

CIRCUITO EXPERIMENTAL PARA PESQUISA DE SISTEMAS DE RESFRIAMENTO DE EMERGÊNCIA DE REATORES AVANÇADOS

Benedito D. Baptista F². (*), Iraci M. P. Gonçalves, José C. de Almeida, Luiz A. Macedo, Samuel C. Santos

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP
Caixa Postal 11049
05422-970, São Paulo, Brasil
(* E-mail: bdbfilho@net.ipen.br

RESUMO

Este trabalho descreve o projeto e apresenta os primeiros resultados de distribuição de temperatura e estimativas de vazão do Circuito de Circulação Natural desenvolvido no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN, dentro do Projeto da Diretoria de Pesquisa e Desenvolvimento da CNEN intitulado “*Ampliação e Complementação das Instalações Experimentais de Sistemas Passivos de Reatores Avançados*”. O objetivo desse projeto foi adequar as instalações experimentais das Instituições que iniciaram linhas de pesquisa em *Reatores Avançados tipo PWR*. Os resultados obtidos mostraram que o circuito é adequado para os propósitos de pesquisa de sistemas passivos de resfriamento de emergência.

Palavras-Chave: Circulação Natural, Segurança Passiva, PWR, ALWR

I. INTRODUÇÃO

Diferente das centrais hidroelétricas que têm sua localização estabelecida mais em função dos caprichos da natureza, as centrais nucleares podem ser instaladas bem próximo das concentrações de consumidores, evidentemente desde que seja possível o alcance de elevados padrões de qualidade e segurança, e que seja possível a demonstração desses padrões e sua aceitação pelo público em geral. Desse modo, o futuro da energia nuclear aplicada na produção energética depende crucialmente de uma adequada seleção dos conceitos do reator e de seus sistemas.

Dentro dessa linha de raciocínio se iniciou há alguns anos o desenvolvimento dos conceitos de “*reatores avançados*”, para os quais foram previstos aperfeiçoamentos tecnológicos tais como a elevada padronização, a redução na demanda de controle, a minimização da necessidade de suprimento de energia elétrica de emergência, o desenvolvimento de conceitos mais robustos, ou seja, imunes a falhas, etc. [1]. Na direção dos reatores PWR Avançados destacou-se principalmente a adoção dos conceitos de reatores navais militares que sempre possuíram sistemas de resfriamento de emergência

com características passivas, utilizando o fenômeno da *circulação natural*.

Os nossos trabalhos anteriores dentro do programa de reatores da Marinha Brasileira [2], juntamente com a proposta de uma Pesquisa/Atividade da Diretoria de Pesquisa e Desenvolvimento da Comissão Nacional de Energia Nuclear intitulada “*Ampliação e Complementação das Instalações Experimentais de Sistemas Passivos de Reatores Avançados*”, nos motivou a iniciar o projeto de uma instalação para experimentos de sistemas de resfriamento de emergência por circulação natural, que foi concluída no início de 1998 [3]. Esse Circuito de Circulação Natural foi concebido e detalhado para atender os objetivos específicos de: a) estudo do comportamento de resfriadores de sistemas passivos de remoção de calor residual típicos de reatores avançados e de reatores navais; b) análise do comportamento operacional de sistemas passivos de remoção de calor residual com linhas de desvio da fonte quente; c) pesquisa de redes neurais artificiais para controle de sistemas de reatores nucleares; e, d) utilização de redes neurais artificiais e análise de ruído para diagnose e previsão de comportamento de sistemas de reatores nucleares.

No próximo segmento deste artigo é apresentada a descrição desse circuito fornecendo suas principais características. Em seguida são descritos o sistema de controle de potência e o sistema de aquisição de dados implementados para sua operação e obtenção das medidas experimentais. No outro segmento são apresentados os resultados da operação inaugural. Finalizando são abordados os principais problemas encontrados e discutidas algumas conclusões preliminares.

II. DESCRIÇÃO DO CIRCUITO

O arranjo mostrado na Figura 1 representa o Circuito de Circulação Natural [4] que foi concebido nos moldes de um sistema de remoção de calor residual de um reator PWR avançado, contendo um aquecedor elétrico que é a fonte quente do sistema, um trocador de calor constituído por dois tubulões horizontais com um feixe

vertical de tubos imersos em um tanque de água que é alimentado por gravidade a partir de um grande reservatório elevado. Além desses componentes e da instrumentação descrita adiante, foi instalada uma bomba para realizar operações de calibração e determinação das características hidráulicas do sistema.

A tubulação utilizada é de cobre tendo 22 mm de diâmetro externo e 0,6 mm de espessura. A linha de abastecimento de água de resfriamento do trocador de calor é de PVC de diâmetro de $\frac{3}{4}$ pol. O circuito foi montado com conexões soldadas e uniões roscadas de $\frac{3}{4}$ pol. compatíveis com as válvulas, instrumentos, e com os bocais dos equipamentos. O aquecedor e todas as tubulações foram isolados termicamente com calhas de lã de vidro de 25 mm de espessura, encamisadas com chapas de alumínio corrugado. Todas as válvulas instaladas nas linhas principais do circuito são do tipo esfera.

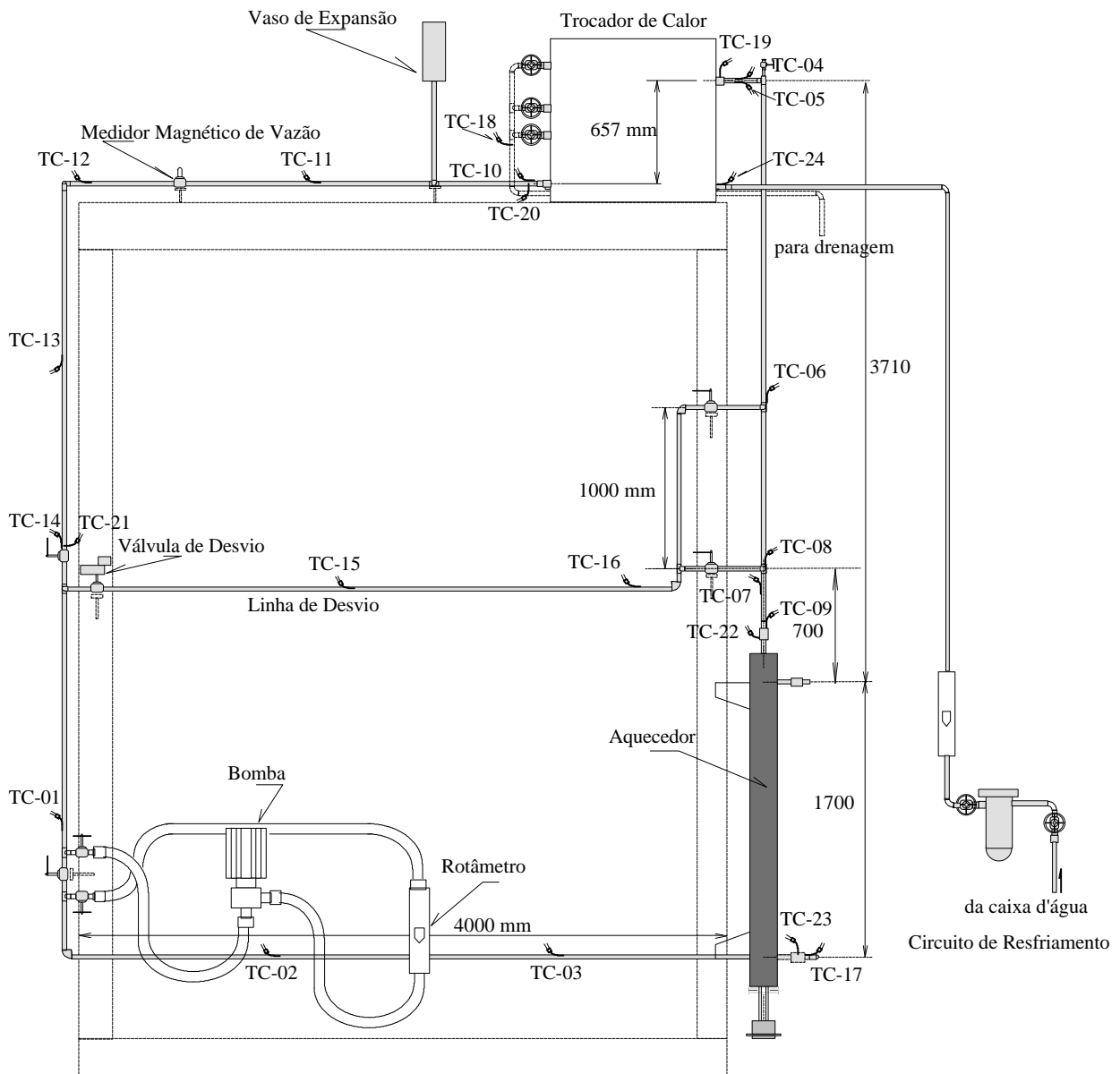


Figura 1 - Arranjo do Circuito.

Para controle da vazão no secundário do trocador de calor foi instalada uma válvula globo e um rotâmetro.

Com a finalidade de estudar o comportamento de sistemas de circulação natural com linhas de desvio foi instalada uma interligação da “perna-fria” com a “perna-quente” do circuito. Foi ainda instalada uma válvula de controle tipo esfera com atuador motorizado e duas ramificações isoladas por meio de válvulas esfera. Na linha principal do circuito, foi instalado um medidor de vazão tipo magnético ajustado para a faixa de vazão máxima de 0,1 kg/s, com transmissor com sinal de saída de 4 a 20 mA.

O aquecedor elétrico foi construído em aço inoxidável austenítico e possui três resistências tubulares em “U”. Foi projetado para uma potência máxima de 10 kW mas será controlado para operar somente até 3,3 kW em circulação natural.

O trocador de calor foi concebido com base em resfriadores de aplicação naval e em conceitos considerados no projeto do AP-600 [5]. Foi totalmente construído em cobre, com dois tubulões de 1 ¾ pol. , interligados por 18 tubos de 3/8 pol. imersos em um reservatório com volume de 0,202 m³.

Ao longo do 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. Em alguns pontos do circuito, com o objetivo de avaliar efeitos de estratificação na seção da tubulação, montamos termopares na mesma posição mas opostos diametralmente. Para o acompanhamento e registro das temperaturas e da vazão foi montado um sistema de aquisição de dados em plataforma PC, descrito no próximo item. Ao longo do circuito foram ainda instaladas 4 tomadas de pressão que permitem determinar os coeficientes de perda de carga de trechos do sistema em condições de circulação forçada, utilizando para isso um manômetro de tubo em “U” invertido.

O controle de potência é realizado por meio de uma fonte de alimentação variável descrita a seguir. Futuramente a fonte de alimentação variável será controlada mediante um sinal gerado por uma Rede Neural Artificial simulada no computador do sistema de aquisição de dados.

III. CONTROLE E AQUISIÇÃO DE DADOS

O controlador de potência, diferente dos modelos industriais, foi especialmente concebido visando a aplicação em experimentos nos quais a contínua informação da potência fornecida é necessária para registro ou para ações de controle. Considera ainda uma

maior preocupação com a segurança dos pesquisadores envolvidos no trabalho.

A variação de potência é feita por meio de uma entrada analógica isolada que pode ser variada entre 0 e 10 V. O ajuste de potência é tiristorizado com o controle dos disparos feito por um circuito integrado desenvolvido para essa aplicação. A isolamento da rede para o aquecedor é feita por um transformador isolador de potência especificado para 4 kVA. O sistema de proteção é baseado no intertravamento com contatos em série ao comando de um contator que ativa a alimentação 220VAC monofásica. As condições consideradas para desligamento da alimentação de potência foram a temperatura da água acima de 90 °C e a abertura da porta do controlador. O controlador desenvolvido pode trabalhar com cargas resistivas tanto em 110 como em 220 V, devendo ser respeitada apenas a potência máxima.

O controlador de potência pode receber o sinal de controle advindo de uma fonte externa ou de uma saída do sistema de aquisição de dados que é constituído por uma placa de aquisição de dados da National Instruments, AT-MIO-16E [6]; um computador (PC); um bloco terminal isolado SCXI; um módulo condicionador de sinais SCXI; e um bastidor SCXI.

A placa de aquisição de dados possui 8 entradas diferenciais analógicas (16 entradas com terra comum), sinal de entrada de -10 a +10V, selecionável por software, 8 entradas/saídas digitais, taxa de amostragem 100 kS/s, 2 saídas analógicas no intervalo de -10 a +10V configurável via software, resolução (I/O) melhor ou igual a 12 bits, com contador/temporizador disponível para acesso a leitura.

O bloco SCXI é formado pelo bloco terminal, por um módulo condicionador de sinais e um bastidor. A fiação da instrumentação é montada no bloco terminal isolado, que é conectado diretamente na parte frontal do módulo condicionador de sinais. Este é acondicionado no bastidor SCXI, e multiplexa todos os sinais em um canal, tal que apenas um cabo é usado para conectar o sistema SCXI à placa de aquisição de dados.

A atuação do condicionador de sinais é controlada via software. Para isso foi utilizado o sistema LabWindows/CVI da National Instruments [7], que é um ambiente de programação que permite desenvolvimento de aplicações de instrumentação e controle, aplicações em testes automatizados e aquisição de dados. Suas bibliotecas contêm funções de alto nível para aquisição, análise e apresentação de dados.

A Figura 2 mostra o esquema do sistema de aquisição de dados configurado para os experimentos. Com

o LabWindows foi feito um programa para aquisição, apresentação e armazenamento dos dados da seguinte instrumentação do Circuito de Circulação Natural: 19 termopares tipo K - sinal em mV; 5 termopares tipo T - sinal em mV; medidor de vazão do primário - sinal de 4 a 20 mA; e potência do aquecedor - sinal do controlador de 0 a 10 V. A Figura 3 mostra a tela de interface do usuário para utilização do programa.

Como pode ser visto na Figura 3, a tela foi feita de tal modo que as posições de indicação das temperaturas correspondam aos locais de instalação dos termopares no circuito, na forma de um quadro sinóptico, de forma a facilitar a visualização do comportamento do circuito durante sua operação.

Antes de iniciar a aquisição dos dados, o usuário fornece o valor da escala de vazão que está sendo utilizado no medidor de vazão do primário, e seleciona dois termopares que deseja que sejam acompanhados em forma gráfica.

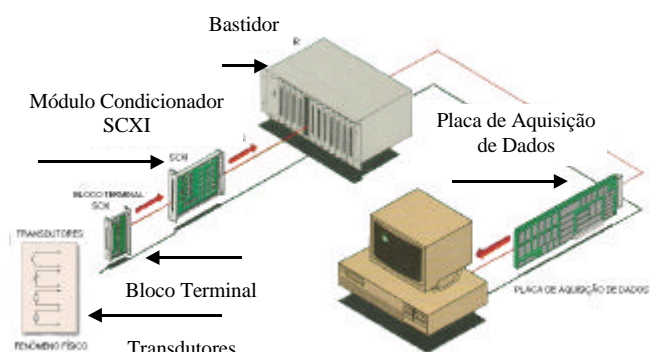


Figura 2 - Sistema de Aquisição de Dados.

O programa permite a operação e acompanhamento dos experimentos sem gravação dos dados ou com a opção de armazenamento em um arquivo definido durante a sua execução. Ao acionar o botão *GRAVAR*, é aberta uma janela para ser fornecido o nome e a localização do arquivo onde serão armazenados os dados. Caso se deseje continuar uma gravação em um arquivo já utilizado, os dados serão colocados em seqüência aos já existentes. O arquivo de saída registra a data, hora de início e fim da gravação, temperaturas em graus Celsius, vazões em l/min., e potência do aquecedor em W. Dessa forma, ao terminar o experimento, os dados poderão ser analisados utilizando-se programas adequados.

IV. RESULTADOS

A operação inaugural do circuito de circulação natural, realizada no dia 4 de março de 1998, teve a duração de 2225 segundos durante os quais foi variada a potência do aquecedor em dois níveis, conforme o diagrama da Figura 4.

Essa operação, mesmo tendo o significado de uma solenidade de comemoração, fez parte do programa de comissionamento do circuito durante o qual estão previstas outras etapas como: 1) calibração das medidas de potência; 2) calibração do medidor de vazão do primário; 3) caracterização hidráulica do circuito em circulação forçada; e 4) ajustes da instrumentação e do programa de aquisição de dados.

Nessa operação de inauguração foram gravados todos os sinais de temperatura e vazão, que são parcialmente apresentados nas Figuras 4 e 5. Na Figura 4 são exibidas isoladamente as temperaturas na entrada e saída do aquecedor sobrepostas à curva de variação de potência, enquanto que na Figura 5 são mostrados outros cinco pontos de medida de temperatura com indicação de intervalos de tempo que foram utilizados para determinação indireta de vazão, uma vez que o medidor de vazão magnético não operou adequadamente devido a depósitos de barro da água descobertos posteriormente a essa operação inaugural. Os resultados de vazão são mostrados na Figura 6, que compara as indicações do medidor de vazão com a vazão estimada pelo movimento da frente de temperaturas.

A Figura 4 permite observar que o circuito segue o comportamento esperado, ou seja, após algum tempo decorrido do início do fornecimento de potência no aquecedor, a temperatura na saída do mesmo começa a aumentar, significando que boa parte da massa de água interna ao aquecedor se aqueceu e iniciou a circulação. Após mais algum tempo uma frente com maior temperatura (inicialmente a temperatura da água em repouso no circuito não era uniforme - na parte superior a temperatura era mais elevada) atinge a entrada do aquecedor, mas logo em seguida é substituída pela água mais fria que estava no interior do resfriador, isso provoca a forma de onda visível no intervalo de 250 a 500 s. Essa onda vai afetar a temperatura de saída do aquecedor no instante aproximado de 500 s. Após isso já começa a chegar na entrada do aquecedor a água mais aquecida que já percorreu todo o circuito, dando início a uma nova elevação de temperaturas na saída do aquecedor.

Observa-se ainda na Figura 4 o relativamente rápido efeito da redução da potência do patamar de 2230 W para o de 1020 W, na temperatura de saída do aquecedor. Consta-se ainda que a capacidade do resfriador é grande o suficiente para absorver essa variação sem afetar significativamente a sua temperatura de saída.

A evolução da temperatura em outros pontos, mostrada na Figura 5, confirma esse comportamento. Nessa figura ainda podem ser observados alguns instantes, delimitados por linhas verticais, que foram utilizados para avaliação indireta da velocidade média de escoamento. Isso foi necessário pois o instrumento de medida de vazão

sofreu interferências, como pode ser observado na Figura 6, e não pôde ser considerado para estas análises.

O comportamento da vazão durante os primeiros 500 s, mostrado na curva tracejada da Figura 6, também seguiu o comportamento esperado, ou seja, existe uma maior aceleração no início, enquanto a “coluna quente” está sendo “preenchida” com água aquecida e a “coluna

fria” ainda está totalmente preenchida com água mais fria, em seguida há uma estabilização decorrente do trecho horizontal da parte superior do circuito e em seguida, um declínio na vazão quando a coluna fria começa a receber água mais quente, o que diminui o potencial para circulação.

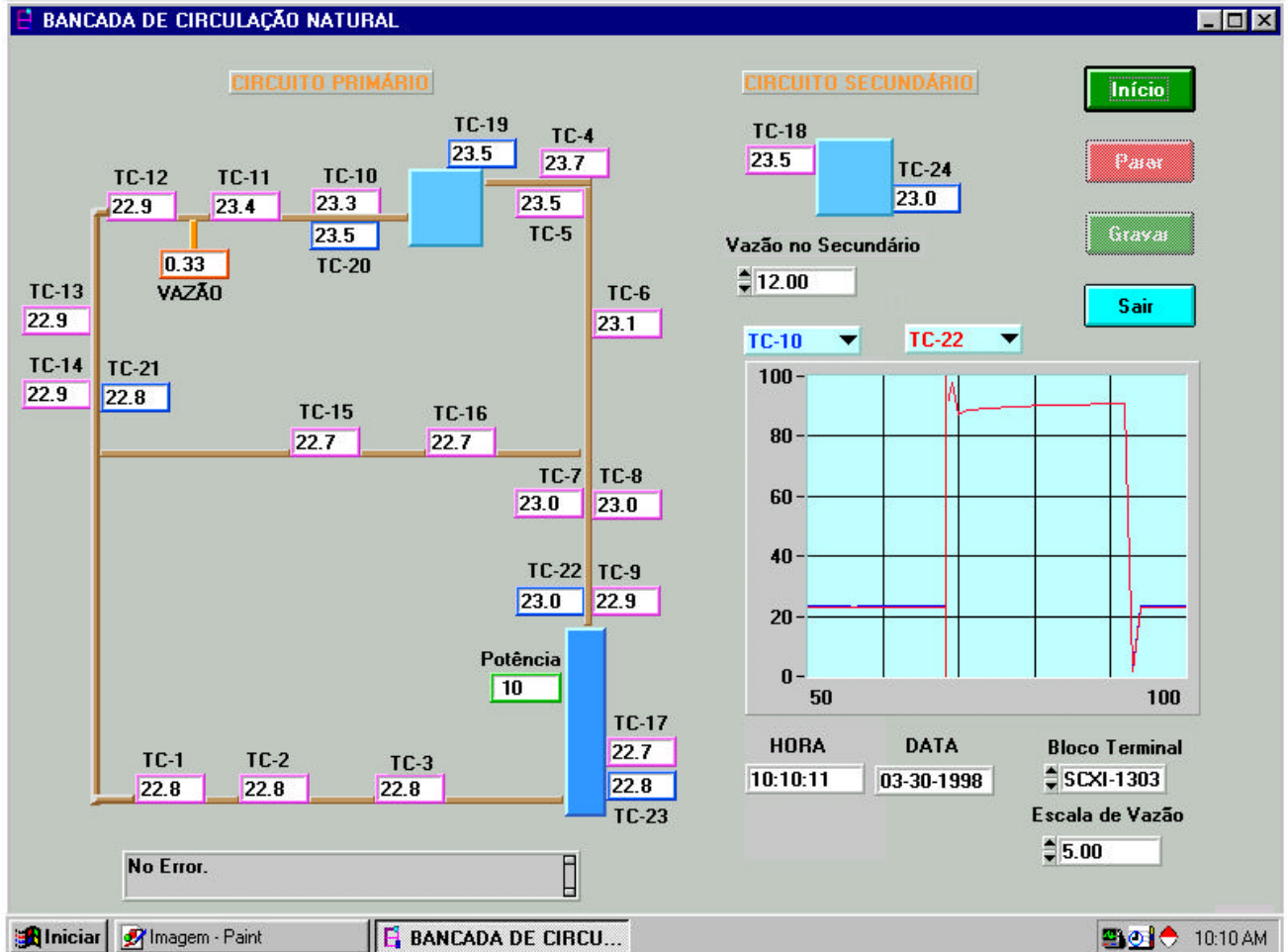


Figura 3 - Tela da Interface H/M.

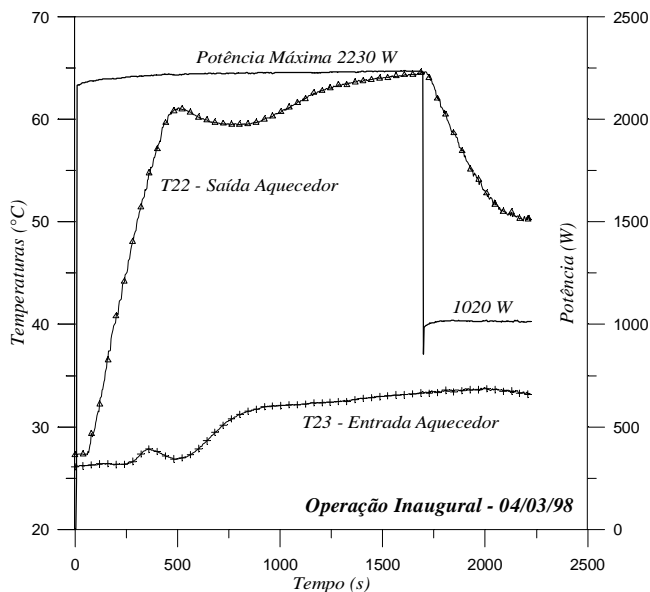


Figura 4 - Potência, T-22 e T-23 na Operação Inaugural.

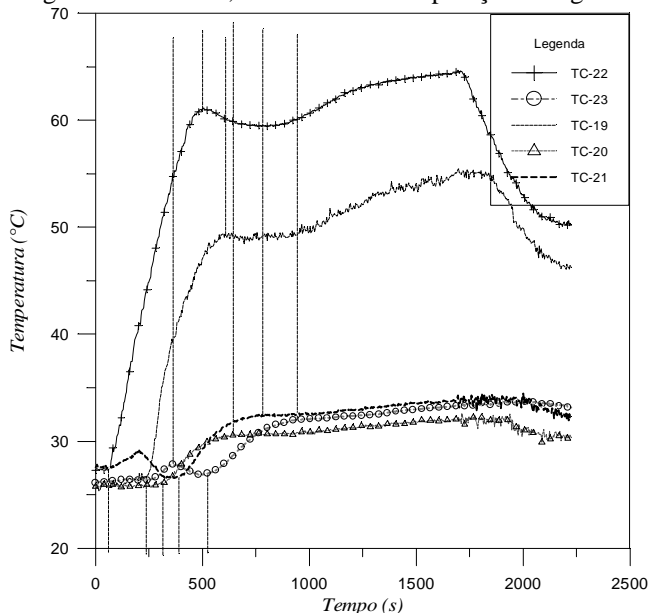


Figura 5 - Temperaturas de Entrada e Saída no Aquecedor.

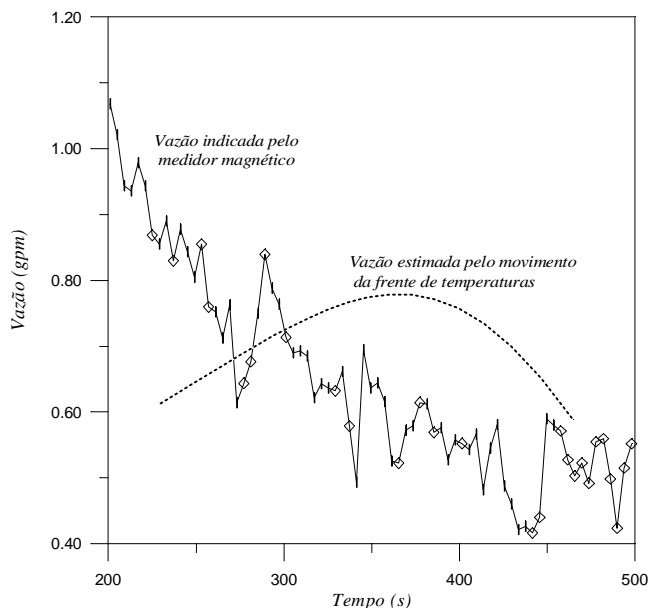


Figura 6 - Indicações de Vazão.

V. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos na operação inaugural do circuito de circulação natural foram suficientes para demonstrar que o circuito é adequado para os propósitos a que foi idealizado, considerando que:

- a) a potência do aquecedor em conjunto com a altura total do circuito e o diâmetro da tubulação, são adequados para a obtenção de vazões facilmente mensuráveis na faixa especificada para o medidor de vazão;
- b) apesar de não ter sido atingido o regime permanente, mas considerando o fato de ter sido utilizada uma vazão bem inferior que a máxima possível para o secundário, pode ser previsto que tanto a capacidade quanto a eficácia térmica do resfriador são adequados para a realização dos experimentos como idealizados;
- c) o sistema de controle de potência e o sistema de aquisição de dados operaram adequadamente dentro do esperado, demonstrando precisão e estabilidade.

Como foi observado na análise das curvas da Figura 6, o medidor de vazão foi afetado pela deposição de sujeira que impossibilitou sua utilização nas análises dos resultados desta operação inaugural. Esse fato nos levou a reprogramar as atividades previstas para o comissionamento do circuito incluindo o estabelecimento de um maior controle com a qualidade da água de reposição e o estabelecimento de um procedimento eventual de desmontagem, limpeza e calibração.

Solucionados os problemas com o medidor de vazão magnético o programa seguirá com as atividades de: a) repetição das medidas de caracterização hidráulica do circuito; b) recalibração do sistema de potência; c)

execução do programa experimental com o circuito principal; d) realização dos experimentos com as linhas de desvio; e) implementação de instrumentação adicional no resfriador; f) realização de experimentos específicos com o resfriador; e g) desenvolvimento das atividades do programa de controle por redes neurais artificiais.

REFERÊNCIAS

- [1] Marston, T. U.; Layman W. H.; and Sugnet, W. R., **Update on the ALWR Program: the future of nuclear power in the USA**, Nuclear Engineering International, Advanced Reactors, p.23-31, Dec. 1991.
- [2] Baptista F., B. D., **Diretrizes Básicas para o RENAP-100**, Memorando Interno Nº 067/90, de 16 de agosto de 1990.
- [3] Informe IPEN, **Inauguração do Circuito Experimental de Sistemas de Resfriamento de Emergência de Reatores Avançados**, Informe Ano X, Nº 06, de 19 de fev. de 1998.
- [4] Baptista F., B. D., **Relatório de Evolução do Projeto da Bancada de Circulação Natural**, Diretoria de Reatores, IPEN-CNEN/SP, relatório interno PED.RES.CNEN.024, RELT.001.R00, 11/07/96.
- [5] Vijuk, R., Bruschi, H., **AP600 offers a simpler way to greater safety, operability and maintainability**, Nuclear Engineering International, Advanced LWRs, p. 22-28, Nov. 1988.
- [6] National Instruments, **Instrumentation Reference and Catalogue - Test and Measurement Process Monitoring and Control**, 1995.
- [7] National Instruments, **LabWindows/CVI - Visual Programing for Instrumentation - Programmer Reference Manual**, June 1995 Edition.

ABSTRACT

This paper describes the project and presents the first results of temperature distribution and flow estimates of the Circuit of Natural Circulation developed at the Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, inside of the Project of the Diretoria de Pesquisa e Desenvolvimento of CNEN entitled *“Amplification and Complementation of the Experimental Facilities of Passive Systems of Advanced Reactors.”* The objective of that project was adapt the experimental facilities of the Institutions that began research lines in *Advanced PWR Reactors*. The results obtained show that the circuit is well adapted for the purposes of research of passive emergency cooling systems.