



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

**Experimentos no circuito de circulação natural e simulação numérica com o
código RELAP5/MOD3.3**

LUCAS SHIMADA FRENZEL

**Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear - Reatores**

**Orientadora:
Profa. Dra. Gaianê Sabundjian**

**São Paulo
2023**

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

**Experimentos no circuito de circulação natural e simulação numérica com o
código RELAP5/MOD3.3**

Versão Original

Versão Original disponível no IPEN

LUCAS SHIMADA FRENZEL

**Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do Grau
de Mestre em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear - Reatores**

**Orientadora:
Profa. Dra. Gaianê Sabundjian**

**São Paulo
2023**

Fonte de Financiamento: CNPq

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Como citar:

SHIMADA FRENZEL, L. *Experimentos no circuito de circulação natural e simulação numérica com o código RELAP5/MOD3.3*. 2023. 129 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN, São Paulo. Disponível em: <<http://repositorio.ipen.br/>> (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de geração automática da Biblioteca IPEN, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

<p>Shimada Frenzel, Lucas Experimentos no circuito de circulação natural e simulação numérica com o código RELAP5/MOD3.3 / Lucas Shimada Frenzel; orientadora Gaiânê Sabundjian. -- São Paulo, 2023. 129 f.</p> <p>Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear (Reatores) -- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2023.</p> <p>1. circulação natural. 2. RELAP5. 3. termo-hidráulica. 4. reatores nucleares. I. Sabundjian, Gaiânê, orient. II. Título.</p>
--

FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor: Lucas Shimada Frenzel

Título: Experimentos no circuito de circulação natural e simulação numérica com o código RELAP5/MOD3.3

Tese (Dissertação) apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Data: 24 / 02 / 2023

Banca Examinadora

Profa. Dr.(a): Gaianê Sabundjian

Instituição: IPEN

Julgamento: aprovado

Profa. Dr.(a): Patrícia Andréa Paladino

Instituição: IFSP

Julgamento: aprovado

Prof. Dr.: Eduardo Madeira Borges

Instituição: IEAv

Julgamento: aprovado

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Eurico e Rita, que passaram a mim amor e sabedoria, zelando desde sempre pela minha autonomia e felicidade.

À Juliana, luz que trouxe conforto, carinho e amor à minha vida.

À Gaiânê, minha orientadora que, com sua fé, confiou a mim a honra na elaboração deste trabalho, me guiando com perseverança, sabedoria e ânimo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha professora, orientadora e amiga, Dra. Gaiânê Sabundjian, pela paciência, apoio e carinho.

Agradeço aos colegas Arthur Flausino, Marcelo da Silva Rocha, Antonio Belchior Junior, Adélk de Carvalho Prado, Walmir Máximo Torres e Armen Ghazarian pela colaboração no projeto.

Agradeço ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), em especial à equipe do CEENG, pela oportunidade de aprender e conduzir este trabalho.

Agradeço também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de pesquisa.

*"Ninguém educa ninguém, ninguém educa a si mesmo, os homens se educam entre si,
mediatizados pelo mundo."*

Paulo Freire

RESUMO

FRENZEL, L. S. **Experimentos no circuito de circulação natural e simulação numérica com o código RELAP5/MOD3.3.** 2023, 129 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP. São Paulo.

A circulação natural vem sendo um importante tópico de estudo em relação aos sistemas passivos de segurança no resfriamento do núcleo de reatores nucleares, principalmente pelo fato de ter como base a inerência das leis da Física, não dependendo de nenhuma força externa para sua aplicação. O estudo de circuitos experimentais de circulação natural e a simulação numérica com o código RELAP5, em suas diversas modalidades, para análise de transientes e acidentes que podem ocorrer em reatores nucleares têm sido amplamente estudados pela literatura. O presente estudo tem como objetivo estudar a capacidade do código RELAP5/MOD3.3 em reproduzir a fenomenologia da circulação natural em regimes monofásico e bifásico obtida por meio de um circuito de circulação natural (CCN) que se encontra no laboratório de termo-hidráulica do Centro de Engenharia Nuclear (CEENG) do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) em São Paulo. Algumas melhorias foram realizadas no circuito experimental, como a inserção de um medidor de vazão, que mudaram as condições iniciais dos transientes ocorridos no circuito, como um sensor de fração de vazio, onde os dados experimentais da fração de vazio, da vazão, das temperaturas e da pressão são comparados com os resultados da simulação numérica obtida com o código RELAP5/MOD3.3. A modelagem dos dados de entrada (*input*) do CCN foi feita com uso do pré-processador FastLAP, que possui uma lógica de funcionamento mais intuitiva e visual do que outros pré-processadores, com janelas de criação padronizadas de acordo com o manual de uso do RELAP5/MOD3.3. Os resultados se mostraram satisfatórios, em que o código RELAP5/MOD3.3 é capaz de projetar tanto o escoamento monofásico quanto bifásico, sendo evidenciado que os modelos de transferência de calor e os padrões de escoamento utilizados no RELAP5/MOD3.3 estão em concordância com os resultados experimentais.

Palavras-chave: circulação natural; RELAP5; termo-hidráulica; reatores nucleares.

ABSTRACT

FRENZEL, L. S. **Experiments at natural circulation circuit and numerical simulation with RELAP5/MOD3.3 code.** 2023, 129 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP. São Paulo.

Natural circulation has been an important topic of study related to passive safety systems in the cooling of nuclear reactors, mainly because it is based on the inherent laws of Physics, not depending on any external force for its application. The study of experimental circuits of natural circulation and numerical simulation with the RELAP5 code, in its various modalities, for the analysis of transients and accidents that can occur in nuclear reactors have been widely studied in the literature. The present study aims to study the ability of the RELAP5/MOD3.3 code to reproduce the phenomenology of natural circulation in single-phase and two-phase regimes obtained through a natural circulation circuit (CCN) that is located in the thermo-hydraulic laboratory of the Nuclear Engineering Center (CEENG) of the Institute for Energy and Nuclear Research (IPEN) in São Paulo. Some improvements were made in the experimental circuit, such as the insertion of a flow meter, which changed the initial conditions of the transients that occurred in the circuit, such as a void fraction sensor, where the experimental data of the void fraction, fluid flow, temperatures and pressure are compared with the numerical simulation results obtained with the RELAP5/MOD3.3 code. The CCN input data modeling was done using the FastLAP pre-processor, which has a more intuitive and visual operating logic than other pre-processors, with standardized creation windows according to the RELAP5/MOD3.3 user's manual. The results were satisfactory, in which the RELAP5/MOD3.3 code is able to project both single-phase and two-phase flow, it was evidenced that the heat transfer models and the flow patterns used in RELAP5/MOD3.3 are in agreement with the experimental results.

Key words: natural circulation; RELAP5; thermos hydraulics; nuclear reactors.

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1 – Vantagens e desvantagens de sistemas de circulação natural	27
Tabela 2 – Trabalhos de circulação natural em regimes monofásico e bifásico.....	31
Tabela 3 – Padrões de escoamento em regime bifásico no RELAP5/MOD3.3	46
Tabela 4 – Correspondência numérica dos modelos de transferência de calor	49
Tabela 5 – Elementos mais utilizados em simulações com o código RELAP5	50
Tabela 6 – Variáveis extraídas do RELAP5/MOD3.3.....	67
Tabela 7 – Condições operacionais do CCN para os escoamentos monofásico e bifásico .	70
Tabela 8 – Expressões algébricas para resistência e capacitância relativas adimensionais, R^* e C^*	97
Tabela 9 – Resultados para teste estático.....	101

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 – Esquematização de um CCN.....	22
Figura 2 – Mudança de escoamento monofásico para bifásico	24
Figura 3 – Padrões de escoamento vertical em regime bifásico	24
Figura 4 – Padrões de escoamento horizontal em regime bifásico.....	25
Figura 5 – Ilustração do reator modular CAREM com parâmetros técnicos.....	36
Figura 6 – Ilustração do reator modular SMART com parâmetros técnicos	38
Figura 7 – Ilustração do reator modular <i>NuScale</i> com parâmetros técnicos	40
Figura 8 – Transferência de calor da interface do volume (<i>bulk</i>) e perto da parede (<i>wall</i>) .	44
Figura 9 – Mapa dos regimes de escoamento vertical no RELAP5/MOD3.3	45
Figura 10 – Mapa dos regimes de escoamento horizontal no RELAP5/MOD3.3.....	46
Figura 11 – Curva de ebulição e condensação do RELAP5	48
Figura 12 – Circuito de Circulação Natural (CCN).....	54
Figura 13 – Termopar tipo K	55
Figura 14 – Esquematização do CCN.....	55
Figura 15 – Medidores de pressão diferenciais	56
Figura 16 – Medidores de vazão: a) primário; b) secundário; c) rotâmetros.....	57
Figura 17 – Sensor de fração de vazio.....	58
Figura 18 – Bloco de aquisição de dados	59
Figura 19 – Interface de aquisição com LabView®	59
Figura 20 – Nodalização simples com a técnica <i>slice nodalization</i>	60
Figura 21 – <i>Slice nodalization</i> aplicada ao circuito primário do CCN.....	62
Figura 22 – Modelagem do CCN no FastLAP com a correspondência entre os componentes do código e as regiões hidráulicas	64
Figura 23 – Janela de execução do RELAP5/MOD3.3	66
Figura 24 – Edições menores RELAP5/MOD3.3.....	68
Figura 25 – Macro para exportar resultados em uma planilha do <i>MS Excel</i> ®	68
Figura 26 – Evolução numérica/experimental das temperaturas em regime monofásico para o termopar T12 acima da região do aquecedor.....	72
Figura 27 – Evolução numérica/experimental das temperaturas em regime monofásico para o termopar T17 na perna fria	73

Figura 28 – Evolução numérica/experimental das temperaturas em regime monofásico para o termopar T22 na saída do trocador de calor	73
Figura 29 – Evolução numérica/experimental das temperaturas em regime monofásico para o termopar de parede TP1 acima do aquecedor	75
Figura 30 – Evolução numérica/experimental da pressão em regime monofásico na seção acima do aquecedor	75
Figura 31 – Evolução numérica/experimental da vazão no circuito primário em regime monofásico.....	76
Figura 32 – Evolução numérica/experimental da fração de vazio em regime monofásico na seção do sensor de fração de vazio	77
Figura 33 – Evolução numérica do padrão de escoamento em regime monofásico na seção do sensor de fração de vazio	77
Figura 34 – Evolução numérica do modelo de transferência de calor em regime monofásico na seção do sensor de fração de vazio	78
Figura 35 – Evolução numérica/experimental das temperaturas em regime bifásico para o termopar T12 acima da região do aquecedor	79
Figura 36 – Evolução numérica/experimental das temperaturas em regime bifásico para o termopar T17 na perna fria	80
Figura 37 – Evolução numérica/experimental das temperaturas em regime bifásico para o termopar T22 na saída do trocador de calor	81
Figura 38 – Evolução numérica/experimental das temperaturas em regime bifásico para o termopar de parede TP1 acima do aquecedor	81
Figura 39 – Evolução numérica/experimental da pressão em regime bifásico na seção acima do aquecedor	82
Figura 40 – Evolução numérica/experimental da vazão no circuito primário em regime bifásico.....	82
Figura 41 – Evolução experimental do nível no tanque de expansão em regime bifásico ..	83
Figura 42 – Evolução numérica/experimental da temperatura no tanque de expansão em regime bifásico.....	84
Figura 43 – Proporcionalidade entre a potência fornecida e a vazão de resfriamento	84
Figura 44 – Evolução numérica/experimental da fração de vazio em regime bifásico na seção acima do aquecedor	85

Figura 45 – Evolução numérica do padrão de escoamento em regime bifásico na seção do sensor de fração de vazio	86
Figura 46 – Evolução numérica do modelo de transferência de calor em regime bifásico na seção do sensor de fração de vazio	86
Figura 47 – Simplificação da fração de vazio.....	96
Figura 48 – Fração de vazio para líquidos com dominância capacitiva	98
Figura 49 – Fração de vazio para líquidos com dominância capacitiva	99
Figura 50 – Fração de vazio para líquidos com dominância capacitiva	99
Figura 51 – Montagem circuito eletrônico	100
Figura 52 – Teste estático sensor fração de vazio	100
Figura 53 – Aba <i>Cover</i>	102
Figura 54 – Aba <i>RELAP5 Input</i>	103
Figura 55 – Componentes hidrodinâmicos <i>FastLAP</i>	103
Figura 56 – Janela de criação PIPE	104
Figura 57 – Janela de criação SINGLJUN	105
Figura 58 – Listagem de componentes para junção.....	105
Figura 59 – Janela de criação de TMDPJUN	106
Figura 60 – Janela de criação BRANCH	106
Figura 61 – Janela de criação TMDPVOL	107
Figura 62 – Listagem componentes hidrodinâmicos a serem associados às estruturas de calor	108
Figura 63 – Janela de criação estruturas de troca de calor.....	108
Figura 64 – Janela de criação das propriedades térmicas das estruturas de calor.....	109
Figura 65 – Janela de criação das tabelas gerais.....	109
Figura 66 – Janela de configurações gerais (<i>Settings</i>).....	110

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATHLET	<i>Analysis of Thermal-hydraulics of Leaks and Transients</i>
ATWS	<i>Anticipated Transients Without Scram</i>
BARC	<i>Bhabha Atomic Research Centre</i>
BWR	<i>Boiling Water Reactor</i>
CATHARE	<i>Code Avancé de Thermohydraulique pour les Accidents sur les Réacteurs à Eau</i>
CCN	Circuito de Circulação Natural
CEENG	Centro de Engenharia Nuclear
CHF	<i>Critical Heat Flux</i>
CNEA	<i>Comisión Nacional de Energía Atómica</i>
CRDM	<i>Control Rod Driving Mechanism</i>
DNB	<i>Departure from Nucleate Boiling</i>
ECCS	<i>Emergency Core Cooling System</i>
FORTTRAN	<i>Formula Translation</i>
IAEA	<i>International Atomic Energy Agency</i>
INEL	<i>Idaho National Engineering Laboratory</i>
IPEN	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
KAERI	<i>Korea Atomic Energy Research Institute</i>
LBLOCA	<i>Large-break Loss of Coolant Accident</i>
LOCA	<i>Loss of Coolant Accident</i>
LWR	<i>Light Water Reactor</i>
NPM	<i>NuScale Power Module</i>
NRC	<i>U.S. Nuclear Regulatory Commission</i>
OSU	<i>Oregon State University</i>
PCRELAP5	Programa de Cálculo do RELAP5

PF	Perna Fria
PHWR	<i>Pressurized Heavy-Water Reactor</i>
PQ	Perna Quente
PREREL5	Pré-processador do RELAP5
PRHRS	<i>Passive Residual Heat Removal System</i>
PSI	<i>Paul Scherrer Institute</i>
PWR	<i>Pressurized Water Reactor</i>
RELAP5	<i>Reactor Excursion and Leak Analysis Program</i>
SBLOCA	<i>Small Break Loss of Coolant Accident</i>
SMART	<i>System-Integrated Modular Advanced Reactor</i>
SMR	<i>Small Modular Reactor</i>
TRAC	<i>Transient Reactor Analysis Code</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Objetivo.....	19
1.2	Motivação do trabalho	20
1.3	Organização da dissertação	20
2	REVISÃO DA LITERATURA	22
2.1	Fenomenologia da circulação natural	22
2.2	Experimentos de circulação natural	29
2.3	Reatores nucleares que utilizam circulação natural	35
2.3.1	CAREM (CNEA, Argentina).....	36
2.3.2	SMART (KAERI, Coréia do Sul).....	37
2.3.3	NuScale (NuScale Power Inc., EUA)	39
2.4	Código RELAP5	40
2.4.1	Pré-processadores para RELAP5	51
3	MATERIAIS E MÉTODO	53
3.1	Circuito de Circulação Natural (CCN).....	53
3.1.1	Instrumentação	54
3.1.1.1	Termopares.....	54
3.1.1.2	Sensores de pressão.....	55
3.1.1.3	Medidores de vazão	56
3.1.1.4	Sensor de fração de vazio	57
3.1.1.5	Sistema de aquisição de dados	58
3.2	Desenvolvimento do trabalho	60
3.2.1	Modelagem dos dados de entrada do circuito com pré-processador FastLAP	60
3.2.2	Simulação da experiência com RELAP5/MOD3.3.....	66
3.2.3	Experimentos no Circuito de Circulação Natural (CCN)	69
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	71
4.1	Regime monofásico.....	71
4.2	Regime bifásico.....	78
5	CONCLUSÕES	88
5.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	89
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91

APÊNDICE A – Detalhes sobre a construção e instalação do sensor de fração de vazio no CCN.....	96
APÊNDICE B – Janelas de criação de componentes pelo FastLAP	102
APÊNDICE C – Dados de entrada (<i>input</i>) do CCN para RELAP5/MOD3.3	111

1 INTRODUÇÃO

No mundo existem 443 reatores em operação e uma capacidade operacional de 394GWe, distribuídos por 33 países. Nos últimos dez anos, os novos empreendimentos termonucleares têm se localizado majoritariamente na Ásia (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION – WNA, 2021).

No Brasil, segundo PLANO NACIONAL DE ENERGIA 2050 (PNE-2050) (2020), os reatores a água leve pressurizada (PWR), Angra 1 e 2, foram a opção tecnológica adotada por ser a mais utilizada em todo o mundo, com mais de 60% das usinas em operação. Essa opção será mantida para Angra 3 e para novos projetos de usinas que sejam eventualmente definidos ao longo das próximas décadas, com uma expansão mínima prevista de 4GW, podendo chegar a 8GW. Espera-se que após 2030, novos projetos possam se basear nos *Small Modular Reactor* (SMR) e reatores de quarta geração, caso essas últimas alcancem maturidade tecnológica e competitividade.

Uma vez abordada a tendência mundial e nacional da energia nuclear, evidencia-se a importância de estudos relacionados a uma maior compreensão da fenomenologia ocorrida em reatores nucleares que utilizam a circulação natural como sistema passivo de segurança, garantindo, assim, a distribuição de energia limpa e segura à sociedade.

A circulação natural em reatores nucleares é o regime de operação de um sistema onde a força motriz do escoamento é a força de empuxo gerada pela diferença de densidades no fluido. Os circuitos operando em regime de circulação natural, também chamados de termossifões, têm várias aplicações na engenharia, tais como: aquecimento de água por meio da energia solar, refrigeração em processos químicos, resfriamento de componentes eletrônicos, aplicações na energia geotérmica, reatores nucleares, entre outros (SABUNDJIAN et al., 2006).

De acordo com a INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA) (2012) o fenômeno de circulação natural em reatores nucleares é importante para a remoção de calor residual no caso de perda de alimentação das bombas do circuito primário e em operações a baixa potência, sendo que em alguns projetos utilizam a circulação natural para remoção do calor do núcleo durante a operação normal. Alguns exemplos destes tipos de

reatores são: o CAREM, desenvolvido pela Comissão Nacional de Energia Atômica da Argentina (CNEA), o *NuScale*, desenvolvido nos EUA, dentre outros reatores. A maioria dos sistemas de segurança passiva usados na evolução de projetos inovadores de reatores refrigerados a água são movidos por circulação natural (IAEA, 2017).

Desde 2004 com o encontro proposto pela IAEA, o *Coordinated Research Project (CRP)* intitulado de *Natural Circulation Phenomena, Modelling and Reliability of Passive Safety Systems that Utilize Natural Circulation*, vem provendo colaborações internacionais entre os países membros no estudo da fenomenologia e aplicação da circulação natural em reatores nucleares resfriados a água leve, no intuito de melhorar sua economia e segurança. As atividades incluem a criação de bancos de dados de processos físicos que possuem relevância na operação e segurança de reatores nucleares refrigerados a água leve, como a circulação natural, havendo o compartilhamento de informações por meio de bancos de dados, testes experimentais, formulação e resolução de métodos analíticos e numéricos (IAEA, 2005).

A fim de promover o estudo de circulação natural neste trabalho é utilizado o Circuito de Circulação Natural (CCN) instalado no laboratório de termo-hidráulica do Centro de Engenharia Nuclear (CEENG) do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares de São Paulo (IPEN), que foi doado pelo Departamento de Engenharia Química da Escola Politécnica em 2009 para o IPEN.

A simulação e análise do fenômeno de circulação natural para os regimes monofásico e bifásico já foram realizados no mesmo circuito experimental, no trabalho de SABUNDJIAN et al. (2006), no entanto, o circuito passou por uma série de reparos e modificações, que alteraram as condições iniciais da fenomenologia ocorrida durante a simulação dos transientes. Por conseguinte, foram realizadas melhorias, visando um maior número de aquisição de dados experimentais e com uma nova modelagem numérica.

Baseado nos trabalhos em regime de circulação natural encontrados na literatura, é que se viu a necessidade de um estudo dos casos onde, os níveis de fluxos de calor envolvidos provoquem mudança de fase no fluido de trabalho. É nesta etapa que se insere este estudo, em que os experimentos foram realizados no CCN/IPEN, o qual foi remodelado para ser inserido um medidor de vazão, além de serem colocadas novas junções de teflon entre as tubulações de vidro e cabos de aço para dar estabilidade ao circuito. Uma vez remontado o circuito, foram realizadas as seguintes etapas:

- a instalação de um medidor de fração de vazio (*void fraction*) capacitivo inspirado no trabalho desenvolvido por ROCHA (2005);
- a realização dos experimentos em regimes monofásico e bifásico, cujos resultados são comparados com a simulação numérica do CCN/IPEN com o código RELAP5 (*Reactor Excursion and Leak Analysis Program*) (IDAHO NATIONAL LABORATORY, 2010).

O código computacional RELAP5 possui uma filosofia realista (*best estimate*) e foi desenvolvido para simular acidentes e transientes em reatores refrigerados a água leve do tipo *Pressurized Water Reactor* (PWR), *Boiling Water Reactor* (BWR) e água pesada *Pressurized Heavy-Water Reactor* (PHWR), além de sistemas associados.

O código tem a capacidade de simular: acidentes de perda de refrigerante primário por pequena ou grande ruptura, conhecido como *Loss of Coolant Accident* (LOCA)¹, acidentes de perda de potência elétrica, acidentes de perda de água de alimentação, acidentes de perda de vazão, entre outros.

Nesse trabalho foi estudada a fenomenologia envolvida na circulação natural, nos regimes monofásico e bifásico, e realizadas análises numéricas para a validação dos modelos do código computacional de termo-hidráulica RELAP5 versão 3.3, que é utilizado no licenciamento de instalações nucleares no país.

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho, a partir da nova configuração do CCN/IPEN é:

- a instalação do medidor de fração de vazio baseado no trabalho de ROCHA (2005);
- desenvolver uma nova memória de cálculo que corresponde aos dados de entrada para o RELAP5/MOD3.3, utilizando para isto o pré-processador matemático do código, FastLAP, desenvolvido por MONACO (2019);

¹ *Loss of Coolant Accident* (LOCA) é um evento em que o fluido refrigerante é perdido do reator. O cenário mais dramático em que isso pode acontecer é conhecido como *Large-break* LOCA (LBLOCA) em que um dos tubos de refrigeração do circuito primário do vaso de pressão do reator rompe. Nesse caso, devido à pressão no circuito primário, o fluido refrigerante é purgado muito rapidamente do vaso do reator juntamente com uma alta taxa de despressurização, colocando em risco a integridade do núcleo. Muitas vezes o LOCA ocorre devido ao *Small-Break* LOCA (SBLOCA).

- simular experimentalmente/numericamente dois cenários: os escoamentos monofásicos e bifásicos com novas condições operacionais em relação ao trabalho desenvolvido por SABUNDJIAN et al. (2006). Os resultados numérico/experimental serão comparados com a finalidade de verificar se os modelos contidos no código reproduzem adequadamente a fenomenologia estudada;
- construir um banco de dados a partir dos resultados experimentais obtidos, para validar futuramente outros programas computacionais de termo-hidráulica.

1.2 Motivação do trabalho

A motivação deste trabalho é compreender melhor o fenômeno de circulação natural e de realizar novas medidas experimentais no CCN do CEENG do IPEN, que foi remodelado ao incluir um medidor de vazão no circuito primário. Com a instalação do medidor de fração de vazão, essas medidas são comparadas com os valores calculados por meio da simulação numérica com o RELAP5/MOD3.3, a fim de validar os modelos teóricos existentes no código. Isto se fez necessário, pois este programa é utilizado pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) no licenciamento de plantas nucleares brasileiras, especificamente no caso da avaliação de acidentes e transientes nestas instalações.

1.3 Organização da dissertação

A presente dissertação foi escrita e organizada conforme o Guia para a elaboração de dissertações e teses apresentadas no Programa de Pós-graduação do IPEN/USP (IGAMI e VIEIRA, 2017).

O capítulo 1 apresenta de forma introdutória e geral o atual panorama da energia nuclear no mundo e no Brasil, bem como os objetivos, a motivação e a estruturação do trabalho.

No capítulo 2 é realizada uma revisão da literatura, apresentando a fenomenologia da circulação natural, alguns trabalhos que se relacionam com o escopo deste projeto, três reatores nucleares inovadores que utilizam a circulação natural para refrigeração e, por fim, o código computacional de termo-hidráulica RELAP5/MOD3.3.

No capítulo 3 são apresentados a metodologia e os materiais utilizados na elaboração do projeto, com enfoque na instrumentação do CCN, na criação dos dados de entrada por meio do pré-processador FastLAP para modelagem da fenomenologia por meio do código RELAP5/MOD3.3 e os experimentos realizados no circuito de circulação natural.

No capítulo 4, os resultados dos experimentos e das simulações numéricas são apresentados e comparados, de forma a analisar a fenomenologia da circulação natural, como a eficiência do código RELAP5/MOD3.3.

No capítulo 5 encontram-se as conclusões obtidas com o estudo e as propostas para trabalhos futuros.

No APÊNDICE A são apresentadas todas as etapas para a instalação do sensor de fração de vazio no CCN.

No APÊNDICE B são apresentadas as janelas de criação dos componentes hidrodinâmicos e de calor por meio do FastLAP.

No APÊNDICE C é apresentado o *input* do RELAP5/MOD3.3 utilizado na modelagem do CCN.

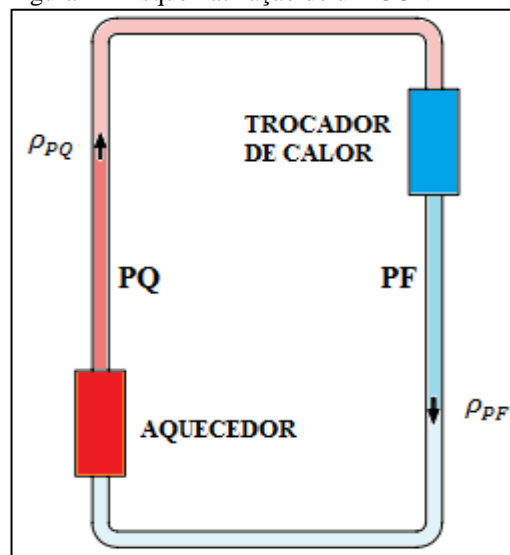
2 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão bibliográfica consiste de um breve resumo sobre os principais aspectos que compõem esse trabalho, como a fenomenologia da circulação natural, a revisão de experimentos que utilizaram circuitos de circulação natural, três reatores nucleares que utilizam a circulação natural como sistema passivo de refrigeração do núcleo e do código computacional de termo-hidráulica RELAP5/MOD3.3.

2.1 Fenomenologia da circulação natural

Segundo INCROPERA et al. (2015), na circulação natural o movimento do fluido ocorre devido à presença combinada de um gradiente de densidades, gerando forças de empuxo no seu interior, enquanto que na circulação forçada o movimento é imposto externamente, geralmente por meio de uma bomba. Na Figura 1 é possível visualizar uma esquematização de um circuito de circulação natural.

Figura 1 – Esquematização de um CCN



Fonte: autor da dissertação.

Como pode ser visto na Figura 1, na perna quente (PQ) o fluido em contato com a fonte de calor é aquecido, diminuindo sua densidade, enquanto que na perna fria (PF) o

trocador de calor resfria o fluido aumentando sua densidade, conseqüentemente, uma força de empuxo é criada, influenciada principalmente pela gravidade, geometria do circuito e diferença de altura entre o aquecedor e o dissipador de calor, formando a circulação natural.

Para efeito de simplificação, a densidade ou massa específica (ρ) na PF (ρ_{PF}) é maior que na PQ (ρ_{PQ}), $\rho_{PF} > \rho_{PQ}$, considerando-se que a tubulação é adiabática e tanto a fonte de calor quanto o trocador de calor estejam aquecendo e resfriando o fluido em valores iguais e constantes, assim, a quantidade de calor fornecida ao sistema também é retirada. Desta maneira, como os valores da diferença de altura entre o aquecedor e o trocador de calor (h) e a gravidade (g) são constantes, a vazão no sistema será maior conforme houver um crescimento na diferença entre as massas específicas ρ_{PF} e ρ_{PQ} . As Equações (1) e (2) indicam a pressão hidrostática (p) existente nas pernas quente (p_{PQ}) e fria (p_{PF}), levando-se em considerações as simplificações do sistema.

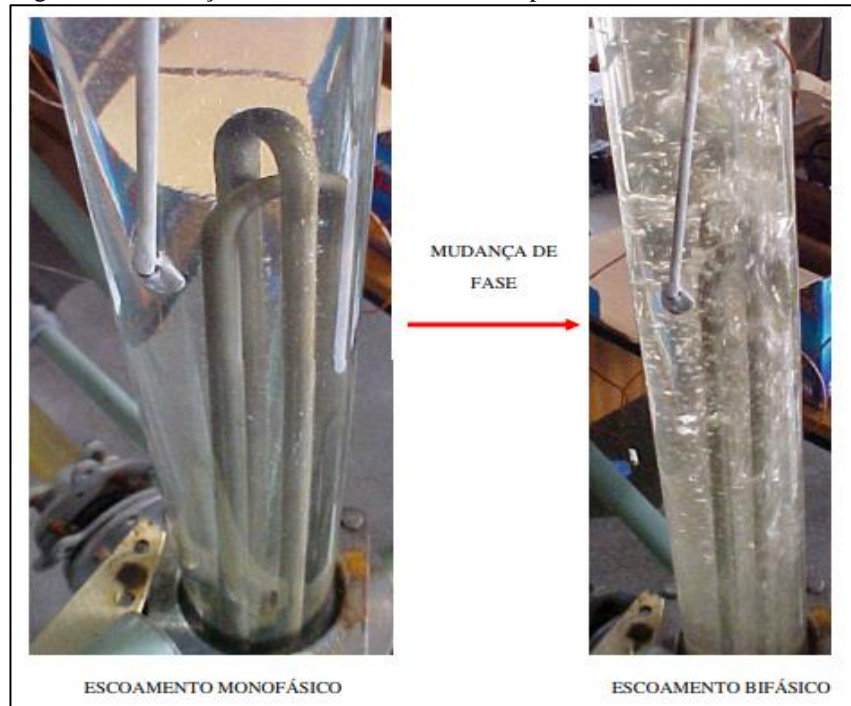
$$p_{PQ} = \rho_{PQ}gh \quad (1)$$

$$p_{PF} = \rho_{PF}gh \quad (2)$$

Os sistemas de circulação natural podem ser classificados conforme os seguintes aspectos: estado físico do fluido de trabalho; interação com o ambiente externo (aberto ou fechado); geometria do circuito; forças de inércia; configuração do sistema e, números de canais de aquecimento/resfriamento.

Dependendo das condições termodinâmicas, o fluido pode se apresentar em escoamento monofásico, bifásico ou supercrítico. Devido às diferenças de densidade ocasionadas pela variação da temperatura, ocorrem mudanças de fase no fluido, neste caso a água, em escoamento monofásico caracteriza-se por apenas uma fase e escoamento bifásico em duas fases (vapor/líquido). Uma melhor visualização destes dois tipos de escoamento pode ser vista na Figura 2.

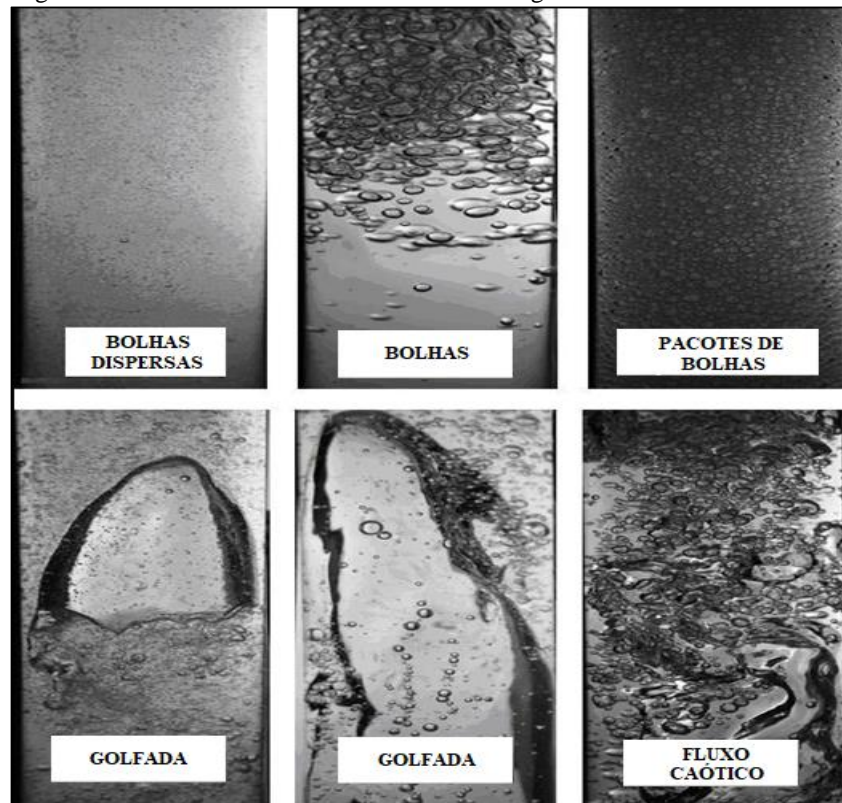
Figura 2 – Mudança de escoamento monofásico para bifásico



Fonte: SABUNDJIAN et al. (2006).

Na Figura 3 é possível visualizar alguns exemplos dos padrões de escoamento ascendentes presentes em regime bifásico na posição vertical.

Figura 3 – Padrões de escoamento vertical em regime bifásico

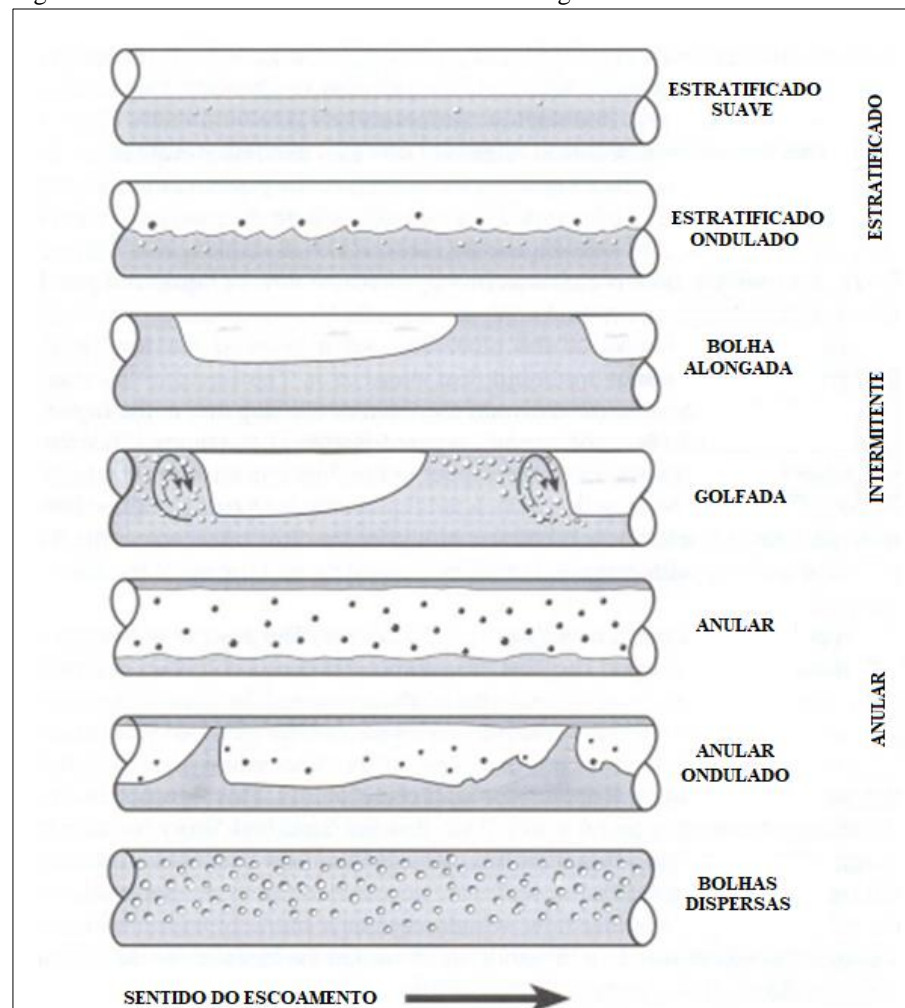


Fonte: adaptado de SABUNDJIAN et al. (2012).

Os padrões de escoamento dependem principalmente da inclinação e diâmetro da tubulação, da vazão e das propriedades dos fluidos (SHOHAM, 2006). Para o padrão de escoamento na posição vertical com bolhas (*bubbly flow*), sejam as bolhas menores ou em “pacotes” (*packet bubbles*), a fase líquida se encontra a baixa velocidade ou equivalente a velocidade da fase gasosa, desta forma, existe uma homogeneidade no escoamento. Enquanto que para velocidades maiores da fase gasosa em relação à fase líquida, podem formar as chamadas golfadas (*slug flow*), quando o diâmetro da bolha é quase igual ao diâmetro da tubulação, caótico (*churn flow*) quando as golfadas se repetem a altas velocidades e acabam se dispersando em uma mistura caótica, e anular (*annular flow*), quando a fase gasosa em alta velocidade forma um filme da fase líquida em torno do perímetro da tubulação.

Para os padrões de escoamento na posição horizontal é mais visível a ação da gravidade no comportamento do fluido, conforme os arranjos típicos apresentados na Figura 4.

Figura 4 – Padrões de escoamento horizontal em regime bifásico



Fonte: adaptado de SHOHAM (2006).

O caso mais comum é o estratificado suave (*Stratified-smooth*) em que as fases à baixa velocidade são separadas devido à ação da gravidade, podendo se tornar estratificado ondulado (*Stratified-wavy*) se aumentada a velocidade relativa entre as fases. Já para os escoamentos intermitentes (*Intermittent*), subdivididos em bolha alongada (*Elongated-bubble*) quando não há turbulência na parte anterior da bolha e golfada (*Slug*) quando a velocidade da fase gasosa é aumentada, causando turbulência no escoamento e criação de pequenas bolhas. No escoamento anular (*Annular*) a fase gasosa percorre o centro da tubulação em velocidade elevada, com o filme da fase líquida na parte inferior um pouco maior em relação a parte superior devido à gravidade. Bolhas dispersas (*Dispersed-bubble*) ocorrem em altas vazões da fase líquida.

O escoamento monofásico é utilizado, principalmente, na refrigeração de núcleos dos reatores nucleares, enquanto que o escoamento bifásico geralmente é um indicativo de falha do sistema, por exemplo, no caso de uma pequena ruptura da tubulação do circuito primário, conhecido como *Small-Break Loss of Coolant Accident* (SBLOCA).

O fluido supercrítico é aquele que se encontra em condições de temperatura e pressão acima de seu ponto crítico, não havendo mais a distinção das fases líquida e gasosa. O grande interesse nesse estado é devido a maior eficiência termodinâmica de seus sistemas, este conceito é utilizado no projeto de futuros reatores da quarta geração.

O principal benefício do uso da circulação natural, ao invés da circulação forçada, é o transporte de calor sem o auxílio de qualquer equipamento e fonte de energia externa, o que implica na diminuição de falhas no sistema, reduzindo os custos de manutenção e operação da instalação (VIJAYAN e NAYAK, 2010a). Sistemas de circulação natural são amplamente utilizados na indústria nuclear para refrigeração e remoção de calor residual, em caso de acidentes ou de desligamento da planta.

Existem vantagens e desvantagens em relação ao uso da circulação natural, em que a simplicidade é seu maior expoente, devido principalmente a eliminação de bombas do sistema, facilitando a construção, operação e manutenção da instalação. Pela necessidade de minimizar as perdas de pressão para aumentar as taxas de vazão, elimina-se cotovelos e tubulações desnecessárias. Ainda mais, com a eliminação das bombas e da tubulação de conexão, elimina-se possíveis cenários de acidentes associados a perda de vazão da bomba, ruptura do selo da bomba e efeitos de turbulência durante a parada, devido a um pequeno acidente de perda de refrigerante (SBLOCA) (VIJAYAN e NAYAK, 2010a). Na Tabela 1 são mostradas as vantagens e desvantagens do uso da circulação natural.

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens de sistemas de circulação natural

Vantagens	Desvantagens
Custo reduzido devido à simplicidade	Baixa velocidade do fluido
Eliminação das bombas	Menor potência máxima por canal
Possibilidade de melhoria na distribuição da vazão no núcleo	Instabilidades potenciais
Melhoria nas características das fases (líquido e vapor) em função da potência	Baixo fluxo de calor crítico ²
Grande inércia térmica	Exigência de procedimentos específicos

Fonte: IAEA, 2005.

O uso de sistemas passivos baseados na circulação natural pode eliminar os custos associados com a instalação, manutenção e operação de sistemas ativos que requerem várias bombas com fontes de alimentação elétricas independentes e redundantes. No entanto, considerando a baixa força motriz de sistemas passivos baseados na circulação natural, o *design* cuidadoso e métodos de análise devem ser empregados para garantir que os sistemas desempenhem as funções pretendidas (IAEA, 2012).

Reatores que utilizam a concepção de segurança passiva em seus projetos possuem maior confiabilidade, são mais fáceis de operar e com menor custo, pois as bombas de circulação possuem alto custo e a sua eliminação é um grande atrativo econômico para o uso da circulação natural.

No caso do reator avançado a água pressurizada AP1000³ que é similar aos atuais PWRs em operação, à implementação de sistemas de segurança passiva neste reator nuclear obteve importantes simplificações que levaram à criação de sistemas redundantes de resfriamento do reator, que não necessitam de potência elétrica, além da utilização de 60% menos válvulas, 75% menos conexões, 80% menos cabos de controle, 35% menos bombas e 50% menor do que os atuais PWRs (CUMMINS et al., 2003).

A eliminação de bombas possui um ponto positivo em relação à segurança, pois não depende delas em caso de acidentes, afinal, a circulação natural tem como propriedade a segurança intrínseca, que é baseada em uma lei natural da Física, além de contribuir para uma melhor distribuição do escoamento e das pressões no sistema. Nos reatores nucleares mais recentes em operação, o seu uso é um *backup* para a remoção do calor residual em caso

² **Fluxo de calor crítico** (*Critical Heat Flux* – CHF) descreve o limite térmico de um fenômeno onde uma mudança de fase ocorre durante o aquecimento (tal como bolhas que se formam sobre uma superfície metálica aquecendo a água), a qual subitamente diminui a eficiência da transferência de calor, causando então superaquecimento localizado na superfície aquecida.

³ **AP1000** é um reator tipo PWR de 1000MWe desenvolvido pela Westinghouse Electric Company com base no AP600, esse que possui potência instalada de 600MWe e tecnologia sólida, com mais de 30 anos de experiência operacional. O AP1000 possui avanços principalmente em termos de segurança passiva e potência, como também na redução de custos de produção, operação e manutenção.

de falha de bomba, devido principalmente, a baixa força motriz comparada à circulação forçada.

Em um circuito de circulação natural a vazão do fluido aumenta com o aumento da potência fornecida pelo núcleo, enquanto que em um escoamento bifásico por circulação forçada, a vazão diminui com o aumento da potência.

Apesar dos benefícios, o uso da circulação natural possui alguns desafios, principalmente, no que tange o desenvolvimento de reatores nucleares de grande potência, pois o aumento da altura do circuito pode tornar o projeto inviável economicamente devido à baixa força motriz no regime de circulação natural.

De modo a criar condições operacionais suficientes para remoção de calor por meio da vazão, o aumento do diâmetro dos componentes é necessário para evitar as perdas de pressão, no entanto, isso pode aumentar os custos e o volume do circuito. Com a baixa força motriz e o aumento da tubulação, a vazão mássica na circulação natural é significativamente menor do que na circulação forçada.

Como exemplo pode ser mencionado o reator de água fervente, em inglês *Boiling Water Reactor* (BWR), VK-300, um reator russo de 250MWe que tem o mesmo vaso de pressão do reator WWER-1000, um reator do tipo PWR de 1000MWe que utiliza circulação forçada no circuito primário. Apesar de serem de tipos de reatores diferentes, o mesmo vaso de pressão foi aproveitado devido a fatores econômicos e fabris. O VK-300 utiliza circulação natural no circuito primário, tornando o reator três vezes maior em volume do que o WWER-1000 (KUZNETSOV, 2001).

Os efeitos de instabilidade são comuns aos dois regimes de circulação, forçada e natural, porém os sistemas de circulação natural são inerentemente menos estáveis devido à natureza não-linear da fenomenologia, em que qualquer mudança na baixa força motriz afeta a vazão, podendo levar a um comportamento oscilatório (DURGA PRASAD, PANDEY e KALRA, 2007).

A circulação natural é altamente dependente da pressão e da potência fornecida pelo núcleo, desta forma, ao ligar um reator nuclear, ele se encontra num regime de baixa pressão e baixa vazão, sendo necessário especificar um procedimento de inicialização que evite a ocorrência do fluxo crítico de calor (VIJAYAN e NAYAK, 2010a).

A seguir são descritos alguns experimentos de circulação natural encontrados na literatura.

2.2 Experimentos de circulação natural

O interesse na aplicação da circulação natural em reatores nucleares se deve, principalmente, a não necessidade de dispositivos ativos para a movimentação do fluido, desta forma, a fenomenologia da circulação natural é interessante no ponto de vista da segurança intrínseca na refrigeração do núcleo de um reator nuclear, considerando que a vazão do fluido refrigerante aumenta conforme o aumento da potência fornecida pelo núcleo.

RAYLEGH (1916, apud ZVIRIN, 1982) chegou à conclusão por meio de seus estudos que a circulação natural é formada pelo aquecimento do fluido situado em regiões inferiores e do seu resfriamento realizado na posição superior do circuito.

DUFFEY e SURSOCK (1987) com a resolução analítica do balanço da equação de quantidade de movimento, com a conservação de massa e energia, obtiveram um modelo de vazão em função apenas do inventário/volume, cobrindo todas as possibilidades dos circuitos, com o propósito de analisar o fenômeno da circulação natural como ferramenta na remoção de calor para reatores de água leve ou *Light Water Reactors* (LWR's). Dados experimentais foram comparados com os gerados pelo modelo, mostrando boa concordância.

Existem diversos estudos relacionados à circulação natural na literatura, abrangendo desde testes em circuitos construídos em escala menor de acordo com as usinas nucleares até circuitos experimentais simples construídos com o propósito específico de análise da circulação natural em regimes monofásico e bifásico. A grande vantagem na utilização de circuitos experimentais está na facilidade de aquisição e análise dos dados, e do menor custo quando comparados ao alto custo na realização de testes em sistemas integrais na escala real.

A área de estudo da circulação natural é complexa e abrangente, tendo como escopo diversos tópicos que se correlacionam, como por exemplo, a fenomenologia envolvida na termo-hidráulica, o seu estudo por meio de diversos programas computacionais, a sua utilização em sistemas de refrigeração de reatores, entre outros.

À vista disso, é imprescindível a realização de uma grande variedade de estudos em relação a circulação natural, a fim de estabelecer um banco de dados experimentais, numéricos e teóricos, que tragam uma maior compreensão e confiabilidade nas aplicações nucleares.

Em circuitos em escala de reatores nucleares se destacam os estudos de REYES (2004), que se concentra na metodologia necessária para o desenvolvimento de circuitos de circulação natural em escala, monofásicos e bifásicos, de forma a conduzir uma análise de escala detalhada para obter dimensões e condições operacionais para uma instalação de teste de sistema integral, e de AKSAN (2005) que fornece uma visão geral sobre a validação experimental e criação de banco de dados dos sistemas na remoção de calor residual. As principais instalações de testes operacionais no mundo são as seguintes:

- CAPCN, CNEA (*Comisión Nacional de Energía Atómica*), Argentina;
- ITL e PLC, BARC (*Bhabha Atomic Research Centre*), Índia;
- PANDA, PSI (*Paul Scherrer Institute*), Suíça;
- APEX-1000 e MASLWR, OSU (*Oregon State University*), EUA.

Nessas instalações é comum a realização de estudos na determinação de correlações para coeficientes de transferência de calor, fluxo crítico de calor e a simulação numérica de fenômenos termofluidodinâmicos em regimes monofásico e bifásico, em canais de escoamento com geometrias circulares, anulares e em forma do feixe de varetas com as dimensões dos elementos combustíveis nucleares, como também a calibração de sensores de medida de pressão para outras instituições.

Enquanto as instalações listadas acima necessitam de um investimento consideravelmente alto, seja em capital ou mão-de-obra, os circuitos simples são mais baratos e fáceis de construir e operar, sendo seus principais atributos o rastreamento de fenômenos e o uso dos dados experimentais no desenvolvimento de modelos teóricos e de códigos computacionais, bem como sua validação, já que a complexidade de circuitos maiores dificulta esse detalhamento. Os tópicos mais estudados por meio de circuitos simples são: o estado estacionário e os comportamentos transitórios, os efeitos no escoamento devido à geometria do circuito, a variação do inventário, injeção de água fria, princípio de ebulição, presença de não condensáveis, precisão dos códigos computacionais, entre outros.

Um levantamento bibliográfico de trabalhos que estudaram a fenomenologia de circulação natural utilizando circuitos simples foi realizado, com base nos trabalhos de VIJAYAN e NAYAK (2010) e de AHMED et al. (2020), que revisaram vários experimentos no campo da circulação natural. A literatura sobre a circulação natural é vasta, sendo que os

trabalhos que se destacam e estão relacionados com o presente estudo são apresentados na Tabela 2, sendo descritos seus principais aspectos de forma resumida.

Tabela 2 – Trabalhos de circulação natural em regimes monofásico e bifásico

Referência	Título	Escoamento	Tópicos de interesse	Ano
ALSTAD et al.	The transient behavior of single-phase natural circulation water loop systems	Monofásico	- Estado transiente; - Análise numérica com diferenças finitas; - Análise teórica e experimental.	1956
MARTIN e TAYLOR	Benchmarking Assessment of RELAP5/MOD3 for the Low Flow and Natural Circulation Experiment at the WSRC	Monofásico e Bifásico	- RELAP5; - Análise teórica e experimental.	1992
AMBROSINI e FERRERI	The effect of truncation error on the numerical prediction of linear stability boundaries in a natural circulation single-phase loop	Monofásico	- RELAP5; - Método de diferenças finitas; - Erro de truncamento.	1998
SHARMA et al.	Simulation of single phase instability behaviour in a rectangular natural circulation loop using RELAP5/MOD3.2 computer code	Monofásico	- RELAP5; - Fluxo crítico de calor; - Transiente oscilatório.	2002
MOUSAVIAN et al.	Transient and stability analysis in single-phase natural circulation	Monofásico	- RELAP5; - Método de diferenças finitas; - Estados estacionário e transiente.	2004
GARTIA, VIJAYAN e PILKHWAL	A generalized flow correlation for two-phase natural circulation loops	Bifásico	- RELAP5; - Método de diferenças finitas; - Estados estacionário e transientes.	2006
VIJAYAN et al.	Effect of Loop Diameter on the Steady State and Stability Behaviour of Single-Phase and Two-Phase Natural Circulation Loops	Monofásico e Bifásico	- Variação nos diâmetros; - Análise teórica e experimental.	2008
SABUNDJIAN et al.	Análise Teórico/Experimental do Fenômeno de Circulação Natural	Monofásico e Bifásico	- RELAP5; - Análise teórica e experimental.	2010
MANGAL, JAIN e NAYAK	Capability of the RELAP5 code to simulate natural circulation behavior in test facilities	Bifásico	- RELAP5; - Circuitos de circulação natural de alta pressão e de canais paralelos; - Variação na temperatura do fluido no trocador de calor.	2012
RUSPINI, MARCEL e CLAUSSE	Two-phase flow instabilities: A review	Bifásico	- Instabilidades; - Análise teórica e experimental.	2014
MISALE	Experimental study on the influence of power steps on the thermohydraulic behaviour of a natural circulation loop	Monofásico	- Variação da potência; - Inércia térmica.	2016
BRAZ FILHO et al.	Assessment of RELAP5 matrix solvers for a two-phase natural circulation loop	Bifásico	- RELAP5; - Transientes; - Solucionadores de equações lineares.	2017
VINHAS	Simulação Computacional de um Circuito de Circulação Natural utilizando código RELAP5	Monofásico e Bifásico	- RELAP5; - Análise teórica e experimental.	2018

Fonte: autor da dissertação.

ALSTAD et al. (1956) demonstraram um método para prever a temperatura e a vazão no transiente de circuitos de circulação natural em regime monofásico. O método usa a solução iterativa em diferenças finitas das equações de balanço de massa, energia e quantidade de movimento. Os resultados experimentais de dois circuitos de circulação natural foram comparados com as soluções numéricas, mostrando que o método é satisfatório na previsão do comportamento transitório do escoamento para aplicações em engenharia.

MARTIN e TAYLOR (1992) avaliaram o código RELAP5/MOD3 na comparação com dados experimentais referentes a 24 testes de um circuito para abordar escoamentos monofásicos e bifásicos, circulação forçada e natural, fluidos aquecidos e não aquecidos. Os resultados se mostraram satisfatórios na predição dos comportamentos do escoamento em circulação natural e forçada, contudo discrepâncias foram encontradas na comparação dos dados experimentais e os resultados no RELAP5/MOD3, em que as deficiências eram resultantes na modelagem da geometria, fenômenos multidimensionais e efeitos da fricção da tubulação. O estudo se mostrou importante como referência a melhorias nas versões posteriores do RELAP5/MOD3.

AMBROSINI e FERRERI (1998) analisaram os efeitos do erro de truncamento na aplicação do método de diferenças finitas na estabilidade da circulação natural em um circuito no regime monofásico. Diferentes esquemas numéricos foram aplicados, diversas modelagens são simuladas e comparadas com os dados experimentais. Devido à escolha do passo de tempo e da discretização espacial, os erros de truncamento podem influenciar a estabilidade para alguns problemas de circulação natural, em que equações de segunda ordem apresentam maior convergência e precisão do que métodos de primeira ordem.

SHARMA et al. (2002) modelaram um circuito de circulação natural retangular utilizando o RELAP5/MOD3.2 para simular o comportamento transitório oscilatório presente no circuito em escoamento monofásico, visando que circuitos de circulação natural possuem zonas instáveis durante o início do aumento da potência fornecida ao sistema. Os resultados são comparados aos dados experimentais, mostrando que o RELAP5/MOD3.2 não consegue simular alguns comportamentos oscilatórios presentes nos experimentos.

MOUSAVIAN et al. (2004) modelaram um circuito de circulação natural retangular em regime monofásico por meio de três métodos, análise não-linear por método de diferenças finitas, análise linear pelo método de perturbação e pelo código RELAP5/MOD3.2. Os resultados foram satisfatórios quando comparados entre si e com os dados experimentais.

GARTIA, VIJAYAN e PILKHWAL (2006) propuseram uma correlação de vazão para estimar o fluxo em estado estacionário em duas fases. As equações de quantidade de movimento, energia e massa no estado estacionário unidimensional de Navier-Stokes para circulação natural em regime bifásico foram solucionadas com propósito de obter a vazão de forma adimensional em função do número de Grashof e de um parâmetro geométrico. A

correlação foi testada na comparação com dados experimentais e gerados pelo RELAP5/MOD3.2 para 5 circuitos diferentes, apresentando boa concordância.

VIJAYAN et al. (2008) realizaram uma análise teórica e experimental da variação do diâmetro da tubulação de um circuito de circulação natural em estado estacionário, com a estabilidade nos regimes monofásicos e bifásicos. Para o escoamento monofásico quatro circuitos com tubulações de diâmetros variados foram estudados, mostrando que circuitos com diâmetros menores são mais estáveis do que os que possuem maior diâmetro. Para o escoamento bifásico cinco circuitos foram analisados, mostrando que ao contrário de regimes monofásicos, o aumento do diâmetro tende a dar maior estabilidade. O estudo também mostrou que diâmetros menores apresentam maior chance de ocorrer *burnout*⁴ e fluxo crítico de calor.

SABUNDJIAN et al. (2010) realizaram a simulação de alguns experimentos com diferentes níveis de potência no aquecedor, em regimes monofásico e bifásico, no mesmo circuito de circulação natural deste trabalho, contudo sem as melhorias citadas nos primeiros capítulos. Os dados experimentais posteriormente são comparados com a modelagem teórica feita com o código RELAP5/MOD3.2, em que os resultados obtidos com o programa se mostraram satisfatórios quando comparados com os experimentais.

MANGAL, JAIN e NAYAK (2012) modelaram dois circuitos, um de alta pressão e outro de canal paralelo, cujos resultados gerados pelo RELAP5/MOD3.2 foram comparados aos dados experimentais. Foi simulado o comportamento dos circuitos de circulação em relação à estabilidade, o estado estacionário e em caso de transiente. Os dados experimentais foram gerados para uma gama de condições de pressão, potência e resfriamento. O código RELAP5/MOD3.2 foi aplicado para prever as características transitórias da circulação natural nas condições monofásica e bifásica, e a amplitude e frequência de oscilações para diferentes condições de operação dos circuitos. Os resultados mostraram grande sensibilidade em relação à nodalização. A predição dada pelo RELAP5/MOD3.2 nos experimentos em regime monofásico foram satisfatórios, enquanto que no bifásico o circuito de alta pressão teve razoável concordância e o circuito de canais paralelos teve diferenças significativas em relação aos dados experimentais.

⁴ **Burnout** é comumente atribuído na literatura como sinônimo dos termos fluxo crítico de calor ou *Departure from Nucleate Boiling* (DNB), em português, “início da ebulição nucleada”. EL-WAKIL (1971) define *burnout* como o salto abrupto dado pela temperatura que excede o fluxo crítico de calor correspondente ao DNB, em que este fenômeno pode romper o revestimento da vareta combustível, liberando produtos de fissão no fluido refrigerante.

RUSPINI, MARCEL e CLAUSSE (2014) realizaram uma revisão das instabilidades ocorridas em escoamentos bifásicos, incluindo resultados experimentais e analíticos em relação a oscilações de ondas de densidade, quedas de pressão, oscilações térmicas, entre outros.

MISALE (2016) estudou o comportamento do escoamento monofásico em um circuito de circulação natural retangular por meio de vários experimentos com a potência constante ou variável, em que todos mostraram instabilidades térmicas, além da amplitude e frequência das oscilações aumentarem, conforme o aumento da potência fornecida ao sistema. O estudo também mostrou como a inércia térmica do circuito pode influenciar o comportamento termo-hidráulico do sistema, em que intervalos de tempos curtos (menores do que 225 segundos) na redução da potência são compensados pela inércia térmica, enquanto valores acima de 450 segundos os efeitos da inércia térmica do circuito se tornam insignificantes.

BRAZ FILHO et al. (2017) realizaram uma avaliação do solucionador de equações lineares do RELAP5/MOD3.3 e RELAP5-3D em condições transientes para o escoamento bifásico num circuito de circulação natural retangular. Para esta avaliação, três abordagens diferentes de solucionadores de equações lineares para o modelo hidrodinâmico são apresentadas: o solucionador de matriz com base na decomposição Inferior-Superior (*Lower-Upper* - LU), o solucionador *Border-Profile Lower Upper* (BPLU) e o método iterativo denominado Método Residual Mínimo Generalizado (*Generalized Minimal Residual Method* - GMRES). Para efeitos de comparação, é analisado um circuito experimental de circulação natural feito de tubos de vidro e usando água como fluido de trabalho. O início da ebulição nucleada observada durante o experimento foi previsto por todos os solucionadores do RELAP5, bem como a representação das oscilações do fluxo ao longo do circuito. Além disso, percebeu-se que a escolha do algoritmo do solucionador tem forte influência na predição dos fenômenos de circulação natural bifásica, uma vez que diferentes comprimentos de onda e amplitudes de instabilidades de fluxo foram obtidos para cada abordagem.

VINHAS (2018) fez trinta e dois experimentos termo-hidráulicos em combinações de quatro potências de aquecimento e oito vazões de resfriamento no circuito de circulação natural que foi construído em escala de 1:10 em altura em relação ao AP600. Os dados experimentais foram comparados com os resultados da simulação do RELAP5/MOD3.2, tendo como objetivo estudar a influência dos parâmetros operacionais

no comportamento do fenômeno de circulação natural. Os resultados mostraram 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 natural não são bem representadas pelos métodos numéricos utilizados.

Após a abordagem descrita acima, evidencia-se a necessidade de dar continuidade aos esforços da comunidade científica. A realização do presente trabalho busca aprimorar os métodos existentes de análise e pesquisa correlacionados a fenomenologia de circulação natural que ocorre em reatores nucleares modernos.

2.3 Reatores nucleares que utilizam circulação natural

Desde a Conferência da *International Atomic Energy Agency* (IAEA) sobre a segurança da energia nuclear: estratégia para o futuro, convocada em 1991, observou-se que para as novas usinas o uso de características de segurança passiva, como a circulação natural, é um método desejável para simplificação e aumento da confiabilidade do desempenho das funções essenciais de segurança, e deve ser usado sempre que apropriado (IAEA, 1991).

Os sistemas ativos, aqueles que precisam de alguma ação, seja mecânica ou eletromagnética, devem ser substituídos tanto quanto possível por sistemas de segurança passivos mais modernos e eficientes, tais como a circulação natural, gravidade e gás comprimido, que se configuram como características da segurança inerente, satisfazendo sua função de segurança (IAEA, 2012).

Os reatores PWR da Geração III⁺ utilizam da circulação natural no caso de falha das bombas ou para remoção do calor residual do núcleo em caso de desligamento. Em um reator do tipo AP1000, por exemplo, a circulação natural ocorre após a ruptura das tubulações conectadas ao vaso de pressão do reator, havendo um fluxo da água aquecida para uma câmara superior que é repostada por água resfriada de uma câmara inferior.

Em reatores de menor porte, abaixo de 300MWe, a circulação natural está sendo utilizada no desenvolvimento de alguns reatores modernos tipo PWR, como o CAREM, como modo de circulação do fluido refrigerante no circuito primário durante a operação normal para resfriamento do núcleo, sem a utilização de bombas de circulação (IAEA, 2004).

Existem vários reatores SMRs, ou seja, modulares de pequeno porte em desenvolvimento no mundo, os que se destacam estão descritos a seguir.

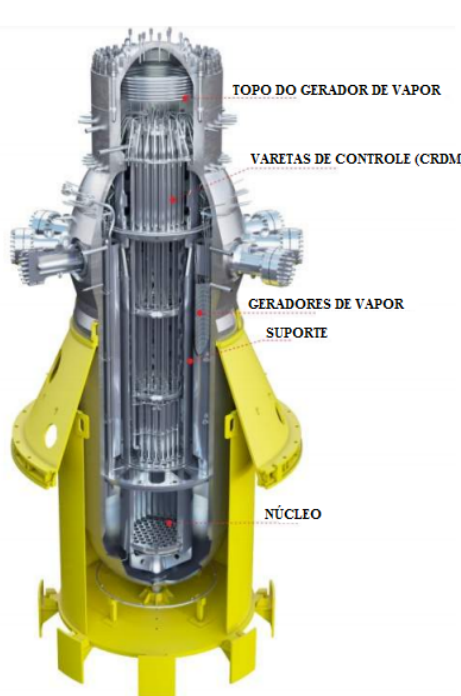
2.3.1 CAREM (CNEA, Argentina)

CAREM é um projeto baseado na tecnologia LWR, coordenado pela Comissão Nacional de Energia Atômica (CNEA) da Argentina, em colaboração com as principais empresas nucleares do país, com o objetivo de desenvolver, projetar e construir pequenas centrais nucleares inovadoras com alta competitividade econômica e nível de segurança. O reator é do tipo PWR, baseado no ciclo de vapor indireto com características que simplificam o projeto e auxiliam no objetivo de alcançar um maior nível de segurança. O CAREM foi desenvolvido com pelo menos 70% dos componentes e serviços relacionados, provenientes de empresas argentinas, tendo como objetivo abastecer com energia elétrica as regiões com pequenas demandas, visando também processos de dessalinização de água do mar.

Na Figura 5 há uma ilustração em corte do núcleo do reator e seus respectivos parâmetros técnicos. Algumas das características de *design* significativas são: sistema de resfriamento primário integrado; auto-pressurizado; resfriamento do núcleo por circulação natural; varetas de controle dentro do vaso de pressão; sistemas de segurança baseado em recursos passivos.

Figura 5 – Ilustração do reator modular CAREM com parâmetros técnicos

Principais parâmetros técnicos	
Parâmetro	Valor
Desenvolvedor da tecnologia/ país de origem	CNEA/Argentina
Tipo de reator	PWR
Refrigerante/moderador	Água leve/água leve
Térmico/elétrico capacidade, MW(t)/MW(e)	100/~30
Circulação no primário	Circulação natural
Pressão do sistema (MPa)	12,25
Temperatura do núcleo entrada/saída (°C)	284/326
Tipo de combustível/ matriz de montagem	Pastilha de UO ₂ /hexagonal
Número de elementos combustível	61
Enriquecimento do combustível (%)	3,1% (protótipo)
Queima de combustível (GWd/ton)	24 (protótipo)
Ciclo do combustível (meses)	14 (protótipo)
Principal mecanismo de controle de reatividade	CRDM (<i>Control rod driving mechanism</i>)
Abordagem para engenharia dos sistemas de segurança	Passivo
Vida útil (anos)	40
Área da usina (m ²)	-
Vaso de pressão altura/diâmetro (m)	11/3.2
Vaso de pressão, componentes internos e geradores de vapor (ton)	267
Características distintas	Remoção de calor do núcleo por circulação natural e contenção de supressão da pressão
Status do desenvolvimento	Em construção (protótipo)



Fonte: adaptado de IAEA (2018).

O CAREM é um reator baseado em circulação natural com características que simplificam o projeto e melhoram o desempenho de segurança. Seu circuito primário está totalmente contido no vaso do reator e não precisa de qualquer bomba de circulação no primário. A auto pressurização é obtida equilibrando a produção de vapor e condensação no vaso de pressão, sem a necessidade de um pressurizador separado. O *design* do CAREM reduz o número de componentes sensíveis e interações potencialmente arriscadas com o meio ambiente.

Além de dois sistemas de desligamento, válvulas de segurança e despressurização, sistema de injeção de boro, controle de hidrogênio, barras de controle que caem por gravidade, contenção, entre outros, o CAREM possui um sistema passivo de remoção de calor residual (*Passive Residual Heat Removal System – PRHRS*), que garante uma temperatura segura ao núcleo por pelo menos 36 horas em caso, por exemplo, de perda de energia elétrica da estação. Os PRHRS são trocadores de calor formados por tubos em U, paralelos horizontais, que por meio da circulação natural há remoção do calor do núcleo transferindo-o para reservatórios dedicados dentro da contenção.

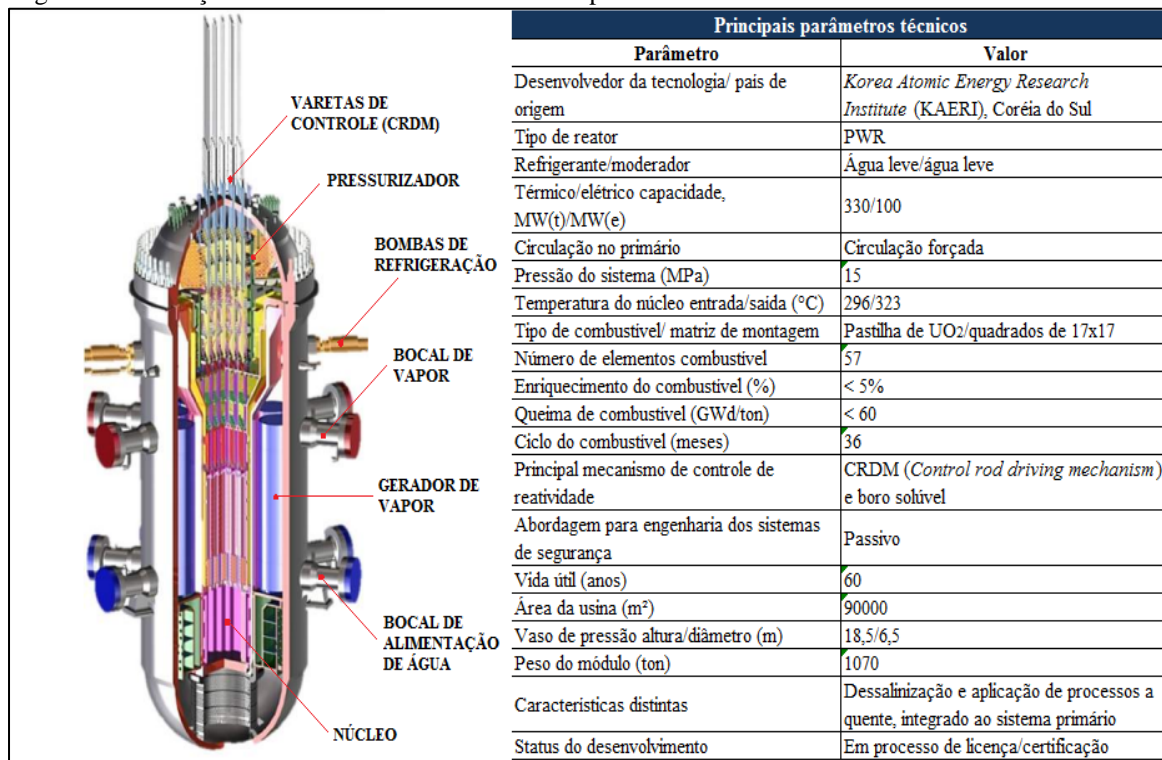
A circulação natural do fluido refrigerante produz diferentes taxas de vazão no sistema primário de acordo com a potência gerada e removida. Com diferentes níveis de potência, uma resposta de autocorreção na taxa de vazão é obtida devido à auto pressurização do vaso de pressão do reator, mantendo a pressão muito próxima da pressão de saturação. Em todas as condições operacionais, juntamente com o sistema de controle, isso pode ser suficiente para garantir uma estabilidade na resposta da pressão.

2.3.2 SMART (KAERI, Coréia do Sul)

O reator modular avançado com sistema integrado, o SMART, é um PWR com uma potência elétrica nominal de 107MWe ou 365MWth. O reator adota recursos de *design* avançados para aumentar a segurança, confiabilidade e a economia do sistema. Os recursos de *design* avançado e tecnologias implementadas no SMART foram verificadas e validadas durante a revisão e aprovação do projeto base. Para aumentar a segurança e a confiabilidade, a sua configuração incorpora recursos de segurança inerentes e sistemas de segurança passivos. O objetivo do seu *design* é alcançar a melhoria na economia por meio da simplificação do sistema, modularização de componentes, redução de tempo de construção

e alta disponibilidade da planta. Na Figura 6 há uma ilustração em corte do núcleo do reator e seus respectivos parâmetros técnicos.

Figura 6 – Ilustração do reator modular SMART com parâmetros técnicos



Fonte: adaptado de IAEA (2018).

O reator SMART é multipropósito, pois além da produção de eletricidade, possui como aplicação adicional a dessalinização de água do mar e produção de vapor para a indústria, sendo adequado para pequenas redes ou sistemas isolados. Com apenas uma unidade, pode-se atender as demandas de eletricidade e água potável para uma população de 100.000 habitantes.

O sistema de resfriamento do circuito primário é baseado na circulação forçada realizada por bombas durante a operação normal, enquanto a circulação natural é utilizada em condições de emergência.

Os sistemas de segurança do reator SMART são projetados para funcionar automaticamente, desta forma, além de possuir um sistema de emergência para resfriamento do núcleo (*Emergency Core Cooling System – ECCS*⁵) em caso de acidentes, depois que o

⁵ *Emergency Core Cooling System (ECCS)* é um dos vários sistemas de proteção para ajudar a garantir que os níveis de radiação nas proximidades dos reatores de potência de água leve sejam mantidos em valores aceitavelmente baixos. Os sistemas ECCS são projetados para proteger o núcleo do reator de superaquecimento caso ocorra um acidente de perda de refrigerante primário (LOCA). Grandes tanques de água com boro são conectados ao circuito primário, com injeção a baixa ou alta pressão conforme os níveis de pressão do reator.

reator é desligado o PRHRS é acionado trazendo o sistema de resfriamento do núcleo para uma condição de desligamento seguro dentro de 36 horas, após o início do acidente e mantém a condição de desligamento seguro por pelo menos mais 36 horas. Portanto, a função de segurança opera por 72 horas sem qualquer ação corretiva por parte dos operadores para acidentes postulados. A função de segurança do PRHRS é mantida continuamente por um longo período em que o tanque de resfriamento de emergência é reabastecido periodicamente por um sistema de recarga.

2.3.3 NuScale (NuScale Power Inc., EUA)

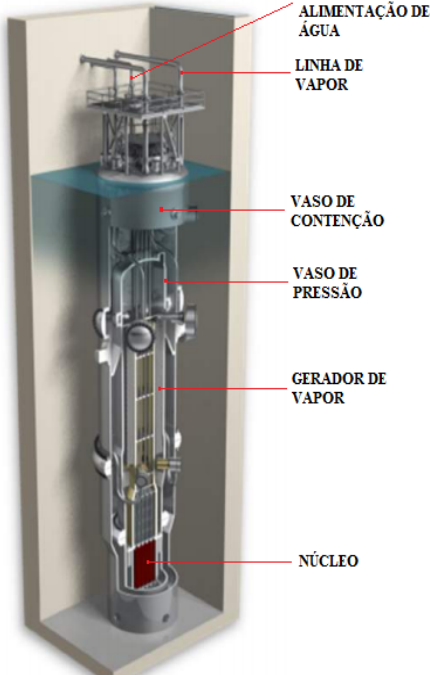
O *NuScale Power Module* (NPM) é um reator de água pressurizada resfriado por água leve (PWR) de pequeno porte. A planta NuScale é escalável e pode ser construída para acomodar um número variável de NPM's, a fim de atender as demandas de energia. Com 50MWe, o NPM fornece energia em incrementos que podem ser escalados até 600MWe em uma única instalação. Uma configuração de doze módulos é o tamanho da planta de referência atual de projeto e licenciamento. Todos os módulos são gerenciados a partir de uma única sala de controle em que cada NPM opera independentemente dos outros módulos em uma configuração multimodular. Essa configuração permite que a planta continue operando enquanto algum módulo é reabastecido.

O projeto *NuScale* é um reator modular para produção de eletricidade e aplicações de processos industriais à quente. A filosofia de projeto da planta NuScale consiste em: simplificação do projeto, uso de reator de água leve comprovado tecnologicamente, sistema de geração de vapor modular, módulos de energia produzidos em fábrica, e sistemas de segurança passiva que permitem um tempo de refrigeração ilimitado após um acidente base de projeto, sem energia ou ação do operador. O NPM é projetado para operar de forma eficiente em condições de potência total usando circulação natural como meio de refrigerar o núcleo do reator, eliminando a necessidade de bombas de circulação no primário do reator.

O vaso de contenção desse reator fica imerso em uma piscina, que fornece um dissipador de calor passivo para a remoção de calor em condições de um LOCA. O *NuScale* possui sistema de remoção de calor residual (PRHRS) por circulação natural e sistema de emergência para resfriamento do núcleo (ECCS), e ainda possui baixa frequência de danos no núcleo, com ordem de magnitude bem abaixo com relação as plantas em operação, de

acordo com a análise probabilística de risco. Na Figura 7 há uma ilustração em corte do núcleo do reator e seus respectivos parâmetros técnicos.

Figura 7 – Ilustração do reator modular *NuScale* com parâmetros técnicos

	Principais parâmetros técnicos	
	Parâmetro	Valor
	Desenvolvedor da tecnologia/ país de origem	NuScale Power, LLC, EUA
	Tipo de reator	PWR
	Refrigerante/moderador	Água leve/água leve
	Térmico/elétrico capacidade, MW(t)/MW(e)	160/50
	Circulação no primário	Circulação natural
	Pressão do sistema (MPa)	12,8
	Temperatura do núcleo entrada/saída (°C)	258/314
	Tipo de combustível/ matriz de montagem	Pastilha de UO ₂ /quadrados de 17x17
	Número de elementos combustíveis	37
	Enriquecimento do combustível (%)	< 4,95%
	Queima de combustível (GWd/ton)	> 30
	Ciclo do combustível (meses)	24
	Principal mecanismo de controle de reatividade	CRDM (<i>Control rod driving mechanism</i>) e boro solúvel
	Abordagem para engenharia dos sistemas de segurança	Passivo
	Vida útil (anos)	60
	Área da usina (m ²)	140.000
Vaso de pressão altura/diâmetro (m)	17,8/3,0	
Peso do módulo (ton)	700	
Características distintas	Tempo ilimitado para resfriamento do núcleo sem energia, adição de água ou ação do operador	
Status do desenvolvimento	Em processo de revisão regulatória	

Fonte: adaptado de IAEA (2018).

2.4 Código RELAP5

No processo de licenciamento nuclear, as empresas que gerenciam os reatores nucleares necessitam realizar estudos termo-hidráulicos no setor de análise de acidentes e transientes para garantir a segurança de sua operação para que a instalação seja certificada. Esse procedimento é feito com a utilização de algumas ferramentas computacionais complexas, ou seja, códigos computacionais, tais como:

- *Reactor Excursion and Leak Analysis Program* - RELAP5;
- *Transient Reactor Analysis Code* - TRAC (SPORE et al., 1993);
- *Analysis of THERmal-hydraulics of LEaks and Transients* - ATHLET (GRS, 2006);
- *Code Avancé de THERmohydraulique pour les Accidents sur les Réacteurs à Eau* – CATHARE (MICAELLY e BESTUIB, 1988), entre outros.

A ferramenta escolhida para a realização das análises termo-hidráulicas e simulações de acidentes no Brasil é o código RELAP5. Este programa é muito eficiente na simulação de acidentes em usinas nucleares, tais como: a perda de refrigerante primário por pequenas ou grandes rupturas de tubulações, perda de potência elétrica, perda de água na alimentação, entre outros. Portanto, neste trabalho o código RELAP5/MOD3.3 foi utilizado.

O código computacional de análise de transientes para reatores de água leve, RELAP5, foi desenvolvido pelo Laboratório de Engenharia Nacional de Idaho (*Idaho National Engineering Laboratory* - INEL) para a Comissão Reguladora Nuclear dos Estados Unidos (*U.S. Nuclear Regulatory Commission* - NRC). O código possui as ferramentas necessárias para apoiar o desenvolvimento de regulamentações, cálculos de auditoria para licenciamento, avaliação de estratégias na mitigação de acidentes e diretrizes do operador, e análise do planejamento de experimentos. O RELAP5 também é usado como base na análise termo-hidráulica de usinas nucleares. Aplicações específicas incluem simulações de transientes em sistemas de LWRs, como perda de refrigerante, transientes antecipados sem desligamento imediato do reator (*scram*) (*Anticipated Transients Without Scram* - ATWS) e transientes operacionais, como perda de água de alimentação, perda de energia externa, blecaute da estação e desligamento da turbina. O RELAP5 é um código altamente genérico que, além de calcular o comportamento de um sistema de refrigeração do reator durante um transiente, pode ser usado para simulação de uma grande variedade de transientes hidráulicos e térmicos tanto nos sistemas nucleares, quanto não nucleares envolvendo misturas de vapor, água, não condensáveis e soluto (IDAHO NATIONAL LABORATORY, 2010).

A série de códigos teve sua primeira versão em 1966, com a abreviação RELAPSE (*REactor Leak and Power Safety Excursion*) com versões subsequentes e o nome foi abreviado para RELAP, como RELAP2, RELAP3 e RELAP4.

RELAPSE-1 ou RELAP1 foi escrito em FORTRAN IV para calcular os seguintes parâmetros: temperatura, pressão, vazão, reatividade, e potência durante um LOCA, para reatores tipo PWR. Com apenas três volumes de controle para modelar o sistema, o pressurizador, a fonte de calor e o dissipador de calor, enquanto que o circuito secundário era modelado como uma constante do coeficiente de transferência de calor, nesta versão o poder computacional era limitado (MESINA, 2016).

Para o RELAP2, de 1968, foram incorporados novos submodelos para reatores tipo BWR. O RELAP3, em 1970, teve melhorias com a opção de 20 volumes de controle, variáveis lógicas, válvulas e expansão dos modelos de transferência de calor.

Em 1976, o desenvolvimento de um modelo não homogêneo e não equilíbrio foi realizado para RELAP4 com muitas melhorias, mas ficou claro na época a necessidade de reescrever o código por completo, sendo o RELAP4/MOD7, de 1980, a última versão da série.

Com isso veio a série RELAP5, em que herdou muitos aspectos das versões anteriores, como sua arquitetura, mas alterou a linguagem de programação de FORTRAN 66 para FORTRAN 77. Cada versão do código exige maiores requisitos no conhecimento da ferramenta, como a simulação de experimentos em pequena e grande escala, conhecimento teórico sobre escoamentos em duas fases, métodos de solução numérica, avanços da programação e o aumento da capacidade de processamento dos computadores.

A principal novidade da série RELAP5 foi o uso do modelo hidrodinâmico para simulação do comportamento de transientes em sistemas bifásicos, em que o RELAP5/MOD2, de 1985, eliminou a necessidade do uso de submodelos, comumente utilizados no RELAP4 para superar as limitações do modelo de equilíbrio-homogêneo em uma fase (MESINA, 2016).

O código RELAP5 na versão 3.3, criado em 2010, é baseado em um modelo não homogêneo e não equilíbrio para o sistema de duas fases que é resolvido por um esquema numérico rápido e parcialmente implícito para permitir o cálculo de transientes do sistema. O objetivo do esforço de desenvolvimento RELAP5 desde o início era produzir um código que inclui importantes efeitos de primeira ordem necessários para uma previsão precisa dos transientes no sistema, mas que era suficientemente simples e eficaz em termos de custos para que os estudos paramétricos ou de sensibilidade fossem possíveis (IDAHO NATIONAL LABORATORY, 2010).

Existem muitos modelos de componentes genéricos a partir dos quais sistemas podem ser simulados. Os componentes incluem tubos, bombas, válvulas, estruturas de troca de calor, aquecedores elétricos, bombas a jato, turbinas, separadores, acumuladores, componentes do sistema de controle e cinética pontual para calcular o comportamento de energia do núcleo, além de modelos de processos específicos.

O modelo termo-hidráulico do RELAP5 possui oito equações de conservação, três para cada fase (líquido e vapor), uma equação adicional para gases não condensáveis e uma equação adicional para o tratamento do boro solúvel. São duas variáveis independentes, tempo (t) e distância (x), e oito variáveis dependentes que são pressão (P), energias internas específicas para cada fase (U_g, U_l), fração de vazão (α_g), velocidades para cada fase (v_g, v_l),

razão da massa de gás não condensável em relação à massa total da fase gasosa e densidade do boro, em que os índices que indicam a fase gasosa é g e líquida é l , respectivamente. As equações básicas para o modelo de não equilíbrio em duas fases consistem nas Equações (3) e (4) de conservação de massa, nas Equações (5) e (6) de conservação da quantidade de movimento, e nas Equações (7) e (8) de conservação de energia, para as fases gasosa e líquida, respectivamente.

- Equações de conservação de massa:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_g \rho_g v_g A) = \Gamma_g \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_l \rho_l) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_l \rho_l v_l A) = \Gamma_l \quad (4)$$

- Equações de conservação de quantidade de movimento:

$$\begin{aligned} \alpha_g \rho_g A \frac{\partial v_g}{\partial t} + \frac{1}{2} \alpha_g \rho_g A \frac{\partial v_g^2}{\partial x} = & -\alpha_g A \frac{\partial P}{\partial x} + \alpha_g \rho_g B_x A - (\alpha_g \rho_g A) FWG(v_g) \\ & + \Gamma_g A (v_{gl} - v_g) - (\alpha_g \rho_g A) FIG(v_g - v_l) \\ & - C \alpha_g \alpha_l \rho_m A \left[\frac{\partial (v_g - v_l)}{\partial t} + v_l \frac{\partial v_g}{\partial x} - v_g \frac{\partial v_l}{\partial x} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \alpha_l \rho_l A \frac{\partial v_l}{\partial t} + \frac{1}{2} \alpha_l \rho_l A \frac{\partial v_l^2}{\partial x} = & -\alpha_l A \frac{\partial P}{\partial x} + \alpha_l \rho_l B_x A - (\alpha_l \rho_l A) FWF(v_l) \\ & + \Gamma_g A (v_{ll} - v_l) - (\alpha_l \rho_l A) FIF(v_l - v_g) \\ & - C \alpha_l \alpha_g \rho_m A \left[\frac{\partial (v_l - v_g)}{\partial t} + v_g \frac{\partial v_l}{\partial x} - v_l \frac{\partial v_g}{\partial x} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

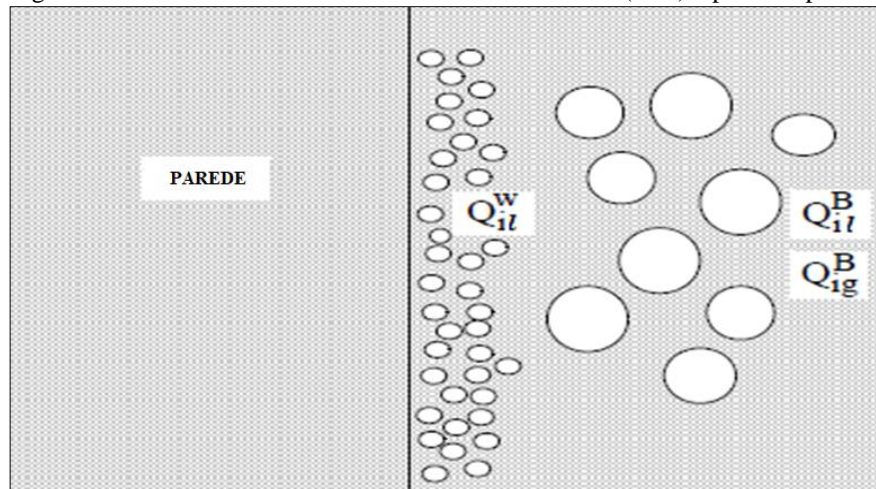
- Equações de conservação de energia:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g U_g) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_g \rho_g U_g v_g A) = & -P \frac{\partial \alpha_g}{\partial t} - \frac{P}{A} \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_g v_g A) \\ & + Q_{wg} + Q_{ig} + \Gamma_{ig} h_g^* + \Gamma_w h'_g + DISS_g \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_l \rho_l U_l) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_l \rho_l U_l v_l A) = & -P \frac{\partial \alpha_l}{\partial t} - \frac{P}{A} \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_l v_l A) \\ & + Q_{wl} + Q_{il} + \Gamma_{ig} h_l^* + \Gamma_w h'_l + DISS_l \end{aligned} \quad (8)$$

Onde: ρ_g , ρ_l e ρ_m são respectivamente as densidades das fases gasosa, líquida e da mistura. Γ_g e Γ_l são a taxa de transferência de massa volumétrica [$\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{s}$] para as fases gasosa e líquida, respectivamente. B_x indica a força de inércia na direção x , A representa a área de escoamento e C é o coeficiente de massa virtual. FWG e FWF são coeficientes de resistência/atrito da parede e FIG e FIF são coeficientes de arrasto da interface, para as fases gasosa e líquida, respectivamente. $DISS_g$ e $DISS_l$ são os efeitos de dissipação de energia [W/m^3]. Q_{wg} , Q_{wl} , Q_{il} e Q_{ig} são as transferências de calor volumétricas [W/m^3] da parede ou da interface para cada fase. Γ_{ig} é a massa trocada entre a interface e a fase gasosa com vaporização ou condensação, e Γ_w é a quantidade de vapor gerada perto da parede. h_g^* e h_l^* são as entalpias na interface, enquanto h'_g e h'_l são as entalpias perto da parede. A Figura 8 ilustra como funciona o fenômeno para melhor entendimento das nomenclaturas descritas acima.

Figura 8 – Transferência de calor da interface do volume (*bulk*) e perto da parede (*wall*)



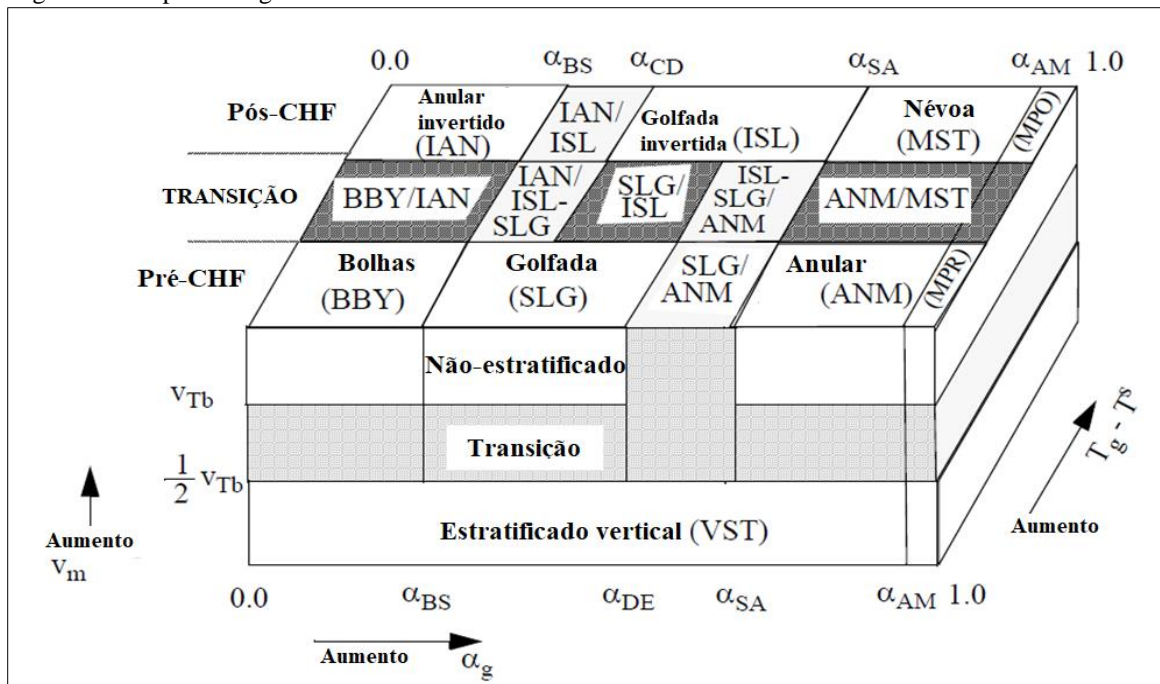
Fonte: IDAHO NATIONAL LABORATORY, 2010.

Por meio de mapas de escoamento, o RELAP5/MOD3.3 é capaz de identificar os padrões de escoamento de acordo com os volumes hidrodinâmicos durante os transientes ocorridos em regime bifásico. Os mapas têm como base, principalmente, os trabalhos de TAITEL e DUKLER (1976), TAITEL, BORNEA e DUKLER (1980), ISHII e CHAWLA (1979), ISHII e MISHIMA (1980) e ISHII e JARLAIS (1982). A determinação do padrão de escoamento é essencial para a acurácia da simulação, pois o balanço de forças na interface gás-líquido e nas paredes da tubulação na equação de quantidade de movimento é determinado pelo arranjo das fases, sendo que as transições entre os padrões de escoamento podem causar instabilidade numérica (NASCIMENTO, 2017).

Diferentemente do RELAP5/MOD2, que havia inconsistência dos resultados quando volumes verticais eram conectados a volumes horizontais e vice-versa, no RELAP5/MOD3 esses problemas foram eliminados devido ao cálculo do coeficiente de fricção da interface da junção utilizando as propriedades da própria junção, e não mais pelos valores do componente hidrodinâmico acoplado.

Para os volumes hidrodinâmicos que possuem angulação entre 45° e 90° é utilizado o mapa de escoamento vertical, conforme Figura 9.

Figura 9 – Mapa dos regimes de escoamento vertical no RELAP5/MOD3.3

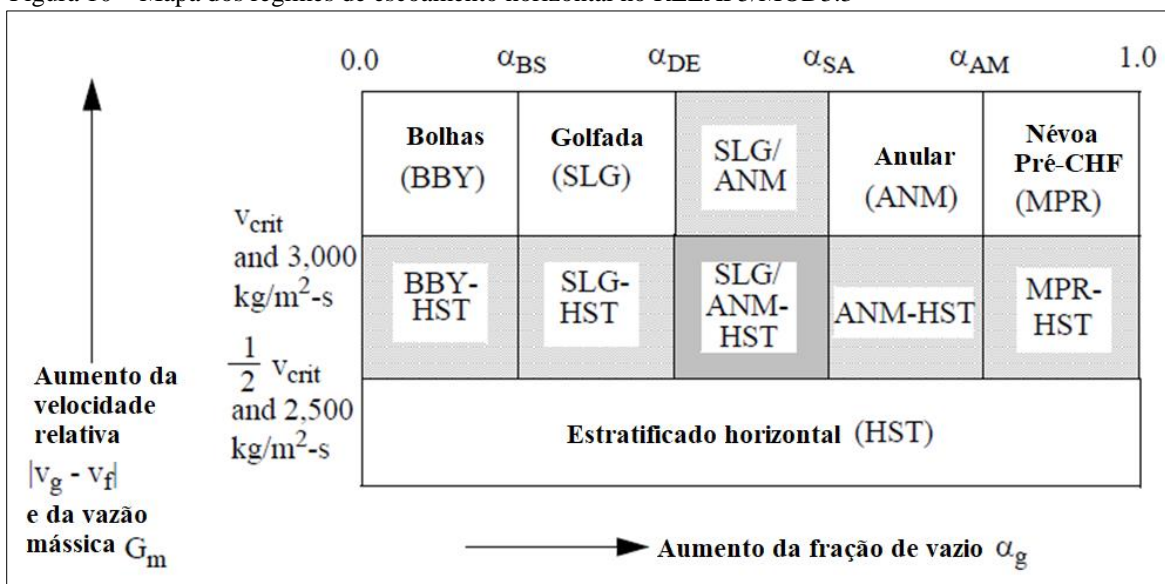


Fonte: IDAHO NATIONAL LABORATORY, 2010.

O mapa é modelado em 9 regimes gerais: 4 para Pré-CHF (bolhas - BBY, golfada (*slug*) - SLG, transição golfada/anular - SLG/ANM e névoa (*mist*) - MPR); 4 para Pós-CHF (anular inverso - IAN, transição inversa anular/golfada - IAN/ISL, névoa - MST e gotas dispersas - MPO); e 1 para estratificação vertical (*Vertically stratified* - VST) para baixas velocidades da mistura (v_m).

Para os volumes hidrodinâmicos que possuem angulação entre 0° e 45° é utilizado o mapa de escoamento horizontal, conforme Figura 10. Os critérios de transição do mapa horizontal são similares ao vertical, com a diferença de que no horizontal não há região Pós-CHF.

Figura 10 – Mapa dos regimes de escoamento horizontal no RELAP5/MOD3.3



Fonte: IDAHO NATIONAL LABORATORY, 2010.

Na Tabela 3 é possível visualizar os sequenciais de letras presentes nos mapas de escoamento associados aos seus respectivos padrões. Por meio da variável FLOREG, o RELAP5/MOD3.3 expressa por meio de números inteiros o padrão de escoamento para cada instante de tempo decorrido da simulação numérica.

Tabela 3 – Padrões de escoamento em regime bifásico no RELAP5/MOD3.3

Padrão de escoamento	Letras do regime	Número
Bolhas dispersas	CTB	1
Bolhas dispersas/transição névoa	CTT	2
Névoa	CTM	3
Bolhas	BBY	4
Golfada	SLG	5
Anular	ANM	6
Névoa Pré-CHF	MPR	7
Anular invertida	IAN	8
Golfada invertida	ISL	9
Névoa	MST	10
Névoa Pós-CHF	MPO	11
Estratificado horizontal	HST	12
Estratificado vertical	VST	13
<i>Level tracking</i>	LEV	14
Jatos	JET	15

Fonte: adaptado de IDAHO NATIONAL LABORATORY (2010).

As equações diferenciais são registradas com formulação unidimensional em tubos de corrente com junções de entrada e saída, ou seja, volumes de controle, nas quais as propriedades do escoamento são assumidas constantes sobre a seção transversal, em que propriedades escalares como energia, densidade, fração de vazio e pressão são retratadas pela média no centro interior dos volumes de controle, enquanto propriedades vetoriais, como a velocidade, são localizadas nas junções (SABUNDJIAN et al., 2010).

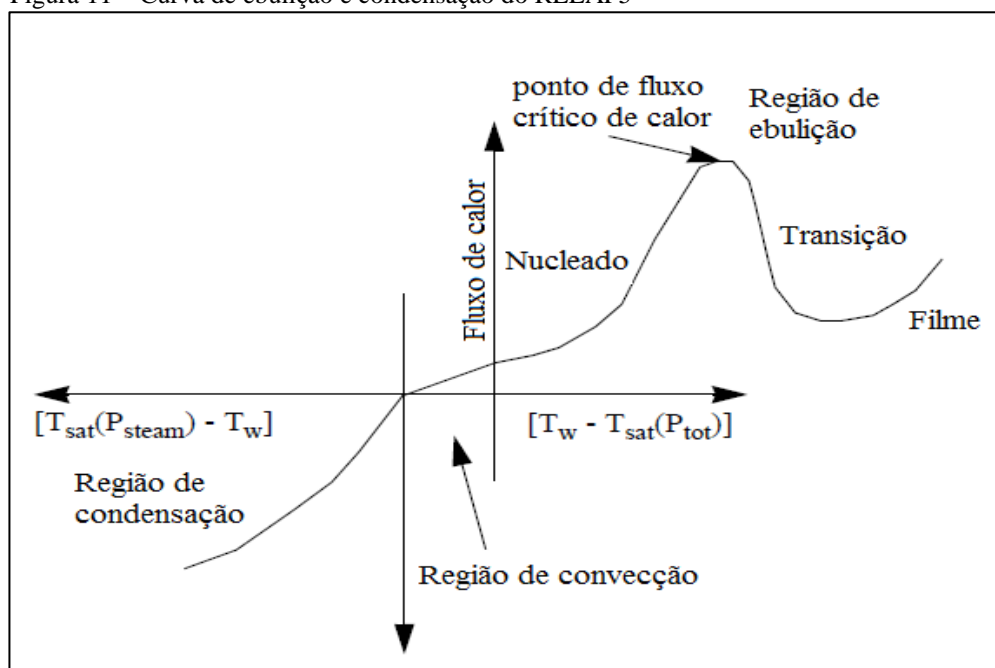
As temperaturas e fluxos de calor também são calculados numa formulação unidimensional na transferência de calor, em que as estruturas de calor são acopladas aos volumes hidrodinâmicos, podendo ser representadas nas geometrias cilíndrica, retangular ou esférica, simulando o fluxo de calor perpendicular ao escoamento. O fluxo de calor total na parede (q'') é uma correlação de transferência de calor por convecção, igual à soma do fluxo de calor para o vapor (fase gasosa) e o fluxo de calor para a fase líquida, conforme Equação (9).

$$q'' = h_g(T_w - T_{refg}) + h_l(T_w - T_{refl}) \quad (9)$$

Onde, h_g e h_l são os coeficientes de transferência de calor das fases gasosas e líquida, respectivamente. T_w é a temperatura da parede (*wall*). T_{refg} e T_{refl} são as temperaturas de referência das fases gasosa e liquidado refrigerante, em que essas temperaturas podem ser locais ou a temperatura de saturação, dependendo de qual coeficiente de transferência de calor seja usado. Propriedades dos materiais, como condutividade e capacidade térmica são fornecidas em forma de tabela ou em função do tempo pelo usuário.

O RELAP5 utiliza uma curva de ebulição e condensação para determinar qual correlação é a governante, ilustrada na Figura 11, levando-se em consideração alguns fatores na escolha do coeficiente de transferência de calor para calcular o fluxo de calor.

Figura 11 – Curva de ebulição e condensação do RELAP5



Fonte: Adaptado de IDAHO NATIONAL LABORATORY (2010).

Os fatores relativos tratados pela lógica do RELAP5 são: se a pressão do volume está acima da pressão crítica; se a temperatura da parede está superior à temperatura de saturação; se há presença de gás não condensável; se o fluido está em fase líquida, vapor ou em duas fases; se o fluxo de calor está acima do fluxo crítico de calor. Desta forma, o RELAP5 seleciona a correlação apropriada para o coeficiente de transferência de calor utilizada no cálculo do fluxo de calor. A Tabela 4 apresenta a correspondência numérica utilizada pelo RELAP5/MOD3.3 com os fenômenos de transferência de calor convectivos entre a superfície e o fluido e suas respectivas correlações.

Apresentados os modelos físicos de termo-hidráulica e de transferência de calor presentes no RELAP5, o modelo numérico utilizado é o de diferenças finitas com solução semi-implícita, em que as equações diferenciais são resolvidas utilizando-se as propriedades do fluido no passo anterior de tempo, acopladas inclusive do passo de tempo atual.

Tabela 4 – Correspondência numérica dos modelos de transferência de calor

Número	Fenômeno	Correlação
0	Mistura de não-condensável-vapor-água ou água superaquecida	KAYS (1955); DITTUS e BOELTER (1930); ESDU ^a , SHAH (1992); CHURCHILL e CHU (1975); McADAMS (1954); ELEMBAAS (1948); PETUKHOV e KIRILLOV (1958); SWANSON e CATTON (1987)
1	Condição supercrítica ou monofásica líquida	Igual ao modelo 0
2	Monofásica líquida ou parede resfriada com baixa fração de vazio (< 0,1)	Igual ao modelo 0
3	Ebulição nucleada sub-resfriada	CHEN (1966)
4	Ebulição saturada e nucleada	Igual ao modelo 3
5	Ebulição em transição sub-resfriada	CHEN, SUNDARAM e OZKAYNAK (1977)
6	Ebulição saturada em transição	Igual ao modelo 5
7	Ebulição em filme sub-resfriado	BROMLEY (1950); SUN, GONZALES e TIEN (1976) e correlações do modelo 0
8	Ebulição em filme saturada	Igual ao modelo 7
9	Bifásico em condição supercrítica ou monofásico gasoso	Igual ao modelo 0
10	Condensação em filme	NUSSELT (1916); SHAH (1979); COLBURN e HOUGEN (1934)
11	Condensação do vapor	Igual ao modelo 10
12	Monofásica líquida ou parede resfriada com baixa fração de vazio (< 0,1)	Igual ao modelo 0
3,4 para tubos horizontais	Ebulição nucleada	FORSTER e ZUBER (1955); POLLEY, RALSTON e GRANT (1981); ESDU ^a

a. ESDU (Engineering Science Data Unit, 73031, Nov 1973; ESDU International Plc, 27, Corsham Street, London, N1 6UA)

Fonte: adaptado de IDAHO NATIONAL LABORATORY (2010).



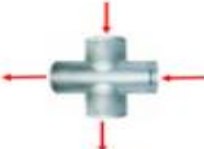






O objetivo primordial no desenvolvimento do RELAP5 é a produção de um código que pudesse prever o comportamento de transientes, mas que fosse suficientemente simples e de baixo custo, para que os estudos paramétricos e de sensibilidade fossem possíveis. Os modelos de duas fases presentes no código podem causar instabilidades numéricas, além do truncamento de termos de alta ordem e afetar sua capacidade de demonstrar importantes fenômenos físicos da circulação natural, sendo de grande importância estudos que testem a capacidade do código em simular o comportamento da circulação natural em regimes monofásico e bifásico (MANGAL, JAIN e NAYAK, 2012).

Como a análise de sensibilidade geométrica e da parametrização na modelagem com o RELAP5 são importantes na avaliação de sistemas termo-hidráulicos, os dados de

entrada englobam 4 principais áreas: hidrodinâmica, transferência de calor, variáveis lógicas e de controle, e neutrônica.

Na modelagem hidrodinâmica, são necessários alguns dados, principalmente em relação à geometria dos componentes, como comprimento, área, diâmetro, angulação e rugosidade do material na interface de contato com o fluido. Na Tabela 3 são apresentados os principais componentes utilizados nas modelagens.

Tabela 5 – Elementos mais utilizados em simulações com o código RELAP5

Tipo	Componente	Nodalização	Descrição
Volume simples (<i>Single-volume</i>)	SNGLVOL		Representação de algum trecho de tubo sem subdivisão.
Tubulação (<i>pipe</i>)	PIPE		Representação de algum trecho de tubo com divisão.
Conector com várias saídas (<i>branch</i>)	BRANCH		Representa uma tubulação com várias junções conectadas a ela.
Junção Simples (<i>single-junction</i>)	SNGLJUN		Conecta um componente a outro.
Válvula (<i>valve</i>)	VALVE		Pode simular a presença de até seis tipos de válvulas.
Bomba (<i>pump</i>)	PUMP		Simula a presença de uma bomba de refrigeração.
Acumulador (<i>accumulator</i>)	ACCM		Simula os acumuladores de um reator PWR.
Volume dependente do tempo (<i>time dependent volume</i>)	TMDPVOL		Representa um volume com condições de contorno.
Junção dependente do tempo (<i>time dependent junction</i>)	TMDPJUN		Representa junções como condições de contorno.

Fonte: SILVESTRE (2006).

Na modelagem das estruturas de calor são necessários dados, a área de transferência de calor do componente, propriedades do material (condutividade térmica e calor específico), as temperaturas iniciais e o tipo de condição de contorno em cada face.

As variáveis lógicas são definidas de acordo com parâmetros já determinados, enquanto as variáveis de controle são definidas, por exemplo, como tempo de abertura ou fechamento de válvulas, limites de saturação, entre outros.

A parte neutrônica pode ser calculada pelo RELAP5 por meio da reatividade inicial, e dados sobre a fração de nêutrons atrasados, produtos de fissão, entre outros, com tabelas fornecidas pelo usuário, resolvendo a equação de cinética pontual. Das quatro partes, apenas esta não será utilizada no presente trabalho, por se tratar de uma seção aquecida eletricamente.

2.4.1 Pré-processadores para RELAP5

Como há uma grande quantidade de dados de entrada a serem inseridos no RELAP5 na simulação de uma planta nuclear, houve a motivação para o desenvolvimento de pré-processadores.

Alguns pré-processadores que foram desenvolvidos a fim de melhorar o desempenho na modelagem foram os seguintes: o Pré-processador do RELAP5 (PREREL5), desenvolvido por PALADINO (2006); houve uma evolução com o Programa de Cálculo do RELAP5 (PCRELAP5), desenvolvido por SILVESTRE (2016); e, o mais atual, a última versão o FastLAP, criado por MONACO (2019), pois tais códigos não dão ênfase a uma maior familiaridade na relação usuário-código, e sim, uma maior confiabilidade no processamento dos dados. Neste trabalho, será utilizado a última versão o pré-processador FastLAP no auxílio da modelagem do CCN no RELAP5/MOD3.3.

O pré-processador FastLAP foi desenvolvido não apenas para gerar os dados de entrada do código RELAP5/MOD3.3, mas também a sua nodalização, de forma mais amigável possível. Apesar do conhecimento do código RELAP5 ser fundamental para o uso adequado do pré-processador, a forma com que as interfaces do pré-processador foram modeladas, fazem com que seja mais fácil identificar quais os parâmetros necessários para seu uso correto.

A ferramenta também direciona os usuários do RELAP5 a manterem metadados para facilitar a análise de problemas no futuro. Apesar de todos os metadados gerados nos dados de entrada do RELAP5 serem guardados por meio de comentários, estes são armazenados de forma a serem reaproveitados pelo *add-in*. Informações como observações, versão, data de criação, nome do autor, descrição dos componentes, entre outros, que

originalmente não fazem parte dos dados de entrada do RELAP5, facilitam as análises dos dados de entrada criados por meio do pré-processador.

Os requisitos de interface escolhidos foram decididos utilizando-se das melhores práticas de modelagem de experiência de usuários. Assim, o resultado final é um pré-processador com interface fluida, não-intrusiva e não bloqueante, permitindo ao usuário decidir o que fazer a cada momento, e dando condições para que quaisquer usuários com experiência no RELAP5 possam criar novos problemas para o código por meio do pré-processador com curva de aprendizado reduzida, quando comparada com ferramentas similares. Por fim, a criação dos diagramas visuais foi feita de forma a permitir que os usuários possam criar intuitivamente os diagramas dentro do problema.

3 MATERIAIS E MÉTODO

Neste capítulo serão descritos o aparato experimental utilizado no desenvolvimento do trabalho, os procedimentos experimentais na construção e instalação do sensor de fração de vazio, e a modelagem do CCN com o pré-processador FastLAP.

3.1 Circuito de Circulação Natural (CCN)

O circuito de circulação natural (CCN) é fechado, de formato retangular, composto por tubos Pyrex da Corning® (vidro de borossilicato), tendo como vantagens além da ótima visualização dos escoamentos, boa resistência a choques térmicos devido ao baixo coeficiente de dilatação, quando comparado a vidros comuns. O circuito é suspenso por cabos metálicos em uma estrutura sólida de tubos de aço, garantindo o alinhamento e integridade da tubulação em vidro, devido a vibrações durante as experiências. A altura do circuito, sem contar o tanque de expansão, é de 2.600 mm e a largura de 850 mm.

A fonte quente é um aquecedor composto por resistências elétricas situado na parte inferior de uma seção vertical do circuito. Ela é composta por duas resistências que dissipam cada uma em torno de 3.900 W, uma sempre operando com potência total, e a outra controlada por um Variac, ou seja, a potência elétrica aplicada nas resistências é feita com um variador de tensão alimentado com corrente alternada, possibilitando potências de até um total de 7.800 W. A retirada de calor (fonte fria) é composta por um trocador de calor com espiras helicoidais e se localiza na parte superior da seção vertical oposta à seção do aquecedor. O volume total do circuito está em torno de 12 litros, englobando o tanque de expansão e a linha de surto. O tanque de expansão possui o bocal superior aberto permanecendo-o à pressão constante, enquanto o bocal inferior é conectado por um tubo flexível até um ponto intermediário da seção horizontal mais abaixo, assim, absorve as variações de densidade do fluido no circuito. O circuito não possui isolamento térmico, a menos da base do aquecedor, possibilitando assim a visualização do escoamento. As juntas de conexão das tubulações são de teflon, enquanto as duas juntas de expansão são de borracha. O CCN pode ser visto na Figura 12.

Figura 12 – Circuito de Circulação Natural (CCN)



Fonte: autor da dissertação.

3.1.1 Instrumentação

A instrumentação utilizada no sensoriamento e na aquisição de dados presentes no CCN são descritas a seguir.

3.1.1.1 Termopares

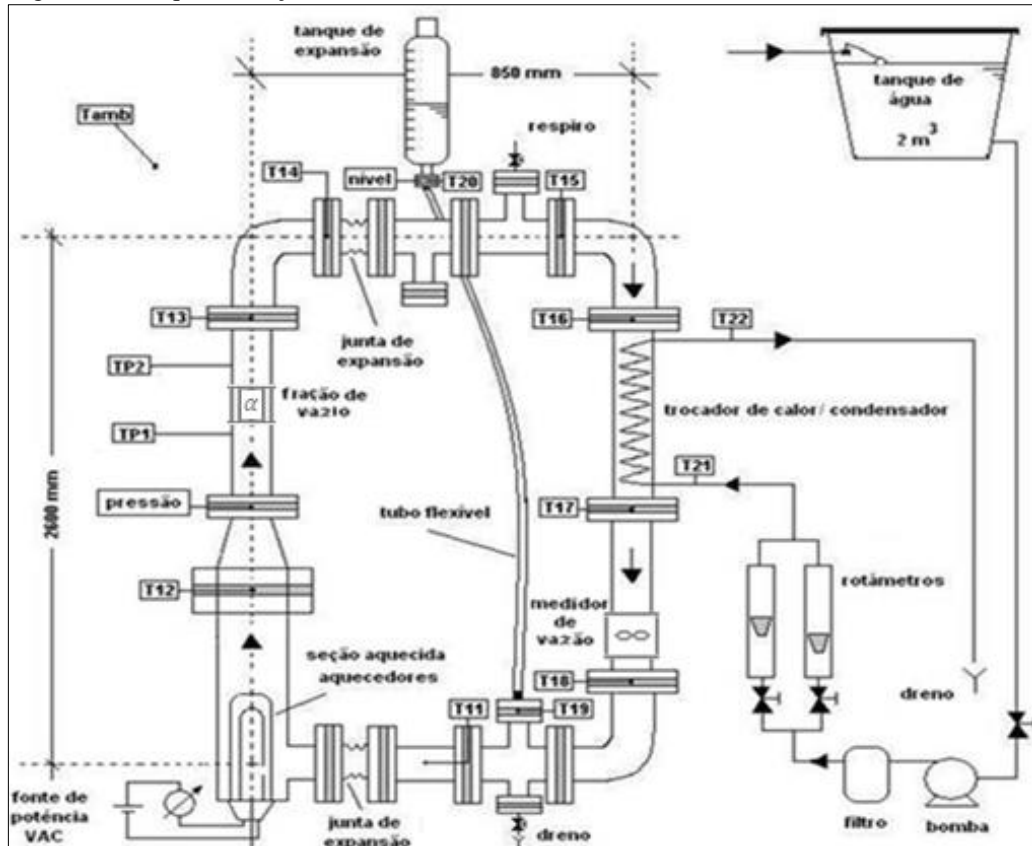
São medidas as temperaturas em 14 pontos, com termopares do tipo K, dois dos quais estão dispostos na superfície dos tubos, os demais se encontram centralizados no interior da tubulação. O termopar tipo K possui boa precisão dentro do intervalo de temperatura do CCN em operação e é mais resistente à oxidação em altas temperaturas do que os tipos E, J e T. Na Figura 13 é possível visualizar o termopar utilizado. A Figura 14 mostra de forma esquemática as respectivas posições dos termopares no circuito, como também a indicação de outros sensores, como pressão, vazão e fração de vazio.

Figura 13 – Termopar tipo K



Fonte: autor da dissertação.

Figura 14 – Esquemática do CCN



Fonte: Adaptado de SABUNDJIAN (2010).

3.1.1.2 Sensores de pressão

Dois medidores de pressão diferenciais são utilizados no CCN, um está posicionado logo acima da fonte quente, e o outro abaixo do tanque de expansão para medição de nível.

Seu funcionamento padrão é de duas conexões dispostas lado a lado para medir a diferença de pressão entre os pontos superiores e inferiores, enviando um sinal elétrico ao microcomputador. Na Figura 15 são mostrados os medidores de pressão utilizados no CCN.

Figura 15 – Medidores de pressão diferenciais



Fonte: autor da dissertação.

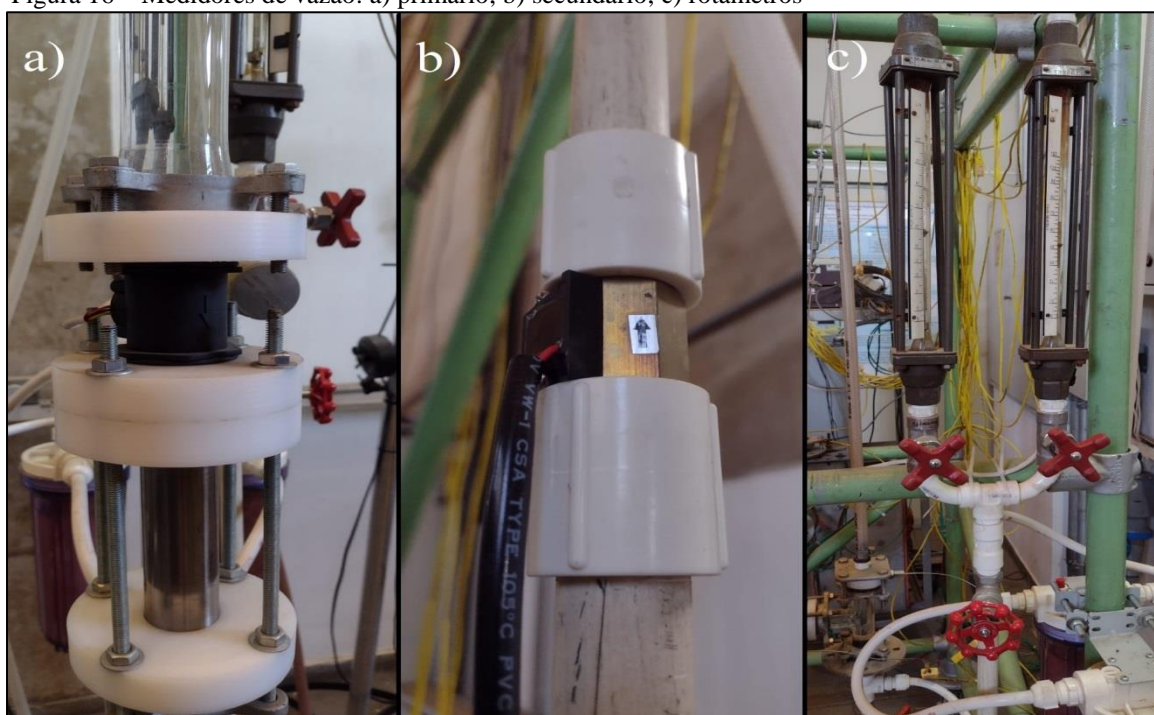
3.1.1.3 Medidores de vazão

Dois medidores de vazão estão acoplados ao CCN, um no circuito primário medindo o fluxo após a saída do fluido do trocador de calor, e outro no secundário, medindo a vazão do fluido refrigerante que passa por dentro do trocador de calor helicoidal.

Água desmineralizada é utilizada no circuito primário, enquanto água proveniente de uma caixa d'água é utilizada no secundário. A vazão de resfriamento pode ser controlada por duas válvulas, tipo globo, acopladas a rotâmetros que indicam a vazão em litros/hora do fluido refrigerante que passará dentro do trocador de calor helicoidal, para posteriormente ser descartado pelo dreno.

Ambos medidores de vazão, presentes nos circuitos primário e secundário, medem a vazão de modo proporcional ao número de giros da turbina no interior dos medidores. Na Figura 16 são ilustrados os dois medidores de vazão, como os rotâmetros.

Figura 16 – Medidores de vazão: a) primário; b) secundário; c) rotômetros

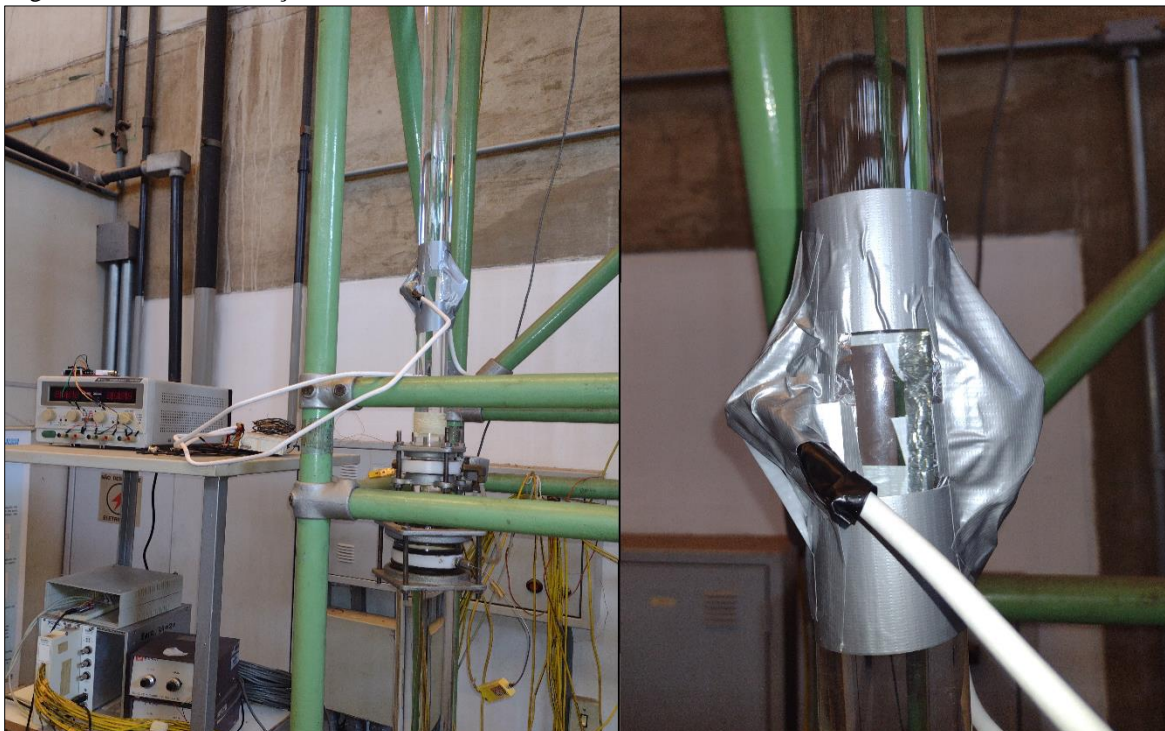


Fonte: autor da dissertação.

3.1.1.4 Sensor de fração de vazio

O sensor de fração de vazio do tipo capacitivo construído a partir do trabalho de ROCHA (2005) foi totalmente desenvolvido dentro do Laboratório de Termo-hidráulica do CEENG do IPEN. O sensor possui dois eletrodos, um de excitação e um de recepção, em que é introduzida uma tensão de onda senoidal com amplitude e frequência conhecidas, com frequência na ordem de MHz, com o objetivo de medir a capacitância relativa do fluido entre os eletrodos. Assim, a corrente flui do eletrodo de excitação para o de recepção, que é transformada em tensão por um conversor corrente-tensão, sendo então possível o cálculo da permissividade elétrica do fluido entre os eletrodos, ou seja, a capacidade de um material se polarizar em resposta a um campo elétrico aplicado. Sua grande vantagem é a não necessidade de contato com o fluido, ao contrário do sensor de fração de vazio do tipo resistivo. Na Figura 17 é possível visualizar o sensor de fração de vazio. Maiores detalhes de sua construção, instalação e funcionamento podem ser vistos no APÊNDICE A.

Figura 17 – Sensor de fração de vazio



Fonte: autor da dissertação.

3.1.1.5 Sistema de aquisição de dados

Os dados fornecidos pelos sensores são registrados por um sistema de aquisição de dados instalado em um microcomputador, com uma taxa de amostragem compatível com o fenômeno. Todo o equipamento empregado para a aquisição de sinais é da marca *National Instruments®* e consiste essencialmente do chassi de alimentação, um bloco de terminais e uma placa de aquisição de dados conectada a um microcomputador para condicionamento dos sinais, como ilustrado na Figura 18.

O chassi de alimentação SCXI-1000 é um chassi robusto de baixo ruído que fornece alimentação a placas SCXI e cuida de toda a temporização, *trigger* e roteamento de sinais entre as placas.

O SCXI-1303 é um bloco terminal blindado e isotérmico de 32 canais. O SCXI-1303 tem termistores (semicondutor sensível à temperatura) de alta precisão e uma superfície isotérmica para minimizar os gradientes de temperatura nos terminais de parafuso quando conectados aos termopares.

O condicionador de sinais SCXI-1600 é um dispositivo de aquisição de dados (*DAQ – Data Acquisition*) que apresenta um ADC (conversor analógico para digital) de 16

bits. Ao receber os sinais analógicos do módulo SCXI-1303, o SCXI-1600 amplifica, digitaliza e envia os dados para o microcomputador por meio de uma porta USB.

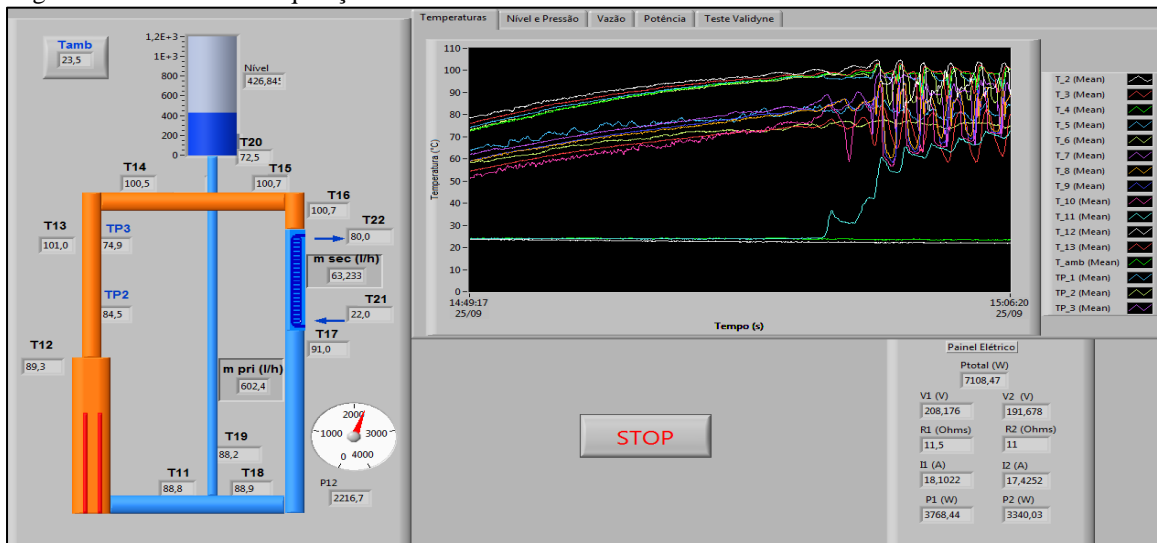
Figura 18 – Bloco de aquisição de dados



Fonte: autor da dissertação.

Por meio do programa LABVIEW 7.0 (2003) instalado no microcomputador, os dados são recebidos e exibidos em tempo real. Com recursos adequados para a interface com a instrumentação, além de oferecer interface homem-máquina simples e confiável, fixa-se a taxa de amostragem, configura-se a tela e o resultado da gravação dos dados é apresentado em uma planilha do *MS Excel*®. A janela de interface pode ser vista na Figura 19.

Figura 19 – Interface de aquisição com LabView®



Fonte: autor da dissertação.

3.2 Desenvolvimento do trabalho

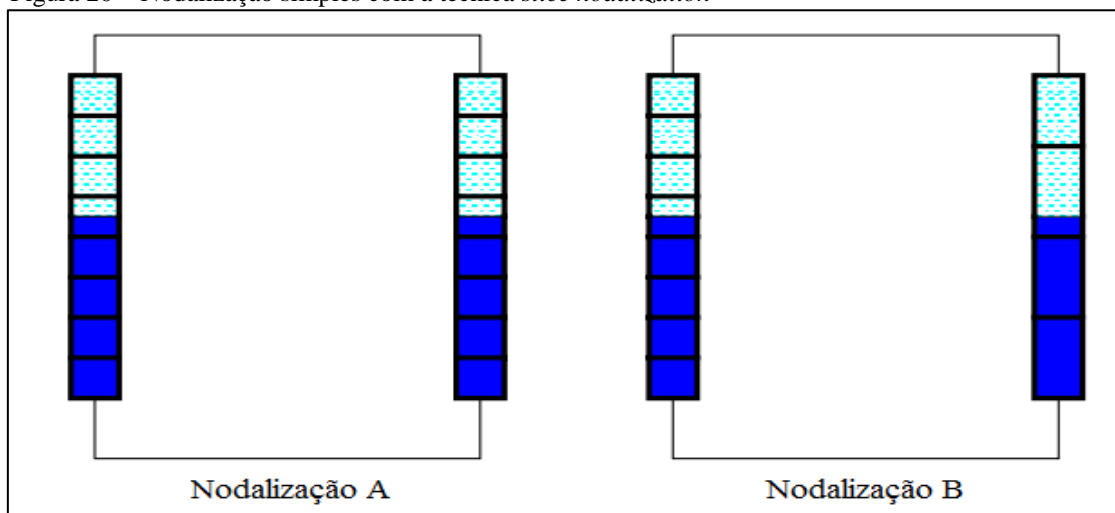
Nesta etapa são descritos os procedimentos na criação dos dados de entrada com o pré-processador FastLAP para modelagem do circuito de circulação natural, as simulações realizadas no RELAP5/MOD3.3 e os experimentos no circuito de circulação natural.

3.2.1 Modelagem dos dados de entrada do circuito com pré-processador FastLAP

Antes de iniciar a modelagem do CCN com o pré-processador FastLAP, algumas etapas devem ser cumpridas para maior eficiência em tal procedimento:

- (1) a organização de todas as informações que definem as condições iniciais e de contorno do problema (medidas geométricas, propriedade dos materiais, distribuição das temperaturas iniciais, entre outros);
- (2) a nodalização inicial do problema, sendo definida a discretização do circuito, ou seja, em quantos volumes de controle serão divididas cada seção do circuito, utilizando o conceito de nodalização estruturada (*slice nodalization technique*), em que cada corte horizontal feito na nodalização possua volumes na mesma cota, assim, os volumes de controle dos lados esquerdo e direito possuam aproximadamente os mesmos valores de comprimento. A técnica *slice nodalization* é adotada no RELAP5 para melhorar a capacidade do código em reproduzir transientes do fenômeno de circulação natural, conforme Figura 20 (PETRUZZI e D'AURIA, 2008).

Figura 20 – Nodalização simples com a técnica *slice nodalization*



Fonte: Adaptado de BAJIS et al. (2000).

Conforme trabalho realizado por BAJIS et al. (2000), a Nodalização A apresenta resultados condizentes com a realidade, enquanto a Nodalização B que não utiliza o conceito de *slice nodalization*, apresenta resultados equivocados.

Enquanto os dados de entrada são listados visando, principalmente, os componentes hidrodinâmicos e estruturas de calor, a nodalização deve levar em conta estabilidade numérica, tempo de processamento e convergência da solução. Quanto mais “nós” tiver o domínio, maior o tempo de execução do programa, em que se recomenda um refinamento em locais ou pontos de maior interesse do circuito, contudo o comprimento dos volumes deve ser tal que os volumes de controle possuam o limite de *Courant* similares para haver estabilidade e convergência numérica, assim, o passo de tempo é limitado de acordo com a razão do comprimento do volume de controle e a velocidade do fluido pelo RELAP5. Como o método de diferenças finitas utilizado no RELAP5 é semi-implícito, a escolha do passo no tempo deve ser em função do passo no espaço para pontos interiores ao domínio, não podendo ser feito livremente como no implícito, desta forma, quanto menor os intervalos espaciais, menor deve ser o intervalo temporal, em que cabe ao usuário a decisão e sensibilidade na análise da nodalização. Como um guia prático, mas informal, o usuário deve considerar o uso de um tamanho mínimo do passo de tempo de 10^{-7} segundos e um passo de tempo não superior a 0,2 segundos (IDAHO NATIONAL LABORATORY, 2010).

Inicialmente, foi determinado um passo de tempo máximo de 0,1 segundos e passo de tempo mínimo de 10^{-7} segundos, desta forma, verifica-se nas primeiras rodadas se o comportamento dos resultados corresponde ao fenômeno físico com um menor esforço computacional. Posteriormente, foi alterado o passo de tempo máximo para 0,001 segundos, visando que o RELAP5/MOD3.3 inicia a simulação com o passo de tempo mínimo aumentando gradativamente até atingir o passo de tempo máximo, se o erro (*mass error*) for suficientemente baixo.

A qualidade da modelagem está intrinsecamente ligada à nodalização do problema, pois existe dificuldade em modelar geometricamente o sistema de forma exata, em que essas aproximações podem ocorrer em resultados que não demonstram os transientes esperados, e a própria capacidade do código.

Ao construir um novo modelo, sugere-se que apenas condições iniciais cruciais sejam especificadas e o código deve ser usado para calcular as condições iniciais estáveis necessárias como ponto de partida dos cálculos. Por exemplo, todas as temperaturas e pressões iniciais do fluido podem ser definidas de acordo com a temperatura da perna fria,

todas as velocidades iniciais definidas com valor zero e todas as estruturas de calor e controle de variáveis com inicialização automática. O modelo é então conduzido à condição de estado estacionário desejada, com a introdução gradual das condições de contorno e respectiva vazão do fluido (PETRUZZI e D'AURIA, 2007).

Também é altamente recomendável que os dados de entrada das estruturas de calor sejam associados aos componentes hidrodinâmicos no mesmo número de volumes de controle.

Na Figura 21 abaixo é apresentado um esboço da nodalização proposta para o circuito primário do CCN, com exceção da linha de surto e do tanque de expansão, em que buscou-se utilizar o mesmo número de nós para as pernas quente e fria, como as mesmas dimensões de altura correspondentes ao lado esquerdo e direito do circuito, seguindo a metodologia de nodalização estruturada.

Figura 21 – *Slice nodalization* aplicada ao circuito primário do CCN

PERNA QUENTE 03					
	122.01.000	122.02.000	122.03.000	122.04.000	
PERNA QUENTE 02	121.02.000			140.01.000	TROCADOR DE CALOR
	121.01.000			140.02.000	
PERNA QUENTE 01	120.06.000			160.01.000	PERNA FRIA 01
	120.05.000			160.02.000	
	120.04.000			160.03.000	
	120.03.000			160.04.000	
	120.02.000			160.05.000	
120.01.000	160.06.000				
AQUECEDOR	100.06.000			160.07.000	
	100.05.000			160.08.000	
	100.04.000			160.09.000	
	100.03.000			161.01.000	SEÇÃO MEDIDOR DE VAZÃO
	100.02.000	161.02.000			
100.01.000	161.03.000				
BASE DO AQUECEDOR	162.02.000	161.04.000	161.05.000		
	162.01.000	175.00.000	170.00.000	PERNA FRIA 02	

Fonte: autor da dissertação.

A diferença de altura entre os pontos médios do aquecedor e do trocador de calor é de cerca de 1,80m. A seção do aquecedor é composta por um PIPE (100) com 6 volumes, totalizando 0,89575m. As pernas quentes 01, 02 e 03 são três PIPE's (120-121-122), com 0,835m, 0,55m e 1,05m de comprimento cada um, e contendo 6, 2 e 4 volumes, respectivamente. O trocador de calor no lado primário do circuito é um PIPE (140) que possui 2 volumes totalizando 0,55m. A perna fria 01 é um PIPE (160) com 9 volumes,

totalizando 1,48m. A próxima etapa de percurso do fluido no circuito de circulação natural é a seção do medidor de vazão, composta por um PIPE (161) com 5 volumes, totalizando 0,4075m. A seguir, na chamada perna fria 02, os componentes hidrodinâmicos utilizados são os BRANCH's (170) e (175) com 0,27m e 0,48m de comprimento, respectivamente. A saída do BRANCH (175) é ligada à base do aquecedor, um PIPE (162) com 2 volumes e 15cm de comprimento, fechando o *loop* do circuito primário. Todas as junções do circuito primário, com exceção às ligadas ao BRANCH, são compostas por junções do tipo SNGLJUN's.

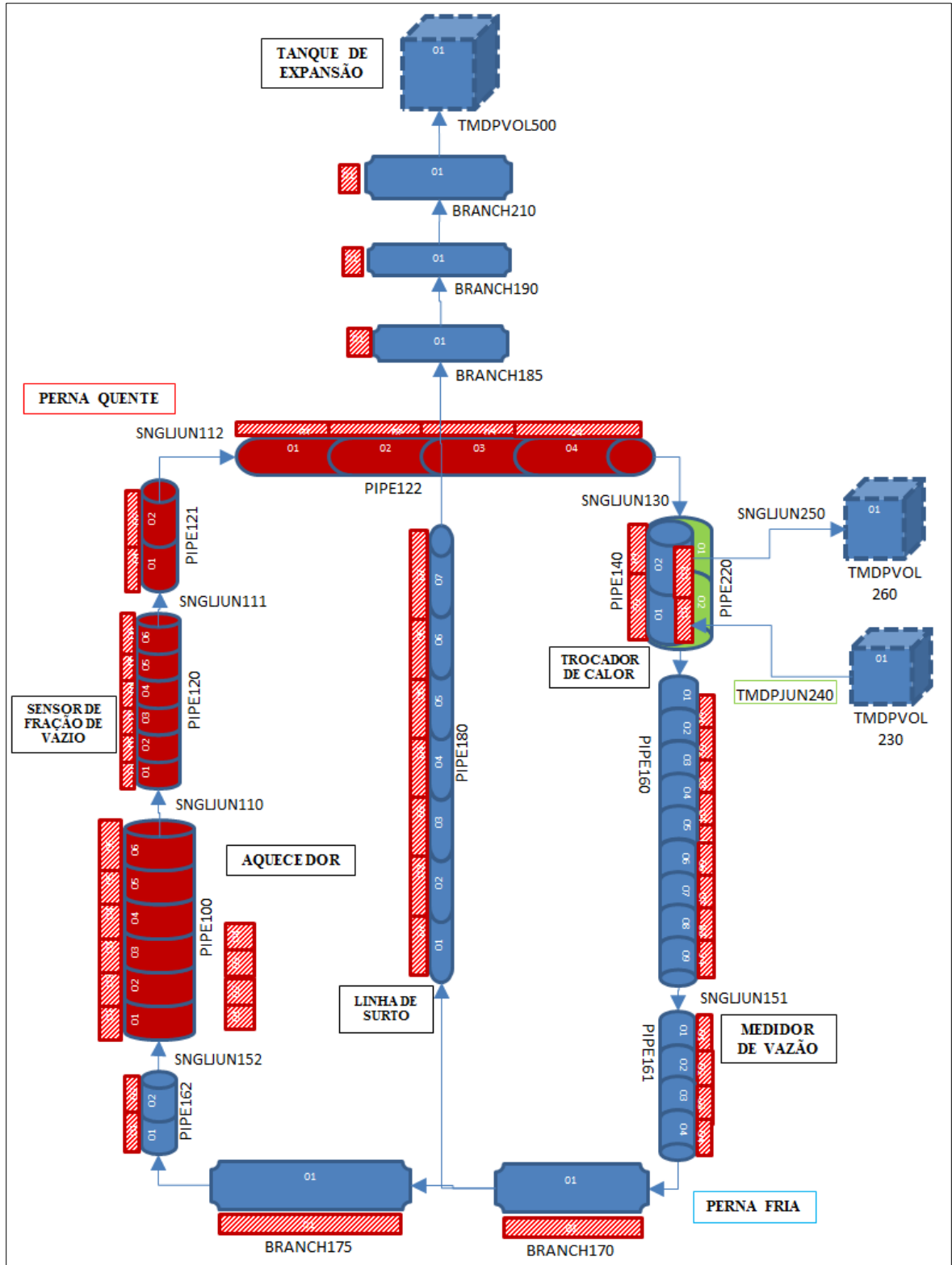
Para acomodação das variações de pressão ocorridas dentro do CCN, há uma linha de surto que sai da base do *loop* em direção ao tanque de expansão, desta forma, uma das junções do BRANCH (170) é uma saída para o PIPE (180) com 7 volumes, totalizando 3,01m. A linha de surto que sobe está ligada a um BRANCH (185) com 0,2m, em que este é ligado a outro BRANCH (190), com 0,5m. Por último, o BRANCH (190) é ligado a outro BRANCH (210) de 0,57m, finalizando a geometria do circuito primário. Para simular o ambiente a qual está submetido o tanque de expansão, é utilizado o componente hidrodinâmico TMDPVOL (500), com temperatura e pressão constantes, conforme Figura 22.

O circuito secundário é composto por um PIPE (220) localizado dentro do PIPE (140), de mesma altura, 0,55m. A entrada do fluido refrigerante no trocador de calor advém de um TMDPJUN (240), uma junção dependente do tempo, em que a vazão e pressão se encontram constantes no decorrer da simulação. O fluido é proveniente de um TMPDVOL (230) que simula a entrada do fluido proveniente da caixa d'água a uma temperatura e pressão constantes. Na saída do trocador de calor é utilizado um SNGLJUN (250) ligado a um TMPDVOL (260) que simula o dreno, conforme Figura 22.

Efetuada as primeiras etapas, um novo projeto pôde ser criado com o FastLAP devidamente instalado conforme passos descritos no APÊNDICE B. Mesmo que o pré-processador seja intuitivo no seu preenchimento, é necessário utilizar o manual do código como auxílio de forma a maximizar o uso do FastLAP, principalmente em relação ao conteúdo a ser preenchido. A modelagem geométrica do circuito utilizada foi desenvolvida, a fim de apresentar da melhor maneira o fenômeno de circulação natural para os escoamentos monofásico e bifásico. Os pontos de medida dos termopares conforme a Figura 14, foram modelados por meio do pré-processador FastLAP de forma a serem compatíveis com os pontos centrais dos volumes de controle da nodalização do CCN. A modelagem de todo o

circuito de circulação natural com a correspondência entre os componentes do código e as respectivas regiões hidráulicas é apresentada na Figura 22.

Figura 22 – Modelagem do CCN no FastLAP com a correspondência entre os componentes do código e as regiões hidráulicas



Fonte: autor da dissertação.

Na modelagem das estruturas de calor, as suas associações aos componentes hidrodinâmicos facilitam essa etapa, pois uma vez que tenha em mãos as dimensões geométricas do circuito, neste caso também a espessura da parede, as estruturas de calor são associadas aos respectivos volumes dos componentes hidrodinâmicos de forma axial, sendo determinado se ocorre transferência de calor por meio da condução ou da convecção, se é uma fonte ou sumidouro de calor, nos lados esquerdo ou direito do componente hidrodinâmico a ele associado. De forma padronizada, todos os componentes hidrodinâmicos na modelagem utilizada possuem 3 pontos radiais e, conseqüentemente, 2 áreas radiais, feitas de vidro do tipo pirex. Com exceção o aquecedor que possui 5 pontos radiais e 4 regiões radiais, feitas em aço inox. Em todas as tubulações e no aquecedor ocorrem transferência de calor por meio da convecção, seja no lado interno da tubulação (água) ou na parte exterior (ar). No trocador de calor no circuito secundário (PIPE 220), a condição de contorno do lado externo é a temperatura do fluido no circuito primário (PIPE 140) e no lado interno a temperatura do fluido proveniente da caixa d'água.

Com a utilização das tabelas das propriedades dos materiais inseridas (TBL/FCTN) e das tabelas gerais padrões do RELAP5/MOD3.3 para as condições de contorno, *power* para designação da potência fornecida à fonte de calor ao longo do tempo, *htc-t* para especificar o coeficiente de transferência de calor nas estruturas troca de calor que ocorre por convecção, e *temp* para designar a temperatura ambiente durante a simulação, os aspectos físicos estão inseridos no *input* a ser executado pelo RELAP5/MOD3.3.

Para finalizar, foi determinado o mesmo tempo total de 3.000 segundos da simulação experimental, sendo especificado os passos de tempo mínimo e máximo (*time step*) permitidos e a frequência mínima e máxima de plotagem dos pontos que serão representados nos resultados para o período de simulação escolhido.

Uma vez que todos os requisitos obrigatórios tenham sido realizados para início da simulação, os dados de entrada são enviados a uma aba específica (RELAP5 *Input*), a qual pode ser exportada para um arquivo *inp* a ser executado pelo RELAP5/MOD3.3, conforme Figura 23.

Figura 23 – Janela de execução do RELAP5/MOD3.3

```

Prompt de Comando - r7500-100
*****
*** THIS CODE IS THE RESULT OF WORK SPONSORED BY AN AGENCY OF THE UNITED ***
*** STATES GOVERNMENT. NEITHER THE UNITED STATES GOVERNMENT NOR ANY AGENCY ***
*** THEREOF, NOR ANY OF THEIR EMPLOYEES MAKES ANY WARRANTY, EXPRESSED OR ***
*** IMPLIED, OR ASSUMES ANY LEGAL LIABILITY OR RESPONSIBILITY FOR ANY THIRD ***
*** PARTYS USE, OR THE RESULTS OF SUCH USE, OR OF ANY INFORMATION, PRODUCT, ***
*** OR PROCESS INCLUDED IN OR CALCULATED BY THIS CODE, OR REPRESENTS THAT ***
*** THE USE BY SUCH THIRD PARTY WOULD NOT INFRINGE UPON PRIVATELY-OWNED ***
*** RIGHTS. IN ADDITION, YOU MAY NOT DISTRIBUTE THIS COMPUTER CODE TO ANY- ***
*** ONE OR USE THIS COMPUTER CODE WITHOUT PERMISSION FROM THE UNITED STATES ***
*** NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. ***
*****
0===== Execute file name = relap5-33iy-win32-cvf-opt
      Input file name = Modelagem_CCN_2022_LucasFrenzel_7500_100_final.inp

Copyright (C) 2001-2010 Information Systems Laboratories, Inc.

Thermodynamic properties files used by this problem:

Thermodynamic properties file for h2o      obtained from lfn tpfh2onew,
tpfh2onew version 3.1-2, tables of thermodynamic properties of light water
generated on 04-Oct-10 at 11:04:31 by stgh2onew0 3.1-2 (29/Apr/06)

0$$$$$$$ Input processing completed successfully.
RELAP5/3.3iy      Reactor Loss Of Coolant Analysis Program
Copyright (C) 2001-2010 Information Systems Laboratories, Inc.
= Modelagem_CCN_2022_LucasFrenzel                                28-Aug-22   17:36:58

cpuT_(s)  probTime  dTime_(s)  dTCournt  VolCoP  PresCo_MPa  VoidCo  emass_kg  VolEr  PresEr_MPa  VoidEr  QualaEr  NSteps  Reason
0.3  0.0000  1.00E-07  0.0  10001  0.1064  0.0000  0.00  10001  0.11  0.00  g  0.00  a  0
10.3  12.294  1.00E-03  3.7  21001G  0.1028  0.0030  4.510E-06  22001  0.02  0.00  g  0.00  a  13126  dtmax
20.3  25.287  1.00E-03  3.9  16007F  0.1270  0.0000  4.578E-06  22001  0.12  0.00  g  0.00  a  26119  dtmax
30.3  38.582  1.00E-03  2.7  10006F  0.1270  0.0000  4.629E-06  22001  0.12  0.00  g  0.00  a  39414  dtmax
40.3  51.346  1.00E-03  2.1  10006F  0.1270  0.0000  4.676E-06  22001  0.12  0.00  g  0.00  a  52178  dtmax
50.3  64.692  1.00E-03  1.7  10006F  0.1271  0.0000  4.728E-06  22001  0.12  0.00  g  0.00  a  65524  dtmax
60.3  78.060  1.00E-03  1.4  10006F  0.1271  0.0000  4.784E-06  22001  0.12  0.00  g  0.00  a  78892  dtmax
70.3  91.168  1.00E-03  1.2  10006F  0.1271  0.0000  4.844E-06  22001  0.12  0.00  g  0.00  a  92000  dtmax
80.3  104.42  1.00E-03  0.99  10006F  0.1271  0.0000  4.906E-06  22001  0.12  0.00  g  0.00  a  105249  dtmax
90.3  117.22  1.00E-03  0.90  10006F  0.1271  0.0000  4.965E-06  22001  0.12  0.00  g  0.00  a  118057  dtmax
100.3  129.87  1.00E-03  0.88  10006F  0.1271  0.0000  5.015E-06  22001  0.12  0.00  g  0.00  a  130707  dtmax
110.3  142.44  1.00E-03  0.92  10006F  0.1271  0.0000  5.051E-06  22001  0.12  0.00  g  0.00  a  143269  dtmax
120.3  155.41  1.00E-03  1.0  10006F  0.1271  0.0000  5.075E-06  22001  0.11  0.00  g  0.00  a  156240  dtmax
130.3  168.67  1.00E-03  1.1  10006F  0.1271  0.0000  5.092E-06  22001  0.11  0.00  g  0.00  a  169503  dtmax
140.3  181.86  1.00E-03  1.2  10006F  0.1271  0.0000  5.105E-06  22001  0.11  0.00  g  0.00  a  182694  dtmax
150.3  195.44  1.00E-03  1.2  10006F  0.1271  0.0000  5.116E-06  22001  0.11  0.00  g  0.00  a  196269  dtmax
160.3  208.46  1.00E-03  1.1  10006F  0.1271  0.0000  5.125E-06  22001  0.11  0.00  g  0.00  a  209291  dtmax
170.3  221.20  1.00E-03  1.1  10006F  0.1271  0.0000  5.132E-06  22001  0.11  0.00  g  0.00  a  222035  dtmax
180.3  234.40  1.00E-03  1.0  10006F  0.1271  0.0000  5.139E-06  22001  0.11  0.00  g  0.00  a  235231  dtmax

```

Fonte: autor da dissertação.

O procedimento para utilização do FastLAP, como alguns exemplos das janelas de criação de componentes hidrodinâmicos e de troca de calor do circuito podem ser vistos no APÊNDICE B.

3.2.2 Simulação da experiência com RELAP5/MOD3.3

Uma vez criado os dados de entrada por meio do FastLAP, a execução do problema pôde ser realizada com o RELAP5/MOD3.3, contudo, alguns pontos devem ser ressaltados, pois a análise dos resultados com o RELAP5 é uma das fases mais importantes de todo o processo, em que o usuário nunca deve aceitar a solução do código sem antes perguntar se o resultado parece razoável. Caso o código não atinja a convergência apropriada, provavelmente é devido ao erro de massa excessivo, então o RELAP5/MOD3.3 aborta a simulação. Um exame completo da saída do código para cada análise é uma regra fundamental que nunca deve ser violada, avaliando se cada tendência mostrada pelo cálculo é consistente com as condições de contorno, as condições iniciais, os padrões de escoamento

e o comportamento previamente conhecido de estudos similares, ou de uma representação simplificada do problema ou por meio de experimentos.

No APÊNDICE C se encontram os dados de entrada (*Input*) exportados pelo FastLAP referentes a modelagem do CCN para sua execução no RELAP5/MOD3.3.

Após a execução dos dados de entrada, o RELAP5/MOD3.3 cria dois arquivos na mesma pasta do diretório onde foi executado o arquivo *inp*, um arquivo *out* onde contém os resultados da simulação numérica, e um arquivo *rst* de *restart/plot*, útil em ocasiões de rodagens sucessivas devido a erros no código (*debugging*), excluindo automaticamente o *output* na nova execução do mesmo *input*, e também na plotagem de gráficos.

É possível extrair inúmeras variáveis na simulação computacional por meio do RELAP5/MOD3.3, cada uma relacionada ao volume hidrodinâmico, a estrutura de calor, a junção, entre outros, porém para este trabalho foram analisadas somente as variáveis descritas na Tabela 6.

Tabela 6 – Variáveis extraídas do RELAP5/MOD3.3

Variável	Descrição
TEMPF	Temperatura do fluido em fase líquida [K]
HTTEMP	Temperatura de parede [K]
MFLOWJ	Vazão combinada das fases líquida e gasosa [kg/s]
P	Pressão [Pa]
VOIDG	Fração de vazio
FLOREG	Padrão de escoamento
HTMODE	Modelo de transferência de calor

Fonte: autor da dissertação.

Com a utilização das edições menores (*minor edits*) no *input* é possível verificar no final do arquivo *out* os resultados dos principais pontos de interesse, como as temperaturas, a pressão, a vazão e a fração de vazio referentes aos respectivos volumes de controle selecionados, de forma a analisar rapidamente se os resultados são condizentes com a realidade física, conforme exemplificado na Figura 24.

Figura 24 – Edições menores RELAP5/MOD3.3

```

0---Restart no. 3000863 written, block no. 1, at time= 3000.00 ---
1 time      tempf      tempf      tempf      htemp      mflowj      p      voidg
(sec)      100050000    160010000    220020000    1200001 3    161010000    120010000    120030000
              (K)              (K)              (K)              (K)              (kg/sec)      (Pa)

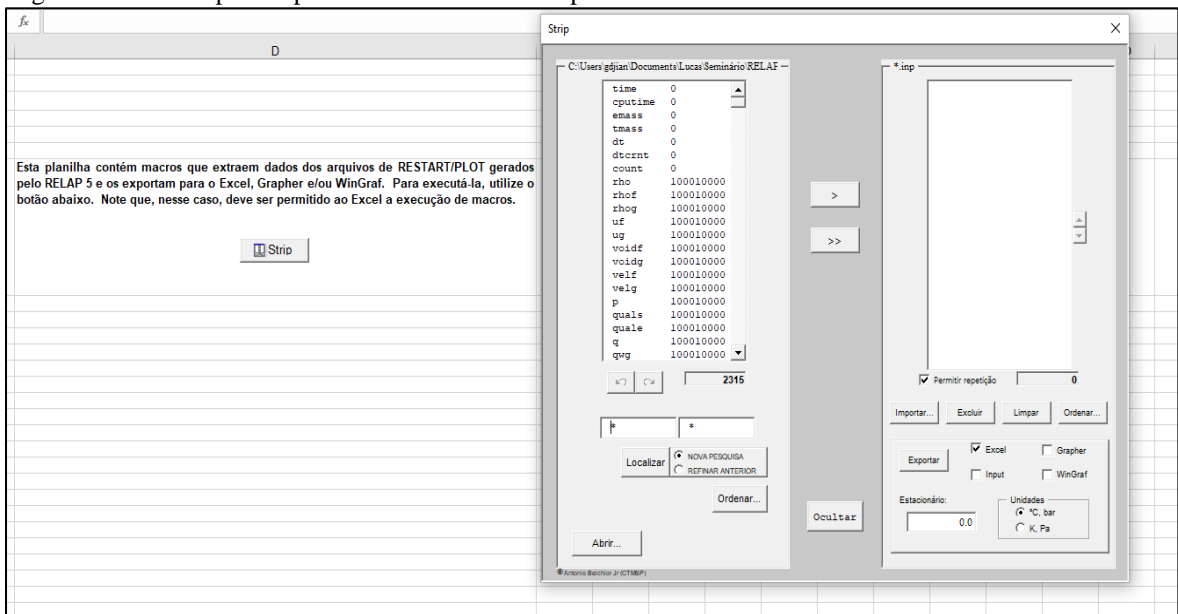
      3000.00      358.34      341.89      323.33      351.58      5.64053E-02    1.25872E+05    0.0000

0---Restart Summary:      2 blocks written in restart file ---
*Card Restart * Problem Time Block
* No. No. (s) No.
*103 0 * 0.00000 0
*103 3000863 * 3000.00 1
0Final time= 3000.00 sec advancements attempted=3000863 cpu time= 1797.55 sec
0Transient terminated by end of time step cards.

```

Fonte: autor da dissertação.

O RELAP5/MOD3.3 exporta os resultados da simulação numérica em um arquivo.txt que não é fácil de ser analisado, desta forma, é utilizado o trabalho desenvolvido por BELCHIOR JUNIOR et al. (2011), que possui um macro em uma planilha do *MS Excel®* que por meio do arquivo.rst, exporta os dados de interesse em uma nova aba, facilitando a análise dos dados numéricos, conforme Figura 25.

Figura 25 – Macro para exportar resultados em uma planilha do *MS Excel®*

Fonte: BELCHIOR JUNIOR et al. (2011).

Com os dados disponíveis da simulação numérica, é possível então compará-los com resultados adquiridos experimentalmente por meio do circuito de circulação natural.

3.2.3 Experimentos no Circuito de Circulação Natural (CCN)

Antes de iniciar o experimento no circuito de circulação natural, que será utilizado como base de comparação com a simulação numérica, se faz necessário rodar o CCN algumas vezes com objetivo de extrair os gases não-condensáveis que podem estar presentes dentro do circuito primário, esses que afetam consideravelmente a precisão dos resultados experimentais.

Considerando-se que o circuito primário esteja devidamente preenchido com água desmineralizada e o sistema de aquisição de dados ligado, o procedimento experimental recomendável antes do início de cada experimento é a verificação por meio da tela de interface do *Labview*® em execução, se a temperatura ambiente está adequada para o estudo em questão, e se as temperaturas estão homogêneas ao longo do circuito.

Assim, abre-se a válvula principal de entrada do circuito secundário e ajusta-se a vazão do fluido de resfriamento proveniente de uma caixa d'água no valor desejado por meio de válvulas acopladas aos rotâmetros. Visto que, a vazão esteja relativamente constante, são ligadas as resistências elétricas de aquecimento do fluido no circuito primário, ajustando-se à potência conforme desejado por meio de um Variac, em poucos segundos, o experimento é iniciado.

Dado que o escopo dos experimentos é a circulação natural em regime monofásico ou bifásico, como as mudanças de fase do fluido, o tempo de 3.000 segundos de experimento são suficientes para serem analisados todos os fenômenos de interesse do presente estudo, pois tanto a amplitude quanto a frequência das oscilações de temperatura no circuito se tornam aproximadamente uniformes com o balanço térmico entre a potência fornecida e a retirada de calor.

Todos os dados podem ser visualizados em tempo real pela tela de interface do *Labview*®, sendo que, posteriormente esses dados são exportados em planilhas do *MS Excel*® para serem analisados.

Vários experimentos foram realizados, alterando-se a potência fornecida e/ou a vazão de resfriamento do circuito secundário, em um range de potência de 1.000 W até 7.500 W, e um intervalo de vazão de 65 L/h (0,0180 kg/s) até 150 L/h (0,0416 kg/s). Os experimentos se encontram disponíveis no banco de dados do CEENG/IPEN. Embora tenham sido simulados vários casos numéricos e experimentais, variando a potência ou a vazão de resfriamento do secundário, serão apresentados apenas alguns casos que

representem bem tanto o escoamento monofásico como o bifásico. As condições de simulação para cada um dos casos são apresentadas por meio da Tabela 7.

Tabela 7 – Condições operacionais do CCN para os escoamentos monofásico e bifásico

Experimento	Potência do aquecedor (W)	Vazão no secundário (L/h)	Temperatura inicial do fluido (°C)	Temperatura Ambiente (°C)	Regime
1	4500	100	21	22	Monofásico
2	7500	100	20	21	Bifásico

Fonte: autor da dissertação.

A partir destas condições de contornos dadas pela Tabela 7, foram simulados os experimentos, cujos resultados são apresentados a seguir.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

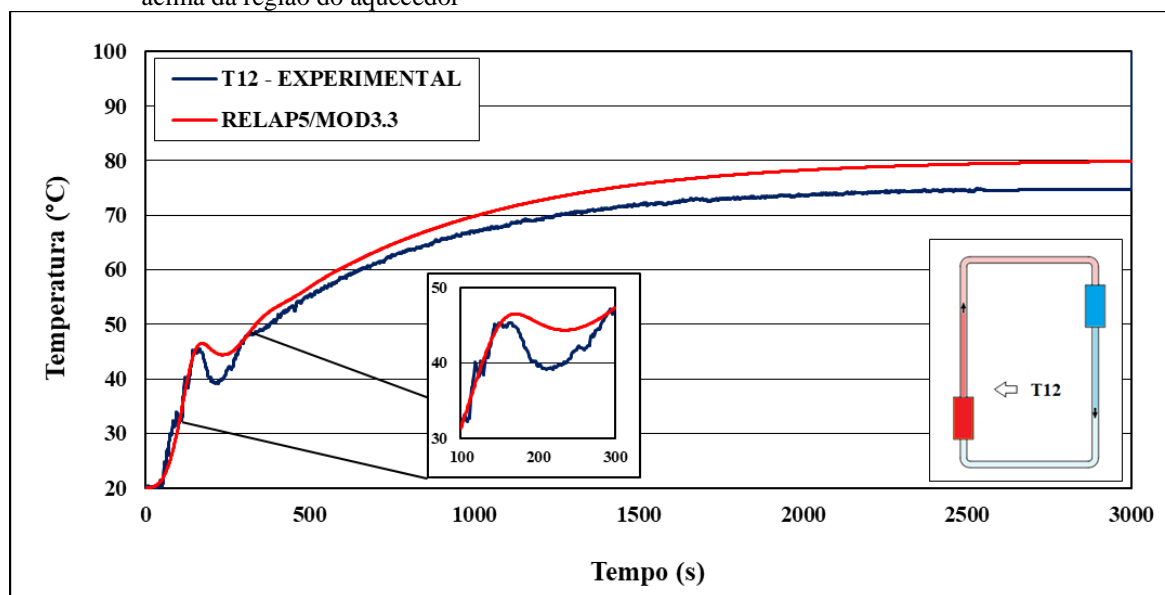
Nesta seção serão feitas análises das principais variáveis de interesse do fenômeno de circulação natural, sendo ressaltadas particularidades físicas do fenômeno, como da simulação numérica. Os resultados obtidos por meio do RELAP5/MOD3.3 e do circuito de circulação natural são comparados e analisados, havendo boa concordância entre os valores adquiridos.

4.1 Regime monofásico

Considerando que existem vários termopares instalados no CCN, conforme esquematização na Figura 14, apenas os que representam bem os fenômenos de circulação natural são retratados a seguir. Lembrando-se que para o regime monofásico a potência fornecida durante a experiência foi de 4.500 W (fixa) e a vazão de resfriamento (secundário) foi de 0,0278 kg/s (100 L/h).

Na Figura 26 é mostrada a evolução da temperatura no termopar T12 localizado na perna quente do circuito de circulação natural, para a simulação numérica e experimental, sendo ressaltado o intervalo de 100 até 300 segundos, com uma variação na faixa de temperatura de 30 a 50°C, onde se observa o comportamento oscilatório inicial das temperaturas em ambos os casos, em que na simulação experimental a temperatura atinge 45°C e depois cai até 39°C. Na simulação numérica a temperatura varia de 46°C até 44°C, e depois volta a subir, destacando-se a grande capacidade do código RELAP5/MOD3.3 na simulação do regime monofásico, além de apresentar um ótimo resultado em comparação à simulação experimental, havendo uma diferença no final de aproximadamente 6% (~ 5°C).

Figura 26 – Evolução numérica/experimental das temperaturas em regime monofásico para o termopar T12 acima da região do aquecedor



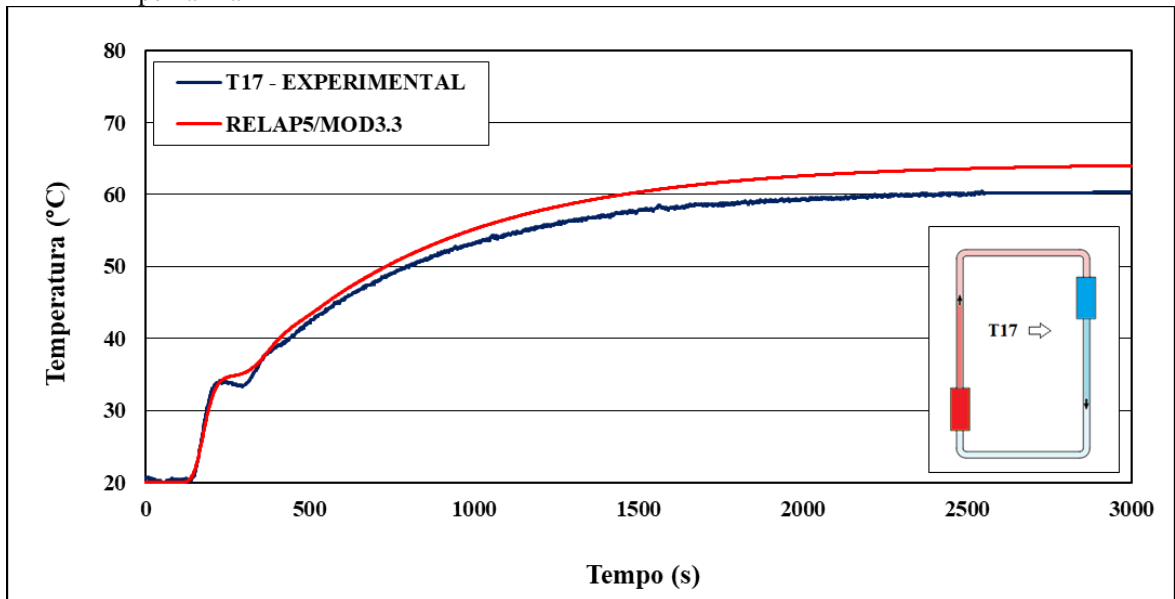
Fonte: autor da dissertação.

Na vista expandida da Figura 26 é ressaltada a instabilidade inicial das temperaturas característica do sistema de circulação natural, também visto no trabalho de SABUNDJIAN et al. (2010), sendo ilustrada tanto pelos dados experimentais quanto numéricos em todos os pontos de medição de temperatura. Como as resistências elétricas fornecem uma potência aproximadamente constante, a temperatura da superfície do aquecedor atinge o ponto de fluxo crítico de calor da água, havendo ebulição localizada e, assim, criando instabilidade em todo sistema, pois conforme a água na região do aquecedor diminui de densidade, gera uma pequena vazão no circuito primário, trazendo à região do aquecedor água com uma temperatura inferior, correspondente à temperatura da perna fria.

Também se nota que a linha do gráfico referente à simulação numérica é contínua e o correspondente a simulação experimental apresenta instabilidade, algo normal tratando-se da instrumentação utilizada e da dinâmica do fluido. Como o CCN possui aterramento elétrico, a captação do sinal possui uma boa precisão, como já discutido por SILVA FILHO e SABUNDJIAN (2009).

Na Figura 27 o comportamento do termopar T17 que se encontra na região da perna fria logo após a saída do trocador de calor é apresentado, mostrando que as simulações experimental e numérica têm boa concordância, com uma variação final de aproximadamente 6% ($\sim 4^{\circ}\text{C}$).

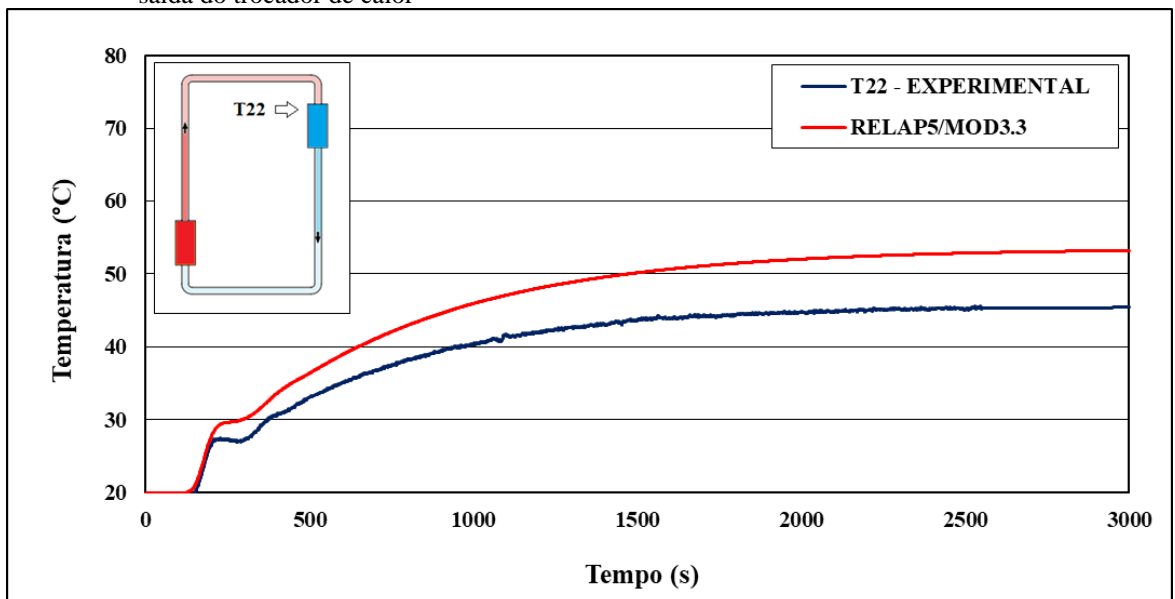
Figura 27 – Evolução numérica/experimental das temperaturas em regime monofásico para o termopar T17 na perna fria



Fonte: autor da dissertação.

Na Figura 28 é apresentada a evolução das temperaturas numérica/experimental, no termopar T22 localizado na saída do lado secundário do trocador de calor, observando-se o comportamento oscilatório inicial, e no final apresentando uma diferença de 15% (~ 8°C).

Figura 28 – Evolução numérica/experimental das temperaturas em regime monofásico para o termopar T22 na saída do trocador de calor



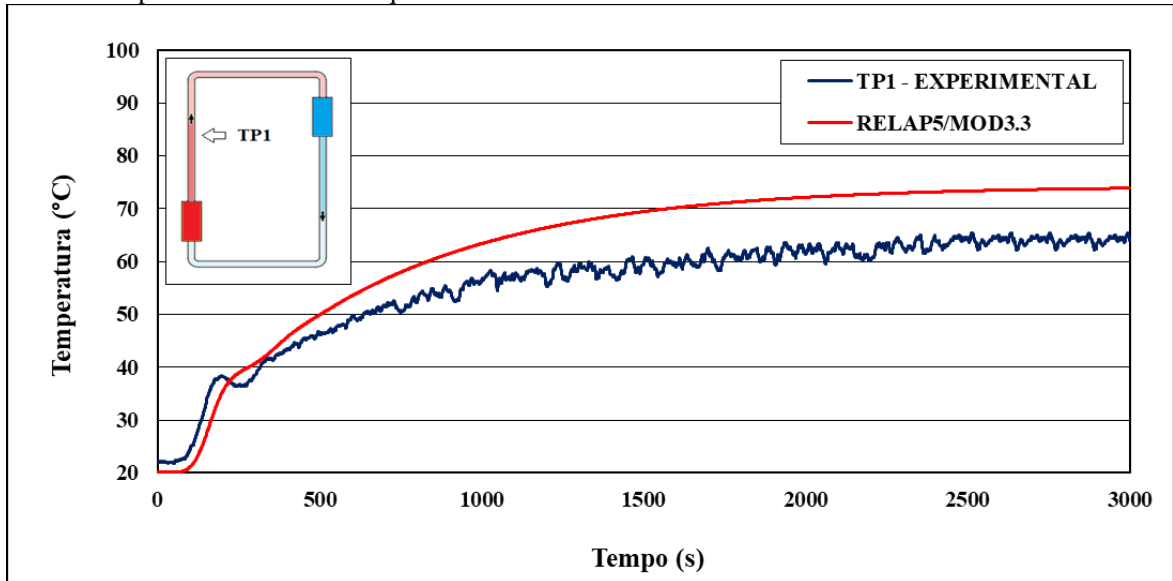
Fonte: autor da dissertação.

A similaridade das diferenças dos valores experimentais e numéricos referentes aos termopares na saída do aquecedor (T12) e na seção da perna fria logo após o trocador de calor (T17), em torno de 6%, indica que modelagem numérica do CCN está condizente com a realidade física do fenômeno de circulação natural. Porém a análise do comportamento da temperatura na saída do trocador de calor (T22) indica a necessidade de um olhar mais acurado na modelagem do trocador de calor especificamente, pois o valor experimental chega em 45°C ao final da simulação, enquanto o RELAP5/MOD3.3 finaliza em 53°C, uma diferença de cerca de 15%, mesmo que inicialmente os valores sejam praticamente iguais. A abordagem utilizada para a representação do trocador de calor no RELAP5 foi a de um PIPE dentro de outro PIPE, desta forma, fica claro que a eficiência dessa geometria na troca de calor não alcança os valores reais da disposição helicoidal que o trocador de calor do CCN possui.

O termopar de parede TP1 que se encontra ao lado externo da perna quente representado na Figura 29, apresenta uma discordância dos dados experimentais e numéricos, com uma variação final em torno de 13% (~ 9°C). Nota-se que até aproximadamente 300 segundos, o resultado experimental apresenta continuidade, e a partir de então uma instabilidade térmica que não é captada pelo RELAP5/MOD3.3. Mesmo que na modelagem da estrutura de calor seja considerada a temperatura inicial de 22°C (conforme valor experimental inicial), o RELAP5/MOD3.3 inicia a simulação numérica com a temperatura de 20°C neste ponto da superfície da estrutura de calor, que é a mesma da temperatura da água dentro do volume hidrodinâmico, acarretando assim na divergência inicial dos resultados.

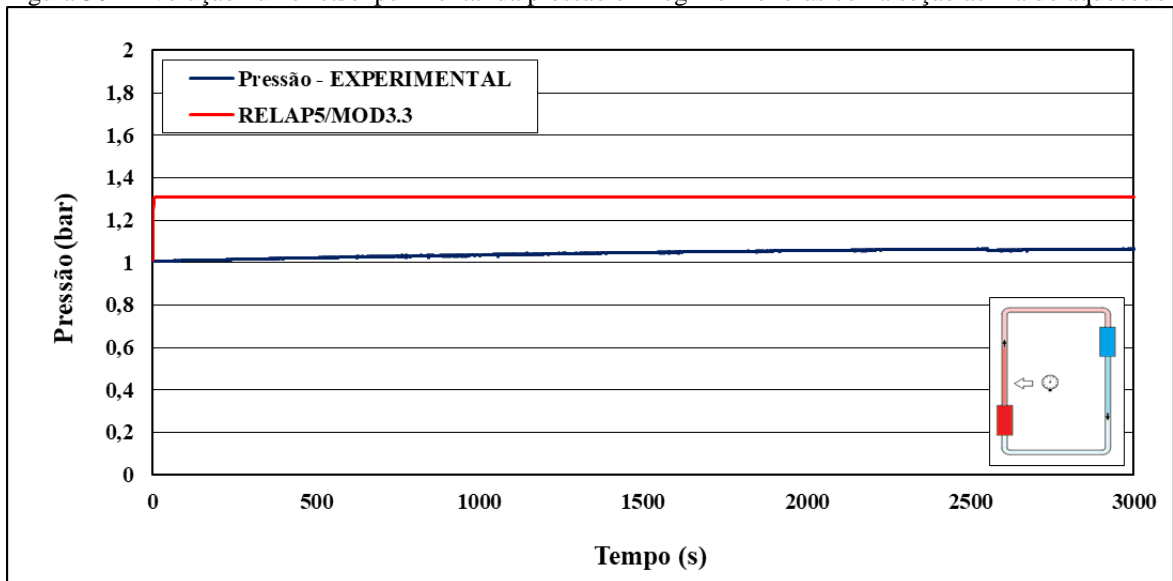
Na Figura 30 é possível visualizar a evolução temporal da pressão no circuito primário para os resultados experimentais e numéricos que apresentam boa concordância e diferença de aproximadamente 19% (~ 0,25 bar) em 3.000 segundos, em que a simulação numérica do RELAP5 converge rapidamente em torno de 1,3 bar e assim permanece.

Figura 29 – Evolução numérica/experimental das temperaturas em regime monofásico para o termopar de parede TP1 acima do aquecedor



Fonte: autor da dissertação.

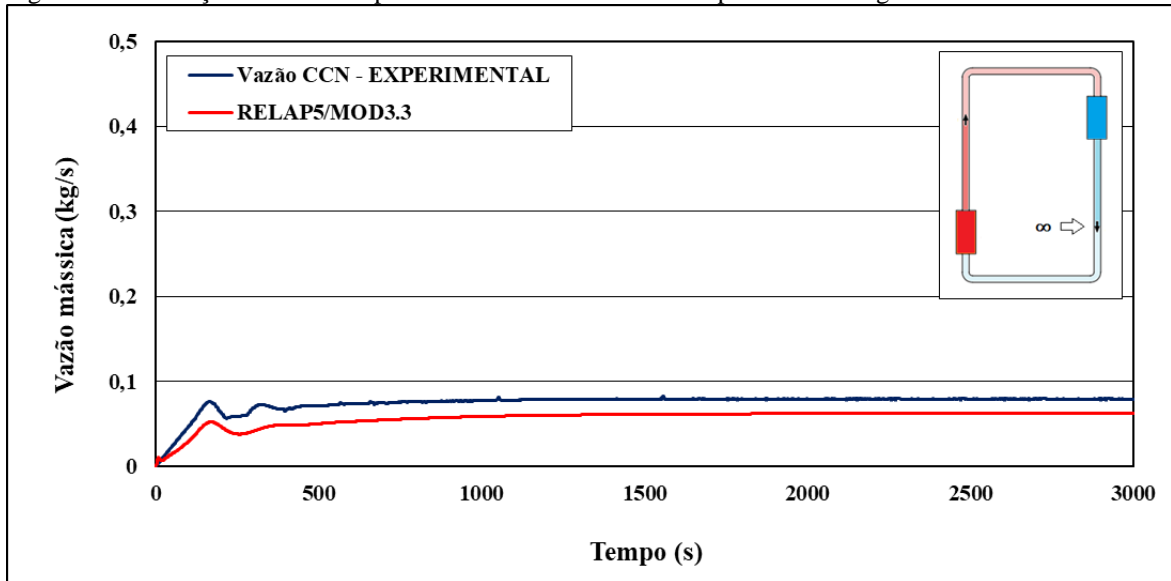
Figura 30 – Evolução numérica/experimental da pressão em regime monofásico na seção acima do aquecedor



Fonte: autor da dissertação.

Na saída do trocador de calor, Figura 31, é possível visualizar a capacidade do código em reproduzir a instabilidade inicial na vazão mássica devido ao início da ebulição localizada no fluido, apresentando comportamentos similares entre os dados experimentais e numéricos, contudo desta vez, os valores experimentais superam os numéricos em torno de 20% ($\sim 0,016$ kg/s).

Figura 31 – Evolução numérica/experimental da vazão no circuito primário em regime monofásico



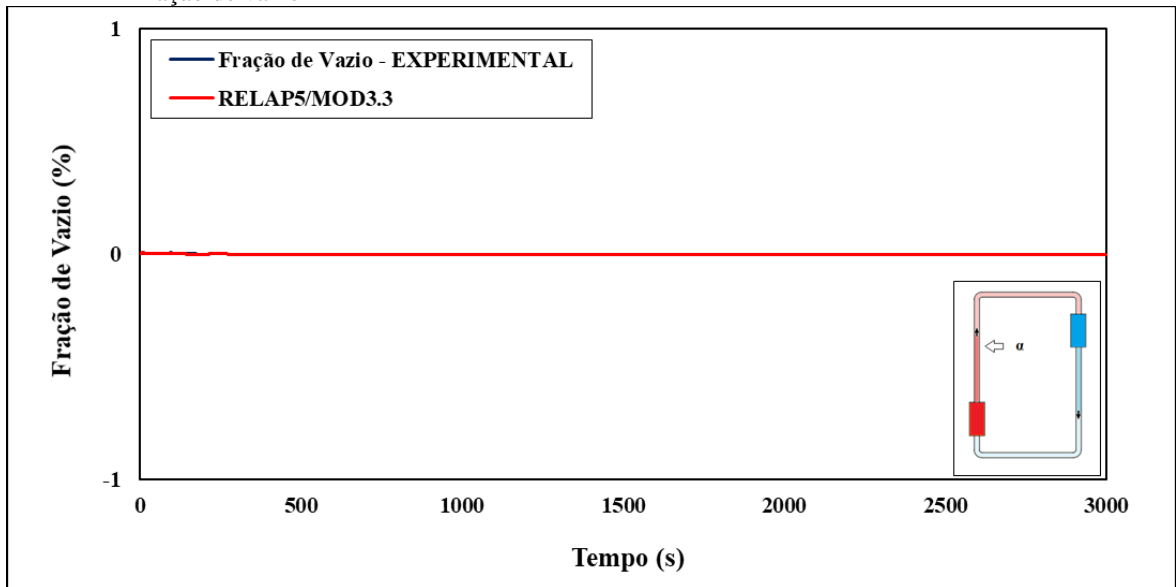
Fonte: autor da dissertação.

A precisão do RELAP5/MOD3.3 é notável quando o mesmo é utilizado na simulação de reatores nucleares que alcançam 150 bar de pressão e vazões mássicas em torno de toneladas por segundo.

É visível que após 2.500 segundos, a circulação natural alcança o regime permanente, em que o balanço térmico é atingido devido à proporcionalidade da vazão do trocador de calor (retirada de calor) e a potência do aquecedor (incremento de calor), em que ambos se encontram em valores constantes durante toda a simulação experimental e numérica.

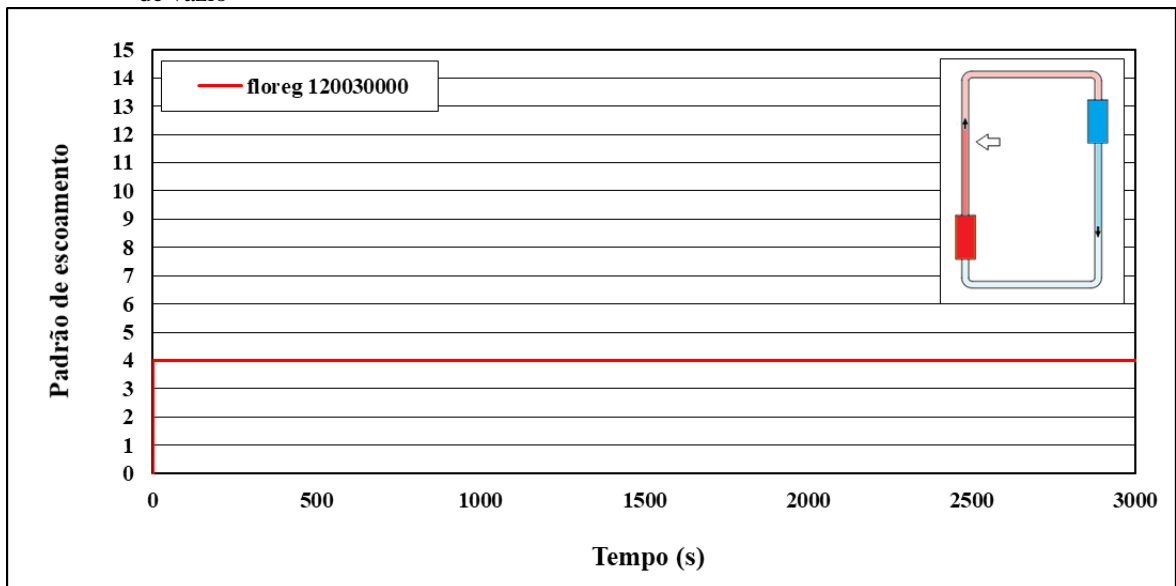
Na região da perna quente onde está localizado o sensor de fração de vazio foi identificado a permanência do regime monofásico durante toda a simulação experimental e numérica, Figura 32, contudo o RELAP5/MOD3.3, de acordo com a Figura 33 apresenta o padrão de escoamento número quatro, que de acordo com a Tabela 3, se trata de uma região de bolhas (Pré-CHF) no volume 12003000.

Figura 32 – Evolução numérica/experimental da fração de vazio em regime monofásico na seção do sensor de fração de vazio



Fonte: autor da dissertação.

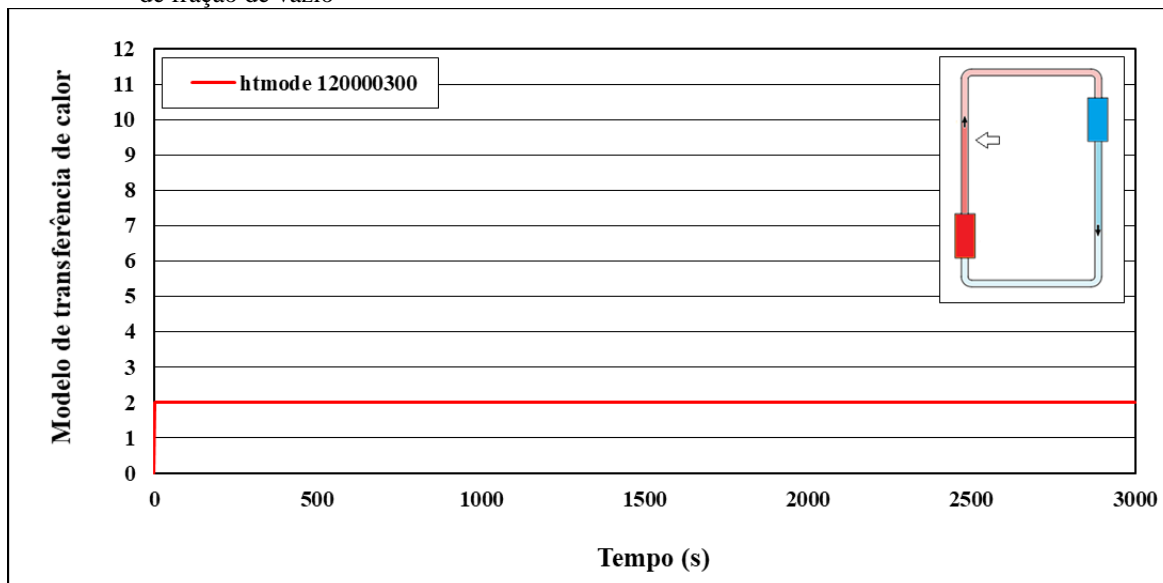
Figura 33 – Evolução numérica do padrão de escoamento em regime monofásico na seção do sensor de fração de vazio



Fonte: autor da dissertação.

Conforme é possível visualizar na Figura 34, durante toda a simulação numérica o RELAP5/MOD3.3 utiliza a correlação número 2 no local onde se encontra o sensor de fração de vazio, correspondente ao regime monofásico líquido ou com parede sub-resfriada, com fração de vazio menor que 0,1, conforme Tabela 4.

Figura 34 – Evolução numérica do modelo de transferência de calor em regime monofásico na seção do sensor de fração de vazio



Fonte: autor da dissertação.

É notável que apesar do RELAP5/MOD3.3 ter uma filosofia *best estimate*, ou seja, busque representar o mais próximo da realidade os fenômenos físicos, os gráficos demonstram um estado conservativo dos resultados para o regime monofásico, pois os resultados da simulação numérica se apresentam superiores aos experimentais, com exceção da vazão, em que o valor experimental se encontra abaixo dos valores numéricos. Neste caso em específico, isso ocorre devido à limitação operacional do sensor, que possui dificuldades na precisão para valores baixos de vazão. Como o método numérico do RELAP5 é o de diferenças finitas, ao realizar a discretização das equações que governam a fenomenologia, as variáveis de interesse são calculadas como médias para cada volume de controle, criando uma tendência conservativa para os resultados. Outro aspecto a ser considerado, é que devido à concepção utilizada na modelagem do trocador de calor no RELAP5, uma parcela do erro entre os valores experimentais e numéricos para as temperaturas no circuito primário é causada pela menor eficiência da retirada de calor quando comparada à eficiência real do trocador de calor helicoidal instalado no CCN.

4.2 Regime bifásico

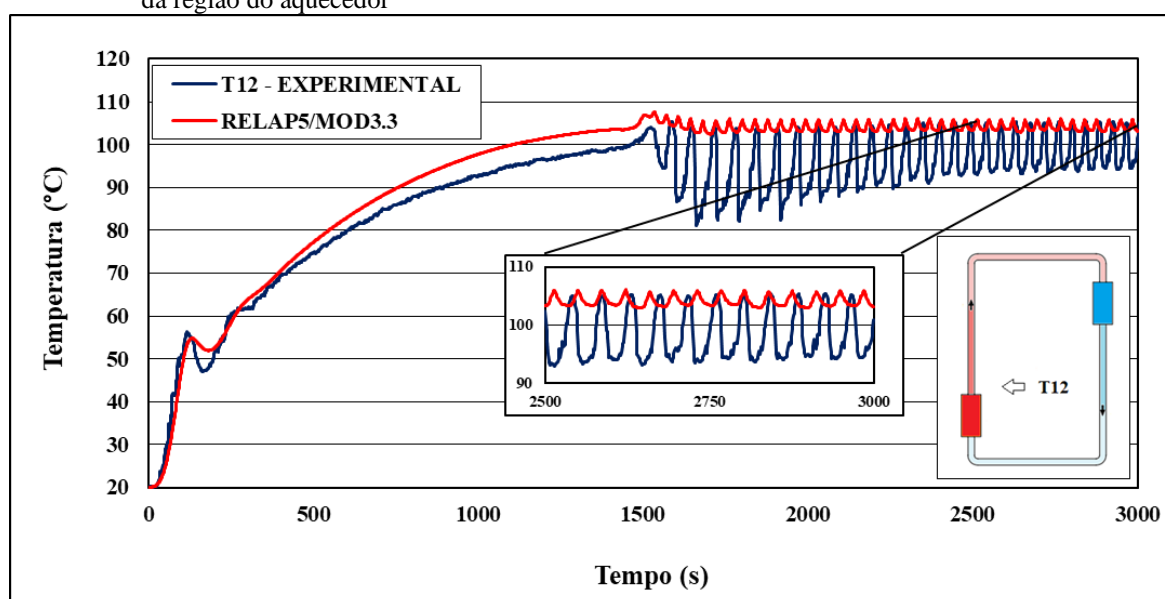
O *input* para a simulação numérica é o mesmo para ambos os casos, monofásico e bifásico, sendo alterada somente a potência de aquecimento, que para a simulação em regime bifásico a potência fornecida foi de 7.500 W, sendo que, a vazão de resfriamento (secundário) foi de 0,0278 kg/s (100 L/h).

A diferença do comportamento experimental do CCN com a modernização se torna mais evidente para o regime bifásico, pois anteriormente, conforme os valores do trabalho de SABUNDJIAN et al. (2010) com as mesmas condições operacionais o circuito entrava em regime bifásico mais rapidamente.

Apesar do código RELAP5 possuir dificuldades na simulação da circulação natural em regime bifásico, os resultados da simulação numérica por meio do RELAP5/MOD3.3 se apresentaram coerentes com o comportamento dos novos resultados experimentais. Em regime bifásico, os resultados da simulação numérica superaram os valores experimentais para as temperaturas, reforçando a tendência conservativa do RELAP5/MOD3.3 devido ao método numérico utilizado. Contudo, como em regime monofásico, existe uma discrepância maior na comparação dos valores numéricos e experimentais em alguns casos, como a pressão, também verificado em SABUNDJIAN et al. (2010).

De modo similar ao experimento de regime puramente monofásico, antes de alcançar o regime bifásico, o escoamento também apresenta a instabilidade inicial, contudo com passar do tempo, dadas as condições operacionais do CCN, o fluido em estado líquido ao ser aquecido com maior potência alcança a temperatura de saturação para a correspondente pressão, nesse momento o regime passa de monofásico para bifásico, em que é possível visualizar na Figura 35 a oscilação característica de tal fenômeno.

Figura 35 – Evolução numérica/experimental das temperaturas em regime bifásico para o termopar T12 acima da região do aquecedor



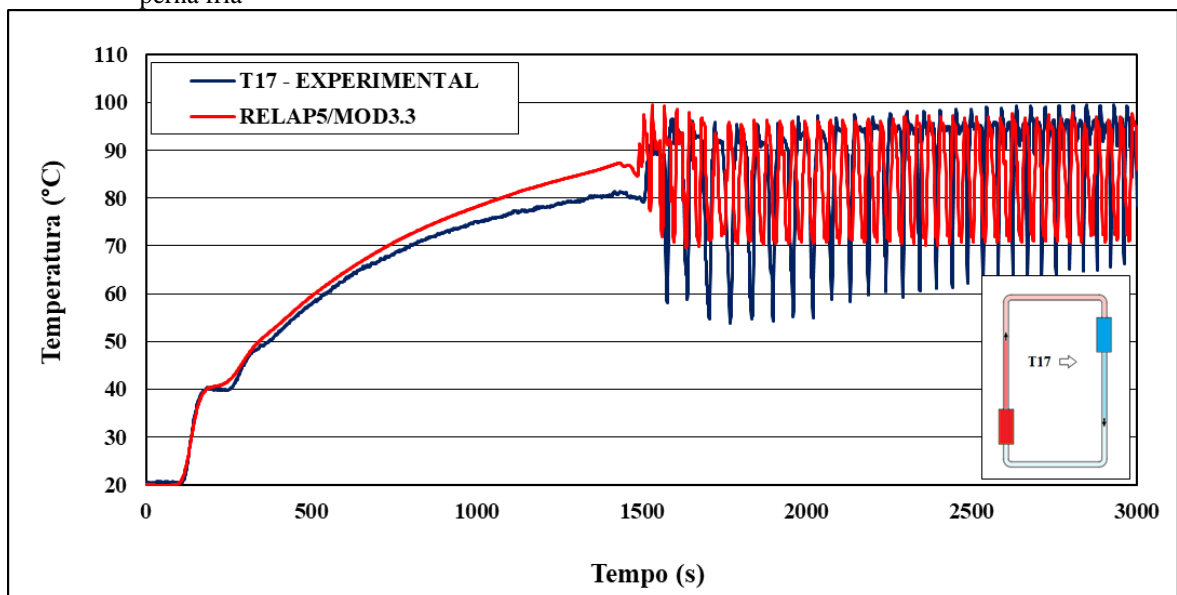
Fonte: autor da dissertação.

Na Figura 35, referente ao termopar T12 na saída do aquecedor, é possível visualizar como a simulação numérica e experimental convergem rapidamente em torno de 55 °C, onde posteriormente a simulação numérica e experimental entram em regime bifásico por volta de 1.500 segundos, em que ambas apresentam a oscilação característica do escoamento bifásico, evidenciando a capacidade do código RELAP5/MOD3.3 em demonstrar o momento exato em que há mudança de fases.

Enquanto a amplitude da oscilação é de cerca de 20°C e sua periodicidade se encontra em torno de 50 segundos para a simulação experimental, na simulação numérica a oscilação é de apenas 3°C e a periodicidade de 16 segundos, ficando praticamente constante em torno desses valores. Estabelecido o balanço térmico, a amplitude das oscilações se torna constante em torno de 10°C a partir dos 2.500 segundos para a simulação experimental, e periodicidade de 25 segundos. Apesar da periodicidade e amplitude divergirem para os resultados experimentais e numéricos, na vista expandida pode-se ver que em ambos os casos a temperatura não ultrapassa 105°C.

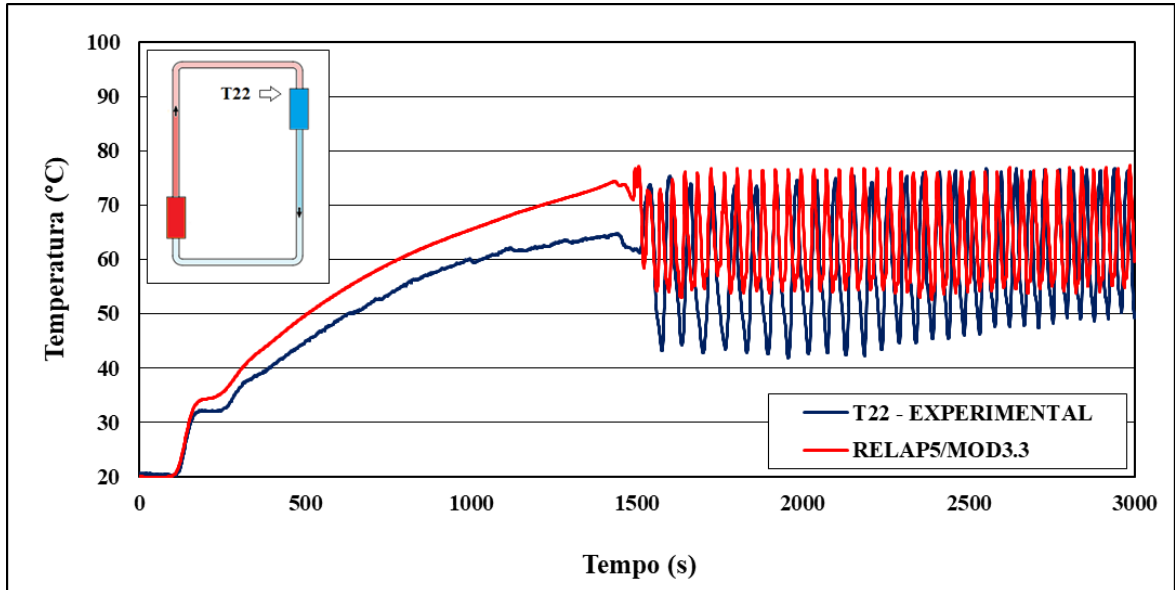
Nas Figuras 36 e 37 são ilustradas as evoluções das temperaturas no termopar T17 localizado na perna fria logo após a saída do trocador de calor no primário e o termopar T22 na saída do trocador de calor no lado secundário, respectivamente. Ambos os resultados apresentam a oscilação característica do regime bifásico, com a simulação numérica alcançando aproximadamente o valor máximo das amplitudes dos resultados experimentais, apesar de não representar o comportamento total do fenômeno.

Figura 36 – Evolução numérica/experimental das temperaturas em regime bifásico para o termopar T17 na perna fria



Fonte: autor da dissertação.

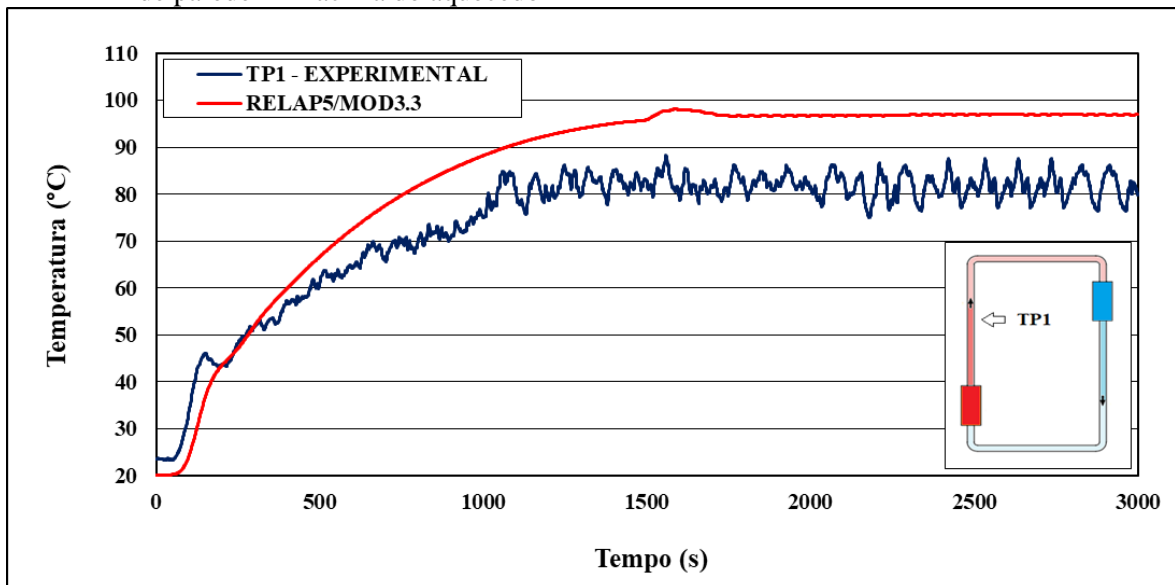
Figura 37 – Evolução numérica/experimental das temperaturas em regime bifásico para o termopar T22 na saída do trocador de calor



Fonte: autor da dissertação.

Na Figura 38 é apresentado o comportamento da temperatura relativa à parede externa da perna quente, para o termopar TP1, em que a simulação numérica não apresenta em totalidade a oscilação característica do regime bifásico.

Figura 38 – Evolução numérica/experimental das temperaturas em regime bifásico para o termopar de parede TP1 acima do aquecedor

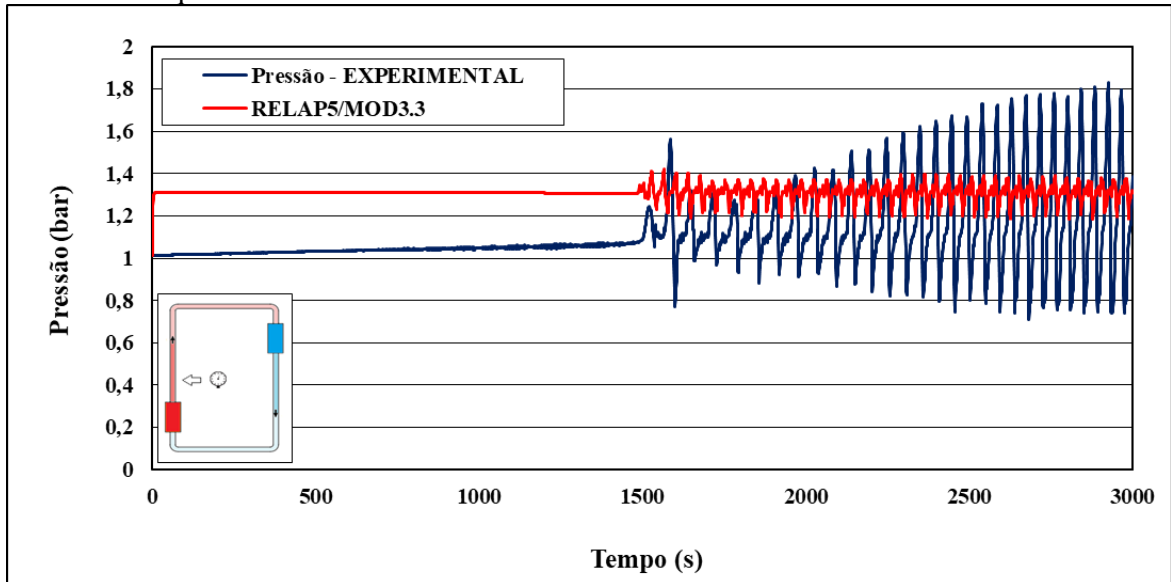


Fonte: autor da dissertação.

Na Figura 39 verifica-se que há uma maior discrepância entre as simulações experimental e numérica, ou seja, para a medida experimental da pressão o seu valor

ultrapassa o patamar de 1,8 bar, enquanto que na simulação numérica a variação é um pouco acima de 1,4 bar.

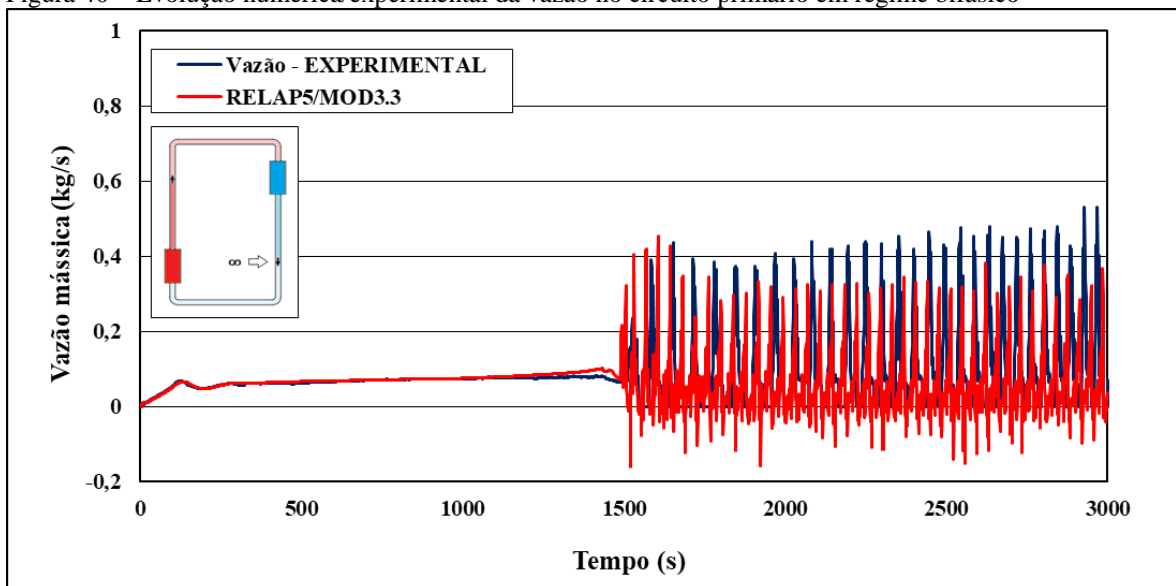
Figura 39 – Evolução numérica/experimental da pressão em regime bifásico na seção acima do aquecedor



Fonte: autor da dissertação.

Como é possível visualizar na Figura 40, a vazão fica praticamente constante até crescer vertiginosamente devido ao o fluido alcançar sua temperatura de saturação e o circuito entrar em regime bifásico.

Figura 40 – Evolução numérica/experimental da vazão no circuito primário em regime bifásico



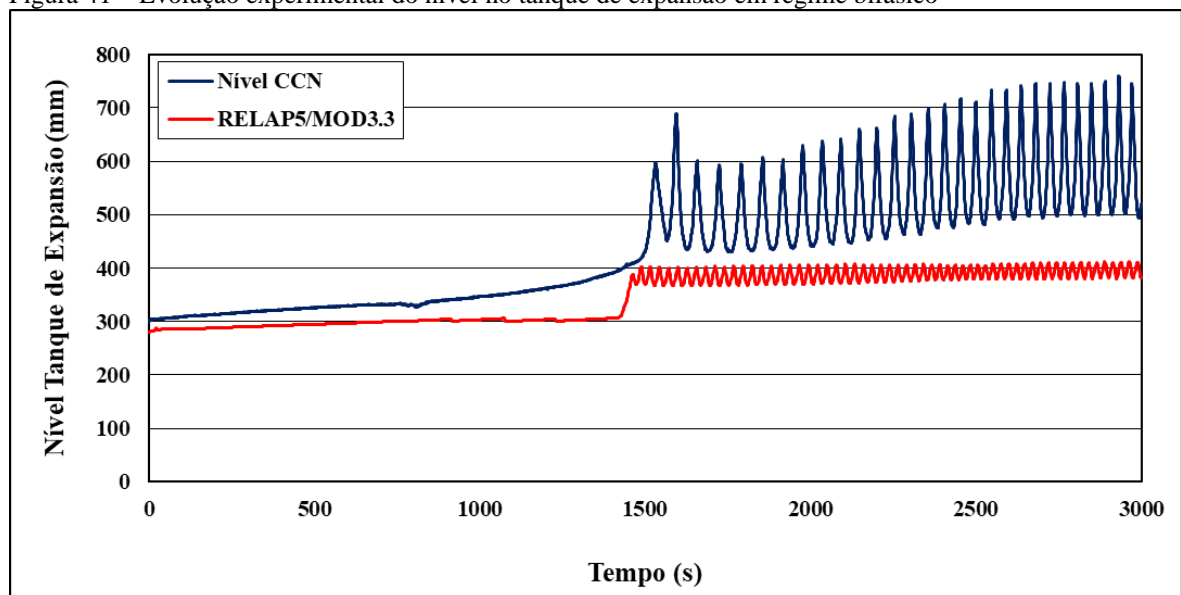
Fonte: autor da dissertação.

Na Figura 40 o comportamento visto é o esperado para a circulação natural em regime bifásico, em que a vazão do fluido aumenta com o aumento da potência fornecida pelo aquecedor. A vazão na simulação numérica adquire valores negativos, enquanto no experimental não são inferiores a zero, apesar de ser constatada a ocorrência física de um fluxo reverso em um dado momento da circulação natural em que, devido à sua funcionalidade, o medidor de vazão não capta essa vazão negativa.

O fluxo reverso ocorre após um período da circulação natural, ou seja, com o aumento da temperatura do fluido na região do aquecedor e a respectiva diminuição da temperatura do fluido após passar o trocador de calor, a vazão aumenta até o momento que o fluido resfriado alcança novamente à região do aquecedor, neste momento a pressão e a vazão do sistema diminuem, onde o vapor que havia empurrado proporcionalmente o volume de água ao tanque de expansão, de forma reversa traz o fluido novamente ao circuito primário.

Na Figura 41 é possível visualizar o comportamento do nível no tanque de expansão e em aproximadamente 1.600 segundos, o momento onde ocorre o aumento de pressão do sistema (vide Figura 39) e aumento do nível. Posteriormente a pressão diminui, ocasionando o fluxo reverso no circuito primário. A simulação numérica não captou em completude a variação no nível do tanque de expansão.

Figura 41 – Evolução experimental do nível no tanque de expansão em regime bifásico

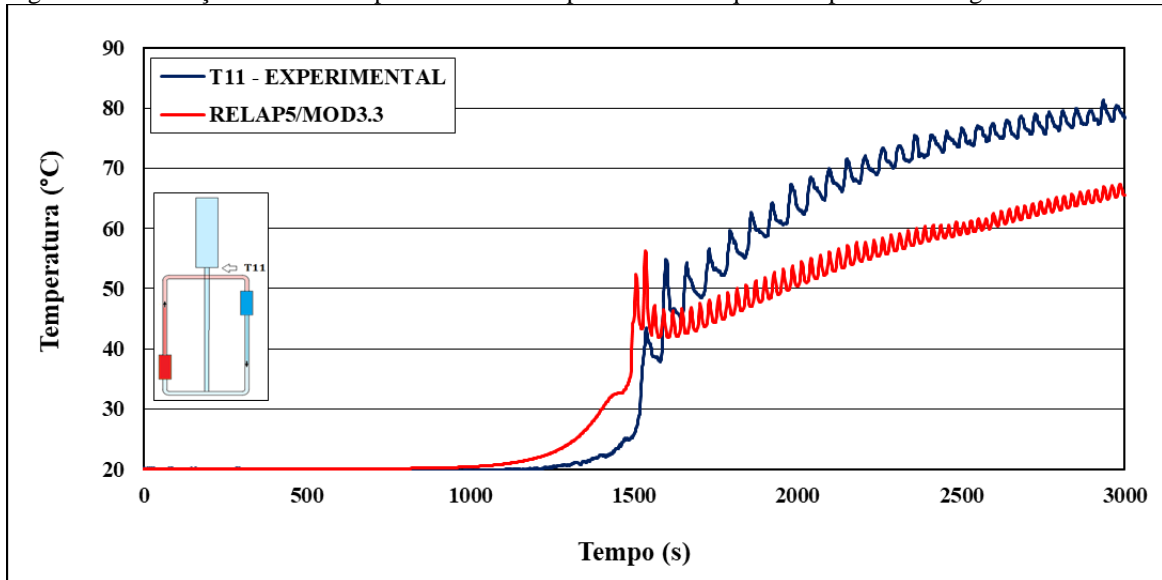


Fonte: autor da dissertação.

Na Figura 42 é apresentado o comportamento da temperatura no termopar T11 na base do tanque de expansão em que as simulações numérica e experimental mudam de

fase em torno de 1.500 segundos, porém a taxa no aumento da temperatura para a simulação numérica é menor do que a experimental, necessitando de uma maior verificação nos modelos existentes no RELAP5.

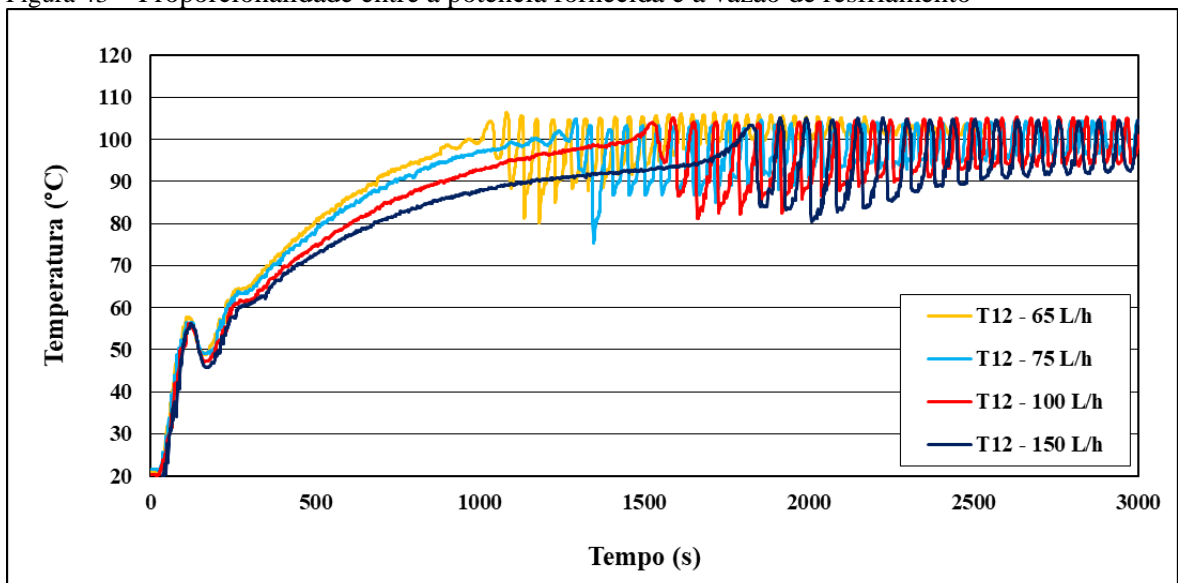
Figura 42 – Evolução numérica/experimental da temperatura no tanque de expansão em regime bifásico



Fonte: autor da dissertação.

A proporcionalidade entre a vazão de resfriamento e a potência fornecida pode ser vista na evolução das temperaturas na seção acima do aquecedor, Figura 43, em que quatro experimentos foram realizados na mesma potência de 7.500W, mas variando a vazão de resfriamento (secundário) em 65 L/h, 75 L/h, 100 L/h e 150 L/h, respectivamente, em que o regime entra em bifásico mais rapidamente quanto menor for a vazão de resfriamento.

Figura 43 – Proporcionalidade entre a potência fornecida e a vazão de resfriamento



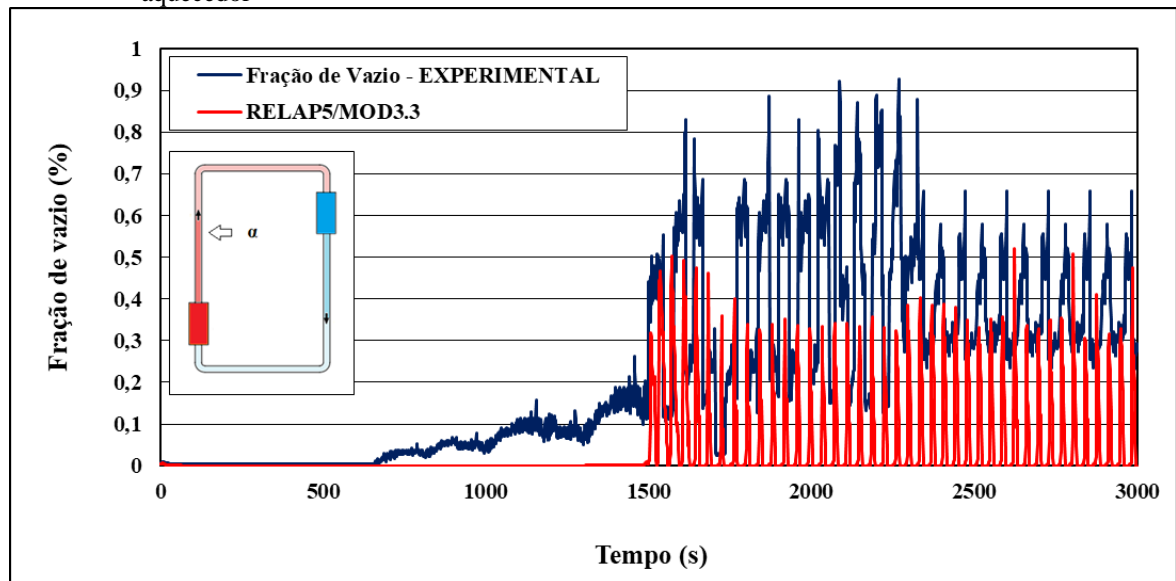
Fonte: autor da dissertação.

Na Figura 44 é possível visualizar o comportamento experimental e numérico da fração de vazio, que deixa de ser nula após os 1.500 segundos na simulação numérica, enquanto na experimental o sensor capta mudança de fase em torno de 650 segundos, quando o regime deixa ser monofásico para se tornar bifásico.

Apesar da não similaridade da fração de vazio entre os resultados numéricos e experimentais e a presença de ruído no sinal do sensor, sendo necessárias novas melhorias, durante a simulação experimental foi constatado visualmente o escoamento de pequenas bolhas (névoa) após os 650 segundos, enquanto o RELAP5 só apresenta valores significativos de fração de vazio em torno dos 1.500 segundos.

Outra divergência é o erro inerente na aquisição experimental dos valores da fração de vazio, que se encontram em torno de 20%, contudo o sensor apresenta resposta de acordo com outras variáveis, como a temperatura e a vazão, pois quando a vazão aumenta vertiginosamente, a fração de vazio também cresce devido à instabilidade do sistema.

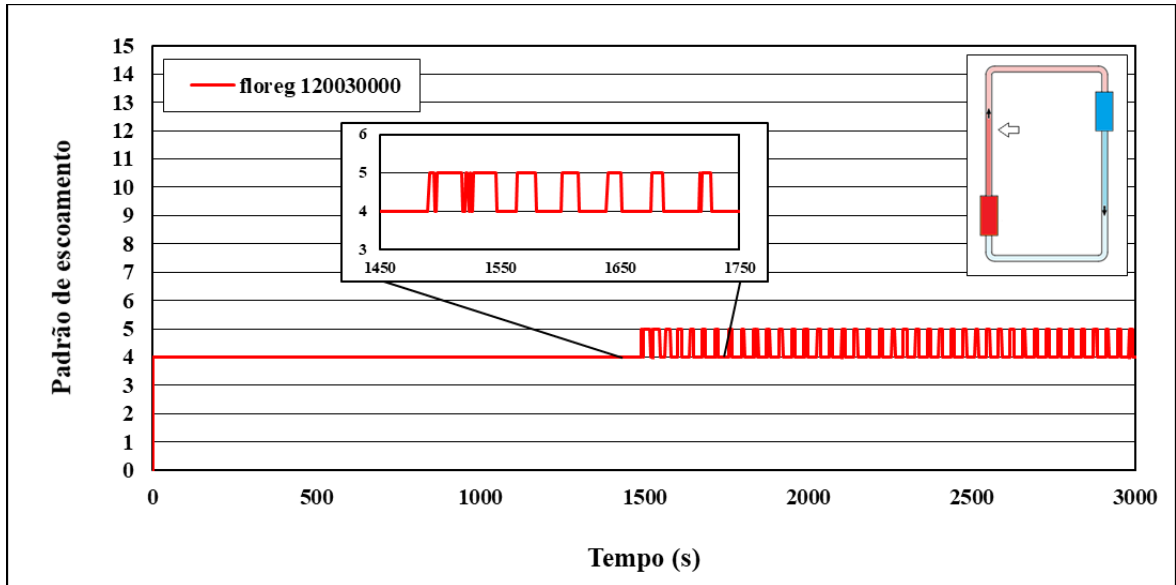
Figura 44 – Evolução numérica/experimental da fração de vazio em regime bifásico na seção acima do aquecedor



Fonte: autor da dissertação.

Os valores experimentais da fração de vazio no intervalo de 0% a 20% correspondem ao padrão de escoamento de bolhas, enquanto valores superiores em torno de 50-80% para golfadas, conforme os padrões de escoamento presentes no fenômeno de circulação natural em duas fases resultantes da simulação do RELAP5/MOD3.3, conforme Figura 45.

Figura 45 – Evolução numérica do padrão de escoamento em regime bifásico na seção do sensor de fração de vazio

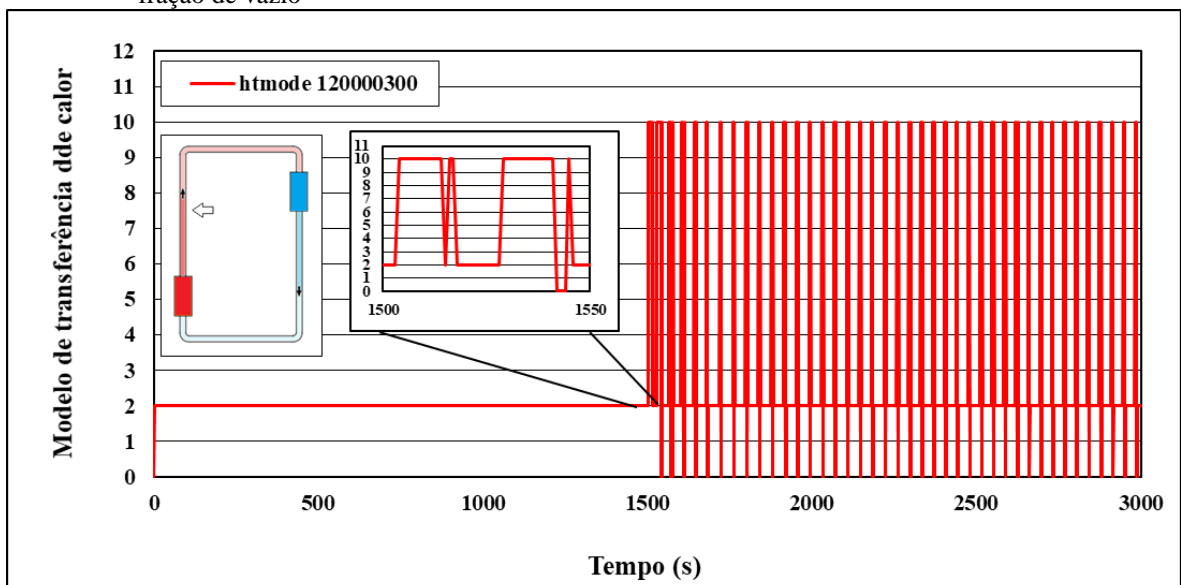


Fonte: autor da dissertação.

Conforme vista expandida na Figura 45, o padrão de escoamento de inicia com valor 4 como nas simulações em regime monofásico, que é correspondente ao padrão de escoamento de bolhas, passando para a intermitência de golfadas, correspondente ao valor 5.

Na Figura 46, o modelo de transferência de calor se inicia em 2, correspondente ao regime monofásico líquido, com fração de vazio menor que 0,1, exatamente como na simulação monofásica, posteriormente oscilando após os 1.500 segundos.

Figura 46 – Evolução numérica do modelo de transferência de calor em regime bifásico na seção do sensor de fração de vazio



Fonte: autor da dissertação.

Conforme verificado na vista expandida, ao ocorrer a oscilação característica do regime bifásico, o modelo de transferência de calor oscila de 2 (monofásico líquido) até o valor 10, correspondente à condensação em filme, e em alguns momentos a valor zero, referente à mistura vapor e água, ou seja, o fluido inicialmente se encontra em estado líquido (valor 2), com o aumento da temperatura o fluido se vaporiza e alcança o valor 10, ocorrendo a condensação em filme para depois retornar ao estado de mistura de vapor e água líquida (valor 0), exatamente como ocorre para os valores experimentais, evidenciando a capacidade do código RELAP5/MOD3.3 em prever a fenomenologia da circulação natural para os padrões de escoamento em regime monofásico e bifásico.

5 CONCLUSÕES

Com o banco de dados criado referente aos experimentos no circuito de circulação natural e as suas simulações numéricas por meio do RELAP5/MOD3.3, alguns trabalhos futuros poderão ser realizados tendo como base a presente pesquisa, desta forma, serão feitas algumas análises da capacidade numérica dos códigos computacionais e do sistema de aquisição experimental da fenomenologia de circulação natural em regimes monofásico e bifásico.

Considerando-se que o fenômeno da circulação natural em reatores nucleares é um campo promissor que só tende a crescer, uma vasta revisão da literatura foi realizada a fim de servir de base bibliográfica para outros trabalhos correlacionados ao tema, como também, todo aparato experimental na aquisição de dados foi descrito de forma detalhada.

O processo de modelagem dos dados de entrada de um circuito termo-hidráulico, como o CCN, por meio do código RELAP5/MOD3.3, que é amplamente utilizado no licenciamento de reatores no país, foi feito minuciosamente considerando-se as boas práticas de modelagem e simulação numérica, servindo também como apoio para futuros trabalhos.

É possível concluir que para os resultados das comparações experimentais e numéricas, observou-se uma boa precisão na simulação do fenômeno de circulação natural em regime monofásico, no entanto, como visto também na literatura, o código numérico possui maiores dificuldades em simular o comportamento da circulação natural em regime bifásico. O código é capaz de apresentar a oscilação característica do regime bifásico, porém não em completude, principalmente em relação a pressão.

O RELAP5/MOD3.3 se mostrou capaz de reproduzir os padrões de escoamento e os fenômenos de transferência de calor dos regimes monofásico e bifásico verificados nos experimentos, evidenciando que se trata de uma ferramenta poderosa na análise termo-hidráulica de sistemas de circulação natural.

O código como esperado, é altamente dependente da concepção do usuário em relação à modelagem do circuito, podendo variar conforme a nodalização adotada. Desta forma, deve-se ressaltar que o pré-processador FastLAP se mostrou uma importante ferramenta principalmente para os usuários que não estão familiarizados com o código RELAP5, que é um código complexo. Apesar de ser obrigatório por parte do usuário noções

tanto do código como de termo-hidráulica, o pré-processador guia o usuário na modelagem e torna o tempo de aprendizagem reduzido, quando comparado ao tempo de assimilação sem o seu uso. A modelagem do CCN com o pré-processador FastLAP se mostrou vantajosa devido aos seguintes aspectos: criação de componentes hidrodinâmicos e estruturas de troca de calor por meio de janelas com campos de preenchimentos padronizados de acordo com o manual do RELAP5/MOD3.3; evitando erros de digitação, o tipo de variável a ser inserida, a falta de *cards* obrigatórios, entre outros. A nodalização dos componentes é feita logo após a inserção dos referidos dados, facilitando, assim, a visualização da criação da modelagem como um todo.

Considerando-se os fatores descritos, o presente trabalho oferece uma base sólida para um maior aprofundamento no estudo da fenomenologia da circulação natural, como, também, em relação as simulações numéricas com o código RELAP5/MOD3.3.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Alguns pontos de melhoria foram notados durante a modelagem dos dados de entrada por meio do pré-processador FastLAP e que deverão ser tratados futuramente:

- a visualização da modelagem no pré-processador só permite a criação de componentes retilíneos (por exemplo, não aceita componente em formato de “L”);
- é necessário um remanejamento dos componentes gráficos por parte do usuário para estarem mais perto da realidade; uma vez criado os dados de entrada por meio das telas de interface, somente é possível fazer ajustes ou correções nos dados do *input* diretamente na aba RELAP5_*Input*; componentes como TMDPJUN, não estão totalmente configurados para serem inseridos, sendo necessário sua adição de forma manual.

Uma nova modelagem do trocador de calor do CCN com o RELAP5, deverá ser refeita a fim de reproduzir a fenomenologia de escoamento natural de forma mais realista.

Poderão ser utilizados outros códigos computacionais de termo-hidráulica com o intuito de simular o CCN e comparar os seus resultados numéricos com os experimentais, e como os do RELAP5, a fim de verificar qual destes programas representam melhor a fenomenologia de circulação natural.

O sensor de fração de vazio poderá ser melhorado a fim de se obter uma maior precisão para estudar mais a fundo os padrões de escoamento e modelos de transferência de calor presentes no RELAP5/MOD3.3.

O CCN deverá ser adaptado para o estudo do fluido em estado supercrítico e se deve verificar nesta nova configuração como o RELAP5/MOD3.3 reproduz os resultados experimentais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMED, N. M.; GAO, P.; BELLO, S. Natural circulation systems in nuclear reactors: advantages and challenges. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 467, n. 1, p. 12077, 1 mar. 2020.
- AKSAN, N. Overview on PANDA test facility and ISP-42 PANDA tests data base. Paul Scherrer Institute, Switzerland, 2005.
- ALSTAD, C. D.; ISBIN, H. S.; AMUNDSON, N. R.; SILVERS, J. P. Transient behavior of single-phase natural-circulation loop systems. *AIChE J.* 1 417-425, 1956.
- AMBROSINI, W.; FERRERI, J. C. The effect of truncation error on the numerical prediction of linear stability boundaries in a natural circulation single-phase loop. *Nuclear Engineering and Design*, v. 183, n. 1–2, p. 53–76, jul. 1998.
- BAJS, T.; DEBRECIN, N.; ŠEGON, V.; KHAN, L.; MAHMOOD, A. Assessment of Discretization Approach for RELAP5/MOD3 Computer Code. International Conference Nuclear Energy in Central Europe 2000 Golf Hotel, Bled, Slovenia, September 11-14, 2000.
- BELCHIOR JUNIOR, A.; BRUEL, R. N.; ANDRADE, D. A.; SABUNDJIAN, G.; MACEDO, L. A.; ANGELO, G.; TORRES, W. M.; UMBEHAUN, P. E.; CONTI, T. N. Development of a VBA Macro-Based Spreadsheet Application for RELAP5 Data Post-Processing. 2011 International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2011. Belo Horizonte, 2011.
- BRAZ FILHO, A. B.; SABUNDJIAN, G.; RIBEIRO, G. B.; CALDEIRA, A. D. Assessment of RELAP5 matrix solvers for a two-phase natural circulation loop. *Annals of Nuclear Energy*, v. 105, p. 249–258, jul. 2017.
- CUMMINS, W. E.; CORLETTI, M. M.; SCHULZ, T. L. Westinghouse AP1000 advanced passive plant. *Nuclear Engineering and Design*, v. 236, n. 14–16, p. 1547–1557, ago. 2003.
- DUFFEY, R. B.; SURSOCK, J. P. Natural circulation phenomena relevant to small breaks and transients. *Nuclear Engineering and Design*, v. 102, n. 2, p. 115–128, jun. 1987.
- DURGA PRASAD, G. V.; PANDEY, M.; KALRA, M. S. Review of research on flow instabilities in natural circulation boiling systems. *Progress in Nuclear Energy*, v. 49, n. 6, p. 429–451, ago. 2007.
- EL-WAKIL, M. M. *Nuclear Heat Transport*. International Textbook Company, New York, 1971.
- FLORA, B. F. *Projeto de sensor para indústria*. 1 ed. Curitiba: Appris, 2017.

GARTIA, M. R.; VIJAYAN, P. K.; PILKHWAL, D. S. A generalized flow correlation for two-phase natural circulation loops. *Nuclear Engineering and Design*, v. 236, n. 17, p. 1800–1809, set. 2006.

GESELLSCHAFT FÜR ANGALLEN-UND REAKTORSICHERHEIT (GRS). *ATHLET mod. 2.1 cycle A, models and methods*. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 2006.

IDAHO NATIONAL LABORATORY. The RELAP5 Development Team. *RELAP5/Mod3.3 Code Manual*. NUREG/CR-5535 Report/Rev P4 - vols. 1-8, Idaho National Engineering Laboratory, October, 2010.

IGAMI, M. P. Z. (Org.); VIEIRA, M. M. F. (Org.). Guia para a elaboração de dissertações e teses apresentadas no Programa de Pós-graduação do IPEN/USP. Coordenação de Mery P. Zamudio Igami e Martha Marques F. Vieira.-- 3. Ed. rev. ampl. Versão on-line -- São Paulo, 2017. Disponível em:
https://www.ipen.br/portal_por/conteudo/biblioteca/arquivos/GuiaIPEN_2017-10-24_versao_4.pdf. Acesso em: 08 mar. 2022.

INCROPERA, F. P. et al. *Fundamentos de transferência de calor e de massa*. Tradução e revisão técnica: Eduardo Mach Queiroz, Fernando Luiz Pellegrini Pessoa. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). Advances in small modular reactor technology developments 2018. Advanced Reactor Information System - ARIS, Vienna, 2018.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). Instrumentation and control systems for advanced small modular reactors. Vienna, 2017.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). Natural circulation in water-cooled nuclear power plants: phenomena, models, and methodology for system reliability assessments. IAEA-TECDOC-1474, Vienna, 2005.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). Natural circulation phenomena and modelling for advanced water cooled reactors. IAEA-TECDOC-1677, Vienna, 2012.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). Status of advanced light water cooled reactor designs. IAEA-TECDOC-1391, Vienna, 2004.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). Status report 77: system-integrated modular advanced reactor (SMART). Vienna, 2007.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). The safety of nuclear power: strategy for the future. Vienna, 1991.

ISHII, M.; CHAWLA, T. C. Local Drag Laws in Dispersed Two-Phase Flow. NUREG/CR 1230, ANL-79-105. Argonne National Laboratory. 1979.

ISHII, M.; JARLAIS, G. Inverted Annular Flow Modeling. Advanced Code Review Group Meeting, Idaho Falls, ID. July 27, 1982.

ISHII, M.; MISHIMA, K. Study of Two-Fluid Model and Interfacial Area. NUREG/CR-1873, ANL-80-111. Argonne National Laboratory. 1980.

KUZNETSOV, Y. U. N.; ROMENKOV, A. A.; ALEKSEEV, A. I.; LISITSA, F. D.; TOKAREV, Y. U. I.; YARMOLENKO, O. A. NPP with VK-300 boiling water reactor for power and district heating grids. Proceedings of International Seminar on Small and Medium Sized Reactors: Status and Prospects organized by IAEA, IAEA-SR-218/32, Cairo, Egypt, 27–31 May, 2001.

LABVIEW 7.0. LabView 7.0 Express, National Laboratory, USA, 2003.

MANGAL, A.; JAIN, V.; NAYAK, A. K. Capability of the RELAP5 code to simulate natural circulation behavior in test facilities. *Progress in Nuclear Energy*, v. 61, p. 1–16, nov. 2012.

MARTIN, P. R.; TAYLOR, B. K. Benchmarking assessment of RELAP5/MOD3 for the low flow and natural circulation experiment at the WSRC. Technical Report, Westinghouse Savannah River Co., Aiken, SC (United States), 1992.

MESINA, G. L. A History of RELAP Computer Codes. *Nuclear Science and Engineering*, v. 182, n. 1, p. v–ix, jan. 2016.

MICAELLY, J.; BESTUIB, D. CATHARE, the new improved french thermal hydraulic code for safety reactor studies. Int. ENS/ANS Conference on Thermal Reactor Safety, France, Avignon, 1988.

MISALE, M. Experimental study on the influence of power steps on the thermohydraulic behavior of a natural circulation loop. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 99, p. 782–791, ago. 2016.

MONACO, D. F. *FastLAP: desenvolvimento de um pré-processador gráfico visual para o código RELAP5*. 2019. Mestrado em Tecnologia Nuclear - Reatores – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85133/tde-05072019-144235/>. Acesso em: 29 jun. 2021.

MOUSAVIAN, S. K.; MISALE, M.; D'AURIA, F.; A. SALEHI, M. Transient and stability analysis in single-phase natural circulation. *Annals of Nuclear Energy*, v. 31, n. 10, p. 1177–1198, jul. 2004.

NASCIMENTO, J. C. S. *Modelagem numérica do escoamento multifásico transiente composicional em poços de petróleo usando modelo de dois fluidos*. 2017. 164p. Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo. Natal, RN, 2017.

PALADINO BIATY, P. A. *Pré-processador matemático para o código Relap5 utilizando o Microsoft Excel*. 2006. Mestrado em Tecnologia Nuclear - Reatores – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85133/tde-14052007-141446/>. Acesso em: 29 jun. 2021.

PETRUZZI, A.; D'AURIA, F. Thermal-Hydraulic System Codes in Nuclear Reactor Safety and Qualification Procedures. *Science and Technology of Nuclear Installations*, v. 2008, p. 1–16, 2008.

PLANO NACIONAL DE ENERGIA 2050 (PNE-2050). Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2020.

REYES, J. N. Integral system experiment scaling methodology. International Atomic Energy Agency, Austria, 2004.

ROCHA, M. S. *Projeto, construção e análise de um sensor de impedância de múltiplos eletrodos para a medição da fração de vazio em sistemas bifásicos do tipo gás líquido*. 2005. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP, São Paulo.

RUSPINI, L. C.; MARCEL, C. P.; CLAUSSE, A. Two-phase flow instabilities: A review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 71, p. 521–548, abr. 2014.

SABUNDJIAN, G.; DE ANDRADE, D. A.; UMBEHAUN, P. E.; TORRES, W. M. Análise experimental do fenômeno de circulação natural. Proceedings of the 11th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering -- ENCIT 2006, Curitiba, Brazil, Dec. 5-8, 2006.

SABUNDJIAN, G.; CONTI, T. N.; TORRES, W. M.; MACEDO, L. A.; UMBEHAUN, P. E.; MESQUITA, R. N.; FILHO, M. F. S.; BRAZ, F. A. Análise Teórico/Experimental do Fenômeno de Circulação Natural. 2º Encontro Brasileiro sobre Ebulição, Condensação e Escoamentos Multifásicos, Brasil, São Carlos, 3-4 de Maio, 2010.

SABUNDJIAN, G.; JUNIOR, A. B.; MESQUITA, R. N.; MASOTTI, P. H. F.; TORRES, W. M.; MACEDO, L. A.; UMBEHAUN, P. E.; CONTI, T. N.; ANGELO, G. Flow regime identification in natural circulation phenomenon using RELAP5 code. 3rd Brazilian Conference on Boiling, Condensation and Multiphase flow Curitiba, Brazil, May 7-9, 2012.

SHARMA, M.; PILKHWAL, D. S.; VIJAYAN, P. K.; SAHA, D.; SINHA, R. K. Simulation of single phase instability behaviour in a rectangular natural circulation loop using RELAP5/MOD3.2 computer code. Bhabha Atomic Research Centre, Mumbai, India, 2002.

SHOHAM, O. *Mechanistic Modeling of Gas-Liquid Two-Phase Flow in Pipes*. [S.l.]: SPE, 2006.

SILVA FILHO, M. F.; SABUNDJIAN, G. Análise teórica/experimental do fenômeno de circulação natural. In: SEMINARIO ANUAL DO PROGRAMA INSTITUCIONAL DE

BOLSAS DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 15.; SEMINÁRIO ANUAL DO PROGRAMA DE BOLSAS E INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 6., 7-8 de outubro, 2009, São Paulo, SP. Resumo expandido. 2009. p. 149-150. Disponível em: <http://repositorio.ipen.br/handle/123456789/22756>. Acesso em: 27 nov. 2022.

SILVESTRE, L. J. B. *PCRELAP5 - Programa de cálculo para os dados de entrada do código RELAP5*. 2016. Mestrado em Tecnologia Nuclear - Reatores – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85133/tde-13052016-104652/>. Acesso em: 29 jun. 2021.

SPORE, J.W. et al. *TRAC-PF1/MOD2 code manual*. Volume 1, Theory Manual, NUREG/CR-5673, LA-12031-M, 1993.

TAITEL, Y.; DUKLER, A. E. A Model of Predicting Flow Regime Transitions in Horizontal and Near Horizontal Gas-Liquid Flow. *AIChE Journal*. 22. pp. 47-55. 1976.

TAITEL, Y.; BORNEA, D.; DUKLER, A. E. Modeling Flow Pattern Transitions for Steady Upward Gas-Liquid Flow in Vertical Tubes. *AIChE Journal*. 26. pp. 345-354. 1980.

VIJAYAN, P. K.; NAYAK, A. K. Experimental validation and data base of simple loop facilities. Bhabha Atomic Research Centre, India. Joint ICTP-IAEA Course on Natural Circulation Phenomena and Passive Safety Systems in Advanced Water Cooled Reactors, 2010.

VIJAYAN, P. K.; NAYAK, A. K. Natural circulation systems: advantages and challenges. Bhabha Atomic Research Centre, India, 2010a.

VIJAYAN, P. K.; NAYAK, A. K.; SAHA, D.; GARTIA, M. R. Effect of Loop Diameter on the Steady State and Stability Behaviour of Single-Phase and Two-Phase Natural Circulation Loops. *Science and Technology of Nuclear Installations*, v. 2008, p. 1-17, 2008.

VINHAS, P. A. M. *Simulação computacional de um circuito de circulação natural utilizando código RELAP5*. Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Nuclear, Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION (WNA). World Nuclear Performance Report 2021. Power Reactor Information System - PRIS. International Atomic Energy Agency - IAEA, Vienna, 2021.

ZVIRIN, Y. A review of natural circulation loops in pressurized water reactors and other systems. *Nuclear Engineering and Design*, v. 67, n. 2, p. 203-225, jan. 1982.

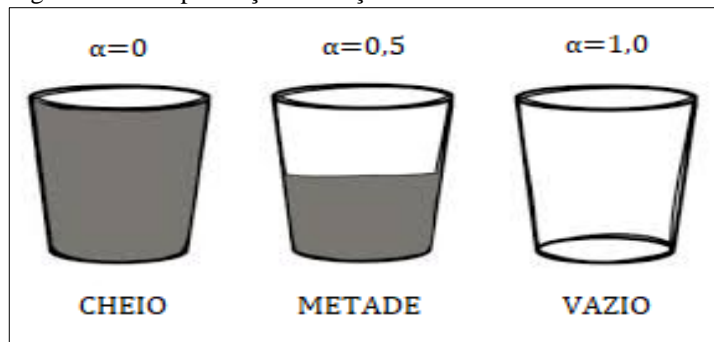
APÊNDICE A – Detalhes sobre a construção e instalação do sensor de fração de vazio no CCN

Sensor de fração de vazio

Na caracterização do escoamento de um fluido em duas fases, um dos parâmetros mais importantes é a fração de vazio, em que é definida como a concentração volumétrica da fase gás na mistura (α), ou seja, a razão entre o volume ocupado pelo gás (V_g) e o volume total da mistura (V_m), conforme Equação (10). Na Figura 47 é possível visualizar de maneira simplificada o que é a fração de vazio.

$$\alpha = \frac{V_g}{V_m} \quad (10)$$

Figura 47 – Simplificação da fração de vazio



Fonte: autor da dissertação.

Sabendo-se que a permissividade da água (ϵ_{rL}) é de 707 pF/m e do ar (ϵ_{rG}) de 8,85 pF/m, três critérios são analisados no cálculo da fração de vazio em sensores eletrônicos: sinal vazio (tubo preenchido totalmente com ar), sinal cheio (preenchido totalmente com água); e sensibilidade (Δ) (mostra a resposta do sensor na variação das fases, conforme Equações 11 e 12). Importante ressaltar que para um fluido monofásico o produto entre R (resistência) e C (capacitância) é uma constante que depende somente de ϵ (permissividade elétrica) e σ (condutividade elétrica), isto é:

$$R \cdot C = \frac{\epsilon}{\sigma} \quad (11)$$

$$\Delta = C_{\text{água}} - C_{\text{ar}} \quad (12)$$

Sabendo-se também que a relação entre a variação relativa da capacitância (C^*) e a fração de vazio (α) se dá pelas Equações 13 e 14.

$$\alpha = \frac{A_{ar}}{A_{total}} = \frac{D_{ar}^2}{D_{total}^2} \quad (13)$$

$$C^* = \frac{C - C_{ar}}{C_{cheio} - C_{ar}} \quad (14)$$

Conforme verificado na literatura os modelos algébricos disponíveis para escoamentos bifásicos, conforme Tabela 10, juntamente com a Equação 6, é possível criar um mapeamento entre a saída do instrumento, V^* , em função da fração de vazio, ou seja, conhecendo-se V^* é possível saber o valor da fração de vazio.

Tabela 8 – Expressões algébricas para resistência e capacitância relativas adimensionais, R^* e C^*

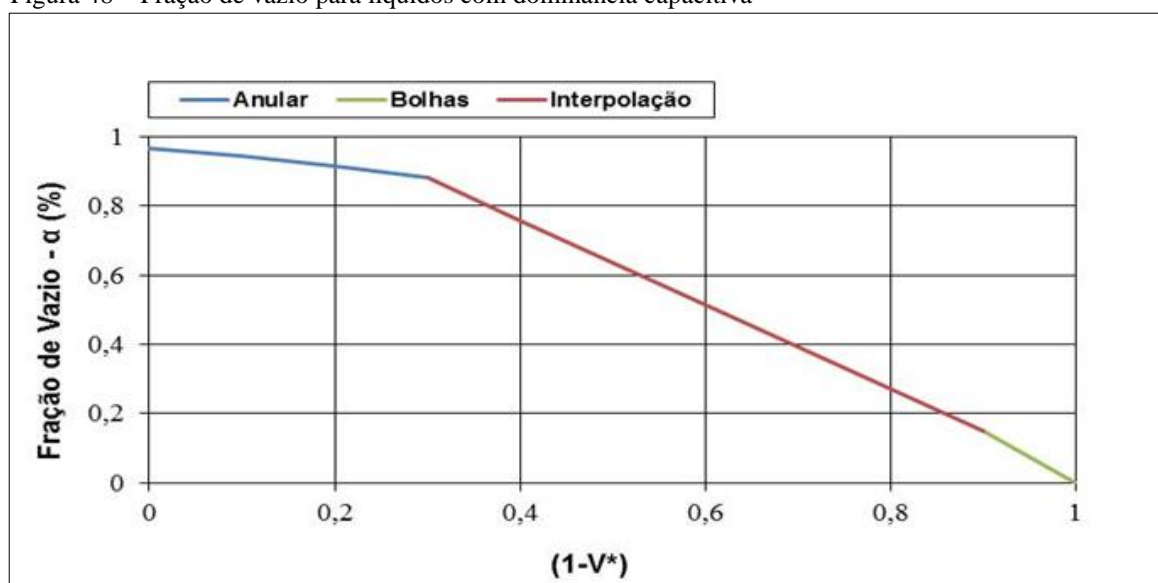
Padrão	R^*	C^*
Anular ($0,8 \leq \alpha \leq 1$)	$2,45(1 - \alpha)$	$3,8(1 - \alpha) - 8,1(1 - \alpha)^2$
Bolhas Dispersas ($0 \leq \alpha \leq 0,2$)	$1 - 1,5\alpha$	$(1 - \alpha) \cdot \left(\frac{3\varepsilon_{rL}}{\varepsilon_{rG} + \varepsilon_{rL}} \right)$

Fonte: FLORA (2017).

$$V^* = \frac{j\omega C R_c - j\omega C_{vazio} R_c}{j\omega C_{cheio} R_c - j\omega C_{vazio} R_c} \equiv \frac{C - C_{vazio}}{C_{cheio} - C_{vazio}} \equiv C^* \quad (15)$$

Com os dados descritos acima, foi criado, na Figura 48, um gráfico da fração de vazio em função de $(1-V^*)$, em que baixos valores de $(1-V^*)$ correspondem à ocorrência de bolhas (*bubble flow*), com $\alpha \leq 0,1$, e os altos valores correspondem a um padrão anular (*annular flow*), com $\alpha > 0,8$. Já no intervalo de $0,1 < \alpha \leq 0,8$ encontra-se o padrão intermitente de golfadas (*slugs*) desta forma, o modelo algébrico não corresponde a esse intervalo, sendo necessário fazer uma interpolação linear.

Figura 48 – Fração de vazio para líquidos com dominância capacitiva



Fonte: autor da dissertação.

A partir das análises realizadas, foi possível verificar que existe uma relação entre a variação da capacitância devido as alterações na fração de vazio e uma tensão que será lida pela instrumentação.

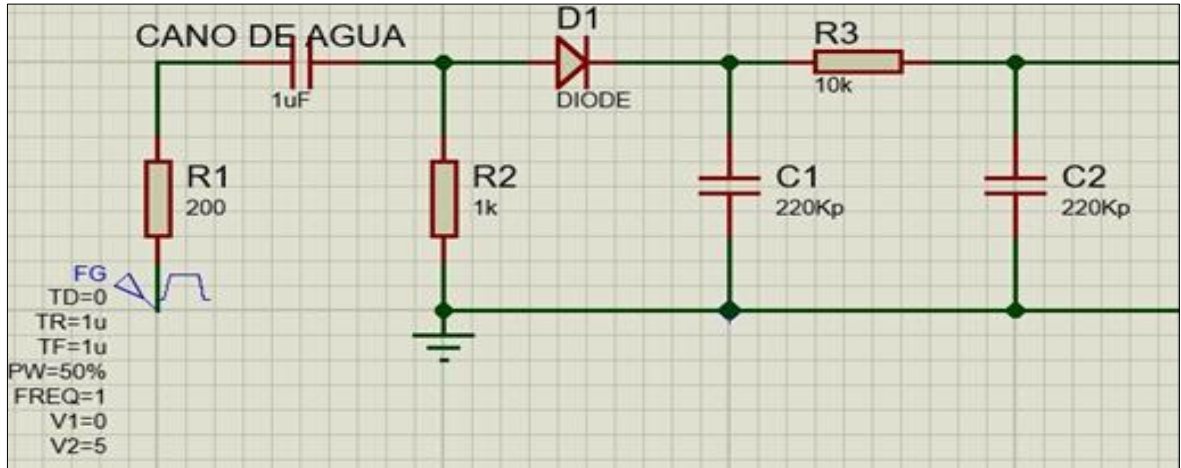
Simulação do circuito eletrônico pelo software Proteus

A criação do sensor de fração de vazio foi realizada se baseando na concepção do trabalho de ROCHA (2005), porém devido à evolução tecnológica na área da eletrônica, o circuito eletrônico foi adaptado visando uma maior simplicidade em sua construção e montagem. Durante as simulações experimentais realizadas, foi notado que quanto maior o número de componentes eletrônicos utilizados, maior o ruído gerado no sinal, afinal, a variação da capacitância durante a fenomenologia da fração de vazio é em torno de pF (10^{-12} F).

Várias configurações de eletrodos são possíveis, desde anéis, helicoidal e em placas, sendo escolhido o formato de placas. O material escolhido para os eletrodos foi o alumínio, mesmo possuindo uma condutividade elétrica menor que o cobre, pois devido à influência no aumento da temperatura durante a simulação experimental, o alumínio reagiu de maneira melhor que o cobre, por possui uma condutividade térmica menor que o cobre. As placas possuem a dimensão retangular de 13x5cm.

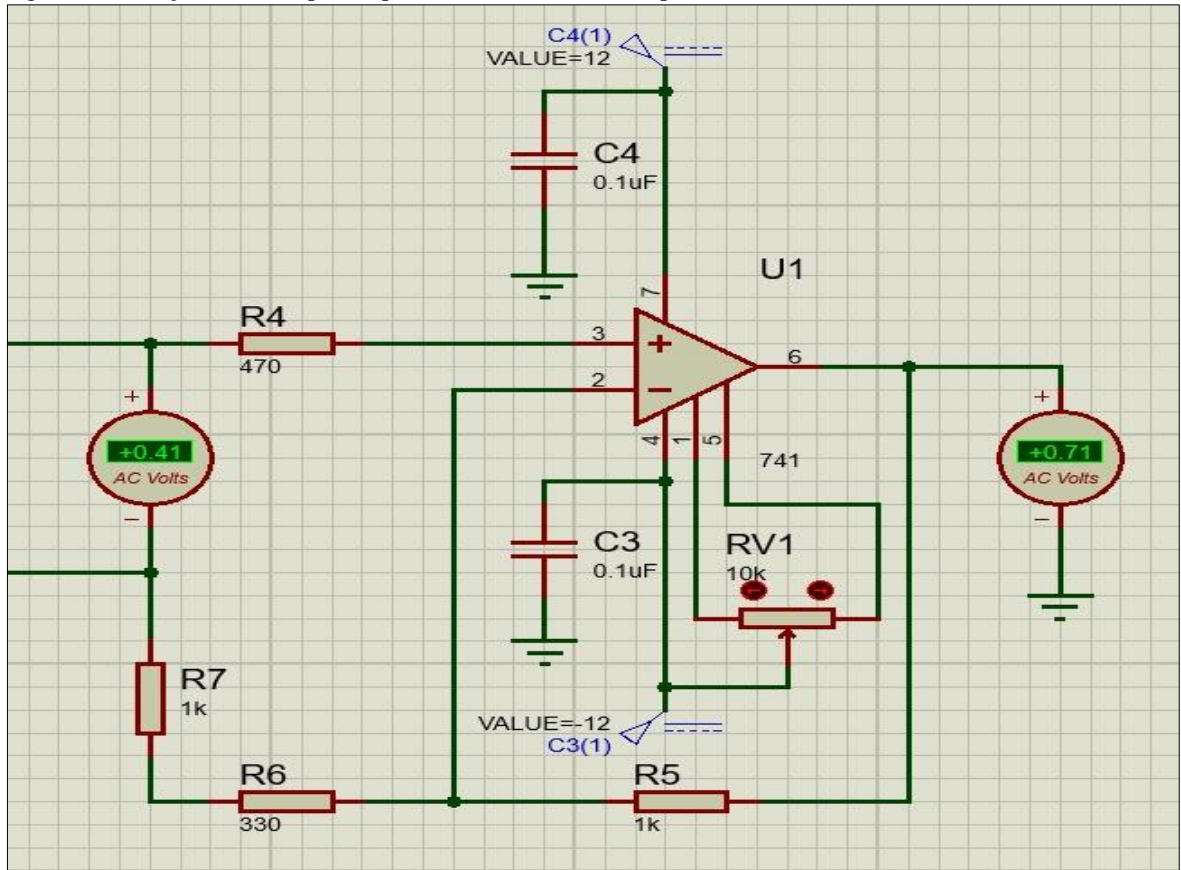
Na Figura 49 é possível visualizar a parte do circuito de sinal de entrada, que possui um gerador de frequência que emitirá um sinal elétrico que de acordo com a variação da capacitância dos eletrodos, será amplificado, conforme Figura 50.

Figura 49 – Fração de vazio para líquidos com dominância capacitiva



Fonte: autor da dissertação.

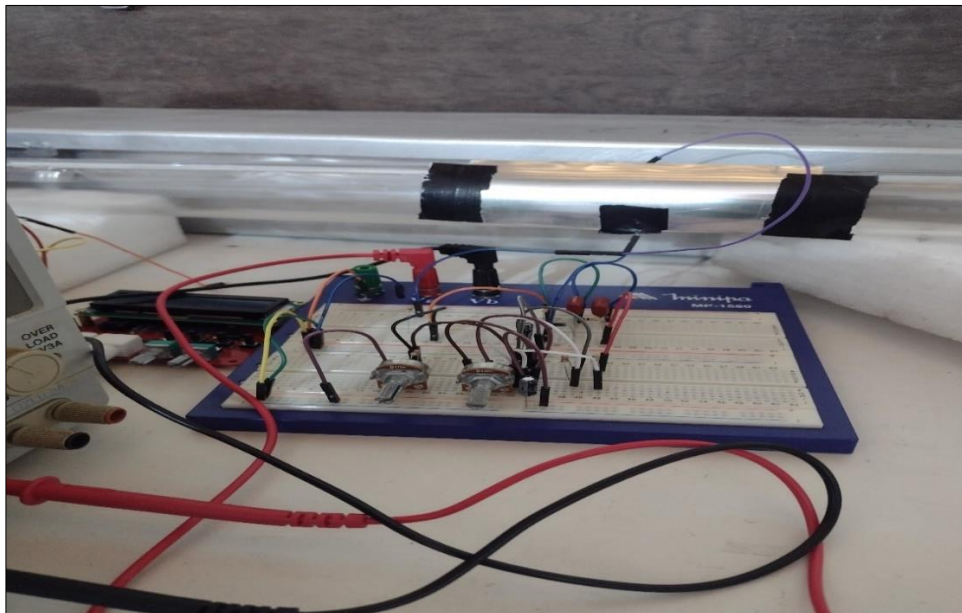
Figura 50 – Fração de vazio para líquidos com dominância capacitiva



Fonte: autor da dissertação.

A simulação do circuito eletrônico demonstrou sua efetividade e que a tensão de saída está no valor esperado, na magnitude de 10^{-1} . Posteriormente foi realizada a montagem do circuito eletrônico, conforme Figura 51.

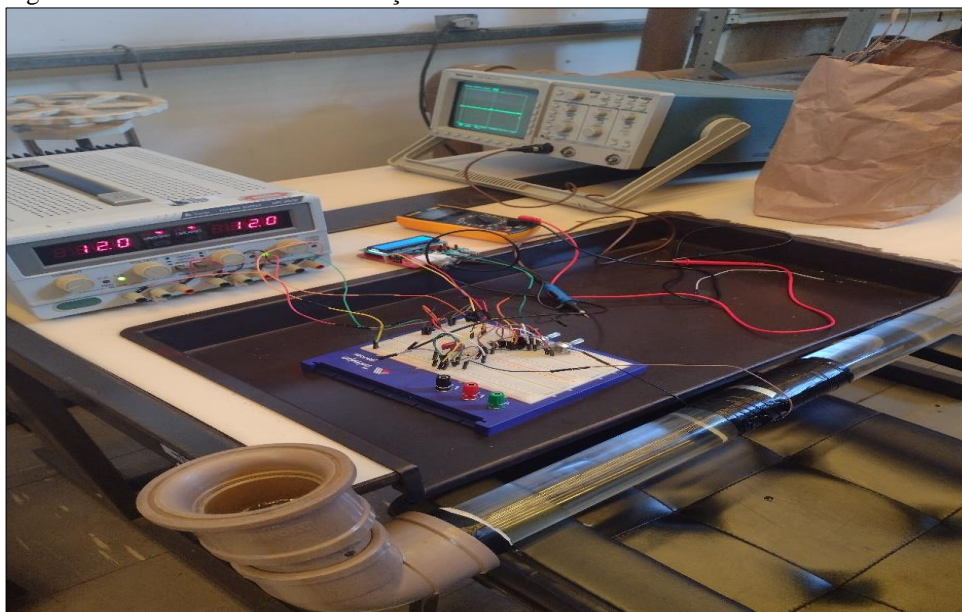
Figura 51 – Montagem circuito eletrônico



Fonte: autor da dissertação.

Com a montagem do circuito eletrônico, foi realizada a primeira sessão dos testes estáticos, ou seja, a verificação da tensão de saída para o tubo vazio ($\alpha = 1,0$) e para o tubo cheio de água ($\alpha = 0$), conforme Figura 52.

Figura 52 – Teste estático sensor fração de vazio



Fonte: autor da dissertação.

Tabela 9 – Resultados para teste estático

Fração de vazio	Tensão de saída [V]
$\alpha = 0$	0,28
$\alpha = 1$	0,75

Fonte: autor da dissertação.

A variação do nível de água acarretou em um gradativo aumento da tensão de saída, sendo os limites inferiores e superiores, 0,28V e 0,75V, respectivamente.

Após os testes iniciais, o sensor de fração de vazio em placas foi instalado no CCN, conforme Figura 17, em que é possível verificar seu comportamento durante a simulação experimental na seção dos resultados em regime monofásico e bifásico.

APÊNDICE B – Janelas de criação de componentes pelo FastLAP

Para utilização do pré-processador FastLAP, primeiramente é necessária sua instalação por meio da adição de um suplemento no *MS Excel®*, de modo facilitador, basta criar um arquivo.reg com o conteúdo abaixo, no mesmo diretório onde se localiza o pré-processador:

```
Windows Registry Editor Version 5.00
[HKEY_CURRENT_USER\SOFTWARE\Microsoft\Office\Excel\Addins\FastLAP]
"Description"="FastLAP"
"FriendlyName"="FastLAP RELAP5"
"LoadBehavior"=dword:00000002
"Manifest"="file:///C:/FASTLAP/FastLAP.vsto|vstolocal"
```

Depois, salve uma planilha na mesma pasta, abra-a novamente, vá em Arquivo>Opções>Suplementos, pesquise e adicione o suplemento FastLAP RELAP5.

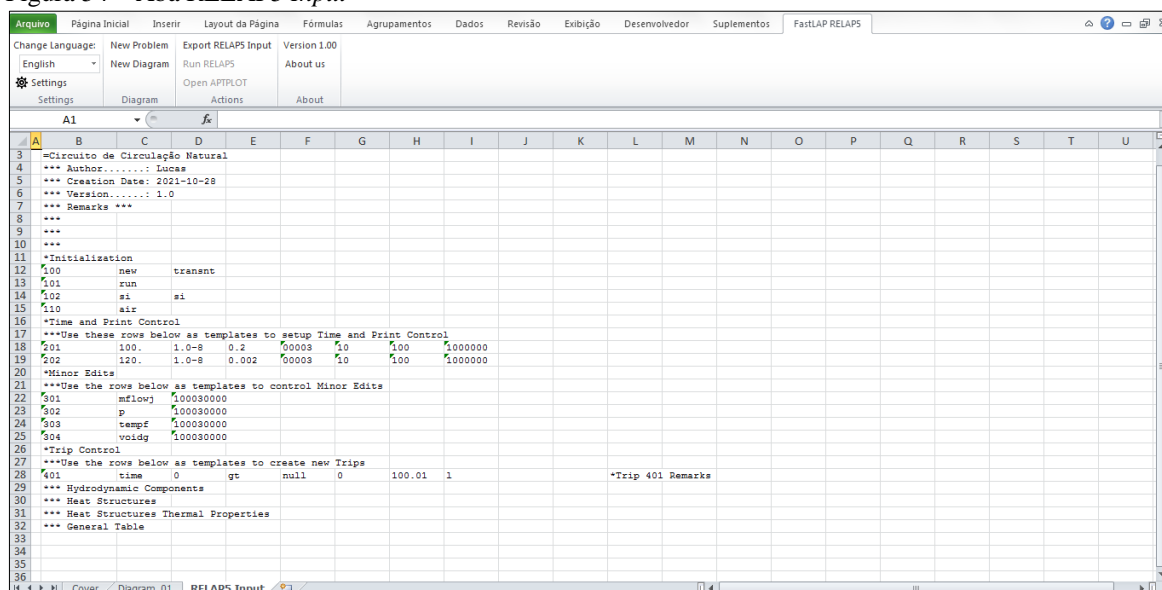
Com o FastLAP devidamente instalado, é possível iniciar o processo de nodalização clicando em “*New Problem*”, desta forma, serão criadas três abas, uma chamada *Cover*, conforme Figura 53, onde são escritas o título do trabalho e o nome do autor, a seleção do formato das unidades de medida (Sistema Internacional – SI ou Sistema britânico) e quais gases não-condensáveis estão presentes no estudo. Uma chamada *Diagram_01*, onde será possível a inserção dos componentes hidrodinâmicos e estruturas de calor. E a terceira, conforme Figura 54, chamada *RELAP5 Input*, para onde são enviados os dados de entrada conforme são inseridos por meio das janelas de criação. Caso seja conveniente, é possível alterar o idioma para português (Brasil) ou francês, em que o inglês é o idioma padrão.

Figura 53 – Aba *Cover*

Problem Title:	Circuito de Circulação Natural	
Author:	Lucas	
Creation Date:	28/10/2021	
Version:	1.0	
Remarks:		
Units Selection (102)	Input: si	Output: si
Noncondensable Gas Species (110)	air	

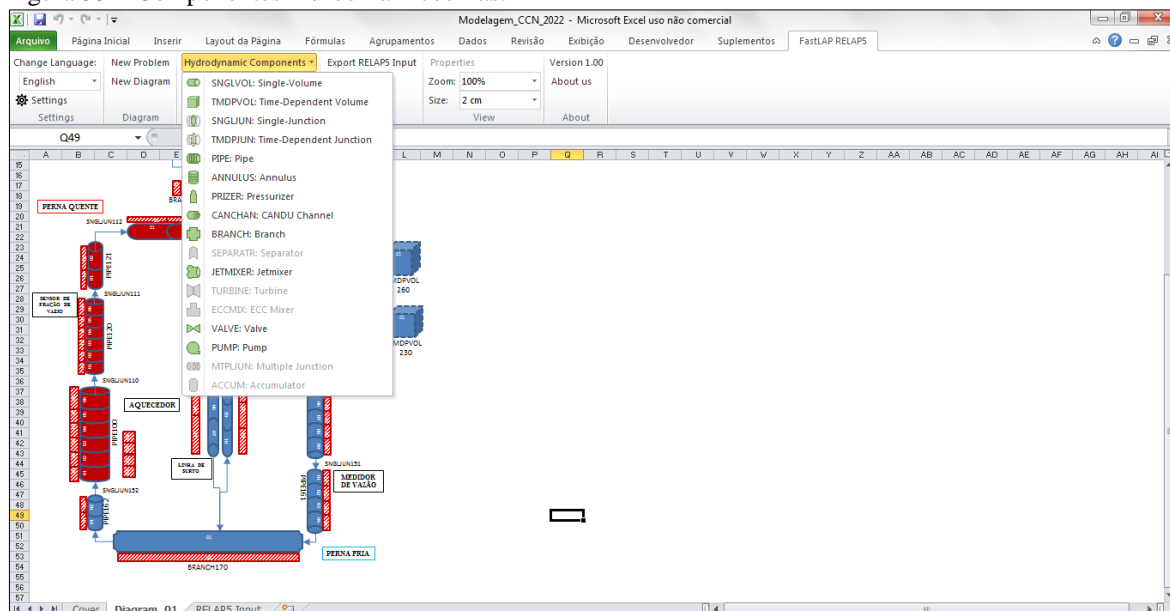
Fonte: autor da dissertação.

Figura 54 – Aba RELAP5 Input



Fonte: autor da dissertação.

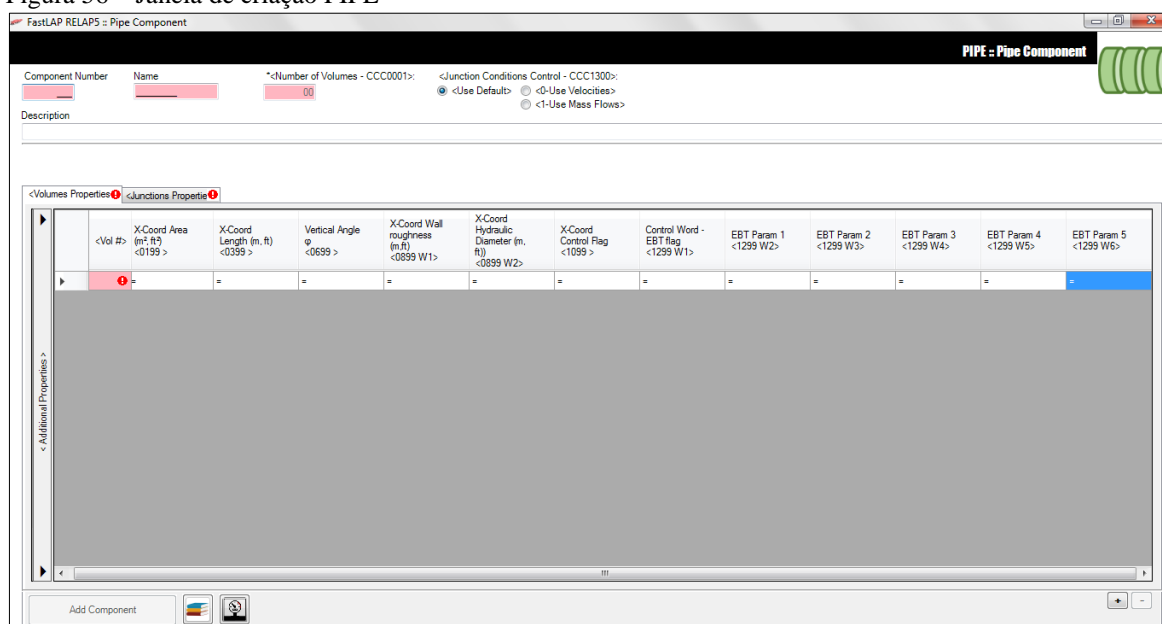
Na aba *Diagram_01*, a opção para inserção de componentes hidrodinâmicos (*hydrodynamic componentes*) é apresentada, sendo possível a inserção conforme a listagem da Figura 55.

Figura 55 – Componentes hidrodinâmicos *FastLAP*

Fonte: autor da dissertação.

Serão apresentados apenas os componentes que compõem este trabalho, sendo PIPE, conforme Figura 56, caracterizado por uma tubulação que possui uma entrada (*inlet*) e uma saída (*outlet*), podendo possuir até 99 volumes de controle em sua constituição.

Figura 56 – Janela de criação PIPE

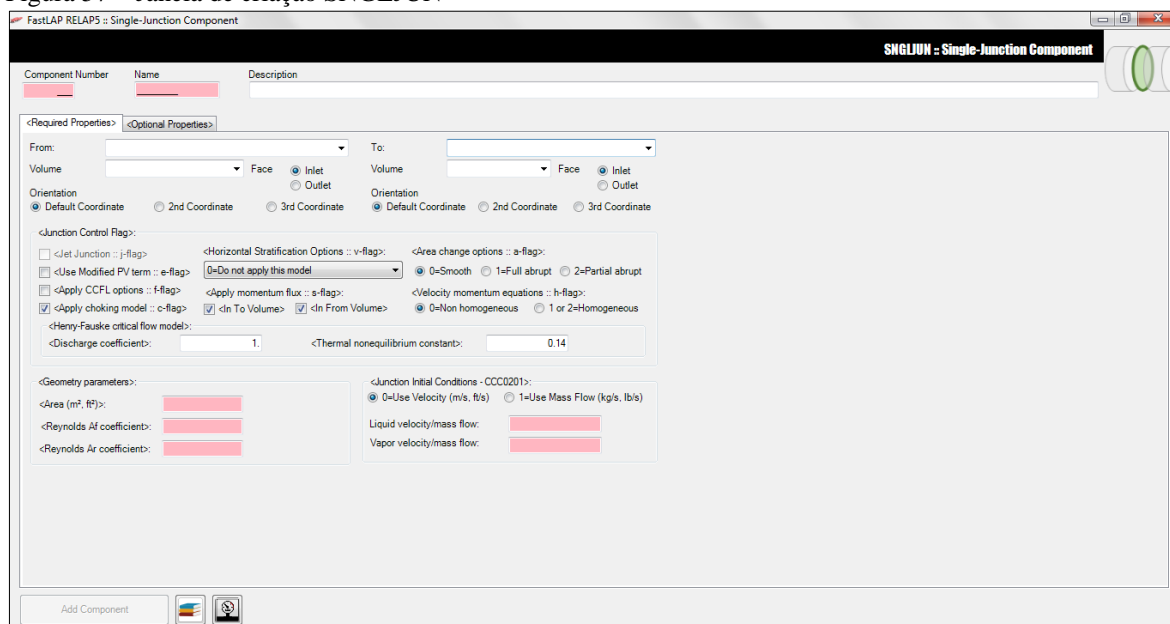


Fonte: autor da dissertação.

Alguns campos de preenchimento são obrigatórios, em que todas as janelas de criação seguem o padrão do IDAHO NATIONAL LABORATORY (2010), sendo destacados com sinal avermelhado de exclamação quando não estão preenchidos. Outra aspecto do FastLAP a evitar o não preenchimento de campos obrigatórios, é que o botão “*Add Component*” apenas é possível de clicar após o preenchimento de todos os campos obrigatórios. Ao lado direito do botão “*Add Component*”, existe o botão para abrir automaticamente o manual do RELAP5 e para abrir o programa *SF Pressure Drop*, se assim for configurado em *Settings*. Os campos de preenchimento também estão configurados para não aceitar certos tipos de valores, seguindo os requisitos padrões do RELAP5, por exemplo, não é permitida a inserção de um valor de área (m^2/ft^2) negativa ou o uso de vírgula (,) ao invés de ponto (.) para apontar valores decimais. A clicar nas células, automaticamente um calculadora aparece a direita, caso seja necessário algum cálculo.

Outro componente bastante utilizado nas simulações por meio do RELAP5 é o SNGLJUN, que faz a junção de-para (*from-to*) entre componentes, geralmente, PIPE’s. Os campos de preenchimento podem ser vistos na Figura 57.

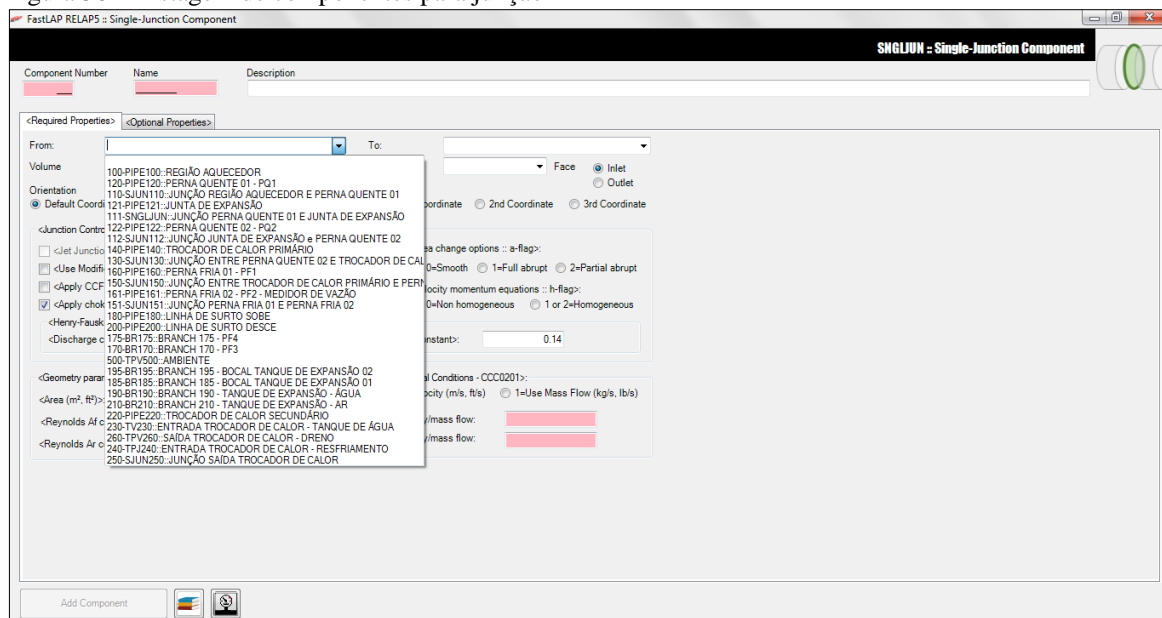
Figura 57 – Janela de criação SNGLJUN



Fonte: autor da dissertação.

Com o intuito de evitar erros de junções, os componentes inseridos são listados nas entradas/saídas, conforme Figura 58, para todos os componentes que possuem junções.

Figura 58 – Listagem de componentes para junção



Fonte: autor da dissertação.

Outro componente que utiliza a listagem de componentes e é similar ao SNGLJUN, é o TMDPJUN, também uma junção, porém que depende da variável tempo (t), que utilizam informações sobre a velocidade ou a vazão do fluido. Os campos de preenchimento podem ser vistos na Figura 59.

Figura 59 – Janela de criação de TMDPJUN

Fonte: autor da dissertação.

Enquanto um PIPE possui a possibilidade de uma nodalização mais refinada, com maior número de nós do que em relação a um SNGLVOL, que possui um único volume de controle, também possuindo apenas uma entrada e uma saída, o componente hidrodinâmico BRANCH é muito versátil na simulação de um circuito, possuindo apenas um volume de controle, ou seja, não é possível refinar sua nodalização, contudo possui a característica de possuir múltiplas junções. Seus principais campos de preenchimento podem ser vistos na Figura 60.

Figura 60 – Janela de criação BRANCH

Fonte: autor da dissertação.

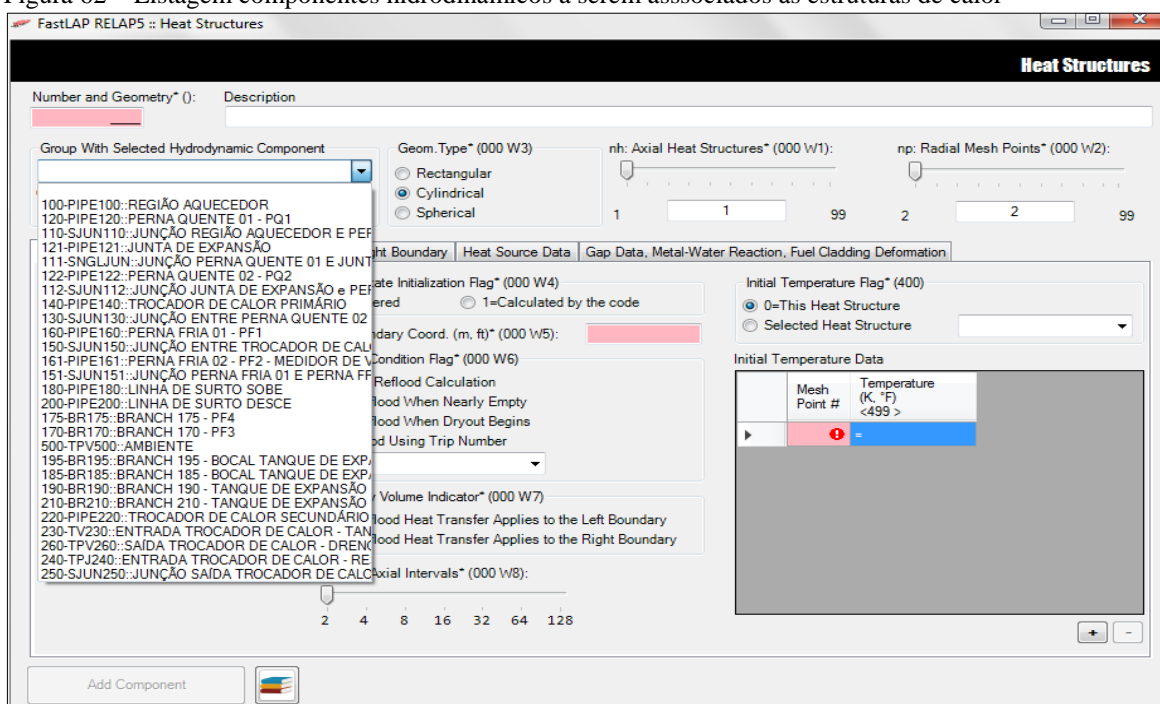
Outro componente que é dependente do tempo é o TMDPVOL, geralmente utilizado para designar o “ambiente”, em que pode haver variação, por exemplo, da pressão ou da temperatura em relação ao tempo. Seus principais campos de preenchimento podem ser vistos na Figura 61.

Figura 61 – Janela de criação TMDPVOL

Fonte: autor da dissertação.

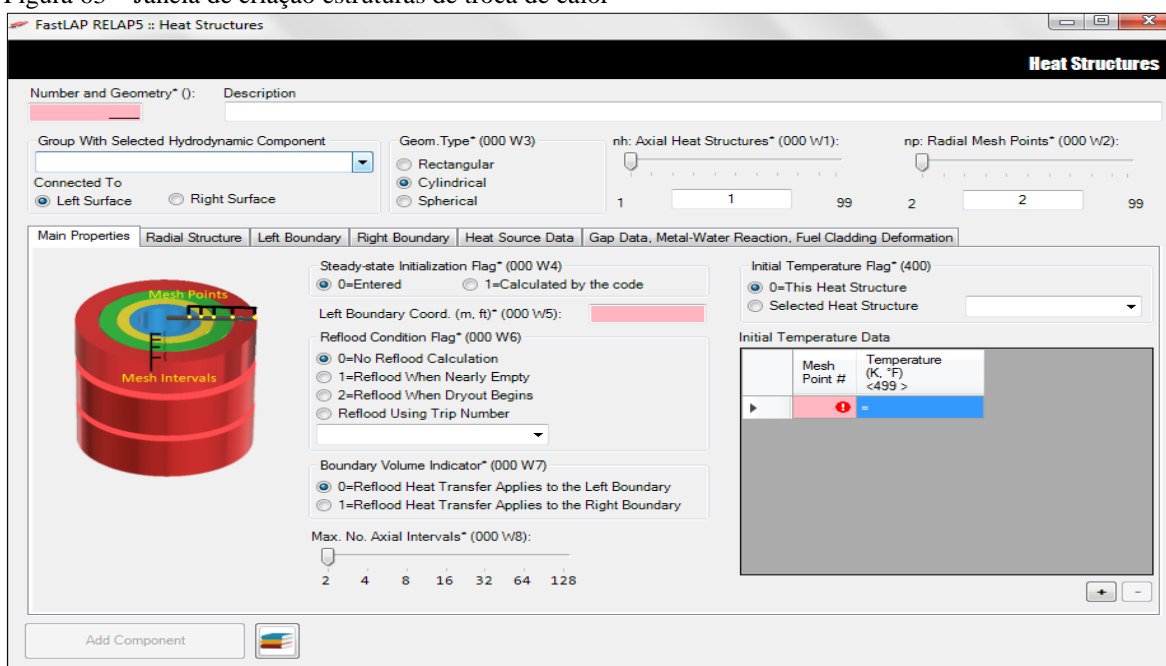
Uma vez inseridos todos os componentes hidrodinâmicos, é possível alocar as estruturas de calor (*heat structures*), essa ordem é recomendada, pois as estruturas de calor são associadas a seus respectivos componentes hidrodinâmicos, seja como fonte de calor ou de sumidouro, como é possível visualizar na Figura 62. Os principais campos de preenchimento das estruturas de calor podem ser vistos na Figura 63.

Figura 62 – Listagem componentes hidrodinâmicos a serem associados às estruturas de calor



Fonte: autor da dissertação.

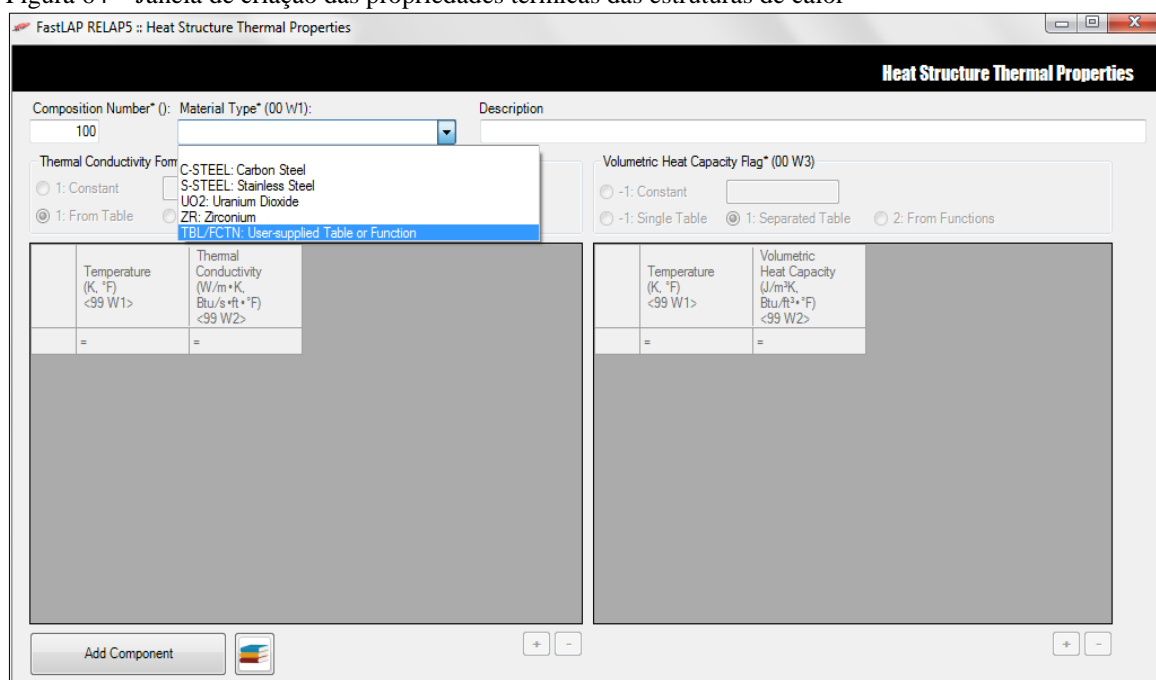
Figura 63 – Janela de criação estruturas de troca de calor



Fonte: autor da dissertação.

Para designação dos materiais aos quais são feitas as estruturas de calor, existe tabelas padronizadas do próprio RELAP5, como também a opção de inserir uma tabela com os respectivos valores (TBL/FCTN), indicando a condutividade térmica e a capacidade volumétrica de calor, como visto na Figura 64.

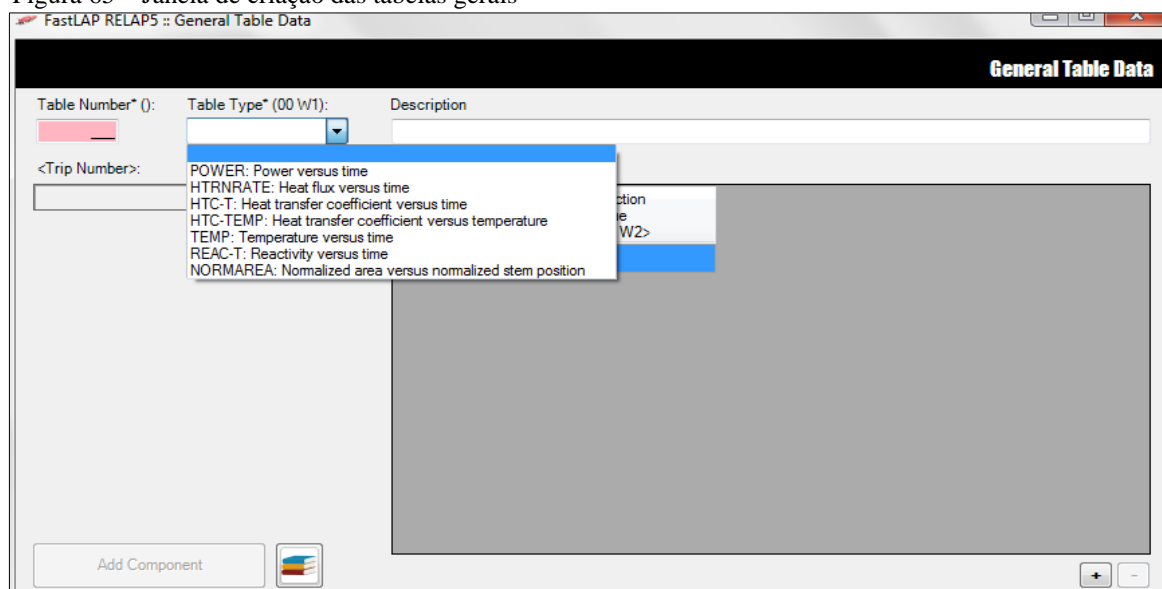
Figura 64 – Janela de criação das propriedades térmicas das estruturas de calor



Fonte: autor da dissertação.

Para finalizar, existem tabelas gerais para designar como algumas unidades irão variar em relação ao tempo, como a potência, o fluxo de calor, a temperatura ambiente, entre outros, Figura 65.

Figura 65 – Janela de criação das tabelas gerais

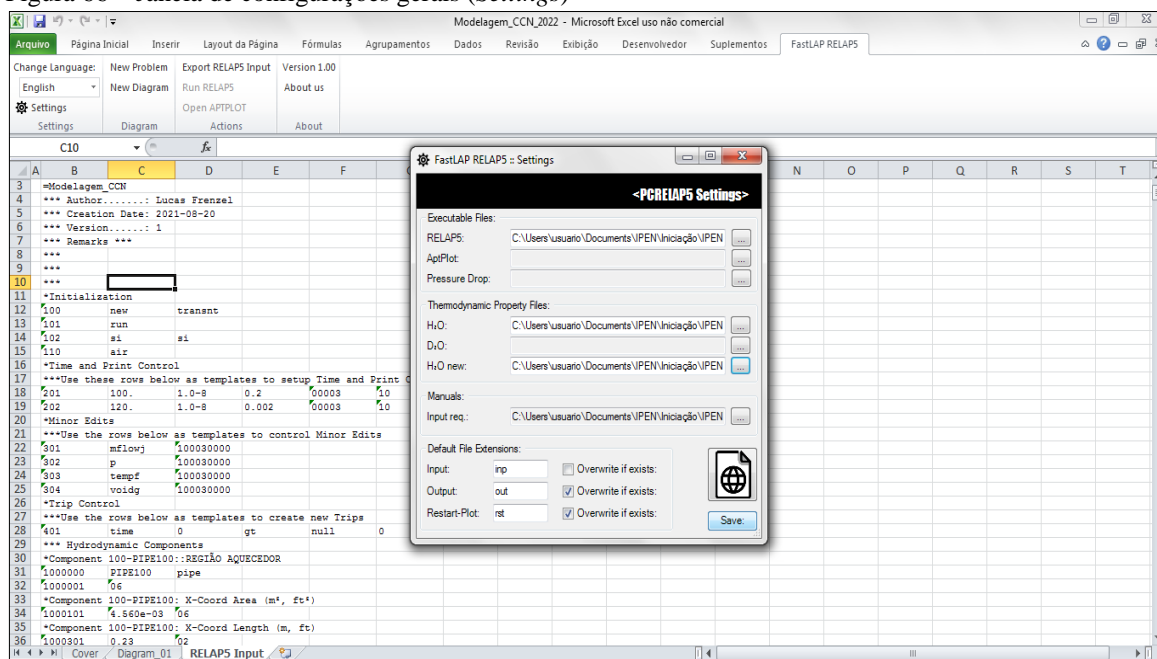


Fonte: autor da dissertação.

Inseridos todos os componentes hidrodinâmicos, as estruturas de calor com a designação dos seus respectivos materiais, informações gerais em relação às condições

iniciais e de contorno, é possível exportar o arquivo.inp padrão a ser rodado no RELAP5/MOD3.3, por meio do botão “*Export RELAP5 Input*”, ou por meio do próprio *FastLAP*, rodar o programa inserindo o diretório onde se encontram o código computacional e as propriedades termodinâmicas utilizadas pelo RELAP5, conforme Figura 66, e clicando em “*Run RELAP5*”.

Figura 66 – Janela de configurações gerais (*Settings*)



Fonte: autor da dissertação.

Aqui foram descritos os aspectos gerais do pré-processador FastLAP utilizado neste trabalho, havendo a possibilidade de encontrar maiores detalhes sobre o programa na dissertação de MONACO (2019).

APÊNDICE C – Dados de entrada (*input*) do CCN para RELAP5/MOD3.3

```

= Modelagem_CCN_2022_LucasFrenzel
*
*
*Initialization
100 new transnt
101 run
102 si si
110 air
*
*Time and Print Control
*
201 3000. 1.0e-7 0.01 00003 100 10000 10000000
*202 3000. 1.0e-7 0.001 00003 100 10000 10000000
*
*
*Minor Edits
*
301 tempf 100050000
302 tempf 160010000
303 tempf 220020000
304 httemp 120000103
305 httemp 122000203
306 mflowj 161010000
307 p 120010000
308 voidg 120030000
*
*
*Trips Control
*
*
501 time 0 ge null 0 3000. 1* fim do problema
502 time 0 ge null 0 0.0 1
*
*
* COMPONENTES HIDRODINAMICOS
*
*
*Component 100-PIPE100::SECAO AQUECEDOR
1000000 pipe100 pipe
1000001 6
*Component 100-PIPE100: X-Coord Area (m?, ft?)
1000101 4.560e-03 5
1000102 1.134e-03 6
1000201 0.00 5
*Component 100-PIPE100: X-Coord Length (m, ft)
1000301 0.1000 1 0.1000 2 0.05750 3
1000302 0.3200 4 0.3200 5 0.05000 6
1000401 0.00e+00 6
1000501 0.00 6
*Component 100-PIPE100: Vertical Angle
1000601 90.0 6
*Component 100-PIPE100: X-Coord Elevation Changes
1000701 0.1000 1 0.1000 2 0.05750 3
1000702 0.3200 4 0.3200 5 0.05000 6
*Component 100-PIPE100: X-Coord Friction Data

```



```

1000801  0.0000015  0.00  6
1000901  0.0  0.0  5
*Component 100-PIPE100: X-Coord Control Flag
1001001  0000000  6
*Component 100-PIPE100: Junction Control Flag
1001101  00000000  5
*Component 100-PIPE100: Volume Initial Conditions
1001201  4  1.0639e+05  2.9315e+02  0.4e-05  0.00e+00  0.00e+00  1
1001202  4  1.0639e+05  2.9315e+02  0.4e-05  0.00e+00  0.00e+00  2
1001203  4  1.0439e+05  2.9315e+02  0.4e-05  0.00e+00  0.00e+00  3
1001204  4  1.0239e+05  2.9315e+02  0.4e-05  0.00e+00  0.00e+00  4
1001205  4  1.0208e+05  2.9315e+02  0.4e-05  0.00e+00  0.00e+00  5
1001206  4  1.0108e+05  2.9315e+02  0.4e-05  0.00e+00  0.00e+00  6
1001300  1
*Component 100-PIPE100: Junction Initial Conditions
1001301  0.00e+00  0.00e+00  0.00e+00  1
1001302  0.00e+00  0.00e+00  0.00e+00  2
1001303  0.00e+00  0.00e+00  0.00e+00  3
1001304  0.00e+00  0.00e+00  0.00e+00  4
1001305  0.00e+00  0.00e+00  0.00e+00  5
*
*
*Component 120-PIPE120::PERNA QUENTE 01
1200000  pipe120  pipe
1200001  6
*Component 120-PIPE120: X-Coord Area (m?, ft?)
1200101  1.134e-03  6
1200201  0.00  5
*Component 120-PIPE120: X-Coord Length (m, ft)
1200301  0.1400  1  0.1400  2  0.1400  3  0.1400  4
1200302  0.1400  5  0.1350  6
1200401  0.00e+00  6
1200501  0.00  6
*Component 120-PIPE120: Vertical Angle
1200601  90.0  6
*Component 120-PIPE120: X-Coord Elevation Changes
1200701  0.1400  1  0.1400  2  0.1400  3  0.1400  4
1200702  0.1400  5  0.1350  6
*Component 120-PIPE120: X-Coord Friction Data
1200801  0.0000015  0.00  6
1200901  0.0  0.0  5
*Component 120-PIPE120: X-Coord Control Flag
1201001  0000000  6
*Component 120-PIPE120: Junction Control Flag
1201101  00000000  5
*Component 120-PIPE120: Volume Initial Conditions
1201201  4  1.0108e+05  2.9315e+02  0.4e-05  0.00e+00  0.00e+00  1
1201202  4  1.0108e+05  2.9315e+02  0.4e-05  0.00e+00  0.00e+00  2
1201203  4  1.0100e+05  2.9315e+02  0.4e-05  0.00e+00  0.00e+00  3
1201204  4  1.0060e+05  2.9315e+02  0.4e-05  0.00e+00  0.00e+00  4
1201205  4  1.0060e+05  2.9315e+02  0.4e-05  0.00e+00  0.00e+00  5
1201206  4  1.0030e+05  2.9315e+02  0.4e-05  0.00e+00  0.00e+00  6
1201300  1
*Component 120-PIPE120: Junction Initial Conditions
1201301  0.00e+00  0.00e+00  0.00e+00  1
1201302  0.00e+00  0.00e+00  0.00e+00  2
1201303  0.00e+00  0.00e+00  0.00e+00  3
1201304  0.00e+00  0.00e+00  0.00e+00  4
1201305  0.00e+00  0.00e+00  0.00e+00  5
*

```

*Component 110-SJUN110::JUNCAO REGIAO AQUECEDOR E PERNA QUENTE 01

1100000 sjun110 sngljun
 1100101 100060002 120010001 0.0 28.7 28.7 00000100
 1100201 1 0.0 0.0 0.0

*

*Component 121-PIPE121::PERNA QUENTE 02

1210000 pipe121 pipe
 1210001 2

*Component 121-PIPE121: X-Coord Area (m², ft²)

1210101 1.134e-03 2
 1210201 0.00 1

*Component 121-PIPE121: X-Coord Length (m, ft)

1210301 0.2750 1 0.2750 2
 1210401 0.00e+00 2

1210501 0.00 2

*Component 121-PIPE121: Vertical Angle ?

1210601 90.0 2

*Component 121-PIPE121: X-Coord Elevation Changes

1210701 0.2750 1 0.2750 2

*Component 121-PIPE121: X-Coord Friction Data

1210801 0.0000015 0.00 2

1210901 0.0 0.0 1

*Component 121-PIPE121: X-Coord Control Flag

1211001 0000000 2

*Component 121-PIPE121: Junction Control Flag

1211101 00000000 1

*Component 121-PIPE121: Volume Initial Conditions

1211201 4 1.0030e+05 2.9315e+02 0.4e-05 0.00e+00 0.00e+00 1

1211202 4 1.0030e+05 2.9315e+02 0.4e-05 0.00e+00 0.00e+00 2

1211300 1

*Component 121-PIPE121: Junction Initial Conditions

1211301 0.00e+00 0.00e+00 0.00e+00 1

*

*Component 111-SNGLJUN::JUNCAO PERNA QUENTE 01 E PERNA QUENTE 02

1110000 SNGLJUN sngljun

1110000 sjun111 sngljun

1110101 120060002 121010001 0.0 0.06 0.06 01000000

1110201 1 0.0 0.0 0.0

*

*Component 122-PIPE122::PERNA QUENTE 03

1220000 pipe122 pipe

1220001 4

*Component 122-PIPE122: X-Coord Area (m², ft²)

1220101 1.134e-03 4

1220201 0.00 3

*Component 122-PIPE122: X-Coord Length (m, ft)

1220301 0.1500 1 0.1000 2 0.6500 3 0.1500 4

1220401 0.00e+00 4

1220501 0.00 4

*Component 122-PIPE122: Vertical Angle ?

1220601 45.0 1 0.00 2 0.00 3 -45.0 4

*Component 122-PIPE122: X-Coord Elevation Changes

1220701 0.1500 1 0.00 2 0.00 3 -0.1500 4

*Component 122-PIPE122: X-Coord Friction Data

1220801 0.0000015 0.00 4

1220901 0.0 0.0 3

*Component 122-PIPE122: X-Coord Control Flag

1221001 0000000 4

*Component 122-PIPE122: Junction Control Flag

1221101 00000000 3

*Component 122-PIPE122: Volume Initial Conditions

1221201	4	1.0000e+05	2.9315e+02	0.4e-05	0.00e+00	0.00e+00	1
1221202	4	1.0000e+05	2.9315e+02	0.4e-05	0.00e+00	0.00e+00	2
1221203	4	1.0000e+05	2.9315e+02	0.4e-05	0.00e+00	0.00e+00	3
1221204	4	1.0000e+05	2.9315e+02	0.4e-05	0.00e+00	0.00e+00	4
1221300							1

*Component 122-PIPE122: Junction Initial Conditions

1221301		0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	1
1221302		0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	2
1221303		0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	3

*

*Component 112-SJUN112::JUNCAO PERNA QUENTE 02 E PERNA QUENTE 03

1120000 SNGLJUN sngljun

1120000 sjun112 sngljun

1120101 121020002 122010001 0.0 0.06 0.06 01000100

1120201 1 0.0 0.0 0.0

*

*Component 130-SJUN130::JUNCAO ENTRE PERNA QUENTE 03 E TROCADOR DE CALOR PRIMARIO

1300000 sjun130 sngljun

1300101 122040002 140010001 0.0 5.0 5.0 00000100

1300201 1 0.0 0.0 0.0

*

*

*Component 140-PIPE140::TROCADOR DE CALOR PRIMARIO

1400000 pipe140 pipe

1400001 2

*Component 140-PIPE140: X-Coord Area (m², ft²)

1400101 3.798e-04 2

1400201 0.00 1

*Component 140-PIPE140: X-Coord Length (m, ft)

1400301 0.2750 2

1400401 0.00e+00 2

1400501 0.00 2

*Component 140-PIPE140: Vertical Angle ?

1400601 -90.0 2

*Component 140-PIPE140: X-Coord Elevation Changes

1400701 -0.2750 2

*Component 140-PIPE140: X-Coord Friction Data

1400801 0.0000015 6.65e-03 2

1400901 0.0 0.0 1

*Component 140-PIPE140: X-Coord Control Flag

1401001 0000000 2

*Component 140-PIPE140: Junction Control Flag

1401101 00000000 1

*Component 140-PIPE140: Volume Initial Conditions

1401201 4 1.0060e+05 2.9315e+02 0.4e-05 0.00e+00 0.00e+00 2

1401300 1

*Component 140-PIPE140: Junction Initial Conditions

1401301 0.00e+00 0.00e+00 0.00e+00 1

*

*

*Component 150-SNGLJUN::JUNCAO TROCADOR DE CALOR E PF

1500000 sjun150 sngljun

1500101 140020002 160010001 0.0 0.06 0.06 00000000

1500201 1 0.0 0.0 0.0

*

*

*Component 160-PIPE160::PERNA FRIA - PF

1600000 pipe160 pipe

```

1600001      9
*Component 160-PIPE160: X-Coord Area (m?, ft?)
1600101  1.134e-03  9
1600201    0.00  8
*Component 160-PIPE160: X-Coord Length (m, ft)
1600301    0.1400  5
1600302    0.1350  6  0.0500  7
1600303    0.3200  8  0.3200  9
1600401    0.00e+00  9
1600501    0.00  9
*Component 160-PIPE160: Vertical Angle ?
1600601   -90.0  9
*Component 160-PIPE160: X-Coord Elevation Changes
1600701   -0.1400  5
1600702   -0.1350  6  -0.0500  7
1600703   -0.3200  8  -0.3200  9
*Component 160-PIPE160: X-Coord Friction Data
1600801  0.0000015  0.00e+00  9
1600901    0.0  0.0  8
*Component 160-PIPE160: X-Coord Control Flag
1601001  0000000  9
*Component 160-PIPE160: Junction Control Flag
1601101  00000000  8
*Component 160-PIPE160: Volume Initial Conditions
1601201  4  1.0100e+05  2.9315e+02  0.4e-05  0.00e+00  0.00e+00  1
1601202  4  1.0108e+05  2.9315e+02  0.4e-05  0.00e+00  0.00e+00  2
1601203  4  1.0108e+05  2.9315e+02  0.4e-05  0.00e+00  0.00e+00  3
1601204  4  1.0108e+05  2.9315e+02  0.4e-05  0.00e+00  0.00e+00  4
1601205  4  1.0208e+05  2.9315e+02  0.4e-05  0.00e+00  0.00e+00  5
1601206  4  1.0239e+05  2.9315e+02  0.4e-05  0.00e+00  0.00e+00  6
1601207  4  1.0279e+05  2.9315e+02  0.4e-05  0.00e+00  0.00e+00  7
1601208  4  1.0309e+05  2.9315e+02  0.4e-05  0.00e+00  0.00e+00  8
1601209  4  1.0339e+05  2.9315e+02  0.4e-05  0.00e+00  0.00e+00  9
1601300      1
*Component 160-PIPE160: Junction Initial Conditions
1601301  0.00e+00  0.00e+00  0.00e+00  1
1601302  0.00e+00  0.00e+00  0.00e+00  2
1601303  0.00e+00  0.00e+00  0.00e+00  3
1601304  0.00e+00  0.00e+00  0.00e+00  4
1601305  0.00e+00  0.00e+00  0.00e+00  5
1601306  0.00e+00  0.00e+00  0.00e+00  6
1601307  0.00e+00  0.00e+00  0.00e+00  7
1601308  0.00e+00  0.00e+00  0.00e+00  8
*
*
*Component 161-PIPE161::SECAO MEDIDOR DE VAZAO
1610000  pipe161  pipe
1610001      5
*Component 161-PIPE161: X-Coord Area (m?, ft?)
1610101  1.000e-03  1
1610102  1.134e-03  5
1610201    0.00  4
*Component 161-PIPE161: X-Coord Length (m, ft)
1610301  0.0575  1  0.1000  2  0.1000  3
1610302  0.1000  4  0.0500  5
1610401    0.00  5
1610501    0.00  5
*Component 161-PIPE161: Vertical Angle ?
1610601   -90.0  3
1610602   -45.0  5

```

```

*Component 161-PIPE161: X-Coord Elevation Changes
1610701 -0.0575 1 -0.1000 2 -0.1000 3
1610702 -0.1000 4 -0.0500 5
*Component 161-PIPE161: X-Coord Friction Data
1610801 0.0000015 0.00e+00 5
1610901 0.0 0.0 4
*Component 161-PIPE161: X-Coord Control Flag
1611001 0000000 5
*Component 161-PIPE161: Junction Control Flag
1611101 00000000 4
*Component 161-PIPE161: Volume Initial Conditions
1611201 4 1.0339e+05 2.9315e+02 0.4e-05 0.00e+00 0.00e+00 1
1611202 4 1.0439e+05 2.9315e+02 0.4e-05 0.00e+00 0.00e+00 2
1611203 4 1.0439e+05 2.9315e+02 0.4e-05 0.00e+00 0.00e+00 3
1611204 4 1.0539e+05 2.9315e+02 0.4e-05 0.00e+00 0.00e+00 4
1611205 4 1.0639e+05 2.9315e+02 0.4e-05 0.00e+00 0.00e+00 5
1611300 1
*Component 161-PIPE161: Junction Initial Conditions
1611301 0.00e+00 0.00e+00 0.00e+00 1
1611302 0.00e+00 0.00e+00 0.00e+00 2
1611303 0.00e+00 0.00e+00 0.00e+00 3
1611304 0.00e+00 0.00e+00 0.00e+00 4
*
*
*Component 151-SNGLJUN:: PERNA FRIA E SECAO MEDIDOR DE VAZAO
1510000 sjun151 sngljun
1510101 160090002 161010001 0.0 0.8 0.8 00000100
1510201 1 0.0 0.0 0.0
*
*
*Component 170-BRANCH::SECAO INFERIOR 01
1700000 br170 branch
1700001 3 1
1700101 1.13e-03 0.2700 0.00e+00 0.0 0.0 0.000 0.0000015 0.0 00000000
1700200 004 1.0639e+05 2.9315e+02 0.4e-05
1701101 161050002 170000000 0.00 0.80 0.80 0
1702101 170010000 175000000 0.00 0.00 0.00 0
1703101 170010000 180010001 0.00 4.80 4.80 0
1701201 0.00 0.00 0.00
1702201 0.00 0.00 0.00
1703201 0.00 0.00 0.00
*
*
*Component 175-BRANCH::SECAO INFERIOR 02
1750000 br175 branch
1750001 1 1
1750101 1.13e-03 0.4800 0.00e+00 0.0 0.0 0.000 0.0000015 0.0 00000000
1750200 004 1.0639e+05 2.9315e+02 0.4e-05
1751101 175010000 162010001 0.00 0.80 0.80 0
1751201 0.00 0.00 0.00
*
*
*Component 162-PIPE162::BASE DO AQUECEDOR
1620000 pipe162 pipe
1620001 2
*Component 162-PIPE162: X-Coord Area (m?, ft?)
1620101 1.134e-03 2
1620201 0.00 1
*Component 162-PIPE162: X-Coord Length (m, ft)
1620301 0.0750 2
1620401 0.00e+00 2

```

```

1620501      0.00      2
*Component 162-PIPE162: Vertical Angle ?
1620601      90.0      2
*Component 162-PIPE162: X-Coord Elevation Changes
1620701      0.0750     2
*Component 162-PIPE162: X-Coord Friction Data
1620801      0.0000015  0.00e-00      2
1620901      0.0      0.0      1
*Component 162-PIPE162: X-Coord Control Flag
1621001      0000000      2
*Component 162-PIPE162: Junction Control Flag
1621101      01000100      1
*Component 162-PIPE162: Volume Initial Conditions
1621201      4 1.0639e+05 2.9315e+02 0.4e-05 0.00e+00 0.00e+00      2
1621300      1
1621301      0.00e+00 0.00e+00 0.00e+00      1
*
*
*Component 251-SNGLJUN:: JUNÇÃO BASE DO AQUECEDOR E AQUECEDOR
2510000 sjun251 sngljun
2510101 162020002 100010001 0.0      0.06 0.06 00000000
2510201 1      0.0      0.0      0.0
*
*
*Component 180-PIPE180::LINHA DE SURTO QUE SOBE
1800000      ls180      pipe
1800001      7
*Component 180-PIPE180: X-Coord Area (m², ft²)
1800101      1.131e-04      7
1800201      0.00      6
*Component 180-PIPE180: X-Coord Length (m, ft)
1800301      0.4370      7
1800401      0.00e+00      7
1800501      0.00      7
*Component 180-PIPE180: Vertical Angle ?
1800601      90.0      7
*Component 180-PIPE180: X-Coord Elevation Changes
1800701      0.4370      7
*Component 180-PIPE180: X-Coord Friction Data
1800801      0.0000015  0.00e+00      7
1800901      0.0      0.0      6
*Component 180-PIPE180: X-Coord Control Flag
1801001      0000000      7
*Component 180-PIPE180: Junction Control Flag
1801101      00000000      6
*Component 180-PIPE180: Volume Initial Conditions
1801201      4 1.0208e+05 2.9315e+02 0.4e-05 0.00e+00 0.00e+00      7
1801300      1
*Component 180-PIPE180: Junction Initial Conditions
1801301      0.00e+00 0.00e+00 0.00e+00      6
*
*
*
*Component 185-BRANCH::BOCAL INFERIOR TANQUE DE EXPANSAO 01
1850000 br185      branch
1850001      2      1
1850101 1.13e-02 0.200 0.00e+00 0.0 90.0 0.200 0.0000015 0.0 00000000
1850200 004 1.0000e+05 2.9315e+02 0.4e-05
1851101 180070002 185000000 0.00      1.00 1.00      0
1852101 185010000 190000000 0.00      0.00 0.00      0

```

```

1851201 0.00    0.00    0.00
1852201 0.00    0.00    0.00
*
*
*
*Component 190-BRANCH:: TANQUE DE EXPANSAO - AGUA
1900000 br190 branch
1900001 1      1
1900101 1.13e-02 0.500 0.00e+00 0.0 90.0 0.500 0.0000015 0.0 00000000
1900200 004    1.0000e+05 2.9315e+02 0.4e-05
1901101 190010000 210000000 0.00 0.00 0.00 0
1901201 0.00    0.00    0.00
*
*
*Component 210-BRANCH:: TANQUE DE EXPANSAO - AR
2100000 br210 branch
2100001 1      1
2100101 1.13e-02 0.570 0.00e+00 0.0 90.0 0.570 0.0000015 0.0 00000000
2100200 004    1.0000e+05 2.94e+02 1.00e+00
2101101 210010000 500000000 0.00 0.00 0.00 0
2101201 0.00    0.00    0.00
*
*   Ambiente
*
*Component 500-TMDPVOL:: AMBIENTE
5000000 tpv500 tmdpvol
5000101 1.00 1.00 0.00 0.0 0.0 0.00 0.0 0.0 00000000
*Component 500-TPV500: Volume Data Control Word
5000200 003
5000201 0.0    100000.0 294.0
5000202 1000000.0 100000.0 294.0
*
*
*Component 220-PIPE220::TROCADOR DE CALOR SECUNDARIO
2200000 pipe220 pipe
2200001 2
*Component 220-PIPE220: X-Coord Area (m?, ft?)
2200101 3.217e-05 2
2200201 0.00    1
*Component 220-PIPE220: X-Coord Length (m, ft)
2200301 5.5500 2
2200401 0.00e+00 2
2200501 0.00    2
*Component 220-PIPE220: Vertical Angle ?
2200601 90.0    2
*Component 220-PIPE220: X-Coord Elevation Changes
2200701 0.2750 2
*Component 220-PIPE220: X-Coord Friction Data
2200801 0.0000015 0.00e+00 2
2200901 0.0    0.0    1
*Component 220-PIPE220: X-Coord Control Flag
2201001 0000000 2
*Component 220-PIPE220: Junction Control Flag
2201101 00000000 1
*Component 220-PIPE220: Volume Initial Conditions
2201201 4 1.0639e+05 2.9315e+02 0.4e-05 0.00e+00 0.00e+00 2
2201300 1
*Component 220-PIPE220: Junction Initial Conditions
2201301 0.00e+00 0.00e+00 0.00e+00 1
*

```

```

*
*Component 230-TMDPVOL:: TORNEIRA - CAIXA D'AGUA
2300000 tpv230 tmdpvol
2300101 3.217e-05 1.0 0.0 0.0 0.0 0.00 0.0000015 0.01 0000000
2300200 001
2300201 0.0 293.0 0.0
2300202 1000000.0 293.0 0.0
*
*
*Component 260-TMDPVOL:: DRENO
2600000 tpv260 tmdpvol
2600101 3.217e-05 1.0 0.0 0.0 0.0 0.00 0.0000015 0.01 0000000
2600200 002
2600201 0.0 100000.0 0.0
2600202 1000000.0 100000.0 0.0
*
*
*Component 240-TMDPJUN:: ENTRADA TROCADOR DE CALOR
2400000 tpj240 tmdpjun
*Component 240-TPJ240: Connect From To
2400101 230010000 220010001 0.000e+00
2400200 1 0
2400201 0.0 0.0278 0.0 0.00
2400202 1000000.0 0.0278 0.0 0.00
*
*
*Component 250-SNGLJUN:: SAIDA TROCADOR DE CALOR
2500000 sjun250 sngljun
2500101 220020002 260000000 0.0 0.0 0.0 00000000
2500201 1 0.0278 0.0 0.0
*
* ESTRUTURAS DE CALOR - HEAT STRUCTURES
*
* AQUECEDOR
11010000 4 5 2 1 0.00e+00
*Heat Structure 1101: Heat Structure Mesh Flags
11010100 0 1
*Heat Structure 1101: Mesh Interval (m, ft)
11010101 4 0.01
*Heat Structure 1101: Composition Number
11010201 1 4
*Heat Structure 1101: Heat Source Value Or Gamma Attenuation Coef.
11010301 1.0000 4
*Heat Structure 1101: Initial Temperature Flag
11010400 0
*Heat Structure 1101: Temperature (K, ?F)
11010401 2.9515e+02 5
*Heat Structure 1101: Left Boundary
11010501 0 0 0 0 0.00 4
*Heat Structure 1101: Right Boundary
11010601 100010000 0 1 0 0.0289 1
11010602 100020000 0 1 0 0.0289 2
11010603 100030000 0 1 0 0.0301 3
11010604 100040000 0 1 0 0.0301 4
*Heat Structure 1101: Heat Source Data
11010701 900 0.28 0.00 0.00 1
11010702 900 0.28 0.00 0.00 2
11010703 900 0.24 0.00 0.00 3
11010704 900 0.20 0.00 0.00 4
11010901 0.00 10.00 1.00e+01 0.00 0.00 0.00 0.00 1.00e+00 4

```



```

*
*Heat Structure 1100::REGIÃO AQUECEDOR
11000000 6 3 2 1 0.0381
*Heat Structure 1100: Heat Structure Mesh Flags
11000100 0 1
*Heat Structure 1100: Mesh Interval (m, ft)
11000101 2 0.0461
*Heat Structure 1100: Composition Number
11000201 2 2
*Heat Structure 1100: Heat Source Value Or Gamma Attenuation Coef.
11000301 0.0000 2
*Heat Structure 1100: Initial Temperature Flag
11000400 0
*Heat Structure 1100: Temperature (K, ?F)
11000401 2.9515e+02 3
*Heat Structure 1100: Left Boundary
11000501 100010000 0 1 1 0.1000 1
11000502 100020000 0 1 1 0.1000 2
11000503 100030000 0 1 1 0.0575 3
11000504 100040000 0 1 1 0.3200 4
11000505 100050000 0 1 1 0.3200 5
11000506 100060000 0 1 1 0.0500 6
*Heat Structure 1100: Right Boundary
11000601 -700 0 3800 1 0.1000 1
11000602 -700 0 3800 1 0.1000 2
11000603 -700 0 3800 1 0.0575 3
11000604 -700 0 3800 1 0.3200 4
11000605 -700 0 3800 1 0.3200 5
11000606 -700 0 3800 1 0.0500 6
*Heat Structure 1100: Heat Source Data
11000701 0 0.0000 0.0000 0.0000 6
11000801 0.00 10.00 10.00 0.00 0.00 0.00 0.00 1.00e+00 6
11000901 0.00 10.00 10.00 0.00 0.00 0.00 0.00 1.00e+00 6
*
*Heat Structure 1120::PERNA QUENTE 01 - PQ1
11200000 6 3 2 1 0.019
*Heat Structure 1120: Heat Structure Mesh Flags
11200100 0 1
*Heat Structure 1120: Mesh Interval (m, ft)
11200101 2 0.027
*Heat Structure 1120: Composition Number
11200201 2 2
*Heat Structure 1120: Heat Source Value Or Gamma Attenuation Coef.
11200301 0.0000 2
*Heat Structure 1120: Initial Temperature Flag
11200400 0
*Heat Structure 1120: Temperature (K, ?F)
11200401 2.9515e+02 3
*Heat Structure 1120: Left Boundary
11200501 120010000 0 1 1 0.1400 1
11200502 120020000 0 1 1 0.1400 2
11200503 120030000 0 1 1 0.1400 3
11200504 120040000 0 1 1 0.1400 4
11200505 120050000 0 1 1 0.1400 5
11200506 120060000 0 1 1 0.1350 6
*Heat Structure 1120: Right Boundary
11200601 -700 0 3800 1 0.1400 1
11200602 -700 0 3800 1 0.1400 2
11200603 -700 0 3800 1 0.1400 3
11200604 -700 0 3800 1 0.1400 4

```

```

11200605 -700 0 3800 1 0.1400 5
11200606 -700 0 3800 1 0.1350 6
*Heat Structure 1120: Heat Source Data
11200701 0 0.0000 0.0000 0.0000 6
11200801 0.00 10.00 10.00 0.00 0.00 0.00 0.00 1.00e+00 6
11200901 0.00 10.00 10.00 0.00 0.00 0.00 0.00 1.00e+00 6
*
*Heat Structure 1121::PERNA QUENTE 02
11210000 2 3 2 1 0.019
*Heat Structure 1121: Heat Structure Mesh Flags
11210100 0 1
*Heat Structure 1121: Mesh Interval (m, ft)
11210101 2 0.027
*Heat Structure 1121: Composition Number
11210201 2 2
*Heat Structure 1121: Heat Source Value Or Gamma Attenuation Coef.
11210301 0.0000 2
*Heat Structure 1121: Initial Temperature Flag
11210400 0
*Heat Structure 1121: Temperature (K, ?F)
11210401 2.9515e+02 3
*Heat Structure 1121: Left Boundary
11210501 121010000 0 1 1 0.2750 1
11210502 121020000 0 1 1 0.2750 2
*Heat Structure 1121: Right Boundary
11210601 -700 0 3800 1 0.2750 1
11210602 -700 0 3800 1 0.2750 2
*Heat Structure 1121: Heat Source Data
11210701 0 0.0000 0.0000 0.0000 2
11210801 0.00 10.00 10.00 0.00 0.00 0.00 0.00 1.00e+00 2
11210901 0.00 10.00 10.00 0.00 0.00 0.00 0.00 1.00e+00 2
*
*Heat Structure 1122::ESTRUTURA 122 - PERNA QUENTE 03
11220000 4 3 2 1 0.019
*Heat Structure 1122: Heat Structure Mesh Flags
11220100 0 1
*Heat Structure 1122: Mesh Interval (m, ft)
11220101 2 0.027
*Heat Structure 1122: Composition Number
11220201 2 2
*Heat Structure 1122: Heat Source Value Or Gamma Attenuation Coef.
11220301 0.0000 2
*Heat Structure 1122: Initial Temperature Flag
11220400 0
*Heat Structure 1122: Temperature (K, ?F)
11220401 2.9515e+02 3
*Heat Structure 1122: Left Boundary
11220501 122010000 0 1 1 0.1500 1
11220502 122020000 0 1 1 0.1000 2
11220503 122030000 0 1 1 0.6500 3
11220504 122040000 0 1 1 0.1500 4
*Heat Structure 1122: Right Boundary
11220601 -700 0 3800 1 0.1500 1
11220602 -700 0 3800 1 0.1000 2
11220603 -700 0 3800 1 0.6500 3
11220604 -700 0 3800 1 0.1500 4
*Heat Structure 1122: Heat Source Data
11220701 0 0.0000 0.0000 0.0000 4
11220801 0.00 10.00 10.00 0.00 0.00 0.00 0.00 1.00e+00 4
11220901 0.00 10.00 10.00 0.00 0.00 0.00 0.00 1.00e+00 4

```

```

*
*Heat Structure 1160::ESTRUTURA 160 - PERNA FRIA
11600000 9 3 2 1 0.019
*Heat Structure 1160: Heat Structure Mesh Flags
11600100 0 1
*Heat Structure 1160: Mesh Interval (m, ft)
11600101 2 0.027
*Heat Structure 1160: Composition Number
11600201 2 2
*Heat Structure 1160: Heat Source Value Or Gamma Attenuation Coef.
11600301 0.0000 2
*Heat Structure 1160: Initial Temperature Flag
11600400 0
*Heat Structure 1160: Temperature (K, ?F)
11600401 2.9515e+02 3
*Heat Structure 1160: Left Boundary
11600501 160010000 0 1 1 0.1400 1
11600502 160020000 0 1 1 0.1400 2
11600503 160030000 0 1 1 0.1400 3
11600504 160040000 0 1 1 0.1400 4
11600505 160050000 0 1 1 0.1400 5
11600506 160060000 0 1 1 0.1350 6
11600507 160070000 0 1 1 0.0500 7
11600508 160080000 0 1 1 0.3200 8
11600509 160090000 0 1 1 0.3200 9
*Heat Structure 1160: Right Boundary
11600601 -700 0 3800 1 0.1400 1
11600602 -700 0 3800 1 0.1400 2
11600603 -700 0 3800 1 0.1400 3
11600604 -700 0 3800 1 0.1400 4
11600605 -700 0 3800 1 0.1400 5
11600606 -700 0 3800 1 0.1350 6
11600607 -700 0 3800 1 0.0500 7
11600608 -700 0 3800 1 0.3200 8
11600609 -700 0 3800 1 0.3200 9
*Heat Structure 1160: Heat Source Data
11600701 0 0.0000 0.0000 0.0000 9
11600801 0.00 10.00 10.00 0.00 0.00 0.00 0.00 1.00e+00 9
11600901 0.00 10.00 10.00 0.00 0.00 0.00 0.00 1.00e+00 9
*
*Heat Structure 1161::ESTRUTURA 161 - MEDIDOR DE VAZAO
11610000 5 3 2 1 0.019
*Heat Structure 1161: Heat Structure Mesh Flags
11610100 0 1
*Heat Structure 1161: Mesh Interval (m, ft)
11610101 2 0.027
*Heat Structure 1161: Composition Number
11610201 2 2
*Heat Structure 1161: Heat Source Value Or Gamma Attenuation Coef.
11610301 0.0000 2
*Heat Structure 1161: Initial Temperature Flag
11610400 0
*Heat Structure 1161: Temperature (K, ?F)
11610401 2.9515e+02 3
*Heat Structure 1161: Left Boundary
11610501 161010000 0 1 1 0.0575 1
11610502 161020000 0 1 1 0.1000 2
11610503 161030000 0 1 1 0.1000 3
11610504 161040000 0 1 1 0.1000 4
11610505 161050000 0 1 1 0.0500 5

```

```

*Heat Structure 1161: Right Boundary
11610601 -700 0 3800 1 0.0575 1
11610602 -700 0 3800 1 0.1000 2
11610603 -700 0 3800 1 0.1000 3
11610604 -700 0 3800 1 0.1000 4
11610605 -700 0 3800 1 0.0500 5
*Heat Structure 1161: Heat Source Data
11610701 0 0.0000 0.0000 0.0000 5
11610801 0.00 10.00 10.00 0.00 0.00 0.00 0.00 1.00e+00 5
11610901 0.00 10.00 10.00 0.00 0.00 0.00 0.00 1.00e+00 5
*
*Heat Structure 1180::ESTRUTURA 180 - LINHA DE SURTO QUE SOBE
11800000 7 3 2 1 0.006
*Heat Structure 1180: Heat Structure Mesh Flags
11800100 0 1
*Heat Structure 1180: Mesh Interval (m, ft)
11800101 2 0.0165
*Heat Structure 1180: Composition Number
11800201 3 2
*Heat Structure 1180: Heat Source Value Or Gamma Attenuation Coef.
11800301 0.0000 2
*Heat Structure 1180: Initial Temperature Flag
11800400 0
*Heat Structure 1180: Temperature (K, ?F)
11800401 2.9515e+02 3
*Heat Structure 1180: Left Boundary
11800501 180010000 10000 1 1 0.437 1
11800502 180020000 10000 1 1 0.437 2
11800503 180030000 10000 1 1 0.437 3
11800504 180040000 10000 1 1 0.437 4
11800505 180050000 10000 1 1 0.437 5
11800506 180060000 10000 1 1 0.437 6
11800507 180070000 10000 1 1 0.437 7
*Heat Structure 1180: Right Boundary
11800601 -700 0 3800 1 0.437 1
11800602 -700 0 3800 1 0.437 2
11800603 -700 0 3800 1 0.437 3
11800604 -700 0 3800 1 0.437 4
11800605 -700 0 3800 1 0.437 5
11800606 -700 0 3800 1 0.437 6
11800607 -700 0 3800 1 0.437 7
*Heat Structure 1180: Heat Source Data
11800701 0 0 0 0 7
11800801 0.00 10.00 10.00 0.00 0.00 0.00 0.00 1.00e+00 7
11800901 0.00 10.00 10.00 0.00 0.00 0.00 0.00 1.00e+00 7
*
*Heat Structure 1170::ESTRUTURA 170 - BRANCH
11700000 1 3 2 1 0.019
*Heat Structure 1170: Heat Structure Mesh Flags
11700100 0 1
*Heat Structure 1170: Mesh Interval (m, ft)
11700101 2 0.027
*Heat Structure 1170: Composition Number
11700201 2 2
*Heat Structure 1170: Heat Source Value Or Gamma Attenuation Coef.
11700301 0.0000 2
*Heat Structure 1170: Initial Temperature Flag
11700400 0
*Heat Structure 1170: Temperature (K, ?F)
11700401 2.9515e+02 3

```

```

*Heat Structure 1170: Left Boundary
11700501 170010000 0 1 1 0.2700 1
*Heat Structure 1170: Right Boundary
11700601 -700 0 3800 1 0.2700 1
*Heat Structure 1170: Heat Source Data
11700701 0 0.0000 0.0000 0.0000 1
11700801 0.00 10.00 10.00 0.00 0.00 0.00 0.00 1.00e+00 1
11700901 0.00 10.00 10.00 0.00 0.00 0.00 0.00 1.00e+00 1
*
*Heat Structure 1175::ESTRUTURA 175 - BRANCH
11750000 1 3 2 1 0.019
*Heat Structure 1175: Heat Structure Mesh Flags
11750100 0 1
*Heat Structure 1175: Mesh Interval (m, ft)
11750101 2 0.027
*Heat Structure 1175: Composition Number
11750201 2 2
*Heat Structure 1175: Heat Source Value Or Gamma Attenuation Coef.
11750301 0.0000 2
*Heat Structure 1175: Initial Temperature Flag
11750400 0
*Heat Structure 1175: Temperature (K, ?F)
11750401 2.9515e+02 3
*Heat Structure 1175: Left Boundary
11750501 175010000 0 1 1 0.4800 1
*Heat Structure 1175: Right Boundary
11750601 -700 0 3800 1 0.4800 1
*Heat Structure 1175: Heat Source Data
11750701 0 0.0000 0.0000 0.0000 1
11750801 0.00 10.00 10.00 0.00 0.00 0.00 0.00 1.00e+00 1
11750901 0.00 10.00 10.00 0.00 0.00 0.00 0.00 1.00e+00 1
*
*
*Heat Structure 1162::ESTRUTURA 162 - BASE DO AQUECEDOR
*
11620000 2 3 2 1 0.019
*Heat Structure 1162: Heat Structure Mesh Flags
11620100 0 1
*Heat Structure 1162: Mesh Interval (m, ft)
11620101 2 0.027
*Heat Structure 1162: Composition Number
11620201 2 2
*Heat Structure 1162: Heat Source Value Or Gamma Attenuation Coef.
11620301 0.0000 2
*Heat Structure 1162: Initial Temperature Flag
11620400 0
*Heat Structure 1162: Temperature (K, ?F)
11620401 2.9515e+02 3
*Heat Structure 1162: Left Boundary
11620501 162010000 0 1 1 0.0750 1
11620502 162020000 0 1 1 0.0750 2
*Heat Structure 1162: Right Boundary
11620601 -700 0 3800 1 0.0750 1
11620602 -700 0 3800 1 0.0750 2
*Heat Structure 1162: Heat Source Data
11620701 0 0.0000 0.0000 0.0000 2
11620801 0.00 10.00 10.00 0.00 0.00 0.00 0.00 1.00e+00 2
11620901 0.00 10.00 10.00 0.00 0.00 0.00 0.00 1.00e+00 2
*
*

```

```

*Heat Structure 1185::ESTRUTURA 185 - BASE TANQUE DE EXPANSAO 01
11850000 1 3 2 1 0.042425
*Heat Structure 1185: Heat Structure Mesh Flags
11850100 0 1
*Heat Structure 1185: Mesh Interval (m, ft)
11850101 2 0.050425
*Heat Structure 1185: Composition Number
11850201 2 2
*Heat Structure 1185: Heat Source Value Or Gamma Attenuation Coef.
11850301 0.0000 2
*Heat Structure 1185: Initial Temperature Flag
11850400 0
*Heat Structure 1185: Temperature (K, ?F)
11850401 2.9515e+02 3
*Heat Structure 1185: Left Boundary
11850501 185010000 0 1 1 0.2000 1
*Heat Structure 1185: Right Boundary
11850601 -700 0 3800 1 0.2000 1
*Heat Structure 1185: Heat Source Data
11850701 0 0.0000 0.0000 0.0000 1
11850801 0.00 10.00 10.00 0.00 0.00 0.00 0.00 1.00e+00 1
11850901 0.00 10.00 10.00 0.00 0.00 0.00 0.00 1.00e+00 1
*
*Heat Structure 1190::ESTRUTURA 190 - TANQUE DE EXPANSAO 01
11900000 1 3 2 1 0.06
*Heat Structure 1190: Heat Structure Mesh Flags
11900100 0 1
*Heat Structure 1190: Mesh Interval (m, ft)
11900101 2 0.068
*Heat Structure 1190: Composition Number
11900201 2 2
*Heat Structure 1190: Heat Source Value Or Gamma Attenuation Coef.
11900301 0.0000 2
*Heat Structure 1190: Initial Temperature Flag
11900400 0
*Heat Structure 1190: Temperature (K, ?F)
11900401 2.9515e+02 3
*Heat Structure 1190: Left Boundary
11900501 190010000 0 1 1 0.5000 1
*Heat Structure 1190: Right Boundary
11900601 -700 0 3800 1 0.5000 1
*Heat Structure 1190: Heat Source Data
11900701 0 0.0000 0.0000 0.0000 1
11900801 0.00 10.00 10.00 0.00 0.00 0.00 0.00 1.00e+00 1
11900901 0.00 10.00 10.00 0.00 0.00 0.00 0.00 1.00e+00 1
*
*Heat Structure 1210::ESTRUTURA 210 - TANQUE DE EXPANSAO 02
12100000 1 3 2 1 0.06
*Heat Structure 1210: Heat Structure Mesh Flags
12100100 0 1
*Heat Structure 1210: Mesh Interval (m, ft)
12100101 2 0.068
*Heat Structure 1210: Composition Number
12100201 2 2
*Heat Structure 1210: Heat Source Value Or Gamma Attenuation Coef.
12100301 0.0000 2
*Heat Structure 1210: Initial Temperature Flag
12100400 0
*Heat Structure 1210: Temperature (K, ?F)
12100401 2.9515e+02 3

```

```

*Heat Structure 1210: Left Boundary
12100501 210010000 0 1 1 0.5700 1
*Heat Structure 1210: Right Boundary
12100601 -700 0 3800 1 0.5700 1
*Heat Structure 1210: Heat Source Data
12100701 0 0.0000 0.0000 0.0000 1
12100801 0.00 10.00 10.00 0.00 0.00 0.00 0.00 1.00e+00 1
12100901 0.00 10.00 10.00 0.00 0.00 0.00 0.00 1.00e+00 1
*
*Heat Structure 1140::ESTRUTURA 140 - TROCADOR DE CALOR
11400000 2 3 2 1 0.0254
*Heat Structure 1140: Heat Structure Mesh Flags
11400100 0 1
*Heat Structure 1140: Mesh Interval (m, ft)
11400101 2 0.02825
*Heat Structure 1140: Composition Number
11400201 2 2
*Heat Structure 1140: Heat Source Value Or Gamma Attenuation Coef.
11400301 0.0000 2
*Heat Structure 1140: Initial Temperature Flag
11400400 0
*Heat Structure 1140: Temperature (K, ?F)
11400401 2.9515e+02 3
*Heat Structure 1140: Left Boundary
11400501 140010000 0 1 1 0.2750 1
11400502 140020000 0 1 1 0.2750 2
*Heat Structure 1140: Right Boundary
11400601 -700 0 3800 1 0.2750 1
11400602 -700 0 3800 1 0.2750 2
*Heat Structure 1140: Heat Source Data
11400701 0 0.0000 0.0000 0.0000 2
11400801 0.00 10.00 10.00 0.00 0.00 0.00 0.00 1.00e+00 2
11400901 0.00 10.00 10.00 0.00 0.00 0.00 0.00 1.00e+00 2
*
*Heat Structure 1220::ESTRUTURA 220 - SERPENTINA TROCADOR DE CALOR
12200000 2 3 2 1 0.0032
*Heat Structure 1220: Heat Structure Mesh Flags
12200100 0 1
*Heat Structure 1220: Mesh Interval (m, ft)
12200101 2 0.0036
*Heat Structure 1220: Composition Number
12200201 2 2
*Heat Structure 1220: Heat Source Value Or Gamma Attenuation Coef.
12200301 0.0000 2
*Heat Structure 1220: Initial Temperature Flag
12200400 0
*Heat Structure 1220: Temperature (K, ?F)
12200401 2.9315e+02 3
*Heat Structure 1220: Left Boundary
12200501 140010000 0 1 1 5.5500 1
12200502 140020000 0 1 1 5.5500 2
*Heat Structure 1220: Right Boundary
12200601 220010000 0 1 1 5.5500 1
12200602 220020000 0 1 1 5.5500 2
*Heat Structure 1220: Heat Source Data
12200701 0 0.0000 0.0000 0.0000 2
12200801 0.00 10.00 10.00 0.00 0.00 0.00 0.00 1.00e+00 2
12200901 0.00 10.00 10.00 0.00 0.00 0.00 0.00 1.00e+00 2
*
*** Heat Structures Thermal Properties

```

```

*Heat Composition 001::ACO
20100100 "tbl/fctn" 1 1
*Heat Composition 001: Thermal Conductivity
20100101 273.0 50.12
20100102 2000.0 50.12
*Heat Composition 001: Volumetric Heat Capacity
20100151 273.0 3.71e+6
20100152 2000.0 3.71e+6
*Heat Composition 002::VIDRO PYREX
20100200 "tbl/fctn" 1 1
*Heat Composition 002: Thermal Conductivity
20100201 273.0 1.08836
20100202 2000.0 1.08836
*Heat Composition 002: Volumetric Heat Capacity
20100251 273.0 1.7581e+6
20100252 2000.0 1.7581e+6
*Heat Composition 003::MANGUEIRA LINHA DE SURTO
20100300 "tbl/fctn" 1 1
*Heat Composition 003: Thermal Conductivity
20100301 273.0 0.02
20100302 2000.0 0.02
*Heat Composition 003: Volumetric Heat Capacity
20100351 273.0 0.6e+6
20100352 2000.0 0.6e+6
*** General Table
*General Table 900::TABELA DE POTENCIA DO AQUECEDOR VERSUS TEMPO
20290000 "power"
*General Table 900: General Table Data
20290001 0.0 7.500e+03
20290002 1.00e+06 7.500e+03
*General Table 700::TABELA DE TEMPERATURA AMBIENTE VERSUS TEMPO
20270000 "temp"
*General Table 700: General Table Data
20270001 0.0 2.94e+02
20270002 1.00e+06 2.94e+02
*General Table 800::TABELA DE COEFICIENTE DE TRANSFER?NCIA DE CALOR VERSUS TEMPO
20280000 "htc-t"
*General Table 800: General Table Data
20280001 0.0 1.00e+01
20280002 1.00e+06 1.00e+01
*
20800011 htmode 120000300
.

```

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000
Fone/Fax(0XX11) 3133-8908
SÃO PAULO – São Paulo – Brasil
<http://www.ipen.br>

O IPEN é uma Autarquia vinculada à Secretaria de Desenvolvimento, associada à Universidade de São Paulo e gerida técnica e administrativamente pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações.
