

ANÁLISE TRANSITÓRIA DE UM CIRCUITO FECHADO EM REGIME DE CIRCULAÇÃO NATURAL MONOFÁSICA

Marcelo de Bastos Lavrador, Pedro Carajilescov, Carlos Valois Maciel Braga
DEM-PUC/RIO

Ricardo Takeshi Vieira da Rocha, José Luis Ferraz Bastos
IPEN-COPEP/SP

RESUMO

O presente trabalho apresenta um estudo sobre o comportamento transitório de um circuito fechado, de geometria retangular em regime de circulação natural. A análise teórica consiste no desenvolvimento de um modelo numérico unidimensional, baseado no método dos volumes de controle. Os dados experimentais foram obtidos em um aparato experimental contendo uma fonte quente na parte inferior e uma fonte fria na parte superior. Um comportamento oscilatório amortecido foi observado tanto para as vazões quanto para as temperaturas das pernas quente e fria. Os resultados apresentam concordância satisfatória.

INTRODUÇÃO

Reatores nucleares, refrigerados e moderados a água leve, representam a tecnologia dominante para a geração elétrica em grande escala. No entanto, os graves acidentes ocorridos nas usinas de Three Mile Island (1979) e de Chernobyl (1986) demonstraram a existência de vulnerabilidade nos sistemas de segurança utilizados nas usinas atuais. Desta forma, a próxima geração de reatores deverá ser de reatores avançados, cujo conceito se fundamenta em princípios de projeto tais como simplicidade, margens de projeto substanciais e utilização de sistemas passivos de segurança que sejam independentes de mecanismos complexos e de interferência humana para funcionarem.

Em situações acidentais, um dos mais graves problemas consiste na remoção do calor residual do núcleo, gerado pelo decaimento radioativo dos produtos de fissão. Para a remoção deste calor, a circulação natural que eventualmente se estabelecerá no circuito primário, conforme mostrado na Figura 1, vem sendo analisada para o estabelecimento de sua viabilidade.

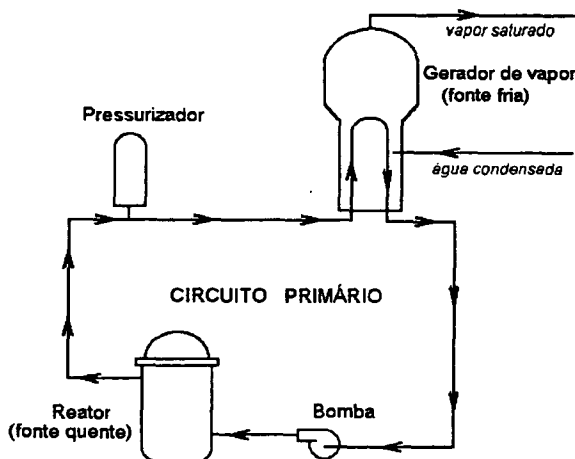


Figura 1. Planta esquemática do circuito primário de um reator PWR

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A técnica de análise de circulação natural, em termosifões tem se concentrado, na sua grande maioria, em modelos unidimensionais, com a hipótese de que a massa específica do fluido de trabalho, em regime monofásico, é constante nas equações de balanço, exceto nos termos associados com o cálculo da diferença de pressão hidrostática, hipótese esta conhecida como *aproximação de Boussinesq*.

Zvirin [1] propõe um modelo analítico válido para o regime permanente e para transitórios lentos contemplando inclusive configurações com circuitos em paralelo. O aparato experimental utilizado para a validação do modelo é composto por uma fonte quente e dois trocadores bitubulares idênticos como fonte fria. As diferenças obtidas entre experimento e modelo são da ordem de 30%.

Huang e Zelaya [2] analisam o comportamento em regime transitório e permanente de um termosifão de geometria retangular. Observou-se um comportamento oscilatório amortecido das temperaturas para todos os casos analisados. Com o auxílio de um modelo numérico unidimensional são estimadas as velocidades e temperaturas ao longo do tempo. O coeficiente de global de troca, utilizado no modelo, é obtido experimentalmente e uma boa concordância é observada para o a região próxima ao regime permanente.

Em [3] Bernier e Baliga propõem um modelo numérico onde, globalmente, o fenômeno de circulação natural é tratado unidimensionalmente. Porém, em regiões específicas do circuito onde efeitos multi dimensionais são observados, um tratamento numérico bidimensional é empregado. Este tratamento possibilita a redução dos erros cometidos na estimativa das perdas de carga e coeficientes de troca de calor nas regiões onde, devido às forças de Boussinesq, os perfis de velocidades e temperaturas se afastam da forma típica dos perfis de regime plenamente desenvolvido.

Desde meados da década de 80, a comunidade científica internacional se dedica à compreensão do fenômeno e à modelagem de sistemas operando em regime de circulação natural. No Brasil, o tema tem sido pouco estudado e apenas recentemente alguns trabalhos foram desenvolvidos. Botelho [4] apresenta um modelo bi-dimensional para o escoamento de vapor no vaso de um PWR. É simulado pelo método dos volumes finitos o problema de convecção natural pressupondo-se uma condição de acidente severo no reator. Em [5], Botelho apresenta uma proposta para um experimento em escala reduzida visando a remoção de calor residual em reatores PWR.

No presente trabalho, é desenvolvido um modelo de simulação de circulação natural em circuitos fechados, seguindo a tendência geral de tratamento unidimensional. A comparação é feita com dados experimentais obtidos em um circuito retangular, com escoamento monofásico.

MODELO MATEMÁTICO

O modelo matemático desenvolvido é baseado numa formulação unidimensional das equações de conservação. A dissipação viscosa, a condução axial e as perdas de calor para o meio ambiente são desprezadas. Adota-se a aproximação de Boussinesq para o termo de força de empuxo. As equações de conservação da quantidade de movimento e balanço de energia para o fluido são apresentadas abaixo:

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial \rho v v}{\partial s} = -\frac{\partial p}{\partial s} - \frac{\partial \tau}{\partial s} + \rho g e_s e_s \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial \rho v h}{\partial s} = q''' \quad (2)$$

A equação de balanço de energia para a tubulação, considerando apenas condução de calor na direção radial, tem a forma:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = K \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right] + q''' \quad (3)$$

Correlações para a estimativa das perdas de carga e transferência de calor são necessárias devido a aproximação unidimensional do modelo. Foram implementadas no código computacional correlações encontradas na literatura [6] para a determinação dos coeficientes de película para os regimes de convecção natural e forçada em regime laminar e turbulento. A decisão sobre o regime de transferência de calor é feito com o auxílio do parâmetro adimensional Gr/Re^2 que relaciona a importância dos fenômenos de convecção natural e forçada.

Os fatores de atrito são calculados pela expressão proposta por Churchill [7] válida para todos os regimes de velocidade. Os coeficientes de perda de carga localizados devem ser fornecidos ao programa pelo usuário, com base na geometria a ser simulada.

A equação de conservação de quantidade de movimento é integrada ao longo de todo o circuito, constituindo o chamado "Método do Momento Integral". A equação de balanço de energia é resolvida, tanto para o fluido como para a tubulação, pelo "Método dos Volumes Finitos". Utiliza-se a condição de continuidade de fluxo, na interface sólido-fluido, para cada intervalo de tempo gerando, assim, um processo iterativo entre o cálculo das temperaturas no fluido e na estrutura.

APARATO EXPERIMENTAL

Figura 2 apresenta o circuito utilizado nos experimentos e suas dimensões gerais. A fonte quente consiste de um segmento de tubulação com diâmetro maior do que os tubos da linha, formando uma camisa que abriga as resistências elétricas de aquecimento. O conjunto de resistências é da marca Resiluz, modelo 106 com rosca, com potência nominal máxima de 7,5 kw. Este conjunto é alimentado por um estabilizador Televolt, modelo EVA 10000 (10kVA). A fonte fria consiste, basicamente, de um segmento de tubo, com 60 mm de diâmetro, que envolve um trecho de 70 cm da tubulação do circuito principal, com água de resfriamento escoando, em contracorrente, na região anular formada. Água foi utilizada como fluido de trabalho. Variações de volume da água, devido ao aquecimento, eram

controlados pela presença de um tanque pressurizador, dotado de uma válvula de alívio, ligado à perna quente do circuito.

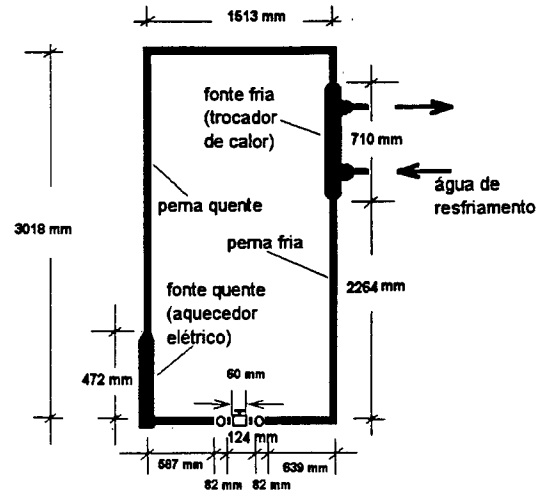


Figura 2 - Dimensões do circuito experimental.

A temperatura da água foi medida por 9 termopares do tipo T (cobre-constantan), localizados nas posições apresentadas na Figura 3. Além destas temperaturas, foram medidas as temperaturas de entrada e saída da água de resfriamento da fonte fria. As leituras foram realizadas por um Datalogger Fluke, modelo 2240B.

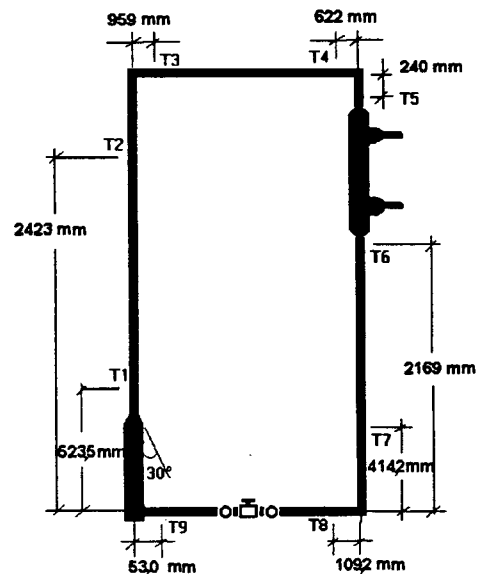


Figura 3 - Posição das tomadas de temperatura.

Todo o circuito foi isolado termicamente por blocos semi-cilíndricos de silicato de cálcio (termosilica), envolvidos por cartolina isolante.

O circuito secundário é composto por duas caixas d'água, uma bomba centrífuga, válvulas para regulagem e isolamento e uma linha de by-pass. Estes elementos visam controlar a vazão da água de resfriamento além de permitir a circulação de água, em regime forçado, pelo circuito primário para a estimativa das perdas de carga no circuito. A Figura 4 mostra o aparato experimental completo com os elementos que compõe o circuito primário e secundário.

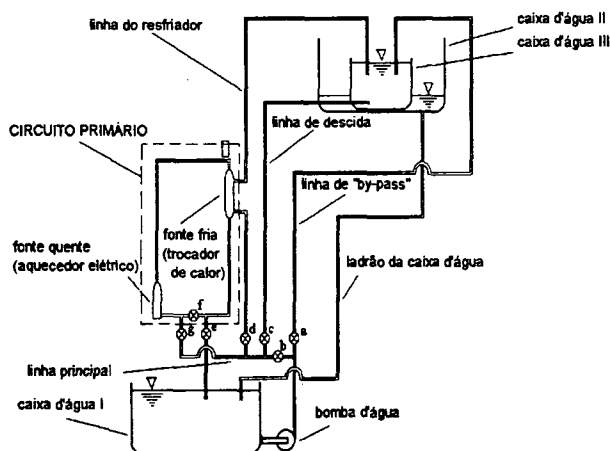


Figura 4 - Circuito Termohidráulico

RESULTADOS

Os resultados teóricos e experimentais foram comparados para dois casos operacionais típicos. No primeiro caso, potência é fornecida às resistências a partir de uma situação inicial em que a água se encontra estacionária. O segundo caso consiste na aplicação de um degrau de potência, após um período inicial de operação a uma potência inferior.

A divisão nodal do modelo para os circuitos primário e secundário é apresentada na Figura 5. O circuito primário é representado por 70 nós sendo 35 nós fluidos e 35 nós de tubulação. A região do aquecedor foi subdividida em 10 fatias de tamanhos iguais. As resistências elétricas não possuem representação física no modelo sendo o fluxo de calor dissipado, imposto diretamente sobre as paredes da tubulação. A região do trocador de calor é representada por 40 nós sendo 10 nós fluidos do lado do circuito primário e 10 nós fluidos para a água de resfriamento. Os 20 nós restantes representam as paredes das tubulações interna e externa.

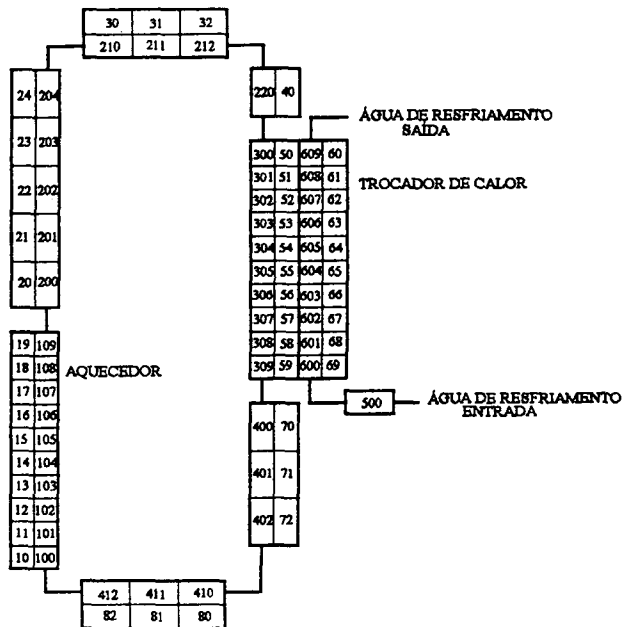


Figura 5 - Divisão Nodal

Caso 1. Aquecimento a partir do repouso

Inicialmente, a água se encontra em equilíbrio térmico com o meio a uma temperatura de 24°C. Para uma vazão da água de resfriamento de 0,5 kg/s, impõe-se a dissipação de uma potência de 1100 W nas resistências elétricas. Nestas condições, as temperaturas são lidas a cada 4 s, a partir do instante inicial. A Figura 6 mostra a comparação entre os resultados experimentais e numéricos para as temperaturas de perna quente e fria.

Temperatura de Perna Quente

Observa-se uma região oscilatória inicial e, em seguida, uma tendência de estabilização da temperatura. Os dois primeiros picos de temperatura são bem capturados pelo modelo sendo que os gradientes experimentais são ligeiramente superiores. No modelo, os picos de temperatura apresentam um atraso de aproximadamente 10 s. Após este transitório inicial, não há discrepância perceptível entre experimento e modelo.

Temperatura de Perna Fria

Nos 150 s iniciais a temperatura permanece constante devido ao tempo em que o fluido leva para se deslocar do aquecedor até a saída do trocador (tempo par T7). Em seguida, nota-se uma elevação da temperatura e, de forma amortecida, detectam-se os picos de temperaturas também observados na perna quente. O modelo reproduz satisfatoriamente o comportamento desta temperatura sem, no entanto detectar os picos de temperatura. As diferenças encontradas são da ordem de 2°C, na região inicial, e inferior a 1°C no final da simulação.

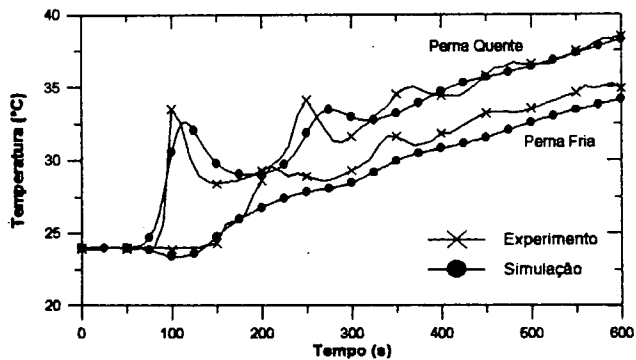


Figura 6. - Comparação Experimento / Modelo - Caso 1

Caso 2. Aplicação de degrau de potência

Neste caso, após 10 min de operação a uma potência de 1100 W, a partir do repouso, a potência é variada para 2200 W. A vazão da água de resfriamento é de 1,0 kg/s e as temperaturas são lidas a cada 10 s, a partir do início do transitório. Figura 7 apresenta a evolução das temperaturas.

Temperatura de Perna Quente

Nota-se uma região oscilatória amortecida nos primeiros 10 min, seguida por uma segunda região oscilatória devido a elevação do fluxo de calor. Para os dois níveis de potência o modelo comporta-se satisfatoriamente. Uma defasagem de 10 s entre os picos de temperatura experimentais e numérico é observado.

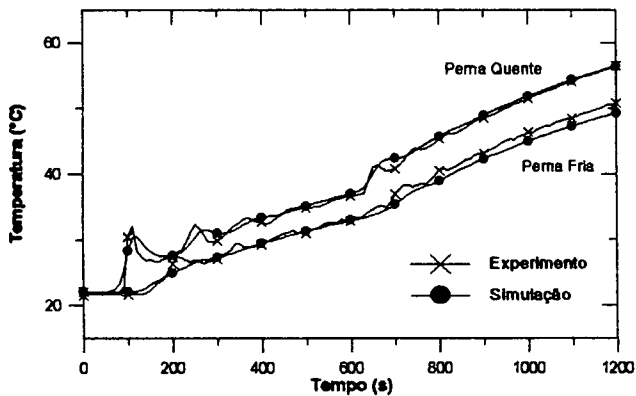


Figura 7. - Comparação Experimento / Modelo - Caso 2

Temperatura de Perna fria

A curva de temperatura da perna fria é composta, inicialmente, por uma região onde a temperatura permanece constante, uma segunda região com um comportamento oscilatório amortecido e uma terceira, onde novas oscilações são observadas devido à variação do fluxo de calor. Aqui, também, pode-se considerar como satisfatório o comportamento do modelo embora as oscilações sejam menos pronunciadas.

Figura 8 apresenta, para este segundo caso, a evolução da vazão e a diferença de temperatura entre as pernas quente e fria obtidas pelo modelo. Esta figura permite a compreensão do fenômeno de

circulação natural em regime transitório que busca um equilíbrio entre forças de empuxo e forças viscosas, conforme segue.

A medida que a diferença de temperatura entre as pernas quente e fria aumenta, aumenta a força de empuxo a qual é proporcional à diferença de peso entre as colunas quente e fria. O aumento da força de empuxo provoca um aumento na vazão e, conseqüentemente, aumenta-se a força viscosa, proporcional ao número de Reynolds. Uma vazão maior provoca uma transferência de calor maior entre circuito primário e secundário e reduz-se, conseqüentemente, a diferença de temperatura entre pernas quente e fria. Desta maneira, o sistema busca um equilíbrio entre estas forças que se opõem apresentando, de forma geral, um comportamento oscilatório amortecido.

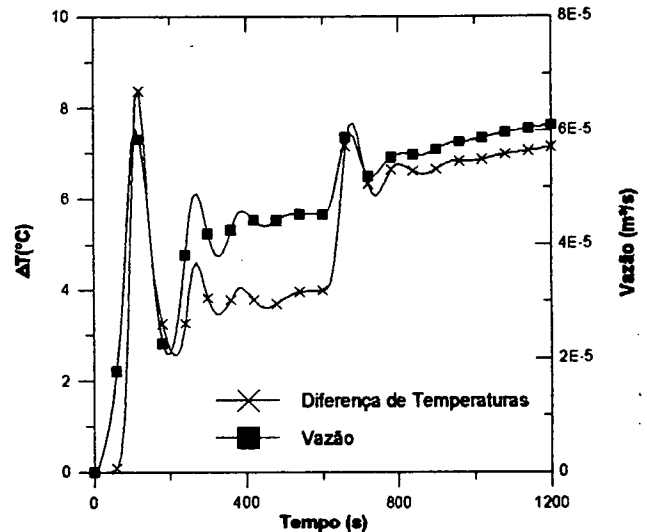


Figura 8 - ΔT e Vazão no Circuito Primário

CONCLUSOES

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um modelo unidimensional de tratamento de circulação natural em circuitos fechados e a obtenção de dados experimentais para a sua validação. Os resultados obtidos pelo modelo podem ser considerados satisfatórios. Diferenças observadas entre os valores experimentais e teóricos se encontram dentro de níveis admissíveis, podendo ser atribuídas ao fato de não se levar em consideração, na análise teórica, da condução de calor axial, ao longo das paredes da tubulação do circuito. Como a tubulação é de cobre, sua temperatura tende a se homogeneizar, removendo calor da água, nas regiões mais quentes, e devolvendo este calor, nas regiões mais frias. Além disso, este processo de troca de calor com as paredes provoca o surgimento de perfis de temperatura no fluido, fazendo com que a leitura do termopar não represente a temperatura de mistura do fluido, naquela posição.

AGRADECIMENTOS

Os autores Lavrador, Carajilescov e Braga agradecem o apoio financeiro e material da COPESP - Coordenadoria de Projetos Especiais - do Ministério da Marinha para a realização da parte experimental deste trabalho

REFERÊNCIAS

- [1] Zvirin, Y et alii., *Experimental and Analytical Investigation of a Natural Circulation System with Parallel Loops*. *Journal of Heat Transfer*, November 1981, Vol. 103 p. 645-652
- [2] Huang, B. J; Zelaya, R., *Heat Transfer Behavior of a Rectangular Thermosyphon Loop*. *Journal of Heat Transfer*, May 1988, Vol. 110 p. 487-493
- [3] Bernier, M. A.; Baliga, B. R., *A 1-D/2-D Model and Experimental results for a close loop thermosyphon with vertical heat transfer*. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1992, Vol. 35, No 11, p 2969-2982
- [4] Botelho, D. A.; Moreira, M. L., *O Fenômeno de Circulação Natural na Análise de Acidentes Severos em Reatores Nucleares*, CGEN 1992, Vol 1. p. 7-11
- [5] Botelho, D. A., *Dimensionamento de Circuitos Termohidráulicos em Escala Reduzida para Estudos de Circulação Natural em Reatores PWR*. IX ENFIR 1993, p. 280-285.
- [6] *RELAPS/MOD2 Models And Correlations*. NUREG/CR-5194 EGG-2531, 1988.
- [7] Churchill, S. W. *Fricion-factor equation spans all fluid-flow regimes*. *Chemical Engineering*, November 1977, p 91-92.

ABSTRACT

The present work presents a theoretical and experimental study about the transient behavior of a closed rectangular loop, operating in the natural circulation regime. The theoretical analysis consists in the development of an one-dimensional numerical model, based on the control volume method, in order to obtain the temperature distribution in loop and the fluid flow rate. The model was compared to the experimental data obtained in an experimental (3.0 m x 1.5 m) rectangular loop with 1 1/4" diameter copper piping. The loop has a heat source at the bottom and a heat sink at the top. A damped oscillatory behavior was observed for the flow rate as well as for the mixed mean temperatures of the cold and hot legs. The theoretical and experimental results show a good agreement.