

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

**Análise Numérica do Comportamento do Sistema de Resfriamento por
Circulação Natural em Plantas Nucleares Embarcadas**

PEDRO ALEXANDRE PINTO CELESTINO

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

Orientador:

Prof. Dr. Marcelo da Silva Rocha

São Paulo

2024

At the bottom of the page, there are three horizontal green bars, each consisting of two parallel lines, mirroring the design at the top.

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

**Análise Numérica do Comportamento do Sistema de Resfriamento por
Circulação Natural em Plantas Nucleares Embarcadas**

Versão Original

PEDRO ALEXANDRE PINTO CELESTINO

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

**Orientador:
Prof. Dr. Marcelo da Silva Rocha**

**São Paulo
2024**

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

Como citar:

ALEXANDRE PINTO CELESTINO, P. **Análise Numérica do Comportamento do Sistema de Resfriamento por Circulação Natural em Plantas Nucleares Embarcadas**. 2024. 137 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).

Alexandre Pinto Celestino, Pedro

Análise Numérica do Comportamento do Sistema de Resfriamento por Circulação Natural em Plantas Nucleares Embarcadas / Pedro Alexandre Pinto Celestino; orientador Marcelo da Silva Rocha. -- São Paulo, 2024.

137 f.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear (Reatores) -- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2024.

1. Circulação Natural. 2. Termo-hidráulica. 3. Modelica. 4. Simulação numérica. 5. Planta Nuclear Embarcada. I. Rocha, Marcelo da Silva, orient. II. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor: Pedro Alexandre Pinto Celestino

Título: Análise Numérica do Comportamento do Sistema de Resfriamento por Circulação Natural em Plantas Nucleares Embarcadas.

Pedro Alexandre Pinto Celestino

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Reatores.

Orientador:

Prof. Dr. Marcelo da Silva Rocha

Data: 28/08/2024

Banca examinadora

Prof.Dr.: Marcelo da Silva Rocha (Presidente)

Instituição: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

Julgamento: Aprovado.

Prof.Dr.:Jorge Luis Baliño

Instituição: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Julgamento: Aprovado.

Prof.Dr.: Gabriel Angelo

Instituição: Centro Universitário FEI campos São Paulo

Julgamento:Aprovado.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Maria das Graças e Ribamar, cujos valores e ensinamentos sempre me guiaram. À minha amada esposa, Micaela Frasson Montero, por todo o amor, companheirismo e incentivo incondicional. E às minhas filhas, Maria Teresa, Luzia e Maria Fernanda, fontes constantes de inspiração e alegria.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, autor da vida e fonte infinita de sabedoria, por me conceder saúde, perseverança e inspiração ao longo desta jornada acadêmica. Sem Sua graça, não seria possível alcançar mais esta conquista.

A minha esposa Micaela Frasson Montero, pelo constante incentivo, fidelidade, compreensão, e carinho essenciais para a continuidade deste trabalho.

Aos meus pais, Francisco Ribamar Celestino e Maria das Graças Celestino, que desde cedo me ensinaram a valorizar as virtudes necessárias para sempre buscar o conhecimento e o aperfeiçoamento constante.

Ao Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP) e Organizações Militares subordinadas pelas facilidades concedidas.

Aos meus chefes diretos, superiores hierárquicos e subordinados pela paciência, amizade e companheirismo que foram suporte fundamental para o desenvolvimento deste projeto de pesquisa.

Ao meu orientador, Dr. Marcelo da Silva Rocha Maria Agostino Angelo Sordi, pela paciência, ajuda e orientação na condução deste trabalho.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão à Dra. Gainane Sabundjian, cujo conhecimento e apoio foram essenciais para a realização desta dissertação.

Ao Antonio Belchior Junior, por todos esclarecimentos e apoio prestado para desenvolvimento do modelo numérico e conclusão deste trabalho.

Ao IPEN, pelo conhecimento na área nuclear necessário para meu crescimento profissional e pela oportunidade para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus professores e amigos do IPEN e da USP, pela força, paciência e valiosas contribuições para a construção do conhecimento.

Muito obrigado!

RESUMO

A circulação natural é um método crucial para o resfriamento seguro do núcleo de reatores nucleares, garantindo a remoção eficiente do calor residual sem a necessidade de bombas mecânicas. Este método é particularmente importante em reatores navais embarcados, onde a confiabilidade e a simplicidade operacional são essenciais. A modelagem precisa desses sistemas é fundamental para prever comportamentos térmicos e garantir a segurança e a eficiência do reator sob várias condições operacionais.

Esta dissertação investiga a circulação natural em um circuito de circulação natural (CCN), com foco na análise das influências de diferentes inclinações operacionais, comumente empregadas em manobras de submarinos, de 5°, 15° e 30°. Utilizando a Programação Orientada a Objetos (POO) por meio da linguagem Modelica, o estudo visa validar modelos numéricos comparando com os dados experimentais e numéricos obtidos pelo código RELAP5/MOD3.3. Os resultados demonstraram boa concordância do modelo proposto, confirmando a precisão e a robustez da linguagem Modelica para simulações de sistemas de circulação natural. Este estudo, portanto, reforça a confiança na utilização da POO para a modelagem e simulação de circuitos de resfriamento em reatores nucleares.

As observações revelaram que para pequenas inclinações ($\pm 5^\circ$ e $\pm 15^\circ$) os impactos no comportamento do sistema são mínimos, seja na variação da vazão ou na estabilidade do sistema. Em contrapartida, inclinações mais acentuadas ($\pm 30^\circ$) resultam em variações significativas, elevando a temperatura do fluido devido à redução da vazão e prolongando o aparecimento das instabilidades ao longo de toda a simulação. Esses resultados são consistentes com estudos anteriores encontrados na literatura, que também observaram que a inclinação altera a força motriz da circulação natural e pode causar instabilidades devido à quebra da simetria termo-hidráulica.

Em resumo, este trabalho não apenas valida a linguagem Modelica para a simulação de sistemas de circulação natural, mas também fornece valiosas conclusões sobre o comportamento desses sistemas sob diferentes inclinações operacionais. Esses achados são fundamentais para o projeto e operação segura de reatores nucleares embarcados em navios e submarinos, contribuindo para a melhoria contínua da tecnologia de resfriamento nuclear.

ABSTRACT

Natural circulation is a crucial method for the safe cooling of nuclear reactor cores, ensuring efficient removal of residual heat without the need for mechanical pumps. This method is particularly important in naval reactors, where reliability and operational simplicity are essential. Accurate modeling of these systems is fundamental for predicting thermal behaviors and ensuring the safety and efficiency of the reactor under various operational conditions.

This dissertation investigates natural circulation in a natural circulation circuit (CCN), with a focus on analyzing the influences of different operational inclinations, commonly employed in submarine maneuvers, specifically 5°, 15°, and 30°. Utilizing Object-Oriented Programming (OOP) through the Modelica language, the study aims to validate numerical models by comparing them with experimental and numerical data obtained using the RELAP5/MOD3.3 code. The results showed good agreement with the proposed model, confirming the precision and robustness of the Modelica language for simulating natural circulation systems. This study, therefore, reinforces confidence in using OOP for modeling and simulating cooling circuits in nuclear reactors.

The observations revealed that for small inclinations ($\pm 5^\circ$ and $\pm 15^\circ$), the impacts on the system's behavior are minimal, both in terms of flow variation and system stability. In contrast, more pronounced inclinations ($\pm 30^\circ$) result in significant variations, increasing the fluid temperature due to reduced flow and prolonging the appearance of instabilities throughout the simulation. These results are consistent with previous studies found in the literature, which also observed that inclination alters the driving force of natural circulation and can cause instabilities due to the breakdown of thermo-hydraulic symmetry.

In summary, this work not only validates the Modelica language for simulating natural circulation systems but also provides valuable conclusions into the behavior of these systems under different operational inclinations. These findings are fundamental for the design and safe operation of nuclear reactors aboard ships and submarines, contributing to the continuous improvement of nuclear cooling technology.

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 – USS Narwhal (USS-671), primeiro reator nuclear operando em circulação natural.....	18
Figura 2 – Desenho esquemático da classe Ohio em sua configuração original de SSBN.	19
Figura 3 – USS Ohio (USS-726), primeiro submarino nuclear balístico da frota americana.....	19
Figura 4 – a) Correntes convectivas em um espaço fechado retangular vertical; b) Circuito retangular fechado de circulação natural.	23
Figura 5 – Esquema de circuito de circulação natural em circuito fechado.....	25
Figura 6 – Padrões de escoamento bifásico para uma coluna de líquido submetido a um fluxo de calor constante.	27
Figura 7 – Dados experimentais realizado no circuito de circulação natural DANTON, localizado na <i>Dresden University of Technology</i> a uma potência de 10kW.	28
Figura 8 – Distribuição do desenvolvimento de SMRs ao redor do mundo.	29
Figura 9 – Ilustração do reator modular BWRX-300 da GE-Hitachi Nuclear Energy (GEH).....	31
Figura 10 – Ilustração do reator modular CAREM25 da CNEA.	34
Figura 11 – Ilustração de um módulo VOYGR™ da NuScale Power Corporation.....	35
Figura 12 – Vista em corte de uma usina VOYGR-12 da NuScale Power Corporation.....	36
Figura 13 – Diagrama esquemático do CCN do CEENG/IPEN.	45
Figura 14 – Diagrama esquemático dos graus de liberdade e movimentos em um submarino.	48
Figura 15 – Os referenciais fixos no corpo e respectivos movimentos da embarcação.	50
Figura 16 – (a) Foto da bancada experimental; e (b) Diagrama esquemático do circuito principal.	59
Figura 17 - Desenho esquemático do circuito de circulação natural e indicação dos principais componentes. ..	61
Figura 18 – a) Dimensões e detalhes para a região do aquecedor; b) Dimensões e detalhes para a região do trocador de calor (todas as dimensões em milímetros).....	62
Figura 19 – Diagrama esquemático atualizado do CCN do CEENG/IPEN.	64
Figura 20 – Interface de aquisição com o LabView®.	65
Figura 21 – Nodalização simples com a técnica slice nodalization	85
Figura 22 – Nodalização simples aplicada ao CCN em modelica com a técnica <i>slice nodalization</i>	86
Figura 23 – Modelagem do CCN em Modelica com os componentes do circuito, componentes de material das paredes dos tubos, componentes convectivos e vizinhança.	89
Figura 24 – Janela geral de edição do componente “GenericPipe_MultiTransferSurface” em POO.....	92
Figura 25 – Janela específica para edição dos dados de geometria do componente “GenericPipe_MultiTransferSurface” em POO.....	93
Figura 26 – Janela de edição das propriedades térmicas e geométricas do componente “WallConstProps” em POO.....	94
Figura 27 – TC helicoidal modelado em POO.....	95
Figura 28 – Janela de edição das propriedades geométricas do tubo helicoidal: (a) tubo externo (HX_tube_EXT); e (b) tubo interno (HX_tube_INT).	96
Figura 29 – Inclinações positivas do CCN para 5°, 15° e 30°.	97
Figura 30 – Inclinações negativas do CCN para 5°, 15° e 30°.	99
Figura 31 – Metodologia empregada para simulação usando POO.....	102
Figura 32 – Caixa de mensagem final (<i>Logs</i>) após a finalização da simulação no Dymola.....	103
Figura 33 – Comparação das simulações numéricas/experimental das temperaturas em regime monofásico para o termopar T12 na saída do aquecedor.....	105
Figura 34 – Comparação das simulações numéricas/experimental das temperaturas em regime monofásico para o termopar T17 na saída do trocador de calor.	106

Figura 35 – Comparação das simulações numéricas/experimental das temperaturas em regime monofásico para o termopar T22 na saída do trocador de calor (lado do secundário).	107
Figura 36 – Comparação das pressões numéricas/experimental em regime monofásico sem inclinação na seção acima do aquecedor.	108
Figura 37 – Comparação das vazões numéricas/experimental regime monofásico sem inclinação na saída do trocador de calor.	109
Figura 38 – Evolução numérica das temperaturas em regime monofásico na entrada e saída do Aquecedor (AQ) do CCN para 0° (default) e para inclinações positivas 5°, 15° e 30°.	110
Figura 39 – Evolução numérica das temperaturas em regime monofásico na entrada e saída do Aquecedor (AQ) do CCN para 0° (default) e para inclinações negativas -5°, -15° e -30°.	111
Figura 40 – Comparação numérica da evolução das temperaturas em regime monofásico na entrada e saída do Aquecedor (AQ) do CCN para as inclinações positivas (imersão) e negativas (submersão).	112
Figura 41 – Evolução numérica das temperaturas em regime monofásico na entrada (ENT_TCP) e saída (SAI_TCP) no lado primário (casco) do TC e entrada (ENT_TCS) e saída (SAI_TCS) do lado secundário (tubos helicoidais) do TC para 0° (default) e para inclinações positivas de 5°, 15° e 30°.	113
Figura 42 – Evolução numérica das temperaturas em regime monofásico na entrada (ENT_TCP) e saída (SAI_TCP) no lado primário (casco) do TC e entrada (ENT_TCS) e saída (SAI_TCS) do lado secundário (tubos helicoidais) do TC para 0° (default) e para inclinações negativas de -5°, -15° e -30°.	113
Figura 43 – Vazão mássica média x ângulo de inclinação do MODELO_CCN na saída do aquecedor	114
Figura 44 – Comparação numérica das vazões no regime monofásico para 0° (default) e para inclinações positivas de 5°, 15° e 30°.	115
Figura 45 – Comparação numérica das vazões no regime monofásico para 0° (default) e para inclinações negativas de -5°, -15° e -30°.	115
Figura 46 – Comparação numérica da evolução das vazões em regime monofásico para as inclinações positivas (imersão) e negativas (submersão) do CCN.	116
Figura 47 – Comparação numérica da evolução das vazões em regime monofásico para as inclinações positivas (imersão) e negativas (submersão) do CCN.	117
Figura 48 – Detalhe dos equipamentos e da tubulação dentro do Compartimento do Reator do submarino nuclear classe Virginia (SSN 774)	119

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1 – Vantagens e desvantagens no uso de sistemas de circulação natural.....	26
Tabela 2 – Comparação das Principais Características entre os Designs de SMR com refrigeração a água por circulação natural.	30
Tabela 3 – Principais trabalhos sobre Circulação Natural em regimes monofásicos e bifásicos.	37
Tabela 4 – Notações para as forças/momentos de seis graus de liberdade, velocidade linear/angular, posição e ângulos de Euler.	49
Tabela 5 – Principais trabalhos sobre Circulação Natural sob condições de inclinação da plataforma.	51
Tabela 6 – Principais trabalhos de revisão bibliográfica de POO em linguagem Modelica.	67
Tabela 7 – Inclinações positivas do CCN	98
Tabela 8 – Inclinações negativas do CCN	100
Tabela 9 – Métricas utilizadas para avaliação das variações das vazões em inclinações positivas e negativas do CCN.....	118

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	14
1.1 Aspectos gerais sobre circulação natural em plantas nucleares embarcadas	14
1.2 Histórico da circulação natural em Submarinos	16
1.3 Motivação do trabalho	20
1.4 Objetivos	20
1.4.1 Objetivo geral	20
1.4.2 Objetivos específicos	20
1.5 Justificativa	21
1.6 Organização da dissertação	21
2. FUDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1 Circulação Natural	23
2.2 SMRs de Circulação Natural em desenvolvimento	28
2.3 Revisão Bibliográfica	37
2.3.1 Revisão Bibliográfica sobre Circulação Natural	37
2.3.2 Revisão Bibliográfica sobre Circulação Natural sob condições de inclinação da embarcação	48
2.4 Circuito de Circulação Natural (CCN)	60
2.4.1 Circuito Experimental	60
2.5 Programação Orientada a Objetos (POO)	65
2.5.1 Revisão Bibliográfica de Circulação Natural Usando Modelagem Orientada a Objetos	66
3. MATERIAIS E MÉTODOS	74
3.1 Equações de Conservação	74
3.2 Equações governantes da Circulação Natural	76
3.2.1 Equações governantes da circulação natural com escoamento monofásico	76
3.3 Modelos de Algoritmos Empregados Para Simulações de CN em Modelica	80
3.4 Desenvolvimento do CCN em Modelica	82
3.4.1 Condições de contorno para simulação do CCN em Modelica	82
3.4.2 Modelagem dos dados de entrada do CCN em Modelica	84

3.4.2.1	Dados gerais de modelagem do CCN em Modelica	84
3.4.2.2	Dados para modelagem da inclinação do CCN em Modelica	96
3.4.3	Simulação numérica do CCN no Dymola	100
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	103
4.1	Validação para o regime monofásico sem inclinação	104
4.2	Regime monofásico com inclinações de 5°, 15° e 30°	109
4.3	Considerações sobre arranjo no compartimento do reator e consequências na Circulação Natural ...	118
5.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	122
5.1	Conclusões.....	122
5.2	Sugestões Para Trabalhos Futuros	124
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	126

1. INTRODUÇÃO

1.1 ASPECTOS GERAIS SOBRE CIRCULAÇÃO NATURAL EM PLANTAS NUCLEARES EMBARCADAS

Os circuitos de convecção natural ou sistemas de Circulação Natural (CN) são de grande interesse na engenharia nuclear. Uma das principais vantagens para aplicação em reatores nucleares é que pode ser usada como sistema passivo de segurança de acordo com relatório técnico da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA-TECDOC-1474, 2005), ou seja, em caso de condições críticas de operação ou de falta de fornecimento externo de energia, o sistema de circulação natural permanece garantindo o resfriamento do núcleo sem a necessidade de nenhum dispositivo externo, além de ser independente de ações humanas, que segundo lições aprendidas em acidentes históricos, é a principal fonte de falhas em acidentes nucleares.

O fenômeno de circulação natural também é de interesse em plantas nucleares de segunda (GII) e terceira geração (GIII e GIII+), como os reatores de água pressurizada (em inglês, Pressurized Water Reactors - PWR), em que no caso de desligamento seguro ou desligamento de emergência do reator, verifica-se que o calor residual do núcleo, devido aos produtos de fissão, poderá continuar sendo removido pelo fluxo gerado pela circulação natural, sem a necessidade de um sistema específico para remoção de calor residual, reduzindo assim número de equipamentos, o tamanho da planta e o custo total de implantação de uma usina nuclear.

Entende-se por Planta Nuclear Embarcada (PNE), uma aplicação específica de reatores nucleares que pode ser embarcada em navios e submarinos para propulsão naval e geração de eletricidade a bordo, sendo usualmente o PWR o principal tipo de reator empregado para essa finalidade. Uma embarcação durante as condições normais de operação no mar, está sujeita a significantes oscilações da maré, movimentações devido a navegação, e no caso de submarinos, inclinações significativas da proa em condições de mergulho e submersão. Tais movimentos geram acelerações que afetam o escoamento do fluido refrigerante podendo, assim, comprometer o processo de transferência de calor. A revisão da literatura científica tem demonstrado que ocorrem modificações no escoamento em circulação natural durante a movimentação em sistemas de resfriamento. Logo, torna-se imprescindível conduzir uma revisão abrangente sobre o tema, incluindo a apresentação dos modelos já existentes.

Inúmeros trabalhos com o tema de circulação natural já foram realizados no IPEN sendo o mais recente o trabalho realizado por FRENZEL e SABUNDJIAN (2023) onde têm se observado uma coerência entre os resultados experimentais e numéricos obtidos pelo RELAP5. Segundo ANGELO et al. (2012) foi possível analisar detalhadamente as características dinâmicas do escoamento através do Circuito de Circulação Natural (CCN) do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), concluindo que os resultados obtidos pelos modelos de turbulência testados se situam nos limites dos erros aceitáveis de engenharia.

Garantir a remoção do calor residual em todas as condições de acidente de navio nuclear é um dos critérios básicos de segurança do "Código de Segurança para Navios Mercantes Nucleares" adotado pela IMO (Organização Marítima Internacional) em 1981. A remoção de calor por circulação natural fornece um meio prático de resfriar e despressurizar o sistema de refrigerante primário do reator em caso de acidentes de navio, como colisão, naufrágio e encalhe (IYORY et al., 1987).

No contexto da simulação numérica, a linguagem Modelica foi escolhida por se destacar como uma ferramenta proeminente, amplamente adotada no meio acadêmico e industrial. A linguagem Modelica oferece um ambiente robusto para modelagem e simulação. Além disso, sua integração no conjunto de programas da *3D Experience* da *Dassault Systèmes*, aliada à disponibilidade de diversas bibliotecas, reforça sua relevância e utilidade para a comunidade científica e profissional.

O projeto de pesquisa aborda a "Análise Numérica do Desempenho do Sistema de Resfriamento por Circulação Natural em Reatores Nucleares Embarcados", concentrando-se na investigação dos efeitos da inclinação da plataforma do submarino na dissipação de calor por circulação natural. O objetivo principal é validar a utilização da linguagem Modelica, aplicada no contexto da bancada de circulação natural do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, por meio de comparações com dados experimentais e simulações numéricas previamente obtidos com o software RELAP5.

O trabalho propõe uma análise numérica, utilizando o ambiente de modelagem e simulação que utiliza linguagem modelica, para reproduzir condições operacionais previamente investigadas por FRENZEL e SABUNDJIAN (2023) e ANGELO et al. (2012) na bancada de circulação natural do CEENG/IPEN. O foco está na comparação e validação dos resultados,

considerando a aplicação do software em circulação natural. Adicionalmente, o estudo incluirá simulações numéricas do processo de transferência de calor por convecção natural em condições de inclinação transversal e longitudinal da embarcação.

Este trabalho representa uma significativa contribuição para os estudos de termo-hidráulica em reatores nucleares, com foco em reatores nucleares embarcados, explorando ferramentas computacionais que utilizam Programação Orientada a Objetos em linguagem Modelica. Sua aplicação em condições de movimentação do sistema oferecerá valiosas conclusões para compreensão dos fenômenos termo-hidráulicos, proporcionando avanços importantes na pesquisa científica e tecnológica.

1.2 HISTÓRICO DA CIRCULAÇÃO NATURAL EM SUBMARINOS

Inicialmente, faz-se necessário trazer as principais vantagens de um submarino movido a energia nuclear, são elas: grande capacidade de dissuasão, pois como não consomem oxigênio como os submarinos convencionais, possuem grande capacidade de permanecer oculto por longos períodos; grande autonomia ou tempo de missão antes de precisar reabastecer combustível, limitando-se apenas pelos suprimentos de alimentos e capacidade de purificação do ar disponíveis a bordo.

Durante a Segunda Guerra Mundial, os submarinos utilizavam motores a Diesel que funcionavam na superfície da água, carregando um grande banco de baterias elétricas. Essas baterias podiam ser usadas enquanto o submarino estava submerso, até se descarregarem. Nesse ponto, o submarino precisava voltar à superfície para recarregar as baterias, tornando-se vulnerável à detecção por aeronaves e navios de superfície. Embora dispositivos especiais de *Snorkel* fossem usados para captar e exaurir o ar enquanto o submarino estava levemente submerso abaixo da superfície da água, um reator nuclear fornece um tempo de submersão teoricamente infinito. Além disso, a alta densidade de energia, ou energia por unidade de peso do combustível nuclear, elimina a necessidade de reabastecimento constante por frotas de petroleiros vulneráveis que seguem uma frota de navios de superfície ou submarinos para suprimento de óleo Diesel. Por outro lado, um único reabastecimento de um reator nuclear é suficiente para longos intervalos de tempo (RAGHEB, M., 2011).

Com o descobrimento da energia nuclear iniciou-se uma corrida para aplicação na propulsão de meios navais, sendo os EUA o primeiro país a conseguir construir e comissionar um submarino com propulsão nuclear, o Nautilus (SSN-571), em 30 de dezembro de 1954. Sendo descomissionado em 1980, após 25 anos de serviço. Vários protótipos de reatores nucleares para emprego em Submarinos, porta aviões e navios de superfície da marinha americana foram desenvolvidos, criticalizados e comissionados na frota americana. Durante a Guerra Fria, com o surgimento da demanda por reatores mais silenciosos em submarinos, iniciaram-se os estudos para utilização de circulação natural como meio de remoção de calor do núcleo do reator. (RAGHEB, M., 2012).

Desde os primeiros submarinos nucleares, várias mudanças foram feitas para eliminar o ruído, um inimigo dos submarinos. Os primeiros submarinos nucleares eram bastante barulhentos, com muito ruído proveniente das bombas do reator e engrenagens. Desde meados dos anos 60, todas as embarcações nucleares tiveram suas máquinas montadas em plataformas de isolamento de ruído, o que ajudou, mas não resolveu completamente o problema. Um submarino nuclear não pode desligar completamente seu reator enquanto está no mar, então, ao contrário de um submarino a Diesel, ele sempre fará um pouco de ruído devido à circulação do refrigerante dentro do reator. A maioria dos reatores requer bombas para ajudar nisso, embora os reatores de submarinos mais recentes sejam projetados para operar em baixa potência usando circulação natural, baseada na tendência de fluidos quentes subirem e fluidos frios descerem.

O reator protótipo S5G da General Electric (GE) possuía o modo de operação por circulação natural, no qual a água de resfriamento circulava pelo reator sem o uso de bombas. O uso de circulação natural em vez de bombas reduzia o nível de ruído no submarino. Para provar que o conceito de design funcionaria em um navio em operação no mar, o protótipo foi construído em uma seção do casco de um submarino capaz de simular o movimento de balanço de um navio no mar. Os testes do protótipo permitiram a simulação da sala de máquinas de um submarino de ataque flutuando em uma piscina, permitindo que o protótipo fosse girado ao longo de seu eixo longitudinal para simular uma curva acentuada. Esses estudos contribuíram para determinar se a circulação natural continuaria mesmo durante manobras bruscas, uma vez que a circulação natural depende da gravidade. O protótipo S5G continuou a operar como parte

do programa de treinamento nuclear da Marinha até que esse programa foi reduzido após o fim da Guerra Fria. (RAGHEB, M., 2011).

O primeiro submarino operando com circulação natural foi o USS Narwhal (USS-671) que possuía a planta de reator mais silenciosa da frota naval dos EUA. O reator S5G de 90 MWth era ligeiramente mais potente que os de outros submarinos nucleares de ataque rápido dos EUA da mesma época, como a terceira geração S3G e a quinta geração S5W. O objetivo de testar a contribuição potencial da tecnologia de circulação natural para a redução do ruído submarino, evitando o uso de bombas de resfriamento forçado, foi comprovada. As bombas de resfriamento do reator são uma das principais fontes de ruído em submarinos, além da caixa de redução de velocidade e da cavitação de bolhas que colapsam na hélice propulsora. A eliminação das bombas de resfriamento e dos equipamentos associados também reduziria a complexidade mecânica e o espaço necessário para os equipamentos de propulsão. (RAGHEB, M., 2011).



Figura 1 – USS Narwhal (USS-671), primeiro reator nuclear operando em circulação natural.

Fonte: [https://en.wikipedia.org/wiki/USS_Narwhal_\(SSN-671\)](https://en.wikipedia.org/wiki/USS_Narwhal_(SSN-671))

O S5G foi o precursor direto do reator S8G de oitava geração, utilizado nos submarinos de mísseis balísticos classe Ohio, que também utilizava circulação natural, permitindo operar em uma fração significativa de sua potência máxima sem usar as bombas do reator, proporcionando um modo de operação silencioso e furtivo. Na Figura 2, apesar de não mostrar detalhes do compartimento do reator, tem-se um diagrama esquemático de um submarino balístico da classe Ohio, e na Figura 3 tem-se uma foto do submarino Ohio SSGN-726 (RAGHEB, M., 2011).

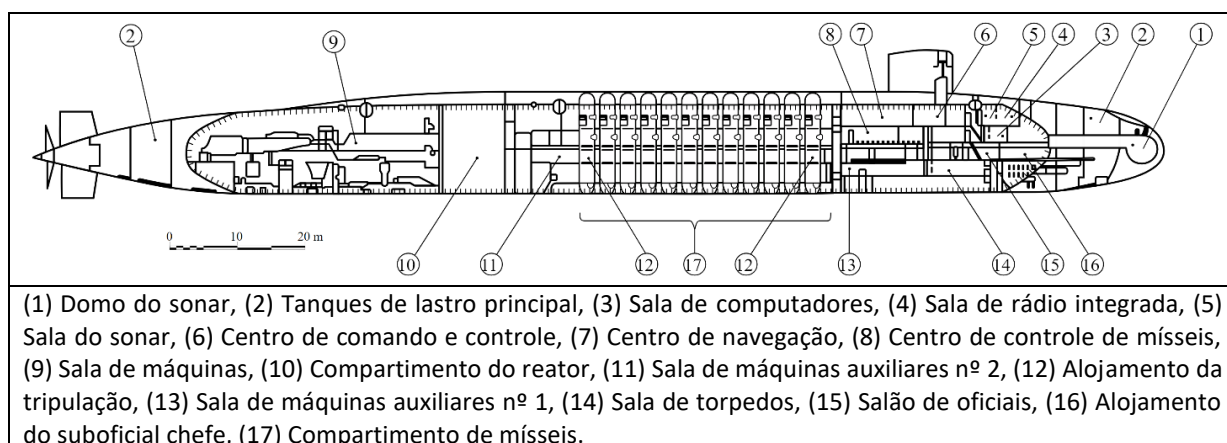


Figura 2 – Desenho esquemático da classe Ohio em sua configuração original de SSBN.

Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/Ohio-class_submarine



Figura 3 – USS Ohio (USS-726), primeiro submarino nuclear balístico da frota americana.

Fonte: <https://shipshub.com/ships/614-1.html>

Pode-se verificar a seriedade com que foi tratado a investigação do fenômeno de circulação natural em reatores embarcados pelo programa nuclear da marinha americana, tendo sido até construído um protótipo em escala real numa piscina de testes para verificação da inclinação e efeito de tombamento na circulação natural. Sedimentando a justificativa do presente trabalho bem como buscando proporcionar resultados que contribuam para um melhor entendimento do fenômeno da circulação natural em plantas nucleares embarcadas, motivação principal deste estudo.

1.3 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

A motivação deste trabalho é validar uma linguagem orientada a objetos para simulação numérica do fenômeno de circulação natural, através da comparação com os resultados experimentais e numéricos do RELAP5/MOD3.3, previamente obtidos em trabalhos no CCN do CEENG do IPEN, a fim de garantir sua aplicabilidade para futuras simulações no circuito. Além disso, será verificada a influência das condições de movimentação da plataforma sobre o circuito de circulação natural, tema ainda pouco analisado de forma crítica pelos trabalhos realizados no IPEN. Os resultados das simulações serão comparados com estudos encontrados na literatura.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um modelo numérico para representação dos fenômenos termo-hidráulicos que regulam o processo de transferência de calor por convecção natural em condições normais e em condições de movimentação e inclinação (todos os tipos de movimentos realizados pela embarcação).

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisão bibliográfica dos fenômenos termo-hidráulicos que regulam o processo de transferência de calor por convecção natural;
- Validar, através de simulação numérica, o escoamento monofásico, comparando com os resultados experimentais e numéricos previamente

obtidos no CCN do CEENG do IPEN. Os resultados numérico/experimental serão comparados com a finalidade de verificar se os modelos presentes na linguagem orientada a objetos reproduzem adequadamente o fenômeno estudado;

- Simular numericamente o comportamento das condições de movimentação e inclinação da plataforma de um navio a fim de verificar a influência sobre o fenômeno de circulação natural, com resultados encontrados na literatura.

1.5 JUSTIFICATIVA

Este trabalho busca investigar o impacto das condições de inclinação da plataforma de um submarino sobre o fluxo de circulação natural. Este tema é de grande relevância para a Marinha, uma vez que, se a ocorrência do fenômeno de circulação natural for confirmada por meio de simulações numéricas, será possível avaliar a influência das condições de inclinação no comportamento termo-hidráulico do circuito primário do reator quando impulsionado por circulação natural. Isso contribuirá significativamente para a compreensão e investigação das condições que podem facilitar ou dificultar a ocorrência do fenômeno de circulação natural no Submarino Convencional de Propulsão Nuclear (SCPN).

1.6 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação foi redigida e estruturada de acordo com o Guia para a elaboração de dissertações e teses do Programa de Pós-graduação do IPEN/USP (IGAMI e VIEIRA, 2017).

No capítulo 1, é fornecida uma visão introdutória e abrangente dos principais aspectos sobre o fenômeno da circulação natural em plantas nucleares embarcadas, um breve histórico do desenvolvimento de reatores nucleares com funcionamento em circulação natural para aplicação naval, além dos objetivos, motivações e estrutura do trabalho.

O capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura, abordando a fenomenologia da circulação natural com e sem inclinação da plataforma, destacando alguns estudos relacionados ao projeto, também são apresentados três reatores nucleares avançados que resfriam seu núcleo por circulação natural. Em forma de tabelas foram apresentadas uma evolução das principais pesquisas sobre o tema da circulação natural, e sobre os estudos da circulação natural

com inclinação da embarcação. Ainda nesse capítulo foi apresentado em detalhes as principais características do Circuito de Circulação Natural (CCN) do IPEN/CNEN, e, por fim, a linguagem de Programação Orientada a Objetos, Modelica, é introduzida descrevendo a ferramenta computacional utilizada para simulação do CCN, bem como também uma revisão da literatura específica dos principais trabalhos que utilizaram essa linguagem para simulação termo-hidráulica.

O capítulo 3 detalha a metodologia e os materiais utilizados no projeto demonstrando as equações de conservação e as equações governantes da Circulação Natural em regime monofásico, um resumo dos principais algoritmos numéricos para solução das equações, o desenvolvimento do CCN em linguagem Modelica e as condições de contorno utilizadas. Também são detalhados os dados de entrada para modelagem da fenomenologia e da inclinação da plataforma.

No capítulo 4, são apresentados e comparados os resultados das simulações numéricas utilizando a linguagem Modelica com os resultados experimentais e numéricos de trabalhos precedentes, analisando a fenomenologia da circulação natural e eficiência da linguagem Modelica para simulação do CCN.

O capítulo 5 traz as conclusões do estudo e propostas para pesquisas futuras.

2. FUDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção serão apresentados os conceitos básicos e as principais teorias para a compreensão plena deste estudo.

2.1 CIRCULAÇÃO NATURAL

Iniciemos definindo a convecção natural (ou livre), de acordo com Çengel (2012), como sendo o movimento de um fluido causado por forças de flutuação induzidas por diferenças de densidade, decorrentes da variação de temperatura no fluido. A circulação natural tem natureza semelhante a convecção natural, onde a circulação do fluido dentro de uma tubulação ocorre devido às mudanças de densidade causadas por diferenças de temperatura, não requerendo nenhum dispositivo mecânico para se manter o fluxo. Na Figura 4.a tem-se o aparecimento de correntes convectivas em um espaço retangular vertical, e na Figura 4.b tem-se o surgimento de correntes de fluxo em um circuito de circulação natural.

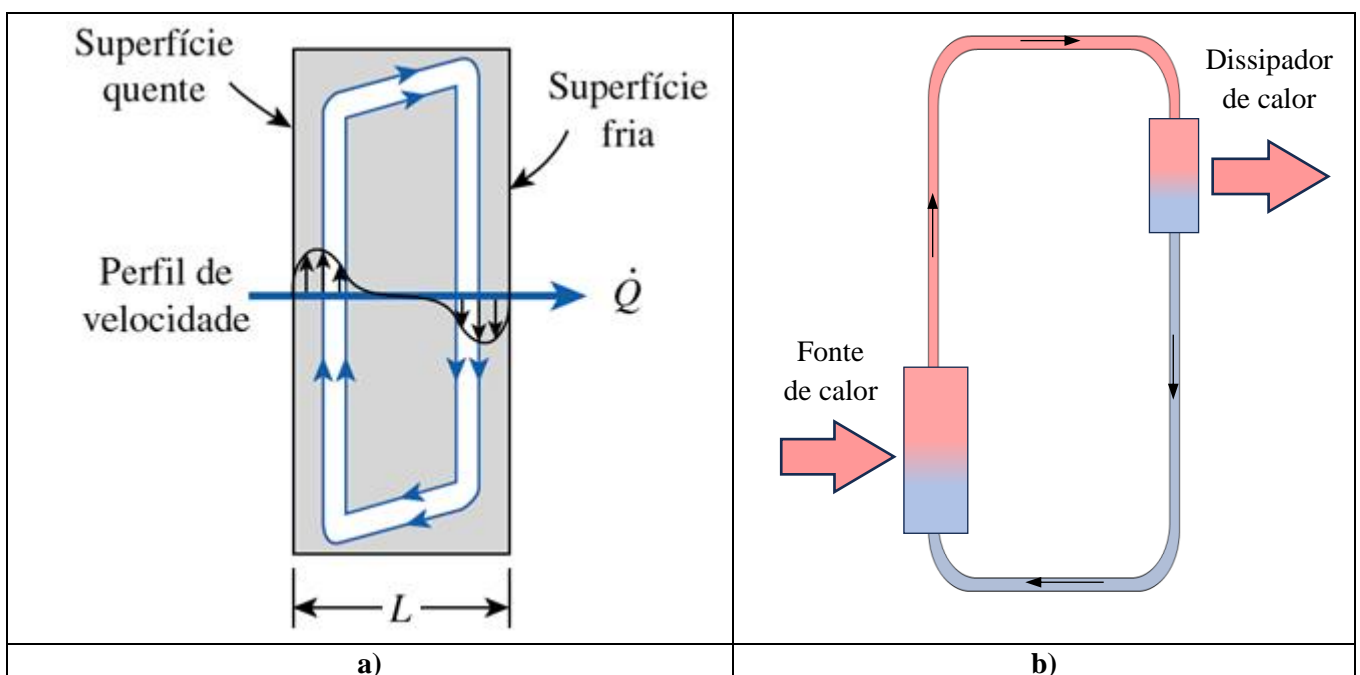


Figura 4 – a) Correntes convectivas em um espaço fechado retangular vertical; b) Circuito retangular fechado de circulação natural.

Fonte a): Çengel (2012), adaptado.

Fonte b): autor da dissertação.

Já a definição do glossário da U.S.NRC especificamente para o setor nuclear diz que: “A circulação do refrigerante no sistema de refrigeração do reator sem o uso das bombas de refrigeração do reator. A circulação ocorre devido à convecção natural resultante das diferentes densidades das partes relativas frias e aquecidas do sistema" (NATURAL CIRCULATION, 2021). Essa característica da circulação natural de promover o escoamento de fluidos sem requerer nenhum dispositivo mecânico, tem sido profundamente estudado por vários pesquisadores. Uma aplicação de interesse na área nuclear é que a circulação natural possibilita a remoção de calor de uma fonte quente para um dissipador de calor proporcionando um reator intrinsecamente seguro e eficiente.

Particularmente no contexto de aplicação em reatores nucleares, os circuitos de circulação natural desempenham um papel essencial como um método passivo de segurança, conforme indicado na referência (IAEA-TECDOC-1474, 2005). Sob circunstâncias de funcionamento críticas, esses circuitos mantêm a capacidade de remover calor do circuito primário sem depender de controle externo, o que se configura como uma característica intrínseca de seu funcionamento. Mecanismos operacionais independentes da ação humana demonstram uma segurança intrínseca superior àquela associada a intervenções externas, principalmente à luz do histórico dos acidentes em que se verificou sucessão de erros, em atitudes desfavoráveis e procedimentos questionáveis, como aconteceu em *Three Mile Island* e Chernobyl (ANGELO, 2013).

A circulação natural é um fenômeno hidráulico que pode ocorrer em circuitos fechados ou abertos, mas somente sob condições específicas. A remoção de qualquer uma dessas condições fará com que a circulação natural seja interrompida. As condições necessárias para que a circulação natural ocorra compreendem a presença de uma aceleração gravitacional apropriada, a existência de uma fonte de calor e um dissipador térmico, bem como um projeto com geometria adequada que favoreça o contato entre os fluidos.

Resumidamente, a circulação natural só pode ocorrer em um campo gravitacional ou na presença de outra aceleração própria. Também são necessários uma fonte de calor e um dissipador de calor pois a circulação natural é gerada pela diferença de densidade no fluido devido à diferença de temperatura, sendo essa diferença de densidade a força motriz para o fluxo de circulação natural. Por último, é necessário que os fluidos estejam em contato a fim de

possibilitar o fluxo entre as áreas, pois caso o caminho do fluxo estiver obstruído ou bloqueado, ou com uma perda de carga excessiva a circulação natural não poderá ocorrer.

A presença e magnitude da circulação natural também dependem da geometria do circuito. A circulação natural em um circuito fechado é estabelecida pela localização de um dissipador de calor no circuito em uma posição mais elevada que a fonte de calor, sendo também as perdas de carga global do circuito um fator limitante para o estabelecimento do fluxo.

Outra definição proposta por ZVIRIN (1982), um dos pioneiros no estudo do fenômeno, é que a circulação natural é criada aquecendo um fluido por baixo e resfriando-o por cima. A Figura 5 ilustra um termostifão sob efeito de circulação natural.

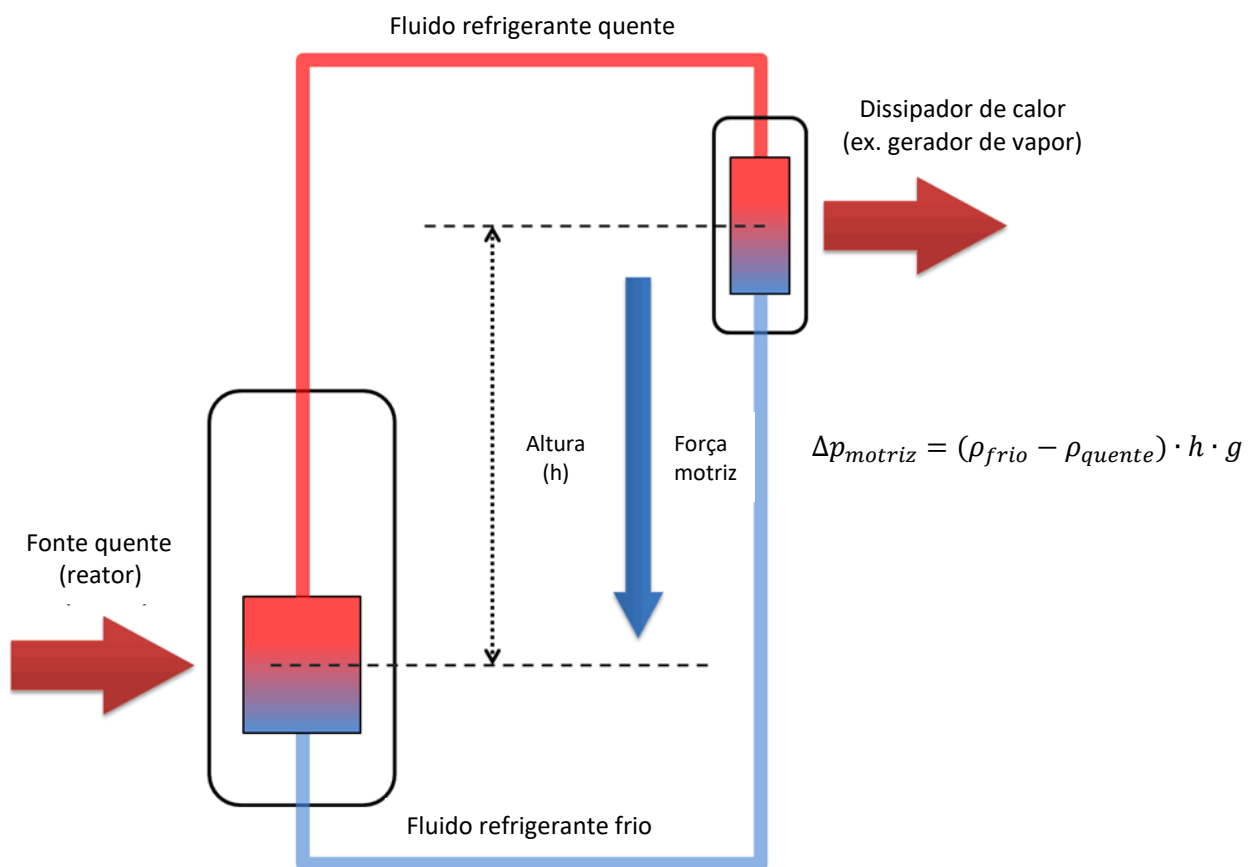


Figura 5 – Esquema de circuito de circulação natural em circuito fechado.

Fonte: <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/heat-transfer/convection-convective-heat-transfer/natural-convection-free-convection/natural-circulation/>.

Numerosos trabalhos sobre circulação natural têm sido desenvolvidos ao longo dos anos com relevantes contribuições para o entendimento do fenômeno, tendo a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) também contribuído com a elucidação do assunto através do documento técnico (IAEA-TECDOC-1474, 2005), o qual trabalhou o assunto e reuniu importantes trabalhos da literatura.

O documento da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA-TECDOC-1474, 2005), trouxe a seguinte explicação integrada para que a circulação natural ocorra: o fluido em contato com a fonte de calor está sendo aquecido, de modo que sua densidade está diminuindo, e o fluido em contato com o dissipador de calor está sendo resfriado, de modo que sua densidade está aumentando. Assim, uma diferença de densidade do fluido é estabelecida no circuito. Essa diferença de densidade, atuada pela gravidade sobre a diferença de elevação entre a fonte e o dissipador, produz uma força de empuxo que impulsiona o fluido pelo circuito.

Uma opinião consensual entre vários pesquisadores é que a principal vantagem de se utilizar a circulação natural, em contraposição à circulação forçada, reside na capacidade de remoção e calor sem a necessidade de máquinas de fluxo ou fontes de energia externas. Tal abordagem implica na redução de falhas no sistema, resultando em uma diminuição dos custos associados à manutenção e operação da instalação (VIJAYAN e NAYAK, 2010). A indústria nuclear tem empregado a circulação natural, particularmente para os propósitos de refrigeração e dissipação de calor residual, especialmente em cenários de acidentes ou desligamento da planta. A Tabela 1 apresenta uma síntese das vantagens e desvantagens associadas ao emprego da circulação natural em reatores nucleares.

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens no uso de sistemas de circulação natural.

Vantagens	Desvantagens
Redução de custos devido à sua simplicidade	Baixa velocidade do fluido
Sem necessidade de máquinas de fluxo (bombas)	Potência máxima por canal reduzida
Potencial para aprimorar a distribuição de vazão no núcleo	Instabilidades potenciais
Melhoria nas características das fases (líquido e vapor) em função da potência	Baixo fluxo de calor crítico
Grande inércia térmica	Necessidade de procedimentos específicos

Fonte: IAEA-TECDOC-1474 (2005)

Em sistemas que empregam fluidos em estado líquido, como a água, é possível se que ocorra a transição de fase líquido-vapor em virtude da magnitude da taxa de transferência de calor, sob condições específicas. A transferência de calor convectiva com mudança de fase manifesta-se quando a temperatura das superfícies em contato com o fluido supera a temperatura de saturação do mesmo. Nesse contexto, diversos padrões de escoamento bifásico podem surgir, incluindo a formação de bolhas (*bubbly flow*), o escoamento anular (*annular flow*), o escoamento pistonado (*slug flow*) e a névoa (*disperse flow*), entre outros. Na Figura 6, são apresentados alguns desses padrões de escoamento bifásico para uma coluna vertical sujeita a um fluxo de calor constante (ANGELO, 2013 apud BRENNEN, 2005).

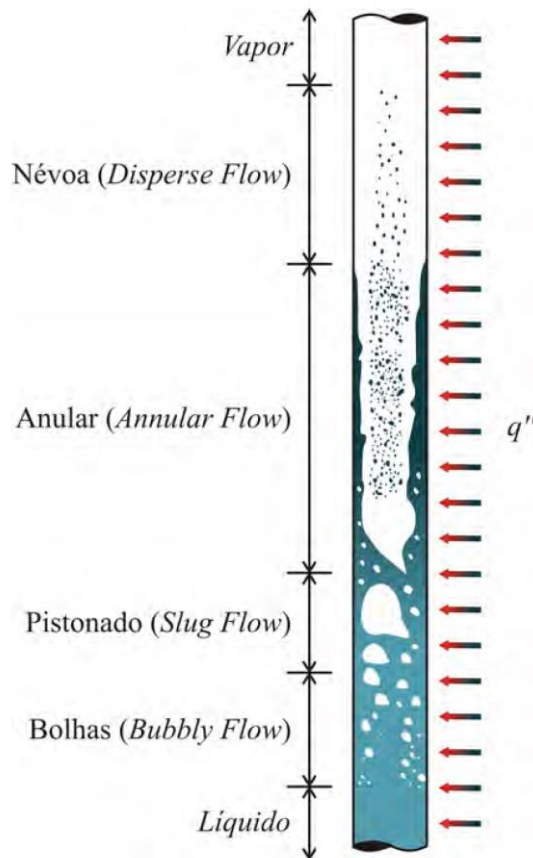


Figura 6 – Padrões de escoamento bifásico para uma coluna de líquido submetido a um fluxo de calor constante.

Fonte: ANGELO (2013).

Diante dos diversos padrões de escoamento que podem ser observados em escoamento bifásicos, neste tipo de escoamento podem existir instabilidades (SCHUSTER et al., 2000; NAYAK e VIJAYAN, 2008), conferindo dinâmica complexa (Belchior Jr. et al., 2000), conforme pode ser observado no gráfico da Figura 7. De acordo com ANGELO (2013), a partir da análise da Figura

7 conclui-se que, para uma região indicada como bifásico instável, a vazão em massa varia com o tempo, de modo aparentemente caótico ou sem tendência clara.

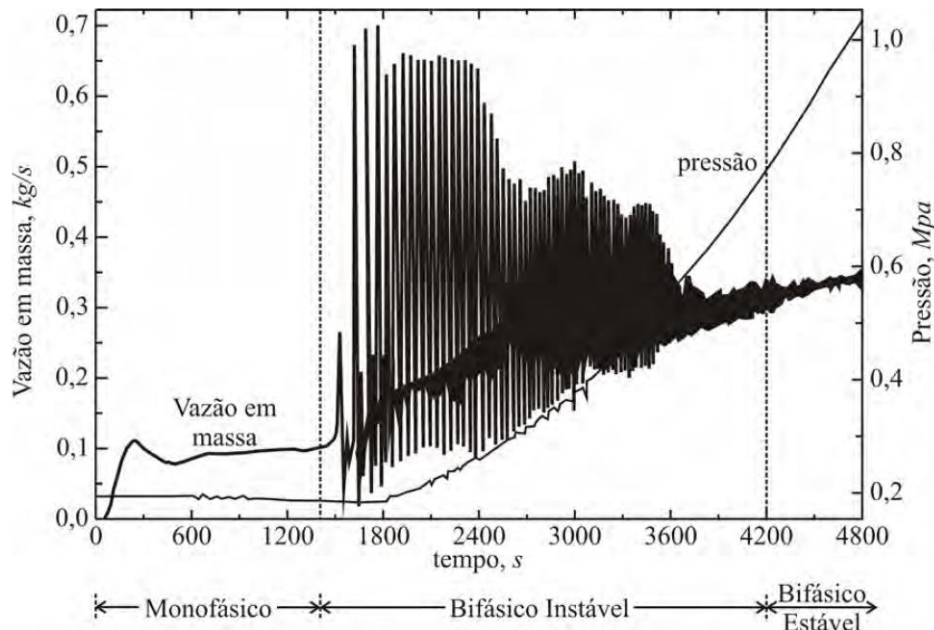


Figura 7 – Dados experimentais realizado no circuito de circulação natural DANTON, localizado na Dresden University of Technology a uma potência de 10kW.

Fonte: ANGELO (2013).

2.2 SMRs DE CIRCULAÇÃO NATURAL EM DESENVOLVIMENTO

De acordo com dados do site *World Nuclear Association*, desde que a geração de energia nuclear se estabeleceu na década de 1950, o tamanho das unidades de reatores cresceu de 60 MWe para mais de 1600 MWe, com economias de escala correspondentes na operação. Ao mesmo tempo, foram construídos centenas de reatores menores para emprego naval (até 190 MW térmicos) e geração de nêutron, gerando uma enorme expertise na engenharia de pequenos reatores de potência e acumulando mais de 12.000 anos de experiência com reatores.

Segundo a IAEA, *Small Modular Reactors (SMRs)*, são reatores nucleares avançados com uma capacidade de potência de até 300 MW(e), cujos componentes e sistemas podem ser fabricados em módulos e, em seguida, transportados como para os locais de instalação conforme a demanda surgir.

A busca pela utilização da circulação natural em reatores nucleares tem contribuído significativamente em dois princípios: econômico e de segurança. No aspecto econômico, a

circulação natural reduz a complexidade e os custos de operação e manutenção, tornando a energia nuclear mais acessível e competitiva. Essa abordagem está alinhada com os objetivos da IAEA, European Utility Requirements (EUR) e Generation IV, que visam desenvolver sistemas nucleares inovadores que sejam economicamente viáveis e padronizados, facilitando a adoção e licenciamento em diferentes países.

Em termos de segurança, os sistemas de circulação natural oferecem uma defesa aprimorada por meio de características inerentemente seguras dos sistemas passivos, que funcionam sem a necessidade de intervenção humana ou de sistemas ativos. A incorporação desses sistemas passivos de segurança não só aumenta a confiabilidade dos reatores, mas também cumpre os princípios básicos de segurança estabelecidos pela IAEA e iniciativas como o *International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles* (INPRO). Na Figura 8 é apresentado no mapa a distribuição de SMRs em desenvolvimento pelo mundo. Observa-se que apenas um reator encontra-se em fase de construção no continente sul-americano, o reator protótipo CAREM, de 27 MWe, que está sendo construído pela Comissão Nacional de Energia Atômica (CNEA) da Argentina e pela empresa INVAP da Argentina.

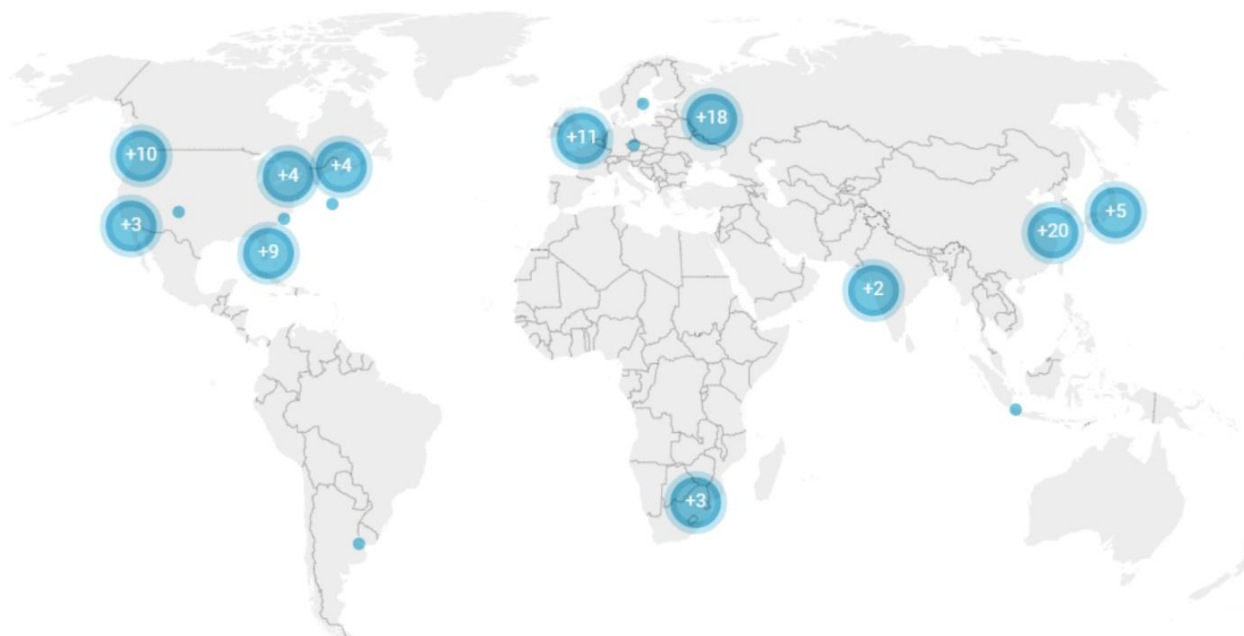


Figura 8 – Distribuição do desenvolvimento de SMRs ao redor do mundo.

Fonte: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors>

A seguir serão apresentados alguns SMRs que operam em circulação natural em construção ou em fase de projeto detalhado, descritos na referência IAEA (2022).

Tabela 2 – Comparação das Principais Características entre os Designs de SMR com refrigeração a água por circulação natural.

Referência	BWRX-300	CAREM	VOYGR (NuScale SMR)
Desenvolvedor da tecnologia/ País de origem	GE-Hitachi Nuclear Energy/ USA & Japan	CNEA/ Argentina	NuScale Power Corporation/ USA
Tipo do reator	BWR	Integral PWR	Integral PWR
Refrigerante/ Moderador	Água leve/ Água leve	Água leve/ Água leve	Água leve/ Água leve
Capacidade térmica MW(t)/ elétrica MW(e)	870 / 270 - 290	100 / ~30	250 / 77 (bruto) por unidade
Pressão do sistema no primário/secundário (MPa)	7,2/ ciclo direto	12,25 / 4,7	13,8 / 4,3
Temperatura de entrada/ saída do núcleo (°C)	270 / 288	284 / 326 (protótipo CAREM 25)	249 / 316
Tipo do combustível/ matriz de montagem	Pastilhas de UO ₂ / quadrada de 10 x 10	Pastilhas de UO ₂ / hexagonal	Pastilhas de UO ₂ / quadrada de 17 x 17
Número de elementos combustíveis	240	61 (protótipo CAREM 25)	37
Enriquecimento do combustível (%)	3,81 (médio) / 4,95 (máximo)	3,1 (protótipo CAREM 25)	≤ 4,95
Queima de combustível (%)	12 - 24	24 (protótipo CAREM 25)	≥ 45
Ciclo do combustível (meses)	49,6	14 (protótipo CAREM 25)	18
Principal mecanismo de controle de reatividade	Barras e absorvedores queimáveis (B ₄ C, Hf, Gd ₂ O ₃)	CRDM (<i>Control rod driving mechanism</i>)	CRDM (<i>Control rod driving mechanism</i>) e boro solúvel
Abordagem para engenharia dos sistemas de segurança	Passivo	Passivo	Passivo
Vida útil (anos)	60	40	60
Área da usina (m ²)	9800	36000 (protótipo CAREM 25)	140000 (modelo VOYGR™_12)
Dimensões do vaso de pressão altura/diâmetro (m)	26 / 4	11 / 3,2 (protótipo CAREM 25)	17,7 / 2,7
Peso do vaso de pressão, componentes internos e gerador de vapor (ton)	485	267 (protótipo CAREM 25)	Não disponível
Critério de projeto Sísmico (SSE)	0,3g	0,25g	0,5
Características distintas	Circulação natural BWR, válvulas de isolamento integral do RPV, condensador de isolamento	Remoção de calor do núcleo por circulação natural, contenção de supressão de pressão.	Tempo ilimitado para resfriamento do núcleo em caso de perda de alimentação, adição de água ou ação do operador
Status do desenvolvimento	Projeto detalhado	Em construção (protótipo CAREM 25)	Revisão regulatória aprovada. Equipamentos em processo de fabricação

Fonte: adaptado de IAEA (2022).

- BWRX-300

O BWRX-300, desenvolvido pela GE-Hitachi Nuclear Energy (GEH), é um pequeno reator modular (SMR) resfriado a água de 300 MWe, utilizando sistemas de segurança baseados em fenômenos naturais. Representando a décima geração de Reactores de Água em Ebulição (BWR), o BWRX-300 é o design mais simples desde que a GE começou a desenvolver reatores nucleares em 1955. Este modelo é uma evolução do Reator de Água em Ebulição Simplificado Econômico (ESBWR) de 1.520 MWe, licenciado pela Comissão Reguladora Nuclear dos EUA (NRC).

As aplicações-alvo do BWRX-300 incluem a geração de eletricidade de base, geração elétrica ajustável entre 50% e 100% da capacidade, aquecimento distrital, produção de combustíveis sintéticos, produção de hidrogênio e outras aplicações de calor de processo. O reator BWRX-300 e alguns componentes podem ser visualizados na Figura 9.

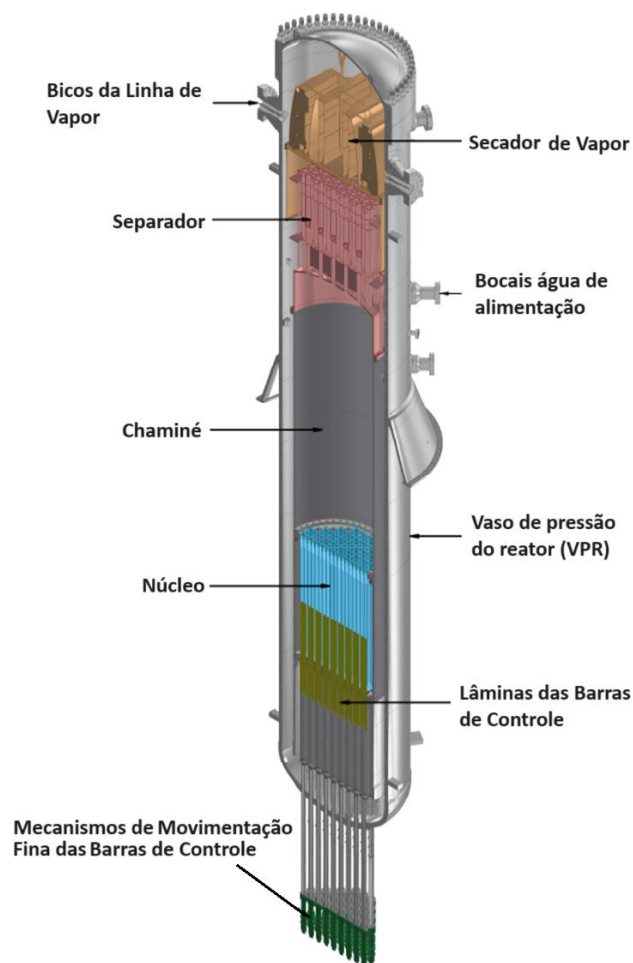


Figura 9 – Ilustração do reator modular BWRX-300 da GE-Hitachi Nuclear Energy (GEH).

Fonte: adaptado de IAEA (2022)

O BWRX-300 aproveita o design aprovado do ESBWR pela NRC, utiliza materiais comprovados, componentes prontos para uso e parâmetros operacionais dentro da base de experiência dos BWRs existentes. Ele emprega um processo robusto e bem definido, guiado por procedimentos, para tomar decisões de design economicamente eficientes. O BWRX-300 está programado para ser implantado a curto prazo, com a unidade líder planejada para iniciar operação comercial em 2028. O reator utiliza uma estratégia de conservação do refrigerante para mitigar acidentes de perda de refrigerante, resultando em estruturas e sistemas significativamente simplificados e com segurança aprimorada.

O NSSS do BWRX-300 aproveita a cadeia de suprimentos comprovada do ABWR e os recursos de segurança baseados em fenômenos naturais do ESBWR. Os componentes deste sistema incluem o Vaso de Pressão do Reator (RPV) e os acionamentos finos de barras de controle (FMCRDs). O NSSS fornece vapor do RPV para a turbina através do sistema de vapor principal, e o sistema de condensado e água de alimentação fornece água de alimentação ao RPV. Ele também oferece proteção contra sobrepressão da barreira de pressão do refrigerante do reator (RCPB).

O núcleo do reator BWRX-300 é organizado como um cilindro vertical contendo conjuntos de combustível dentro da cobertura do núcleo. Durante a operação, o refrigerante/moderador entra na parte inferior do núcleo como água sub-resfriada e sai do núcleo como vapor saturado. O BWRX-300 utiliza combustível GNF2, o mesmo usado pela maioria da frota de BWRs atualmente. O design do combustível GNF2 é uma matriz de 10x10 com 78 barras de combustível de comprimento total, 14 barras de comprimento parcial e dois grandes tubos centrais de água.

O sistema de refrigerante do reator (RCS) é acionado por circulação natural e proporciona resfriamento do núcleo do reator em todos os estados operacionais e todas as condições anormais postuladas. O BWRX-300 aproveita a modelagem de circulação natural e informações operacionais do ESBWR e da Usina Nuclear de Dodewaard, que operava na Holanda.

- CAREM

O reator CAREM é um projeto de SMR que está sendo construído na Argentina, coordenado pela Comissão Nacional de Energia Atômica (CNEA) em parceria com importantes empresas nucleares daquele país. Baseado na tecnologia de reatores de água leve (LWR), o projeto tem como objetivo desenvolver, projetar e construir pequenas usinas nucleares inovadoras que oferecem altos padrões de segurança e competitividade econômica. O CAREM25, um protótipo de demonstração, que foi desenvolvido majoritariamente com tecnologia nacional, com pelo menos 70% de seus componentes e serviços provenientes de empresas argentinas.

Projetado para atender regiões com pequenas demandas de eletricidade, o CAREM também pode apoiar processos de dessalinização de água do mar em áreas costeiras. Este reator opera em um ciclo indireto baseado em circulação natural, o que simplifica o design e melhora o desempenho de segurança. As características principais incluem um sistema de resfriamento primário integrado, auto-pressurização, resfriamento do núcleo por circulação natural, mecanismos de acionamento de barras de controle dentro do vaso e sistemas de segurança passivos.

CAREM é um reator integral onde o sistema primário de alta energia, incluindo o núcleo, geradores de vapor, refrigerante primário e cúpula de vapor, está contido em um único vaso de pressão. A circulação natural resfria o sistema primário, facilitada pela posição dos geradores de vapor acima do núcleo. O refrigerante flui do plenum inferior, através do núcleo, subindo pela chaminé até a cúpula de vapor superior, onde sai através de janelas laterais para a região externa antes de descer pelos geradores de vapor modulares, diminuindo sua entalpia.

O núcleo do protótipo CAREM25 possui conjuntos de combustível de seção transversal hexagonal com 61 unidades, cada uma contendo 108 barras de combustível, 18 tubos-guia e um tubo de instrumentação. O combustível, enriquecido entre 1,8% e 3,1% de UO₂, tem um design de referência para 390 dias de potência total, com substituição de 50% do núcleo. Na Figura 10 pode ser observado uma representação ilustrativa do reator modular protótipo CAREM25 da CNEA.

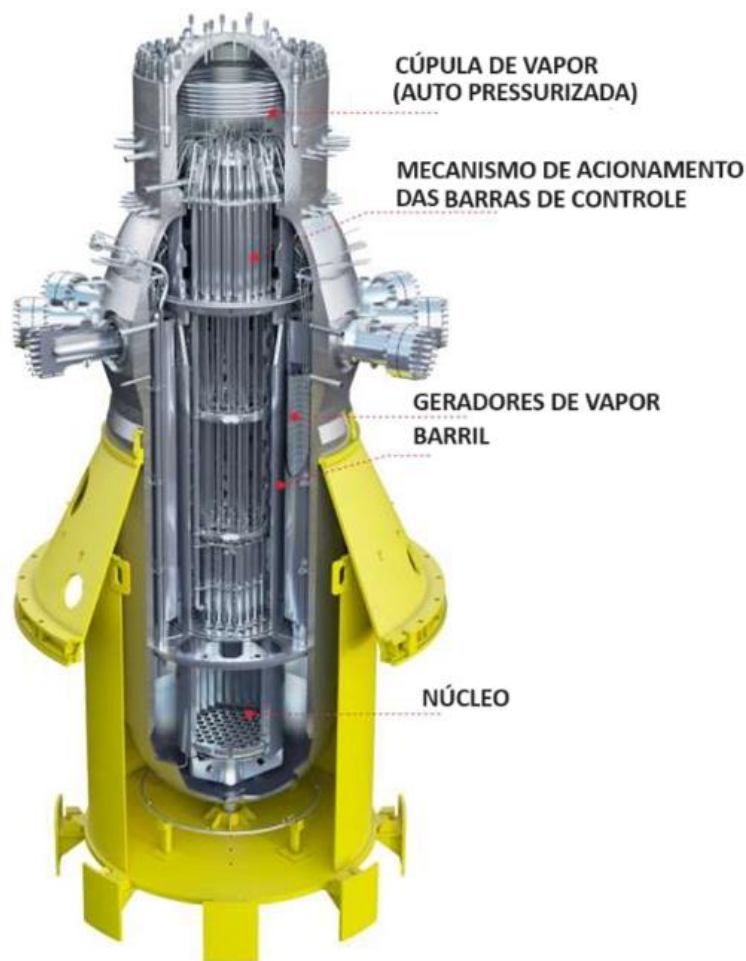


Figura 10 – Ilustração do reator modular CAREM25 da CNEA.

Fonte: adaptado de IAEA (2022)

- VOYGR (antigo NuScale SMR)

O NuScale Power Module™ (NPM) é um reator pressurizado pequeno e resfriado a água leve. As plantas NuScale VOYGR™ SMR são escaláveis e podem ser construídas para acomodar diferentes números de NPMs conforme a demanda de energia do cliente. As plantas padrão incluem o VOYGR-4 com 308 MW(e), o VOYGR-6 com 462 MW(e) e o VOYGR-12 com 924 MW(e). A configuração de seis módulos é a referência para o design e licenciamento da planta padrão. Cada NPM é um módulo autônomo que opera independentemente dos outros em uma configuração multi-módulo, sendo todos controlados a partir de uma única sala de controle.

O design NuScale é um reator modular para produção de eletricidade, com capacidade para operações flexíveis e aplicações de calor de processo não elétricas, incluindo cogeração de calor e eletricidade. Ele adota simplificações de design, tecnologia comprovada de reator de

água leve, sistema modular de fornecimento de vapor nuclear, módulos de energia fabricados em fábrica e sistemas de segurança passivos que permitem resfriamento ilimitado do reator após um acidente além da base de design, sem necessidade de energia AC ou DC, ação do operador ou água de reposição. Não há acidentes de base de design que exponham o núcleo ou exijam ação do operador.

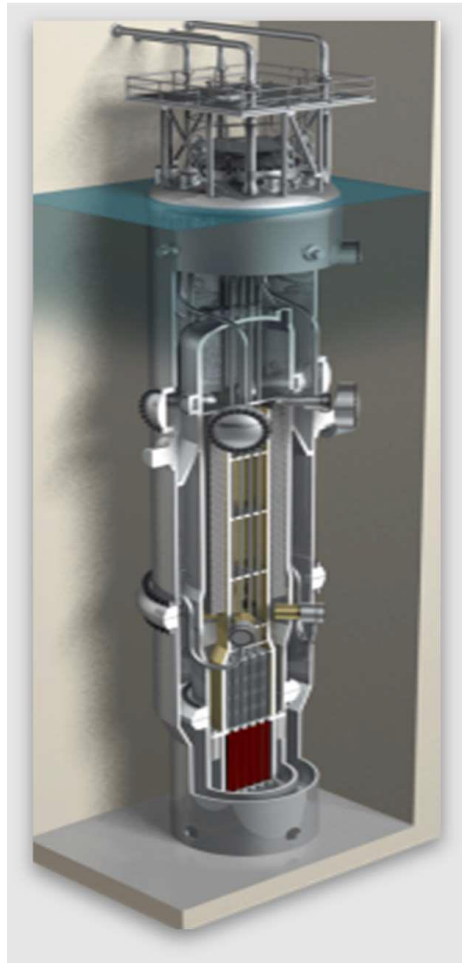


Figura 11 – Ilustração de um módulo VOYGR™ da NuScale Power Corporation.

Fonte: adaptado de IAEA (2022)

O NSSS do NPM inclui um núcleo de reator, geradores de vapor em espiral e um pressurizador dentro de um vaso de pressão do reator (RPV). O NSSS é fechado em um vaso de contenção cilíndrico que fica na estrutura da piscina do reator. Cada módulo de energia está conectado a uma unidade dedicada de turbina-gerador e sistemas de equilíbrio de planta.

O núcleo do NPM consiste em 37 conjuntos de combustível e 16 conjuntos de barras de controle. O design dos conjuntos de combustível é um arranjo 17 x 17 aprovado e disponível

comercialmente, com 24 locais de tubos-guia para os dedos das barras de controle e um tubo central de instrumentos. O conjunto de combustível tem altura nominalmente metade da altura do combustível das plantas padrão e é suportado por cinco grades espaçadoras. O combustível é UO_2 com Gd_2O_3 como absorvedor queimável misturado homoganeamente dentro do combustível em locais selecionados. O enriquecimento de Urânio-235 é de até 4,95%.

O sistema de refrigeração do reator (RCS) proporciona a circulação do refrigerante primário usando circulação natural, eliminando a necessidade de bombas de refrigerante do reator ou de um sistema de tubulação externa para gerar fluxos operacionais. O RCS inclui o vaso de pressão do reator (RPV) e pressurizador integral, os componentes internos do vaso do reator, válvulas de segurança do reator, tubulação do RCS dentro do vaso de contenção, entre outros. Cada NPM utiliza dois geradores de vapor em espiral de passagem única entrelaçados para produção de vapor. Os geradores de vapor estão localizados no espaço anular entre o riser da perna quente e a parede interna do RPV. Na Figura 12 tem-se uma vista em corte de uma usina da NuScale Power Corporation que pode ser escalável até 12 módulos operacionais de produção independente de energia, totalizando 942 MWe.

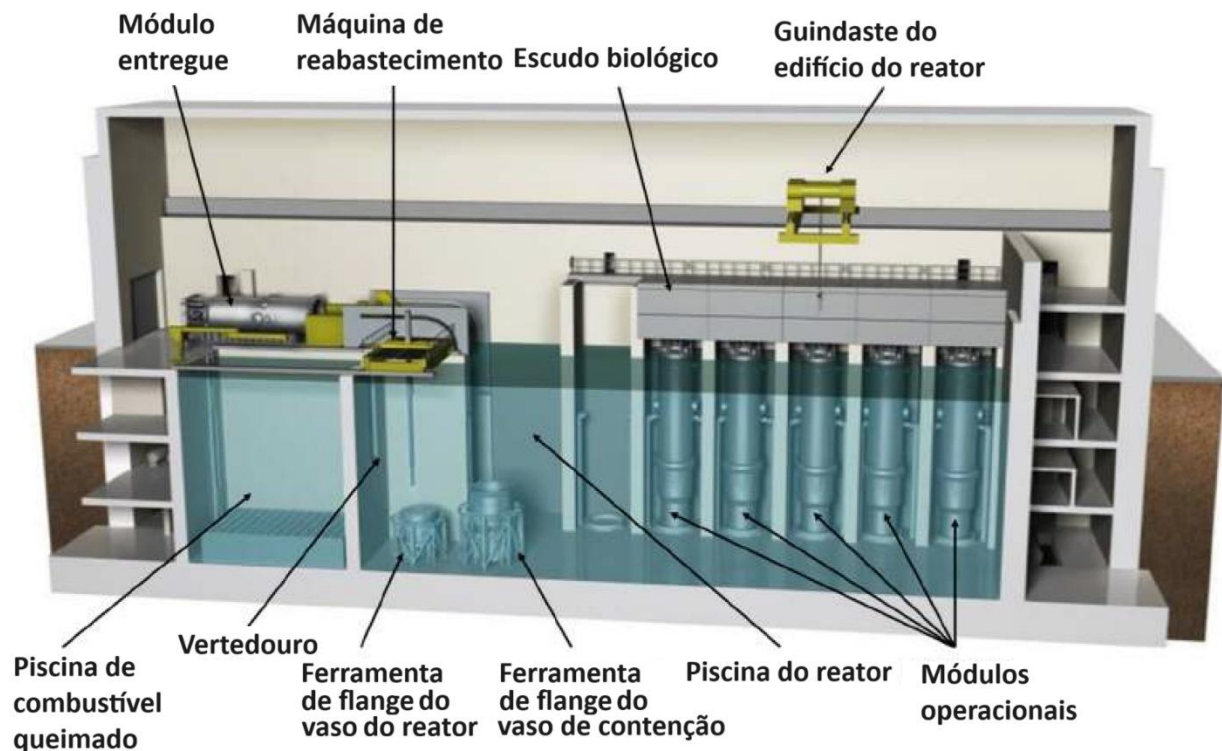


Figura 12 – Vista em corte de uma usina VOYGR-12 da NuScale Power Corporation.

Fonte: adaptado de IAEA (2022)

2.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção serão apresentados os trabalhos científicos desenvolvidos ao longo dos anos envolvendo a fenomenologia da circulação natural. Para isso dividiremos este tópico em duas partes: no tópico 2.3.1 serão reunidos os trabalhos que apresentaram revisões teóricas e experimentais de circuitos de circulação natural em regime de escoamento monofásico e bifásico; e no tópico 2.3.2 serão apresentados os principais trabalhos de revisão da literatura em circulação natural sobre inclinação da plataforma.

2.3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE CIRCULAÇÃO NATURAL

A principal vantagem de utilização da circulação natural tem motivado inúmeros pesquisadores para aplicação em resfriamento de reatores nucleares. A dispensa de dispositivos ativos para a movimentação do fluido apresenta-se como uma solução atrativa, tanto economicamente, mas especialmente no contexto da segurança intrínseca para refrigeração do núcleo de um reator nuclear e ou remoção do calor residual. Serão apresentados a seguir os principais trabalhos envolvendo circulação natural até o presente momento.

No levantamento bibliográfico realizado por FRENZEL (2023) dos trabalhos que estudaram a fenomenologia da circulação natural em circuitos simples, foram tomados os trabalhos de VIJAYAN e NAYAK (2010) e de AHMED et al. (2020), para organização de uma tabela cronológica dos trabalhos mais relevantes no escopo da circulação natural. No presente trabalho, a Tabela 3, originalmente organizada por FRENZEL (2023), foi revisada e atualizada para inclusão de outras referências consideradas importantes no domínio da circulação natural. Esses trabalhos estão sintetizados de maneira concisa e são apresentados os principais aspectos de cada estudo.

Tabela 3 – Principais trabalhos sobre Circulação Natural em regimes monofásicos e bifásicos.

Referência	Título	Escoamento	Tópicos de interesse	Ano
ALSTAD et al.	<i>Transient behavior of single-phase natural-circulation loop systems</i>	Monofásico	- Estado transiente; - Análise numérica com diferenças finitas; - Análise teórica e experimental.	1956
KELLER	<i>Periodic oscillations in a model of thermal convection</i>	Monofásico	- Modelagem analítica e numérica; - Análise teórica da CN.	1966

Tabela 3 – Principais trabalhos sobre Circulação Natural em regimes monofásicos e bifásicos.

Referência	Título	Escoamento	Tópicos de interesse	Ano
WELANDER	<i>On the oscillatory instability of a differentially heated fluid loop.</i>	Monofásico	- Modelagem analítica da CN.	1967
ZVIRIN	A review of natural circulation loops in pressurized water reactors and other systems	Monofásico	- Modelagem analítica e numérica; - Transientes e estabilidade; - Efeitos dos parâmetros geometria, propriedades do fluido e condições iniciais e de contorno circuitos de CN. - Análise teórica e experimental.	1982
HUANG e ZELAYA	<i>Heat transfer behavior of a rectangular thermosyphon loop</i>	Monofásico	- Estudo do desempenho térmico de um loop termossifão retangular. - Análise teórica e experimental.	1988
GREIF	<i>Natural Circulation Loops</i>	Monofásico	- Análise numérica para solução das equações governantes por diferenças finitas; - Transientes e estabilidade; - Análise teórica e experimental de CN de um loop toroidal.	1988
MARTIN e TAYLOR	<i>Benchmarking assessment of RELAP5/MOD3 for the low flow and natural circulation experiment at the WSRC</i>	Monofásico e Bifásico	- RELAP5; - Análise teórica e experimental.	1992
AMBROSINI e FERRERI	<i>The effect of truncation error on the numerical prediction of linear stability boundaries in a natural circulation single-phase loop</i>	Monofásico	- RELAP5; - Método de diferenças finitas; - Erro de truncamento.	1998
SHARMA et al.	<i>Simulation of single phase instability behaviour in a rectangular natural circulation loop using RELAP5/MOD3.2 computer code</i>	Monofásico	- RELAP5; - Fluxo crítico de calor; - Transiente oscilatório.	2002
MOUSAVIAN et al.	<i>Transient and stability analysis in single-phase natural circulation</i>	Monofásico	- RELAP5; - Método de diferenças finitas; - Estado estacionário e transiente.	2004
GARTIA, VIJAYAN e PILKHWAL	<i>A generalized flow correlation for two-phase natural circulation loops</i>	Bifásico	- RELAP5; - Método de diferenças finitas; - Estado estacionário e transientes.	2006
VIJAYAN et al.	<i>Effect of Loop Diameter on the Steady State and Stability Behaviour of Single-Phase and Two-Phase Natural Circulation Loops</i>	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; - Variação de potência; - Análise teórica e experimental.	2010
ANGELO et al.	<i>A numerical and three-dimensional analysis of steady state rectangular natural circulation loop</i>	Monofásico	- ANSYS-CFX®; - Análise numérica tridimensional; - Análise teórica e experimental.	2012

Tabela 3 – Principais trabalhos sobre Circulação Natural em regimes monofásicos e bifásicos.

Referência	Título	Escoamento	Tópicos de interesse	Ano
MANGAL, JAIN e NAYAK	<i>Capability of the RELAP5 code to simulate natural circulation behavior in test facilities</i>	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	<i>Two-phase flow instabilities: A review</i>	Bifásico	- Instabilidades; - Análise teórica e experimental.	2014
MISAEEL	<i>Experimental study on the influence of power steps on the thermohydraulic behavior of a natural circulation loop</i>	Monofásico	- Variação de potência; - Inércia térmica.	2016
BRAZ FILHO et al.	<i>Assessment of RELAP5 matrix solvers for a two-phase natural circulation loop</i>	Bifásico	- RELAP5; - Transientes; - Solucionadores de equações livres.	2017
VINHAS	Simulação computacional de um circuito de circulação natural utilizando código RELAP5	Monofásico e Bifásico	- RELAP5; - Análise teórica e experimental.	2018
FRENZEL e SABUNDJIAN	Experimentos no circuito de circulação natural e simulação numérica com o código RELAP5/MOD3.3	Monofásico e Bifásico	- RELAP5; - Análise teórica e experimental.	2023

Fonte: autor da dissertação.

ALSTAD et al. (1956) propuseram um método para prever a temperatura e a vazão em circuitos de circulação natural em regime monofásico, utilizando 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, demonstrando que o método é satisfatório na previsão do comportamento transitório do escoamento para aplicações em engenharia. Em outras palavras, o método proposto por ALSTAD et al. (1956) é capaz de prever com precisão a temperatura e a vazão em circuitos de circulação natural em regime monofásico, o que é útil para aplicações em engenharia.

No trabalho de KELLER (1966), foram identificadas oscilações periódicas em um modelo unidimensional de convecção térmica. O modelo consiste em um tubo preenchido com fluido, dobrado em forma retangular e posicionado em um plano vertical. O fluido é aquecido no centro do segmento horizontal inferior e resfriado no centro do segmento horizontal superior. Quando um determinado parâmetro excede a unidade, é observada uma movimentação

periódica do fluido, na qual o fluxo está sempre na mesma direção, porém a velocidade varia. A inércia é irrelevante para essa oscilação, que depende da interação entre as forças de atrito e flutuação. Este estudo contribuiu significativamente para a compreensão dos fenômenos de convecção térmica e suas implicações em diversas áreas da física e da engenharia.

No estudo de WELANDER (1967), foi realizada uma discussão teórica sobre o movimento de um fluido contido em um tubo que forma um circuito fechado, aquecido de baixo e resfriado de cima, em continuidade ao trabalho realizado por KELLER (1966). O sistema tem uma solução estável que pode se tornar instável de maneira oscilatória. Essas oscilações irregulares estão associadas a anomalias térmicas no fluido que são transportadas materialmente ao redor do circuito. A curva de estabilidade neutra é trabalhada como uma função de dois parâmetros do problema, uma gravidade adimensional e um coeficiente de atrito adimensional. A instabilidade também foi estudada por meio da integração numérica direta das equações do modelo. É sugerido que o mecanismo de instabilidade encontrado para este modelo também opera em sistemas mais complicados.

ZVIRIN (1982) e GREIF (1988) escreveram dois artigos relevantes de revisão do fenômeno de circulação natural. Seus trabalhos apresentam experiências e circuitos teóricos de circulação natural para um fluxo em regime monofásico. Estes artigos discutem métodos analíticos e numéricos para diferentes desenhos de circuitos como: (i) geometrias simples; (ii) pequena escala sistemas; (iii) reatores nucleares e (iv) termossifões.

ZVIRIN (1982) apresentou uma revisão abrangente da literatura sobre circuitos de circulação natural em regime monofásico, incluindo métodos teóricos e experimentais disponíveis para descrever os sistemas. Foram discutidas as características de fluxo estacionário, transientes e de estabilidade, bem como os efeitos de parâmetros como geometria, propriedades do fluido e condições iniciais e de contorno. Em suas conclusões, ZVIRIN (1982) avaliou o desempenho de sistemas de conversão de energia com fluxos de circulação natural, sua estabilidade e a precisão dos métodos de modelagem teórica em comparação com os dados experimentais disponíveis.

Ainda de acordo com ZVIRIN (1982) os circuitos de circulação natural podem representar sistemas eficazes para a transferência de calor. Foi constatado que a utilização de modelos unidimensionais e correlações para determinação do fator de atrito revelou discrepâncias da

ordem de 30% em relação aos dados experimentais. Além disso, ZVIRIN (1982) sugeriu a adoção de modelos tridimensionais como meio de contabilizar efeitos observados de forma clara em experimentos, e propôs a realização de experimentos mais sofisticados, visando obter perfis transversais de velocidade e temperatura de maneira mais precisa.

Neste trabalho, HUANG e ZELAYA (1988) investigaram o desempenho térmico de um loop termossifão retangular, empregando uma abordagem unidimensional e uma correlação empírica para o coeficiente global de transferência de calor. Eles demonstraram que essa metodologia foi capaz de prever com precisão o desempenho do loop em estado estacionário ou próximo a ele, ao substituir o comprimento geométrico pelo comprimento efetivo no cálculo do atrito do loop. Além disso, obtiveram uma solução para o fluxo de circulação natural em estado estacionário que apresentou concordância satisfatória com os resultados experimentais. Essas descobertas contribuem para o avanço do entendimento e da modelagem de sistemas de circulação natural, com potenciais aplicações em coletores solares termossifão, sistemas de resfriamento de reatores e equipamentos industriais similares.

No trabalho de GREIF (1988), foi realizado um estudo numérico do comportamento transitório e de estabilidade de um loop toroidal, utilizando um método de diferenças finitas para resolver as equações governantes. Os resultados apresentaram a distribuição de temperatura em diferentes momentos para condições estáveis, bem como a variação de velocidade para diferentes condições iniciais. Além disso, foi observado que cálculos precisos para a transferência de calor requerem análises tridimensionais. Concluiu em seu trabalho que a estabilidade do loop toroidal pode ser estudada numericamente, e que a compreensão do comportamento transitório é crucial para o projeto e operação eficientes de sistemas de transferência de calor baseados em loops naturais de circulação.

MARTIN E TAYLOR (1992) conduziram uma avaliação rigorosa do código RELAP5/MOD3, comparando-o com dados experimentais derivados de 24 testes distintos em um circuito específico, visando estudar escoamentos monofásicos e bifásicos, circulação natural e forçada, além de fluidos aquecidos e não aquecidos. Os resultados obtidos foram, em geral, satisfatórios, especialmente no que se refere à predição dos comportamentos do escoamento em circulação natural e forçada. No entanto, foram identificadas discrepâncias notáveis ao comparar os dados experimentais com os resultados gerados pelo RELAP5/MOD3. Essas discrepâncias foram

atribuídas a deficiências na modelagem da geometria, na representação de fenômenos multidimensionais e nos efeitos da fricção da tubulação.

AMBROSINI e FERRERI (1998) realizaram uma análise abrangente dos efeitos do erro de truncamento na aplicação do método de diferenças finitas para avaliar a estabilidade da circulação natural em um circuito operando no regime monofásico. Neste estudo, diferentes esquemas numéricos foram empregados e uma variedade de modelagens foram simuladas e subsequentemente comparadas com dados experimentais. A pesquisa revelou que a escolha do passo de tempo e da discretização espacial pode ter um impacto significativo nos erros de truncamento, os quais, por sua vez, podem influenciar a estabilidade em certos problemas de circulação natural. Notavelmente, foi observado que as equações de segunda ordem tendem a apresentar maior convergência e precisão em comparação com os métodos de primeira ordem.

SHARMA et al. (2002) desenvolveu um modelo de um circuito de circulação natural retangular usando o código RELAP5/MOD3.2. O objetivo do seu trabalho foi simular o comportamento transitório oscilatório que ocorre no circuito quando o escoamento é monofásico, considerando que circuitos de circulação natural apresentam zonas instáveis durante a fase inicial do aumento da potência do sistema. Os resultados obtidos pelo modelo foram confrontados com dados experimentais, demonstrando que o RELAP5/MOD3.2 foi capaz de reproduzir satisfatoriamente as características do escoamento oscilatório, bem como as condições de estabilidade e instabilidade do circuito. Além disso, o estudo forneceu uma análise detalhada dos fatores que influenciam o comportamento transitório oscilatório, tais como a geometria do circuito, o número de Reynolds, o número de Grashof e o coeficiente de expansão térmica do fluido. Portanto, o trabalho de Sharma et al. (2012) é uma referência importante para pesquisadores e profissionais que atuam na área de modelagem de escoamentos em circulação natural.

MOUSAVIAN et al. (2004) desenvolveu um modelo de um circuito de circulação natural retangular operando em regime monofásico, utilizando três métodos distintos: análise não-linear pelo método de diferenças finitas, análise linear pelo método de perturbação e análise pelo código RELAP5/MOD3.2. O objetivo deste trabalho foi comparar a eficácia e a precisão desses métodos na modelagem do escoamento e da transferência de calor no circuito. Os resultados obtidos pelos três métodos foram consistentes entre si e concordaram bem com os

dados experimentais, demonstrando que os três métodos são adequados para a modelagem de circuitos de circulação natural em regime monofásico. Além disso, o estudo forneceu uma análise detalhada das vantagens e desvantagens de cada método, considerando aspectos como a complexidade, o tempo de computação, a sensibilidade aos parâmetros e a robustez.

GARTIA, VIJAYAN e PILKHWAL (2006) propuseram uma correlação de vazão para estimar o fluxo bifásico em estado estacionário. Para isso, eles resolveram as equações de Navier-Stokes para a quantidade de movimento, a energia e a massa no estado estacionário unidimensional, considerando a circulação natural em regime bifásico. A partir dessas equações, eles obtiveram a vazão adimensional em função do número de Grashof e de um parâmetro geométrico que caracteriza o circuito. A correlação proposta foi validada por meio da comparação com dados experimentais e com resultados gerados pelo código RELAP5/MOD3.2 para cinco circuitos diferentes. Os resultados mostraram uma boa concordância entre a correlação e os dados, indicando que a correlação é capaz de estimar o fluxo bifásico em estado estacionário com precisão e eficiência.

VIJAYAN et al. (2008) realizaram uma análise teórica e experimental da influência do diâmetro da tubulação na estabilidade de um circuito de circulação natural em estado estacionário, considerando os regimes monofásicos e bifásicos. Para o escoamento monofásico, eles estudaram quatro circuitos com tubulações de diferentes diâmetros, demonstrando que circuitos com diâmetros menores são mais estáveis do que os que possuem diâmetros maiores. Para o escoamento bifásico, eles analisaram cinco circuitos, demonstrando que, diferentemente do regime monofásico, o aumento do diâmetro tende a aumentar a estabilidade. O estudo também mostrou que diâmetros menores apresentam maior risco de ocorrer burnout e fluxo crítico de calor. Este estudo representa uma contribuição importante para a modelagem de circuitos de circulação natural, especialmente em contextos que envolvem o estado estacionário. Através da análise teórica e experimental, foi possível obter resultados relevantes e confiáveis, que podem auxiliar na compreensão e no controle dos efeitos do diâmetro da tubulação na estabilidade do escoamento.

SABUNDJIAN et al. (2010) realizaram a simulação de alguns experimentos com diferentes níveis de potência no aquecedor, considerando os regimes monofásico e bifásico, no mesmo circuito de circulação natural que é objeto deste trabalho, porém sem as melhorias

efetivadas por FRENZEL (2023). Os dados experimentais obtidos foram confrontados com a modelagem teórica feita com o código RELAP5/MOD3.2, a fim de avaliar a precisão e a confiabilidade do código. Os resultados mostraram que o código foi capaz de reproduzir satisfatoriamente os fenômenos de escoamento e de transferência de calor observados nos experimentos. Este estudo representou uma contribuição relevante para a modelagem de circuitos de circulação natural, especialmente em contextos que envolvem diferentes níveis de potência e regimes de escoamento. Através da simulação de alguns experimentos e da comparação com a modelagem teórica, foi possível obter resultados consistentes e válidos, que podem auxiliar na compreensão e no aprimoramento desses circuitos.

ANGELO et al. (2012) apresenta uma análise numérica tridimensional de um CCN retangular em estado estacionário. O objetivo do estudo foi avaliar a eficiência do modelo numérico em capturar os efeitos tridimensionais do escoamento, como a formação de estruturas de vórtice e efeitos de turbilhonamento. Os resultados numéricos foram comparados com dados experimentais e mostraram boa concordância. No entanto, a simplificação geométrica e as condições de contorno impostas no trocador de calor superestimaram a taxa geral de transferência de calor. Os autores sugeriram que o acoplamento entre modelos unidimensionais e tridimensionais poderia ser uma alternativa viável para reduzir o número de elementos em simulações tridimensionais e estudar a dinâmica global do fluxo.

No IPEN, muitos trabalhos têm sido realizados buscando analisar o fenômeno de circulação natural onde têm se observando uma coerência entre os resultados experimentais e numéricos obtidos pelo RELAP5. Tem se verificado uma expressiva quantidade de trabalhos científicos na literatura que utilizarão o software comercial ANSYS-CFX® para simulação numérica e comparação com os resultados experimentais. No diagrama esquemático do CCN do CEENG/IPEN mostrado na Figura 13, obtida do trabalho de ANGELO et al. (2012), é possível visualizar detalhadamente os componentes que compõem o CCN, ainda sem a inclusão do medidor de fração de vazio desenvolvido por ROCHA (2005) e implementado por FRENZEL (2023).

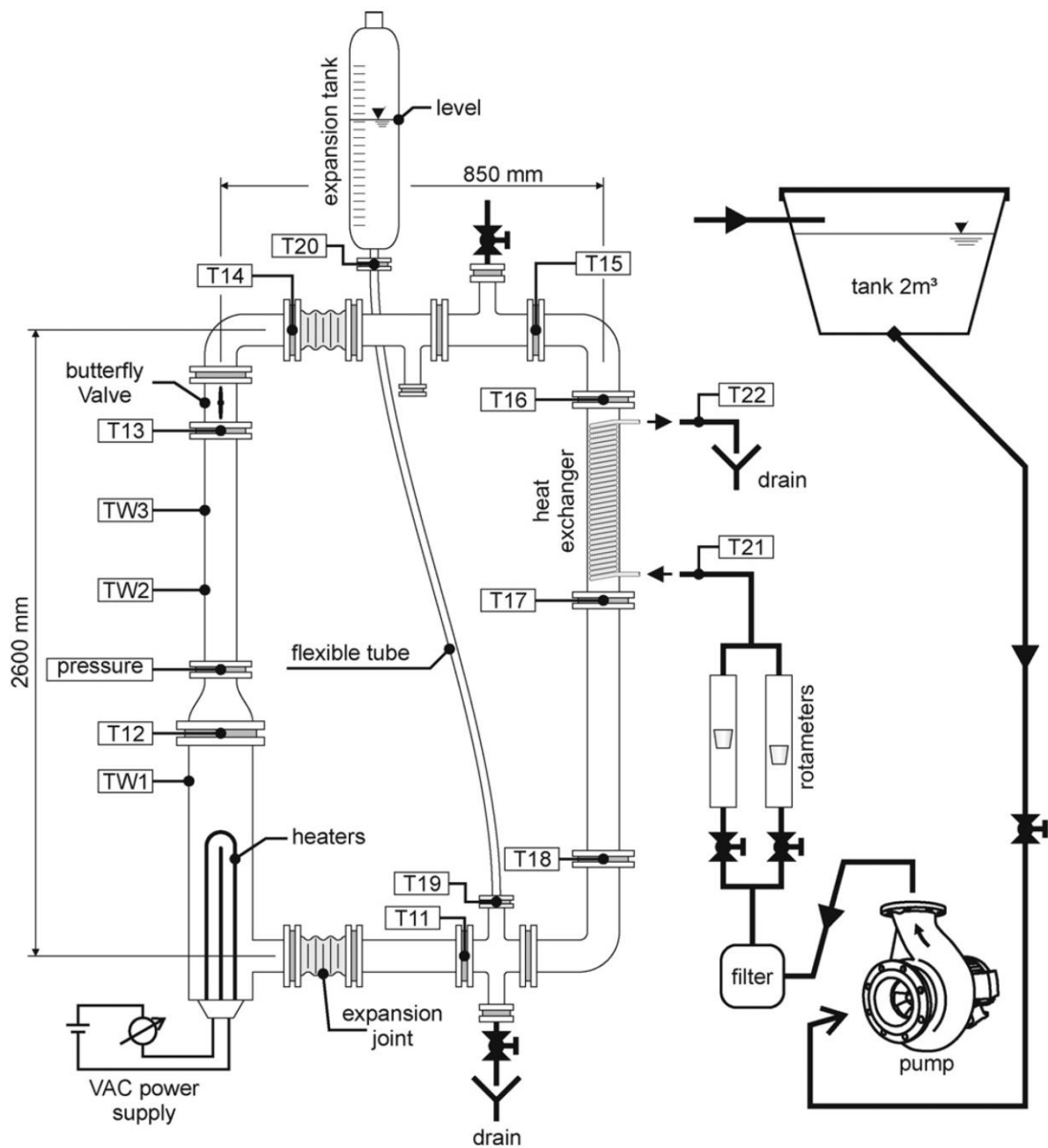


Figura 13 – Diagrama esquemático do CCN do CEENG/IPEN.

Fonte: ANGELO et al. (2012).

MANGAL, JAIN e NAYAK (2012) desenvolveram um modelo de dois circuitos distintos, um de alta pressão e outro de canal paralelo, usando o código RELAP5/MOD3.2. O objetivo deste trabalho foi comparar os resultados gerados pelo código com os dados experimentais, considerando o comportamento dos circuitos de circulação em termos de estabilidade, estado estacionário e transiente. Os dados experimentais foram obtidos para uma variedade de condições de pressão, potência e resfriamento. O código RELAP5/MOD3.2 foi empregado para

prever as características transitórias da circulação natural nas condições monofásica e bifásica, bem como a amplitude e a frequência das oscilações para diferentes condições de operação dos circuitos. Os resultados obtidos pelo código mostraram uma grande sensibilidade em relação à nodalização, isto é, a forma como o circuito é dividido em segmentos para a aplicação das equações. A predição feita pelo RELAP5/MOD3.2 nos experimentos em regime monofásico foi satisfatória, indicando que o código foi capaz de reproduzir com precisão o escoamento e a transferência de calor no circuito. No entanto, no regime bifásico, o código apresentou uma razoável concordância com os dados experimentais para o circuito de alta pressão, mas mostrou diferenças significativas para o circuito de canal paralelo, sugerindo que o código tem limitações para representar o escoamento bifásico em canais paralelos.

RUSPINI, MARCEL e CLAUSSE (2014) realizaram uma revisão abrangente das instabilidades que afetam os escoamentos bifásicos, abordando resultados experimentais e analíticos de diversos estudos na literatura. O objetivo deste trabalho foi apresentar uma síntese dos principais mecanismos e fatores que causam as instabilidades em escoamentos bifásicos, tais como oscilações de ondas de densidade, quedas de pressão, oscilações térmicas, entre outros. A revisão também forneceu uma classificação das instabilidades em escoamentos bifásicos, considerando aspectos como a geometria do circuito, o regime de escoamento, o tipo de fluido, o modo de aquecimento e resfriamento, entre outros. Além disso, a revisão discutiu as implicações das instabilidades em escoamentos bifásicos para o desempenho e a segurança de sistemas térmicos e nucleares, bem como as possíveis estratégias para mitigar ou controlar essas instabilidades.

MISALE (2016) conduziu uma investigação detalhada sobre o comportamento do escoamento monofásico em um circuito de circulação natural retangular. Através de uma série de experimentos com potência constante ou variável, foi observado que todos os experimentos apresentaram instabilidades térmicas. Além disso, a amplitude e a frequência das oscilações aumentaram proporcionalmente ao aumento da potência fornecida ao sistema. O estudo também revelou como a inércia térmica do circuito pode influenciar o comportamento termo-hidráulico do sistema. Foi observado que intervalos de tempo curtos na redução da potência são compensados pela inércia térmica. No entanto, para intervalos de tempo superiores a 450 segundos, os efeitos da inércia térmica do circuito tornam-se insignificantes.

BRAZ FILHO et al. (2017) realizou uma avaliação abrangente do solucionador de equações lineares dos códigos RELAP5/MOD3.3 e RELAP5-3D, considerando condições transientes para o escoamento bifásico em um circuito de circulação natural retangular. Nesta avaliação, foram apresentadas três abordagens distintas de solucionadores de equações lineares para o modelo hidrodinâmico: o solucionador de matriz baseado 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 fins de comparação, foi analisado um circuito experimental de circulação natural, construído com tubos de vidro e utilizando água como fluido de trabalho, similar ao CCN objeto da simulação deste trabalho. Todos os solucionadores do RELAP5 foram capazes de prever o início da ebulição nucleada observada durante o experimento, bem como a representação das oscilações do fluxo ao longo do circuito.

Além disso, o trabalho de BRAZ FILHO et al. (2017) revelou que a escolha do algoritmo do solucionador tem uma forte influência na predição dos fenômenos de circulação natural bifásica. Diferentes comprimentos de onda e amplitudes de instabilidades de fluxo foram obtidos para cada abordagem, destacando a importância da seleção apropriada do solucionador para a precisão e a confiabilidade das simulações.

VINHAS (2018) realizou uma investigação detalhada sobre os 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 obtidos foram confrontados com os resultados da simulação do código RELAP5/MOD3.2, a fim de avaliar 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 foi capaz de prever de forma geral o comportamento do escoamento, tanto monofásico quanto bifásico. No entanto, as instabilidades características da circulação natural não foram bem representadas pelos métodos numéricos utilizados, indicando que o código tem limitações para reproduzir esses fenômenos.

2.3.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE CIRCULAÇÃO NATURAL SOB CONDIÇÕES DE INCLINAÇÃO DA EMBARCAÇÃO

Nesta seção, apresentamos uma revisão bibliográfica sobre circulação natural em sistemas com inclinação da plataforma. Antes de adentrar na revisão da literatura sobre circulação natural sob os efeitos de inclinação da embarcação, serão apresentados os principais movimentos possíveis nos seis graus de liberdade.

Um submarino em movimento pelos oceanos possui seis graus de liberdade, resultando em seis componentes distintos. Esses seis componentes são convencionalmente definidos como: Deslocamento ou avanço (surge) é o movimento para frente e para trás ao longo do eixo X, rebatimento (sway) é o movimento de oscilação para bombordo e boreste ao longo do eixo Y e arfagem (heave) é o movimento para cima e para baixo ao longo do eixo Z. O rolamento (roll) é a rotação em torno do eixo longitudinal (X), o caturro (pitch) é a rotação em torno do eixo transversal (Y) e o cabeceio (yaw) é a rotação em torno do eixo vertical (Z). Na Figura 14, tem-se uma representação esquemática dos movimentos em seus respectivos graus de liberdade para um submarino.

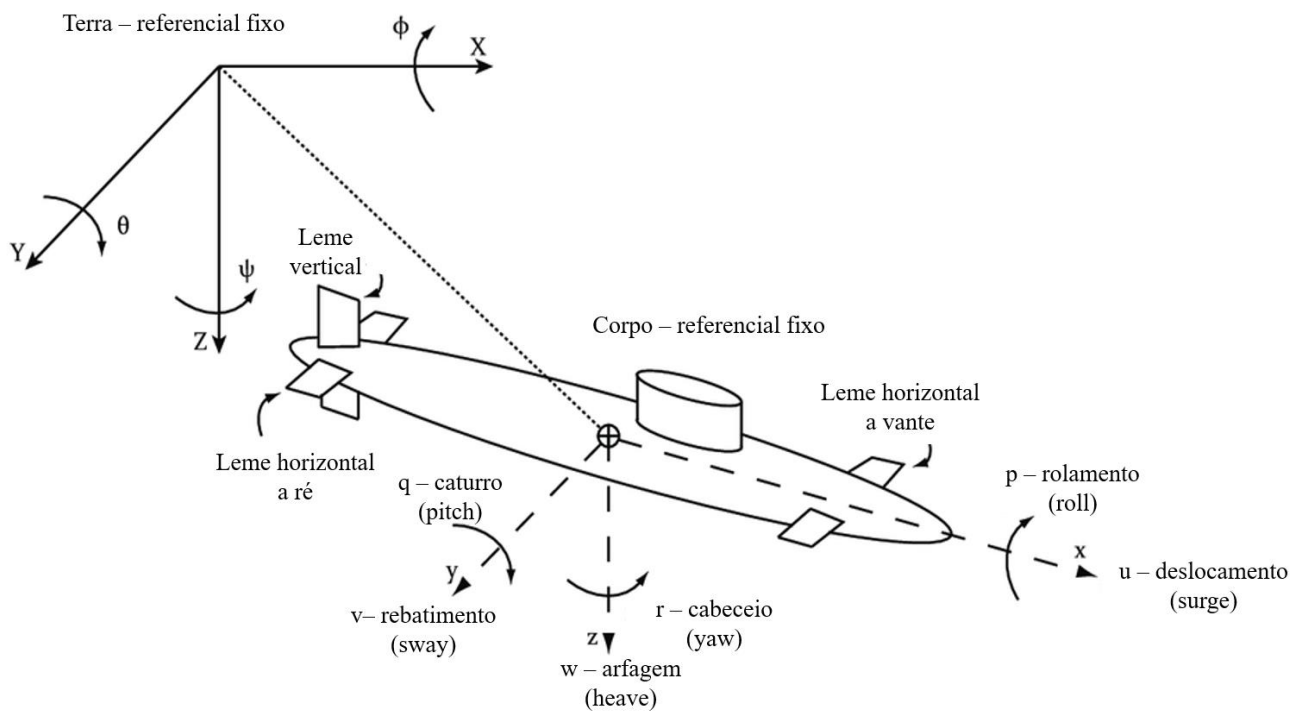


Figura 14 – Diagrama esquemático dos graus de liberdade e movimentos em um submarino.

Fonte: LESSAGE et al. (2011), adaptado.

As notações utilizadas para estudar inclinações do CCN que serão utilizadas neste trabalho são baseadas na tese de THUNÉ (2015) e estão detalhadas Tabela 4. As três primeiras coordenadas e suas derivadas temporais correspondentes na Tabela 4 referem-se aos movimentos de posição e translação ao longo dos eixos x , y e z . As últimas três correspondem aos ângulos de orientação e aos movimentos rotacionais, respectivamente. Ao analisar os movimentos, é conveniente definir dois sistemas de coordenadas: os referenciais fixos ao corpo e fixos à terra. O referencial fixo ao corpo está vinculado à embarcação em movimento em sua origem \oplus , frequentemente escolhida para coincidir com o centro de gravidade (CG) da embarcação. Os eixos do corpo X , Y e Z são definidos como o eixo longitudinal, eixo transversal e eixo vertical, respectivamente. Os eixos e os movimentos apresentados no esquema da Figura 4, podem ser visualizados em seus respectivos planos na Figura 15.

Tabela 4 – Notações para as forças/momentos de seis graus de liberdade, velocidade linear/angular, posição e ângulos de Euler.

Graus de liberdade	Descrição	Forças e momentos	Velocidade linear e angular	Posição e ângulos de Euler
1	Deslocamento na direção x	X	u	x
2	Deslocamento na direção y	Y	v	y
3	Deslocamento na direção z	Z	w	z
4	Rotação em torno do eixo x	K	p	ϕ
5	Rotação em torno do eixo y	M	q	θ
6	Rotação em torno do eixo z	N	r	ψ

Fonte: THUNÉ (2015), adaptado.

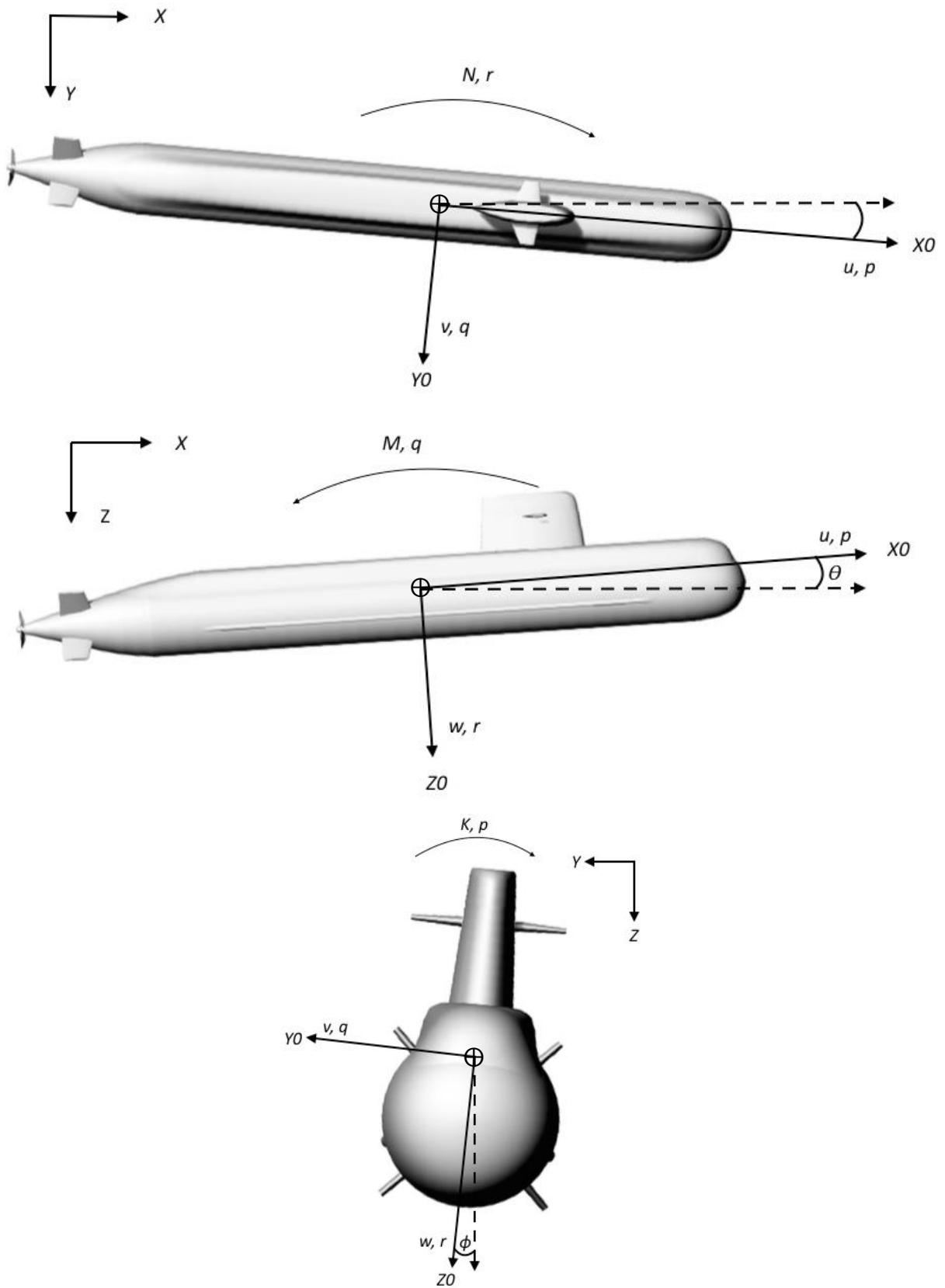


Figura 15 – Os referenciais fixos no corpo e respectivos movimentos da embarcação.

Fonte: THUNÉ (2015), adaptado.

Após a breve exposição sobre os movimentos de uma embarcação em seus respectivos graus de liberdade, direcionaremos nossa atenção para uma revisão da literatura centrada na circulação natural com inclinação da plataforma. Esta transição busca aprofundar nossa compreensão das complexidades associadas aos sistemas de circulação natural, especialmente quando a inclinação da plataforma interfere no escoamento, gerando oscilações e instabilidades no circuito, como será apresentado a seguir. A revisão abordará estudos relevantes, proporcionando valiosas conclusões sobre as implicações práticas e teóricas desse fenômeno em particular.

Tabela 5 – Principais trabalhos sobre Circulação Natural sob condições de inclinação da plataforma.

Referência	Títulos	Escoamento	Tópicos de interesse	Ano
IYORI et al.	<i>Basic flow rate characteristics of natural circulation of marine reactors at inclined attitude (1986)</i> <i>Natural circulation of integrated-type marine reactor at inclined attitude (1987)</i>	Monofásico	- Circulação natural em reatores navais; - Estudo da inclinação na circulação natural; - Análise de modelos analíticos;	1986 1987
MURATA et al.	<i>Natural Circulation Characteristics of a marine reactor in rolling motion (1990)</i> <i>Experimental Investigation of Natural Convection in a Core of a Marine Reactor in Rolling Motion (2000)</i> <i>Natural circulation characteristics of a marine reactor in rolling motion and heat transfer in the core (2002)</i>	Monofásico	- Efeito do movimento de rolamento em reatores navais em circulação natural; - Variações na taxa de circulação do circuito e na taxa de circulação do núcleo do reator devido ao movimento de rolamento; - Desenvolvimento de um modelo analítico unidimensional para estimar o efeito na taxa de circulação do núcleo do reator naval.	1990 2000 2002
KIM e PARK	<i>Development of RETRAN-03/MOV Code for Thermal-Hydraulic Analysis of Nuclear Reactor Under Moving Conditions</i>	Monofásico	- Desenvolvimento do código RETRAN-03/MOV para análise termo-hidráulica de sob movimentações tridimensionais.	1996
KIM et al.	<i>Study on the natural circulation characteristics of the integral type reactor for vertical and inclined conditions</i>	Monofásico	- Características de circulação natural em reator naval integrado; - Desenvolvimento e modificação do código RETRAN-03 para análise de fenômenos tridimensionais; - Comportamento do fluxo em condições verticais e inclinadas, incluindo distribuição de temperatura e taxas de escoamento.	2001

Tabela 5 – Principais trabalhos sobre Circulação Natural sob condições de inclinação da plataforma.

Referência	Títulos	Escoamento	Tópicos de interesse	Ano
PENDYALA et al.	<p><i>Convective heat transfer in single-phase flow in a vertical tube subjected to axial low frequency oscillations</i></p> <p><i>Flow and pressure drop fluctuations in a vertical tube subject to low frequency oscillations</i></p>	Monofásico	<ul style="list-style-type: none"> - Efeito de oscilações em baixa frequência para na transferência de calor por convecção, escoamento e queda de pressão em um tubo circular axial; - Desenvolvimento de uma correlação entre o número de Nusselt e Reynolds e proposição de uma expressão para calcular o número de Nusselt em função do comprimento da tubulação vertical. 	2008a 2008b
TAN, SU PU-GHEN	<p><i>Experimental and theoretical study on single-phase natural circulation flow and heat transfer under rolling motion condition (2009a)</i></p> <p><i>Experimental study on two-phase flow instability of natural circulation under rolling motion condition (2009b)</i></p> <p><i>Heat transfer model of single-phase natural circulation flow under a rolling motion condition (2009c)</i></p>	Monofásico e Bifásico	<ul style="list-style-type: none"> - Efeitos do movimento de rolamento na circulação natural monofásica e bifásica; - Influência do rolamento na transferência de calor e no desencadeamento de instabilidades; - Desenvolvimento de equação empírica e modelo matemático para simular o escoamento, coeficiente de transferência de calor em circulação natural sob movimento de rolamento. 	2009a 2009b 2009c
WANG et al.	<p><i>Experimental study on single-phase heat transfer of natural circulation in circular pipe under rolling motion condition</i></p>	Monofásico	<ul style="list-style-type: none"> - Efeito do movimento de rolamento na transferência de calor em circulação natural monofásica; - Relações entre a taxa de escoamento média e as características de transferência de calor antes e depois do início do movimento de rolamento; - Influência dos parâmetros do rolamento na amplitude da pulsação do número de Nusselt e de Reynolds. 	2014
YAN	<p><i>Review of the nuclear reactor thermal hydraulic research in ocean motions</i></p>	Monofásico e Bifásico	<ul style="list-style-type: none"> - Estudo dos movimentos oceânicos que afetam as características termo-hidráulicas e de segurança de reatores nucleares em plataformas flutuantes; - Modelos teóricos para escoamentos monofásicos e bifásicos e transferência de calor em movimentos oceânicos; - Desenvolvimento de códigos termo hidráulicos e de análise de subcanais em movimentos oceânicos. 	2017

Tabela 5 – Principais trabalhos sobre Circulação Natural sob condições de inclinação da plataforma.

Referência	Títulos	Escoamento	Tópicos de interesse	Ano
LIHUI et al.	<i>Study on natural circulation characteristics of an IPWR under inclined and rolling condition</i>	Monofásico e Bifásico	<ul style="list-style-type: none"> - Considerações sobre escoamentos monofásicos e bifásicos no contexto da circulação natural em um reator IPWR; - Desenvolvimento de um código de análise termo-hidráulica baseado em condições oceânicas para estudar a circulação natural em um reator de água pressurizada integrado (IPWR); - Análise das características de operação da circulação natural sob condições de inclinação e rotação e suas implicações para a segurança e desempenho. 	2017
LI et al.	<i>The natural circulation flow characteristic of the core in floating nuclear power plant in rolling motion</i>	Monofásico	<ul style="list-style-type: none"> - Circulação natural em reatores nucleares flutuantes em movimento de rolamento. - Utilização de reatores de água pressurizada integral em plantas nucleares flutuantes. - Remoção de calor residual do núcleo por meio da operação de circulação natural em condições de acidente ou operação de baixa carga. 	2020
LAI et al.	<i>Experimental study on thermal hydraulic characteristics of natural circulation loop under motion condition</i>	Monofásico e Bifásico	<ul style="list-style-type: none"> - Análise das condições de movimento nas características de escoamento e transferência de calor em circuitos de circulação natural; - Investigação do coeficiente de resistência de atrito médio periódico e do número de Nusselt médio periódico sob diferentes condições de operação. 	2022

Fonte: autor da dissertação.

Dentre os trabalhos que estudaram a circulação natural em reatores navais, destaco os trabalhos realizados por IYORI et al. (1986, 1987), que consistiu na execução de um teste de circulação natural monofásica em estado estacionário, com o propósito de investigar os efeitos da inclinação em um modelo de reator naval integrado, usualmente empregado em submarinos, devido questões de arranjo. Durante a pesquisa, foram analisados os padrões de fluxo e a distribuição de temperatura no gerador de vapor, resultando na identificação de diferentes tipos de padrões de fluxo em resposta à variação do ângulo de inclinação.

Adicionalmente, foi conduzida uma análise do modelo analítico empregado, evidenciando a necessidade de considerar os caminhos de fluxo em forma de U, sua correlação e a função de distribuição de temperatura do núcleo, a fim de aprimorar a precisão da análise realizada.

Na sequência de trabalhos conduzidos por MURATA et al. (1990, 2000, 2002) foram realizadas uma série de testes de circulação natural em um modelo de reator naval montado em um equipamento de rolamento. O objetivo foi investigar as características de circulação natural em reatores navais sob movimento de rolamento e desenvolver um modelo analítico para estimar o efeito na taxa de circulação do núcleo do reator. Os resultados mostraram que a taxa de circulação do núcleo do reator é independente do ângulo de rolamento, enquanto a taxa de circulação em cada perna varia ciclicamente com o ângulo de rolamento. Foi proposto um modelo analítico unidimensional (RETRAN-02/GRAV) para estimar o efeito na taxa de circulação do núcleo do reator, que foi validado por meio de dados experimentais.

MURATA et al. (1990, 2000, 2002) observou que à medida que o período de rolamento se torna mais curto, tanto a amplitude das oscilações da taxa de circulação do circuito quanto o atraso de fase entre o ângulo de rolamento e as oscilações da taxa de circulação do circuito aumentam. Essa variação é influenciada principalmente pela força inercial do movimento de rolamento e pela distribuição desigual de temperatura ao longo do circuito. Em resumo, os três trabalhos de MURATA contribuem para a compreensão do comportamento térmico-hidráulico de reatores navais em condições de rolamento, fornecendo modelos analíticos e experimentais para prever e otimizar o desempenho do sistema em situações dinâmicas.

KIM e PARK (1996) e KIM et al. (2001) realizaram o experimento de circulação natural em instalações de teste dimensionadas da SMART em condição inclinada, e desenvolveram o código RETRAN-03/INT e CFX-4 para analisar as características do fluxo de circulação natural em um reator do tipo PWR. PENDYALA et al. (2008a e 2008b) realizaram estudos experimentais sobre o efeito das oscilações na transferência de calor e escoamento em um tubo vertical.

O trabalho conduzido por TAN, SU e PU-ZHEN (2009a) consistiu em um estudo experimental e teórico da circulação natural monofásica da transferência de calor sob condições de movimento de rolamento. Foram conduzidos experimentos para investigar os efeitos do movimento de rolamento na circulação natural e na transferência de calor. Os resultados experimentais indicaram que o movimento de rolamento causou flutuações

adicionais no fluxo de circulação natural devido à inércia adicional. Além disso, observou-se que a taxa média de fluxo de massa da circulação natural diminuiu com o aumento da amplitude e frequência do rolamento. O estudo também revelou que o movimento de rolamento aumenta a transferência de calor, resultando em um aumento no coeficiente de transferência de calor do fluxo de circulação natural. Como resultado, os autores desenvolveram uma equação empírica para o coeficiente de transferência de calor sob movimento de rolamento, e elaboraram um modelo matemático para calcular o fluxo de circulação natural nessas condições. Os resultados calculados pelo modelo apresentaram concordância satisfatória com os dados experimentais, permitindo a análise dos efeitos do movimento de rolamento no fluxo de circulação natural. Concluiu-se que o aumento do coeficiente de resistência ao fluxo é a principal razão pela qual a capacidade de circulação natural diminui sob condições de movimento de rolamento.

O estudo realizado por TAN, SU e PU-ZHEN. (2009b) consistiu em uma investigação experimental da instabilidade do escoamento bifásico em um sistema de circulação natural sob a influência do movimento de rolamento. Por meio de um circuito experimental tridimensional, os pesquisadores analisaram os efeitos do movimento de rolamento na ocorrência de instabilidades no escoamento, observando mudanças nos tipos de oscilações do escoamento e na estabilidade do sistema. Os resultados obtidos demonstraram que o movimento de rolamento pode desencadear precocemente a instabilidade do escoamento de circulação natural bifásico, levando a oscilações complexas do fluxo.

No trabalho seguinte de TAN, SU e PU-ZHEN (2009c) deu-se sequência nos estudos experimentais sobre as características de transferência de calor para o escoamento de circulação natural monofásico sob uma condição de movimento de rolamento. Foram conduzidos experimentos com e sem movimentos de rolamento para obter os efeitos do rolamento na transferência de calor por circulação natural. Os resultados experimentais demonstraram que o movimento de rolamento aprimora a transferência de calor. O coeficiente de transferência de calor do escoamento em circulação natural aumenta com a amplitude e a frequência do rolamento. Além disso, foi empregado um número de Reynolds modificado que considera a influência da aceleração para expressar o efeito da capacidade de calor. Utilizando dados experimentais, uma equação empírica para o coeficiente de transferência de calor sob

uma condição de movimento de rolamento foi obtida, e os resultados calculados concordam com os dados experimentais.

A sequência de trabalhos realizados por TAN, SU e PU-ZHEN (2009a, 2009b e 2009c) concluíram que a circulação natural pode ser influenciada pelo efeito de rolamento devido à alteração na altura efetiva do circuito de circulação. Quando o sistema é inclinado, a diferença de altura entre a fonte fria e a fonte quente é modificada, o que pode afetar o padrão de circulação. Eles observaram que o movimento de rolamento introduz flutuações adicionais no fluxo de circulação natural devido à inércia adicional, resultando em alterações na eficiência da circulação e na transferência de calor.

Em contrapartida, nas pesquisas realizadas por XING et al. (2012, 2013) onde foram investigados experimental e teoricamente os efeitos do movimento de rolamento no escoamento monofásico com diferentes alturas de pressão, relataram que a amplitude de flutuação da vazão diminui rapidamente à medida que é aumentada a altura manométrica e que a flutuação pode desaparecer com uma altura manométrica extremamente mais alta, chegando à conclusão que a vazão do fluido não é afetada pelo movimento de rolamento. Contudo, seus trabalhos foram realizados sob a condição de circulação forçada, o que difere das condições originadas pela circulação natural.

O estudo experimental de WANG et al. (2014) investigou o efeito do movimento de rolamento na transferência de calor em circulação natural monofásica em um tubo circular. Foram analisadas as relações entre a taxa de escoamento média do ciclo de circulação natural antes e depois do início do movimento de rolamento, as características médias de transferência de calor e a amplitude relativa da pulsação do número de Nusselt em relação aos parâmetros do movimento de rolamento. O aparato experimental consistiu em uma seção de teste, um resfriador, uma torre para condensação da água quente, um pressurizador, um medidor eletromagnético de fluxo, um preaquecedor e instrumentação para medição de temperatura e pressão. O movimento de rolamento foi gerado por um mecanismo acionado por motor, permitindo a aquisição de dados sobre as variações periódicas da taxa de fluxo e das temperaturas durante o movimento. Os resultados obtidos fornecem informações sobre as características instantâneas de transferência de calor em condições de movimento de

rolamento, ampliando o entendimento das condições térmicas e hidráulicas em sistemas de circulação natural.

No trabalho de revisão realizado por YAN (2017), foi feita uma análise sistemática de resultados valiosos e dados experimentais sobre a pesquisa de termo-hidráulica de reatores nucleares em movimentos oceânicos. Foram classificados e explicados os mecanismos inerentes a questões controversas em diferentes experimentos. Além disso, foram sugeridos trabalhos necessários para o futuro. A revisão teve como objetivo encontrar o maior número possível de resultados valiosos para o projeto e pesquisas subsequentes.

No trabalho realizado por LIHUI HE et al. (2017), foi desenvolvido um código de análise termo-hidráulica baseado em condições oceânicas para investigar as características de operação da circulação natural em um reator de água pressurizada integrado (IPWR) sob condições de inclinação e rotação. Foram adicionados modelos de força adicional das condições oceânicas e um modelo de solução de coordenadas de volume de controle ao código RELAP5/MOD3. Os efeitos da inclinação e rotação na taxa de fluxo de massa e na assimetria dos parâmetros do sistema foram analisados, fornecendo conclusões sobre a influência das condições oceânicas na operação do reator e suas implicações para a segurança e desempenho do reator.

Uma das conclusões de LIHUI HE et al. (2017) é que a circulação natural é influenciada pela inclinação devido à variação na posição das fontes de calor e frio no sistema. Sob condições de inclinação, a posição da fonte quente (núcleo do reator) geralmente permanece inalterada, enquanto a posição da fonte fria (geradores de vapor) pode se deslocar. Isso resulta em uma assimetria na força motriz da circulação natural entre os diferentes loops do sistema. A inclinação pode resultar em diferenças significativas nas taxas de fluxo de refrigerante entre os loops, o que influencia o desempenho térmico do sistema e a transferência de calor nos geradores de vapor.

No estudo realizado por LI et al. (2020), foi investigada a característica de circulação natural monofásica no núcleo de reatores nucleares flutuantes em movimento de rolamento. Os principais achados indicaram que a circulação natural no canal de combustível em placa do reator flutuante apresenta flutuações periódicas devido ao movimento de rolamento harmônico simples. A variação da queda de pressão gravitacional ao longo do tempo foi

identificada como a principal causa das flutuações na taxa de escoamento. Além disso, observou-se que a distribuição de temperatura do núcleo apresenta pequenas flutuações com o movimento de rolamento, resultando em uma segurança geral do sistema térmico-hidráulico do reator. A variação de potência aumenta com a distância ao eixo de rolamento, sendo maior na saída do núcleo e nas montagens com hastes de controle.

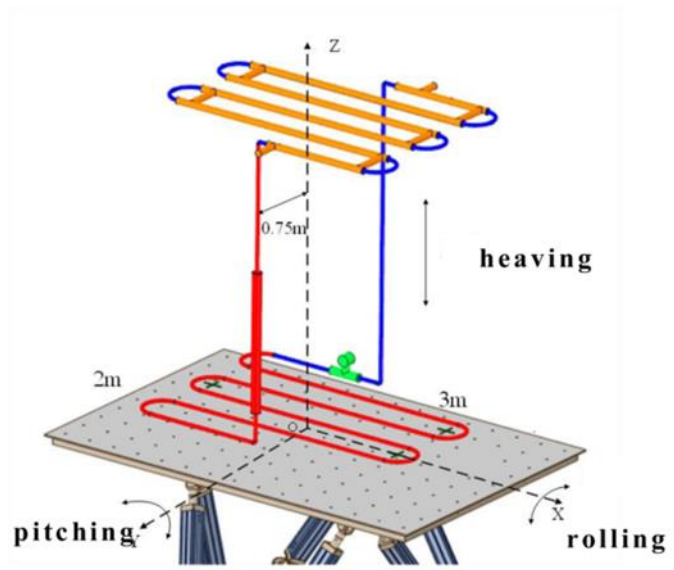
No trabalho conduzido por LAI et al. (2022), foi realizada uma pesquisa experimental para investigar a influência de diferentes condições de movimento nas características de escoamento e transferência de calor em circuitos de circulação natural. Um circuito de circulação natural foi construído em uma plataforma de experimentação de seis graus de liberdade na Universidade Jiaotong de Xi'an. Foram estudadas as características de fluxo do circuito de circulação natural sob diferentes condições de movimento, incluindo aceleração pequena para cima e movimento de rolamento. Além disso, foram investigados o coeficiente de resistência de atrito médio periódico e o número de Nusselt médio periódico sob diferentes condições de operação.

De acordo com LAI et al. (2022) os resultados mostraram que diferentes condições de movimento afetam significativamente as características de escoamento e transferência de calor do circuito de circulação natural. De acordo com os resultados obtidos e a disposição dos eixos em que foi montado o circuito de circulação natural, foi observado que dentre todos os movimentos de um grau de liberdade, o movimento de rolamento tem a maior influência nas características do circuito de circulação natural. Essa influência se deve a uma grande oscilação do fluxo de refrigerante no circuito de circulação natural, e o fluxo de refrigerante afetará diretamente a capacidade de remoção de calor do circuito. Na Figura 4 tem-se uma demonstração do esquema montado.

LAI et al. (2022) chegou à conclusão que para evitar grande oscilação do fluxo do refrigerante, foi sugerido que os loops de circulação natural fossem instalados de forma que o eixo X do loop ficasse perpendicular ao eixo X do navio. Dessa forma, quando o navio está rolando, o loop está se inclinando. Como pode ser observado na Figura 16, para atendimento da sugestão fornecida pelo trabalho o eixo X do circuito deveria ser instalado sob o eixo Y do navio, reduzindo os efeitos de oscilação do fluxo do refrigerante.



(a)



(b)

Figura 16 – (a) Foto da bancada experimental; e (b) Diagrama esquemático do circuito principal.

Fonte: LAI et al. (2022).

A principal conclusão do trabalho é que sob condições de inclinação e rotação, a circulação natural em um reator de água pressurizada integrado (IPWR) é significativamente afetada, resultando em assimetrias na distribuição do refrigerante primário entre os loops do sistema. Essas assimetrias podem levar a variações na temperatura e no fluxo de refrigerante, impactando a operação e o desempenho do reator. Além disso, a influência das condições oceânicas na circulação natural destaca a importância de considerar esses fatores para garantir a segurança e eficiência do reator em diferentes cenários operacionais.

Portanto, pode-se como a inclinação afeta a circulação natural ao alterar a distribuição das fontes de calor e frio, levando a uma assimetria na força motriz e nas taxas de fluxo de refrigerante nos diferentes loops do reator.

2.4 CIRCUITO DE CIRCULAÇÃO NATURAL (CCN)

Nesta seção será descrito o circuito experimental que foi utilizado nos trabalhos precedentes bem como alguns detalhes dos experimentos realizados, e que será modelado utilizando Programação Orientada a Objetos (POO), em linguagem Modelica.

2.4.1 CIRCUITO EXPERIMENTAL

O circuito de circulação natural (CCN) do IPEN é do tipo fechado e tem formato retangular, preenchido com água desmineralizada e composto por tubos de vidro de seção transversal circular. O circuito fica suspenso por cabos de aço em uma estrutura metálica, garantindo o alinhamento e integridade da tubulação em vidro, devido a vibrações durante as experiências. As dimensões do circuito, sem contar o tanque de expansão, é de 2.600 mm de altura e 850mm de largura. As dimensões principais do circuito de circulação natural e disposição dos principais equipamentos são apresentados na Figura 17.

O material dos tubos é o vidro Pyrex (vidro de borossilicato), da marca Corning®, que apresentam boa resistência a choques térmicos devido ao baixo coeficiente de dilatação, quando comparado a vidros comuns. Os tubos que conectam o aquecedor ao trocador são de seção circular constante de diâmetro interno igual a 38,1 mm e espessura de 4,4 mm. O aquecedor se acopla a tubulação por meio de uma redução do diâmetro de 76,2 mm para o diâmetro de 38,1 mm.

A fonte quente consiste em um aquecedor composto por duas resistências elétricas que dissipam cada uma em torno de 3.900 W, localizado na parte inferior esquerda na Figura 17. Uma das resistências opera sempre com potência total, enquanto a outra é controlada por um variador de tensão que é alimentado com corrente alternada, o que possibilita a aplicação de potências elétricas de até um total de 7.800 W. No aquecedor, a resistência 1 pode ser ajustada pelo variador de tensão, denominado *Variac*. Dessa forma, circuito possui capacidade para realização de experimentos em regime de escoamento monofásico e bifásico. As dimensões e detalhes construtivos do aquecedor podem ser visualizadas na Figura 18.a.

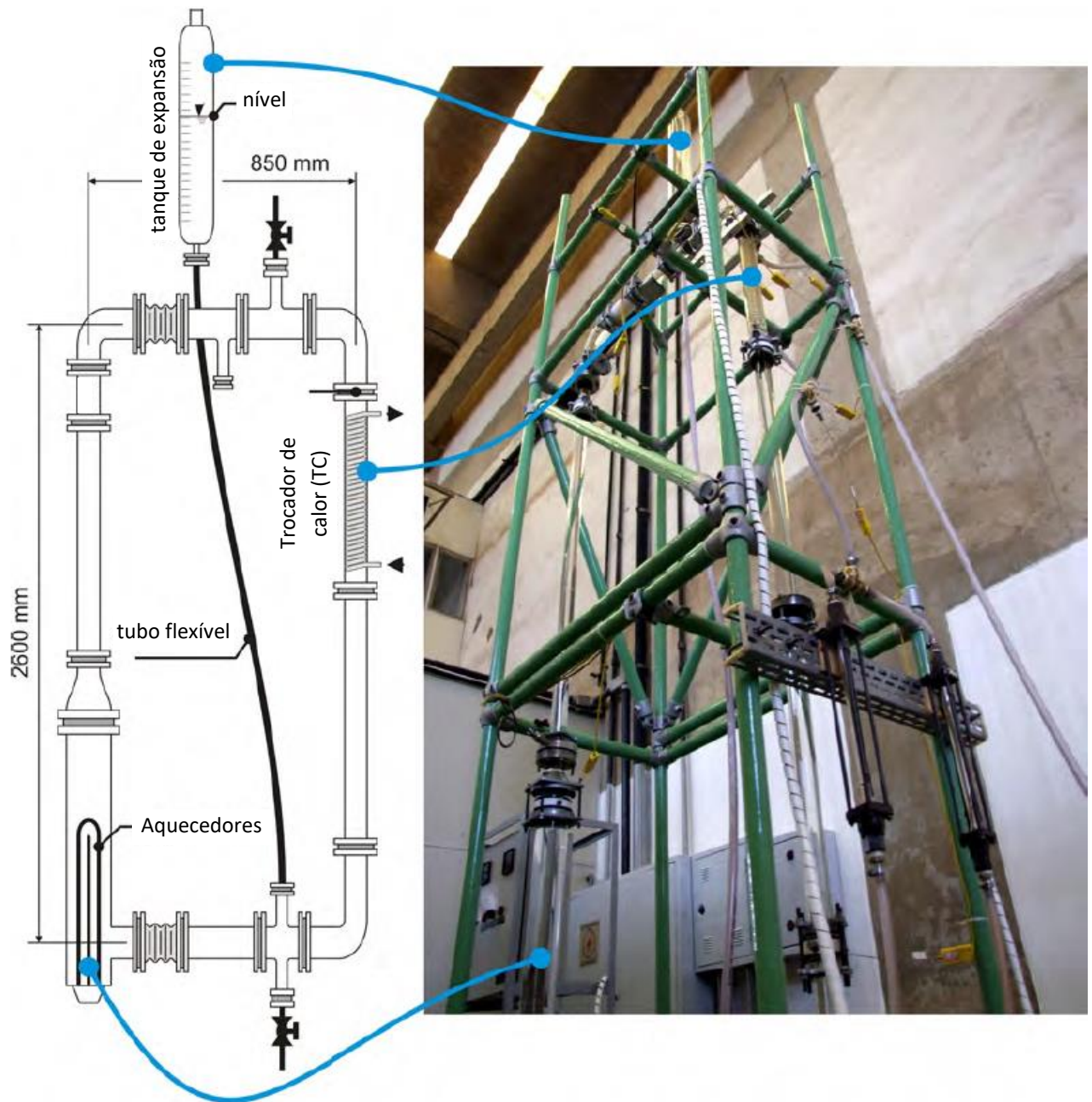


Figura 17 - Desenho esquemático do circuito de circulação natural e indicação dos principais componentes.

Fonte: ANGELO (2013).

O trocador de calor é do tipo casco tubo operando em contracorrente, construído também em vidro Pyrex. Fica instalado na parte superior da seção vertical oposta à seção do aquecedor. A região dos tubos é composta por dois pares de dutos de seção circular constante em um arranjo helicoidal concêntrico. A Figura 18.b ilustra as dimensões principais e detalhes da montagem do trocador de calor de forma esquemática.

O circuito de resfriamento possui dois rotômetros para ajuste da vazão do fluido de resfriamento na serpentina helicoidal. O fluido de resfriamento é a água e que fica armazenada em um reservatório com capacidade de 2 metros cúbicos. É utilizada uma bomba elétrica para circulação do fluido refrigerante. Para todos os experimentos realizados nos trabalhos de FRENZEL (2023) e ANGELO (2013) a vazão de água de resfriamento no secundário é de 0,02772 kg/s.

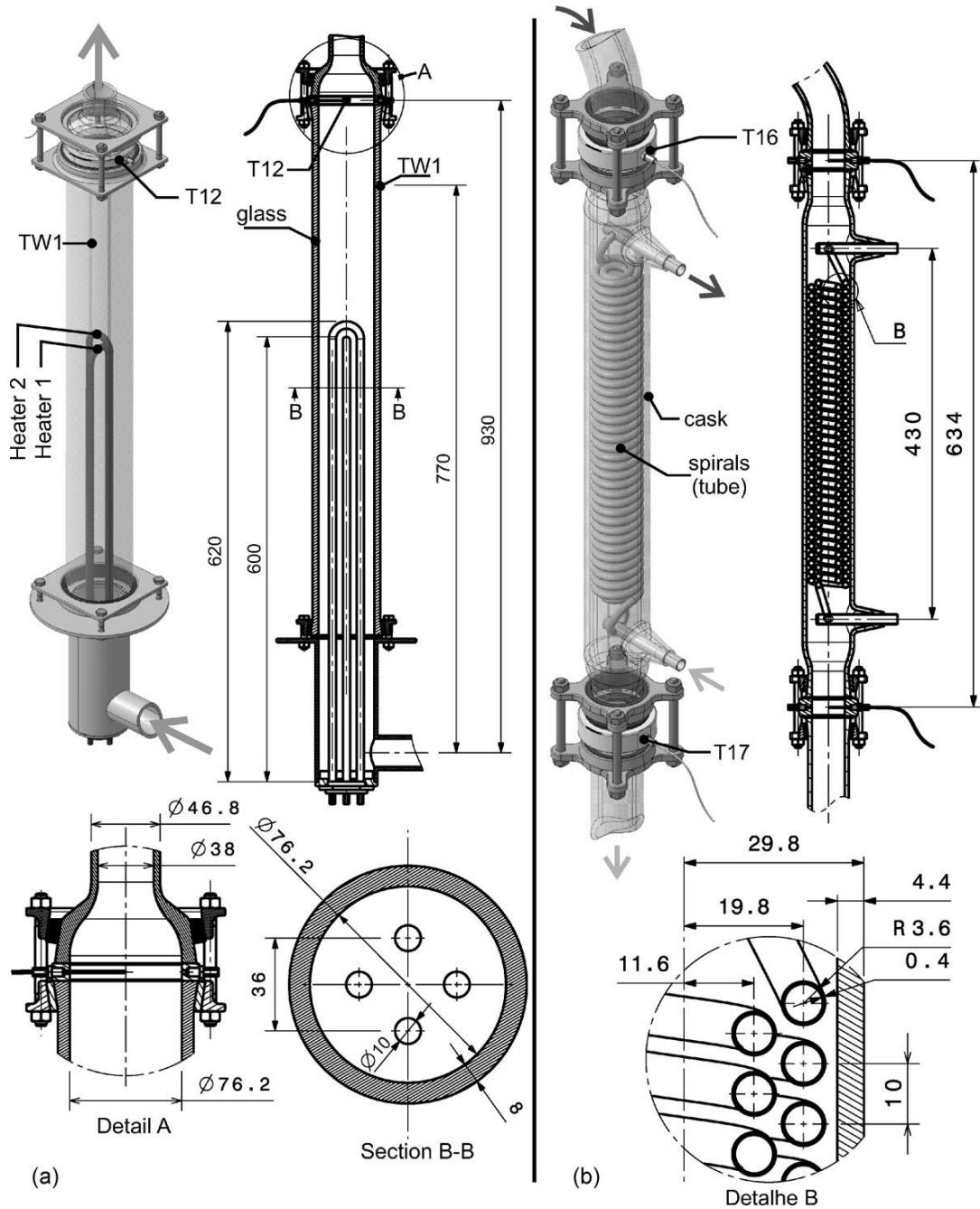


Figura 18 – a) Dimensões e detalhes para a região do aquecedor; b) Dimensões e detalhes para a região do trocador de calor (todas as dimensões em milímetros).

Fonte: ANGELO (2012), adaptado.

O circuito experimental possui ainda um tanque de expansão com capacidade de em torno de 7 litros, que fica localizado logo acima da tubulação horizontal superior. O volume total do circuito, considerando o tanque de expansão e a linha de surto, possui aproximadamente 12 litros de água desmineralizada. A instalação conta com duas juntas de expansão e uma válvula borboleta que permanece totalmente aberta em todos os experimentos. O circuito não possui isolamento térmico permitindo assim a visualização do escoamento. O calor é dissipando por convecção e radiação para o ambiente.

O CCN, que foi recentemente atualizado por FRENZEL (2023), pode ser visualizado esquematicamente na Figura 19. O CCN possui quatorze termopares que se encontram dispostos no CCN de duas formas: (a) duas medidas de temperatura na parede do circuito (termopares TP1, TP2); (b) e oito medidas de temperatura no centro das tubulações do circuito realizada pelos termopares de T11 a T18, instalados por meio de um dispositivo flangeado. Também são medidas as temperaturas nos dispositivos: na linha de conexão do circuito com o tanque de expansão (T19 e T20) e circuito secundário do trocador de calor (T21 e T22). Os termopares instalados são do tipo K com 1 mm de diâmetro e possuem incertezas da ordem de $\pm 1^\circ\text{C}$. Os valores experimentais são armazenados por um sistema de aquisição de dados.

O sistema de aquisição de dados utilizado é do fabricante *National Instruments Corporation* e inclui um condicionador de sinais, uma placa de aquisição de dados do tipo PCMCIA, e um software desenvolvido em LabView® para criar uma interface gráfica. Os dados dos sensores são registrados por esse sistema, instalado em um microcomputador, com uma taxa de amostragem adequada ao fenômeno.

O CCN apresentado na Figura 13 foi atualizado para inclusão do medidor de fração de vazio desenvolvido por ROCHA (2005) e implementado por FRENZEL (2023), retirada da válvula borboleta e retirada do termopar na parede do aquecedor. Dessa forma, o CCN conforme encontra-se no CEN/IPEN pode ser visualizado no diagrama esquemático da Figura 19.

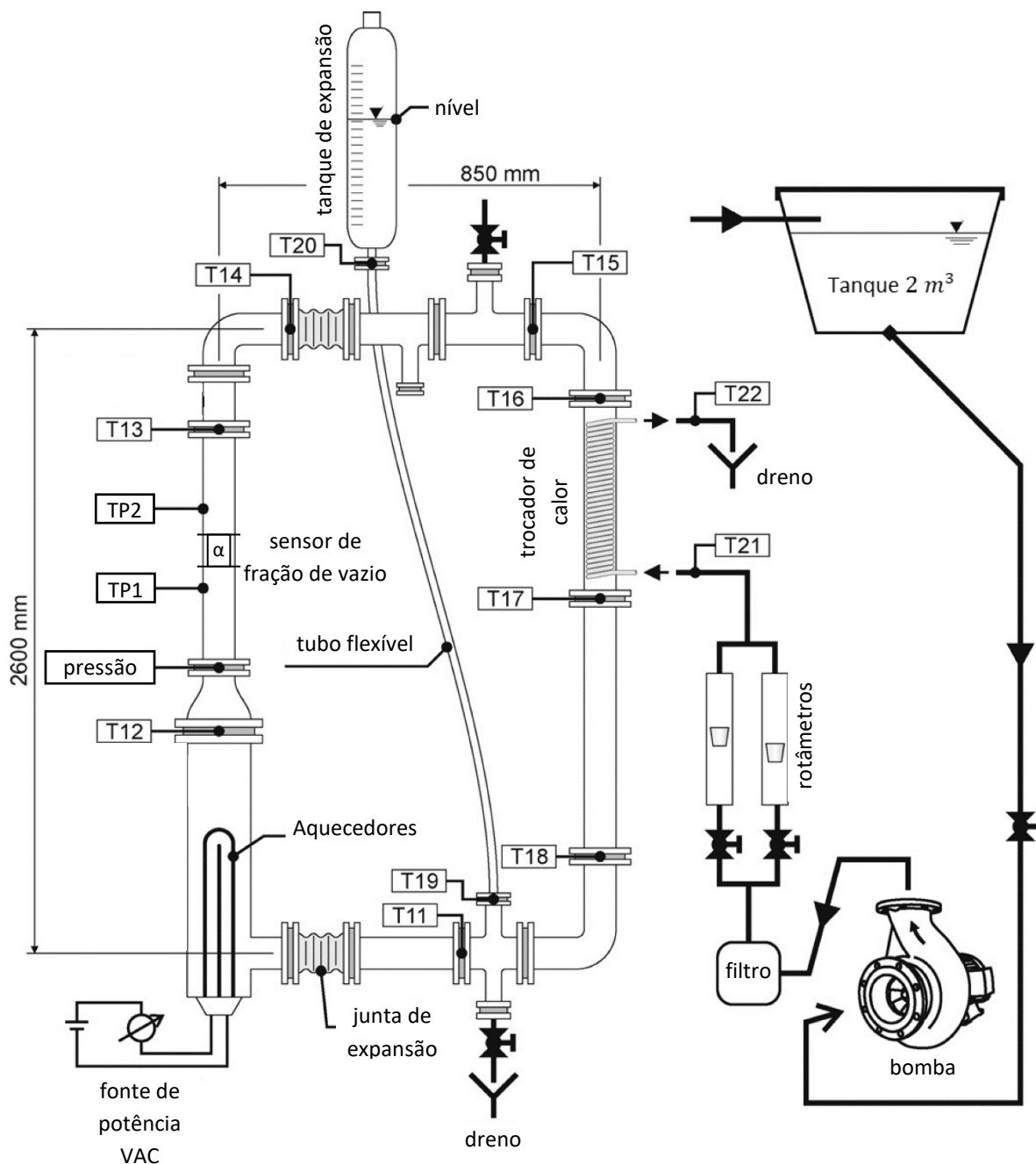


Figura 19 – Diagrama esquemático atualizado do CCN do CEENG/IPEN.

Fonte: ANGELO (2012), adaptado.

Utilizando o software LABVIEW versão 7.0 (2003) no microcomputador do laboratório, os dados são recebidos em tempo real e visualizados. O programa possui recursos apropriados para a interação com a instrumentação, proporcionando uma interface homem-máquina simples e confiável. A taxa de amostragem é estabelecida, a configuração da tela é ajustada, e os resultados da aquisição de dados são registrados em uma planilha do MS Excel®. A representação visual da interface é apresentada na Figura 20.

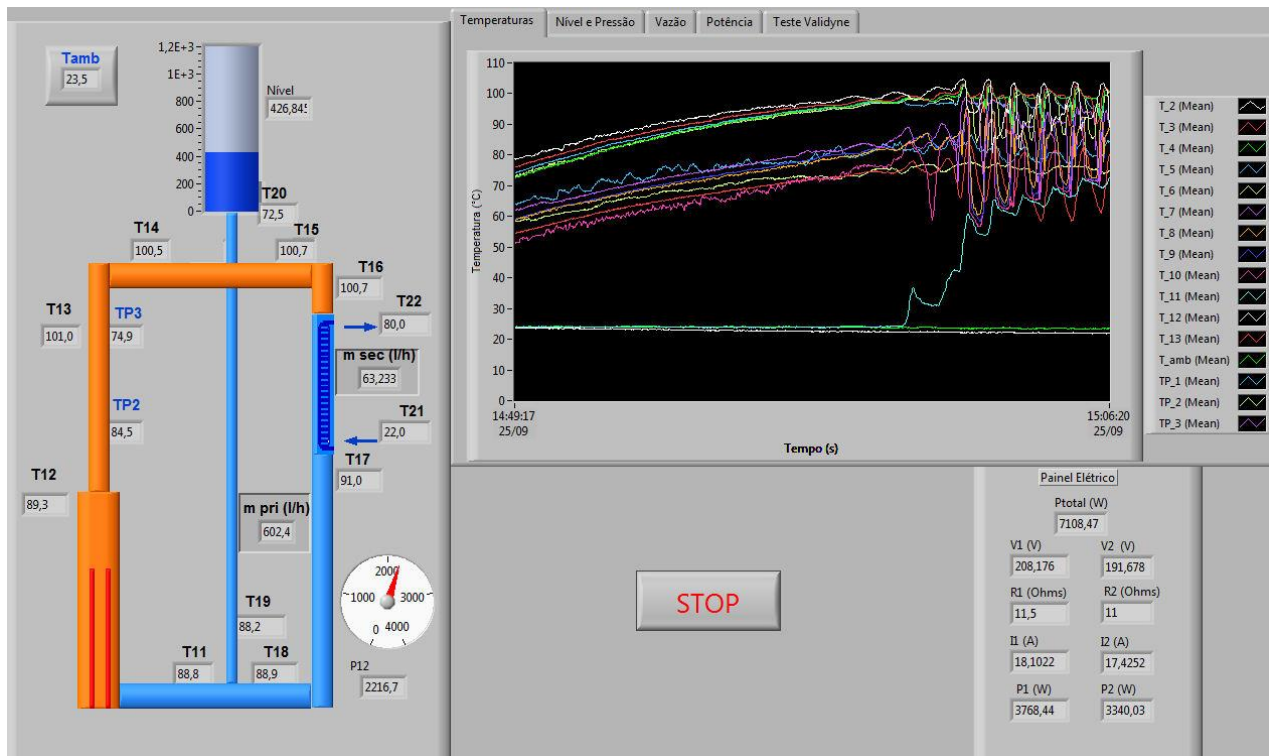


Figura 20 – Interface de aquisição com o LabView®.

Fonte: FRENZEL (2023).

2.5 PROGRAMAÇÃO ORIENTADA A OBJETOS (POO)

Nesta seção serão alguns conceitos básicos e as principais vantagens da utilização da Programação Orientada a Objetos (POO) e da linguagem Modelica para compreensão da simulação que será utilizada neste estudo.

A Programação Orientada a Objetos (POO) representa um paradigma de programação fundamental na engenharia de software, desempenhando um papel central na modelagem e implementação de sistemas complexos. Este paradigma, que teve suas raízes nas décadas de 1960 e 1970, promove a organização do código em unidades autônomas denominadas "objetos", que encapsulam dados e funcionalidades específicas. A POO oferece vantagens como reusabilidade, modularidade e uma representação mais próxima da realidade, contribuindo significativamente para o desenvolvimento de software robusto e escalável.

Em paralelo ao desenvolvimento da POO, destaca-se a Linguagem Modelica, uma linguagem de modelagem orientada a objetos que se concentra na representação precisa de sistemas físicos complexos. Criada na década de 1990, a Modelica permite a descrição de

sistemas dinâmicos através de equações diferenciais, fornecendo uma notável capacidade de modelagem de sistemas multidomínio, tais como mecânica, elétrica, termo-hidráulica e termodinâmica.

A linguagem Modelica se diferencia por sua sintaxe clara e expressiva, facilitando a representação de sistemas físicos de forma intuitiva. A linguagem favorece a reusabilidade de modelos e a colaboração entre diferentes disciplinas de engenharia, promovendo uma abordagem integrada na modelagem de sistemas complexos.

Dentre as ferramentas em Modelica, destaca-se o software Dymola, um ambiente de simulação e modelagem que utiliza a linguagem Modelica como base. Desenvolvido pela Dassault Systèmes, o Dymola integra efetivamente a POO e Modelica, proporcionando um ambiente de desenvolvimento poderoso e flexível. Sua interface gráfica intuitiva permite aos engenheiros e pesquisadores explorarem dinâmicas de sistemas em diversos domínios de forma eficiente.

O Dymola se destaca pela sua capacidade de integrar modelos provenientes de diferentes disciplinas, proporcionando uma visão holística e interdisciplinar na análise de sistemas complexos. Sua aplicação estende-se a áreas como engenharia de controle, sistemas elétricos, térmicos e de automação, reforçando a importância da Modelica e da POO na modelagem avançada de sistemas dinâmicos.

2.5.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DE CIRCULAÇÃO NATURAL USANDO MODELAGEM ORIENTADA A OBJETOS

Nesta seção, destacaremos alguns trabalhos da literatura pioneiros no desenvolvimento de bibliotecas de termo-hidráulica e que realizaram simulação numérica da circulação natural utilizando a linguagem Modelica. A simulação computacional desempenha um papel crucial na compreensão e otimização de sistemas complexos, e a linguagem Modelica tem sido bastante utilizada devido sua capacidade de modelagem de sistemas multifísicos, emerge como uma ferramenta valiosa para investigar os fenômenos associados à circulação natural.

Tabela 6 – Principais trabalhos de revisão bibliográfica de POO em linguagem Modelica.

Referência	Títulos	Linguagem	Tópicos de interesse	Ano
TUMMESCH IT et al.	<i>Development of a Modelica BaseLibrary for Modeling of Thermo-Hydraulic Systems</i>	Modelica	- Desenvolvimento de uma biblioteca de componentes em linguagem Modelica.	2000
CASELLA E LEVA	<i>Modelling of Distributed Thermo-Hydraulic Processes Using Modelica</i>	Modelica	- Modelagem e simulação de processos termo-hidráulicos.	2003
CASELLA E LEVA	<i>Object-Oriented Modelling & Simulation of Power Plants with Modelica</i>	Modelica	- Desenvolvimento da Biblioteca Thermo Power em linguagem Modelica	2005
SCHIMON et al.	<i>Simulation of Components of a Thermal Power Plant</i>	Modelica/ Dymola	- Modelagem de equações diferenciais e equações algébricas para representar o comportamento de diferentes componentes.	2006
SOUYRI et al.	<i>Pressurized Water Reactor Modelling with Modelica</i>	Modelica/ Dymola	- Tradução de modelo de usina nuclear PWR para linguagem Modelica, e simulação dinâmica em Dymola. - Comparação dos resultados de simulação obtidos com Dymola com os resultados da ferramenta LEDA.	2006
BONVINI e POPOVAC	<i>Fluid Flow Modelling with Modelica</i>	Modelica/ Dymola	- Modelagem de escoamentos de fluidos em Modelica, permitindo a integração com outros sistemas; - Redução do esforço computacional na modelagem de escoamentos de fluidos em Modelica.	2012
QUALLS, CETINER e WILSON JR.	<i>Advanced High-Temperature Reactor Dynamic System Model Development</i>	Modelica/ Dymola	- Implementação de modelos dinâmicos do reator de alta temperatura avançado (AHTR) utilizando a linguagem Modelica e o software Dymola; - Integração do tradutor simbólico do Dymola para as equações do modelo Modelica, permitindo a geração de códigos C para simulação direta dos modelos.	2012
ZHU et al.	<i>Boiler Water-Steam System Modeling and Calibration Based on Modelica</i>	Modelica/ Dymola	- Modelagem de sistemas físicos complexos utilizando a linguagem Modelica e a plataforma Dymola. - Calibração de parâmetros de modelos de sistemas físicos complexos.	2014
BOARIN et al.	<i>Object-Oriented Modeling and simulation of a TRIGA reactor plant with Dymola</i>	Dymola	- Modelagem, desenvolvimento e validação de modelos de sistemas de reatores nucleares com alta precisão e flexibilidade usando a linguagem Modelica e o ambiente de simulação Dymola.	2016

Tabela 6 – Principais trabalhos de revisão bibliográfica de POO em linguagem Modelica.

Referência	Títulos	Linguagem	Tópicos de interesse	Ano
Pini et al.	<i>An Experimental Facility to Investigate the Natural Circulation Dynamics in Presence of Distributed Heat Sources</i>	Dymola	<ul style="list-style-type: none"> - Modelagem e simulação numérica da dinâmica de circulação natural; - Análise comparativa entre abordagens 1D e 3D para estudar o comportamento dependente do tempo. - Validação de resultados de simulação com dados experimentais da instalação DYNASTY. 	2016
Alessio Siviero	<i>Model development for studying natural circulation with the DYNASTY facility</i>	Modelica/ Dymola	<ul style="list-style-type: none"> - Análise de Sensibilidade dos Mapas de Estabilidade no Dymola para Avaliar o Comportamento de Circuitos de Circulação Natural. - Desenvolvimento de Modelos Orientados a Objetos 1D (O-O) no Dymola para Capturar Condições Reais, como Perdas de Calor em Tubulações e Presença de Fluxo de Ar Controlado em Circuitos de Circulação Natural. 	2018
Frick e Bragg-Sitton	<i>Development of the NuScale Power Module in the INL Modelica Ecosystem</i>	Modelica/ Dymola	<ul style="list-style-type: none"> - Desenvolvimento de modelos e análise de desempenho dinâmicos de sistemas de energia nuclear no Dymola. - Desenvolvimento de controladores para sistemas de energia nuclear. 	2020
Brunneman, Vojacek e Koch	<i>Numerically Robust Six-Equation Two-Phase Flow Model for Stationary and Moving Systems in Modelica</i>	Modelica/ Dymola	<ul style="list-style-type: none"> - Desenvolvimento de modelo de fluxo de duas fases baseado em seis equações. - Implementação numericamente robusta do modelo. - Utilização do software Dymola para o desenvolvimento e demonstração da aplicabilidade do modelo em diversos cenários. 	2021
Benzoni et al.	<i>Preliminary validation of the 1D modeling of the DYNASTY natural circulation loop against results from water experimental campaign</i>	Modelica/ Dymola	Modelagem 1D e simulação da dinâmica de circulação natural do loop DYNASTY utilizando o ambiente de modelagem Dymola.	2023

Fonte: autor da dissertação.

O trabalho realizado por TUMMESCHEIT et al. (2000) teve como objetivo desenvolver uma biblioteca base em Modelica para sistemas termo-hidráulicos. A biblioteca é estruturada em três partes: classes base, componentes parciais e componentes. As classes base contêm as equações físicas básicas para um volume de controle e os tipos de conectores para meios fluidos. Os componentes parciais contêm expressões comuns para modelos de componentes,

permitindo o compartilhamento de código e simplificando a manutenção. Os componentes são a parte do usuário da biblioteca, ou seja, modelos que podem ser usados para construir um sistema para simulação. O objetivo geral da biblioteca é fornecer uma estrutura e blocos básicos para modelagem de sistemas termo-hidráulicos em Modelica.

No trabalho de CASELLA e LEVA (2003) foi discutida a modelagem e simulação de processos termo-hidráulicos em usinas de geração de energia térmica, com foco no desenvolvimento de sistemas de controle. Os autores apresentam uma abordagem baseada na linguagem Modelica, que permite a representação de sistemas físicos de diferentes domínios, como sistemas mecânicos, circuitos elétricos, sistemas pneumáticos e fenômenos de transferência de calor. O trabalho também destaca as características desejáveis de um ambiente de simulação para processos termo-hidráulicos e fornece diretrizes para o desenvolvimento de uma biblioteca de componentes termo-hidráulicos.

Já no trabalho publicado por CASELLA e LEVA (2005) apresenta a aplicação do paradigma de modelagem orientada a objetos a sistemas termo-hidráulicos, com foco em usinas termelétricas a combustíveis fósseis e nucleares. Os autores propõem e justificam uma abordagem de modelagem específica, além de apresentar a biblioteca ThermoPower Modelica, desenvolvida no Politecnico di Milano, e disponibilizada para a comunidade científica e profissional sob os termos da licença Modelica.

O trabalho de SCHIMON et al. (2006) apresenta modelos para simulação de componentes de usinas termelétricas e outros processos termodinâmicos. Utilizando uma ferramenta de simulação, baseada na linguagem Modelica, foram desenvolvidos modelos com equações diferenciais e equações algébricas para representar o comportamento de diferentes componentes, como bombas centrífugas, tubulações e trocadores de calor. A biblioteca Modelica.Media foi utilizada para modelar os fluidos presentes nos sistemas simulados. O trabalho destaca a importância de se escolher o nível de abstração adequado para cada modelo, a fim de obter resultados precisos e eficientes.

O trabalho de SOUYRI et al. (2006) teve como principal objetivo avaliar a viabilidade de substituir a ferramenta LEDA por ferramentas abertas baseadas em Modelica para a modelagem dinâmica de uma usina nuclear PWR. Para isso, um modelo de referência da usina P4 LEDA foi traduzido com sucesso para Modelica e simulado no ambiente Dymola. Os

resultados das simulações com Dymola foram comparados com os obtidos com LEDA, demonstrando que as ferramentas baseadas em Modelica são adequadas para a modelagem dinâmica de uma usina PWR, o que pode resultar em redução de custos de manutenção e acompanhamento das últimas tendências em tecnologia de modelagem e simulação.

BONVINI e POPOVAC (2012) propuseram uma metodologia para modelar escoamentos de fluidos usando o Modelica. Os autores tinham como objetivo fornecer uma abordagem inovadora para simular o movimento do fluido e sua interação com outros sistemas, como edifícios, usinas elétricas, sistemas de tratamento de água e HVAC, sem esforço adicional. A abordagem proposta permite uma simulação abrangente e eficiente dos fluxos de fluidos, evitando a necessidade de co-simulação e suas desvantagens associadas. Os autores validaram seu modelo investigando o caso da convecção natural em uma cavidade alta, comparando os dados de simulação obtidos com os modelos do Modelica com resultados experimentais e um código CFD padrão. Os resultados mostraram boa concordância entre os dados de simulação fornecidos pelos modelos do Modelica e tanto os dados do CFD quanto os experimentais.

O relatório realizado por QUALLS, CETINER e WILSON JR. (2012) teve como objetivo apresentar o desenvolvimento de modelos dinâmicos de sistemas para o reator de alta temperatura avançado (AHTR). O estudo descreve a modelagem do sistema de transporte de calor baseado em sal, do núcleo do reator, dos sistemas de conversão de energia e dos sistemas de remoção de calor auxiliares e relacionados à segurança. O escopo dos modelos é limitado ao sistema de energia da planta, incluindo o reator, os sistemas de transporte de calor primário e intermediário, o sistema de conversão de energia e os sistemas de remoção de calor relacionados à segurança. O trabalho apresenta ainda a utilização da linguagem Modelica para a implementação dos modelos e a utilização de cálculos em estado estacionário para dimensionar o equipamento para o desempenho nominal.

No artigo de ZHU et al. (2014), foi apresentado um modelo de segunda ordem e quarta ordem utilizando a linguagem de modelagem orientada a objetos, linguagem Modelica, na plataforma Dymola, para analisar as propriedades não lineares do sistema de água-vapor de caldeira. Além disso, o trabalho descreve a calibração dos parâmetros do modelo, que não podem ser medidos diretamente, utilizando a soma residual dos quadrados entre os resultados da simulação e os dados medidos de um dispositivo real. A calibração foi baseada nas respostas

de pressão e nível de água a um degrau na taxa de fluxo de combustível. Após a calibração, a confiabilidade do modelo foi aprimorada.

No trabalho de BOARIN et al. (2016), foi realizado um estudo que apresenta a modelagem e simulação de um reator do tipo TRIGA-Mark II com combustível de Zircônio-Hidreto de Urânio imerso em água leve, utilizando a linguagem orientada a objetos Modelica, no ambiente de simulação Dymola. O modelo abrange o sistema integrado da planta, incluindo o reator e os circuitos de resfriamento. Além disso, os resultados da simulação foram validados em relação a dados experimentais, demonstrando a capacidade da linguagem Modelica em fornecer uma plataforma flexível e precisa para a análise de sistemas de reatores nucleares.

No estudo conduzido por PINI et al. (2016), a dinâmica da instalação DYNASTY foi investigada por meio de ferramentas semi-analíticas e numéricas. A instalação, que utiliza um fluxo de calor externo para simular o efeito da geração de calor interna, foi modelada utilizando linguagem Modelica e analisada utilizando o software Dymola. A abordagem numérica adotada incluiu um modelo orientado a objetos 1D e um modelo de dinâmica dos fluidos computacional 3D para estudar o comportamento dependente do tempo. Os resultados obtidos foram comparados com dados experimentais da instalação DYNASTY, e a concordância entre os resultados das simulações e os dados experimentais foi observada.

A Tese de SIVIERO (2018), teve como objetivo analisar e melhorar modelos para o estudo do comportamento dinâmico de circuitos de circulação natural com aquecimento distribuído. A Tese utiliza a linguagem Modelica e o software Dymola para simular os sistemas desenvolvidos. O estudo se concentra em duas ferramentas de modelagem, os mapas de estabilidade e os modelos orientados a objetos 1D (O-O), que são complementares na análise dos estados de equilíbrio e do comportamento dinâmico. A Tese apresenta uma análise de sensibilidade dos mapas de estabilidade, que revela a forte influência da transição do regime laminar para o turbulento e do tipo de correlação adotada para o fator de atrito. Além disso, a Tese desenvolve novos componentes para os modelos O-O 1D, que permitem uma melhor representação das condições reais, como perdas de calor em tubulações e a presença de fluxo de ar controlado. O estudo destaca a importância da análise de sensibilidade para os mapas de estabilidade, a necessidade de modelos O-O 1D aprimorados e a natureza complementar dos

mapas de estabilidade e modelos O-O 1D no estudo do comportamento dinâmico de circuitos de circulação natural com aquecimento distribuído.

O trabalho desenvolvido por FRICK e BRAGG-SITTON (2020) apresenta uma abordagem inovadora na modelagem dinâmica do módulo de energia NuScale em Modelica, utilizando o software Dymola. Os autores descrevem a criação de um modelo dinâmico do módulo de energia NuScale, operando sob circulação natural e consistente com os parâmetros de design estabelecidos na documentação de certificação de design para a Comissão Reguladora Nuclear (NRC). Além disso, destacam o desenvolvimento de controladores compatíveis com os documentos de certificação de design da NuScale, abrangendo cálculos de canais quentes, controle de reatividade e um modelador de pressurizador. A utilização do Dymola como plataforma para a implementação desses modelos demonstra a capacidade dessa ferramenta em contribuir significativamente para o avanço da modelagem e simulação de sistemas de energia nuclear.

O artigo conduzido por BRUNNEMANN et al. (2021) apresenta um modelo de fluxo de duas fases baseado em seis equações, implementado de forma numericamente robusta. O autor destaca a utilização do software Dymola para o desenvolvimento e demonstração da aplicabilidade do modelo em diversos cenários. Além disso, o artigo ressalta a extensão do modelo para incluir modelos mais detalhados de atrito, distribuição espacial e transferência de calor, bem como a possibilidade de expansão para meios multicomponentes. Essa abordagem tem potencial aplicação em uma variedade de áreas de engenharia, incluindo sistemas aeroespaciais, automotivos, navais, plantas de energia e tecnologias de processo.

O artigo escrito por BENZONI et al. (2023), apresenta uma validação preliminar do modelo 1D da dinâmica de circulação natural do loop DYNASTY, utilizando o ambiente de modelagem do Dymola. O objetivo do trabalho foi melhorar o modelo existente para incluir perdas de pressão do medidor de vazão de massa, perdas térmicas entre o loop e o ambiente e uma representação mais realista do resfriador. O modelo foi então validado com os resultados experimentais da primeira campanha do DYNASTY, que testou o comportamento do loop em diferentes configurações e transientes de aquecimento e resfriamento. Os resultados mostraram que o modelo desenvolvido é capaz de prever com precisão o comportamento do

loop, e a utilização do Dymola permitiu uma modelagem flexível e reutilizável dos componentes do sistema.

Em resumo, a revisão bibliográfica destaca a importância crescente da linguagem Modelica e ferramentas numéricas similares na simulação e validação de experimentos. Os trabalhos ressaltam a capacidade da POO em modelar sistemas dinâmicos complexos oferece uma abordagem integrada para investigar fenômenos naturais e projetar sistemas inovadores. Sua flexibilidade e capacidade de acoplar diferentes domínios físicos proporcionam uma representação precisa e eficiente de sistemas do mundo real, simplificando o processo de simulação e permitindo uma validação mais robusta. A incorporação da linguagem Modelica na plataforma Dymola representa um avanço significativo na busca por soluções eficientes e precisas no desenvolvimento de sistemas complexos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentadas as equações governantes de conservação em suas formas gerais vetoriais para escoamentos compressíveis e incompressíveis, assim como as equações de estado e constitutivas aplicáveis e o modelo de convecção natural. As equações governantes para circulação natural em regime monofásico serão apresentadas na seção 3.2. Também serão apresentados os principais modelos de algoritmos matemáticos utilizados para resolução das EDOs e EAs disponíveis no Dymola na seção 3.3. Por fim, será apresentado como foi feita a modelagem dos dados de entrada e consecutivas simulação do CCN usando POO.

3.1 EQUAÇÕES DE CONSERVAÇÃO

A representação das equações de conservação a seguir serão apresentadas para fluidos compressíveis e incompressíveis, conforme ÇENGEL e GHAJAR (2012), IAEA-TECDOC-1474 (2005).

Admitindo válidas as seguintes hipóteses simplificadoras:

1. Escoamento incompressível;
2. Fluido Newtoniano;
3. Validade da hipótese de Stokes (WHITE, 1991); e
4. Pequena influência dos termos de dissipação viscosa na equação de conservação da energia.

As equações de conservação de massa (ou continuidade), conservação da quantidade de movimento e conservação da quantidade de energia serão apresentadas para um sistema de coordenadas cartesiano (x_i), respectivamente:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

Simplificando o desenvolvimento da equação de Navier-Stokes para o tensor de tensões viscosas (τ) aplicada a fluidos Newtonianos, para fluidos incompressíveis, a equação de conservação de movimento para um sistema de coordenadas cartesiano (x_i), pode ser simplificada conforme a equação 2:

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(U_i U_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + 2 \frac{\partial}{\partial x_i}(\nu S_{ij}) + S_M \quad (2)$$

Onde:

U é a velocidade,

p é a pressão,

ν é a viscosidade cinemática (é a relação entre viscosidade absoluta (μ) pela massa específica (ρ)),

S_M é um termo fonte,

S_{ij} é um tensor simétrico denominado de tensor taxa de deformação, que pode ser obtido como indicado na equação 3:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

Quando um fluido está sujeito à convecção natural, a diferença de densidade causada pela variação de temperatura gera uma força chamada empuxo e é incluída na equação 2 como um termo fonte, e pode ser calculada pela equação 4. Assumindo que a densidade é constante, e usando a equação 5 que relaciona o coeficiente de expansividade térmica com a temperatura, chegamos na equação 6, que é o modelo de Boussinesq:

$$S_M = (\rho - \rho_{ref})g_i \quad (4)$$

$$\beta = \frac{1}{\rho} \left. \frac{\partial \rho}{\partial T} \right|_{cte} \quad (5)$$

$$S_M = \rho_{ref} \beta (T - T_{ref})g_i \quad (6)$$

onde:

ρ_{ref} é a massa específica de referência,

g é a gravidade local,

T_{ref} é uma temperatura de referência.

β é o coeficiente de expansão térmica, em K^{-1}

De forma similar as equações de conservação da massa e do momento, representando a equação da energia para um sistema de coordenadas cartesianas (x_i), ficamos com a equação 7.

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (U_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

onde:

T é a temperatura,

α é a difusividade térmica (razão entre a condutividade térmica e o produto da massa específica pelo calor específico a pressão constante).

3.2 EQUAÇÕES GOVERNANTES DA CIRCULAÇÃO NATURAL

No relatório da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA-TECDOC-1474, 2005) foram apresentadas as equações governantes para a circulação natural monofásica e bifásica. Este capítulo resume os resultados dessas formulações para o escoamento monofásico na subseção 3.2.1. Para o detalhamento completo das equações ver anexo 11 da citada referência.

3.2.1 EQUAÇÕES GOVERNANTES DA CIRCULAÇÃO NATURAL EM ESCOAMENTO MONOFÁSICO E COM INCLINAÇÃO DA PLATAFORMA

As equações de balanço de massa, momento e energia em volumes de controle podem ser formuladas para cada componente. Para formulação das equações, contexto da análise do fluxo de circulação natural monofásico, foram estabelecidas as seguintes hipóteses:

1. O fluxo unidimensional ao longo do eixo do circuito, assim, as propriedades do fluido foram consideradas uniforme em cada seção transversal;
2. A aproximação de Boussinesq é aplicável;
3. O fluido é incompressível;
4. Temperatura média do fluido na perna fria (T_C) é constante;
5. As perdas de forma, principalmente nas regiões do núcleo e gerador de vapor, predominam na resistência do circuito.

Ao adotar a aproximação de Boussinesq, todas as densidades do fluido no circuito foram consideradas iguais a uma densidade média, exceto aquelas que compõem o termo de flutuabilidade.

A equação de balanço de momento para circulação natural em regime monofásico é apresentada na equação 8:

$$\sum_{i=1}^N \left(\frac{l_i}{a_i} \right) \cdot \frac{d\dot{m}}{dt} = \beta g \rho (T_H - T_C) L_{th} - \frac{\dot{m}^2}{\rho a_c^2} \sum_{i=1}^N \left[\frac{1}{2} \left(\frac{f_l}{d_h} + K \right)_i \left(\frac{a_c}{a_i} \right)^2 \right] \quad (8)$$

onde:

a é a área de fluxo;

d_h é o diâmetro hidráulico;

f é o fator de atrito;

g é a constante gravitacional;

K é o coeficiente de Perdas de carga, resistividade hidráulica do circuito;

\dot{m} é a vazão mássica;

L_{th} é a distância entre os centros térmicos da fonte de calor e do dissipador de calor;

T_H é a temperatura média do fluido na perna quente;

T_C é a temperatura média do fluido na perna fria;

ρ é a massa específica;

Equação 9 define o balanço de Energia para circulação natural em regime monofásico:

$$C_{vl} M_{sys} \frac{d(T_M - T_C)}{dt} = \dot{m} C_{pl} (T_H - T_C) - \dot{q}_{SG} - \dot{q}_{loss} \quad (9)$$

onde:

C_{vl} é o calor específico a volume constante;

C_{pl} é o calor específico a pressão constante;

M_{sys} é a massa do sistema;

T_M representa uma temperatura média mista para o sistema.

Sob condições de estado estacionário, essas equações resultam na seguinte solução simples para a velocidade do fluido através do Circuito de Circulação Natural, de acordo com a equação 10:

$$u_{circuito} = \left(\frac{\beta \dot{q}_{co} L_{th} g}{\rho_l a_c C_{pl} \Pi_{Fl}} \right) \quad (10)$$

onde:

β é o coeficiente de expansão térmica que relaciona o coeficiente de expansividade térmica com a temperatura, K^{-1}

$u_{circuito}$ é a velocidade do escoamento no circuito;

\dot{q} é a taxa de transporte de potência ou calor;

Π_{Fl} é o termo adimensional de resistência do circuito é dado pela equação 15:

$$\Pi_{Fl} = \sum_{i=1}^N \left[\frac{1}{2} \left(\frac{f_l}{d_h} + K \right)_i \left(\frac{a_c}{a_i} \right)^2 \right] \quad (11)$$

Conforme mencionado no início desta seção, o Anexo 11 da referência (IAEA-TECDOC-1474, 2005) fornece todos os detalhes e as nomenclatura para cada um dos termos nas equações mostradas acima.

De acordo com IYORI et al. (1987) a inclinação causa não apenas uma mudança na força motriz da circulação natural, mas também uma quebra da simetria termo-hidráulica entre os circuitos constituintes devido à presença da gravidade.

O trabalho de Lai et al. (2022) apresenta várias conclusões e equações relacionadas à influência da inclinação e da gravidade nas características da circulação natural. As principais conclusões incluem:

1. **Influência da Inclinação:** A inclinação altera a força motriz da circulação natural, resultando em variações significativas no fluxo e na transferência de calor. A presença da gravidade causa uma quebra da simetria termo-hidráulica entre os circuitos, levando a um comportamento não uniforme.

2. Oscilações no Fluxo: A inclinação e a gravidade contribuem para oscilações no fluxo do fluido refrigerante, afetando a eficiência do sistema. O estudo sugere que a magnitude das oscilações está relacionada à direção e à intensidade da força adicional gerada pela inclinação.

3. Equação de Pressão: O trabalho apresenta uma equação que relaciona as diferentes componentes de pressão no sistema, incluindo a pressão de impulso, a pressão gravitacional, a pressão de atrito e a pressão adicional. É expressa na equação 12:

$$\sum \rho_i l_i \frac{du_i}{dt} = \sum \Delta\rho_d + \sum \Delta\rho_g + \sum \Delta\rho_f + \sum \Delta\rho_a \quad (12)$$

onde:

$\Delta\rho_d$ é a pressão de impulso;

$\Delta\rho_g$ é a pressão gravitacional;

$\Delta\rho_f$ é a pressão de atrito;

$\Delta\rho_a$ é a pressão de adicional.

4. Coeficiente de Resistência de Atrito: O estudo realizado por Lai et al. (2022), também fornece um modelo matemático para prever o coeficiente de resistência de atrito médio periódico, que é dividido em regiões de flutuação de fluxo e turbulência. A equação 13, que apresenta o coeficiente de resistência ao atrito, foi obtida através do ajuste de curva não linear:

$$f = \frac{0.3236[1 + (\sin\theta_m)^{1.3}]}{Re^{0.25}} \quad (13)$$

O escopo de aplicação da fórmula de previsão é: $5000 < Re < 35000$; $5^\circ < \text{ângulo de rotação} < 15^\circ$; e $8 < \text{período de rotação} < 16$ s. Os valores $n=1.3$ e $k=0.3236$ são coeficientes que foram determinados a partir do ajuste dos dados experimentais.

Essas conclusões e equações são fundamentais para entender como a inclinação e a gravidade afetam o desempenho dos circuitos de circulação natural, e os principais fatores afetados a partir da inclinação da plataforma, especialmente em aplicações marítimas onde as condições dinâmicas são prevalentes.

4.1 MODELOS DE ALGORITMOS EMPREGADOS PARA SIMULAÇÕES DE CN EM MODELICA

Neste capítulo, serão apresentados os modelos de algoritmos empregados para simulações numéricas em Modelica. Os algoritmos empregados para resolver as equações dos sistemas são baseados em métodos numéricos de integração, como Euler, Runge-Kutta, Gear, Radau, Dormand-Prince, entre outros. Cada algoritmo tem suas características, vantagens e desvantagens, dependendo do tipo de problema, da precisão desejada, do tempo de execução, da ocorrência de eventos, da conservação de propriedades, etc. Neste capítulo, serão descritos os principais algoritmos disponíveis para simulação do circuito de circulação natural, bem como suas aplicações, limitações e recomendações de uso, de acordo com o manual de usuário do OpenModelica (*OPENMODELICA- User's guide, 2024*).

- **Dassl:** DASSL (*Differential-Algebraic System Solver*) é um solver que utiliza métodos implícitos para resolver sistemas de equações diferenciais Ordinárias (EDOs) e equações algébricas (EAs).
- **Lsodar:** Lsodar (*Linear Solver ODE Solver with Automatic method switching for stiff and non-stiff problems*) é um algoritmo de solução de equações diferenciais ordinárias (ODEs) que incorpora métodos baseados na família de métodos Gear, também conhecidos como métodos implícitos lineares. O Lsodar, combina métodos implícitos, como o método Gear, com métodos explícitos, como o método Adams. Essa abordagem híbrida permite que o Lsodar se adapte automaticamente às características do problema, alternando entre métodos implícitos e explícitos conforme necessário para otimizar a eficiência computacional.
- **Euler:** O método de Euler é um método de passo simples e direto para resolver ODEs. Ele utiliza uma aproximação linear para avançar a solução no tempo. O método é simples de implementar, mas pode não ser muito preciso, especialmente para problemas complexos ou que envolvem curvas com variações rápidas.
- **Rkfix2, Rkfix3, Rkfix4:** são algoritmos baseados nos métodos de Runge-Kutta de segunda, terceira e quarta ordem, respectivamente. São usados para resolver sistemas de EDOs não stiff, com passo de integração fixo e precisão moderada.
- **Radau:** o método de Radau é uma classe de métodos de Runge-Kutta implícitos (*DIRK - Diagonally Implicit Runge-Kutta*). A abordagem do Radau é um método implícito de

ordem elevada projetado para resolver eficientemente equações diferenciais ordinárias (ODEs), especialmente aquelas que podem envolver sistemas stiff.

- **Esdirk23a, Esdirk34a, Esdirk45a:** são algoritmos baseados nos métodos de Runge-Kutta implícitos-explicitos (ESDIRK), de segunda, terceira e quarta ordem, respectivamente. São usados para resolver sistemas de EDOs stiff e não stiff, com passo de integração variável e controle de erro.
- **Dopri853 e Dopri45:** são algoritmos baseados nos métodos de Dormand-Prince, de oitava e quarta ordem, respectivamente. São usados para resolver sistemas de EDOs não stiff, com passo de integração variável e controle de erro.
- **Sdirk34hw:** é um algoritmo baseado no método de Runge-Kutta implícito de terceira ordem, com passo de integração variável e controle de erro. É usado para resolver sistemas de EDOs stiff, com estabilidade de A-stabilidade e L-stabilidade.
- **Cerk23, Cerk 34, Cerk 45:** são algoritmos baseados nos métodos de Runge-Kutta conservativos (CERK), de segunda, terceira e quarta ordem, respectivamente. São usados para resolver sistemas de EDOs que conservam alguma quantidade física, como energia ou momento, com passo de integração variável e controle de erro.
- **Cvode:** é um algoritmo integrador de equações diferenciais ordinárias (ODEs) baseado em métodos implícitos de álgebra linear, como métodos de Adams-Bashforth-Moulton. Ele utiliza a diferenciação para trás para discretizar as equações diferenciais, resultando em um método que é especialmente eficaz para lidar com sistemas stiff.

A escolha do melhor algoritmo para representar simulações termo-hidráulicas depende das características do problema, como a natureza das equações, a precisão desejada, o tempo de execução, a ocorrência de eventos, as equações de conservação envolvidas, propriedades termodinâmicas, etc. Em geral, os algoritmos que são mais adequados para esse tipo de simulação são os que têm passo de integração variável, controle de erro, tratamento de eventos e estabilidade numérica. Alguns exemplos são Lsodar, Radau, Esdirk45a, Dopri853, Sdirk34hw e Cvode. De acordo com o problema e o algoritmo escolhido, deve-se buscar um equilíbrio entre precisão e eficiência.

Os métodos de solução numérica, nomeadamente Lsodar, Radau, Esdirk45a, Dopri853, Sdirk34hw e Cvode, foram submetidos a testes para simulação do CCN IPEN. Observou-se que o método Lsodar exigiu um tempo computacional excessivamente prolongado. Tanto Cvode quanto Dopri não convergiram para os resultados esperados, além de apresentarem longos tempos de simulação. Por outro lado, os algoritmos Esdirk45a e Sdirk34hw exibiram resultados notáveis, entretanto, o método Esdirk45a demonstrou resultados mais favoráveis, mais consistentes com os resultados experimentais e numéricos obtidos no RELAP5 mod 3.3, além de requerer um tempo de solução inferior ao Sdirk34hw.

4.2 DESENVOLVIMENTO DO CCN EM MODELICA

Nesta seção serão apresentadas as condições de contorno utilizadas na modelagem e simulação do Circuito de Circulação Natural em Modelica, utilizando a plataforma do Dymola. Em seguida serão descritos os procedimentos utilizados para modelagem dos dados de entrada em Modelica, bem como as particularidades da simulação do CCN no Dymola.

4.2.1 CONDIÇÕES DE CONTORNO PARA SIMULAÇÃO DO CCN EM MODELICA

As condições de contorno aplicadas na modelagem para simulação do CCN em linguagem Modelica, foram as mesmas apresentadas nos trabalhos prévios de ANGELO (2013) e FRENZEL (2023). A manutenção das mesmas condições de contorno usadas nas simulações dos trabalhos que se desejam comparar, garante consistência na aplicação da metodologia para comparar os resultados das simulações em linguagem Modelica com os trabalhos precedentes. Esta prática garante a reprodutibilidade dos experimentos e simulações, possibilitando a validação cruzada dos resultados e, conseqüentemente, a robustez das conclusões.

Ao empregar condições de contorno consistentes, é possível isolar variáveis específicas e avaliar de maneira precisa as discrepâncias ou convergências entre os conjuntos de dados. A comparabilidade entre os resultados obtidos no presente estudo e as pesquisas anteriores é essencial para identificar padrões, corroborar descobertas e destacar possíveis melhorias metodológicas ao longo do tempo. Além disso, a uniformidade nas condições de contorno oferece uma base sólida para a generalização dos resultados, permitindo inferências confiáveis sobre o fenômeno estudado e, por conseguinte, contribuindo para o avanço do conhecimento na área em questão.

As condições de contorno utilizadas para simulação do CCN em Modelica são apresentadas a seguir:

1. Temperatura média do fluido no interior dos tubos do trocador de calor de $24,7^{\circ}\text{C}$;
2. Coeficiente de transferência de calor médio na parede interna dos tubos do trocador de calor de $835,4 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$;
3. A taxa de transferência de calor nas resistências de aquecimento de $Q_A = 1000 \text{ W}$, equivale a um fluxo de calor de $25250 \text{ W}/\text{m}^2$;
4. Condição de não escorregamento em todas as paredes que são consideradas com rugosidade média próxima de zero, ou seja, paredes lisas para os tubos de vidro, a exceção é a superfície da resistência térmica cuja rugosidade foi estimada em $0,0015 \text{ mm}$ (considerada um valor médio para o aço inoxidável com acabamento superficial usinado);
5. O valor do coeficiente de transferência de calor médio na superfície externa dos tubos de vidro componentes do circuito é de $8 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ – valor estimado pela aplicação do balanço de energia no circuito completo, em condição de regime permanente, conforme indicado na equação 14:

$$\bar{h}_{amb} = \frac{Q_A - Q_{TC}}{A_{ST}(T_{ST} - T_{amb})} \quad (14)$$

6. Temperatura média do ar ambiente do local onde se encontra o CCN $T_{amb} = 21,05^{\circ}\text{C}$;

Hipóteses simplificadoras adotadas:

- a) Trocas térmicas por radiação desprezível.

Diferentemente do trabalho de ANGELO (2013) foi considerada a resistência térmica da condução nos tubos de vidro do trocador de calor.

A simulação numérica começou com o fluido no CCN a uma temperatura inicial de $20,05^{\circ}\text{C}$ e velocidade zero em todo o circuito. As demais condições de contorno foram mantidas conforme previamente especificado. O regime permanente foi alcançado quando, ao longo do tempo, não houve mais variações nas grandezas dentro do circuito.

4.2.2 MODELAGEM DOS DADOS DE ENTRADA DO CCN EM MODELICA

4.2.2.1 DADOS GERAIS DE MODELAGEM DO CCN EM MODELICA

A nodalização empregada na linguagem Modelica, especialmente utilizada em Modelica, consiste na descrição de sistemas físicos por meio de equações diferenciais e algébricas, e integrando os componentes do sistema através de conectores. Em Modelica, os conectores são utilizados para representar a interconexão entre os componentes do sistema. Eles desempenham um papel semelhante ao conceito de "nós" em outras abordagens de nodalização. Os conectores em Modelica permitem que você conecte diferentes partes do seu modelo e especifique as relações entre as variáveis nesses pontos de conexão.

Também é possível subdividir cada componente do sistema em pequenos volumes, visando uma modelagem mais precisa de fenômenos físicos complexos. Cada pequeno volume representa uma região do circuito com propriedades físicas (como temperatura, densidade, pressão, concentração, entre outras) e condições locais específicas do fluido. Cada um dos volumes adjacentes interage entre si através de transferências de massa, calor e momento, etc.

Portanto, a nodalização define as conexões entre componentes, que é uma parte integrante do processo de modelagem em Modelica. Essas conexões nodais ajudam a construir modelos mais modulares e representam relações físicas entre os componentes do sistema.

Antes de iniciar a modelagem do Circuito de Circulação Natural (CCN) em Modelica, foram levantadas as informações necessárias para simulação numérica com base nos trabalhos de FRENZEL e SABUNDJIAN (2023) e ANGELO et al. (2012) a fim de se garantir reprodutibilidade nos resultados e garantir maior eficiência no procedimento:

1. Para fins de comparação, foram especificadas as mesmas condições iniciais e de contorno do problema definidos nos trabalhos de FRENZEL e SABUNDJIAN (2023) e ANGELO et al. (2012), bem como, medidas geométricas, propriedades dos materiais e distribuição das temperaturas iniciais, entre outros.

2. A fim de garantir uma discretização do CCN conforme os trabalhos precedentes, também foi empregado o conceito de nodalização estruturada (*slice nodalization technique*). Nessa técnica, cada corte horizontal feito na nodalização deve possuir volumes na mesma cota,

garantindo que os volumes de controle dos lados esquerdo e direito possuam valores de comprimento aproximadamente iguais. A Figura 21 apresenta o conceito da aplicação da técnica *slice nodalization*.

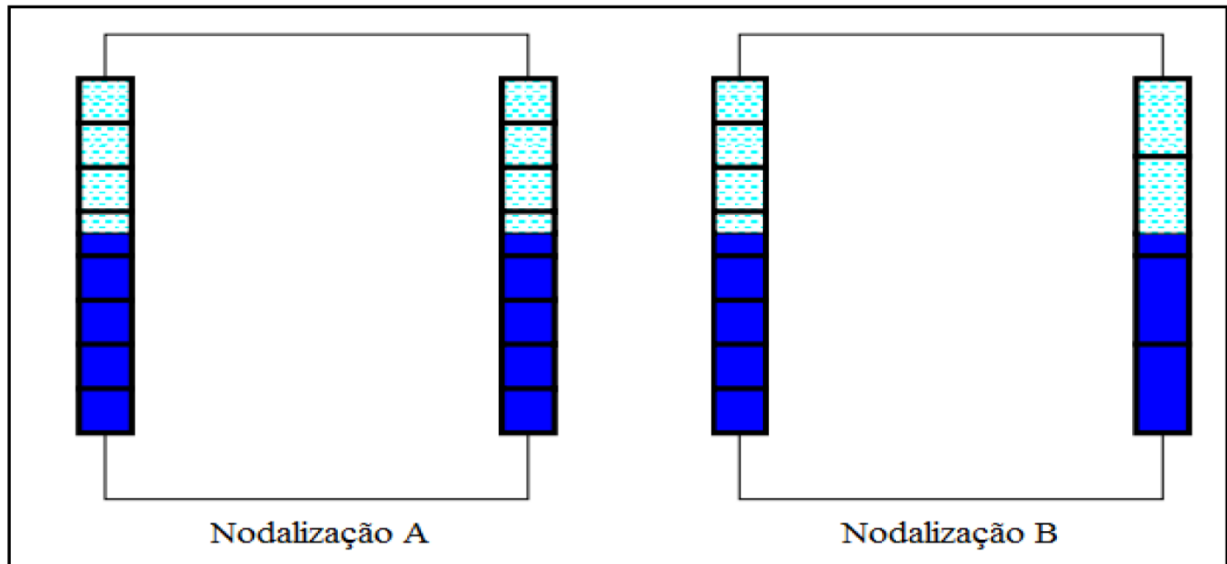


Figura 21 – Nodalização simples com a técnica *slice nodalization*

Fonte: FRENZEL (2023).

De acordo com o trabalho de FRENZEL e SABUNDJIAN (2023 apud BAJIS et al, 2000), a Nodalização A demonstra resultados coerentes com a realidade, ao passo que a Nodalização B, que não incorpora o conceito de *slice nodalization*, produz resultados imprecisos.

Aplicando a técnica “*slice nodalization*” ao Circuito de Circulação Natural do IPEN, foram mantidos o mesmo número de nós para as pernas quente e fria, assim como dimensões de altura idênticas para os lados esquerdo e direito do circuito. Na Figura 22 abaixo mostra um esquema da nodalização sugerida para o circuito primário do CCN do IPEN, excluindo a linha de surto e o tanque de expansão.

Perna quente 03 ($\varnothing 38,1$ mm) (888,1 mm)						
	[1]	[2]	...	[8]	[9]	
Perna quente 02 ($\varnothing 38,1$ mm) (300 mm)	[3]				[1]	Trocador de calor (634 mm)
	[2]				[2]	
	[1]				[3]	
Perna quente 01 ($\varnothing 38,1$ mm) (1.331,9 mm)	[13]				[4]	
	[12]				[5]	
	...				[6]	
	[2]				[1]	Perna fria 01 ($\varnothing 38,1$ mm) (1.480 mm)
[1]	[2]					
Aquecedor - saída ($\varnothing 76,2$ mm) (310 mm)	[3]				[3]	
	[2]				...	
	[1]				[13]	
Aquecedor - resistência ($\varnothing 76,2$ mm) (620 mm)	[6]				[14]	
	[5]				[15]	
	[4]				[1]	Perna fria 02 - medidor de vazão ($\varnothing 38,1$ mm) (407,5 mm)
	[3]				[2]	
	[2]	[3]				
	[1]	[4]				
	[8]	...	[1]	Perna fria 03 ($\varnothing 38,1$ mm) (792,85 mm)		

Figura 22 – Nodalização simples aplicada ao CCN em modelica com a técnica *slice nodalization*.

Fonte: autor.

Em Modelica, os componentes podem ser divididos em “*volumes nodes*”, que é a forma de representar volumes dentro de um sistema físico. Um “*volume node*” representa uma região em um sistema físico onde as propriedades como temperatura, pressão, densidade, etc., são consideradas uniformes ou aproximadamente uniformes. Em outras palavras, é uma região onde as condições internas são consideradas homogêneas o suficiente para serem consideradas

como um único volume, permitindo modelar o comportamento de sistemas físicos de forma mais precisa e eficiente.

Na modelagem apresentada na Figura 22 foram utilizados o mesmo número de *volumes nodes* para as pernas quente e fria, respectivamente o lado esquerdo e direito, e com as mesmas dimensões de altura, seguindo a metodologia de nodalização estruturada (*slice nodalization*). Todo o circuito do CCN foi modelado com o componente PIPE. Os PIPES da seção do aquecedor possuem diâmetro de 76,2 mm, os PIPES do trocador de calor possuem 50,8 mm e todo resto do CCN possui 38,1 mm. A diferença de altura entre os pontos médios do aquecedor e do trocador de calor é de aproximadamente 1,8 m.

O aquecedor foi dividido em duas seções: Aquecedor – resistência e Aquecedor-tubo. A seção do aquecedor-resistência é a região onde ficam localizadas as duas resistências elétricas, com comprimentos de 600 mm e 620 mm. A seção aquecedor-resistência foi dividida em 6 *volumes nodes*. Ambas as seções do aquecedor foram modeladas em Modelica como um Tubo (componente *GenericPipe*), no entanto, na seção aquecedor-resistência foi modelada para permitir o fornecimento de um fluxo de calor ao fluido. A seção aquecedor-tubo é basicamente um tubo de 310 mm que foi dividida em 3 *volumes nodes*, com o mesmo diâmetro da seção anterior, mas sem o termo de fornecimento de calor, devido à ausência de resistência.

As pernas quentes 01, 02 e 03 consistem em PIPES com 1.331,9 mm, 300 mm e 888,1 mm de comprimento, e contendo 13, 3 e 9 *volumes nodes*, respectivamente. No canto superior da perna quente foi selecionado um trocador de calor genérico com funcionamento em contracorrente e modelado conforme informações obtidas do CCN IPEN. Para a modelagem do trocador de calor casco-tubo foram consideradas a mesma área de troca térmica das duas serpentinas helicoidais do trocador de calor do CCN, no entanto, foram consideradas como trechos retos dos tubos no trocador de calor.

Ainda no circuito secundário, foram selecionados dois componentes de fluxo para fornecimento e retorno do fluido de resfriamento, onde foram observadas a vazão de 0,02772 kg/s bem como as temperaturas dos experimentos.

A perna fria 01, que se inicia logo após o trocador de calor, possui 1.480,0 mm e foram divididas em 15 *volumes nodes*. A perna fria 02, em que é montado o sensor de medição de

vazão do circuito, possui 407,5 mm de comprimento e foi organizada em 04 *volumes nodes*. Por fim a perna fria 03 possui 792,85 mm e foi dividida em 8 *volumes nodes*, conectando-se a base do aquecedor. A perna quente 03 e a perna fria 03 são as tubulações horizontais do CCN.

O CCN possui uma linha de surto que sai da perna fria 03 e se conecta com um tanque de expansão localizado na parte superior do circuito. Essa linha serve para acomodar as variações de pressão ocorridas no CCN.

Após a conclusão das etapas iniciais, um novo projeto pode ser criado alterando algum parâmetro de entrada e permitindo assim realizar novas simulações. Embora a POO do Modelica seja intuitiva em sua utilização, é recomendado consultar o manual de usuário da ferramenta disponível na internet para otimizar sua eficácia, especialmente no que diz respeito ao preenchimento adequado dos dados. A modelagem geométrica do circuito foi elaborada visando representar de forma mais precisa possível o fenômeno de circulação natural para o escoamento monofásico. Os pontos de medição dos termopares, conforme mostrado na Figura 19, foram configurados em Modelica para corresponder aos pontos centrais dos volumes de controle da nodalização do Circuito de Circulação Natural (CCN). A representação completa do circuito de circulação natural em Modelica, seus componentes, componentes de especificação dos materiais dos tubos, componentes convectivos e de vizinhança modelados é apresentado na Figura 23 .

A modelagem orientada a objetos em linguagem Modelica permite a criação de diagramas utilizando os componentes de uma determinada biblioteca. Para isso, basta selecionar o componente desejado e para levar para a área de trabalho basta clicar duas vezes no ícone do componente ou utilizar o recurso arraste e solte, também conhecido como “*drag and drop*”, na posição desejada do diagrama.

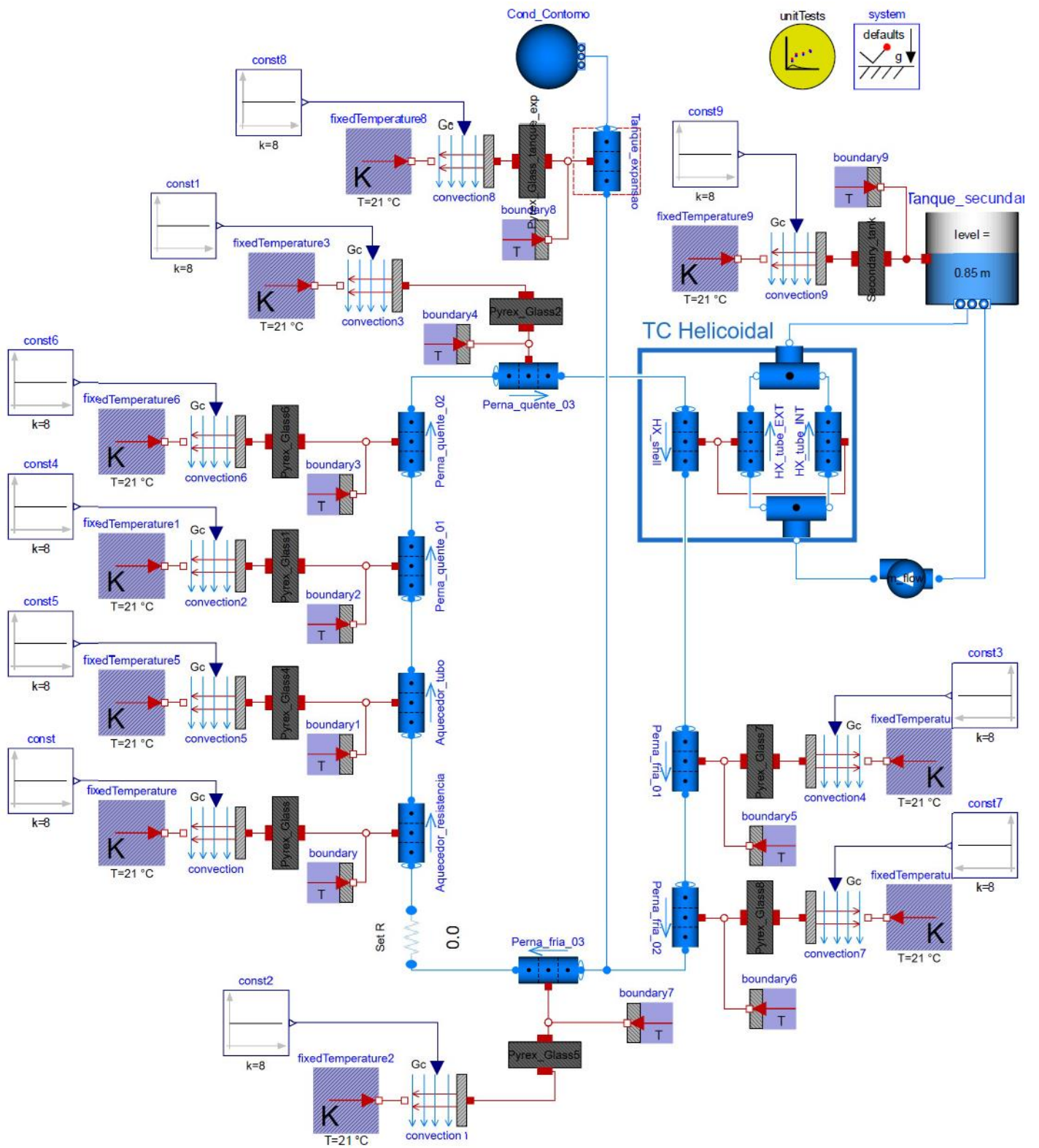


Figura 23 – Modelagem do CCN em Modelica com os componentes do circuito, componentes de material das paredes dos tubos, componentes convectivos e vizinhança.

Fonte: autor.

Na modelagem do CCN foram utilizados diferentes componentes, dentre eles o “*GenericPipe_MultiTransferSurface*”, que foi utilizado para todas as tubulações, destacou-se por várias razões. Primeiro, o modelo permitiu representar sistemas de fluxo distribuído, dividindo o volume total em segmentos (*volume nodes*) ao longo do caminho do fluxo. Isso é essencial para capturar com precisão as interações fluidodinâmicas e térmicas que ocorrem no circuito. Além disso, o modelo fornece equações de balanço completas para fluxo unidimensional de fluidos, incluindo balanços de massa, energia e momentum garantindo uma representação completa do fenômeno de circulação natural do sistema. A capacidade de incorporar a transferência de calor entre o fluxo e as superfícies dos segmentos também é crucial para modelar adequadamente os fenômenos de transferência de calor no CCN. Na Figura 24 tem-se a visualização da janela geral para especificação dos dados de entrada no componente.

Na Figura 24 foram adicionadas quatro posições importantes com o intuito de fornecer mais detalhes da modelagem empregada para simulação do CCN. A marcação número 1, refere-se a caixa para seleção e definição das propriedades do meio. Para a simulação do CCN foi utilizada a formulação industrial fornecida pela IAPWS em 1997 para as Propriedades Termodinâmicas de Água e Vapor.

A marcação número 2 refere-se ao local para inserção dos dados da geometria do componente. Na Figura 25 tem-se a caixa de edição dos dados geométricos do componente. Onde são adicionadas as informações do número de volumes, diâmetro, comprimento, ângulo que o componente faz com o plano horizontal, posicionamento do componente no plano cartesiano, entre outras informações. Algumas fórmulas e outras informações complementares são preenchidas automaticamente e aparecem na janela na cor cinza.

Na terceira marcação mostrada na Figura 24 é possível fazer a seleção da relação para o escoamento do modelo. Para o escoamento no regime monofásico, dentre os modelos disponíveis, foi selecionado o “*TRANSFORM.Fluid.ClosureRelations.PressureLoss.Models.DistributedPipe_1D.SinglePhase_Developed_2Region_Simple*” que é um modelo da biblioteca TRANSFORM bastante utilizado para prever perdas de carga em escoamentos monofásicos em condições tanto laminar quanto turbulenta. Esse modelo emprega o método simples que aplica as equações para representação

do escoamento de acordo com o seu respectivo comportamento, podendo ser integrado em modelos de sistemas fluidos em Modelica, permitindo a análise de sistemas hidráulicos completos com uma precisão satisfatória.

O ponto 4 permite a seleção da função *use_HeatTransfer* como “false” ou “true”. Selecionando como “true” são ativadas as caixas para seleção do modelo de transferência de calor, bem como o campo para inserção dos dados para geração interna de calor.

Para início das simulações foi selecionado o modelo da biblioteca TRANSFORM “TRANSFORM.Fluid.ClosureRelations.HeatTransfer.Models.DistributedPipe_1D_MultiTransferSurface.Nus_SinglePhase_2Region” que é um modelo usado para representar transferências de calor em regime monofásico em tubulações distribuídas em uma dimensão. Esse modelo incorpora as correlações de Nusselt para estimar os coeficientes de transferência de calor, levando-se em conta o regime de escoamento e a geometria da tubulação, permitindo uma representação mais realista da distribuição de temperatura ao longo da tubulação e a análise do desempenho térmico do sistema. Além disso, esse modelo é altamente flexível e pode ser adaptado para lidar com uma variedade de condições operacionais e de propriedades do fluido. Isso inclui a capacidade de considerar variações na temperatura, pressão, composição do fluido, diferentes geometrias e materiais da tubulação.

A ativação da função *use_HeatTransfer* ainda permite configurar a geração de calor interna na tubulação. Para o aquecedor do CCN, foi utilizado esse recurso, que admite configurar facilmente a potência térmica dissipada pelas resistências elétricas ao fluido de trabalho que passa através do aquecedor.

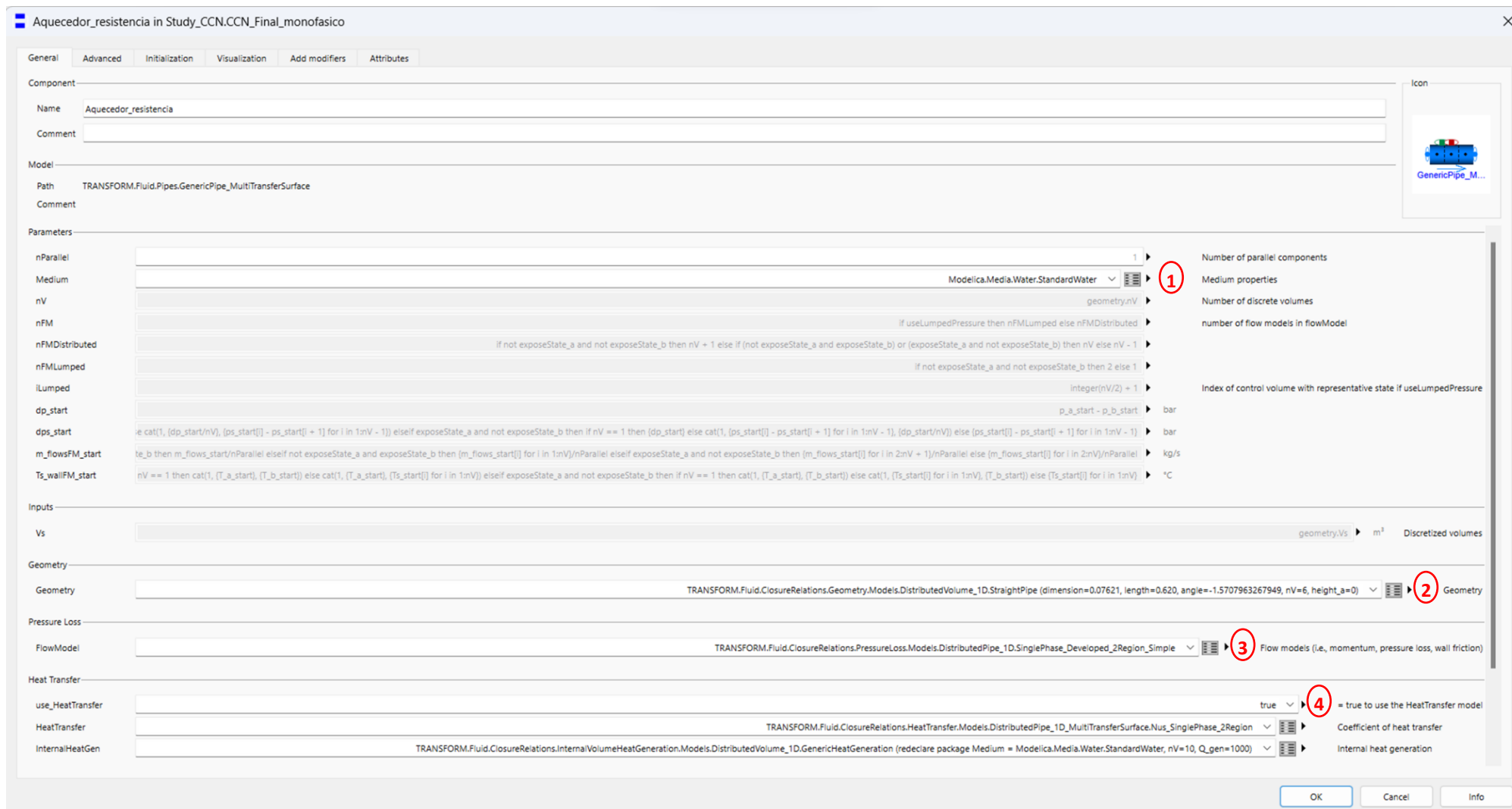


Figura 24 – Janela geral de edição do componente “GenericPipe_MultiTransferSurface” em POO.

Fonte: autor

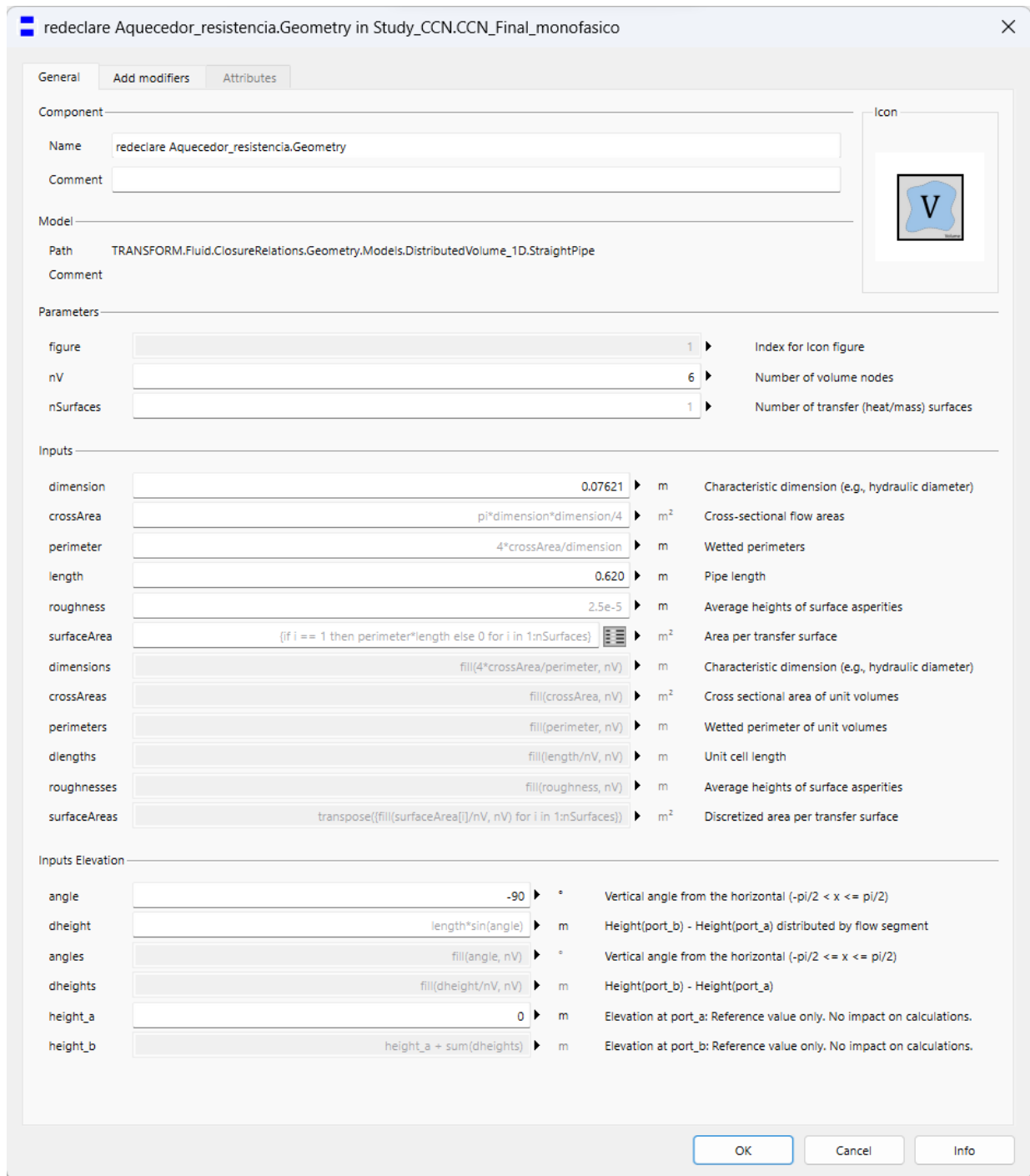


Figura 25 – Janela específica para edição dos dados de geometria do componente “GenericPipe_MultiTransferSurface” em POO.

Fonte: autor

Para especificação do material Pyrex utilizado na tubulação do CCN foi adicionado um componente chamado WallConstProp que é um modelo simples de parede de tubo assumindo condução de calor unidimensional e propriedades do material constantes. Por esse componente é possível determinar a capacitância térmica do material através das propriedades

fornecidas como densidade, calor específico e condutividade térmica e temperatura além das informações de geometria do componente como espessura do material e área de transferência de calor. Como cada trecho da tubulação possui um comprimento diferente foi necessário inserir um componente para cada trecho do circuito, sendo posicionado entre o próprio tubo e o componente convectivo. Na Figura 26 é apresentada a janela para inserção das propriedades térmicas e geométricas da tubulação.

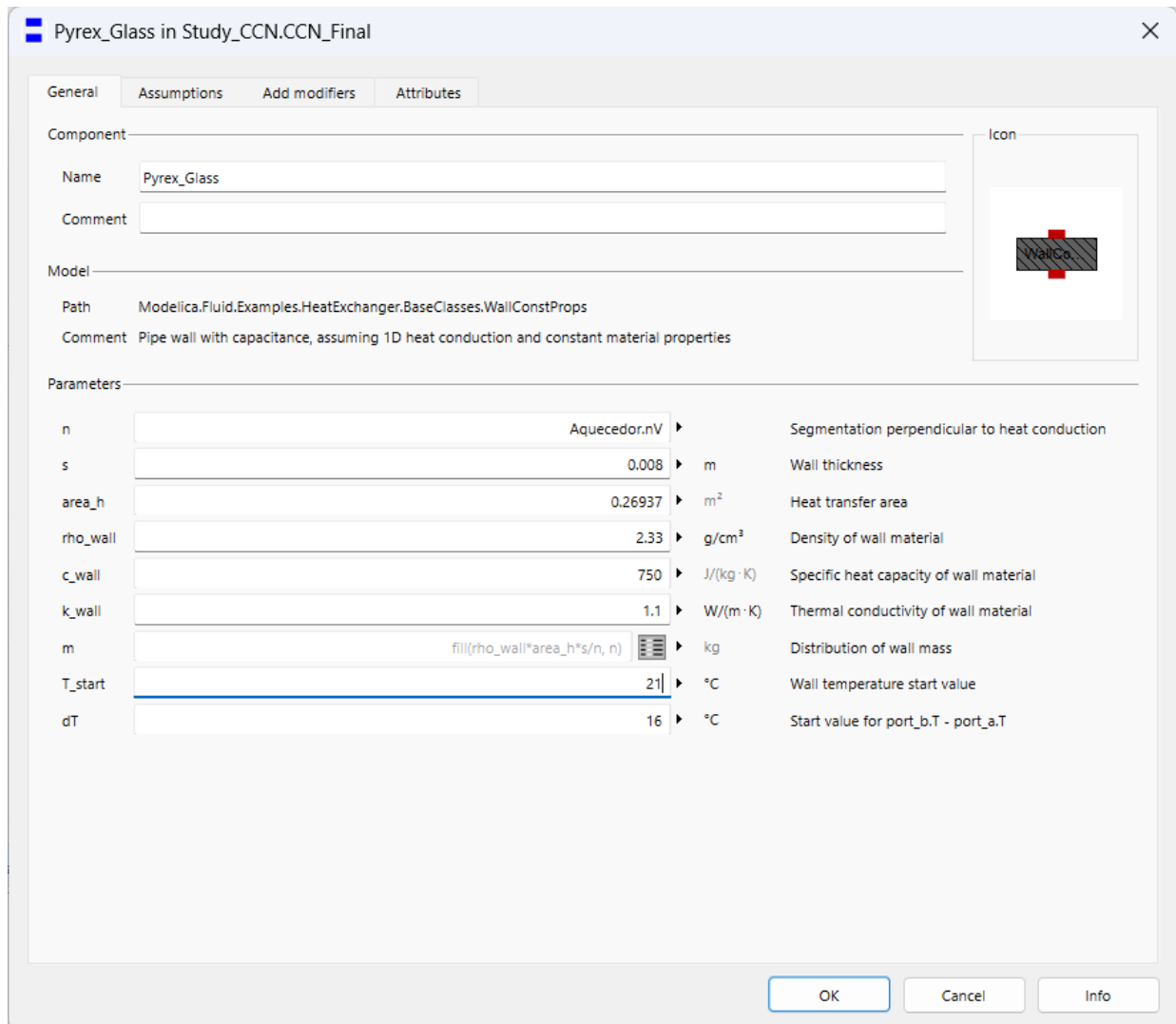


Figura 26 – Janela de edição das propriedades térmicas e geométricas do componente “WallConstProps” em POO.

Fonte: autor

Para considerar a convecção no CCN, além do componente convectivo são necessários dois outros componentes do Modelica para completar as informações necessárias. Um para fornecer a temperatura ambiente e outro para fornecer o coeficiente de transferência de calor

por convecção. O valor do coeficiente de transferência de calor médio na superfície externa dos tubos de vidro é de $8 \text{ W/m}^2\text{K}$ conforme apresentado no item (5) do tópico 4.2.1.

A modelagem do Trocador de Calor (TC) foi desenvolvida utilizando também componentes PIPE e aplicando uma função que considera a dissipação de calor de um tubo helicoidal “kc_overall”. Essa função fornece o coeficiente médio de transferência de calor para um tubo helicoidal. Dessa forma, o TC helicoidal foi configurado com um tubo (HX_shell) para representar o casco externo e dois tubos conectados paralelamente e internamente para representar os tubos helicoidais.

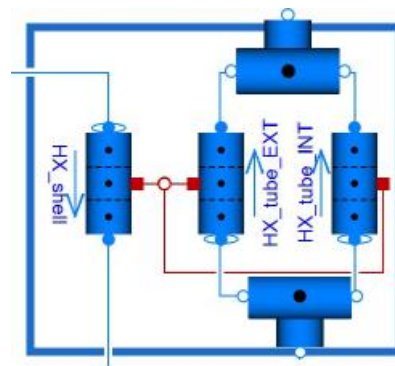


Figura 27 – TC helicoidal modelado em POO.

Fonte: autor

No dimensionamento do TC helicoidal são necessárias informações como número total de voltas do helicoide, diâmetro hidráulico, passo (ou distância entre voltas) e o comprimento “reto” total do tubo helicoidal. Cada um dos tubos do TC helicoidal possui 36 voltas. O diâmetro hidráulico e o passo podem ser obtidos do Detalhe B mostrado na Figura 18. Já o comprimento horizontal de cada um dos tubos pode ser calculado a partir da equação 15:

$$L_H = \sqrt{(2\pi Rn)^2 + H^2} \quad (15)$$

onde,

R é o raio da hélice;

n é o número de voltas;

H é altura total da hélice;

Assim, os comprimentos dos tubos helicoidais externo e interno do TC são 4,493 m e 2,65 m, respectivamente. Lançando

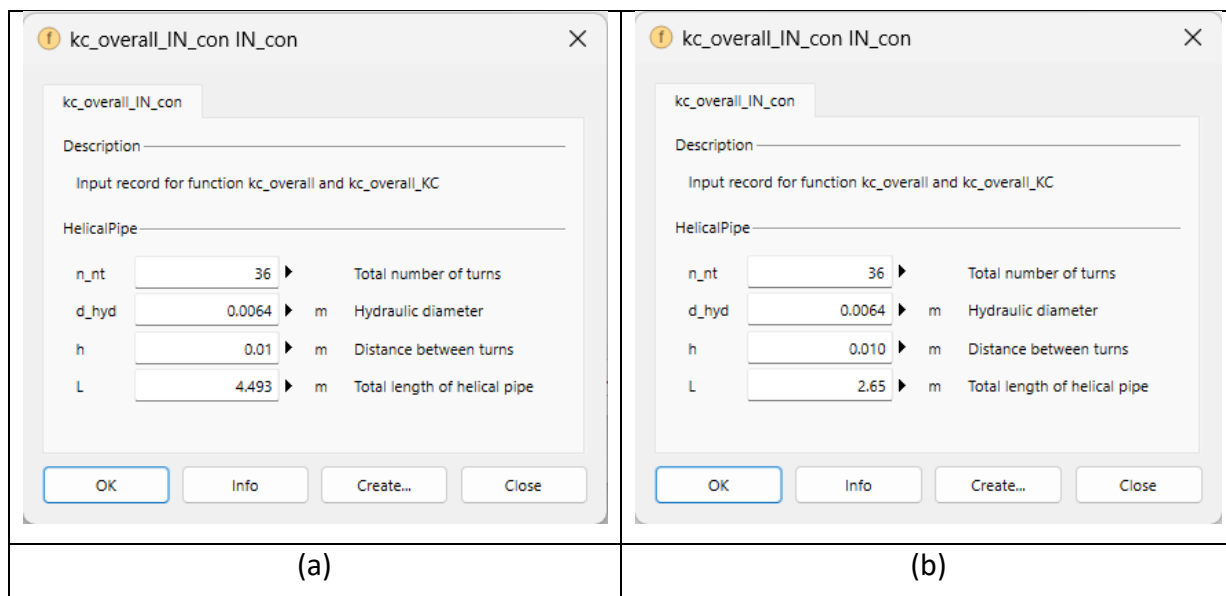


Figura 28 – Janela de edição das propriedades geométricas do tubo helicoidal: (a) tubo externo (HX_tube_EXT); e (b) tubo interno (HX_tube_INT).

Fonte: autor

4.2.2.2 DADOS PARA MODELAGEM DA INCLINAÇÃO DO CCN EM MODELICA

Em linguagem Modelica, a inclinação de um modelo para simulação numérica é configurada através da definição de ângulos específicos e do posicionamento dos componentes no espaço. Para a simulação em questão, foram selecionadas inclinações de 5°, 15° e 30° para verificar o efeito na CN. Para a modelagem dos ângulos de inclinação em linguagem Modelica, a perna fria foi definida com uma inclinação de 90° com a horizontal, indicando que essa perna está completamente vertical. Em Modelica, isso é interpretado como um segmento do circuito que sobe diretamente a partir do ponto de origem sem qualquer desvio lateral, ou seja, a componente horizontal é zero e a componente vertical é máxima.

Por outro lado, uma inclinação de -90° com a horizontal para a perna quente significa que essa perna também é completamente vertical, mas no sentido oposto. A linguagem Modelica interpreta essa orientação como uma descida direta a partir de um ponto específico do circuito, novamente com a componente horizontal sendo zero e a componente vertical no sentido oposto à perna fria.

Em Modelica, a geometria do circuito é definida por coordenadas espaciais e ângulos de inclinação. Quando um segmento é definido com uma inclinação específica, o software utiliza essas informações para calcular a orientação espacial de cada componente. As angulações de

90° e -90° são tratadas como orientações verticais absolutas no espaço 3D. Para qualquer inclinação diferente de 0°, a linguagem Modelica ajusta a orientação do componente para refletir o ângulo especificado em relação à horizontal.

No contexto da inclinação do CCN, as inclinações de 5°, 15° e 30° para a perna horizontal, considerando o eixo de rotação na base do aquecedor podem ser verificadas na Figura 29. Essas inclinações positivas afetam diretamente as inclinações verticais das pernas quente e fria do circuito, contribuindo para o resultado da simulação.

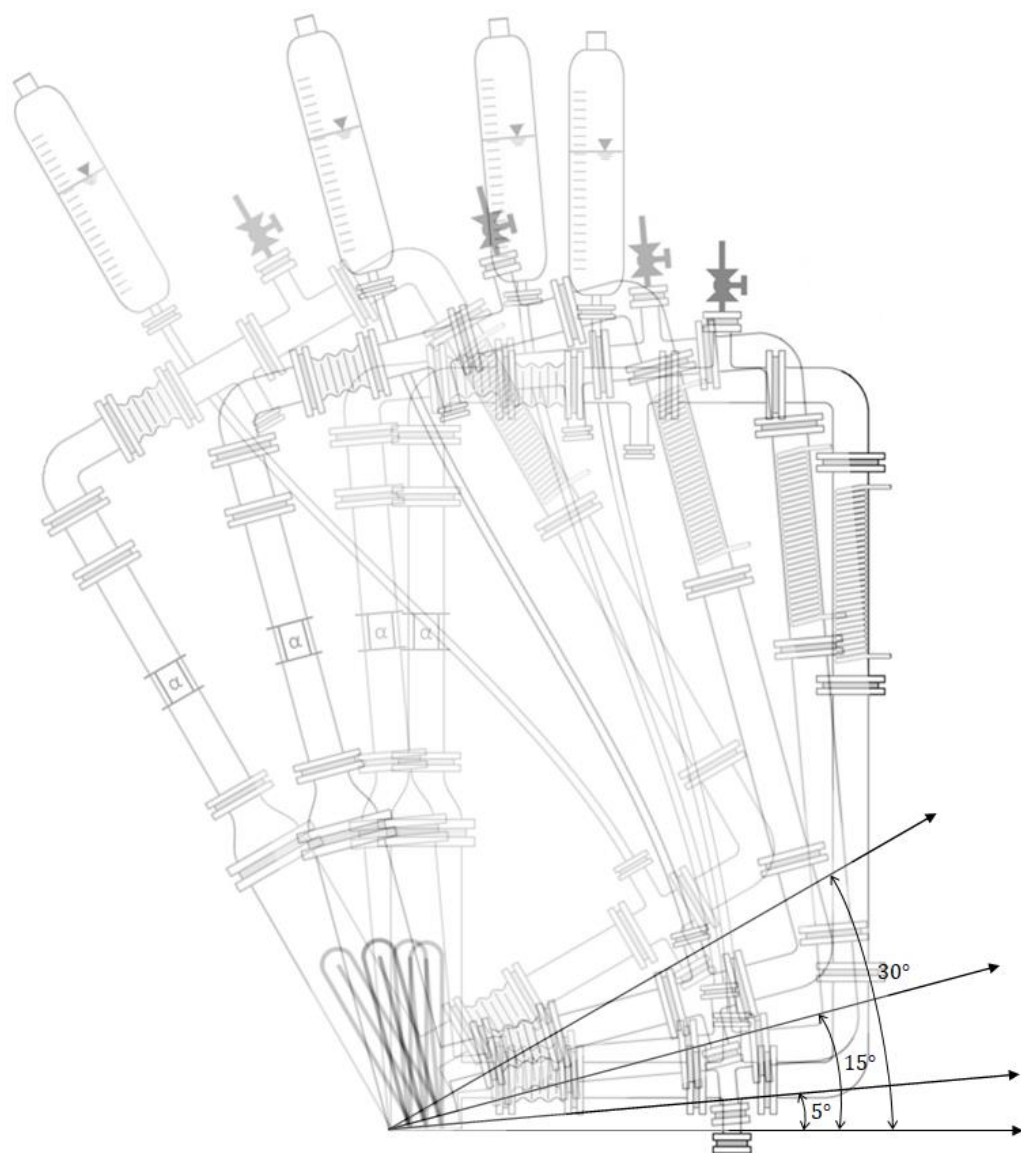


Figura 29 – Inclinações positivas do CCN para 5°, 15° e 30°.

Fonte: autor

Ao aplicar inclinações positivas de 5°, 15° e 30° à perna horizontal do circuito, estas inclinações se somam ou subtraem às inclinações verticais das pernas quente e fria. Para uma inclinação de 5° na perna horizontal, a perna fria, inicialmente a 90° com a horizontal, terá sua inclinação ajustada para 95° em relação ao eixo de rotação da base do aquecedor. Da mesma forma, a perna quente, inicialmente a -90°, será ajustada para -85°. Com uma inclinação de 15°, a perna fria passa a ter uma inclinação de 105° em relação à horizontal, enquanto a perna quente terá uma inclinação de -75°. Para uma inclinação de 30°, a perna fria é ajustada para 120°, e a perna quente para -60°, sempre em relação à horizontal e considerando o eixo de rotação na base do aquecedor. Na Tabela 7 tem-se um resumo das inclinações positivas utilizadas para inclinação do CCN.

Tabela 7 – Inclinações positivas do CCN

Inclinações	Perna_quente	Perna quente H_SUP Perna fria H_INF	Perna_fria	TC_secundário
Default (0°)	-90°	0°	90°	90°
Inclinação de 5°	-85°	5°	95°	95°
Inclinação de 15°	-75°	15°	105°	105°
Inclinação de 30°	-60°	30°	120°	120°

Fonte: autor da dissertação.

Esses ajustes são cruciais para a simulação da condição inclinada do CCN em POO, pois as inclinações verticais das pernas quente e fria influenciam no fluxo desenvolvido, na distribuição de calor no circuito e consequentemente na capacidade de remoção de calor por CN (IORY et al, 1987), (MURATA et al., 1990), (LIHUI et al. 2017) e (LAI et al., 2022). A soma ou subtração das inclinações horizontais influencia diretamente esses parâmetros, permitindo que a simulação reflita com precisão o comportamento real do sistema. As inclinações positivas refletem a condição de um submarino emergindo (subindo para a superfície).

Da mesma forma que as inclinações positivas, as inclinações negativas de -5°, -15° e -30° na perna horizontal também desempenham um papel significativo na configuração do circuito. Considerando o eixo de rotação na base do aquecedor, essas inclinações negativas subtraem-se das inclinações verticais das pernas quente e fria. Para uma inclinação de -5°, a perna fria,

inicialmente a 90° com a horizontal, terá sua inclinação ajustada para 85° , enquanto a perna quente, inicialmente a -90° , será ajustada para -95° . Com uma inclinação de -15° , a perna fria passa a ter uma inclinação de 75° em relação à horizontal, enquanto a perna quente terá uma inclinação de -105° . Para uma inclinação de -30° , a perna fria é ajustada para 60° , e a perna quente para -120° . As inclinações negativas reproduzem a condição de um submarino submergindo (mergulhando), que podem ser visualizadas na Figura 30.

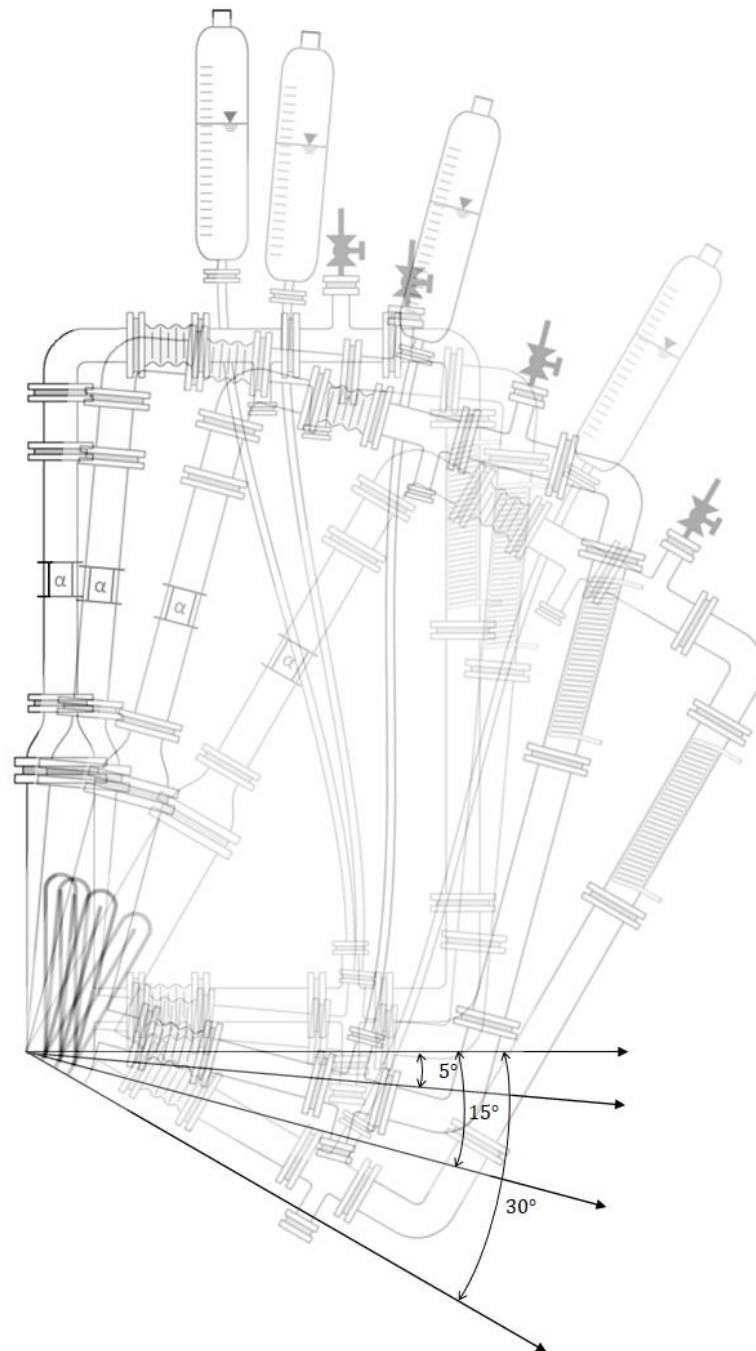


Figura 30 – Inclinações negativas do CCN para 5° , 15° e 30° .

Fonte: autor

Na Tabela 8 tem-se um resumo das inclinações negativas utilizadas para inclinação do CCN. A Tabela 7 e Tabela 8 apresentam as inclinações das pernas quente e fria ajustadas após a aplicação das inclinações horizontais positivas e negativas, ilustrando visualmente os ajustes e seus impactos no sistema.

Tabela 8 – Inclinações negativas do CCN

Inclinações	Perna_quente	Perna quente H_SUP Perna fria H_INF	Perna_fria	TC_Secundário
Default (0°)	-90°	0°	90°	90°
Inclinação de 5°	-95°	-5°	85°	85°
Inclinação de 15°	-105°	-15°	75°	75°
Inclinação de 30°	-120°	-30°	60°	60°

Fonte: autor da dissertação.

Em resumo, as inclinações de 5°, 15° e 30° na perna horizontal do circuito, somadas ou subtraídas das inclinações verticais das pernas quente e fria, ajustam a orientação espacial dos componentes do circuito. Considerando o eixo de rotação na base do aquecedor, essas inclinações são fundamentais para garantir a precisão e a confiabilidade da simulação em linguagem Modelica. A Figura 29 e Figura 30 complementam o entendimento dessas inclinações positivas (emergindo) e negativas (submergindo), ilustram as inclinações no caso do CCN estar alinhado com o eixo longitudinal de um submarino. Nestas figuras, a configuração inicial das pernas quente e fria, com inclinações de -90° e 90°, são sobrepostas com as respectivas inclinações do CCN.

4.2.3 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO CCN NO DYMOLA

A versão Dymola 2024x refresh 1 foi utilizada como plataforma de simulação do Circuito de Circulação Natural (CCN), proporcionando um ambiente robusto e versátil para a modelagem e análise dinâmica do sistema. Esta versão do Dymola, que incorpora avanços recentes na linguagem Modelica, permitiu a representação precisa dos componentes multifísicos envolvidos no CCN, incluindo aspectos térmicos, hidráulicos e mecânicos.

Com os dados iniciais de modelagem do CCN inseridos na ferramenta de programação orientada a objeto, pode ser iniciada a configuração da simulação, escolhendo o melhor algoritmos para solução das equações, regime de simulação, com ou sem inclinação. Assim como em qualquer resultado de simulação numérica, a análise dos resultados é uma das fases mais importantes, pois nunca se deve aceitar a solução de um código sem se perguntar se o resultado parece razoável.

É válido lembrar que, assim como o RELAP5/MOD3.3, a linguagem Modelica também aborta a simulação em caso de não alcançar a convergência adequada. É provável que isso se deva a um erro de massa excessivo, em que as fontes desse tipo de erro podem ser as mais variáveis, como por exemplo, erros de discretização, condições de contorno inadequadas, modelagem incorreta, parâmetros de entrada incorretos e mesmo por problemas numéricos inerentes ao método de solução apropriado. Portanto, é fundamental realizar um exame completo da saída do código em cada análise, garantindo que todas as tendências apresentadas pelo cálculo sejam consistentes com as condições de contorno, condições iniciais, padrões de escoamento e comportamentos previamente conhecidos de estudos similares, ou de uma representação simplificada do problema, ou por meio de experimentos.

No caso deste trabalho, os trabalhos prévios realizados no CCN do IPEN/CNEN, em especial os trabalhos de ANGELO (2013) e FRENZEL (2023), forneceram dados para verificar o comportamento dos resultados obtidos a partir da utilização dessa ferramenta. No entanto, para a condição de inclinação, foram necessários outros trabalhos da literatura para analisar e comparar os resultados obtidos, uma vez que é uma condição ainda não estudada nesse circuito.

Após a discretização do modelo em Modelica (ou POO) é necessário definir que tipo de simulação será realizada, com ou sem inclinação da plataforma. Pois caso seja com inclinação será necessário alterar o ângulo de inclinação em cada um dos componentes do circuito.

Após a simulação, é possível combinar diferentes parâmetros e extrair gráficos direto do software. Contudo, para elaboração de gráficos apresentáveis em outras ferramentas, é possível extrair os dados em formato *Comma-separated values* (.csv) ou arquivo de texto simples (.txt). Na Figura 31 é apresentada a metodologia que foi empregada para realização das

simulações numéricas do CCN em POO. Uma análise dos gráficos e validação do software para simulação da CN e aplicação no CCN será apresentado no capítulo 5.

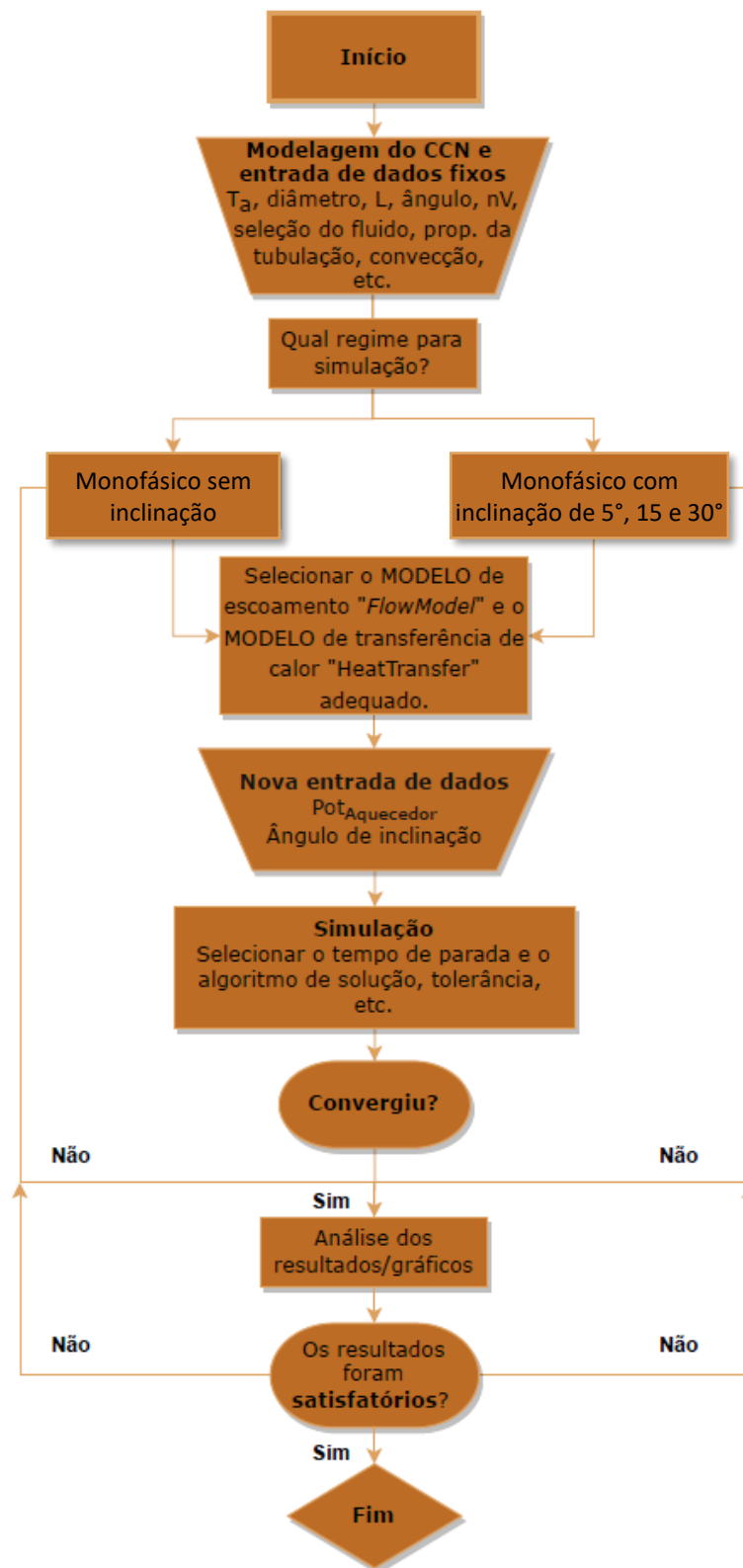
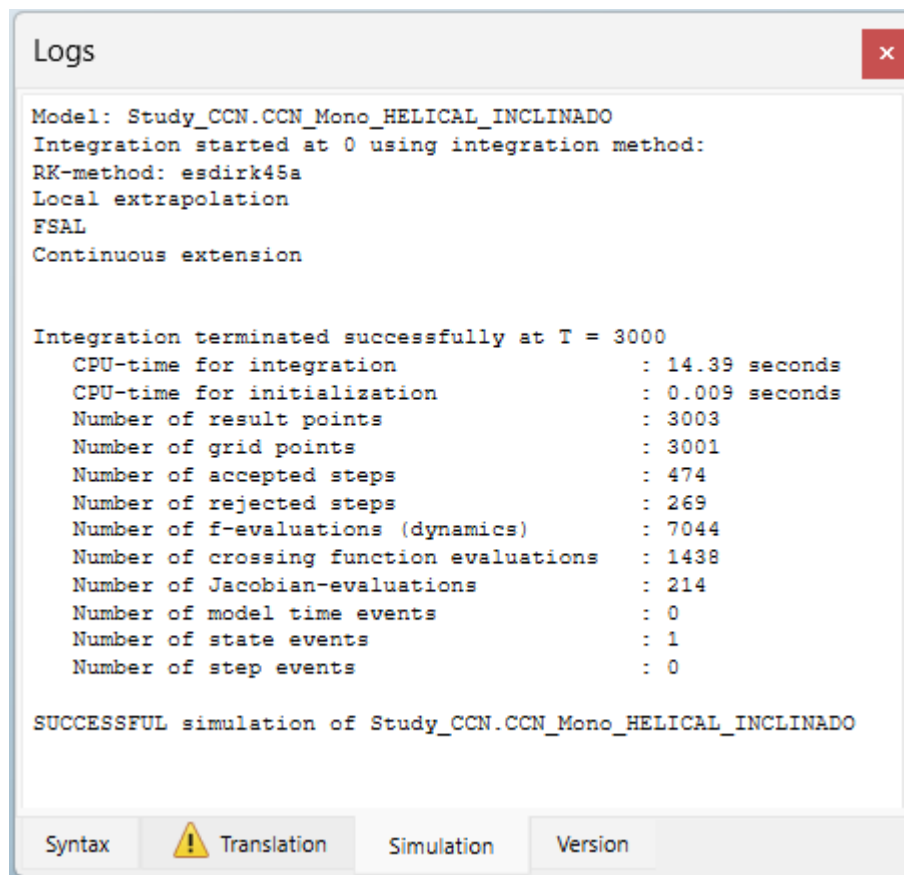


Figura 31 – Metodologia empregada para simulação usando POO.

Fonte: autor

Após a finalização da simulação o software exibe uma caixa de mensagem, conforme Figura 32, apresentando dados gerais da simulação.



```
Logs
Model: Study_CCN.CCN_Mono_HELICAL_INCLINADO
Integration started at 0 using integration method:
RK-method: esdirk45a
Local extrapolation
FSAL
Continuous extension

Integration terminated successfully at T = 3000
CPU-time for integration           : 14.39 seconds
CPU-time for initialization        : 0.009 seconds
Number of result points           : 3003
Number of grid points             : 3001
Number of accepted steps          : 474
Number of rejected steps          : 269
Number of f-evaluations (dynamics) : 7044
Number of crossing function evaluations : 1438
Number of Jacobian-evaluations    : 214
Number of model time events       : 0
Number of state events            : 1
Number of step events             : 0

SUCCESSFUL simulation of Study_CCN.CCN_Mono_HELICAL_INCLINADO
```

Syntax Translation Simulation Version

Figura 32 – Caixa de mensagem final (*Logs*) após a finalização da simulação no Dymola.

Fonte: autor

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, realizaremos análises detalhadas das variáveis relevantes associadas ao fenômeno de circulação natural. Destacaremos as características físicas específicas desse fenômeno, utilizando simulações em linguagem Modelica para obter os resultados. Em seguida, compararemos e analisaremos minuciosamente esses resultados, buscando verificar a concordância entre os resultados das simulações usando linguagem Modelica com os resultados experimentais e numéricos do RELAP5/MOD3.3, previamente obtidos para o Circuito de Circulação Natural do IPEN/CNEN. Essa abordagem permitirá avaliar a utilização da POO para aplicações em simulações numéricas no CCN do IPEN.

5.1 VALIDAÇÃO PARA O REGIME MONOFÁSICO SEM INCLINAÇÃO

A partir da modelagem do circuito de circulação natural (MODELO_CCN) no software Dymola 2024x *refresh* 1, foi possível observar uma ótima aderência com os resultados experimentais e numéricos do RELAP5/MOD3.3 no CCN, observando que os resultados da simulação do MODELO_CCN no Dymola, pode reproduzir com boa precisão o comportamento observado em outros trabalhos da literatura, especialmente aos trabalhos de SABUNDJIAN et al. (2010), ANGELO (2012) e FRENZEL e SABUNDJIAN et al. (2019).

Para simulação do regime monofásico, foi mantida uma potência fixa 4500W nas resistências do aquecedor e uma vazão no circuito secundário de 0,02772 kg/s (equivalente a 100L/h). Dado que diversos termopares estão instalados no CCN, apenas aqueles que melhor representam os fenômenos de circulação natural serão destacados a seguir. Em todos os casos analisados, foi possível acompanhar as variações da temperatura do fluido do Circuito de Circulação Natural (CCN) à medida que entra em modo de circulação natural, conforme previsto pelos trabalhos da literatura.

Na Figura 33 observa-se o aquecimento do fluido na posição do termopar T12, para a simulações numéricas e experimental. Uma primeira observação nas curvas do gráfico, para o intervalo de 100 até 300 segundos, é uma variação na faixa de temperatura de 30 a 50°C, onde se percebe 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 com o código RELAP5/MOD3.3 a temperatura varia de 46°C até 44°C (FRENZEL, 2023). Já o MODELO_CCN no software Dymola, a variação da temperatura atinge 42°C e depois cai até 38,5°, estabilizando em 73,44 °C, uma diferença no final de aproximadamente 2% (aproximadamente 1,25°C). Também foi percebido um prolongamento dessas oscilações na temperatura e bem como uma aderência maior com o resultado experimental, podendo-se concluir que o software Dymola 2024x pode representar a simulação do regime monofásico, além de apresentar um ótimo resultado em comparação à simulação experimental.

No detalhe da Figura 33 destaca-se a instabilidade inicial das temperaturas, uma característica do sistema de circulação natural, conforme observado no estudo de SABUNDJIAN et al. (2010). Isso é ilustrado por dados experimentais e numéricos em todos os pontos de

medição de temperatura. Com as resistências elétricas fornecendo uma potência constante, a temperatura da superfície do aquecedor atinge o ponto crítico de fluxo de calor da água, provocando ebulição localizada. Isso cria instabilidade no sistema, pois a densidade da água na região do aquecedor diminui, gerando uma pequena vazão no circuito primário, que traz para a região do aquecedor água a uma temperatura inferior, correspondente à temperatura da perna fria.

Nota-se que a linha do gráfico da simulação numérica é contínua, enquanto a da simulação experimental apresenta instabilidade, o que é esperado devido à instrumentação utilizada e à dinâmica do fluido. Como o CCN possui aterramento elétrico, a captação do sinal é bastante precisa, conforme discutido por SILVA FILHO e SABUNDJIAN (2009). Em contraponto ao resultado da simulação do código RELAP5/MOD3.3, o resultado do MODELO_CCN no Dymola 2024x apresentou curvas de instabilidade que se propagaram até aproximadamente 1000s de simulação. Uma possível explicação para essas oscilações é que no início para o estabelecimento da circulação natural ocorre uma variação no fluxo de escoamento do circuito, variando assim a temperatura do fluido, que pode ser observado em todo o circuito.

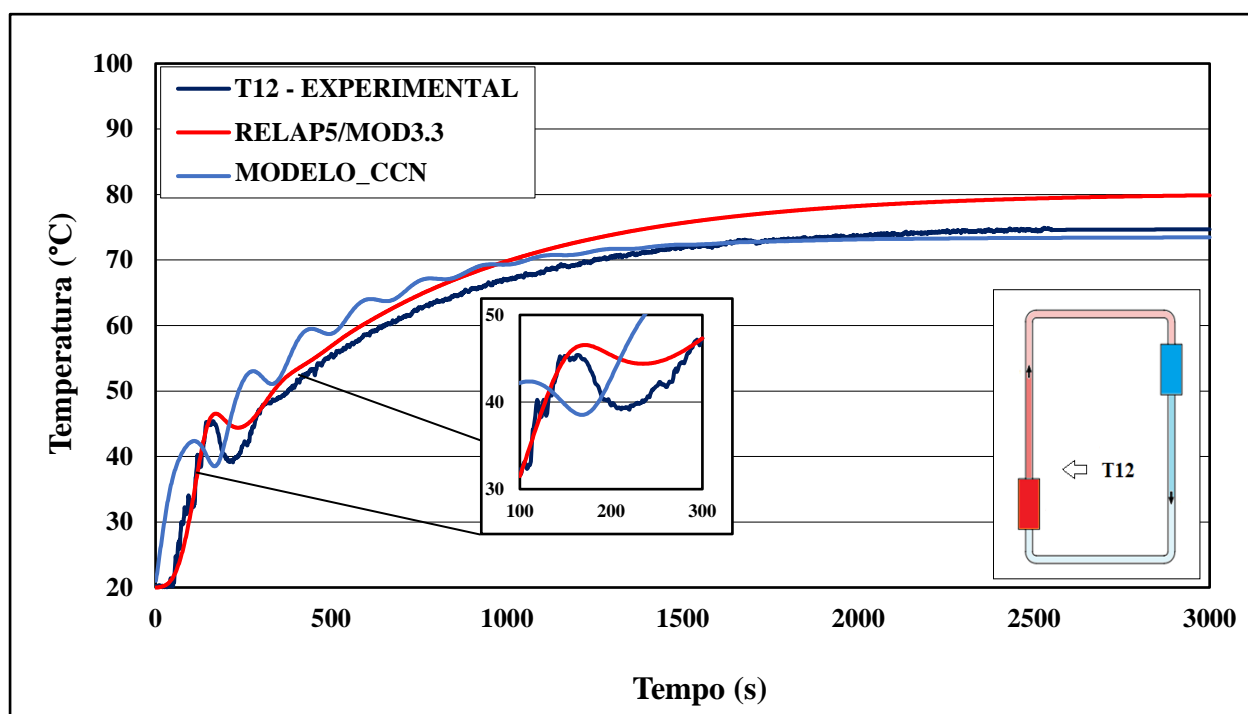


Figura 33 – Comparação das simulações numéricas/experimental das temperaturas em regime monofásico para o termopar T12 na saída do aquecedor.

Fonte: autor

Além das oscilações, pode-se perceber que na Figura 33 e conseqüentemente das figuras seguintes, houve defasagem entre os as curvas apresentadas. Essa defasagem, provavelmente se deve a forma como foi modelado o fornecimento de potência térmica no aquecedor. Como a resistência elétrica não foi detalhada no MODELO_CCN, e sim foram distribuídos 750 W de geração interna de calor em cada um dos 6 nós do componente aquecedor, totalizando 4500 W. A potência dissipada aquece mais rapidamente o fluido de circulação, gerando essa antecipação e defasagem entre as curvas.

A Figura 34 mostra o comportamento do termopar T17 da simulação experimental, localizado na região da perna fria logo após a saída do trocador de calor, juntamente com as curvas das simulações numéricas no Dymola e RELAP5/MOD3.3. O resultado do MODELO_CCN no Dymola para a posição do termopar T17 também apresentaram mais oscilações que as outras curvas, contudo apresentou uma melhor concordância final com o resultado experimental.

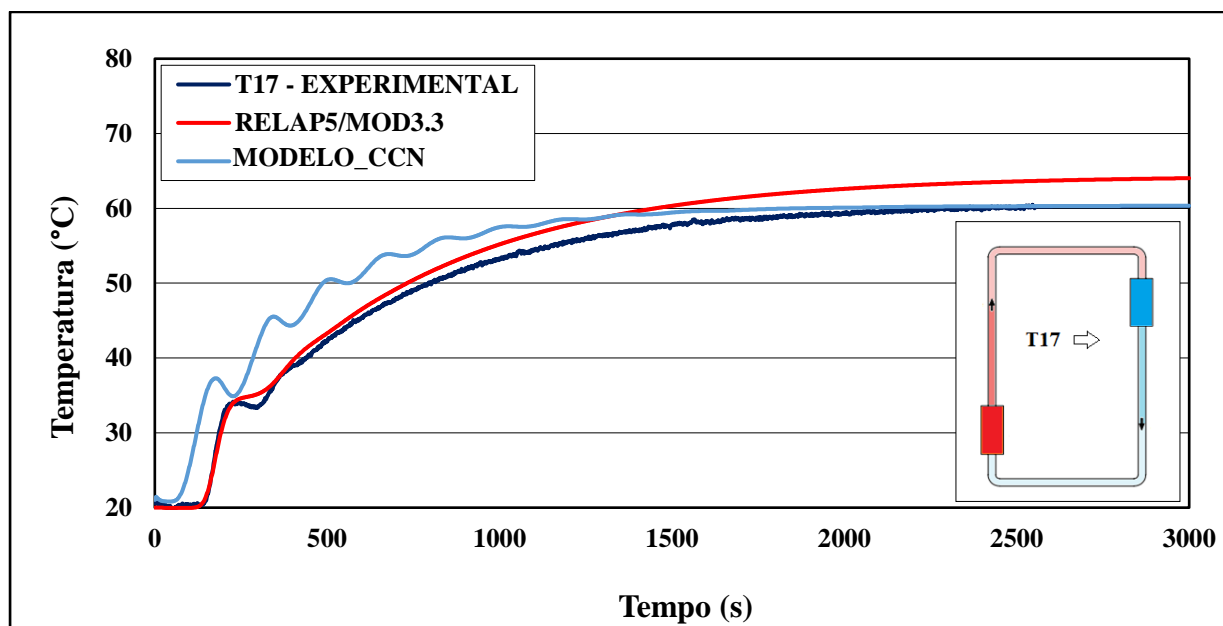


Figura 34 – Comparação das simulações numéricas/experimental das temperaturas em regime monofásico para o termopar T17 na saída do trocador de calor.

Fonte: autor

Na Figura 35 é exibida a evolução das temperaturas numéricas/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 7% (aproximadamente 3,4°C).

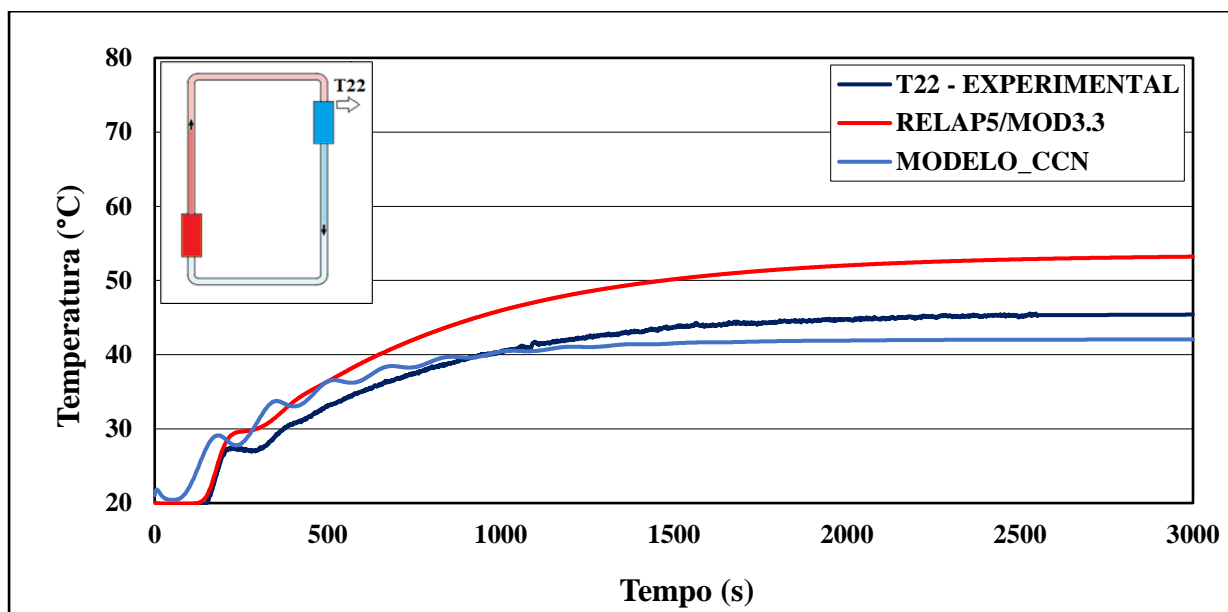


Figura 35 – Comparação das simulações numéricas/experimental das temperaturas em regime monofásico para o termopar T22 na saída do trocador de calor (lado do secundário).

Fonte: autor

Apesar da proximidade das temperaturas finais entre os valores experimentais e numéricos obtidos pelo MODELO_CCN no Dymola para os termopares na saída do aquecedor (T12) e na seção da perna fria logo após o trocador de calor (T17), e da pequena diferença no termopar na saída do lado secundário (T22) de aproximadamente 3,4%, na simulação no Dymola surgiram instabilidades adicionais as curvas de temperaturas, bem como uma defasagem do início do aquecimento entre elas. Ainda assim, o comportamento térmico-hidráulico do CCN, simulado no Dymola, pode evidenciar a ocorrência do fenômeno em conformidade com a expectativa teórico-experimentais. Sugerindo-se que a modelagem numérica do CCN está alinhada com a realidade física do fenômeno de circulação natural.

Esses resultados validam a capacidade do MODELO_CCN em POO em representar satisfatoriamente o comportamento do CCN em regime monofásico. A concordância com os padrões observados na literatura fortalece a confiabilidade do modelo e contribui para a compreensão aprofundada do desempenho térmico-hidráulico do Circuito de Circulação Natural em diferentes cenários operacionais.

Na Figura 36 é possível visualizar a evolução temporal das pressões na posição acima do aquecedor para o circuito primário para o resultado experimental e numéricos que apresentam boa concordância e diferença de aproximadamente 17% (~ 0,22 bar) em 3.000 segundos, em que a simulação numérica do MODELO_CCN no Dymola converge rapidamente em torno de 1,27 bar e assim permanecendo até o final da simulação. Resultado da simulação muito mais próximo se comparado com o resultado para a simulação do software RELAP5/MOD3.3, onde é apresentada uma diferença de aproximadamente 2%.

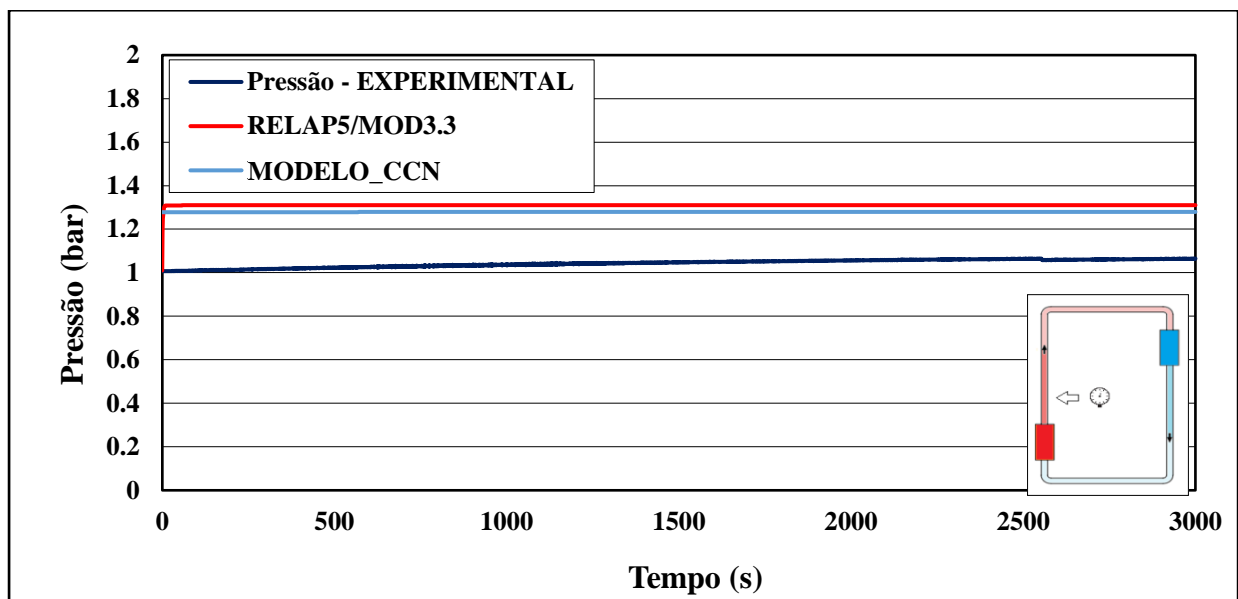


Figura 36 – Comparação das pressões numéricas/experimental em regime monofásico sem inclinação na seção acima do aquecedor.

Fonte: autor

O gráfico para as vazões na saída do trocador de calor são pode ser observado na Figura 37. É possível perceber como o resultado da simulação do MODELO_CCN no Dymola reproduz as instabilidades iniciais da vazão mássica de forma bastante similar ao resultado obtido experimentalmente, convergindo para valores próximo ao obtido na simulação do RELAP5/MOD3.3. Uma notória observação é que mesmo observando todas as configurações para que o sistema parta do repouso, a vazão atinge muito rapidamente o patamar de 0,05 kg/s o que também pode ser entendido pelo não detalhamento do aquecedor. Os dados experimentais e a simulação numérica exibiram comportamentos muito semelhantes, com uma divergência de aproximadamente 14% (0,011 kg/s) menores para o resultado experimental, e

uma pequena diferença dos valores numéricos obtidos no RELAP5/MOD3.3 por FRENZEL (2023) de aproximadamente 7% maiores ($\sim 0,005$ kg/s).

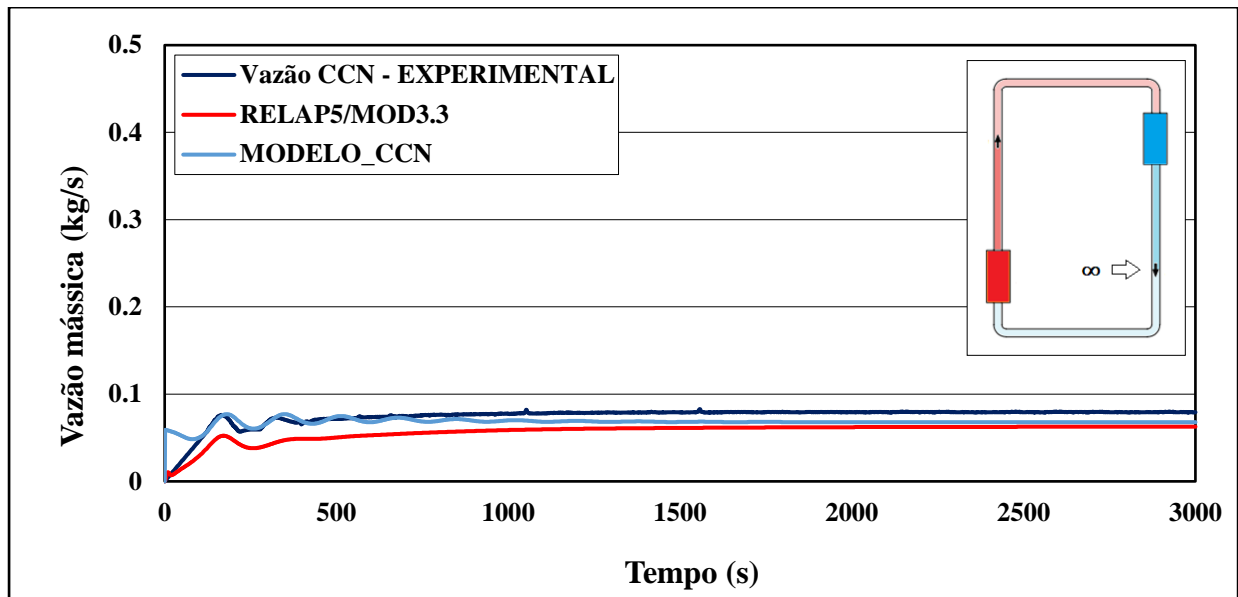


Figura 37 – Comparação das vazões numéricas/experimental regime monofásico sem inclinação na saída do trocador de calor.

Fonte: autor

5.2 REGIME MONOFÁSICO COM INCLINAÇÕES DE 5°, 15° E 30°

Conforme já discutido na seção 4.2.2.2, foram selecionadas algumas inclinações mais um submarino usualmente recorre em suas manobras de imersão e submersão. Para inclinação do CCN do IPEN, não temos dados experimentais nem numéricos do circuito inclinado para comparação dos resultados. Contudo, inúmeros trabalhos da literatura têm buscado trazer elucidções de como a inclinação afeta a circulação natural de reatores nucleares embarcados.

De forma geral, a principal conclusão dos trabalhos de IYORI et al. (1987), TAN, SU e PU-ZHEN (2009a, 2009b, 2009c), LIHUI HE et al. (2017) e LAI et al. (2022) é que sob condições de inclinação e rotação, a circulação natural em um reator de água pressurizada integrado (IPWR) IYORI et al. (1987) e LIHUI HE et al. (2017) é significativamente afetada, resultando em assimetrias na distribuição do refrigerante primário entre os loops do sistema. Essas assimetrias podem levar a variações na temperatura e no fluxo de refrigerante, impactando a operação e o desempenho do reator. Além disso, não somente os trabalhos acima citados, mas é unanime a

que todos os trabalhos asseguram a importância de considerar a influência das condições oceânicas na circulação natural e destacam a importância de considerar esses fatores para garantir a segurança e eficiência do reator nucleares embarcados em diferentes cenários operacionais.

Na Figura 38 observa-se a evolução numérica das temperaturas em regime monofásico para as posições de entrada e saída do aquecedor sem inclinação 0° (default) e para as inclinações positivas de 5° , 15° e 30° . Para uma inclinação positiva de 5° na saída do aquecedor, equivalente a posição do termopar T12, é imperceptível qualquer variação na evolução das temperaturas; para a inclinação positiva de 15° , pode-se verificar uma ligeira elevação da temperatura, em comparação com circuito sem inclinação. Porém, para a inclinação positiva de 30° , é fica evidente uma elevação considerável na faixa de temperatura do fluido, bem como no prolongamento de oscilações até o tempo de 3000s. Essas oscilações, ou perturbações no fluxo de CN, acontecem em decorrência da diferença entre a fonte fria e a fonte quente, manifestando-se como regiões de instabilidade, conforme observações apontadas em outros trabalhos da literatura.

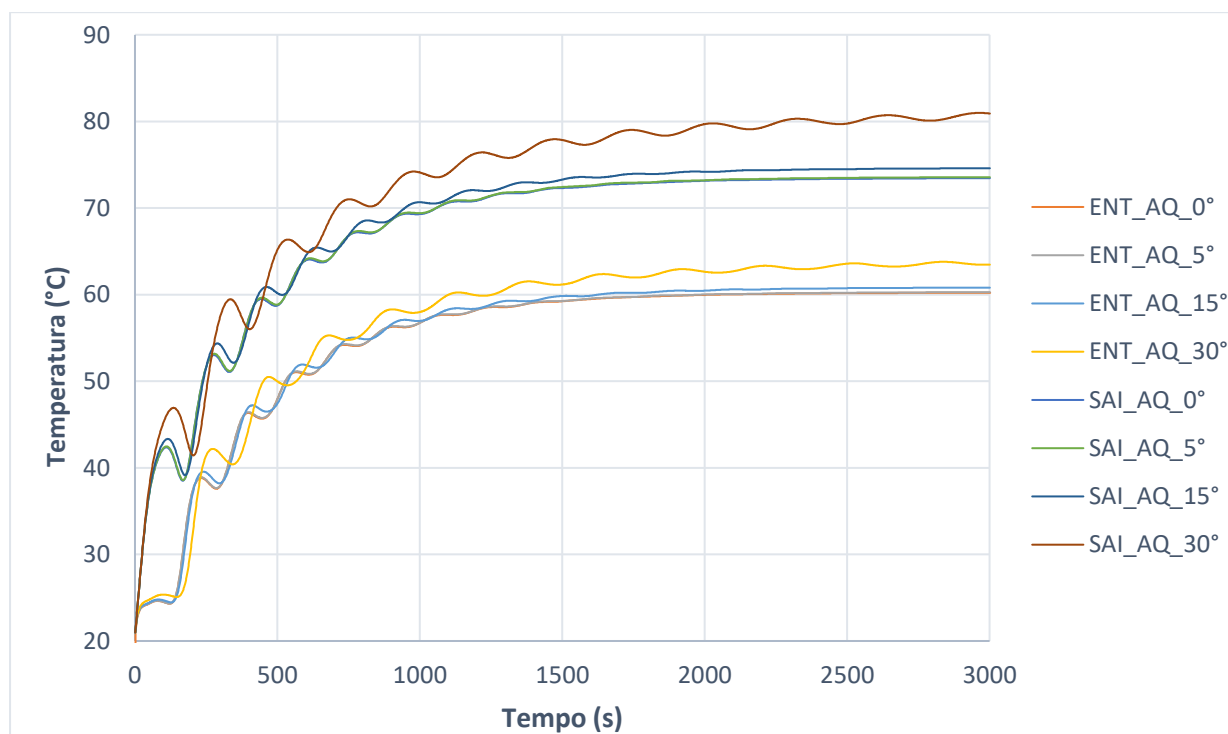


Figura 38 – Evolução numérica das temperaturas em regime monofásico na entrada e saída do Aquecedor (AQ) do CCN para 0° (default) e para inclinações positivas 5° , 15° e 30° .

Fonte: autor

De forma similar a Figura 38, a Figura 39 apresenta a evolução numérica das temperaturas em regime monofásico para as posições de entrada e saída do aquecedor sem inclinação 0° (default) e para as inclinações negativas de 5° , 15° e 30° . Nenhuma alteração é perceptível para a inclinação negativa de 5° na saída do aquecedor. Uma leve variação na evolução das temperaturas pode ser percebida para a inclinação negativa de 15° , em comparação com circuito sem inclinação. No entanto, para a inclinação negativa de 30° , são percebidas as mesmas observações para a inclinação positiva. é reproduzida a mesmo apontamento para a inclinação positiva de 30° .

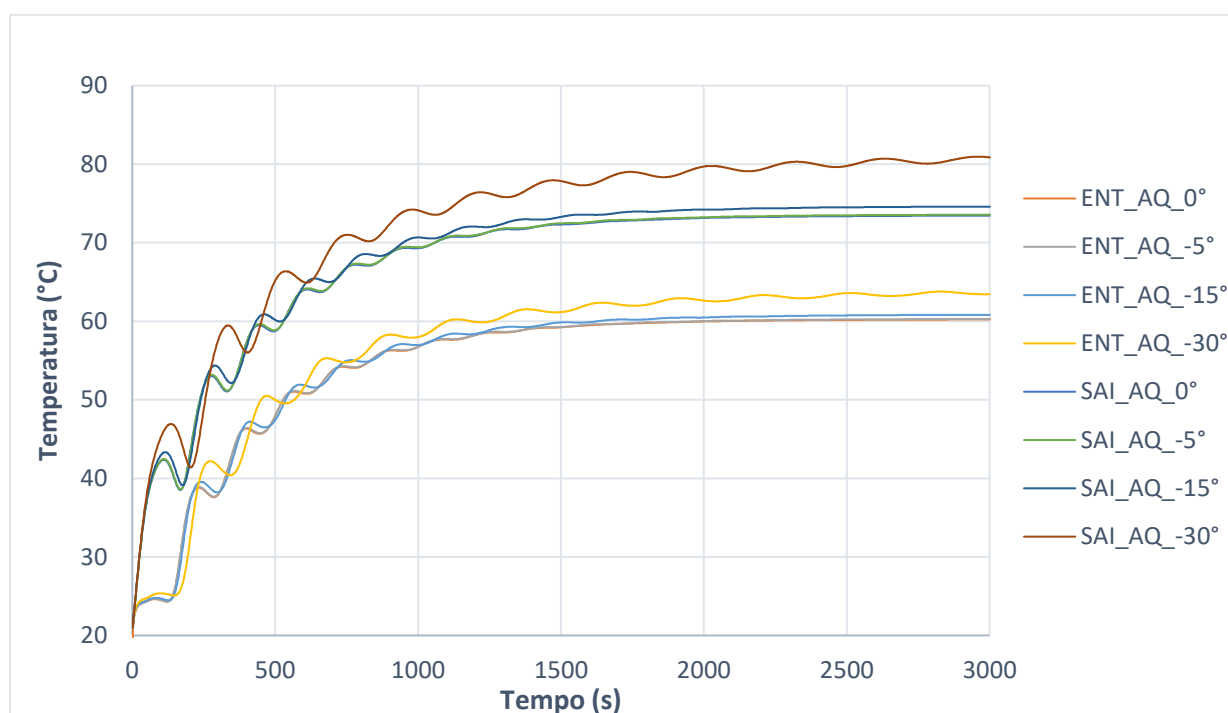


Figura 39 – Evolução numérica das temperaturas em regime monofásico na entrada e saída do Aquecedor (AQ) do CCN para 0° (default) e para inclinações negativas -5° , -15° e -30° .

Fonte: autor

Uma observação interessante extraída da Figura 40 é que não houve diferenças significativas ao inclinar o CCN positivamente (emergindo) ou negativamente (submergindo). Em outras palavras, a simulação numérica não registrou alterações perceptíveis nas faixas de temperaturas ou nas oscilações para nenhuma das inclinações. Isso indica que, no caso do CCN estudado, apenas a variação na altura entre a fonte fria e a fonte quente influencia a faixa de temperatura e ao padrão das oscilações no escoamento, instabilidades.

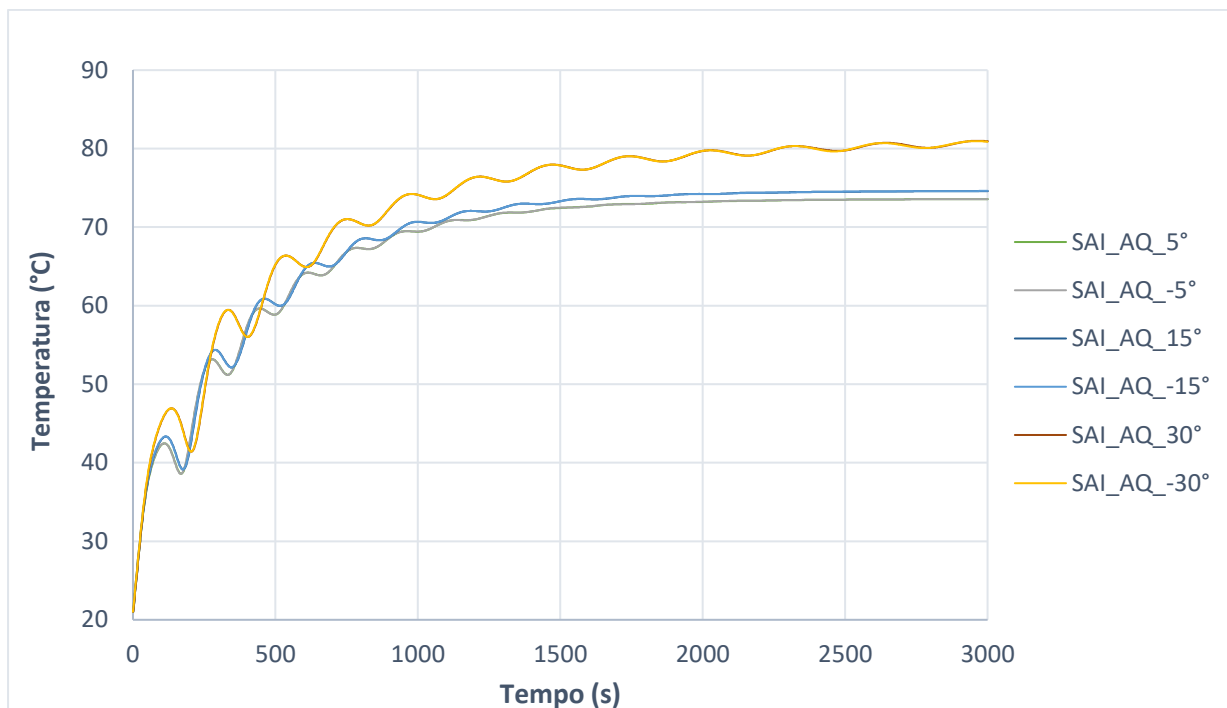


Figura 40 – Comparação numérica da evolução das temperaturas em regime monofásico na entrada e saída do Aquecedor (AQ) do CCN para as inclinações positivas (imersão) e negativas (submersão).

Fonte: autor

No trocador de calor, observou-se o mesmo comportamento identificado no aquecedor. Não houve mudanças significativas para inclinações de $\pm 5^\circ$. Para inclinações de $\pm 15^\circ$, notou-se uma leve diferença na temperatura. Porém, para inclinações de $\pm 30^\circ$, houve uma variação notável na evolução da temperatura e um prolongamento das oscilações do padrão do escoamento. Nota-se que, nas temperaturas mais baixas do lado secundário (tubos), tanto na saída (SAI_TCS) quanto, especialmente, na entrada (ENT_TCS), as temperaturas são menos afetadas e as oscilações se tornam menos pronunciadas. Isso é evidenciado pelas inclinações positivas mostradas na Figura 41 e pelas inclinações negativas na Figura 42.

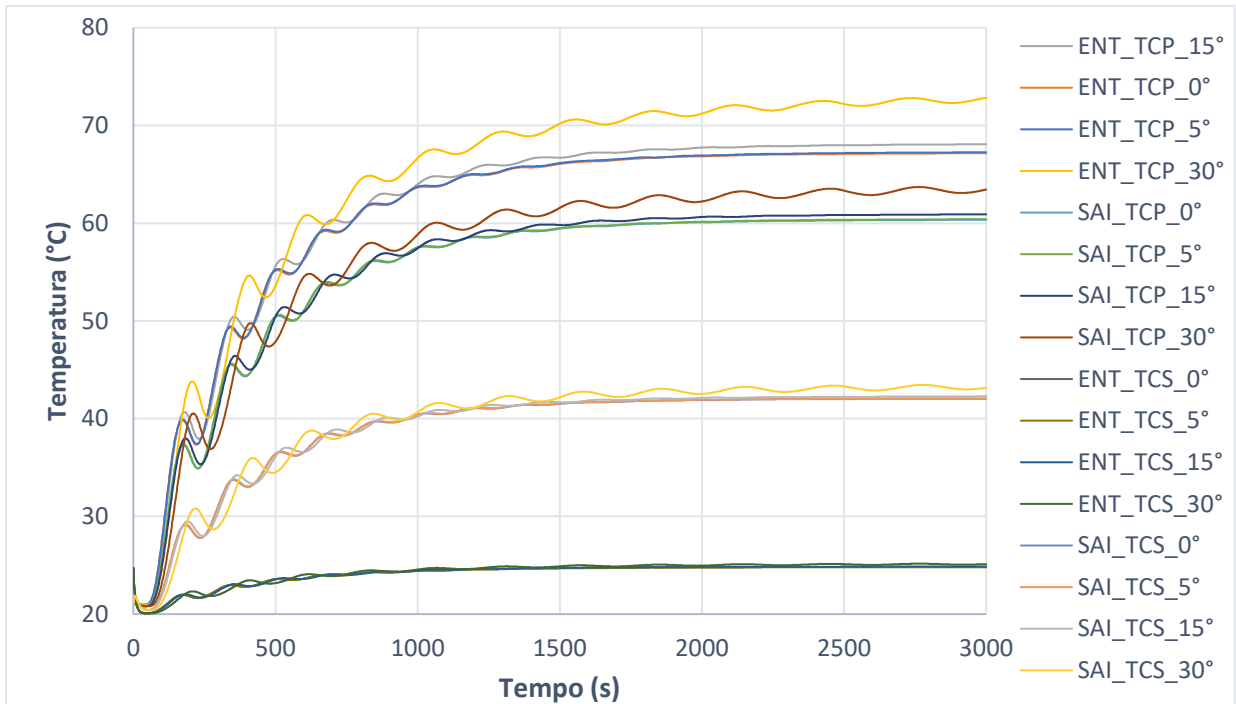


Figura 41 – Evolução numérica das temperaturas em regime monofásico na entrada (ENT_TCP) e saída (SAI_TCP) no lado primário (casco) do TC e entrada (ENT_TCS) e saída (SAI_TCS) do lado secundário (tubos helicoidais) do TC para 0° (default) e para inclinações positivas de 5°, 15° e 30°.

Fonte: autor

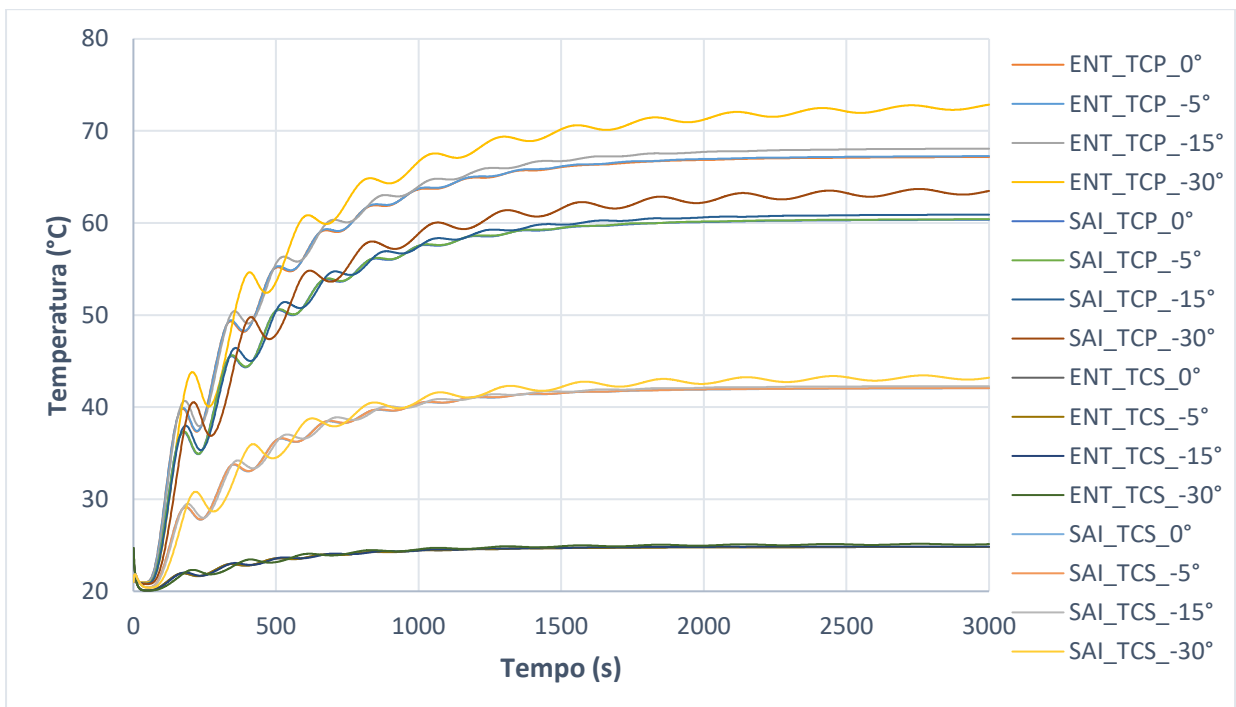


Figura 42 – Evolução numérica das temperaturas em regime monofásico na entrada (ENT_TCP) e saída (SAI_TCP) no lado primário (casco) do TC e entrada (ENT_TCS) e saída (SAI_TCS) do lado secundário (tubos helicoidais) do TC para 0° (default) e para inclinações negativas de -5°, -15° e -30°.

Fonte: autor

A influência na vazão do circuito está diretamente relacionada à inclinação do CCN. À medida que a inclinação aumenta, observa-se uma diminuição na vazão do circuito. Essa redução na vazão ocorre porque a inclinação altera a dinâmica de circulação do fluido, diminuindo a altura entre as fontes quente e fria, tornando-o menos eficiente.

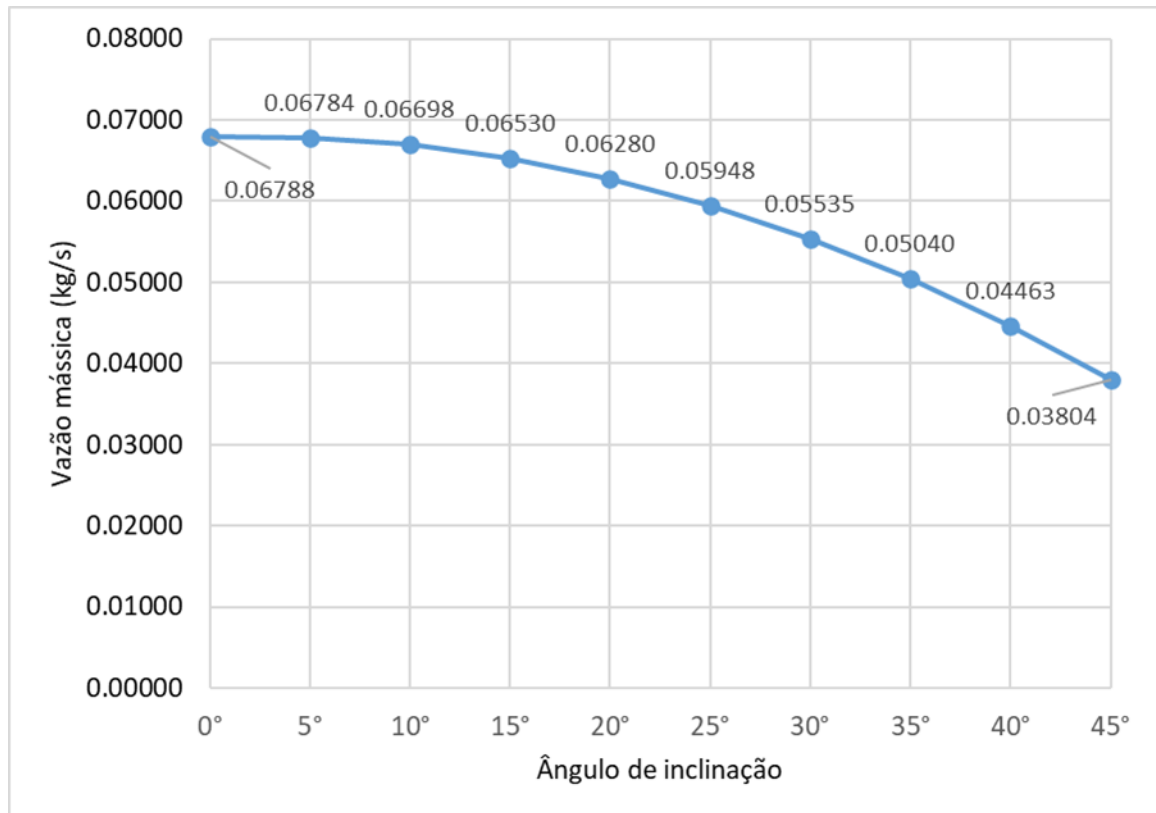


Figura 43 – Vazão mássica média x ângulo de inclinação do MODELO_CCN na saída do aquecedor

Fonte: autor

Com a diminuição da vazão, o fluido circula mais lentamente pelo sistema, resultando em uma menor capacidade de remover calor do CCN. Conseqüentemente, a temperatura no sistema aumenta, pois o fluido não consegue dissipar o calor de forma eficaz. Em resumo, a inclinação afeta negativamente a vazão do circuito, reduzindo a eficiência na remoção de calor e, portanto, causando um aumento na temperatura do fluido de refrigeração no CCN. A Figura 44 apresenta a evolução numérica das vazões em regime monofásico sem inclinação 0° (default) e para as inclinações positivas de 5°, 15° e 30°. A Figura 45 apresenta a evolução numérica das vazões em regime monofásico sem inclinação 0° (default) e para as inclinações negativas de 5°, 15° e 30°.

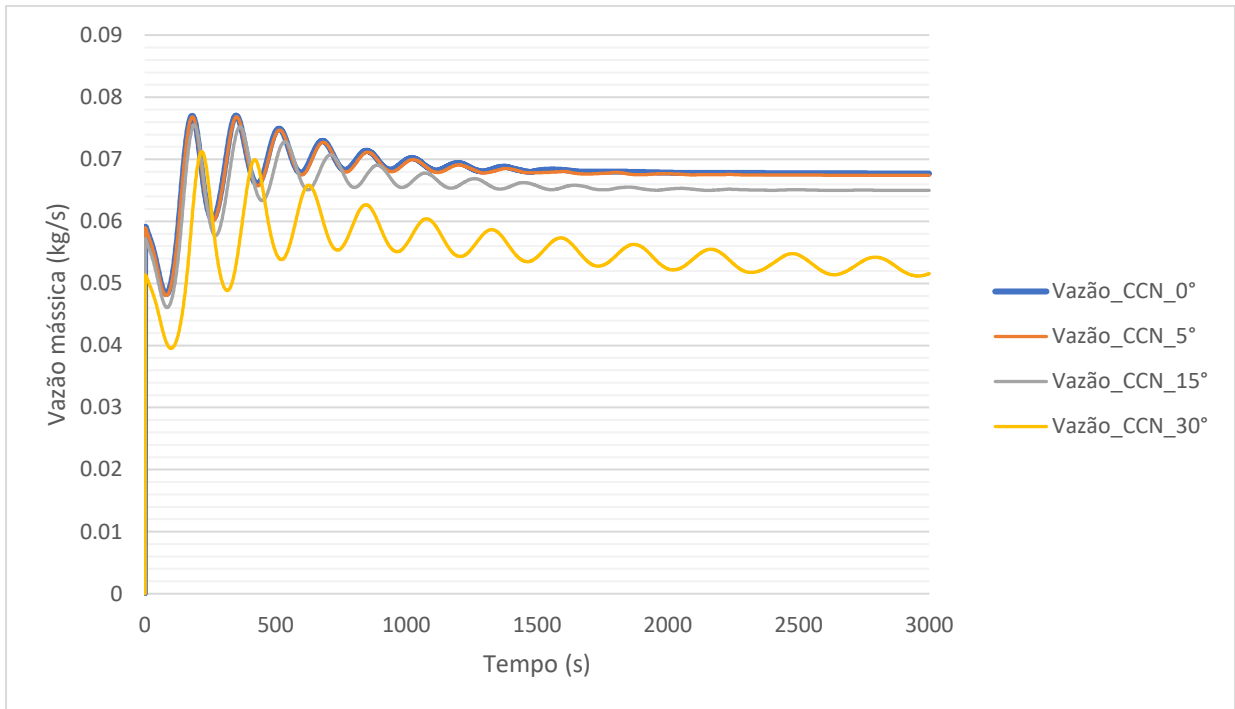


Figura 44 – Comparação numérica das vazões no regime monofásico para 0° (default) e para inclinações positivas de 5°, 15° e 30°.

Fonte: autor

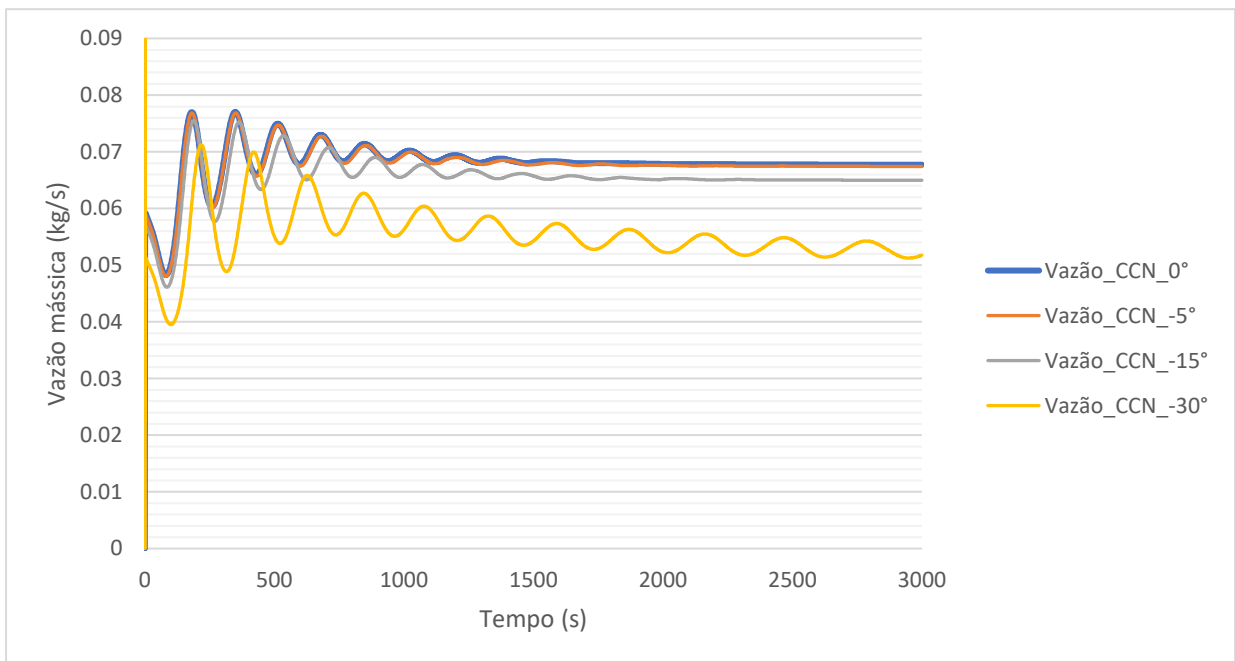


Figura 45 – Comparação numérica das vazões no regime monofásico para 0° (default) e para inclinações negativas de -5°, -15° e -30°.

Fonte: autor

A Figura 46 reforça a demonstração anterior de que independe o lado para o qual o circuito é inclinado, apresentando resultados idênticos para qualquer um dos lados. Por fim, a Figura 47 apresenta a curva de influência da inclinação na temperatura média do fluido do MODELO_CCN na saída do aquecedor.

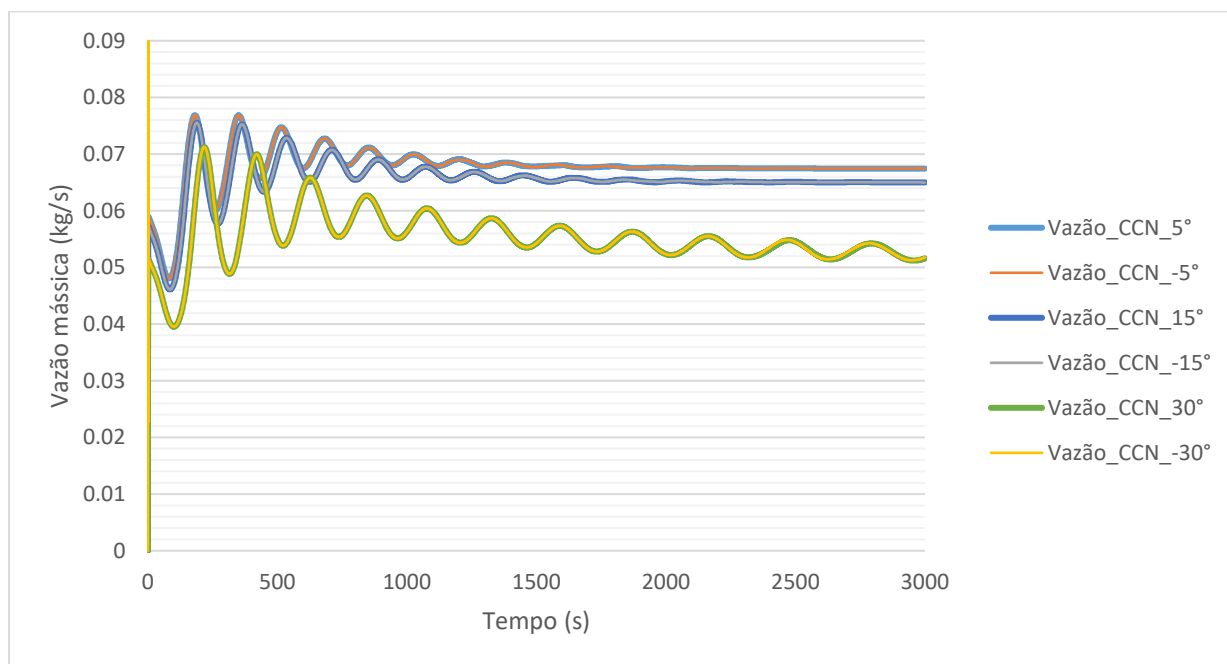


Figura 46 – Comparação numérica da evolução das vazões em regime monofásico para as inclinações positivas (imersão) e negativas (submersão) do CCN.

Fonte: autor

A Tabela 9 apresenta as métricas usadas para avaliar as variações nas vazões em diferentes inclinações do CCN. Analisando estatisticamente os resultados obtidos para as inclinações de 5°, 15° e 30° (positivas e negativas), tem-se que:

- Para inclinações de $\pm 5^\circ$, os resultados indicam uma excelente correlação com um Coeficiente de Correlação de Pearson perfeito (1,000). Os erros (MAE e MSE) são extremamente baixos, mostrando que as inclinações de 5° têm um impacto mínimo na vazão, resultando em variações muito pequenas.
- Para inclinações de $\pm 15^\circ$, os resultados continuam a mostrar uma excelente correlação (Pearson de 1,000) e erros baixos, embora um pouco maiores que para 5°. Isso indica que, enquanto há um pequeno aumento nas variações de vazão, a inclinação de 15° ainda mantém as vazões relativamente estáveis.

- Para inclinações de $\pm 30^\circ$, há um aumento significativo nas métricas de erro. O desvio padrão percentual aumenta drasticamente para 1,867, e os valores de MAE e MSE também são muito maiores em comparação com as inclinações menores. O coeficiente de correlação de Pearson, embora ainda alto (0,977), não é perfeito, indicando uma redução na precisão das simulações. O erro percentual médio absoluto de 0,1459 reflete uma variação significativa na vazão, evidenciando que maiores inclinações têm um impacto substancial na dinâmica do sistema.

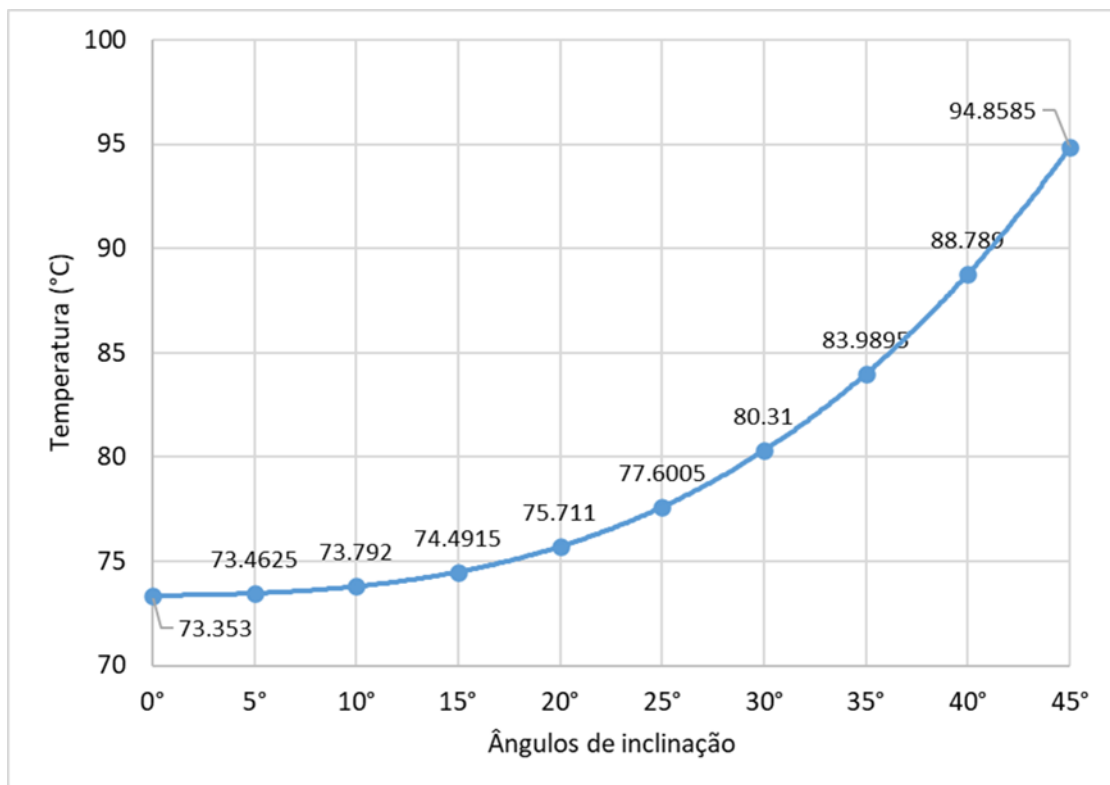


Figura 47 – Temperatura média x ângulo de inclinação do MODELO_CCN na saída do aquecedor.

Fonte: autor

As observações apontadas por IYORI et al. (1987), TAN, SU e PU-ZHEN (2009a, 2009b, 2009c), LIHUI HE et al. (2017) e LAI (2022), sobre a influência da inclinação em reatores nucleares, podem ser correlacionadas com os resultados das inclinações de 5° , 15° e 30° realizadas para o CCN. Os pesquisadores destacaram que a inclinação altera a força motriz da circulação natural e afeta a distribuição de temperatura e os caminhos de fluxo, gerando padrões de fluxo diferentes e instabilidades. Os resultados deste estudo confirmam essas observações, mostrando que inclinações menores ($\pm 5^\circ$ e $\pm 15^\circ$) têm impactos mínimos,

enquanto inclinações maiores ($\pm 30^\circ$) causam variações significativas nas vazões e na estabilidade do sistema.

IYORI et al. (1987) também observaram que a inclinação pode criar uma força motriz adicional em seções do sistema anteriormente horizontais, o que pode ajudar a manter taxas de fluxo estáveis em ângulos elevados. Esta força motriz adicional é consistente com as variações observadas nas inclinações de 30° neste estudo, onde a inclinação causou grandes variações na vazão e aumento na instabilidade térmica.

Tabela 9 – Métricas utilizadas para avaliação das variações das vazões em inclinações positivas e negativas do CCN

Métrica	5°_-5°	15°_-15°	30°_-30°
Desvio Padrão Percentual	0.050	0.041	1.867
Erro Absoluto Médio (MAE_)	2.54445E-05	2.70263E-05	7.6891E-05
Erro Quadrático Médio (MSE)	1.787E-09	1.454E-09	1.158E-06
Coef. de Correlação de Pearson	1.000	1.000	0.977
Erro Percentual Médio Absoluto	0.0374	0.0413	0.1459

Fonte: autor da dissertação.

A simulação bem-sucedida do CCN inclinado no Dymola 2024x proporcionou informações valiosas para entender o comportamento do circuito na condição inclinada, verificando sua influência no fenômeno da circulação natural. Para os ângulos selecionados, em concordância com as principais manobras de um submarino mergulhado, foram mantidas as condições de fluxo em circulação natural, ressalvadas as observações apontadas no presente capítulo. Para todas as simulações das condições inclinadas, foi possível perceber que os resultados concordam com os principais trabalhos da literatura que replicaram essa condição de um submarino, consolidando a confiabilidade e aplicabilidade do modelo desenvolvido.

5.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE ARRANJO NO COMPARTIMENTO DO REATOR E CONSEQUÊNCIAS NA CIRCULAÇÃO NATURAL

O arranjo das tubulações do circuito primário em um reator naval, como os utilizados em submarinos, é crucial para garantir a eficiência, segurança e operação estável do sistema de

resfriamento operando em circulação natural. A disposição desses trechos pode ser longitudinal, ao longo do comprimento do navio, ou transversal, através da largura do navio. Cada configuração tem suas implicações específicas, especialmente em termos de desempenho durante inclinações positivas e negativas, que ocorrem quando o submarino está emergindo ou submergindo, respectivamente.

De acordo LAI et al. (2022), para circuitos de circulação natural que operam com baixa taxa de escoamento e número de Reynolds (Re), a recomendação é que o eixo X do circuito seja paralelo ao eixo X do navio. Essa orientação pode ajudar a otimizar o desempenho do circuito de circulação natural, minimizando as flutuações indesejadas no fluxo e melhorando a eficiência da transferência de calor. Quando os trechos do circuito primário são posicionados longitudinalmente, a circulação natural pode ser mais uniforme, uma vez que a diferença de altura entre as partes quente e fria do circuito é maximizada, pois o submarino passa muito pouco tempo emergindo e submergindo, sendo a maior parte do tempo numa cota de profundidade pré-estabelecida. Na Figura 48 tem-se uma ideia do arranjo no compartimento do reator do submarino USS VIRGINIA (SSN 774), produzida e disponibilizada por estudantes da *New River Community College*, Dublin, Virginia, USA.

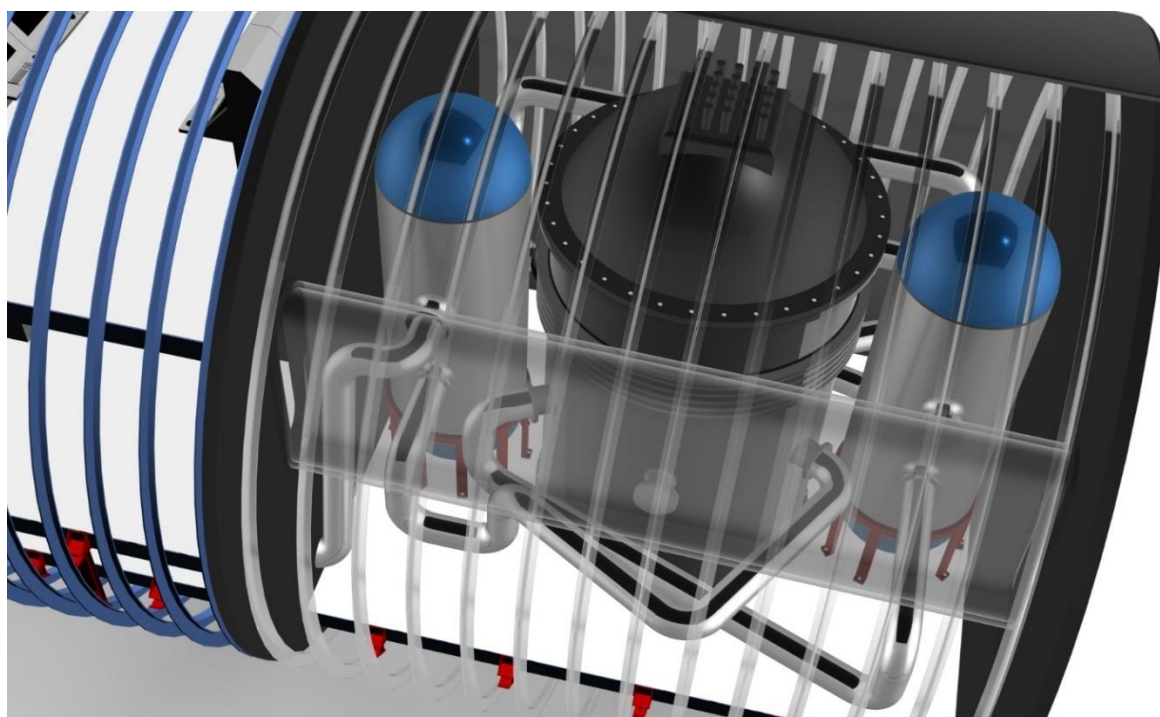


Figura 48 – Detalhe dos equipamentos e da tubulação dentro do Compartimento do Reator do submarino nuclear classe Virginia (SSN 774)

Fonte: <https://www.nr.edu/cad/vaclass.php>

Por outro lado, uma disposição transversal do circuito primário, poderia oferecer uma maior resistência a inclinações longitudinais, uma vez que a diferença de altura entre as partes quente e fria permanece relativamente constante. No entanto, essa configuração pode ser mais complexa em termos de arranjo e manutenção, além de ocupar mais espaço útil no interior do submarino. Além disso, durante inclinações laterais como bandas que podem ocorrer durante manobras ou devido ao balanço do mar quando na superfície, a circulação natural pode ser afetada de maneira similar às inclinações longitudinais, causando desequilíbrios no fluxo de refrigerante, uma vez que o submarino passa uma parte considerável do seu tempo atracado aos cais e navegando na superfície durante a entrada ou saída de portos e baías.

As observações obtidas a partir da simulação numérica do CCN no Dymola, concordam com os apontamentos do estudo de LI et al. (2020), na qual apresentam flutuações periódicas no fluxo de circulação natural, principalmente devido à variação da queda de pressão gravitacional. Para pequenas inclinações de $\pm 5^\circ$ e $\pm 15^\circ$, as flutuações na temperatura do fluido refrigerante indicam uma operação estável, essencial para a remoção eficaz do calor residual em condições adversas. Os resultados reforçam as vantagens e viabilidade dos reatores nucleares flutuantes e a necessidade de monitoramento contínuo das condições térmicas e hidráulicas para garantir a segurança e eficiência em ambientes dinâmicos.

O estudo de LIHUI HE et al. (2017) conclui que a circulação natural é significativamente afetada por condições de inclinação e rotação, resultando em uma distribuição desigual do refrigerante entre os loops. Essa assimetria pode levar a variações nas temperaturas e fluxos de refrigerante, impactando a eficiência térmica e a segurança do reator. Por fim, apontou ainda que a análise das condições oceânicas é crucial para garantir a operação segura e eficiente do reator em diferentes cenários. LIHUI HE et al. (2017) realizou seus estudos em um reator IPWR, *Integral Pressurized Water Reactor*, ideal para aplicação em submarinos, por serem mais compactos, onde o espaço é limitado, facilitando a integração no design do submarino.

Em um reator IPWR, todos os componentes primários, incluindo o núcleo do reator e os geradores de vapor, estão contidos em um único vaso de pressão. Isso reduz significativamente o número de conexões de tubulação de alta pressão, diminuindo o risco de vazamentos e

facilitando a manutenção. Além disso, a colocação dos componentes em um único vaso permite um design mais compacto e leve, ideal para o espaço limitado de um submarino.

Aliando-se os benefícios da circulação natural, por vezes citado no texto, que reduz a dependência de sistemas de bombeamento mecânico, diminuindo o risco de falhas e aumentando a segurança operacional, com a flexibilidade operacional dos IPWRs permitem que os submarinos se adaptem a diferentes condições oceânicas, tornando-os uma escolha versátil e ideal para propulsão e operação em ambientes desafiadores.

Comparado aos arranjos nucleares convencionais, onde o vaso do reator e os geradores de vapor são componentes separados, os IPWRs oferecem uma maior eficiência térmica devido à menor resistência ao fluxo e à menor perda de calor nas conexões de tubulação. Além disso, o design integrado pode proporcionar uma resposta mais rápida a mudanças na carga térmica, melhorando a capacidade de manobra do submarino. A menor complexidade estrutural também facilita a implementação de medidas de segurança passiva, como a circulação natural do refrigerante em caso de perda de energia, aumentando a segurança operacional do reator.

Em resumo, a escolha do arranjo dos trechos do circuito primário em um reator nuclear naval deve considerar as implicações de inclinações longitudinais e transversais, buscando um equilíbrio entre eficiência térmica e estabilidade operacional. Os reatores integrados (IPWRs) apresentam vantagens significativas em termos de compactação, segurança e eficiência, tornando-os uma escolha superior para aplicações navais, especialmente em submarinos, onde o espaço e a segurança são fatores críticos.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

6.1 CONCLUSÕES

Em conclusão, o estudo sobre circulação natural desenvolvido usando Programação Orientada a Objetos (POO) apresenta avanços significativos na compreensão do comportamento do Circuito de Circulação Natural (CCN) sob diferentes condições operacionais. Os resultados obtidos fornecem valiosas conclusões sobre a dinâmica do circuito de circulação natural (CCN), bem como a manifestação de instabilidades associadas.

Pontos fortes deste estudo incluem a capacidade da linguagem Modelica em simular de maneira precisa e dinâmica as características termo-hidráulicas do CCN. A validação do modelo para o regime monofásico o qual proporcionou resultados para o aquecimento do circuito, temperaturas nos pontos especificados e vazões do fluido no CCN são resultados coerentes com outros trabalhos realizados na CCN do IPEN/CNEN, que confluem para validação do modelo em desenvolvimento.

A validação do modelo em Modelica, através da comparação com os resultados experimentais e numéricos obtidos com o código RELAP5/MOD3.3 em outros trabalhos do IPEN para o mesmo circuito, confirma a precisão e a confiabilidade da POO. Os resultados consistentes entre as diferentes abordagens demonstram que a linguagem Modelica é uma ferramenta robusta para a simulação de sistemas de circulação natural, fornecendo uma base sólida para estudos futuros e aplicações práticas.

Os resultados obtidos para as inclinações do CCN evidenciam que pequenas inclinações de $\pm 5^\circ$ e $\pm 15^\circ$ têm um impacto mínimo nas variações de vazão, mantendo a estabilidade do sistema. No entanto, inclinações mais acentuadas de $\pm 30^\circ$ resultam em variações significativas, com erros maiores e uma redução na precisão das simulações. Essas observações são cruciais para a compreensão do comportamento de reatores nucleares operando em circulação natural em navios e submarinos, onde a inclinação da embarcação pode variar durante a operação. A capacidade de prever e mitigar as variações na vazão é essencial para garantir a eficiência e a segurança da remoção de calor nesses sistemas.

O estudo também destaca a importância de uma modelagem precisa para sistemas de circulação natural em reatores nucleares embarcados. A influência da inclinação sobre a circulação natural foi claramente demonstrada, fornecendo valiosas conclusões para o design e a operação segura desses reatores. A análise detalhada das inclinações mostra que ajustes no design podem ser necessários para manter a estabilidade térmica e a eficiência da remoção de calor em condições operacionais variáveis.

Possíveis melhorias podem ser direcionadas para aprimorar a precisão do modelo, considerando fatores adicionais, como a influência de perturbações externas e variações nas propriedades do fluido. Além disso, a expansão do estudo para incluir inclinações da embarcação seria uma extensão valiosa, uma vez que proporcionaria uma compreensão mais abrangente do comportamento do CCN em cenários mais próximos da realidade operacional.

O estudo do arranjo das pernas quentes e frias do circuito primário em reatores navais, especialmente em submarinos, é crucial para garantir a operação segura e eficiente do sistema de resfriamento sob diferentes condições de inclinação e rotação. A disposição longitudinal é preferível a posição transversal, pois essa orientação pode ajudar a otimizar o desempenho do circuito de circulação natural, minimizando as flutuações indesejadas no fluxo e melhorando a eficiência da transferência de calor.

Em submarinos, onde o espaço é limitado e as condições operacionais são desafiadoras, os reatores integrados de água pressurizada (IPWRs) se destacam como a melhor escolha. Eles proporcionam uma maior compactação e eficiência na circulação natural do refrigerante, reduzindo a dependência de sistemas de bombeamento mecânico e minimizando os requisitos de manutenção. Além disso, a capacidade dos IPWRs de manter a eficiência térmica mesmo sob inclinações e oscilações variadas garante um resfriamento adequado do núcleo, tornando-os ideais para a propulsão e operação segura de submarinos em ambientes oceânicos adversos.

Em suma, o estudo em Modelica representa uma base sólida para investigações futuras, destacando a importância da modelagem dinâmica e precisa na compreensão do comportamento de sistemas de circulação natural. A busca contínua por melhorias e expansões na modelagem garantirá a relevância e aplicabilidade contínua desse trabalho na otimização e segurança de reatores nucleares embarcados.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para avançar neste campo de pesquisa, futuros trabalhos devem focar na validação do código para circuitos operando em regime bifásico. Isso incluirá a realização de simulações e experimentos adicionais para verificar a precisão do código em condições mais complexas, representando melhor os cenários reais enfrentados por reatores nucleares embarcados. Além disso, a investigação de outras variáveis, como diferentes configurações de trocadores de calor e variações na geometria do circuito, pode fornecer uma compreensão mais abrangente e robusta do comportamento do sistema em circulação natural sob diversas condições operacionais.

- **Validação do código para operação em Regime Bifásico:**

- Realizar simulações adicionais para circuitos operando em regime bifásico.
- Comparar os resultados dessas simulações com dados experimentais para validar a precisão do código.

- **Análise de Variáveis Adicionais:**

- Examinar o impacto de variáveis operacionais adicionais, como diferentes taxas de fluxo e cargas térmicas.
- Investigar a influência de materiais e revestimentos nos componentes do circuito.

- **Estudos de Escalabilidade:**

- Explorar a escalabilidade dos modelos para diferentes tamanhos de reatores nucleares.
- Avaliar se as conclusões são aplicáveis a reatores de maior ou menor escala.

- **Comparação com Outros Modelos Numéricos:**

- Comparar os resultados da linguagem Modelica com outros códigos de simulação, além do RELAP5/MOD3.3, para verificar a robustez e a consistência dos resultados.

- Identificar possíveis melhorias no modelo com base nas comparações.

- **Estudo das Condições de Operação em Ambientes Marítimos:**

- Simular cenários operacionais específicos de reatores nucleares em navios e submarinos, considerando as condições ambientais reais, como movimento e variação de temperatura.

- Analisar o impacto das condições marítimas extremas na circulação natural e na eficiência térmica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALESSIO SIVIERO, *Model development for studying natural circulation with the DYNASTY facility*. 2018. Tesi di Laurea Magistrale (Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica e Nucleare) – POLITECNICO DI TORINO – Itália. Disponível em: <https://webthesis.biblio.polito.it/secure/8063/1/tesi.pdf>

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. Doi: <https://doi.org/10.1002/aic.690010407>.

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. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0029-5493\(98\)00157-5](https://doi.org/10.1016/S0029-5493(98)00157-5).

ANGELO, G.; ANDRADE, D. A.; ANGELO, E.; TORRES, W. M.; SABUNDJIAN, G.; MACEDO, L. A.; SILVA A.F. *A numerical and three-dimensional analysis of steady state rectangular natural circulation loop*. Nuclear Engineering and Design, v. 244, p. 61–72, 2012. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2011.12.020>.

ANGELO, G. *Análise Numérica da Dinâmica do escoamento em Circuitos de Circulação Natural*. 2013. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP, São Paulo.

BENZONI, G.; INTROINI, C.; LORENZI, S.; CAMMI, A. *Preliminary validation of the 1D modeling of the DYNASTY natural circulation loop against results from water experimental campaign*. Progress in Nuclear Energy, Volume 155, 2023, 104486, ISSN 0149-1970. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2022.104486>.

BOARIN, S.; CAMMI, A.; PONCIROLI, R.; CHIESA, D.; PREVITALI, E.; SISTI, M.; MAGROTTI, G. PRATA, M.; SALVINI, A. **Object-Oriented Modeling and simulation of a TRIGA reactor plant with Dymola**. Energy Procedia, Volume 101, 2016, Pages 42-49, ISSN 1876-6102. Doi <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.006>.

BONVINI, M.; POPOVAC, M. **Fluid Flow Modelling with Modelica**. IFAC Proceedings Volumes Volume 45(2), 2012, p. 1047-1051. Doi: <https://doi.org/10.3182/20120215-3-AT-3016.00185>

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. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.03.023>.

BRUNNEMANN, J.; VOJACEK, A.; KOCH, T. **Numerically Robust Six-Equation Two-Phase Flow Model for Stationary and Moving Systems in Modelica**. 2021. Proceedings of 14th Modelica Conference 2021, Linköping, Sweden, September 20-24, 2021. Doi: <https://doi.org/10.3384/ecp21181539>

CASELLA, F.; LEVA, A. **Modelling of Distributed Thermo-Hydraulic Processes Using Modelica**. Proceedings 4th Mathmod Vienna, 2003.

CASELLA, F.; LEVA, A. **Object-Oriented Modelling & Simulation of Power Plants with Modelica** Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, Spain, 2005.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. Livro “**Transferência de Calor e Massa: Uma abordagem prática.**”, 4^o Edição em português. Ed. McGrawHill/ Bookman.

Dynasim AB. *Dymola – Dynamic Modeling Laboratory, Users Manual*, Versão 5.3a. Dynasim AB, Research Park Ideon, SE-223 70, Lund, Suécia, 2004.

FRENZEL, L. S.; SABUNDJIAN, G. **Theoretical / Experimental Analysis of the Natural Circulation Phenomenon in the Natural Circulation Circuit of IPEN**. International Nuclear Atlantic Conference, Santos, SP, Brasil, v. 1, p. 01-12, 2019.

FRENZEL, L.S. **Experimentos no circuito de circulação natural e simulação numérica com o código RELAP5/MOD3.3**. 2023. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP, São Paulo. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85133/tde-12042023-115922/pt-br.php>.

FRICK, K., & BRAGG-SITTON, S. (2020). **Development of the NuScale Power Module in the INL Modelica Ecosystem**. Nuclear Technology, 207(4), 521–542. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00295450.2020.1781497>

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. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2006.02.004>.

GREIF, R. **Natural circulation loops**. ASME. Journal of Heat Transfer 110 (4b), 1243–1258. Nov. 1988. Doi: <https://doi.org/10.1115/1.3250624>.

HOU, Y.; WANG, M.; ZHANG, J.; QIU, S.; SU, G.H.; TIAN, W. **Comparative analysis of auxiliary feedwater system and passive safety system under typical accident scenarios for integrated pressurized water reactor (IPWR)**. Prog. Nucl. Energy, v. 115, p. 42–51, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2019.03.020>.

HUANG, B.; ZELAYA, R. **Heat transfer behavior of a rectangular thermosyphon loop**. ASME. Journal of Heat Transfer, v. 110 (2), p. 487-493, Mai. 1988. Doi: <https://doi.org/10.1115/1.3250512>

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: 01 nov. 2023

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Natural circulation in water cooled nuclear power plants.** IAEA-TECDOC-1474, IAEA, Vienna, 2005. Disponível em: <https://www.iaea.org/publications/7376/natural-circulation-in-water-cooled-nuclear-power-plants>.

IYORI, I.; INASAKA, F.; MATSUOKA, T.; AYA, I.; NARIAI, H.; KONDO, M.; NAKAJIMA, K. **Basic flow rate characteristics of natural circulation of marine reactors at inclined attitude.** Proceedings of Second International Topical Meeting on Nuclear Power Plant Thermal Hydraulics and Operations, Atomic Energy Soc of Japan, Tokyo, Japan, 1986.

IYORI, I.; AYA, I.; MURATA, H.; KOBAYASHI, M.; NARIAI, H. 1987. **Natural circulation of integrated-type marine reactor at an inclined attitude.** Nuclear Engineering and Design, v. 99, p. 423-430, 1987. Doi: [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(87\)90138-5](https://doi.org/10.1016/0029-5493(87)90138-5)

JIANG, Y. Y.; SHOJI, M.; NARUSE, M. **Boundary condition effects on the flow stability in a toroidal thermosyphon.** International Journal of Heat and Fluid Flow, v. 23 (1), p. 81–91, 2002. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0142-727X\(01\)00141-2](https://doi.org/10.1016/S0142-727X(01)00141-2)

KELLER J., **Periodic oscillations in a model of thermal convection,** J. Fluid Mech, 1966, vol. 26, p. 599. Doi: <https://doi.org/10.1017/S0022112066001423>

KIM, J.H.; KIM, T.W.; LEE, S.M.; PARK, G.C. **Study on the natural circulation characteristics of the integral type reactor for vertical and inclined conditions.** Nuclear Engineering and Design, v. 207(1), p. 21-31, 2001. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0029-5493\(00\)00417-9](https://doi.org/10.1016/S0029-5493(00)00417-9)

KIM, J.H.; PARK, G.C. **Development of RETRAN03/MOV code for thermal-hydraulic analysis of nuclear reactor under moving conditions.** Journal Korean Nuclear Soc., 28 (6), p. 542-550, 1996. Disponível em: <https://koreascience.kr/article/JAKO199611921631417.pdf>

LAI, Z.; TIAN, W.; CHEN, C.; WANG, M.; ZHANG, K.; QIU, S.; SU, G. **Experimental study on thermal hydraulic characteristics of natural circulation loop under motion condition**. Applied Thermal Engineering, v. 207, p. 118122, 2022. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118122>

LESSAGE, J., SHUTT, W. L., LONGORIA, R. G. **Modeling and Synthesis Methods for Retrofit Design of Submarine Actuation Systems. Energy Storage for Electric Actuators**. Report submitted to Office of Naval Research Dec, 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/258511539_Modeling_and_Synthesis_Methods_for_Retrofit_Design_of_Submarine_Actuation_Systems_Energy_Storage_for_Electric_Actuators

LI, R.; PENG, M.; XIA, G.; SUN, L. **The natural circulation flow characteristic of the core in floating nuclear power plant in rolling motion**. Annals of Nuclear Energy, v. 142 p.107385, 2020. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107385>.

LIHUI, H.; WANG, B.; XIA, G.; PENG, M. **Study on natural circulation characteristics of an IPWR under inclined and rolling condition**. Nuclear Engineering and Design, 2017, v. 317, p. 81-89. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.03.033>.

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. Doi <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2012.06.005>.

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. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/254992480_Benchmarking_assessment_of_RELAP5MOD3_for_the_low_flow_and_natural_circulation_experiment

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. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.04.036>.

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.

Doi: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2004.01.005>

MURATA, H.; IYORI, I.; KOBAYASHI, M. **Natural circulation characteristics of a marine reactor in rolling motion**. Nuclear Engineering and Design, v. 118 (2), p. 141-154, 1990. Doi:

[https://doi.org/10.1016/0029-5493\(90\)90053-Z](https://doi.org/10.1016/0029-5493(90)90053-Z)

MURATA, H.; SAWADA, K.; KOBAYASHI, M. **Experimental investigation of natural convection in a core of a marine reactor in rolling motion**. J. Nucl. Sci. Technol. V. 37 (6), p. 509-517, 2000.

Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/18811248.2000.9714924>

MURATA, H.; SAWADA, K.; KOBAYASHI, M. **Natural circulation characteristics of a marine reactor in rolling motion and heat transfer in the core**. Nuclear Engineering and Design, v. 215(1-2), p. 69-85, 2002. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0029-5493\(02\)00042-0](https://doi.org/10.1016/S0029-5493(02)00042-0).

Natural Circulation. Disponível em: <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/heat-transfer/convection-convective-heat-transfer/natural-convection-free-convection/natural-circulation/>. Acesso em: 29 set. 2022.

NATURAL CIRCULATION. In: *Glossary of United States Nuclear Regulatory Commission* (U.S.NRC), 2021. Disponível em: <https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/glossary/natural-circulation.html>>. Acesso em: 19/06/2024

OpenModelica *Users Guide*, Release v1.24.0-dev-196-gd48837e5bc. Open Source Modelica Consortium. Disponível em: <https://openmodelica.org/doc/OpenModelicaUsersGuide/OpenModelicaUsersGuide-latest.pdf>. Acesso de 2022 a 2024.

PENDYALA, R.; JAYANTI, S.; BALAKRISHNAN, A.R. **Convective heat transfer in single phase flow in a vertical tube subjected to axial low frequency oscillations**. Heat Mass Transfer 44 (7), p. 857-864, 2008a. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00231-007-0302-3>.

PENDYALA, R.; JAYANTI, S.; BALAKRISHNAN, A.R. **Flow and pressure drop fluctuations in a vertical tube subject to low frequency oscillations**. Nuclear Engineering and Design, v. 238 (1), p. 178-187, 2008b. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2007.06.010>.

A. PINI, A. CAMMI, M. CAUZZI, F. FANALE, L. LUZZI. **An Experimental Facility to Investigate the Natural Circulation Dynamics in Presence of Distributed Heat Sources**. Energy Procedia, Volume 101, 2016, Pages 10-17, ISSN 1876-6102. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.002>.

QUALLS, A. L.; CETINER, M. S.; WILSON JR, T. L. **Advanced High-Temperature Reactor Dynamic System Model Development**. 2012. Report Oak Ridge National Laboratory ORNL/TM-2012/174. Disponível em: <https://www.osti.gov/biblio/1054142>.

RAGHEB, Magdi. **Nuclear marine propulsion**. University of Illinois at Urbana-Champaign, 2012. Disponível em https://www.academia.edu/download/32853271/Nuclear_Marine_Propulsion.pdf. Acesso em 01 jul 2024.

RAGHEB, Magdi., **Nuclear Power – Deployment, Operation and Sustainability**. Editado por Pavel Tsvetkov. 2011 Disponível em: <https://www.intechopen.com/chapters/19667>. Acesso em 10 jul 2024.

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.; 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.

SCHIMON, R.; SIMIC, D.; HAUMER, A.; KRAL, C.; PLAINER, M. **Simulation of Components of a Thermal Power Plant**. The Modelica Association, 2006.

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. Disponível em: <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/20399649>

SOUYRI, A.; Bouskela, D.; PENTORI, B.; Kerkar, N. **Pressurized Water Reactor Modelling with Modelica**. The Modelica Association, 2006.

TAN, S. C.; SU, G.H.; PU-ZHEN, G. **Experimental and theoretical study on single-phase natural circulation flow**. Applied Thermal Engineering, v. 29(14-15), p. 3160–3168, 2009a. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.04.019>

TAN, S. C.; SU, G.H.; PU-ZHEN, G. **Experimental study on two-phase flow instability of natural circulation under rolling motion condition**. Nuclear Energy, v. 36, p. 1030–113, 2009b. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2008.09.014>

TAN, S. C.; SU, G.H.; PU-ZHEN, G. **Heat transfer model of single-phase natural circulation flow under a rolling motion condition**. Nuclear Engineering and Design. v. 239 (10), p. 2212–2216, 2009c. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2009.05.002>

THUNÉ, S. **Simulation of Submarine Manoeuvring**. 2015. Dissertação (Mestrado em Arquitetura Naval) – Royal Institute of Technology, Sweden.

TUMMESCHEIT, H.; EBORN, J.; WAGNER, F. J. **Development of a Modelica Base Library for Modeling of ThermoHydraulic Systems**. Modelica Workshop 2000 Proceedings, p. 41-51.

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. Doi: <https://doi.org/10.1155/2008/672704>.

VIJAYAN, P.K; NAYAK, A. K. **Flow Instabilities in Boiling Two-Phase Natural Circulation Systems: A Review**. Science and Technology of Nuclear Installations. 2008. Article ID 573192, 15 pages. Doi: 10.1155/2008/573192. Doi: <https://doi.org/10.1155/2008/573192>.

VIJAYAN, P.K; NAYAK, A. K. **Natural circulation systems: advantages and challenges**. Bhabha Atomic Research Centre, India, 2010. Disponível no ANEXO 3 do IAEA-TECDOC-1474.

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.

VIRGINIA CLASS - SUBMARINE: **Full scale reverse engineering of a Virginia class nuclear fast attack submarine**. New River Community College, Dublin, Virginia, USA. Disponível em: <https://www.nr.edu/cad/vaclass.php>. Acesso em: 01/08/2024.

WANG, C., LI, X., WANG, H., PU-ZHEN, G. **Experimental study on single-phase heat transfer of natural circulation in circular pipe under rolling motion condition**. Nuclear Engineering and Design, 2014, v. 273, p. 497-504. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2014.03.045>.

WELANDER, P., **On the oscillatory instability of a differentially heated fluid loop**, J. Fluid Mech, 1967, vol. 29, p. 17. Doi: <https://doi.org/10.1017/S0022112067000606>.

XING, D.; YAN, C.; SUN, L.; WANG, C. ***Effect of rolling motion on single-phase laminar flow resistance of forced circulation with different pump head.*** Annals of Nuclear Energy v. 54, p. 141–148, 2013. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2012.10.025>.

XING, D.; YAN, C.; SUN, L.; XU, C. ***Effects of rolling on characteristics of single-phase water flow in narrow rectangular ducts.*** Nuclear Engineering and Design, 2012, v. 247, p. 221–229. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2012.03.010>.

YAN, B. H. ***Review of the nuclear reactor thermal hydraulic research in ocean motions.*** Nuclear Engineering and Design, 2017, v. 313, p. 370–385. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2016.12.041>.

ZVIRIN, Y. ***A review of natural circulation loops in pressurized water reactors and other systems.*** Nuclear Engineering and Design, v. 67 (2), p. 203–225, 1982. Doi: [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(82\)90142-X](https://doi.org/10.1016/0029-5493(82)90142-X)

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000
Fone/Fax(011) 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.