

Simulação e Análise do Fenômeno de Circulação Natural Monofásica e Bifásica no Circuito Experimental Instalado na Engenharia Química POLI – USP, com o Código RELAP5

**Delvonei A. de Andrade¹, Gaianê Sabundjian¹, Pedro E. Umbehaun¹,
Walmir M. Torres¹, Antonio Belchior Jr.², Ricardo T. V. da Rocha²
Thiago Daniel Jorge Fernandes³ e Alexandre Dervazi Carvalho³**

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

delvonei@ipen.br, gdjian@ipen.br, umbehaun@ipen.br, wmtorres@ipen.br

² Centro Tecnológico da Marinha – CTM-SP
Av. Professor Lineu Prestes 2242
05508-000 São Paulo, SP

³ Escola Politécnica POLI -USP
Av. Professor Lineu Prestes 2242
05508-000 São Paulo, SP

thiago.fernandes@poli.usp.br, alexandre.carvalho@poli.usp.br

RESUMO

O objetivo deste trabalho consiste em estudar o fenômeno da circulação natural 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, houve um crescente interesse na comunidade científica pelo estudo desse fenômeno. Para promover esse estudo, foram realizadas a modelagem e a simulação de um sistema de circulação natural. O circuito experimental, descrito neste documento, foi montado no Departamento de Engenharia Química da Escola Politécnica da USP com o objetivo de gerar informações para uma melhor compreensão do fenômeno de circulação natural monofásica e bifásica. Inicialmente é realizado o experimento monofásico, ou seja, com as seguintes condições: baixos níveis de potência dissipada no aquecedor e de vazão de água de resfriamento no circuito secundário. Esses resultados darão origem a um banco de dados para validar, futuramente, alguns programas computacionais de termo-hidráulica. Para que sejam realizados os estudos fenomenológicos propostos é necessário que a bancada de circulação natural citada acima fosse colocada operante e estabelecido o regime permanente.

1. INTRODUÇÃO

A circulação natural em reatores nucleares 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 chamado termossifão, 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 termossifão 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 [1-4].

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.

2. CIRCUITO DE CIRCULAÇÃO NATURAL

O circuito experimental, descrito neste documento, 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 [5]. 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 realizados:

- Manutenção e remontagem da bancada;
- Instalação dos termopares para leitura dos dados;
- Desenvolvimento de software em LabView para aquisição e tratamento dos dados.

Estes passos serão apresentados de forma sucinta a seguir.

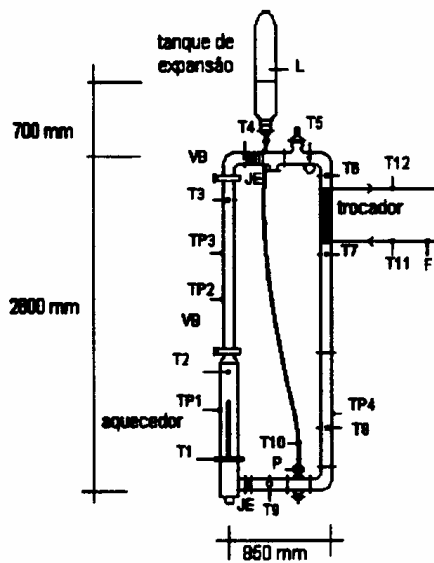
2.1. Descrição do Circuito

O circuito experimental é um retângulo formado por tubos e equipamentos em vidro Pyrex da Corning, 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 circuito a uma pressão próxima 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 da bancada.



(a)

(b)

Figura 1. Esquema usado na bancada de circulação natural e a direita vista lateral da bancada

Inicialmente, a bancada apresentava alguns problemas que tiveram de ser sanados gradativamente. Após esses reparos, iniciamos a elaboração do software para coleta de dados através do sistema de aquisição. O software foi desenvolvido pelo pacote da National Instruments LabView 6.0 [6], Fig. 2, pois esse possui recursos adequados para a instrumentação além de oferecer interface simples e confiável. O programa possui um conjunto de seletores de canais que associam um determinado canal a um termopar ou medidor de nível ou medidor de pressão, possui gráfico e indicadores para mostrar o valor coletado e um sistema para gravar os dados obtidos em arquivo.

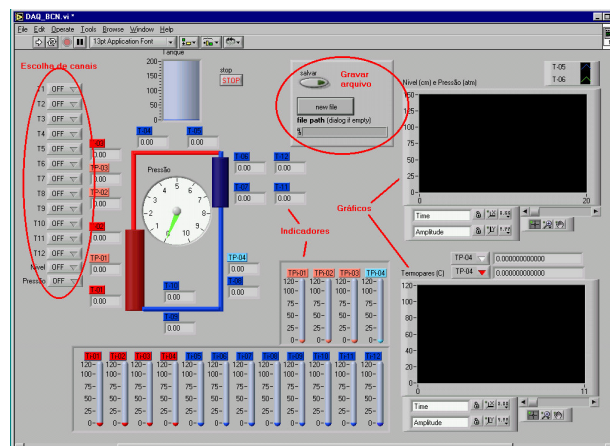


Figura 2. Interface de aquisição

O software recebe e trata os dados provenientes do sistema de aquisição, a partir disso foram realizadas as calibrações dos instrumentos, de modo a garantir a consistência dos dados coletados, os quais ainda necessitam de alguns ajustes.

2.2. Procedimento Experimental

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.

3. MODELAGEM NUMÉRICA COM O CÓDIGO RELAP5/MOD3.3

Neste trabalho é apresentado apenas o experimento realizado em regime monofásico, pois a instrumentação apresentou alguns problemas quando do escoamento bifásico e necessita ser devidamente adequada. Portanto foi possível estabelecer uma rotina para compreender o comportamento do sistema, em regime de circulação natural monofásico, bem como, gerar dados para a validação do código RELAP5 [7], em regime permanente. 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. No entanto, são apresentados apenas os resultados teórico e experimental para o escoamento monofásico, pois o sistema de aquisição de dados para o escoamento bifásico necessita ser devidamente calibrado.

3.1. Código RELAP5

O RELAP5/MOD3.3 tem a capacidade de simular : um acidente 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. Esse código computacional possui um modelo de sete equações de conservação, sendo três para cada uma das fases (líquido e vapor) e uma equação adicional para gases não condensáveis, e finalmente uma equação adicional para o tratamento do boro solúvel. Além dos dados geométricos da Planta, que fazem parte dos dados de entrada do código RELAP5, devem-se representar também as estruturas de troca de calor entre dois ou mais componentes ou com o ambiente e os dados dos materiais que constituem a Planta.

3.2. Procedimento Teórico e Experimental

A segunda parte do trabalho é o de estudar a fenomenologia da circulação natural em instalações nucleares, por meio das simulações realizadas na bancada experimental. Os resultados obtidos com essas simulações são utilizados para a validação dos modelos que existem dentro do código RELAP5 e também podem ser usados em outros projetos que abordem a mesma fenomenologia. A nodalização proposta para o RELAP5 é apresentada na Fig. 3, onde são obtidos os comportamentos de temperatura e pressão do sistema de circulação natural operando em regime monofásico e bifásico.

3.3. Resultados

Foram realizados alguns ensaios com diferentes níveis de potência, onde não ocorreu mudança de fase em alguns deles e em outros houve formação de vapor.

Até o momento analisamos apenas o regime monofásico de escoamento, pois estamos adquirindo os novos medidores de pressão e nível. Por este motivo são apresentadas apenas as medidas de temperatura ao longo do circuito.

Após realizar a modelagem geométrica do circuito foi utilizado o experimento monofásico para se ajustar os coeficientes de perda de carga e a transferência de calor nas serpentinas e para o meio ambiente. A tabela 1 apresenta a correspondência entre os componentes do código e as respectivas regiões hidráulicas e a Fig. 3 ilustra a nodalização deste circuito em componentes.

As figuras 4, 5 e 6 apresentam os resultados da simulação com o RELAP5 do circuito de circulação natural em regime monofásico, bem como os resultados experimentais obtidos do mesmo.

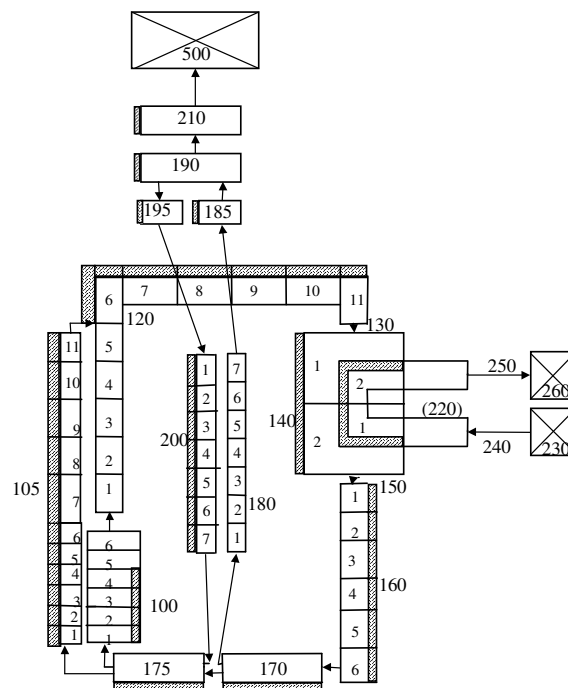


Figura 3. Nodalização do Circuito de Circulação Natural para o RELAP5

Conforme pode ser observado, em geral, os valores calculados estão em concordância com os resultados experimentais. Devido à dúvida na posição exata do termopar T6, assumiu-se que ele esteja na junção entre a tubulação horizontal e a entrada do trocador de calor. Dessa forma, o valor de T6 na Fig. 5 foi calculado como a média aritmética entre as temperaturas do volume 130-11 e 140-01 da nodalização. As discrepâncias observadas nas temperaturas da parede (Fig. 6) não foram completamente compreendidas, já que nos parece lógico que os resultados apresentassem o comportamento previsto pelo código.

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

Trecho do Circuito	Nº do Comp.	Tipo de Componente
Aquecedor	100	PIPE
Perna Quente	120	PIPE
Primário do Trocador de Calor	140	PIPE
Perna Fria	160	PIPE
	170	BRANCH
	180	SINGVOL
Linha de Surto	200	PIPE
Tanque de Expansão	210	PIPE
Secundário do Trocador de Calor	220	PIPE
Água de Resfriamento (Entrada)	230	TMDPVOL
	240	TMDPJUN
Água de Resfriamento (Saída)	250	SINGLJUN
	260	TMDPVOL
Contenção	500	TMDPVOL

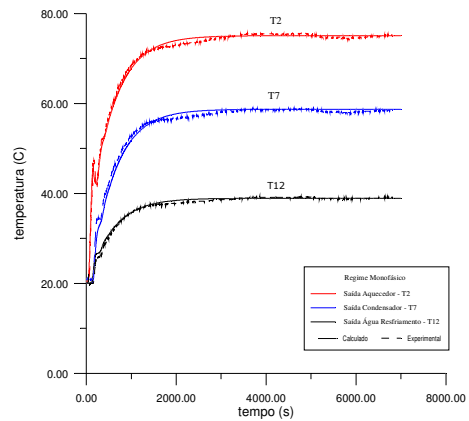


Figura 4. Evolução das temperaturas dos termopares T2, T7 e T12 no experimento monofásico

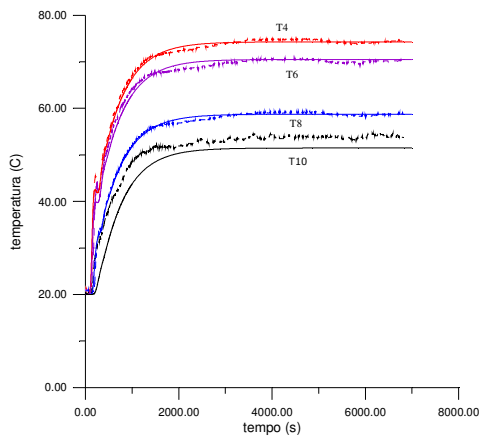


Figura 5. Evolução das temperaturas dos termopares T4, T6, T8 e T10 no experimento monofásico

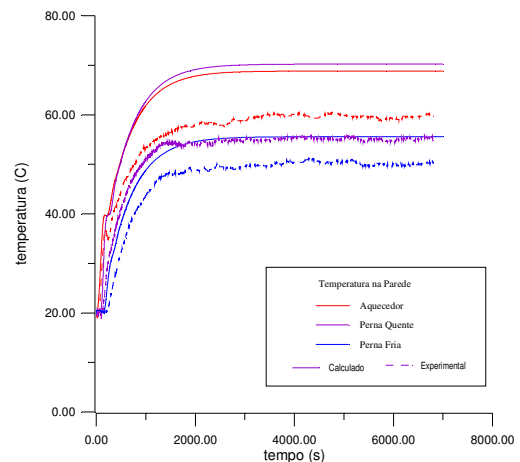


Figura 6. Evolução das temperaturas dos termopares TP1, TP3 e TP4 no experimento monofásico

4. CONCLUSÕES

Uma boa concordância entre os resultados experimentais e calculados foi obtida para o regime permanente. Embora, fosse possível simular teoricamente o escoamento bifásico, com o RELAP5, o mesmo não pode ser realizado com sucesso experimentalmente, pois o sistema de aquisição de dados apresentou problemas que estão sendo solucionados.

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 através da aquisição de medidores de pressão, vazão e nível, para a bancada de Circulação Natural.

REFERÊNCIAS

1. J. L. Bastos e R. T. V. Rocha, “Desenvolvimento de um Programa para a Modelagem do Fenômeno de Circulação Natural em Reatores Nucleares”, *IV General Congress on Nuclear Energy*, p. 107-111, Abril (1992).
2. M. B. Lavrador, “Análise Experimental de Circulação Natural em um Circuito Fechado”, Dissertação (Mestrado), Jan. (1994).
3. J. L. F. Bastos e L. V. Loureiro, “Experimental Transient Analysis of Natural Circulation in a Complex Geometry, Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics”, P. 801-806, (1994).
4. J. L. F. Bastos e W. M. Torres, “Transient Analysis of Natural Circulation in Parallel Loops”, *ENCIT 94*, Rio de Janeiro (1994).
5. “Tema Especial de Termo-Hidráulica”, XI Encontro Nacional de Física de Reatores e Termo-hidráulica ENFIR, Poços de Caldas, MG, 18-22 Agosto (1997).
6. “LabView 6.0, software Measurement & Automation” disponível em: <http://aer.ual.es/CursoLabview/cursolabview01.htm>, (2005).
7. The RELAP5 Development Team, “RELAP5/MOD3 Code Manual, NUREG/CR-5535 Report, vols. 1-5”, Idaho National Engineering Laboratory, August (1995).