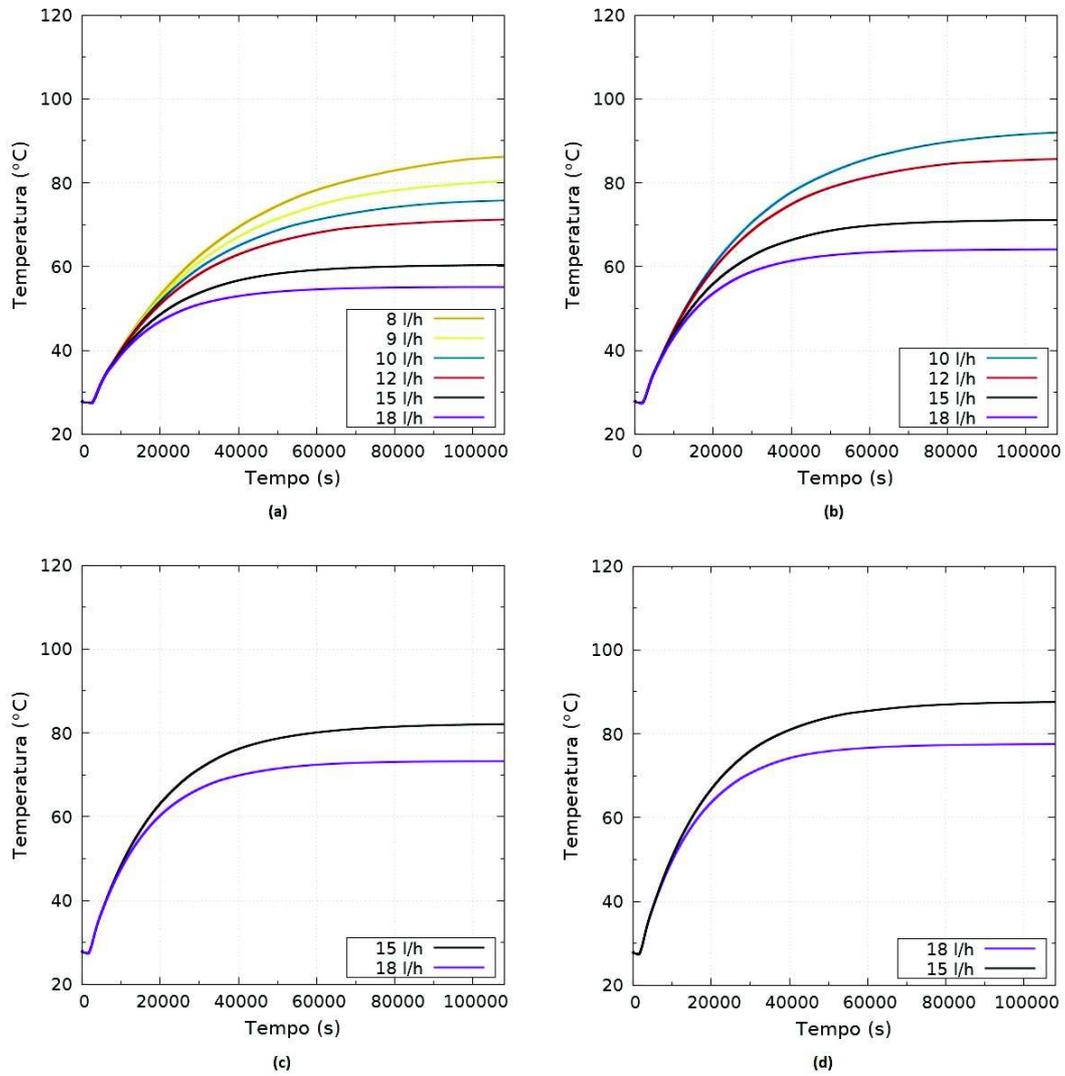


Figura 4.47: Temperatura na saída da água de resfriamento(TC12): (a) 600W, (b) 800W, (c) 1000W e (d) 1100W para os casos monofásicos.

do lado secundário. A vazão tenderá a aumentar até que seja necessário atingir o regime bifásico.

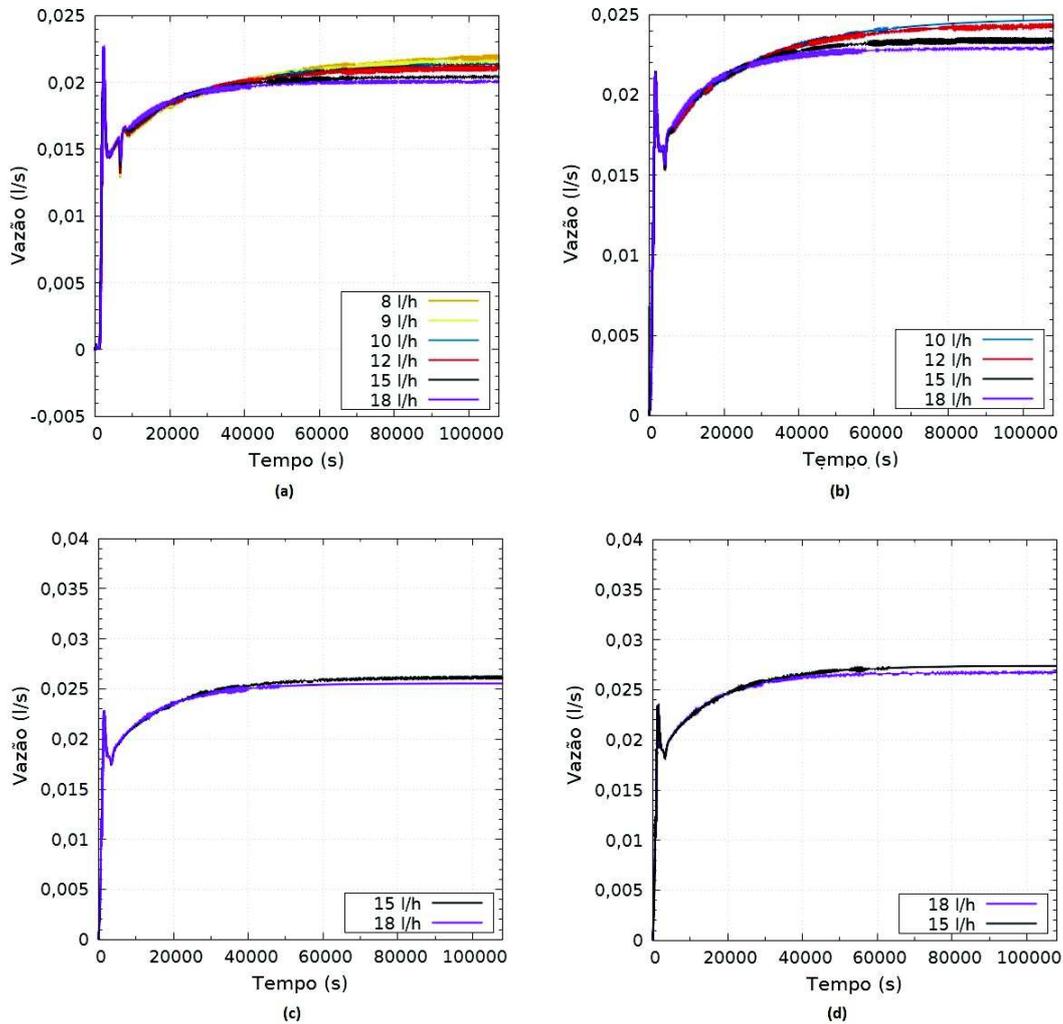


Figura 4.48: Vazão na Perna Fria do lado primário: (a) 600W, (b) 800W, (c) 1000W e (d) 1100W para os casos monofásicos.

4.5.2 Simulações Bifásicas

Conforme apresentado no Capítulo 2 existe uma dificuldade dos códigos da família RELAP5 simularem a circulação natural em regime bifásico. Porém as simulações apresentadas demonstraram um comportamento coerente com o esperado.

Entre as simulações que atingiram o regime bifásico, temos 3 conjuntos de si-

mulação, Potência de $600W$ com vazões de $3l/h$ e $6l/h$ e também potência de $800W$ com $8l/h$; que apresentaram apenas pequenas formações de bolhas próximo às resistências, mas ao atingirem a temperatura de saturação no Aquecedor, apresentaram um comportamento mais próximo a dos escoamentos bifásicos do que do monofásico, conforme pode ser observado pelas Figuras 4.49, 4.50, 4.51.

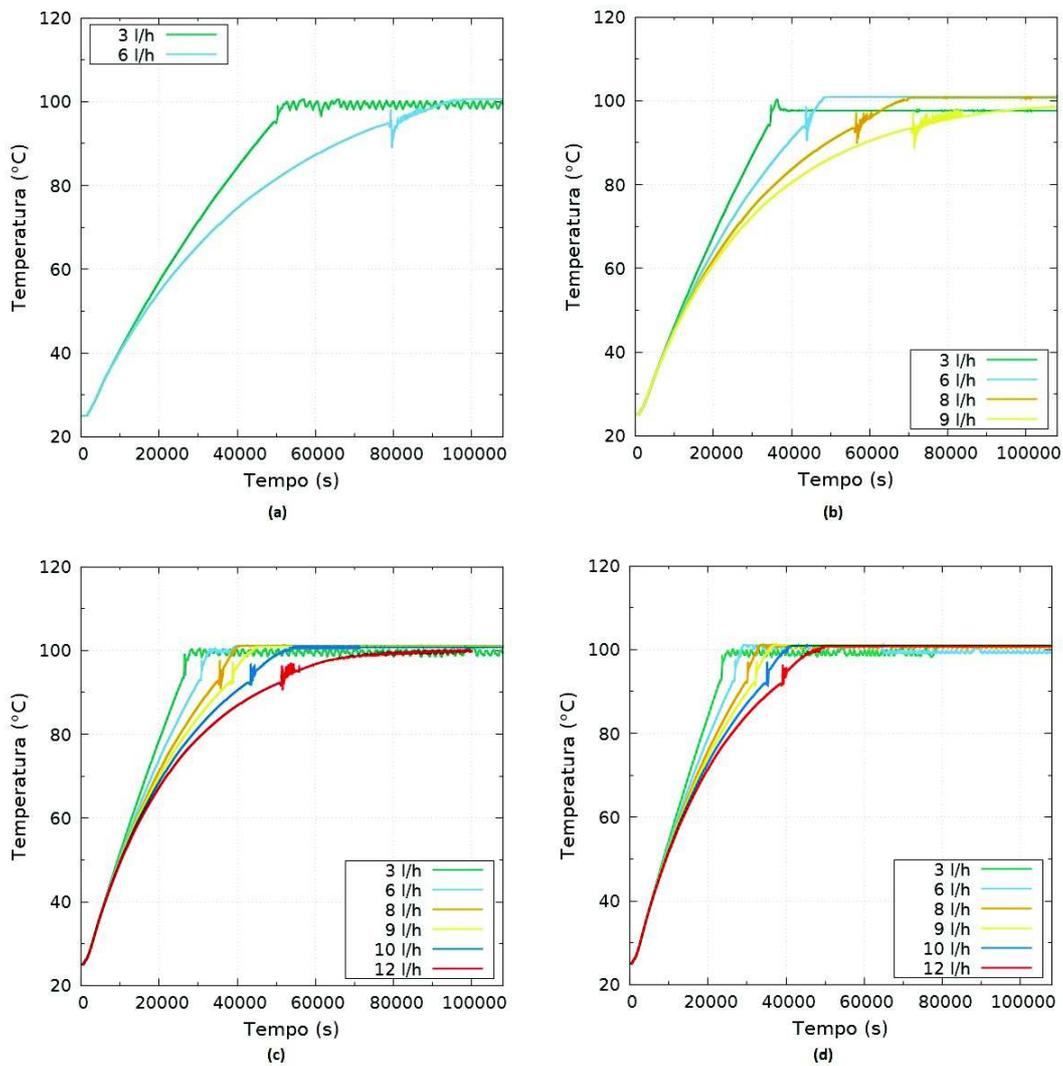


Figura 4.49: Temperatura na entrada do *downcomer*(TC1): (a) $600W$, (b) $800W$, (c) $1000W$ e (d) $1100W$ para os casos bifásico.

Este comportamento está ligado ao fato do regime de transferência de calor ter sido alterado. Isso pode ser confirmado ao verificar que as temperaturas de entrada e saída do trocador variam apenas em $2^{\circ}C$ aproximadamente, Figuras 4.52 e 4.53. Isso

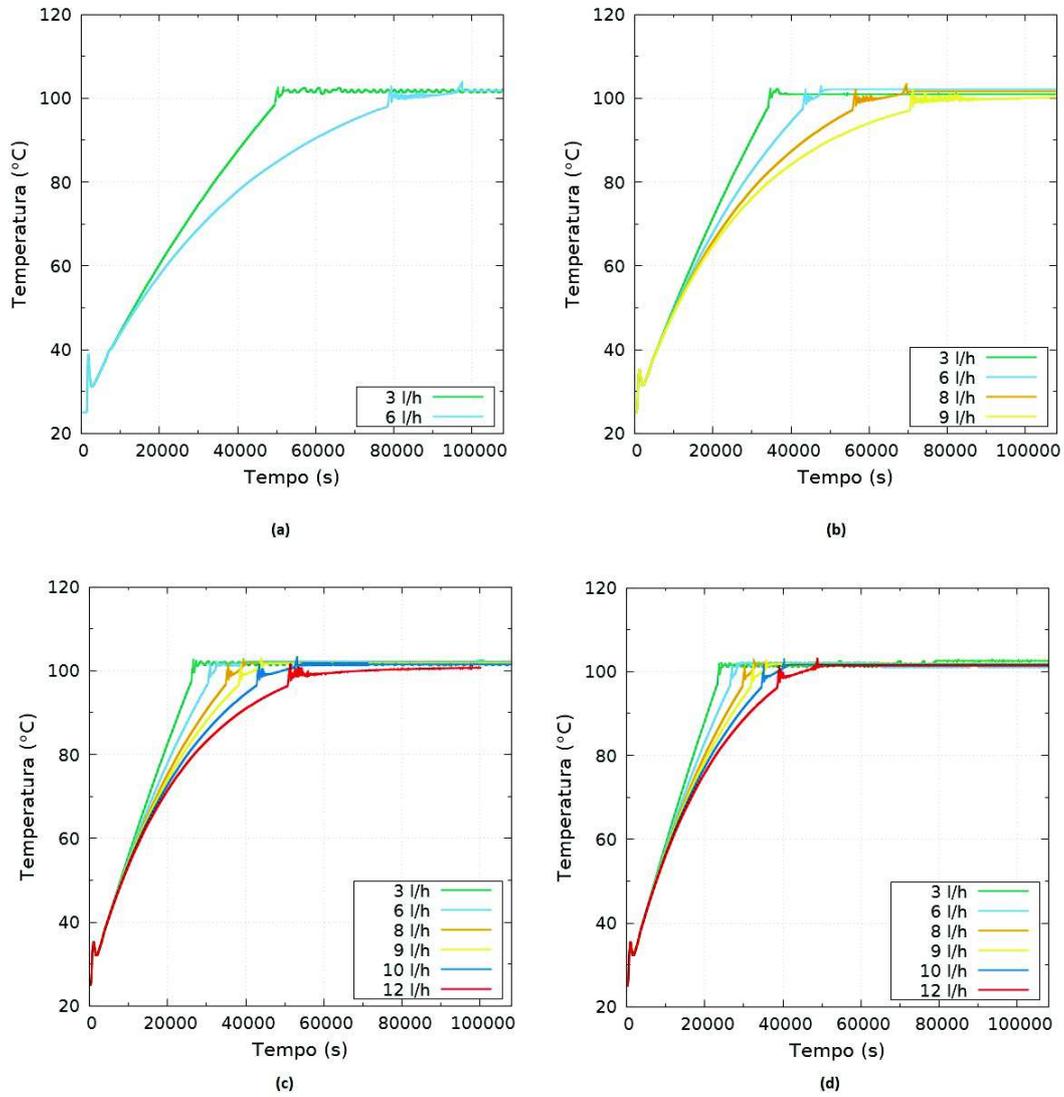


Figura 4.50: Temperatura na entrada do Pleno Inferior(TC11): (a) 600W, (b) 800W, (c) 1000W e (d) 1100W para os casos bifásico.

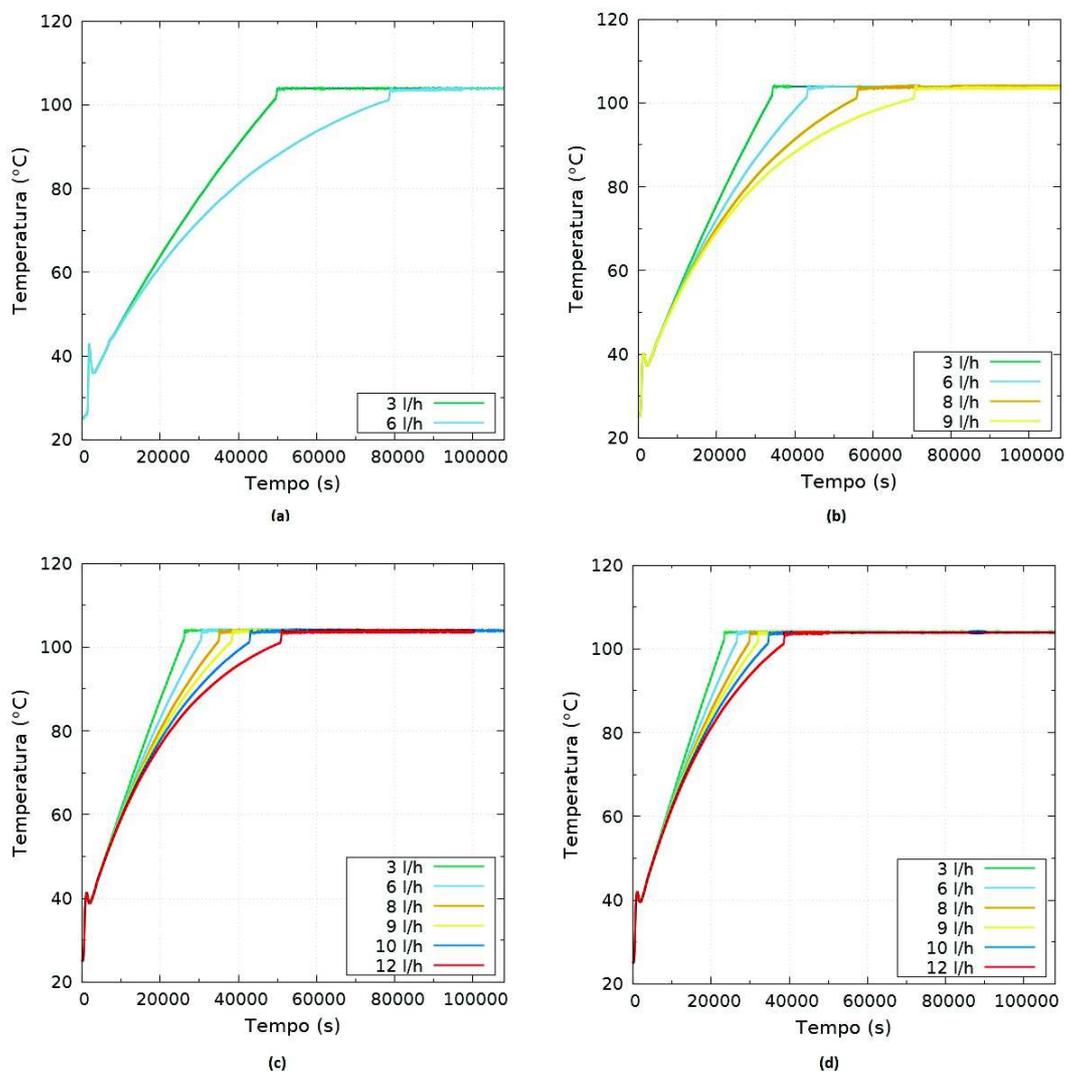


Figura 4.51: Temperatura na parede da entrada da Perna Quente(TC2): (a) 600W, (b) 800W, (c) 1000W e (d) 1100W para os casos bifásico.

mostra que praticamente todo calor retirado está na forma de calor latente.

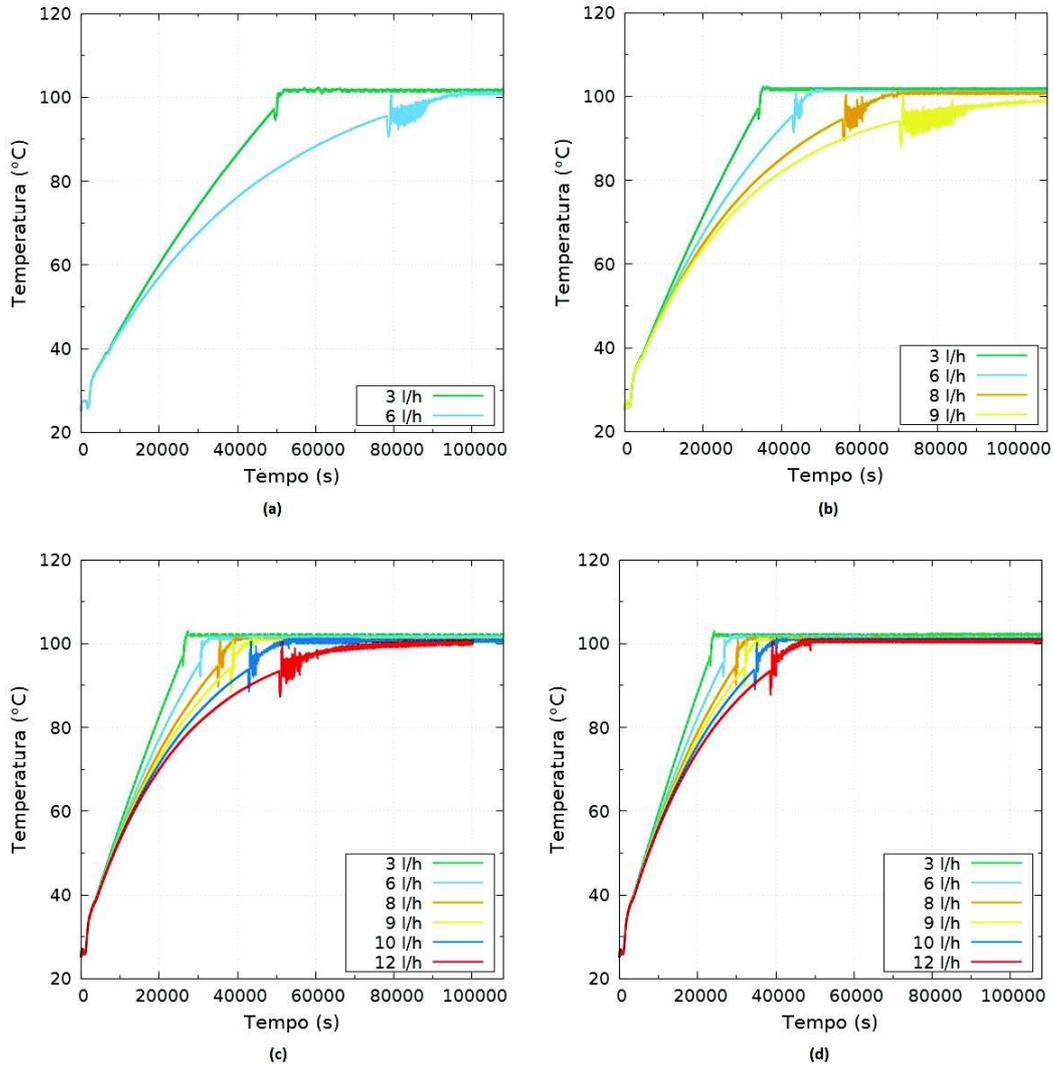


Figura 4.52: Temperatura na parede da entrada do Trocador de Calor(TC6): (a) 600W, (b) 800W, (c) 1000W e (d) 1100W para os casos bifásico.

O comportamento da vazão durante o regime bifásico, apresenta algumas descontinuidades, Figura 4.54, porém não foi possível observar as oscilações características deste tipo de regime na maioria das simulações.

A tentativa de alterar o modelo padrão do RELAP5, desativando o filtro *Water Packing* não produziu nenhum resultado perceptível.

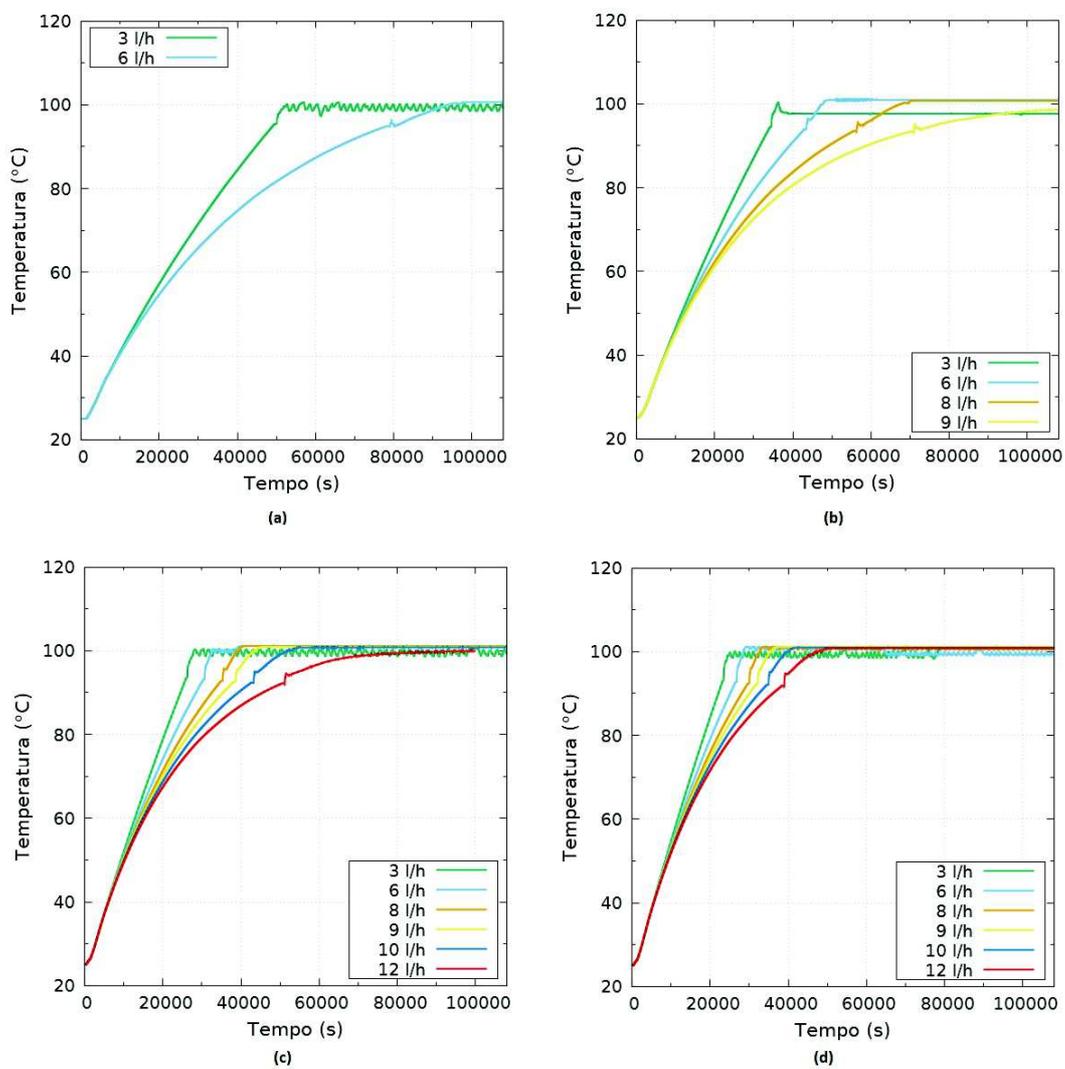


Figura 4.53: Temperatura na parede da saída do Trocador de Calor(TC8): (a) 600W, (b) 800W, (c) 1000W e (d) 1100W para os casos bifásico.

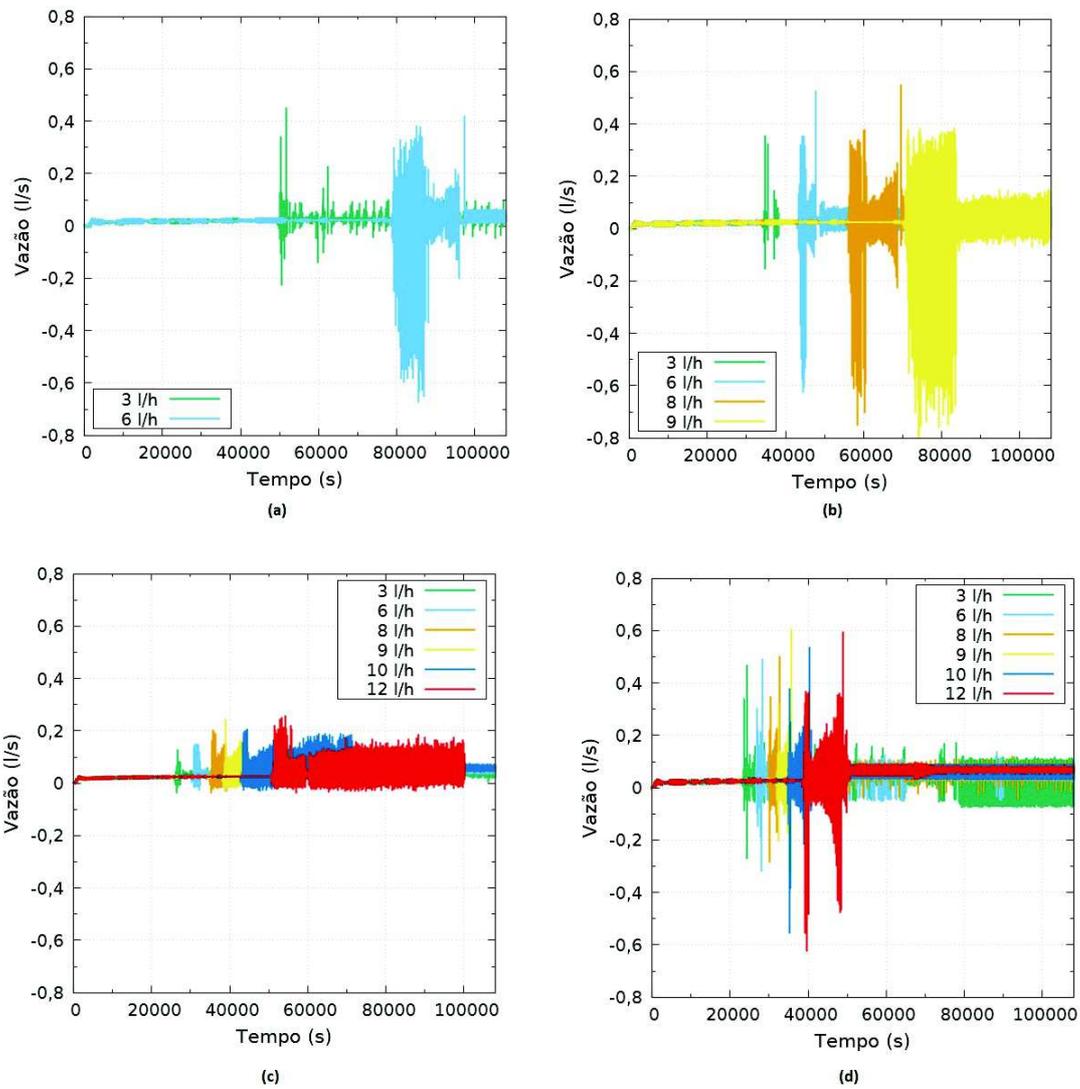


Figura 4.54: Vazão na Perna Fria do lado primário: (a) 600W, (b) 800W, (c) 1000W e (d) 1100W para os casos bifásico.

Capítulo 5

Conclusões e Sugestões

Neste trabalho estudou-se o comportamento do Circuito de Circulação Natural do IEN/CNEN utilizando o código computacional RELAP5/MOD3.2.

Através da nodalização proposta foi possível estudar alguns fenômenos locais, como a influência das estruturas passivas no tempo de estabilização da circulação e o aquecimento realizado pelo Aquecedor no *downcomer* através do cilindro interno. E também as circulações naturais localizadas no pleno superior e no Tanque de Expansão e o comportamento da pressão do Circuito em função da válvula de alívio. Observou-se que como o fenômeno ocorre em uma escala de tempo grande, o comportamento da temperatura das estruturas metálicas passivas, como as tubulações, ou das ativas, como as resistências, apresentam comportamento próximos à temperatura do fluido nos arredores.

Para o grupo de simulações monofásicas, o RELAP5 mostrou-se capaz de representar a instabilidade inicial, e a região estacionária. Apresentando uma relação direta entre a o aumento da vazão em relação à potência e a relação inversamente proporcional em relação à vazão do secundário.

Por fim, no grupo de simulações bifásicas, foi possível verificar a mudança no modelo de troca de calor, porém não foi possível verificar as oscilações na vazão. Tal fato está em concordância com a literatura. O trabalho aqui apresentado pode ser melhorado em alguns aspectos para melhor representar os fenômenos que ocorrem dentro do CCN. É importante que seja realizado um estudo de sensibilidade mais complexo da nodalização. Assim como uma análise mais completa das características

materiais e geométricas do Circuito. Além disso, é interessante também utilizar mais resultados experimentais tanto monofásico quanto bifásicos, para reforçar a validação da modelagem.

Referências Bibliográficas

- Ambrosini, W. e Ferreri, J. (1998). The effect of truncation error on the numerical prediction of linear stability boundaries in a natural circulation single-phase loop. *Nuclear Engineering and Design*, 183(1-2):53–76.
- Ambrosini, W. e Ferreri, J. C. (2003). Prediction of stability of one-dimensional natural circulation with a low diffusion numerical scheme. *Annals of Nuclear Energy*, 30(15):1505–1537.
- Andersen, P., Astrup, P., Eget, L., e Rathmann, O. (1977). Numerical experience with the two-fluid model, risque. In *Thermal reactor safety. Vol. II*.
- Arne, N., Cho, S., e Kim, H. (1993). Assessment of relap5/mod2 computer code against the natural circulation test data from yong-gwang unit 2. Technical report, Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (United States). Office of Nuclear Regulatory Research; Korea Electric Power Corp.(KEPCO), Taejon (Korea, Republic of). Research Center; Korea Inst. of Nuclear Safety, Taejon (Korea, Republic of).
- Bajs, T., Debrecin, N., Šegon, V., Khan, L., e Mahmood, A. (2000). Assessment of discretization approach for relap5/mod3 computer code. In *Proc. Int. Conf. Nuclear Energy in Central Europe*, páginas 11–14.
- Barnea, D., Shoham, O., Taitel, Y., e Dukler, A. (1980). Flow pattern transition for gas-liquid flow in horizontal and inclined pipes. comparison of experimental data with theory. *International Journal of Multiphase Flow*, 6(3):217–225.
- Barnea, D., Shoham, O., Taitel, Y., e Dukler, A. (1985). Gas-liquid flow in inclined

- tubes: flow pattern transitions for upward flow. *Chemical Engineering Science*, 40(1):131–136.
- Bergles, A. E., Collier, J., Delhaye, J. M., Hewitt, G., e Mayinger, F. (1981). *Two-phase flow and heat transfer in the power and process industries*. Hemisphere New York.
- Brennen, C. E. (2005). *Fundamentals of multiphase flow*. Cambridge University Press.
- D’Auria, F., Frogheri, M., e Misale, M. (1997). System codes capabilities in predicting instabilities in single-phase natural circulation. *Nuclear Energy in Central Europe*, página 555.
- Davies, R. M. e Taylor, G. (1950). The mechanics of larges bubbles rising trhough extend liquids and through liquids in tubes. *Proceedings of the Royal Society of London*, 200A:375–390.
- Elias, C. C. R. (2014). *Simulação Computacional do Trocador de Calor de um Circuito de Circulação Natural Bifásica.* , Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Fletcher, C. e Schultz, R. (1995a). *RELAP5/MOD3 Code Manual Volume I: User’s Guide and Input Requirements*.
- Fletcher, C. e Schultz, R. (1995b). *RELAP5/MOD3 Code Manual Volume II: User’s Guide and Input Requirements*.
- Guozhi, Z., Xinrong, C., e Xingwei, S. (2013). A study using relap5 on capability and instability of two-phase natural circulation flow under passive external reactor vessel cooling. *Annals of Nuclear Energy*, 60:115–126.
- International Atomic Energy, I. (2000). *Experimental Tests and Qualification of Analytical Methods to Address Thermo Hydraulic Phenomena in Advanced Water Cooled Reactors*. IAEA-TECDOC-1149.
- International Atomic Energy, I. (2001). *Thermo Hydraulic Relationship for Advanced Water Cooled Reactors,*. IAEA-TECDOC-1203.

- International Atomic Energy, I. (2002). *Natural Circulation Data and Methods for Advanced Nuclear Power Plant Design*. IAEA-TECDOC-1281.
- International Atomic Energy, I. (2005). *Natural Circulation in Water Cooled Nuclear Power Plants*. IAEA-TECDOC-1474.
- International Atomic Energy, I. (2012). *Natural Circulation Phenomena and Modeling for Advanced Water Cooled Reactors*. IAEA-TECDOC-1677.
- Kozmenkov, Y., Rohde, U., e Manera, A. (2012). Validation of the relap5 code for the modeling of flashing-induced instabilities under natural-circulation conditions using experimental data from the circus test facility. *Nuclear Engineering and Design*, 243:168–175.
- Lakshmanan, S. e Pandey, M. (2010). Numerical investigation of startup instabilities in parallel-channel natural circulation boiling systems. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 2010.
- Lemos, W. F. (2014). *Estudo Experimental de Circulação Natural Bifásica Ultrasônicas e de Visualização*. , Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Nuclear. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Lemos, W. F., Faccini, J. L. H., e Su, J. (2012). Experimental study of two-phase natural circulation circuit. In *Proceedings of the 14^o Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering*, Rio de Janeiro,RJ, Brazil.
- Lemos, W. F., Faccini, J. L. H., e Su, J. (2013). Flow visualization of bubble behavior under two-phase natural circulation flow conditions using high speed digital camera. In *Proceedings of International Nuclear Atlantic Conference*, Recife, PE, Brazil.
- Lewis, E. E. (1977). *Nuclear Power Reactor Safety*. A Wiley-interscience publication, primeira edição.
- Mangal, A., Jain, V., e Nayak, A. (2012). Capability of the relap5 code to simulate natural circulation behavior in test facilities. *Progress in Nuclear Energy*, 61:1–16.

- Martin, R. e Taylor, B. (1992). Benchmarking assessment of relap5/mod3 for the low flow and natural circulation experiment. Technical report, Westinghouse Savannah River Co., Aiken, SC (United States).
- Misale, M., Frogheri, M., D'Auria, F., Fontani, E., e Garcia, A. (1999). Analysis of single-phase natural circulation experiments by system codes. *International journal of thermal sciences*, 38(11):977–983.
- Mousavian, S. K., Misale, M., D'Auria, F., e Salehi, M. A. (2004). Transient and stability analysis in single-phase natural circulation. *Annals of Nuclear Energy*, 31(10):1177–1198.
- No, H. (1985). Studies of water packing phenomenon in safety analysis codes. In *Proceedings of third international topical meeting on reactor thermal hydraulics*.
- Pershagen, B. (1989). *Light Water Reactor Safety*. PERGAMON PRESS, primeira edição.
- Rabiee, A., Mirzaee, M. M., Nematollahi, M. R., e Atf, A. (2016). Experimental and numerical investigation of natural circulation stability of the shuncl thermal-hydraulic loop. *Progress in Nuclear Energy*, 93:386–396.
- Reis, P. (2009). *Avaliação Termo-Hidráulica do Reator TRIGA IPR-R1 Utilizando o Código RELAP5*. , dissertação de mestrado, DEN, UFMG, Belo Horizonte, Brazil.
- Sabundjian, G., Andrade, D. A. d., Umbehaun, P. E., Torres, W. M., Castro, A. J. A. d., Braz, F., Francisco, A., Borges, E. M., Belchior, J., Rocha, R. T. V. d., et al. (2007). Relap5 simulation for one and two-phase natural circulation phenomenon.
- Sabundjian, G., Torres, W. M., Macedo, L. A., Mesquita, R. N., Andrade, D. A., Umbehaun, P. E., Conti, T. N., Masotti, P. H., Junior, A. B., e Angelo, G. (2011). A relap5 study to identify flow regime in natural circulation phenomenon. *INAC2011, Belo Horizonte*.
- Todreas, N. E. e Kazimi, M. S. (1990). *Nuclear systems I: Elements of thermal hydraulic design*, volume 1. Taylor & Francis.

- Todreas, N. E. e Kazimi, M. S. (2001). *Nuclear systems II: Elements of thermal hydraulic design*, volume 2. Taylor & Francis.
- Tong, L. S. e Weisman, J. (1979). *Thermal analysis of pressurized water reactors*. American Nuclear Society, LaGrange Park, IL.
- Veríssimo, G. L. (2011). Modelagem e análise termo-hidráulica de um circuito de circulação usando uma ferramenta de cfd. XIX Seminário Anual Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica CNPq-PIBIC.
- Vianna, A. L., Faccini, J. L., Su, J., et al. (2017). Transient modelling of a natural circulation loop under variable pressure. In *Proceedings of International Nuclear Atlantic Conference*, Recife, PE, Brazil.
- Vileiniskis, V. e Kaliatka, A. (2003). Uncertainty and sensitivity analysis of mcps trip events at ignalina npp. *Nuclear engineering and design*, 224(2):213–225.
- Vinhas, P. A. M., Faccini, J. L. H., e Su, J. (2013). Experimental study of natural two-phase flow circulation using a visualization technique. In *Proceedings of International Nuclear Atlantic Conference*, Recife, PE, Brazil.
- Wallis, G. B. (1969). *One Dimensional Two-phase Flow*. John Wiley and Sons, Inc., primeira edição.
- Weisman, J. e Kang, S. (1981). Flow pattern transitions in vertical and upwardly inclined lines. *International Journal of Multiphase Flow*, 7(3):271–291.
- Zhou, Y., Zhang, Z., Lin, M., Hou, D., e Yan, X. (2013). Capability of relap5 mod3.3 code to simulate density wave instability in parallel narrow rectangular channels. *Annals of Nuclear Energy*, 60:256–266.