

# ANÁLISE TEÓRICO/ EXPERIMENTAL DO FENÔMENO DE CIRCULAÇÃO NATURAL NO CIRCUITO DE CIRCULAÇÃO NATURAL DO IPEN

Lucas Shimada Frenzel<sup>1</sup> e Gaiânê Sabundjian<sup>2</sup>

<sup>1 e 2</sup> Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN / CNEN - SP)  
Av. Professor Lineu Prestes 2242  
05508-000 São Paulo, SP

lucasfrenzel@yahoo.com.br  
gdjian@ipen.br

## RESUMO

O objetivo deste trabalho é o estudo do fenômeno de circulação natural em circuitos experimentais para aplicação em instalações nucleares. Trabalhos sobre circuitos de circulação natural ganharam força após o acidente de *Three Mile Island*. Este acidente mostrou que a segurança deste tipo de reator não era suficientemente confiável. Outro ponto importante é relacionado a necessidade de intervenção humana para a entrada de operação dos sistemas de segurança, evidenciando que erros operacionais foram as maiores causas para o acidente de *Three Mile Island*. Assim, há um crescente interesse da comunidade científica no estudo da circulação natural devido ao seu uso na nova geração de reatores nucleares compactos. O circuito experimental utilizado neste estudo foi reparado/modernizado, e se encontra no Centro de Engenharia Nuclear do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (CEN-IPEN). Para a realização deste trabalho, foi simulado alguns experimentos com diferentes: níveis de potência e vazão de água no secundário; originando um banco de dados experimentais que é utilizado para validar alguns programas termohidráulicos. Particularmente para este estudo, os resultados experimentais obtidos são comparados com o modelo teórico criado com o código RELAP/MOD3.3 [1]. Os resultados obtidos com o programa são satisfatórios quando comparados com os experimentais.

## 1. INTRODUÇÃO

Em reatores nucleares o fenômeno de circulação natural é importante para a remoção de calor residual, no caso de perda de alimentação das bombas do circuito primário e em operações a baixa potência [2].

Os estudos de sistemas operando em regime de circulação natural ganharam força após o acidente ocorrido no reator nuclear em *Three Mile Island*. Este acidente mostrou que os sistemas de segurança deste tipo de reatores não eram suficientemente confiáveis. Outro fato importante diz respeito à necessidade da intervenção humana para a entrada em funcionamento dos sistemas de segurança, mostrando que os erros operacionais foram, na verdade, a maior causa do acidente no reator nuclear em *Three Mile Island*.

Uma das motivações deste trabalho é o de estudar a fenomenologia da circulação natural em instalações nucleares. Este estudo se faz necessário, pois a nova geração de reatores nucleares compactos utiliza a circulação natural do fluido refrigerante como sistema de refrigeração e de remoção de calor residual, em caso de acidente ou desligamento da planta. Outra motivação é que a partir dos resultados experimentais podem ser validados os modelos que existem dentro do código RELAP5, a fim de que se tenha confiabilidade na simulação de sistemas de resfriamento do núcleo de um reator nuclear durante seu desligamento.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

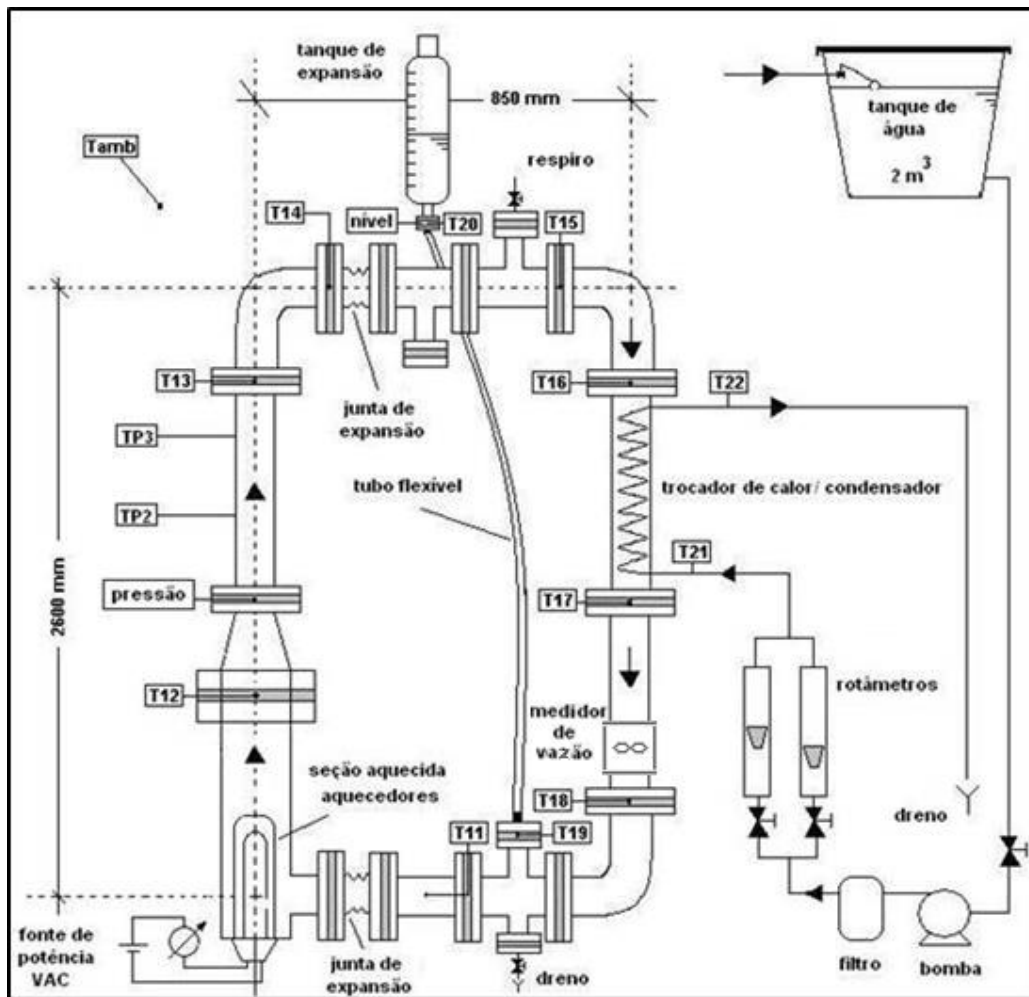
O objetivo deste trabalho é o de estudar a fenomenologia da circulação natural em circuitos experimentais com aplicação em instalações nucleares. Este estudo envolve os dois tipos de escoamento do fluido refrigerante dos reatores nucleares, que são o escoamento monofásico, no caso da operação normal, e bifásica no caso de algum transitório ou acidente que ocorra na planta. Neste trabalho será preparado um banco de dados experimentais para a validação dos modelos do código RELAP5/MOD3.3, quando da utilização desse programa na simulação do sistema de circulação natural em reatores nucleares.

### 2.1. Descrição do Circuito Experimental

O circuito experimental está montado no Centro de Engenharia Nuclear (CEENG) no Instituto de Pesquisas Energéticas (IPEN/CNEN-SP) desde 2009, por empréstimo da Engenharia Química da USP/SP, com o objetivo de gerar informações para uma melhor compreensão do fenômeno de circulação natural: monofásica e bifásica.

O circuito experimental é formado por equipamentos e tubos em vidro *Pyrex* da *Corning* montado em forma retangular, com 2600 mm de altura e 850 mm de largura, conforme Fig. 1 e 2. A fonte quente é um aquecedor elétrico situado na parte inferior de uma seção vertical do circuito.

O Circuito de Circulação Natural (CCN) é composto por duas resistências que dissipam cada uma em torno de 3900 W, uma sempre operando com potência total, e a outra controlada por um Variac, possibilitando potências até 7800 W. A fonte fria é um trocador de calor com espiras helicoidais e encontra-se na parte superior da seção vertical oposta à seção do aquecedor. O volume total de água no circuito, incluindo o tanque de expansão e a linha de surto é de, aproximadamente, 12 litros. O tanque de expansão, previsto para absorver as variações de densidade do fluido no circuito é conectado em um ponto intermediário da seção horizontal inferior. O bocal superior do tanque de expansão permanece aberto, mantendo-o à pressão ambiente. O circuito não possui isolamento térmico, a menos da base do aquecedor, possibilitando assim a visualização do escoamento.



**Figura 1: Esquemática do Circuito de Circulação Natural.**

No circuito existem 14 pontos de medida de temperaturas, com termopares do tipo K, dois dos quais estão dispostos na superfície dos tubos (TP) e os demais se encontram no interior dos mesmos (T) nas posições apresentadas na Fig. 1. Há também um ponto de medida de pressão e um medidor de nível do tanque de expansão como indicados na Fig. 1.

Os dados são registrados por um sistema de aquisição de dados instalado em um microcomputador, com uma taxa de amostragem compatível com o fenômeno. A Fig. 2 mostra uma foto lateral do circuito.

Todo o equipamento empregado para a aquisição de sinais é da marca *National Instruments* e consiste essencialmente do condicionador de sinal e de uma placa de aquisição de dados instalada no microcomputador. Por meio do programa *LabView 7.0* [3], fixa-se a taxa de amostragem, configura-se a tela e o resultado da gravação dos dados é apresentado em um arquivo em formato *Excel*. Todos os termopares foram conectados até o condicionador de sinal, a montagem e modernização do CCN foram feitas, e pode ser vista na Fig. 2.



**Figura 2: Foto da remontagem do Circuito de Circulação Natural.**

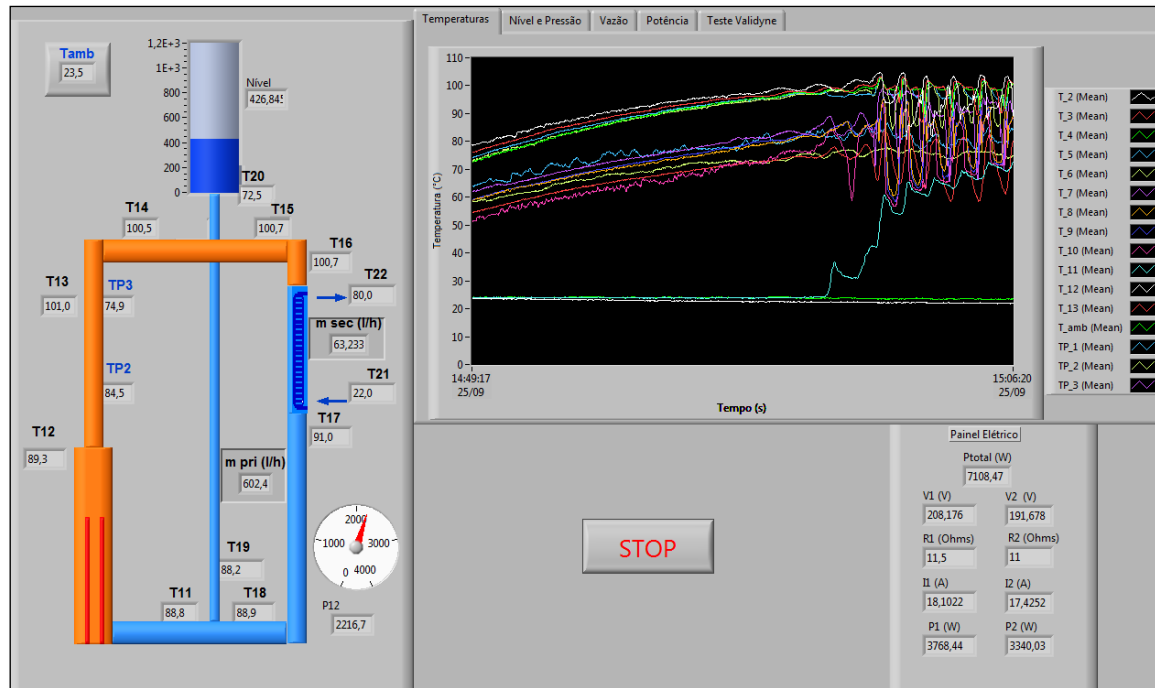
As seguintes condições iniciais são definidas para cada experimento: inventário de água no circuito, caracterizado pelo nível no tanque de expansão, temperatura da água no circuito que deve ser homogênea e próxima à ambiente.

As condições de contorno para o experimento são: vazão de água de resfriamento e potência elétrica aplicada. Após o enchimento do circuito até um nível pré-definido de água no tanque de expansão e a verificação da homogeneidade da temperatura ao longo do circuito, com auxílio do sistema de aquisição de dados, o circuito encontra-se operacional. Fixa-se a vazão de água de resfriamento para então ligar-se as resistências elétricas, no nível de potência desejado. Opera-se o CCN nas condições estipuladas pelo usuário.

Para a aquisição de dados experimentais foi elaborada uma interface de coleta de dados por meio do sistema de aquisição. O *software* foi desenvolvido utilizando-se o programa *LabView*

7.0 da *National Instruments*, que possui recursos adequados para a interface com a instrumentação, além de oferecer interface homem-máquina simples e confiável. A janela de interface pode ser vista na Fig. 3.

**LabView** Nessa primeira etapa do trabalho foram realizadas: a manutenção, modernização, instalação dos termopares para leitura dos dados e a implementação do *software* em 7.0 [3] para aquisição dos dados do CCN. Na Fig. 3 pode ser visto o sistema de aquisição de dados onde se vê a tela de interface de aquisição.



**Figura 3: Interface de aquisição.**

### 2.1.1. Modelo Teórico com Código RELAP5

O código RELAP5/MOD3.3 é um programa computacional utilizado para cálculo de transientes e acidentes em reatores nucleares refrigerados à água leve. Este programa possui um modelo de sete equações de conservação, sendo três para cada uma das fases (líquido e vapor), uma equação adicional para gases não condensáveis e uma equação adicional para o tratamento do boro solúvel. Além disso, o programa conta com uma aproximação da equação de conservação de movimento para fluxo transversal e um modelo de fluxo reverso. Este último utiliza uma solução de condução bidimensional.

O modelo de escoamento do RELAP5 utiliza um modelo de escoamento bifásico, não homogêneo e de não equilíbrio. Este modelo é baseado numa formulação unidimensional ao longo da tubulação na qual as propriedades de escoamento são assumidas constantes sobre a seção transversal.

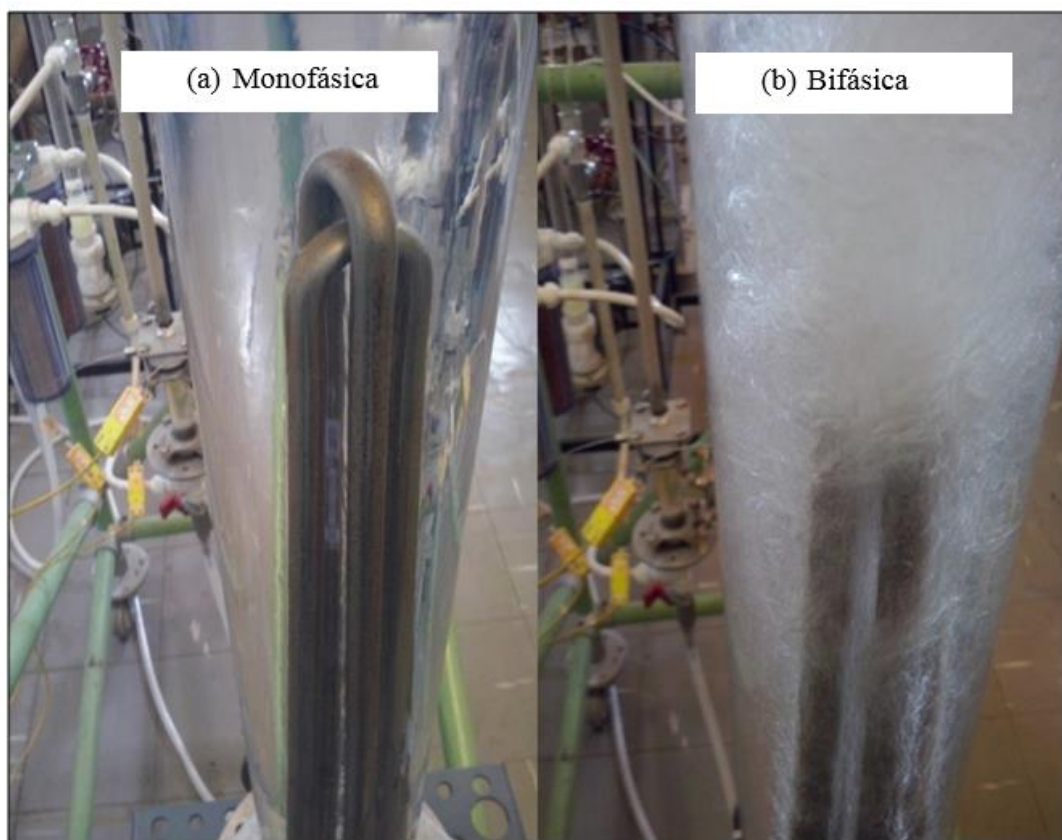
O modelo de transferência de calor também é baseado numa aproximação unidimensional para o cálculo das temperaturas e fluxos de calor. As estruturas de troca de calor são conectadas aos volumes hidrodinâmicos simulando o fluxo de calor perpendicular ao escoamento. As estruturas de calor são usadas para simular paredes de tubos, elementos aquecidos, combustíveis nucleares e qualquer superfície de troca de calor.

Os sistemas de controle podem também ser simulados. Estes são processos que podem ser definidos em termos das variáveis do sistema por meio de operações algébricas ou lógicas.

### 3. RESULTADOS OBTIDOS

Na primeira etapa do trabalho foram gerados os dados experimentais para um range de potências de 4000 a 7600 W, com a vazão de resfriamento do trocador de calor variando de 65 a 150 l/h para todos os casos analisados. Os resultados obtidos foram armazenados em um banco de dados disponível no CEENG. Os pontos de medida dos termopares (Fig. 1) foram modelados no código RELAP5 de forma a serem compatíveis com os pontos centrais dos volumes de controle da nodalização do CCN.

A Fig. 4 mostra a simulação experimental dos escoamentos monofásico e bifásico no CCN. Como o circuito foi construído em pirex pode-se visualizar, durante a transição de uma fase para outra, a evolução de alguns tipos de escoamento, tais como: *single flow*, *bubbly flow*, *slug flow*, entre outros.



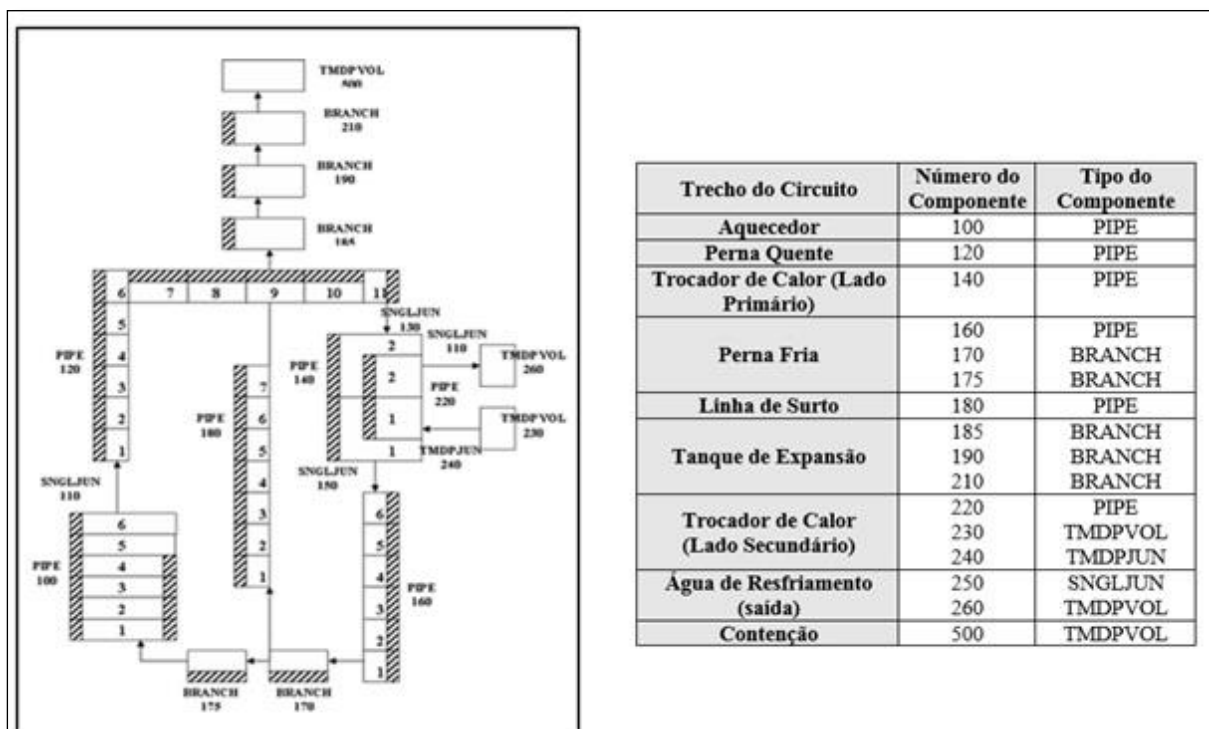
**Figura 4: Simulação experimental.**

Embora tenham sido simulados vários casos teóricos e experimentais, serão apresentados apenas dois casos que representam bem tanto o escoamento monofásico como o bifásico. As condições de simulação para cada um dos casos são apresentadas por meio da Tabela 1.

**Tabela 1: Condições operacionais do CCN para os escoamentos monofásico e bifásico**

Monofásico	Bifásico
Condições Operacionais	Condições Operacionais
Potência do Aquecedor: 4709 W	Potência do Aquecedor: 7712 W
Vazão no Secundário: 0,042 kg/s	Vazão no Secundário: 0,018 kg/s
Temperatura de Entrada: 22°C	Temperatura de Entrada: 22 °C
Temperatura Ambiente: 23°C	Temperatura Ambiente: 22°C

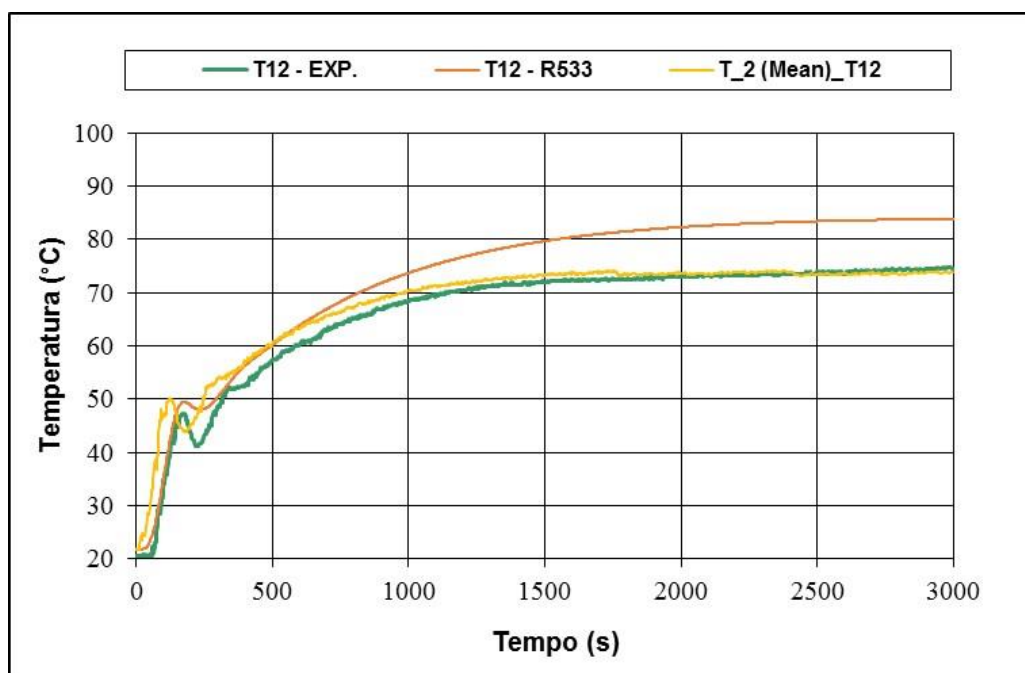
A modelagem geométrica do circuito utilizado foi elaborada a fim de descrever da melhor forma a fenomenologia dos escoamentos monofásico e bifásico. A modelagem com a correspondência entre os componentes do código e as respectivas regiões hidráulicas são apresentadas na Fig. 5, que ilustra os componentes hidrodinâmicos para o código RELAP5.



**Figura 5: Modelagem do CCN no RELAP5 com a correspondência entre os componentes do código e as regiões hidráulicas.**

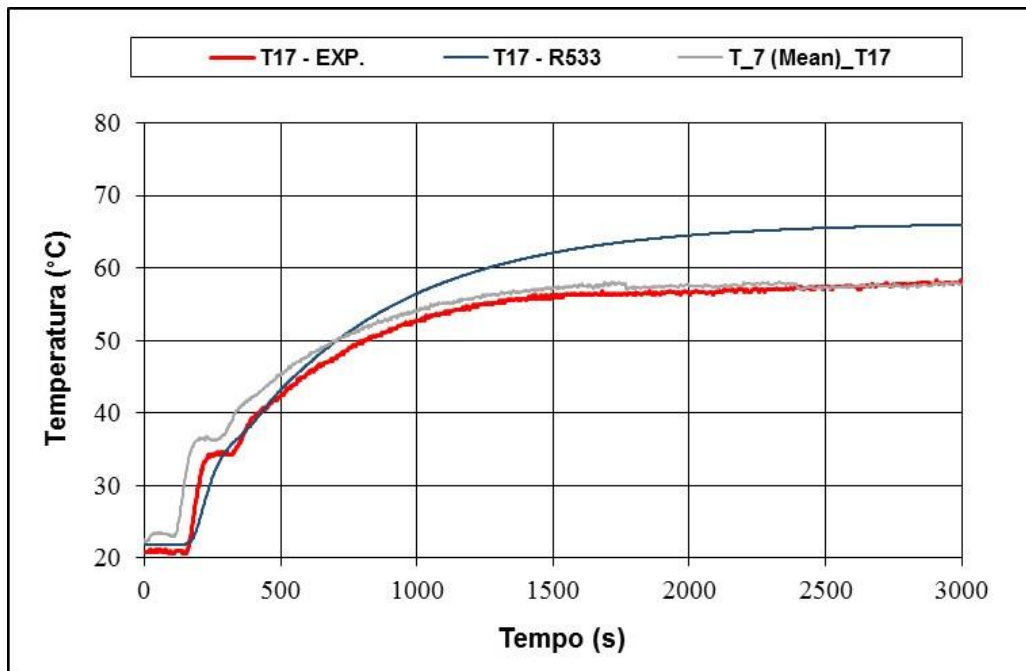
As Fig. 6 a 8 apresentam os resultados obtidos da simulação teórica com o RELAP5/MOD3.3 (R533) e experimental (Mean), para o escoamento monofásico, e as Fig. 9 a 11 para o escoamento bifásico no Circuito de Circulação Natural. Os gráficos foram criados com o objetivo de comparar também os experimentos realizados antes da modernização do CCN (EXP.). Como nota, o termo Mean é relacionado à média que o condicionador de sinais realiza com os pontos obtidos (sinais de entradas não-lineares) e os lineariza (sinais de entradas lineares), algo comum no processo de aquisição de dados de temperatura.

A Fig.6 mostra a evolução das temperaturas na perna quente e na saída do aquecedor, para a simulação teórica e experimental, onde se observa o comportamento oscilatório inicial das temperaturas, em ambos os casos e posteriormente há uma diferença no final de aproximadamente 10°C.



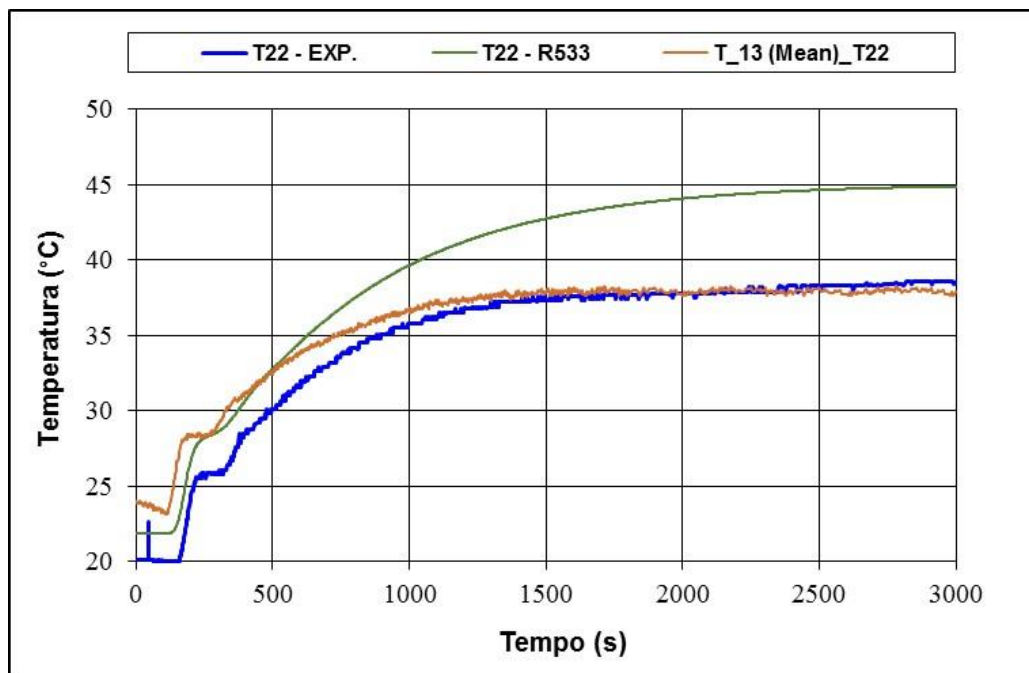
**Figura 6: Evolução teórico/experimental das temperaturas no termopar T12, monofásico.**

A Fig. 7 mostra a evolução das temperaturas teórica/experimental, do lado primário do trocador de calor, com comportamento oscilatório inicial e no final apresenta uma diferença nesse caso menor do que 10°C.



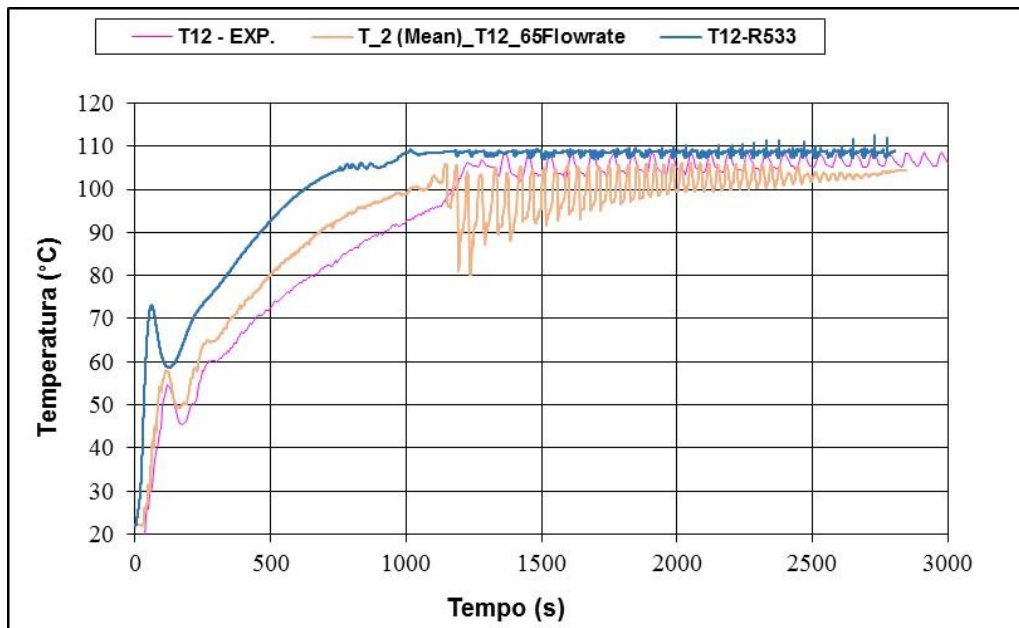
**Figura 7: Evolução teórico/experimental das temperaturas no termopar T17, monofásico.**

Na Fig. 8 é apresentada a evolução das temperaturas teórica/experimental, no lado secundário do trocador de calor, observa-se o comportamento oscilatório inicial e no final apresenta uma diferença nesse caso menor do que 10°C.



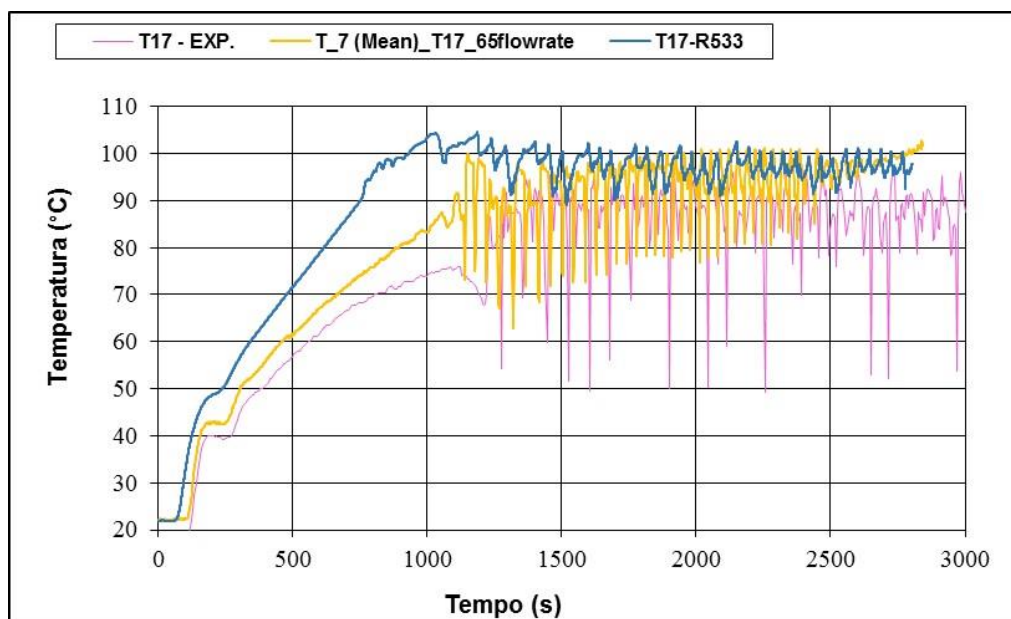
**Figura 8: Evolução teórico/experimental das temperaturas no termopar T22, monofásico.**

A Fig. 9 mostra a simulação teórico/experimental do comportamento das temperaturas na saída do aquecedor, onde se observa o comportamento oscilatório das temperaturas que é devido ao escoamento bifásico.



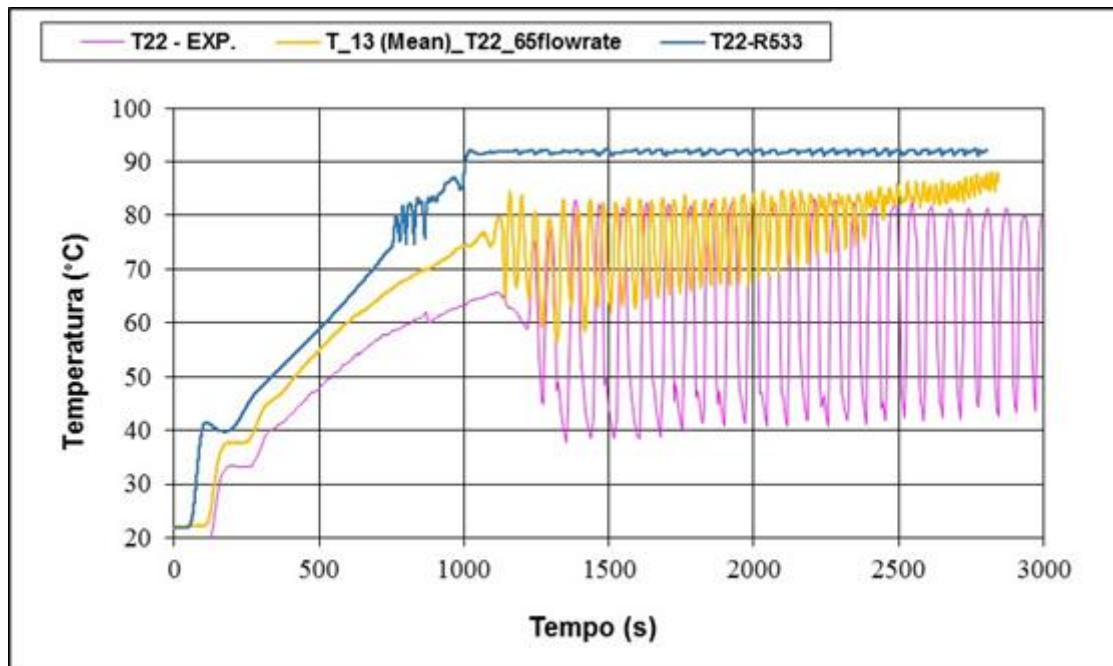
**Figura 9: Evolução teórico/experimental das temperaturas no termopar T12, bifásico.**

A Fig. 10 apresenta também a simulação teórico/experimental do comportamento das temperaturas na saída do trocador de calor, lado primário, cujo o comportamento oscilatório das temperaturas é devido ao escoamento bifásico.



**Figura 10: Evolução teórico/experimental das temperaturas no termopar T17, bifásico.**

Finalmente, na Fig. 11 pode ser vista a simulação teórico/experimental do comportamento das temperaturas na saída do trocador de calor, lado secundário, em que o comportamento oscilatório das temperaturas é visto devido ao escoamento bifásico.



**Figura 11: Evolução teórico/experimental das temperaturas no termopar T22, bifásico.**

Observa-se por meio dos resultados experimentais e calculados que houve uma boa concordância entre eles, tanto para o escoamento monofásico quanto para o bifásico. No entanto, os resultados teóricos podem ser melhorados por meio de testes de sensibilidade dos modelos existentes no RELAP5 e de novas nodalizações do circuito.

#### 4. CONCLUSÃO

Conclui-se que os resultados experimentais obtidos para os regimes monofásico e bifásico apresentam comportamento esperado, mostrando que a instrumentação e o sistema de aquisição de dados estão bem ajustados.

Os resultados obtidos com a nodalização proposta para o RELAP5 foram semelhantes com os resultados experimentais tanto qualitativamente como quantitativamente, para o escoamento monofásico e bifásico. A variação das temperaturas obtidas com o RELAP5 e comparadas com os valores experimentais foram em torno de 10%. Como continuidade deste trabalho serão realizados testes teóricos com objetivo de melhorar os resultados e diminuir as diferenças existentes entre os valores teóricos/experimentais.

## AGRADECIMENTOS

Agradecimentos especiais a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho, disponibilizando o Circuito de Circulação Natural, ao CNPq pela concessão da bolsa de Iniciação Científica e a Pós-graduação do IPEN pelo apoio financeiro para a participação desse evento.

## REFERÊNCIAS

1. USNRC, “*RELAP5/Mod3.3 Code Manual – Volume I: Code Structure, System Models, and Solution Methods*”, Information Systems Laboratories, Inc., Idaho (2010).
2. Bastos, J. L. F. e Loureiro, L. V., “*Experimental Transient Analysis of Natural Circulation in a Complex Geometry, Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*”, pp. 801-806 (1995).
3. LabView 7.0 Express, National Laboratory, USA (2003).