

## CONTROLE DE SISTEMAS PASSIVOS EM CIRCULAÇÃO NATURAL POR MEIO DE LINHAS DE DESVIO

Benedito Dias Baptista Filho e Luiz Alberto Macedo

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP  
Av. Lineu Prestes 2.242 – Cidade Universitária  
05508-000 São Paulo, SP, Brasil

## RESUMO

Este trabalho apresenta resultados de uma pesquisa sobre o uso de linhas de desvio para controle de temperatura em reatores resfriados por sistemas de resfriamento de emergência operando em circulação natural. São apresentados resultados obtidos em um circuito denominado "Bancada de Circulação Natural," que permite a simulação da abertura de uma linha de desvio entre a fonte quente e a fonte fria. Uma parte dos resultados experimentais foi utilizada para ajuste e validação de um modelo numérico, cujos resultados preliminares são discutidos. A introdução de válvulas em linhas de desvio possibilita algum controle da temperatura na saída da fonte quente sem a introdução de componentes ativos na linha principal e assegurando operação do sistema mesmo em caso de falha de atuação, sendo por isso interessante para aplicação em sistemas dos reatores das novas gerações. Os resultados permitem observar que quando é aberta a linha de desvio, a temperatura na saída da fonte quente aumenta. Esse aumento ocorre devido a diminuição da vazão através do aquecedor. A vazão através da fonte fria aumenta ligeiramente. Os resultados permitem ainda observar que a posição da conexão da linha de desvio com a perna quente determina o sentido de escoamento, podendo ocorrer sua inversão a partir de uma determinada cota.

**Keywords:** natural circulation, advanced reactors, passive systems.

## I. INTRODUÇÃO

O futuro da energia nuclear depende de aspectos econômicos, de segurança e de aceitação pública [1]. Pensando nesses aspectos foi iniciado o desenvolvimento dos conceitos de "reatores avançados," para os quais foram previstos aperfeiçoamentos tais como elevada padronização, redução na demanda de controle, redução na demanda de energia elétrica de emergência e utilização de conceitos mais robustos [2]. Em quase todos os conceitos de reatores avançados são adotados sistemas de emergência com características passivas de resfriamento, utilizando o fenômeno da circulação natural.

Dentro desses mesmos objetivos, existe uma linha de pesquisa no Centro de Engenharia Nuclear do IPEN que avalia o uso de linhas de desvio para redução da taxa de resfriamento em reatores resfriados por sistemas passivos de resfriamento de emergência. Os experimentos realizados envolvem transitórios em circulação natural a baixas pressões e potências. Este trabalho complementa informações apresentadas nas referências [3] e [4].

O trabalho é apresentado em cinco seções, a primeira é esta introdução. A segunda seção apresenta uma breve descrição da instalação experimental utilizada e os testes para seu comissionamento. A terceira seção descreve e apresenta os resultados da primeira fase de experimentos e na quarta seção é descrito o modelo numérico desenvolvido

para validação da metodologia de análise do processo de circulação natural. A quinta seção apresenta as conclusões.

## II. DESCRIÇÃO DA BCN

Um esquema do circuito experimental, batizado de "Bancada de Circulação Natural," BCN, é mostrado na Fig. 1. Uma descrição detalhada é encontrada em [2]. O circuito primário consiste de um aquecedor elétrico, um trocador de calor, tubulações, incluindo a linha de desvio, válvulas e instrumentação constituída basicamente de termopares e um medidor magnético de vazão. O resfriamento é realizado por um circuito secundário de água. O trocador de calor é alimentado por gravidade a partir de um reservatório elevado, sendo que sua vazão é regulada por uma válvula globo e medida por um rotâmetro. A Fig.1 indica ainda a representação das principais variáveis do processo. A vazão no circuito externo, aquecedor elétrico, perna quente, trocador de calor e perna fria, é indicada por  $m$ . A abertura e fechamento da linha de desvio 1, conexão inferior, e da linha de desvio 2, conexão superior, se dão por meio da válvula de desvio, da válvula esfera B e da válvula esfera A, respectivamente. Na linha de desvio 1 a vazão é definida por  $m_{d1}$  e na linha de desvio 2 por  $m_{d2}$ .

A tubulação é de cobre com 22 mm de diâmetro e 0,6 mm de espessura. Todo o sistema possui isolamento

térmico. Para reduzir as restrições ao escoamento foram utilizadas válvulas tipo esfera nas linhas principais do circuito. Na linha de desvio foi instalada uma válvula tipo esfera com atuador elétrico tipo aço: abre/fecha. O medidor de vazão é do tipo magnético, marca Sparling TIGERMAG, modelo FM 625 com diâmetro 1/2 pol. e ajustado para a faixa de vazão máxima de 0,1 kg/s.

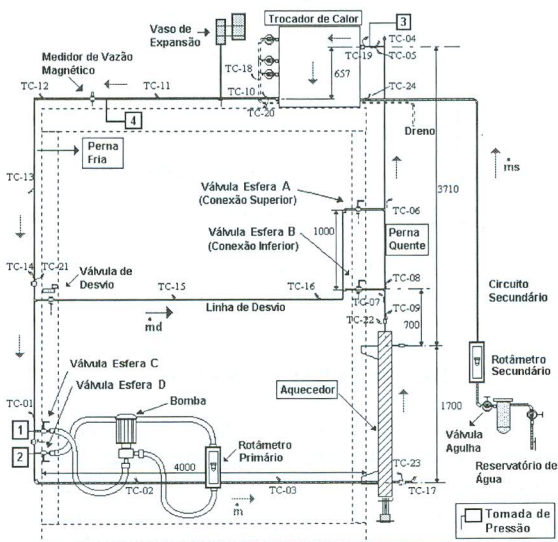


Figura 1. Bancada de Circulação Natural.

O aquecedor elétrico é do tipo passagem direta. Foi construído com tubos e conexões de aço inoxidável e é equipado com três resistências de imersão em "U" com flange, elementos tubulares blindados em aço inoxidável e termostato de segurança. O aquecedor elétrico, embora projetado para 10.000 W, teve sua potência fornecida ao sistema limitada a 2.400 W nesta fase inicial de testes, para evitar danos às resistências elétricas. O trocador de calor foi construído totalmente em cobre. É constituído por 2 tubulões de  $\phi$  1 3/4 pol., interligados por 18 tubos de  $\phi$  3/8 pol. e 590 mm de comprimento. O vaso de expansão tem por finalidade acomodar as variações de volume da água no circuito primário da bancada devido a variação de temperatura. No circuito foram instalados 24 termopares, sendo 5 do tipo T de 1,5 mm e 19 do tipo K de 0,5 mm de diâmetro. Um sistema de aquisição de dados foi preparado em uma plataforma PC, utilizando-se uma placa de aquisição de dados da National Instruments e um programa baseado no ambiente de programação LabWindows [5], [6]. O sistema exibe e registra os dados de 5 termopares tipo T, 19 termopares tipo K, medidor de vazão magnético e potência do aquecedor, gerado por um sinal do controlador de potência.

Antes de se iniciarem os experimentos em circulação natural, foram desenvolvidas quatro atividades de comissionamento: calibração dos rotâmetros, calibração de potência elétrica, calibração do medidor de vazão magnético e caracterização hidráulica do circuito.

**Calibração dos Rotâmetros.** Para assegurar medidas precisas durante a caracterização hidráulica da bancada, na calibração do sistema de medida de potência e na calibração do

medidor de vazão magnético, foi feita uma cuidadosa calibração dos rotâmetros. A Fig. 2 ilustra os resultados para o rotâmetro auxiliar utilizado no circuito primário.

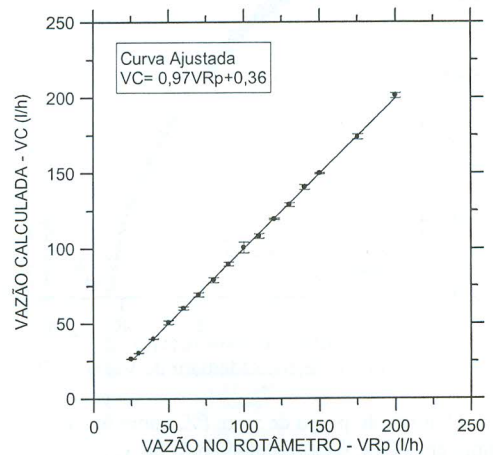


Figura 2. Curva de Calibração do Rotâmetro Primário.

**Calibração de Potência Elétrica.** A medida e registro da potência elétrica utilizam um sinal do controlador de potência. A calibração desse sinal foi feita por meio de balanço térmico no aquecedor elétrico. A curva de calibração, mostrada na Fig. 3, teve seus dados ajustados por meio da Eq. (1):

$$P_f = 1.115 - 1.127S + 592S^2 - 90S^3 + 5S^4 \quad (1)$$

Onde  $P_f$  é a potência fornecida e  $S$  o sinal de tensão.

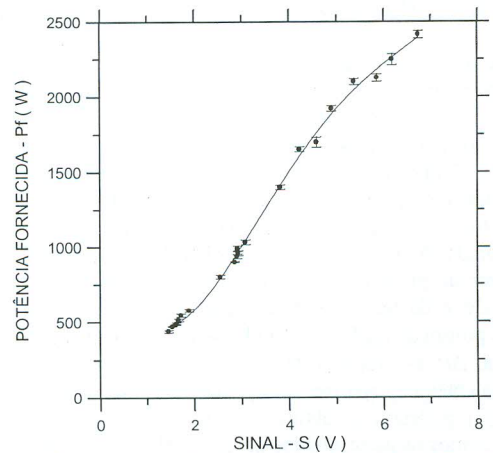


Figura 3. Calibração Potência Fornecida x Sinal Tensão.

**Calibração do Medidor de Vazão Magnético.** O medidor magnético de vazão foi desenvolvido para medidas a temperatura ambiente e constante. Observou-se um desvio (*drift*) do "zero" em função da variação da temperatura. A Fig. 4 mostra essa variação como função da temperatura na tubulação, medida pelo termopar TC11.

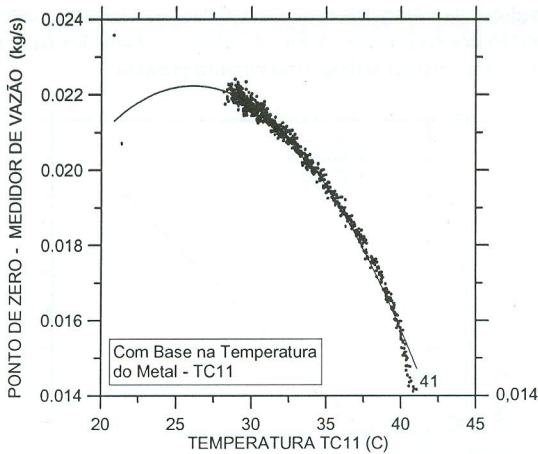


Figura 4. Ponto de Zero do Medidor de Vazão – TC11.

O ajuste do ponto de zero, PZ, como função da temperatura em TC11, é representado pela Eq. (2):

$$PZ = -7,5 \times 10^{-4} + 1,76 \times 10^{-3} T - 3,37 \times 10^{-5} T^2 \quad (2)$$

**Caracterização Hidráulica.** A caracterização hidráulica do circuito primário, necessária para análises e modelos, foi feita circulando-se água em cada trecho onde se queria medir a perda de pressão,  $\Delta P$ , para se determinar coeficientes de perda de pressão ou fatores de atrito. As medidas de  $\Delta P$  foram realizadas com um transmissor de pressão diferencial ajustado para a faixa de 0 a 130 mmH<sub>2</sub>O. Os coeficientes de atrito são obtidos da Eq. (3):

$$\Delta P = f (L_{eq} / D_h) \rho v^2 / 2 \quad (3)$$

onde  $\Delta P$  é a perda de pressão (N/m<sup>2</sup>),  $f$  o fator de atrito,  $L_{eq}$  o comprimento equivalente (m),  $D_h$  o diâmetro hidráulico (m),  $\rho$  a massa específica da água (kg/m<sup>3</sup>) e  $v$  a velocidade de escoamento (m/s).

O fator de atrito na bancada foi determinado experimentalmente para cada trecho selecionado. Para isso a vazão foi variada e medida por meio do rotâmetro primário calibrado. A partir do início da faixa de medição do transmissor de pressão, se iniciavam os registros da perda de pressão e da temperatura da água para determinação das suas propriedades físicas. Conhecida a vazão,  $Q$ , a perda de carga,  $\Delta P$ , as propriedades da água e os comprimentos equivalentes de cada trecho,  $L_{eq}$ , baseados em dados tabelados [7], puderam ser obtidos os valores de fator de atrito. A Fig. 5 mostra os resultados para o trecho externo da BCN na forma de correlação do fator de atrito. Os testes atingem a zona de transição. Na faixa de regime laminar foi obtido um fator de atrito um pouco inferior ao da curva de Hagen-Poiseuille. Na zona de transição ( $Re = 2000$  a  $3000$ ) a curva tende a manter o comportamento esperado, porém atingindo valores superiores aos da curva de Blasius. O fator de atrito é intrínseco à bancada e dependente das características geométricas do circuito [8].

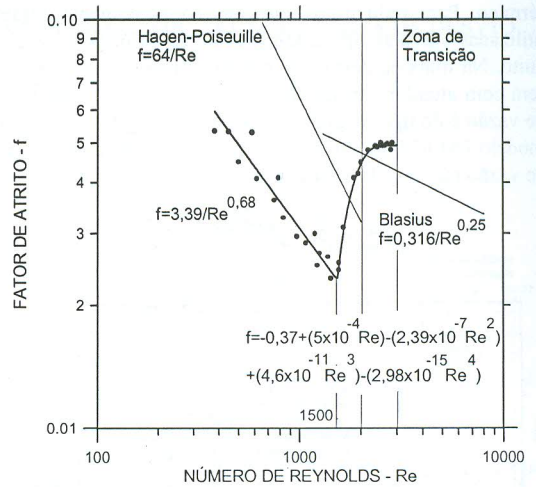


Figura 5. Fator de Atrito ( $f$ ) x Número de Reynolds ( $Re$ ).

### III. CIRCULAÇÃO NATURAL

Os experimentos em circulação natural foram divididos em três etapas. A primeira etapa corresponde ao experimento na parte externa do circuito. A segunda e terceira etapas compreendem os experimentos utilizando as linhas de desvio 1 e 2 (ver Fig.1). As linhas de desvio podem reduzir as taxas de resfriamento do reator, permitindo maior tempo para análise de problemas e religamento e produzem efeito equivalente ao de válvulas de controle, porém sem introduzir elementos ativos no circuito principal.

**Etapa 1 – Circuito Externo.** A Fig. 6 mostra as temperaturas de entrada (TC23), saída (TC22) e média no aquecedor, indicando o regime permanente.

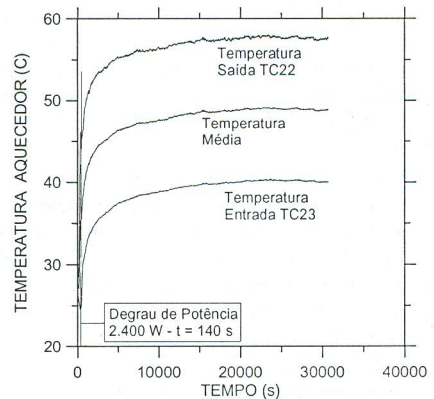


Figura 6. Temperaturas no Aquecedor Elétrico.

O experimento consistiu de um transitório de aumento de potência, partindo-se da condição inicial de fluido estacionário na temperatura ambiente. A válvula de desvio bem como as válvulas esfera A e B estavam fechadas. O degrau de potência foi de aproximadamente 2.400 W e foi aplicado 140 s após iniciada a gravação.

**Etapa 2 – Linha de Desvio 1 – Conexão Inferior.** Nesta etapa, o experimento consistiu da aplicação de dois degraus de potência. O primeiro degrau de potência foi de aproximadamente 1.100 W, aplicado no instante  $t=214$  s. O segundo degrau elevou a potência para aproximadamente 2.400 W e foi aplicado no instante  $t=1.894$  s. No instante  $t=1.354$  s, a válvula de desvio e a válvula de esfera B (ver Fig.1), na linha de desvio, foram abertas. A Fig.7 mostra a vazão no aquecedor elétrico ( $m_{aq1}$ ), a vazão no trocador de calor ( $m_{t1}$ ) e na linha de desvio ( $m_{d1}$ ) até o instante  $t = 20.000$ s.

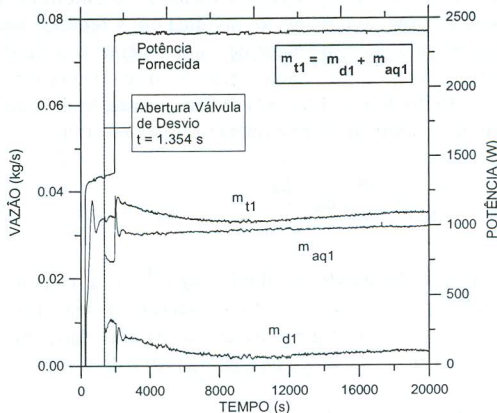


Figura 7. Potência e Vazões no Transitório.

A Fig. 8 mostra a variação de temperatura em TC15 e em TC16. A diferença entre essas temperaturas mostra que a vazão na linha de desvio tem o sentido da “perna fria” para a “perna quente” (ver Fig. 1).

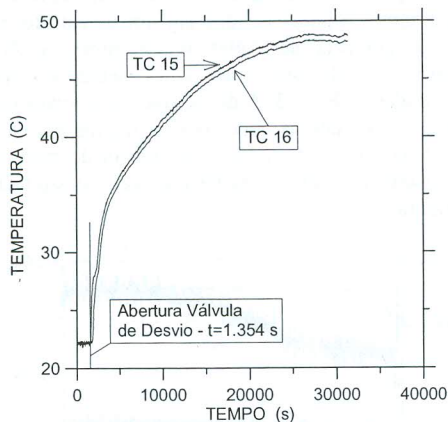


Figura 8. Temperaturas TC15 e TC16 no Transitório.

Para uma potência fornecida de 2.400 W, no experimento sem linha de desvio, em regime permanente, obteve-se uma diferença de temperatura no aquecedor elétrico de 17,7°C para uma vazão ( $m$ ) de 0,031 kg/s. Para a mesma potência (2.400 W), no experimento com a linha de desvio 1, em regime permanente, a diferença de temperatura no aquecedor foi de 17,8°C com uma vazão ( $m_{aq1}$ ) de 0,03 kg/s. Houve uma redução na vazão da ordem de 10% no

aquecedor, com uma variação muito pequena na diferença de temperatura do aquecedor elétrico (cerca de 0,56%), além de se estabelecer uma temperatura maior na saída do aquecedor elétrico (ver Fig. 9). Se as condições iniciais de temperatura nos dois transientes fossem as mesmas poder-se-ia ter um acréscimo ainda maior na temperatura de saída no aquecedor, no caso do experimento com linha de desvio.

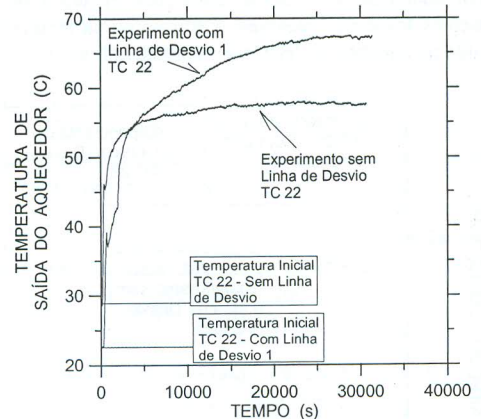


Figura 9. Temperatura de Saída no Aquecedor.

**Etapa 3 – Linha de Desvio 2 – Conexão Superior.** A Fig.10 mostra a potência fornecida e as vazões no trocador de calor ( $m_{t2}$ ), no aquecedor elétrico ( $m_{aq2}$ ) e na linha de desvio ( $m_{d2}$ ).

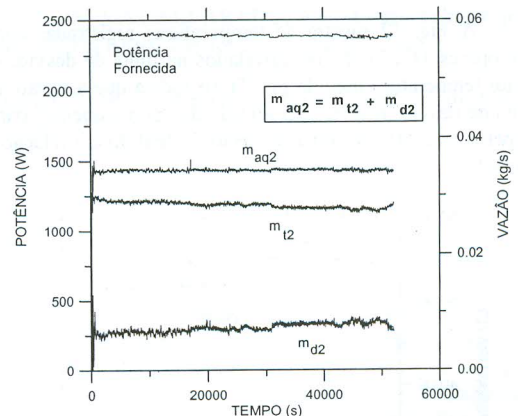


Figura 10. Potência e Vazões no Transitório.

O experimento consistiu da mudança da linha de desvio 1 para 2, mantida a potência de 2.400 W, a partir do regime permanente obtido a partir do transitório anterior. A duração total do experimento foi de aproximadamente 14h46, e o circuito foi mantido em regime permanente por tempo suficiente para observar sua estabilidade. Após 250 s do início da gravação, a válvula esfera A foi aberta e a válvula esfera B foi fechada (ver Fig.1). Para a potência de 2.400 W, obteve-se com a linha de desvio 2, conexão superior, uma diferença de temperatura no aquecedor elétrico de 16,7°C e uma vazão ( $m_{aq2}$ ) de 0,033 kg/s. No experimento sem linha de desvio, para a mesma potência, obteve-se uma

diferença de temperatura no aquecedor de 17,7°C e uma vazão (m) igual a 0,031 kg/s. O aumento de vazão foi da ordem de 6% no aquecedor, com uma variação 6% menor na diferença de temperatura no aquecedor elétrico. A Fig.11 mostra o aumento da temperatura na saída do aquecedor elétrico no experimento com a linha de desvio 2 em relação ao experimento sem linha de desvio. Esse aumento é de aproximadamente 7°C. Se as condições iniciais dos dois transientes fossem as mesmas, o acréscimo na temperatura de saída no aquecedor elétrico seria ainda maior.

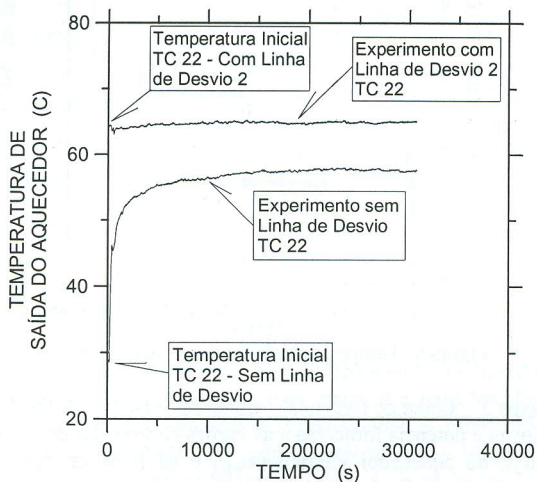


Figura 11. Temperatura de Saída do Aquecedor.

A Fig. 12 mostra as temperaturas registradas com termopares TC15 e TC16, instalados na linha de desvio. A maior temperatura medida por TC16 indica que a vazão na linha de desvio ( $m_{d2}$ ) teve o sentido da "perna quente" para a "perna fria." Houve uma inversão de sentido em relação a etapa 2.

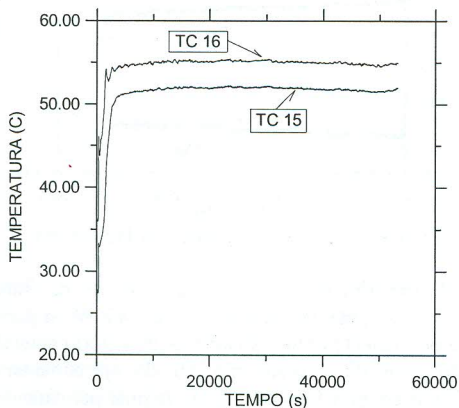


Figura 12. Temperaturas TC15 e TC16 no Transitório.

#### IV. MODELO NUMÉRICO

Nesta fase inicial da pesquisa, o modelo numérico foi preparado para qualificar a metodologia de análise baseada na solução das equações de energia com coeficientes obtidos experimentalmente. Para facilitar sua validação, foi elaborado para reproduzir os experimentos de circulação natural pelo circuito externo, deixando o modelo para o estudo das linhas de desvio para uma etapa posterior.

O modelo foi desenvolvido com o programa computacional "Engineering Equation Solver" (EES) [9], considerando-se fluido incompressível e escoamento unidirecional. A parte externa do circuito foi dividida em 4 regiões: aquecedor, perna quente, trocador de calor e perna fria, conforme mostrado na Fig.1. Cada região foi discretizada em um número finito de nós. Em cada região, a equação de conservação de quantidade de movimento [10] é dada por:

$$\bar{n} \left( \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial s} \right) = \frac{\partial P}{\partial s} + \bar{n}g - \frac{\partial \delta}{\partial s} \quad (4)$$

onde  $\rho$  é a densidade do fluido ( $\text{kg/m}^3$ ),  $v$  a velocidade ( $\text{m/s}$ ),  $P$  a pressão ( $\text{N/m}^2$ ),  $s$  a coordenada espacial ( $\text{m}$ ),  $t$  o tempo ( $\text{s}$ ),  $\tau$  o atrito e  $g$  é a aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ ). A equação de conservação de energia [10] é dada por:

$$\rho V c_p \frac{\partial T}{\partial t} = S + G\Delta T + m \Delta h \quad (5)$$

onde  $V$  é o volume ( $\text{m}^3$ ),  $c_p$  o calor específico ( $\text{J/kg}^\circ\text{C}$ ),  $T$  a temperatura ( $^\circ\text{C}$ ),  $S$  a geração de calor ( $\text{W}$ ),  $G\Delta T$  a troca com o ambiente ( $\text{W}$ ) e  $m\Delta h$  é o transporte de massa ( $\text{W}$ ).

O ajuste e verificação do modelo da BCN em seu trecho externo, foram baseados em um transitório de aumento de potência de 2.400 W. A potência térmica, experimental e calculada, e as vazões medida e calculada são mostradas na Fig. 13. A discrepância observada na fase inicial, que antecede as condições de regime permanente, foi constatada ser devido a "drift" no sensor do medidor de vazão magnético, que caracterizou sua sensibilidade a temperatura.

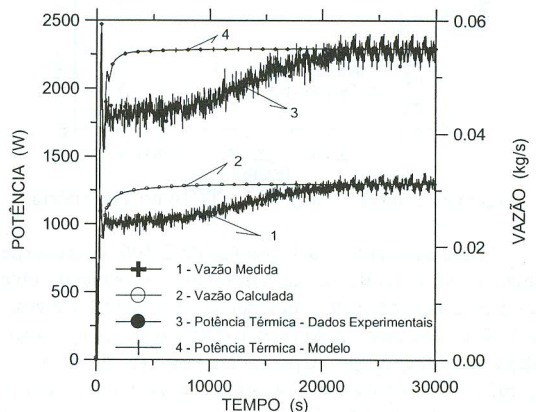


Figura 13. Potência no Aquecedor Elétrico e Vazão.

A Tabela 1 compara o balanço térmico do circuito calculado por meio do modelo ( $Q_i$ ) e o balanço térmico ( $P_i$ ) feito no trecho externo do circuito.

TABELA 1. Balanço Térmico BCN

Potência Fornecida – 2.400 W	$P_i$ (W)	$Q_i$ (W)
Potência Térmica no Aquecedor	2.297	2.284
Perda de Calor no Aquecedor para o Ambiente	103	116
Perda de Calor na Perna Quente	78	13
Perda de Calor na Perna Fria	52	34
Potência no Primário – Trocador de Calor	2.167	2.237
Potência no Secundário – Trocador de Calor	2.136	2.202
Perda de Calor na Carcaça Trocador de Calor	31	35

Os resultados mostram que o modelo numérico reproduz com excelente precisão o experimento sem linha de desvio. A maior discrepância encontrada foi na perda de calor para o ambiente na perna quente. Isso se deve à leitura imprecisa de temperatura na perna quente, influenciada pela estrutura da tubulação. Pequena variação na diferença de temperatura ( $\Delta T$ ), ocasiona uma sensível mudança no cálculo da potência.

## V. CONCLUSÕES

A pesquisa iniciada no Centro de Engenharia Nuclear do IPEN para avaliar o uso de linhas de desvio para redução da taxa de resfriamento em reatores resfriados por sistemas passivos de resfriamento de emergência foi iniciada com a realização de vários experimentos e validação de uma metodologia de análise numérica.

Os experimentos mostraram que a utilização de linhas de desvio produz resultados sensíveis na redução das taxas de resfriamento de sistemas resfriados por circulação natural. Observou-se que a posição de conexão da linha de desvio com a “perna quente” determina o sentido de escoamento, podendo ocorrer a inversão a partir de uma determinada cota.

O modelo numérico utilizando coeficientes obtidos experimentalmente apresentou boa concordância com os dados experimentais obtidos, possibilitando a sua utilização na simulação de outros transientes em circulação natural. A próxima etapa consistirá no desenvolvimento e validação de um modelo para análise do sistema completo com linhas de desvio.

## REFERÊNCIAS

- [1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, **Advanced Reactors – Fact Sheet**. Disponível em: <<http://www.iaea.org>>, 2000.
- [2] LAYMAN W.H., MARSTON W.H., SUGNET, W. R., **Update on the ALWR Program: The Future of Nuclear Power in the USA**, Nuclear Engineering International, Advanced Reactors, p.23 – 31, dezembro, 1991.
- [3] BAPTISTA FILHO et al, **Circuito Experimental para Pesquisa de Sistemas de Resfriamento de Emergência para Reatores Avançados**, VII CGEN – General Conference on Nuclear Energy, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2000.
- [4] MACEDO, L. A., BAPTISTA FILHO, B. D., **Caracterização da Bancada de Circulação Natural de Sistemas de Resfriamento de Emergência em Reatores Navais e em Reatores Avançados**, CONEM – Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Natal, RN, Brasil, 2000.
- [5] NATIONAL INSTRUMENTS, **LabWindows/CVI – Visual Programming for Instrumentation – Programmer Reference Manual**, June Edition, 1995.
- [6] GONÇALVES, I. M. P., **Programa de Aquisição de Dados da Bancada de Circulação Natural**, IPEN – CNEN/SP, São Paulo, junho, 2001, (Relatório Técnico P&D.CENT.CENT.022.00, RELT.001.00).
- [7] CRANE Co., **Flow Fluids Through Valves, Fittings and Pipe**, Metric Edition, England, 1997.
- [8] ZVIRIN, Y., JEUCK III, P. R., SULLIVAN, C. W., DUFFEY, R. B., **Experimental and Analytical Investigation of a Natural Circulation System with Parallel Loops**, Journal of Heat Transfer, Vol. 103, p. 645 – 652, Novembro, 1981.
- [9] KLEIN, S.A., ALVARADO, F.L., **Engineering Equation Solver (EES)**, Version 5.226, Junho, 2000.
- [10] KREITH, F., **Princípios da Transmissão de Calor**, Ed. Edgard Blücher, São Paulo, 1977.

## ABSTRACT

This work presents results of a research on bypass lines for control of the cooling rate in reactors with emergency core cooling system operating in natural circulation. Experimental results obtained in a water loop with a bypass line between the hot source and the cold source, are presented. The experimental results were used for validating a numeric model, whose results are discussed. The use of bypass lines allows the control of the heater outlet temperature without the need of active components in the main line. This can assure the effectiveness of the cooling system even in case of valve opening failure, what is interesting for application in the new generation of nuclear reactors. The results showed that, when the bypass line is opened, the heater outlet temperature increases. That increase happens due to decrease of the flow through the heater. The flow through the cold source increases lightly. The results still show that the bypass connection position in the hot-leg determines the flow direction.