

ANÁLISE TEÓRICO/EXPERIMENTAL DO FENÔMENO DE CIRCULAÇÃO NATURAL

Gaianê Sabundjian*, Thadeu N. Conti*, Walmir M. Torres*, Luiz A. Macedo*, Delvonei A. Andrade*, Pedro E. Umbehaun*, Roberto N. Mesquita*, Mauro F. Silva Filho*, Francisco A. Braz Filho^o e Eduardo M. Borges^o

* 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, fbraz@ieav.cta.br

RESUMO

O objetivo deste trabalho é o estudo do fenômeno de 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 da planta, há um crescente interesse na comunidade científica pelo estudo desse fenômeno. O circuito experimental utilizado neste estudo encontra-se montado no Centro de Engenharia Nuclear (CEN) do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares de São Paulo (IPEN-SP). Para a realização deste trabalho foram simulados alguns experimentos com diferentes níveis de potência no aquecedor, que originou um banco de dados experimentais que é utilizado para validar alguns programas computacionais de termo-hidráulica. Particularmente, neste estudo os resultados experimentais obtidos são comparados com a modelagem teórica feita com o código RELAP5 [1]. Os resultados obtidos com o programa mostraram-se satisfatórios quando comparados com os experimentais.

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 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 de *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.

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. Neste trabalho será preparado um banco de dados experimentais para a validação dos modelos do código RELAP5, quando da utilização desse programa na simulação do sistema de circulação natural em reatores nucleares.

DESCRIÇÃO DO CIRCUITO EXPERIMENTAL

O circuito experimental está montado no CEN no 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 tubos e equipamentos em vidro Pyrex da Corning montado em forma retangular, com 2600 mm de altura e 850 mm de largura, Figuras 1 e 2. A fonte quente é um aquecedor elétrico situado na parte inferior de uma seção vertical do circuito. Ela é composta por duas resistências que dissipam cada uma em torno de 4200 W, uma sempre operando com potência total, e a outra controlada por um Variac, possibilitando potências de 4200 W até um total de 8400 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.

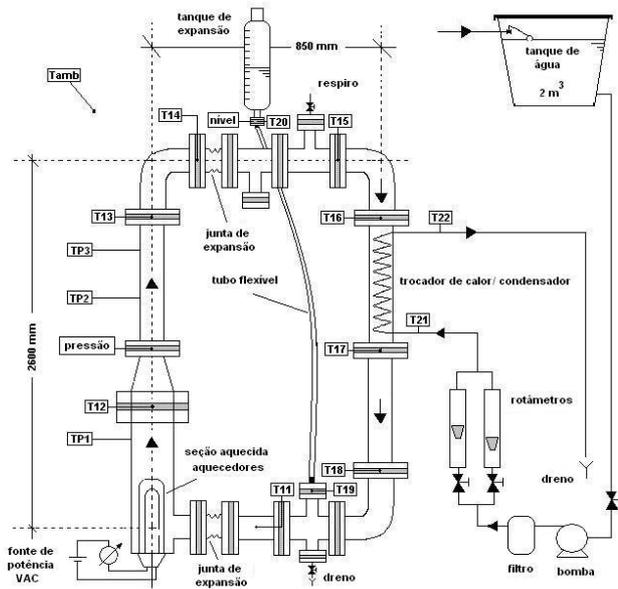


Figura 1. Esquema usado no Circuito de Circulação Natural

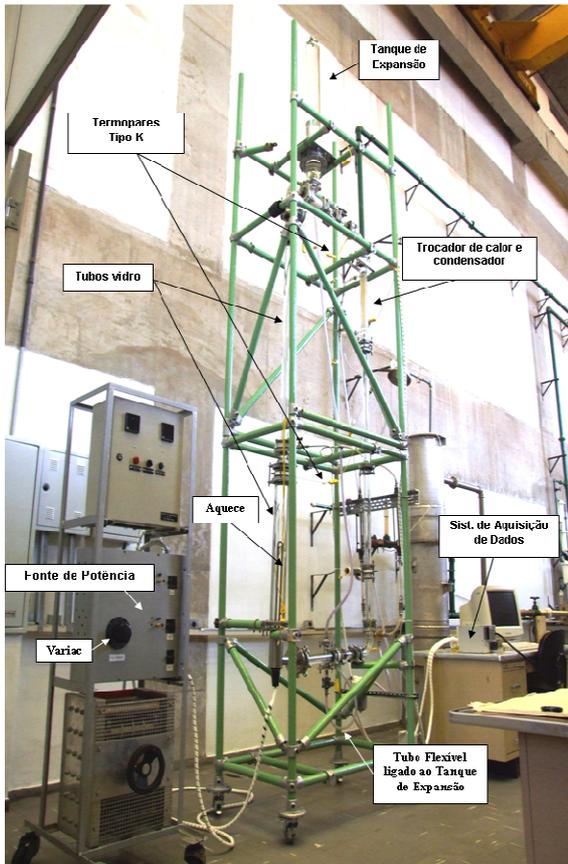


Figura 2. Foto do Circuito de Circulação Natural

No circuito existem 15 pontos de medida de temperaturas, com termopares do tipo K, três 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 com extensão txt. Todos os termopares foram conectados até o condicionador de sinal, como mostra a Fig. 2.

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 desejada. Opera-se o circuito nas condições estipuladas pelo usuário.

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 a interface com a instrumentação, além de oferecer interface homem-máquina simples e confiável. A janela de interface pode ser vista na Fig. 3.

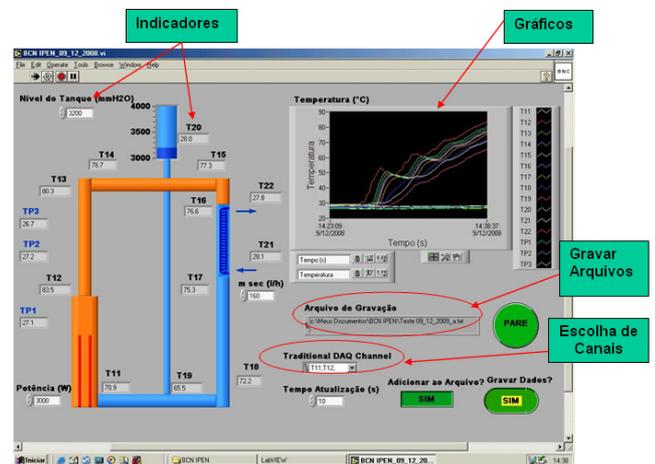


Figura 3. Interface de Aquisição

MODELO TEÓRICO

Código RELAP5

O código RELAP5 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 de tubos de corrente na quais as propriedades do 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. Os condutores de calor são conectados 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.

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 do comportamento termo-hidráulico durante alguns acidentes ou transiente pode ocorrer tanto no circuito primário como no 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 necessário uma grande quantidade de informações. Além disto, existe a necessidade de uma quantidade razoável de operações matemáticas para os cálculos da geometria dos componentes.

RESULTADOS OBTIDOS

Na primeira etapa do trabalho foram gerados os dados experimentais para uma gama de potências entre 1000 a 7500 W, com a vazão de resfriamento do trocador de calor no valor fixo de 100 l/h para todos os casos analisados. Os resultados obtidos foram armazenados em um banco de dados disponível no CEN. Os pontos de medida dos termopares (Fig. 1) foram escolhidos de forma a serem compatíveis com os pontos de cálculo do código RELAP5.

A Fig. 4 mostra a simulação experimental da transição do escoamento monofásico para o bifásico no Circuito de Circulação Natural. Como o circuito foi construído em pirex pode-se visualizar, durante a transição, a evolução de alguns tipos de escoamento, tais como: *single flow*, *bubbly flow*, *slug flow*, etc.

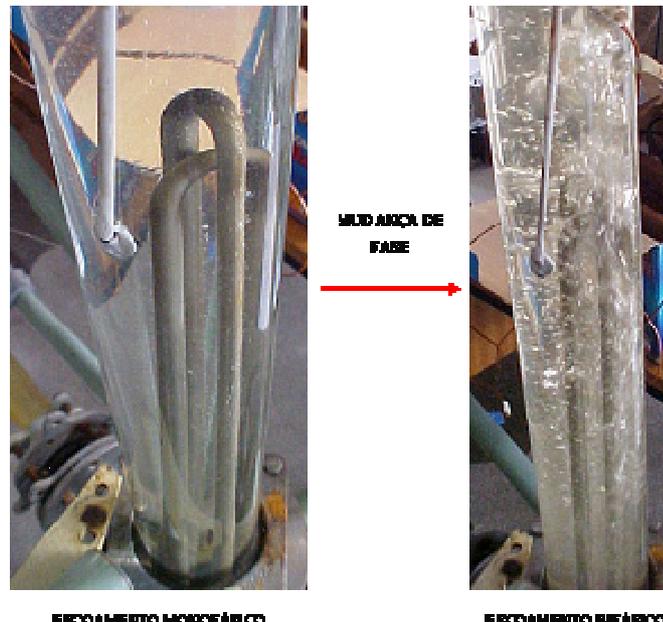


Figura 4. Simulação experimental

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 a seguir:

- (1) regime monofásico com as seguintes condições operacionais:
 - potência dissipada no aquecedor: 1000 W;
 - vazão de água de resfriamento: 0,0278 kg/s;
 - temperaturas iniciais: 22,4 °C;
 - temperatura ambiente: 21 °C.
- (2) regime bifásico com as seguintes condições operacionais:
 - potência dissipada no aquecedor: 7500 W;
 - vazão de água de resfriamento: 0,0278 kg/s;
 - temperaturas iniciais: 23,3 °C;
 - temperatura ambiente: 18 °C.

A modelagem geométrica do circuito utilizado foi elaborada a fim de descrever da melhor forma a fenomenologia do escoamento monofásico e bifásico, conforme a Fig. 5.

A Tab. 1 apresenta a correspondência entre os componentes do código e as respectivas regiões hidráulicas com a Fig. 5, que ilustra os componentes hidrodinâmicos para o código RELAP5.

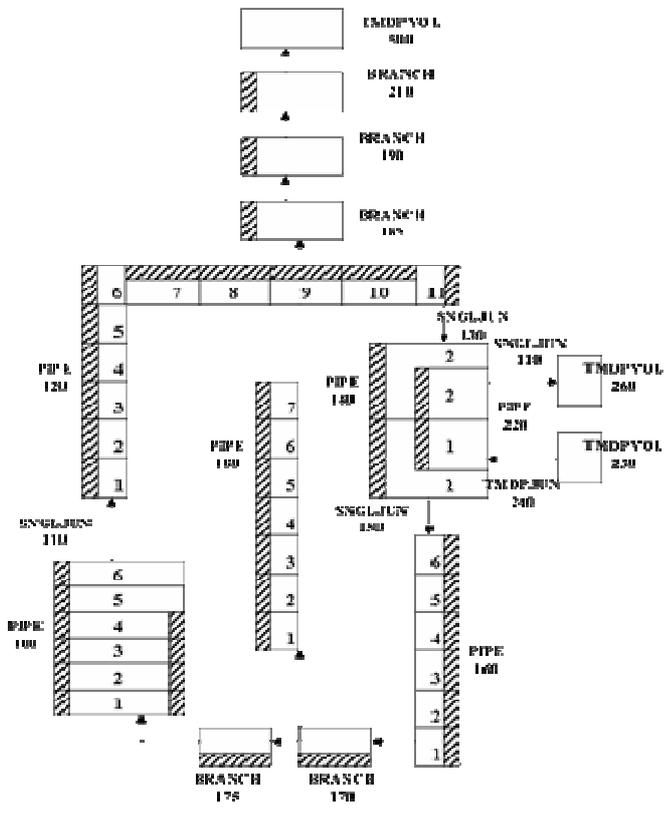


Figura 5. Modelagem do Circuito de Circulação Natural para o RELAP5

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	SNGLJUN TMDPVOL
Contenção	500	TMDPVOL

As Figuras 6 a 10 apresentam os resultados obtidos da simulação teórica e experimental, para o escoamento monofásico no Circuito de Circulação Natural.

A Figura 6 mostra a evolução das temperaturas na perna quente e na saída do lado primário do trocador de calor, para a simulação teórica e experimental, onde se observa o comportamento oscilatório inicial das temperaturas, devido à diminuição da transferência de calor devido ao início da ebulição.

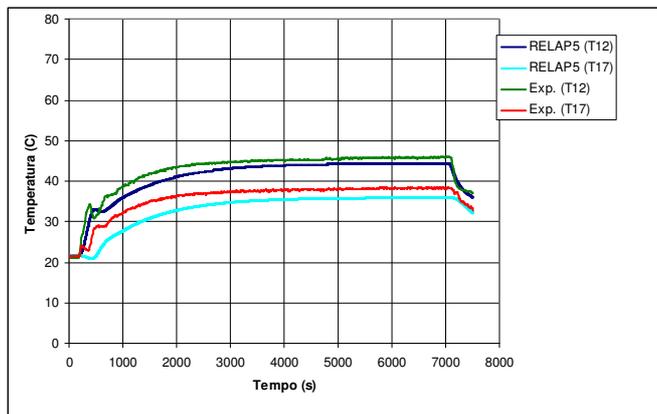


Figura 6. Evolução teórico/experimental das temperaturas nos pontos T12 e T17, para o escoamento monofásico

A Figura 7 apresenta a evolução da temperatura teórico/experimental para o termopar localizado na parede da perna quente.

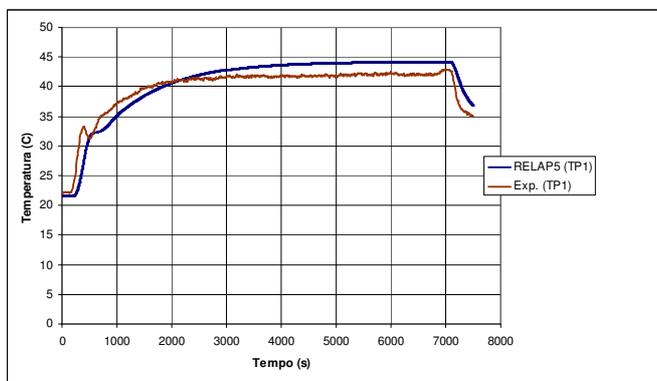


Figura 7. Evolução teórico/experimental da temperatura na parede da seção aquecida, para o escoamento monofásico

A evolução temporal da vazão mássica no primário, que é obtida apenas por meio da simulação teórica, pode ser vista pela Figura 8.

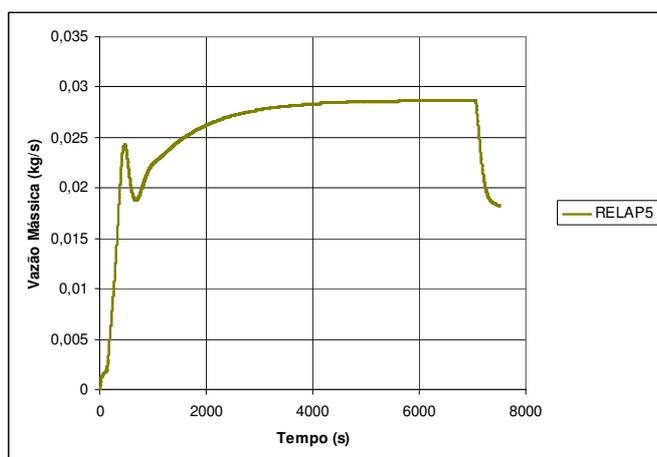


Figura 8. Evolução da vazão mássica no primário obtida com o RELAP5 para o escoamento monofásico

A Figura 9 apresenta a evolução temporal da temperatura na linha de surto do tanque de expansão obtida dos resultados teórico/experimental.

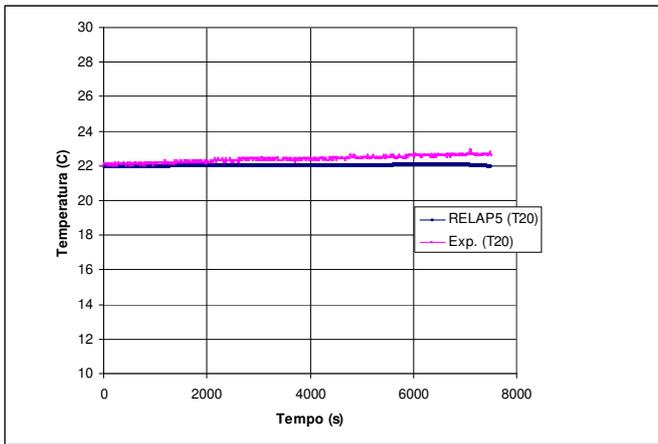


Figura 9. Evolução teórico/experimental da temperatura na linha de surto para o escoamento monofásico

A Figura 10 apresenta os resultados teórico/experimental da evolução temporal da pressão no primário.

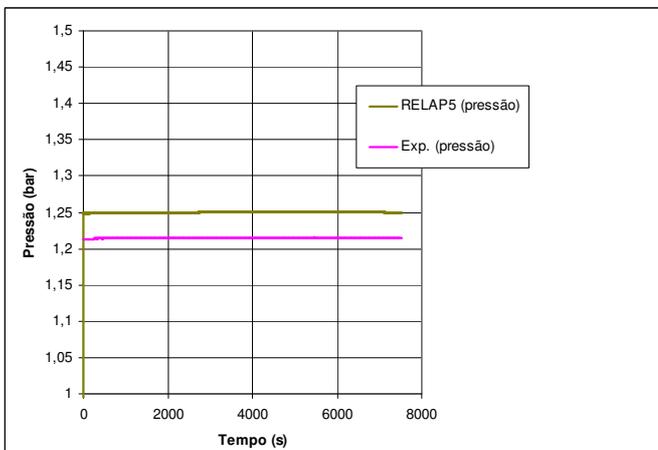


Figura 10. Evolução teórico/experimental da pressão no circuito primário para o escoamento monofásico

As Figuras 11 a 16 mostram os resultados obtidos da simulação teórica e experimental, na condição bifásica.

A Fig. 11 mostra a simulação teórico/experimental do comportamento das temperaturas na perna quente e na saída do lado primário do trocador de calor, onde se observa o comportamento oscilatório das temperaturas que é devido ao escoamento bifásico. Observa-se também que os resultados teóricos estão dentro da média dos experimentais.

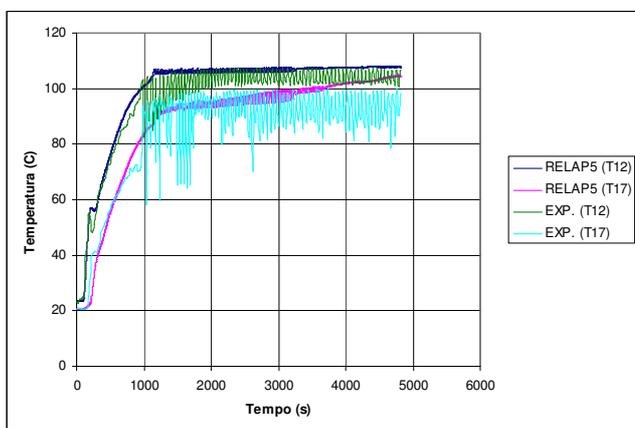


Figura 11. Evolução das temperaturas teórico/experimental do termopar T12 para o escoamento bifásico

A Fig. 12 apresenta a evolução das temperaturas teórico/experimental na seção aquecida, cujos resultados teóricos superestimaram os experimentais.

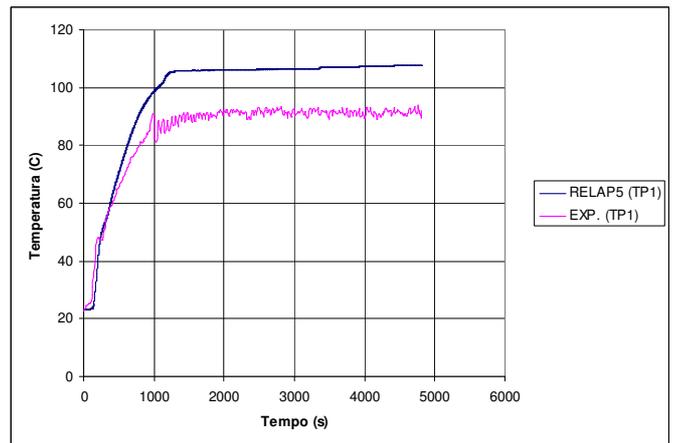


Figura 12. Evolução teórico/experimental da temperatura na parede da seção aquecida, para o escoamento bifásico

A evolução temporal da vazão mássica no primário, que é obtida apenas por meio da simulação teórica, pode ser vista pela Figura 13, onde se observa o comportamento oscilatório da vazão que é característico no escoamento bifásico.

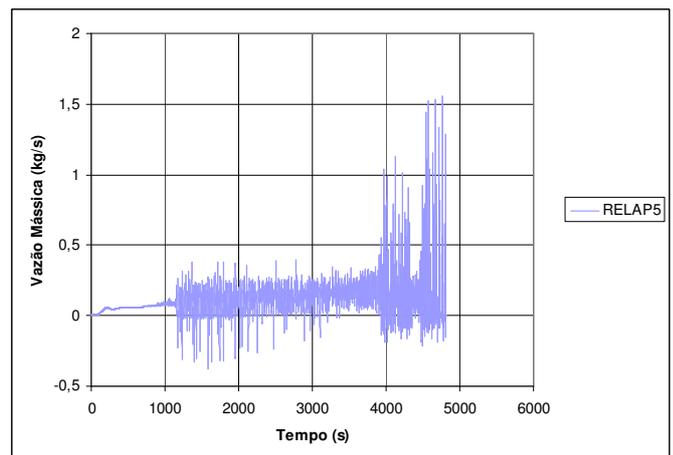


Figura 13. Evolução da vazão mássica no primário obtida com o RELAP5 para o escoamento bifásico

A evolução temporal da fração de vazio na saída do aquecedor, obtida da simulação teórica com o RELAP5, pode ser vista na Figura 14, onde se verifica claramente o escoamento bifásico.

A Figura 15 apresenta a evolução temporal da temperatura na linha de suro do tanque de expansão obtida dos resultados teórico/experimental, para o caso bifásico.

A Figura 16 apresenta os resultados teórico/experimental da evolução temporal da pressão no primário.

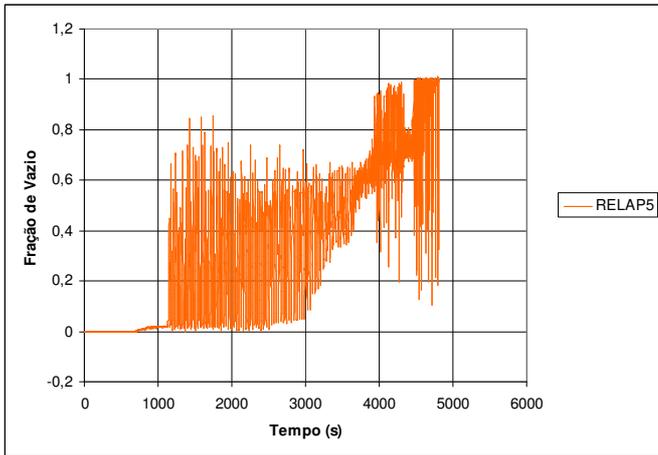


Figura 14. Evolução da fração de vazio no primário obtida com o RELAP5 para o escoamento bifásico

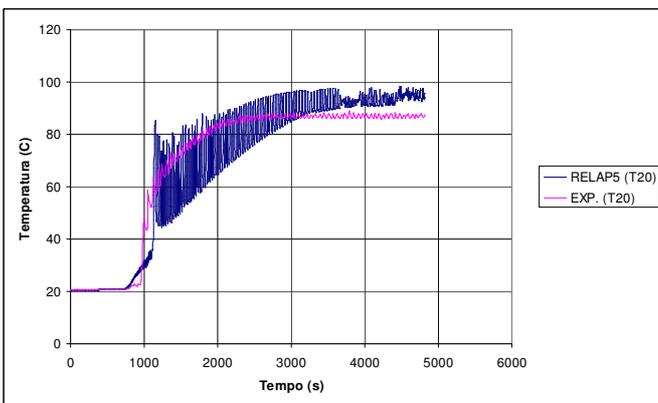


Figura 15. Evolução teórico/experimental da temperatura na linha de surto para o escoamento bifásico

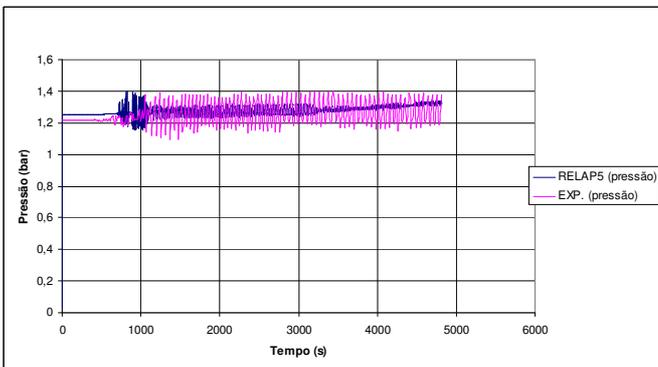


Figura 16. Evolução teórico/experimental da pressão no circuito primário para o escoamento monofásico

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

Para caracterizar melhor os resultados teóricos seriam necessários: testes de sensibilidade dos modelos existentes no RELAP5; teste de diferentes nodalizações do circuito e introdução das tabelas de propriedades dos materiais em função da temperatura.

CONCLUSÕES

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 tiveram uma boa concordância com os resultados experimentais tanto qualitativamente como quantitativamente, para o escoamento monofásico e bifásico. O erro obtido com o RELAP5 de modo geral está abaixo de 10%.

Como continuidade deste trabalho serão realizados testes teóricos com objetivo de melhorar os resultados e diminuir os erros.

O Circuito de Circulação Natural encontra-se a disposição para futuras parcerias com outras instituições.

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] 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/EXPERIMENTAL ANALYSIS FOR THE NATURAL CIRCULATION PHENOMENON

Gaianê Sabundjian*, Thadeu N. Conti*, Walmir M. Torres*, Luiz A. Macedo*, Delvonei A. Andrade*, Pedro E. Umbehaun*, Roberto N. Mesquita*, Mauro F. Silva Filho*, Francisco A. Braz Filho^o e Eduardo M. Borges^o

* 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, fbraz@ieav.cta.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 theoretical results showed satisfactory when compared with the experimental results.