

ANÁLISE TEÓRICO E EXPERIMENTAL DO FENÔMENO DE CIRCULAÇÃO NATURAL

Gaianê Sabundjian*, Delvonei Alves de Andrade*, Pedro Ernesto Umbehaun*, Walmir Máximo Torres*, Alfredo José Alvim de Castro*, Thadeu das Neves Conti*, Paulo Henrique F. Masotti*, Roberto Navarro de Mesquita*, Patrícia Andrea Paladino*, Francisco A. Braz Filho^o, Eduardo Madeira Borges^o, Antonio Belchior Jr.⁺, Ricardo Takeshi Vieira da Rocha⁺ e Osvaldo Luiz Almeida Damy*

* Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN / CNEN - SP) Av. Professor Lineu Prestes 2242
05508-000 São Paulo, SP gdjian@ipen.br

^o Instituto de Estudos Avançados (IEAv - SP), Rodovia dos Tamoios, km 5,5, 12228-001 São José dos Campos, SP, eduardo@ieav.cta.br

⁺ Centro Tecnológico da Marinha (CTMSP - SP), Av. Professor Lineu Prestes 2242 05508-000 São Paulo, SP, belchior@bol.com.br

RESUMO

O objetivo deste trabalho consiste em estudar o fenômeno da circulação natural em circuitos experimentais para aplicação em instalações nucleares. Dada a nova geração de reatores nucleares compactos, que utiliza a circulação natural do fluido refrigerante como sistema de refrigeração e de remoção de calor residual, em caso de acidente ou desligamento de plantas nucleares é que houve um crescente interesse na comunidade científica pelo estudo desse fenômeno. Um circuito experimental foi montado no Departamento de Engenharia Química da Escola Politécnica da USP, com o objetivo de estudar o fenômeno de circulação natural monofásica e bifásica. Foram realizados experimentos com diferentes níveis de potência no aquecedor e vazão de água de resfriamento no circuito secundário, que originou um banco de dados que foi utilizado para validar alguns programas computacionais de termo-hidráulica. Os resultados experimentais obtidos para os regimes monofásico e bifásico são apresentados neste trabalho como também os resultados teóricos obtidos com o código RELAP5/MOD3.2.2gama[1].

INTRODUÇÃO

A circulação natural é o regime de operação onde a força motriz do escoamento é a força de empuxo gerada pela diferença de densidades no fluido. Os circuitos operando em regime de circulação natural, também chamados termosifões, têm várias aplicações na engenharia: aquecimento de água através da energia solar, refrigeração em processos químicos, resfriamento de componentes eletrônicos, aplicações na energia geotérmica, reatores nucleares, etc. Um termosifão é um circuito, aberto ou fechado, onde o fluido de trabalho circula entre uma região quente e uma região fria. O fluido, na região do aquecedor, é aquecido provocando uma diminuição de sua densidade e o fluido na região do trocador de calor é resfriado. O desequilíbrio hidrostático entre os ramais verticais do circuito gera uma vazão de circulação. 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, como mostram [2].

A motivação 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 aplicação dos resultados gerados deste circuito experimental é a validação dos modelos que existem dentro do código RELAP5, quando da simulação de sistemas do resfriamento do núcleo de um reator nuclear durante seu desligamento.

OBJETIVO DO TRABALHO

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. A aplicação principal dos resultados gerados neste circuito experimental será na elaboração de um banco de dados para a validação do código RELAP5, quando da utilização desse programa na simulação do sistema de circulação natural em reatores nucleares. O RELAP5 é um programa computacional muito utilizado na simulação de transitórios e de acidentes em plantas nucleares, além de ser muito utilizado nos institutos da CNEN, para fins de licenciamento das usinas nucleares existentes no país. Por esta razão é que existe a necessidade de validar o código RELAP5 com base em dados experimentais para se ter confiabilidade em seus resultados.

DESCRIÇÃO DO CIRCUITO EXPERIMENTAL

O circuito experimental foi montado no Departamento de Engenharia Química, da Escola Politécnica da USP no final dos anos 80, com o objetivo de gerar informações para uma melhor compreensão do fenômeno de circulação natural: mono e bifásica [3]. No entanto, ele foi desativado nos meados dos anos 90, pois o sistema de aquisição de dados já tinha se tornado obsoleto. Foi então que, no início de 2004 o circuito foi retomado, onde foram realizadas:

- Manutenção e remontagem do circuito;
- Instalação dos termopares para leitura dos dados;
- Desenvolvimento de software em LabView 7.0 [4] para aquisição dos dados legíveis e agradáveis à leitura e análise dos resultados.

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

A potência elétrica aplicada nas resistências é controlada com um variador de tensão alimentado com corrente alternada. São medidas as temperaturas em 16 pontos do circuito, com termopares do tipo T, quatro dos quais estão dispostos na superfície dos tubos (TP) e os demais se encontram no interior dos mesmos (T) nas posições apresentadas na Fig. 1a. Estes 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. 1b mostra uma foto lateral do circuito.

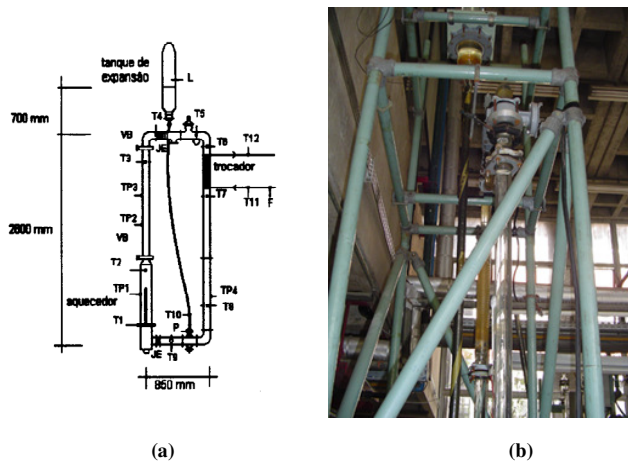


Figura 1. Esquema usado no circuito de circulação natural e a direita vista lateral do circuito

Todo o equipamento empregado para a aquisição de sinais é da marca National Instruments e consiste essencialmente de dois módulos condicionadores de sinal com dois blocos terminais para até 8 termopares e uma placa de aquisição de dados instalada no micro computador. Por meio do programa LabView 7.0, fixa-se a taxa de amostragem, configura-se a tela e o formato da planilha na qual os dados serão registrados.

Todos os termopares foram conectados, através de fios de cobre comum até dois módulos condicionadores de sinal.

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, potência elétrica aplicada às resistências e abertura das válvulas borboleta.

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. Abrem-se completamente as válvulas borboleta, fixa-se a vazão de água de resfriamento para então ligar-se as resistências elétricas, no nível de potência desejada. Opera-se o circuito até que o sistema atinja uma situação de regime permanente.

Para a aquisição de dados experimentais foi elaborada uma interface de coleta de dados através do sistema de aquisição. O software foi desenvolvido utilizando-se o programa LabView 7.0 da National Instruments, que possui recursos adequados para interface com a instrumentação além de oferecer interface homem-máquina simples e confiável. A janela de interface pode ser vista na Fig. 2.

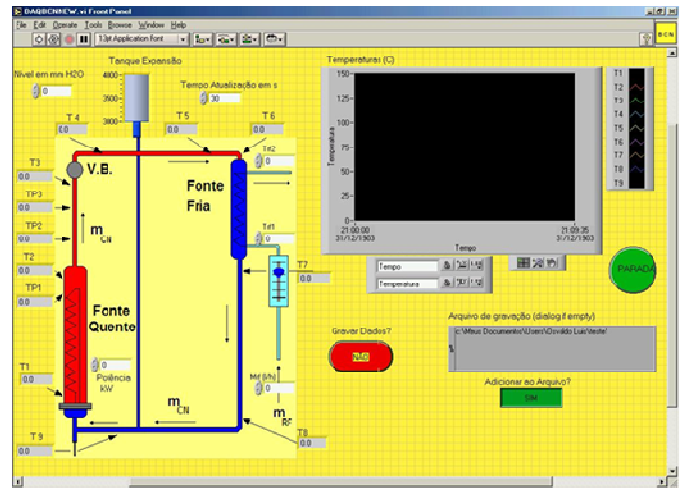


Figura 2. Interface de Aquisição

MODELO TEÓRICO

Código RELAP5

O código RELAP5 será utilizado para a análise de interações de sistemas e não para simulações detalhadas de escoamento em componentes. O código 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 hidrodinâmico é baseado no modelo de volumes de controle para o fluido. Estes volumes de controle podem ser considerados como tubos de corrente com junções de entrada e saída. Propriedades escalares como pressão, energia, densidade e fração de vazio são representadas pela média dentro do volume de controle e são localizadas no ponto central do mesmo. Por outro lado, propriedades vetoriais, tais como, as velocidades são localizadas nas junções.

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 de

tubos de corrente na quais as propriedades do escoamento são assumidas constantes sobre a seção transversal. Os volumes de controle são incrementos finitos do escoamento e podem ter uma junção na entrada ou saída (junções normais) ou na lateral (junções de fluxo transversal). A variação do diâmetro do tubo de corrente é especificada através da área transversal do volume, as áreas das junções e através do uso de opções de mudança de área das junções. O cálculo dos coeficientes de perda de carga considera a variação na área da seção transversal no volume. A velocidade média é utilizada na equação de conservação da quantidade de movimento, no cálculo da transferência de calor e da fricção na parede. No caso de mudança de área abrupta são modelados os efeitos de turbulência e separação de escoamento.

O modelo de transferência de calor também é baseado numa aproximação unidimensional para o cálculo das temperaturas e fluxos de calor. Os condutores de calor são conectados aos volumes hidrodinâmicos simulando o fluxo de calor perpendicular ao escoamento. A estrutura de calor é termicamente conectada ao volume hidrodinâmico através de um fluxo de calor que é calculado através de uma correlação de transferência de calor por convecção. As estruturas de calor são usadas para simular paredes de tubos, elementos aquecidos, combustíveis nucleares e qualquer superfície de troca de calor.

Sistemas de controle podem também ser simulados. Estes são processos que podem ser definidos em termos das variáveis do sistema através de operações algébricas ou lógicas.

Modelagem Utilizada

A análise termo-hidráulica utilizada para o estudo de acidentes em reatores nucleares, é feita com o uso de algumas ferramentas computacionais sofisticadas, sendo que um dos códigos computacionais mais utilizados é o RELAP5. A maioria destes programas possui uma filosofia realista (best estimate) e todos foram desenvolvidos para simular acidentes e transitórios em reatores refrigerados a água leve do tipo PWR (Pressurized Water Reactor) e sistemas associados.

O código RELAP5, versão MOD3.2.2gama, tem a capacidade de simular acidentes de perda de refrigerante primário por pequena ou grande ruptura (LOCA – Loss of Coolant Accident), acidentes de perda de potência elétrica, acidentes de perda de água de alimentação, acidentes de perda de vazão etc. A análise do comportamento termo-hidráulico durante um destes acidentes ou transitório se aplica tanto para o circuito primário como para o secundário de uma instalação nuclear. O primeiro passo para simulação de um sistema com o RELAP5 requer a nodalização do mesmo em componentes hidrodinâmicos. Na modelagem procura-se fazer a representação geométrica mais realista possível através de componentes próprios do código, tais como: PIPE para tubulações, BRANCH para bifurcações ou T's, VALVE para válvulas, PUMP para bombas, SEPARATOR para separadores de vapor e outros. Além dos dados geométricos da planta, que fazem parte dos dados de entrada do código RELAP5, deve-se representar também as estruturas de troca de calor entre dois ou mais componentes ou com o ambiente, os sistemas de controle, a geração de calor no reator e os dados dos materiais que constituem a planta.

Para a simulação de uma instalação nuclear com o código RELAP5 é necessária uma grande quantidade de informações. Além disto, existe a necessidade de uma quantidade razoável

de operações matemáticas para os cálculos da geometria dos componentes.

O Código RELAP5 além de simular transitório e acidentes termo-hidráulico pode ser utilizado também para a análise do comportamento de tubulações contendo água/vapor e para a estimativa de perdas de carga.

RESULTADOS OBTIDOS

Nesta etapa, foram obtidas as curvas experimentais de temperatura do circuito de circulação natural operando nos dois regimes de escoamento. Os pontos de medição dessas curvas são apresentados na Fig. 1 e foram escolhidos de forma a melhor descrever o comportamento termodinâmico do sistema.

A Fig. 3 mostra a simulação experimental da transição do escoamento monofásico e para o bifásico no circuito de circulação natural, e devido à utilização de um circuito construído em pirex pode-se visualizar, durante a transição, a evolução de alguns tipos de escoamento bifásico, tais como: *single flow*, *bubbly flow*, *slug flow*, etc.

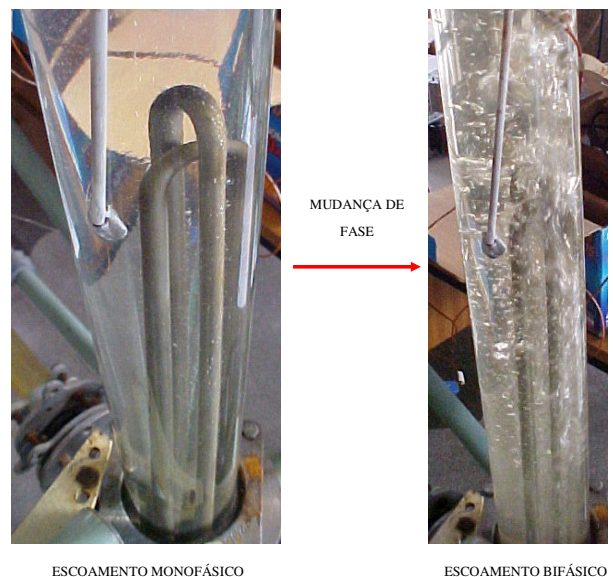


Figura 3. Simulação experimental

Análise do regime monofásico com as seguintes condições operacionais:

- Potência dissipada no aquecedor: 4706 W;
- Vazão de água de resfriamento: 0,05 kg/s;
- Temperaturas iniciais: 20 °C; e
- Temperatura ambiente 21 °C.

Análise do regime bifásico com as seguintes condições operacionais:

- Potência dissipada no aquecedor: 6536 W;
- Vazão de água de resfriamento: 0.0233 kg/s;
- Temperaturas iniciais: 20 °C; e
- Temperatura ambiente 21 °C.

A modelagem geométrica do circuito utilizada foi elaborada a fim de descrever da melhor forma a fenomenologia do escoamento monofásico e bifásico. A Tab. 1 apresenta a correspondência entre os componentes do código e as respectivas regiões hidráulicas com a Fig. 4, que ilustra os componentes hidrodinâmicos para o código RELAP5. Foram realizados experimentos em regime monofásico e bifásico, variando-se a potência dissipada no aquecedor e vazão de água de resfriamento. Estes testes foram

efetuados com o objetivo de compreender o comportamento do sistema, em regime de circulação natural monofásico e bifásico, e gerar dados para a validação do código RELAP5. A utilização de um circuito em vidro permite a visualização do escoamento nas diversas regiões do circuito e possibilita a identificação das instabilidades de escoamento por analogia às descritas na literatura.

As Figuras 5 a 9 apresentam os resultados obtidos da simulação teórica e experimental, para o escoamento monofásico no circuito de circulação natural.

A Figura 5 mostra a evolução das temperaturas na perna quente, na saída do lado primário e secundário do condensador para a simulação teórica e experimental, onde se observa o comportamento oscilatório inicial das temperaturas.

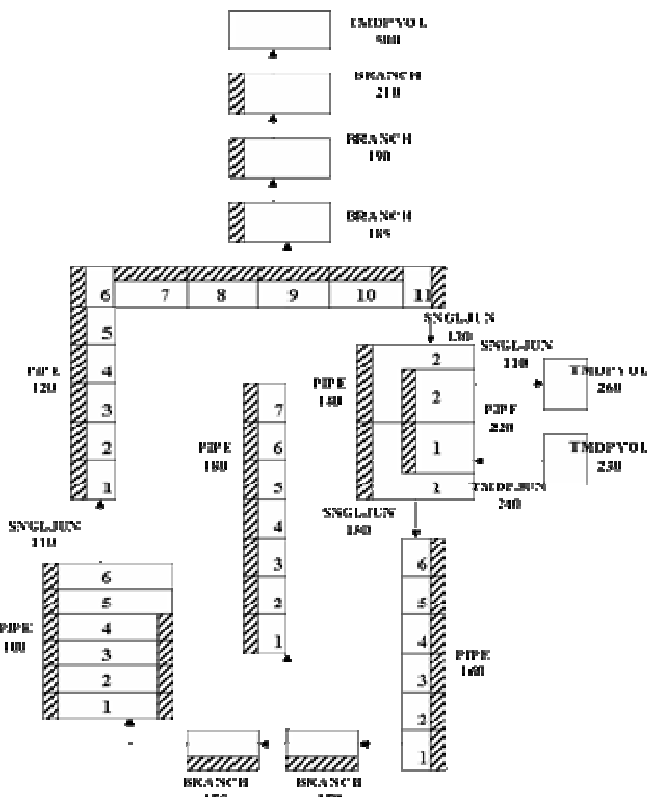


Figura 4. Nodalização do Circuito de Circulação Natural para o RELAP5

Tabela 1. Correspondência entre os componentes do código e as regiões hidráulicas

Trecho do Circuito	Número do Componente.	Tipo do Componente
Aquecedor	100	PIPE
Perna Quente		PIPE
Trocador de Calor (Lado Primário)	140	PIPE
Perna Fria	160 170 175	PIPE BRANCH BRANCH
Linha de Surto	180	PIPE
Tanque de Expansão	185 190 210	BRANCH BRANCH BRANCH
Trocador de Calor (Lado Secundário)	220 230 240	PIPE TMDPVOL TMDPJUN
Água de Resfriamento (saída)	250 260	SINGLJUN TMDPVOL
Contenção	500	TMDPVOL

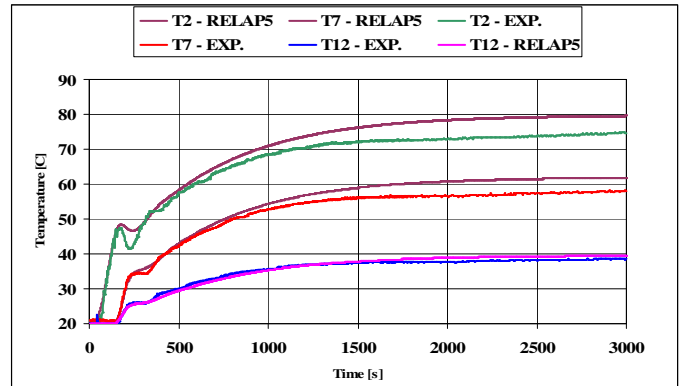


Figura 5. Evolução das temperaturas teórico/experimental dos termopares T2, T7 e T12 para o escoamento monofásico

A Figura 6 apresenta a evolução da temperatura teórico/experimental para o termopar localizado na parede da perna quente.

A evolução temporal das vazões mássicas no primário e na linha de surto é obtida apenas por meio da simulação teórica, como pode ser vista pelas Figuras 7 e 8, respectivamente.

A Figura 9 apresenta a evolução temporal da fração de vazio no tanque de expansão obtida por meio do código RELAP5.

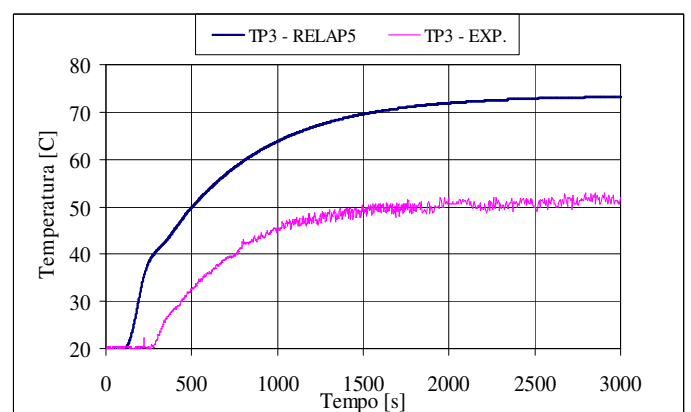


Figura 6. Evolução das temperaturas teórico/experimental do termopar TP3 para o escoamento monofásico

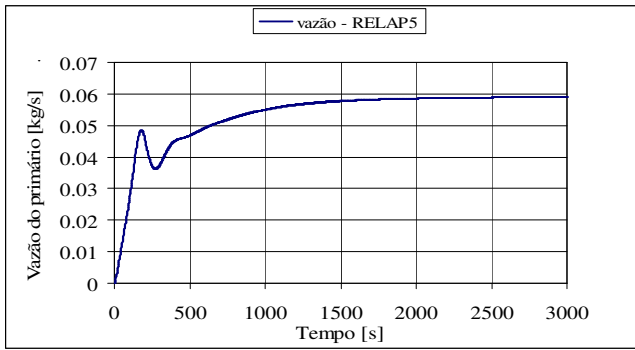


Figura 7. Evolução da vazão mássica no primário obtida com o RELAP5 para o escoamento monofásico

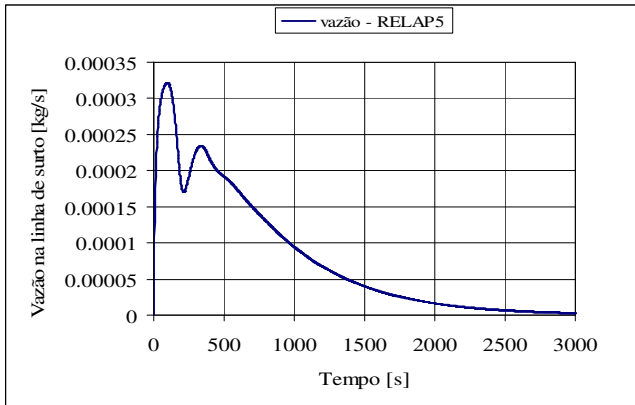


Figura 8. Evolução da vazão mássica na linha de surto obtida com o RELAP5 para o escoamento monofásico

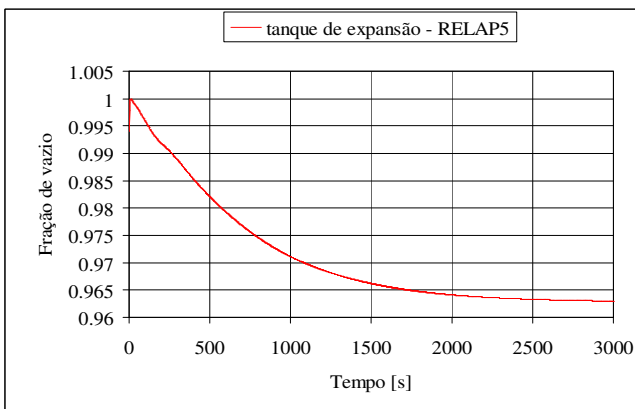


Figura 9. Evolução das temperaturas do termopar TP3 com o RELAP5 para o escoamento monofásico

As Figuras 10 a 15 mostram os resultados obtidos da simulação teórica e experimental, na condição de escoamento bifásico no circuito de circulação natural.

A Fig. 10 mostra o comportamento das temperaturas na perna quente e na saída do lado primário do condensador, para a simulação teórico/experimental, onde se observa o comportamento oscilatório das temperaturas devido ao escoamento bifásico. Observa-se que no caso do escoamento bifásico os resultados experimentais apresentam uma amplitude maior durante o transitório, devido ao ruído proveniente da falta de aterramento da estrutura metálica que suporta o experimento.

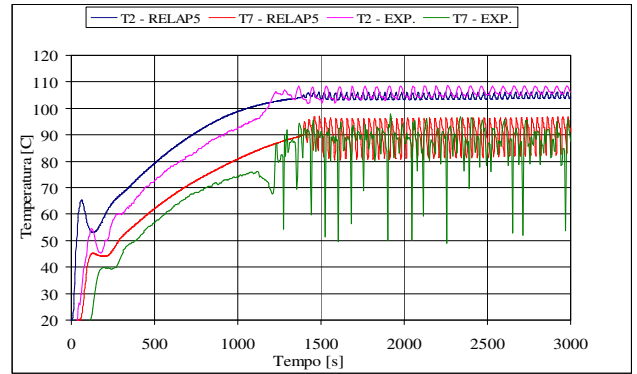


Figura 10. Evolução das temperaturas teórico/experimental dos termopares T2 e T7 para o escoamento bifásico

A Fig. 11 apresenta a evolução das temperaturas teórico/experimental para o termopar localizado no lado secundário do condensador, que é também oscilatório devido à mudança de fase.

A evolução temporal das vazões mássicas no primário e na linha de surto foi obtida por meio da simulação teórica com o RELAP5, como pode ser vista pelas Figuras 12 e 14, respectivamente.

A fração de vazio na saída do aquecedor e no tanque de expansão podem ser vistos por meio das Figuras 13 e 15, respectivamente.

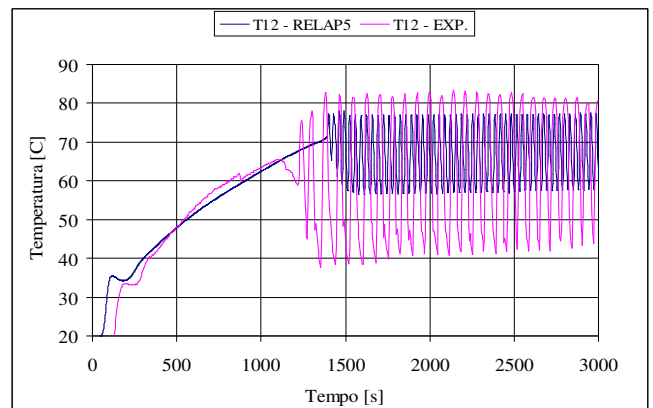


Figura 11. Evolução das temperaturas teórico/experimental do termopar T12 para o escoamento bifásico

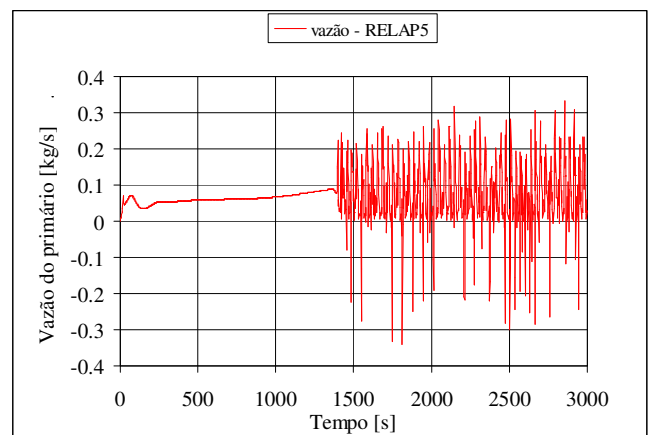


Figura 12. Evolução da vazão no primário com o RELAP5 para o escoamento bifásico

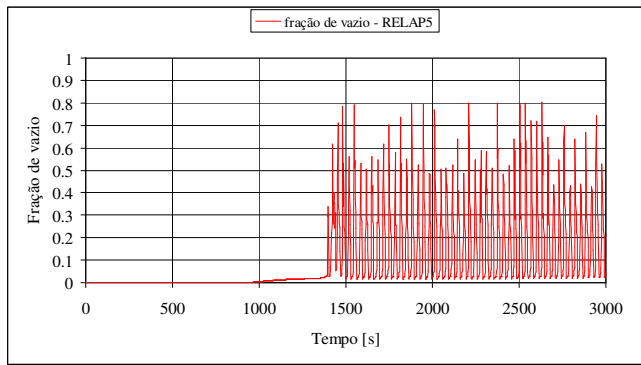


Figura 13. Evolução da fração de vazio na saída do aquecedor com o RELAP5 para o escoamento bifásico

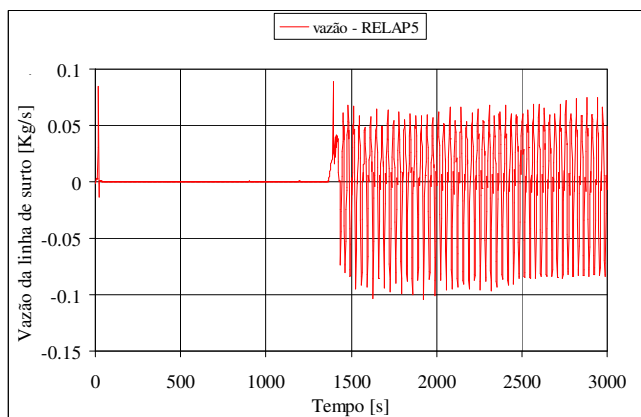


Figura 14. Evolução da vazão na linha de surto com o RELAP5 para o escoamento bifásico

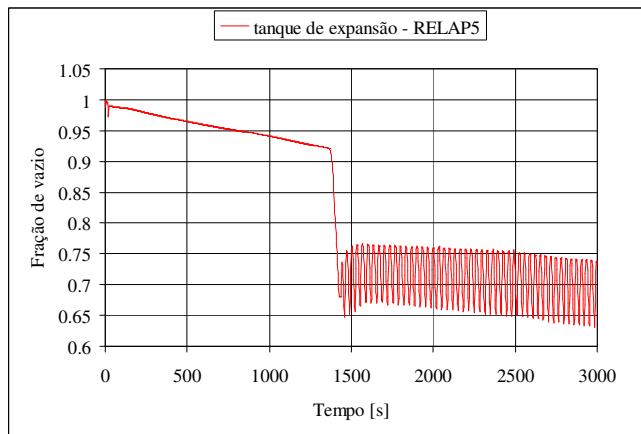


Figura 15. Evolução da fração de vazio no tanque de expansão com o RELAP5 para o escoamento bifásico

Uma boa concordância entre os resultados experimentais e calculados foi obtida tanto para o escoamento monofásico quanto para o bifásico.

Para caracterizar melhor o experimento, seriam necessários outros resultados experimentais, como por exemplo: distribuição de pressão e vazão no circuito primário, nível e temperatura do tanque de expansão, detalhes geométricos e de materiais dos aquecedores. Todas estas medidas estão sendo providenciadas a fim de se ter um maior número de informações possíveis do circuito quando do estudo fenomenológico de escoamentos monofásico e bifásico.

CONCLUSÕES

Conclui-se que os resultados experimentais obtidos para o regime monofásico apresentam um comportamento esperado, mostrando que a instrumentação e o sistema de aquisição de dados estão bem ajustados. O mesmo não se observa para o escoamento bifásico, onde os resultados obtidos, embora coerentes, apresentaram oscilações devido à falta de aterramento da estrutura metálica.

Os resultados obtidos com a nodalização proposta para o RELAP5 tiveram uma boa concordância com os resultados experimentais tanto para o escoamento monofásico e bifásico.

Os próximos testes experimentais com o Circuito de Circulação Natural serão realizados nas dependências do Centro de Engenharia Nuclear do IPEN-CNEN/SP, pois o aparato experimental foi transferido para o IPEN com base no empréstimo estabelecido entre a USP e a CNEN.

REFERÊNCIAS

- [1] RELAP5/MOD3.2.2Gamma, NUREG/CR-5535, IDAHO LAB. SCIENETECH Inc., Idaho (1999).
- [2] Bastos, J. L. F. e Loureiro, L. V., 1995 Experimental Transient Analysis of Natural Circulation in a Complex Geometry, Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, pp. 801-806.
- [3] XI ENFIR, 1997, Tema Especial de Termo-Hidráulica, XI Encontro Nacional de Física de Reatores e Termo-hidráulica, Poços de Caldas, Brasil.
- [4] LabView 7.0 Express, 2003, National Laboratory, USA.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos especiais ao Dr. Ivan Gilberto Sandoval Falleiros, Diretor da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, ao Prof. Dr. Claudio Oller do Nascimento Diretor da Engenharia Química da POLI e ao Prof. Dr. Luiz Valkov Loureiro, pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho, disponibilizando o Circuito de Circulação Natural.

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS FOR THE NATURAL CIRCULATION PHENOMENON

Gaianê Sabundjian*, Delvonei Alves de Andrade*, Pedro Ernesto Umbehaun*, Walmir Máximo Torres*, Alfredo José Alvim de Castro*, Thadeu das Neves Conti*, Paulo Henrique F. Masotti*, Roberto Navarro de Mesquita*, Patrícia Andrea Paladino*, Francisco A. Braz Filho^o, Eduardo Madeira Borges^o, Antonio Belchior Jr.⁺, Ricardo Takeshi Vieira da Rocha⁺ e Osvaldo Luiz Almeida Damy*

* Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN / CNEN - SP) Av. Professor Lineu Prestes 2242
05508-000 São Paulo, SP gdjian@ipen.br

^o Instituto de Estudos Avançados (IEAv - SP), Rodovia dos Tamoios, km 5,5, 12228-001 São José dos Campos, SP, eduardo@ieav.cta.br

⁺ Centro Tecnológico da Marinha (CTMSP - SP), Av. Professor Lineu Prestes 2242 05508-000 São Paulo, SP, belchior@bol.com.br

ABSTRACT

The objective of this paper is to study the natural circulation phenomenon in one and two-phase regime. There has been a crescent interest in the scientific community in the study of the natural circulation. New generation of compact nuclear reactors uses the natural circulation for residual heat removal in case of accident or shutdown. For this study, the modeling and the simulation of the experimental circuit is performed with the RELAP5 code. The experimental circuit is mounted in the Chemical Engineering Department of the University of São Paulo. It is presented in this work the theoretical/experimental comparison for one and two-phase flow. These results will be stored in a database to validate RELAP5 calculations.