

## **CIRCUITO EXPERIMENTAL COM ESCOAMENTO BIFÁSICO E COM ALTA CONCENTRAÇÃO DE NÃO-CONDENSÁVEIS PARA PESQUISA E DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS DE RESFRIAMENTO DE EMERGÊNCIA DE REATORES NUCLEARES AVANÇADOS**

**Luiz Alberto Macedo**

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP – Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – São Paulo – SP  
lamacedo@ipen.br

**Benedito Dias Baptista Filho**

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP – Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – São Paulo – SP  
bdbfilho@ipen.br

**Resumo.** *O desenvolvimento de sistemas passivos de resfriamento de emergência de reatores nucleares avançados requer a pesquisa de alguns processos relativos à circulação natural, em condições de escoamento bifásico envolvendo processos de condensação na presença de gases não-condensáveis. Este trabalho descreve as principais características do circuito experimental denominado Bancada de Circulação Natural (BCN), projetado para a realização de experimentos termo-hidráulicos em um sistema com uma fonte quente, aquecedor elétrico; uma fonte fria, trocador de calor, operando com escoamento bifásico e com alta concentração de não-condensáveis, ar. Os testes operacionais, o desenvolvimento do sistema de aquisição de dados e os primeiros resultados experimentais em circulação natural são apresentados. Os experimentos são realizados pela aplicação de transitórios em circulação natural considerando degraus de potência. A distribuição de temperaturas e o comportamento da vazão e pressão são analisados. O conjunto circuito experimental, instrumentação e aquisição de dados demonstrou ser adequado para os propósitos da pesquisa de sistemas passivos de resfriamento de emergência, operando em escoamento bifásico e com alta concentração de não-condensáveis.*

*Palavras chave:* circulação natural, escoamento bifásico, condensação na presença de não-condensáveis, reatores avançados.

### **1. Introdução**

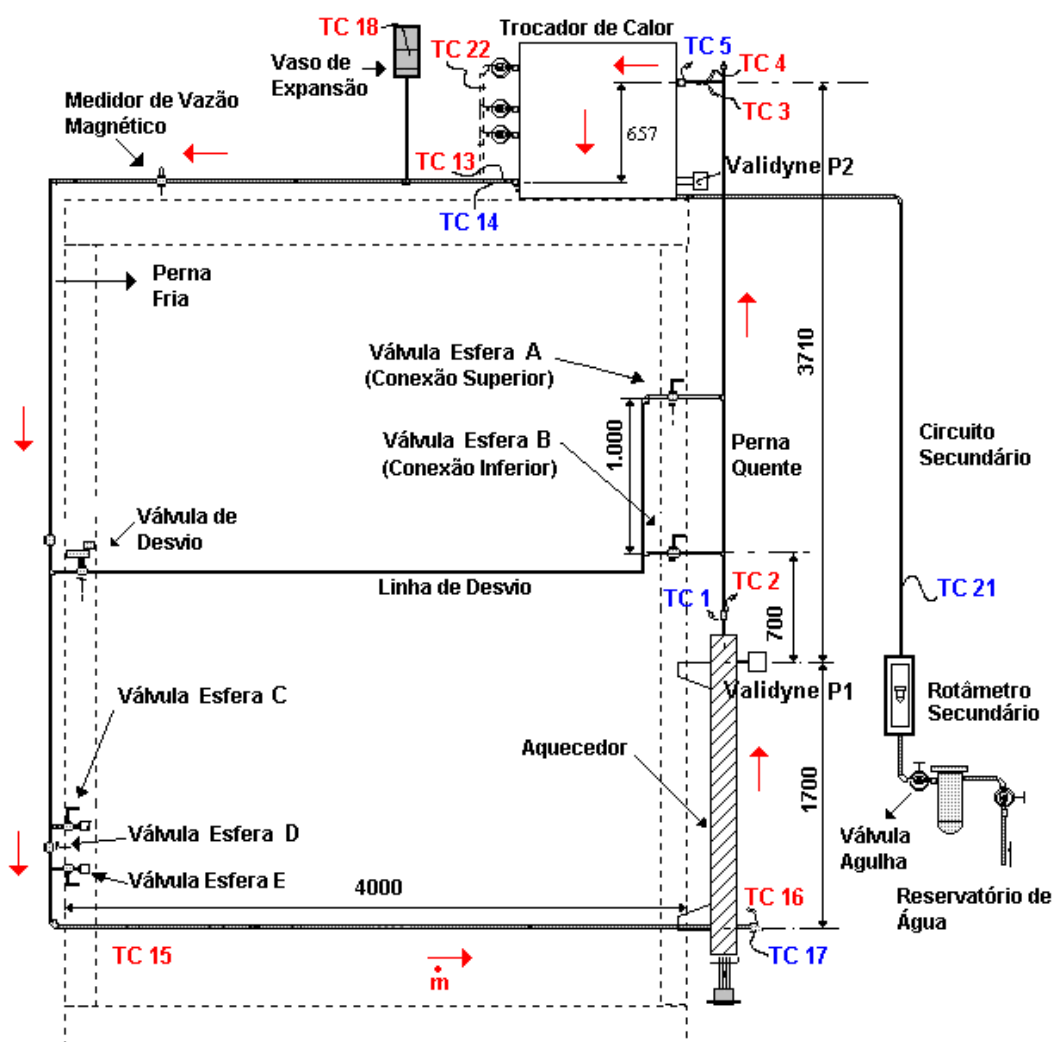
A indústria nuclear motivada pelos aspectos econômicos e de segurança desenvolveram novos conceitos de reatores nucleares e de sistemas de segurança. Em 2001, o Departamento de Energia (DOE) dos Estados Unidos liderou um projeto denominado “Fórum Internacional Geração IV – GIF”, onde foram definidos requisitos, objetivos e metas para o setor nuclear, sendo selecionadas as tecnologias de reatores mais promissoras para o período posterior a 2030 (Uranium Information Center, 2002). As principais metas para os reatores de IV geração são: melhor utilização e aproveitamento do combustível nuclear, minimização dos rejeitos, resistência à proliferação, maior segurança e confiabilidade para os trabalhadores e população, drástica redução na probabilidade de ocorrência de acidentes, aumento na segurança da usina, aumento da eficiência da geração da planta e maior atratividade para o investidor (Aranha, 2001). O GIF reconheceu outros tipos de reatores conceituais para aplicação a médio prazo (NTD – Near Term Deployment) para estarem disponíveis até 2015 (Uranium Information Center, 2003). Observando as metas estabelecidas e, entre os vários projetos conceituais, os reatores integrais de pequeno e médio porte estão ganhando a atenção da comunidade nuclear internacional, pois eles diversificam o uso pacífico da energia nuclear na área de desalinização da água do mar, geração de energia e propulsão naval (Chung, 2004).

Nesse sentido, o reator integrado IRIS (reator internacional inovador e seguro) está sendo desenvolvido por um consórcio internacional de indústrias, laboratórios e universidades (19 participantes de 9 países), liderados pela Westinghouse (Polimi, 2003). O reator tem um projeto integrado, significando que os geradores de vapor, bombas, pressurizador, mecanismos de acionamento de barras e a blindagem do núcleo se encontram dentro do vaso do reator. Adota-se sistemas de resfriamento de emergência com características de segurança passiva, utilizando o fenômeno da circulação natural. Na indústria nuclear, o efeito do gás não-condensável é importante na área de Análise de Acidentes. Os reatores avançados prevêm a utilização de sistemas passivos de remoção de calor de emergência do núcleo por meio de circulação natural. O gás não-condensável se aloja, por gravidade, na parte superior do circuito (trocador de calor). Há um crescente interesse nos efeitos causados pela presença de gases não-condensáveis nesses circuitos de resfriamento. Cada vez há mais necessidade de uma correta avaliação do comportamento do escoamento de fluidos na presença de duas ou mais fases, pois estes afetam significativamente o desempenho de trocadores de calor, como acontece no sistema passivo de resfriamento de emergência do reator integrado IRIS. Para atender esse objetivo, um circuito experimental denominado Bancada de Circulação Natural (BCN) foi alterado para permitir a investigação e análise do comportamento de sistemas passivos de resfriamento de emergência em condições de escoamento bifásico envolvendo condensação na presença de gases não-condensáveis.

O trabalho apresenta 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. Em outro segmento são apresentados os resultados da calibração de potência e a verificação da calibração do medidor de vazão magnético, instalado na BCN. Finalizando são apresentados os primeiros resultados experimentais em circulação natural e na presença de gases não-condensáveis. São analisados a distribuição de temperaturas, o comportamento da vazão e da pressão. Os experimentos foram realizados pela aplicação de transitórios considerando um degrau de potência.

## 2. Descrição do circuito experimental

O arranjo mostrado na Fig. 1 representa a BCN que foi projetada 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 e uma linha de desvio (não utilizada nesse trabalho). A tubulação utilizada é de cobre tendo 22 mm de diâmetro externo e 0,6 mm de espessura. O circuito foi montado com conexões soldadas e uniões roscadas de 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. Para redução das restrições ao escoamento são utilizadas válvulas tipo esfera nas linhas principais do circuito. Para controle da vazão de resfriamento (secundário) do trocador de calor foi instalada uma válvula globo e um rotâmetro.



TC : termopar tipo T de 1,5 mm  
 TC : termopar tipo K de 0,5 mm

Figura 1. Esquema da Bancada de Circulação Natural – BCN.

O aquecedor elétrico é do tipo passagem direta, 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 um termostato de segurança. Inicialmente, o aquecedor elétrico, embora projetado para 10 kW, teve sua potência fornecida ao sistema limitada a 2.400 W com escoamento monofásico (Macedo, 2001). Para operar a BCN em regime bifásico, foi implementada uma alteração na potência do aquecedor elétrico de 2.400 W (3 resistências x 110 V) para 4.200 W (2 resistências x 220 V), para garantir um aumento na produção de vapor na perna quente.

O trocador de calor foi projetado com base em resfriadores de aplicação naval e em conceitos considerados no projeto do reator avançado AP-600 (Westinghouse, 2002). Foi totalmente construído em cobre, com dois tubulões de 1 3/4 pol. , interligados por 18 tubos de 3/8 pol. imersos em um reservatório com volume de 0,202 m<sup>3</sup>.

Quando a BCN era operada com escoamento monofásico (até 2.400 W), utilizava-se na linha principal do circuito um medidor de vazão tipo magnético, marca Sparling TIGERMAG, modelo FM 625, diâmetro 1/2 pol., ajustado para a faixa de vazão máxima de 0,1 kg/s e com transmissor com sinal de saída de 4 a 20 mA (Baptista Filho, 2002). Devido a observação sistemática do “zero” do medidor de vazão magnético depender da temperatura da bobina do sensor, induzindo a um erro de medida, o medidor de vazão magnético foi substituído por um de marca Krohne Conaut, também tipo magnético, modelo IFS4000W/6, diâmetro 10 mm e calibrado para uma faixa de vazão máxima de 300 l/h e com transmissor com sinal de saída de 4 a 20 mA. O vaso de expansão tem por finalidade acomodar as variações de volume da água no trecho primário da BCN devido as variações de temperatura. Ao longo do circuito foram instalados 24 termopares, sendo 5 do tipo T de 1,5 mm e 19 do tipo K (12 de 1,5 mm de diâmetro e 7 de 0,5 mm de diâmetro).

Para se medir a pressão em locais determinados na BCN, foram instalados dois sensores de pressão da marca Validyne, modelo DP 15. O sinal de saída varia de ±10 V. Os sensores de pressão Validyne caracterizam-se por apresentar excelente qualidade para trabalhos em laboratórios e, principalmente pela resposta extremamente rápida, justificando sua utilização na BCN com escoamento bifásico (Validyne, 2005). O sensor P1 (calibrado para uma faixa de pressão de 5.000 mm de coluna de água) está instalado na saída do aquecedor elétrico e medirá a flutuação de pressão na base da perna quente. O sensor P2 (calibrado para uma faixa de pressão de 2.000 mm de coluna de água) está instalado no nível do tubulão inferior do trocador de calor e medirá a pressão no tubulão superior do trocador de calor (ver Fig. 4).

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 LabVIEW (Bertolace, 2003). Esse sistema exibe e registra os dados de temperatura, medidor de vazão magnético, pressão e potência do aquecedor.

Com a BCN operando em escoamento bifásico e com a presença de gás não-condensável no trocador de calor, algumas alterações físicas foram necessárias, além do aumento da potência no aquecedor elétrico e da substituição do medidor de vazão magnético. As mudanças efetuadas são descritas a seguir.

## 2.1. Instrumentação

Para se obter a variação e o comportamento das temperaturas no interior (primário e secundário) do trocador de calor, foi projetado um dispositivo para fixação de termopares (DFT). Os termopares são fixados na superfície do tubulão superior (diâmetro de 1 3/4 pol.) do trocador de calor por meio de grampos de fixação, que fazem com que anéis O’ring apropriados se comprimam em um conector de latão e impeçam o vazamento de fluido. Os termopares a serem utilizados são da marca IOPE, tipo K, diâmetro 1,5 mm e são calibrados para uma faixa de trabalho de 20 °C a 95 °C. Testes preliminares realizados em um “protótipo” de DFT, indicaram que suportam uma pressão absoluta da ordem de 133 kPa. O esquema do DFT é mostrado na Fig. 2.

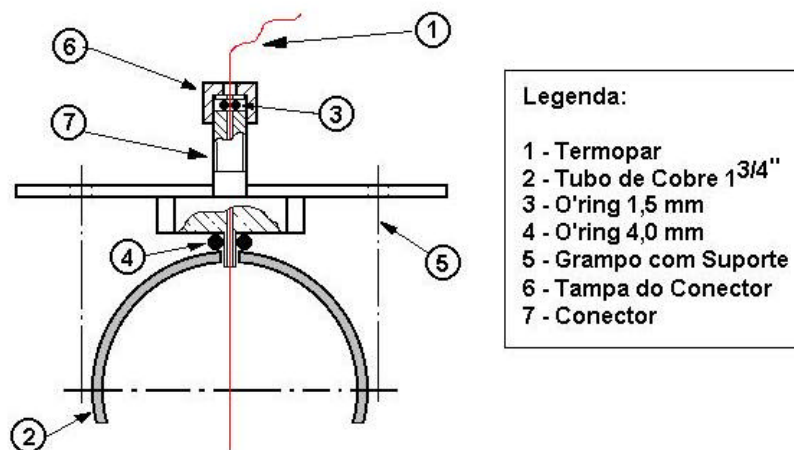


Figura 2. Esquema do DFT.

Os locais adotados para a colocação dos DFT's no tubulão superior do trocador de calor são mostrados na Fig. 3. No total serão 8 DFT's. Para o primário do trocador de calor foram escolhidas 7 posições para uso de termopares e uma será utilizada para respiro de ar no tubulão ("sangrar" o ar contido no tubulão – DFT 2). Os DFT's 1, 3, 5 e 8 permitem posicionar os termopares na superfície interna inferior do tubulão superior. Os DFT's 4 e 6 posicionam os termopares na região central dos tubos de diâmetro 3/8 pol.. O DFT 7 permite posicionar o termopar na saída do trocador de calor (tubulão inferior). Para se medir as temperaturas no secundário do trocador de calor, foram utilizados 3 termopares (TC23, TC24 e TC25), que estão imersos no fluido e suas posições em relação à altura, comprimento e largura do trocador de calor, poderão ser modificadas.

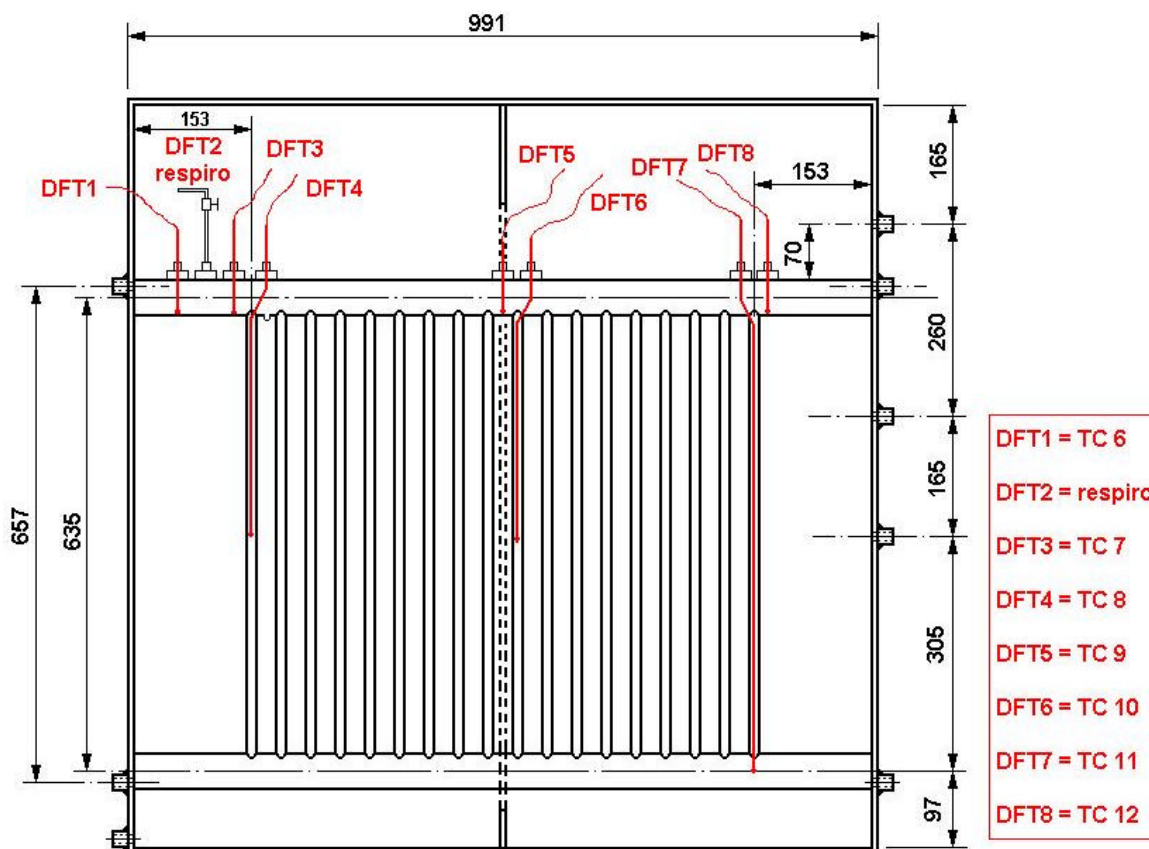


Figura 3. Localização dos DFT's com termopares no trocador de calor.

## 2.2. Dispositivos experimentais

Esse sistema possibilitará a reprodução na BCN dos fenômenos esperados na atuação de um sistema passivo de resfriamento de emergência do reator integrado IRIS ou de qualquer outro reator avançado refrigerado com água leve, após um acidente de perda de refrigerante que provoque o ingresso de não-condensáveis no circuito. A esse sistema estão associados o nível inicial de ar e a medida da pressão no trocador de calor, permitindo a caracterização do escoamento na presença de gás não-condensável (ar) por intermédio da vazão (medidor de vazão magnético), temperatura (termopares) e da pressão (sensor de pressão diferencial). A Figura 4 indica a posição do sistema de injeção de ar, do nível e do sensor de pressão diferencial (P2) na parte superior da BCN e a rotina experimental para a medição do nível inicial de ar no trocador de calor e da pressão inicial no tubulão superior do trocador de calor. O princípio utilizado para a determinação do nível inicial de ar no trocador de calor é o de "vasos comunicantes".

A medição do nível deve observar os procedimentos detalhados a seguir. As válvulas A (DFT2), B e C encontram-se abertas, conforme mostrado na Fig. 4 (A). O vaso de expansão é preenchido com água e a correspondente altura de água será indicada no nível (ver Fig. 4 (B)). Para se efetuar a medida da pressão diferencial (P2) em relação ao tubulão superior do trocador de calor, nivela-se a coluna de água negativa (-) do sensor de pressão com a linha de centro do tubulão superior do trocador de calor, por intermédio do "sangrador" do sensor de pressão. Em seguida, por intermédio das válvulas B ou C, permite-se que a água escoe para fora da tubulação, fazendo com que a altura da coluna de água seja o mesmo no vaso de expansão, no trocador de calor e na régua de nível (ver Fig. 4 (C)). As válvulas B e C são fechadas. A mangueira da coluna positiva (+) do sensor de pressão deve ser conectada à válvula A (DFT2) e, o vaso será novamente completado com água no nível desejado, estabelecendo uma pressão diferencial ( $\Delta P$ ) a ser medida no sensor P2 (ver Fig. 4 (D)). A altura de água que for medida na régua de nível, será a mesma que no tubulão superior do

trocador de calor. Os volumes iniciais de água e de ar podem ser calculados, uma vez que a geometria do trocador de calor é conhecida.

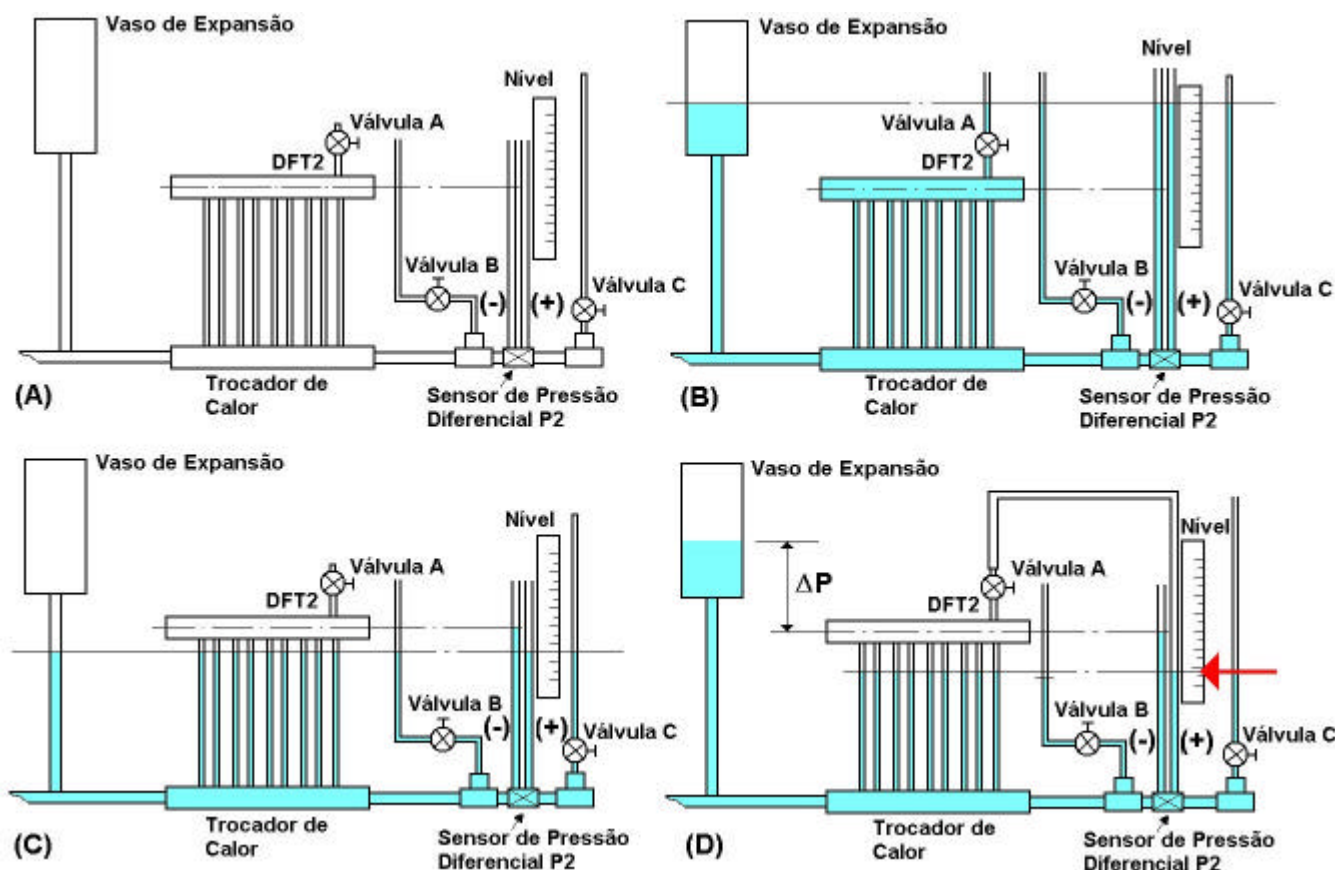


Figura 4. Sistema de injeção de ar no trocador de calor – nível inicial e pressão no trocador de calor.

### 2.3. Controle e aquisição de dados

Diferente dos modelos industriais, o controlador de potência foi especialmente projetado visando aplicações experimentais nas quais a contínua informação da potência fornecida é necessária para registro ou para ações de controle. Foi considerado ainda uma maior preocupação com a segurança dos pesquisadores envolvidos no trabalho.

A variação de potência é feita por meio de um sinal de tensão gerado na interface gráfica (LabVIEW) e enviado ao controlador pela placa de aquisição de dados. Esse sinal pode ser modulado de 0 a 7,5 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 5 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 110 °C e a abertura da porta do controlador de potência. O controlador desenvolvido pode trabalhar com cargas resistivas tanto em 110 V como em 220 V, devendo ser respeitada apenas a potência máxima.

O controlador de potência recebe o sinal de controle 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 (National, 1995), 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) menor 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 programa LabVIEW 6.1 (National, 2000), que é um ambiente de programação que permite o 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.

O esquema do sistema de aquisição de dados configurado para os experimentos é mostrado na Fig. 5. Com o LabVIEW 6.1 foi desenvolvido um programa para aquisição, apresentação e armazenamento dos dados da seguinte instrumentação da BCN: 19 termopares tipo K – sinal em mV, 5 termopares tipo T – sinal em mV, medidor de vazão magnético – sinal de 4 a 20 mA, potência do aquecedor – sinal de 0 a 7,5 V e 2 sensores de pressão diferencial – sinal de 0 a 10 V. A tela de interface para utilização do programa pelo usuário é indicada na Fig. 6. A tela de interface 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 de dados, o usuário fornece o valor da escala de vazão que está sendo utilizado no medidor de vazão do circuito, o sinal de tensão ( $V_a$ ) gerado na interface e enviado ao controlador pela placa de aquisição de dados (0 a 7,5 V) para a determinação da potência aplicada na BCN, a taxa de aquisição, a média desejada de pontos na aquisição e seleciona dois termopares para serem acompanhados de forma gráfica.

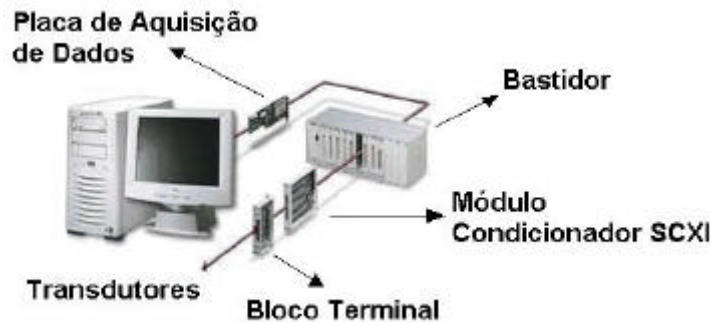


Figura 5. Sistema de aquisição de dados.

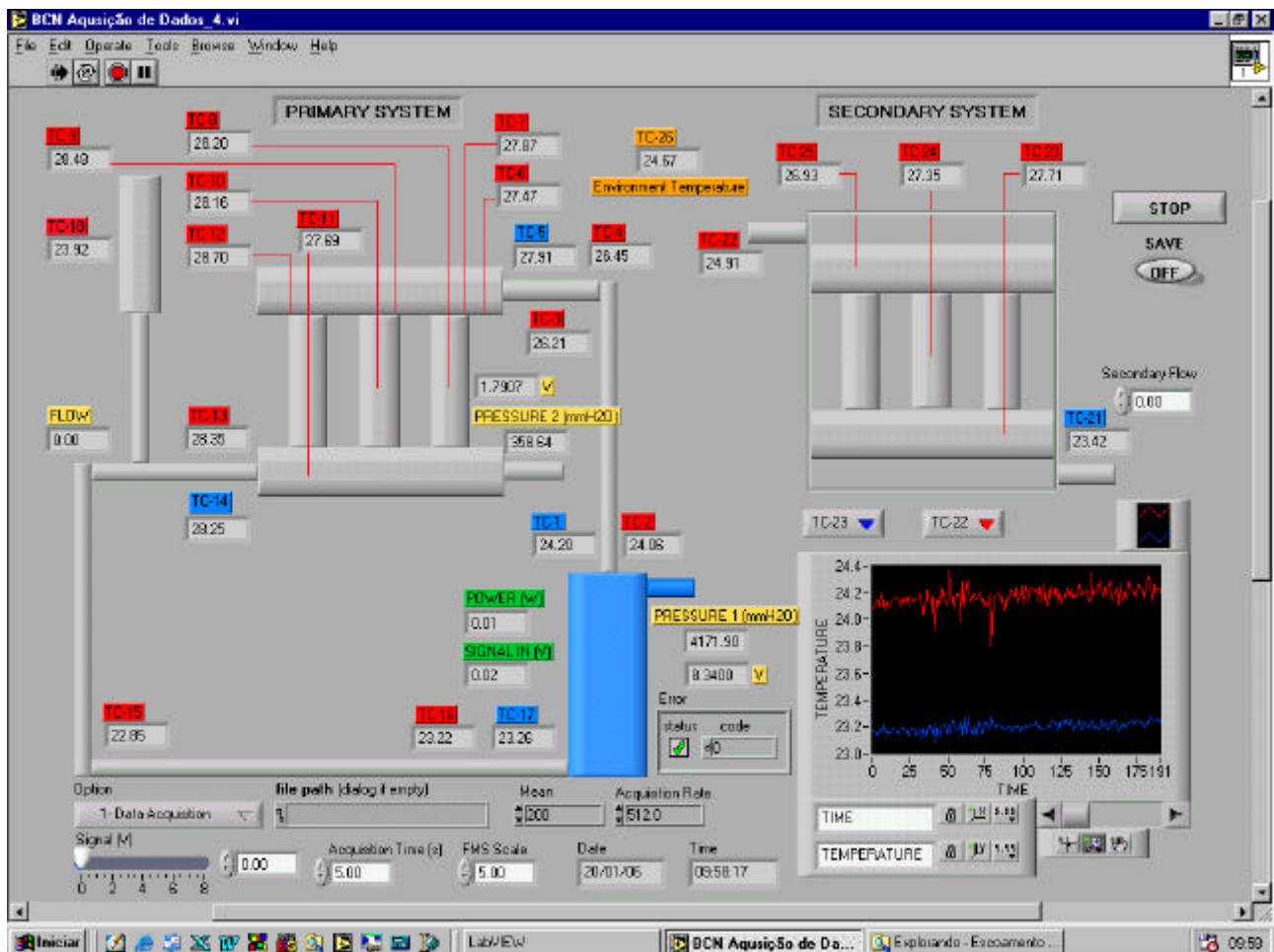


Figura 6. Tela de interface.

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. Deve ser fornecido o nome e a localização do arquivo onde serão armazenados os dados e acionar o botão ON (SAVE). O arquivo de saída registra a data, hora de início e fim da gravação, temperaturas em graus Celsius, vazão em l/min., potência do aquecedor em W e pressão em mm de coluna de água. Dessa forma, ao terminar o experimento, os dados poderão ser analisados utilizando-se programas adequados.

## 2.4. Calibração da potência

Para se medir a potência aplicada na BCN, utiliza-se um sinal de tensão  $V_a$  (gerado por meio da interface LabVIEW 6.1 no PC), que é enviado ao controlador de potência através da placa de aquisição de dados. Esse sinal não é linear e deve ser calibrado. A calibração foi realizada de duas formas distintas. A primeira consistiu de balanço térmico no aquecedor elétrico em regime permanente. A segunda foi feita pela verificação do sinal da saída no transformador (entrada das resistências elétricas) com um multímetro digital em relação a um sinal gerado no PC (interface LabView 6.1). A curva de potência fornecida (determinada de forma elétrica e térmica) em função do sinal aplicado ( $V_a$ ) é mostrada na Fig. 7. Com boa precisão, adotou-se a curva de potência elétrica para representar a calibração do sinal aplicado, que é representada pela Eq. (1).

$$P_{\text{fornecida}} = 0,0454V_a^5 - 3,984V_a^4 + 40,056V_a^3 - 21,34V_a^2 + 7,102V_a + 0,015 \quad (1)$$

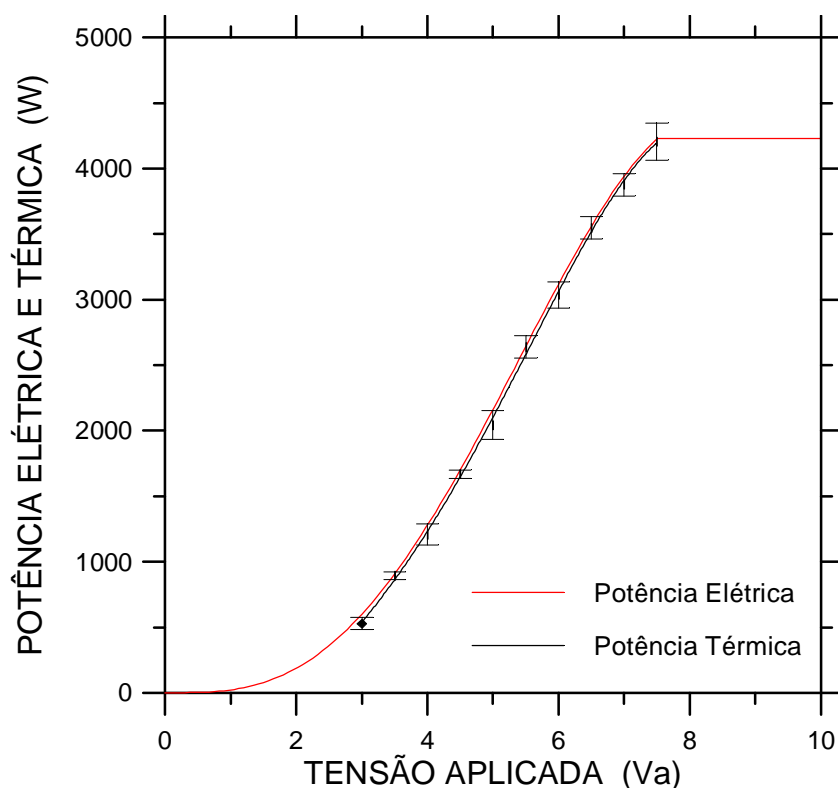


Figura 8. Potência fornecida ao sistema x tensão aplicada.

Observa-se que para um sinal superior a 7,5 V, ocorre “saturação” da potência, devido às limitações do controlador.

## 2.5. Calibração do medidor de vazão magnético

A BCN tinha instalado em sua linha principal, um medidor de vazão magnético marca Sparling TIGERMAG, modelo FM 625, com diâmetro  $\frac{1}{2}$  pol. e ajustado para a faixa de vazão máxima de 0,1 kg/s. Observou-se que o “zero” do medidor de vazão magnético dependia da temperatura da bobina do sensor. Apesar de pequena, essa variação é importante na faixa de vazão obtida em circulação natural. Para a correção desse problema, foi adquirido um medidor de vazão magnético marca Krohne Conaut, modelo IFS4000W/6 (com conversor de sinal IFC090K – sinal de saída de 4 a 20 mA), com diâmetro 10 mm e calibrado para uma faixa de vazão máxima de 300 l/h. A precisão do medidor de vazão magnético é  $\pm 0,33$  l/h (Krohne-Conaut, 2003). Após a instalação no circuito, foram realizadas duas aferições da calibração do medidor de vazão magnético, uma feita com fluido frio (temperatura = 25 °C) e a outra com o fluido quente (temperatura = 42 °C). A temperatura média do fluido foi medida pelo termopar TC11 (ver Fig. 9). O esquema da BCN para a realização da aferição é indicado na Fig. 9. A vazão medida no rotâmetro calibrado foi comparada com a

vazão registrada no medidor de vazão magnético. As vazões utilizadas foram: 26, 51, 70, 110, 132, 171, e 188 l/h. Os resultados obtidos são muito bons, mesmo não considerando a correção da densidade do fluido na medida do medidor de vazão magnético. A aferição do medidor de vazão magnético para o fluido quente é indicada na Fig. 10.

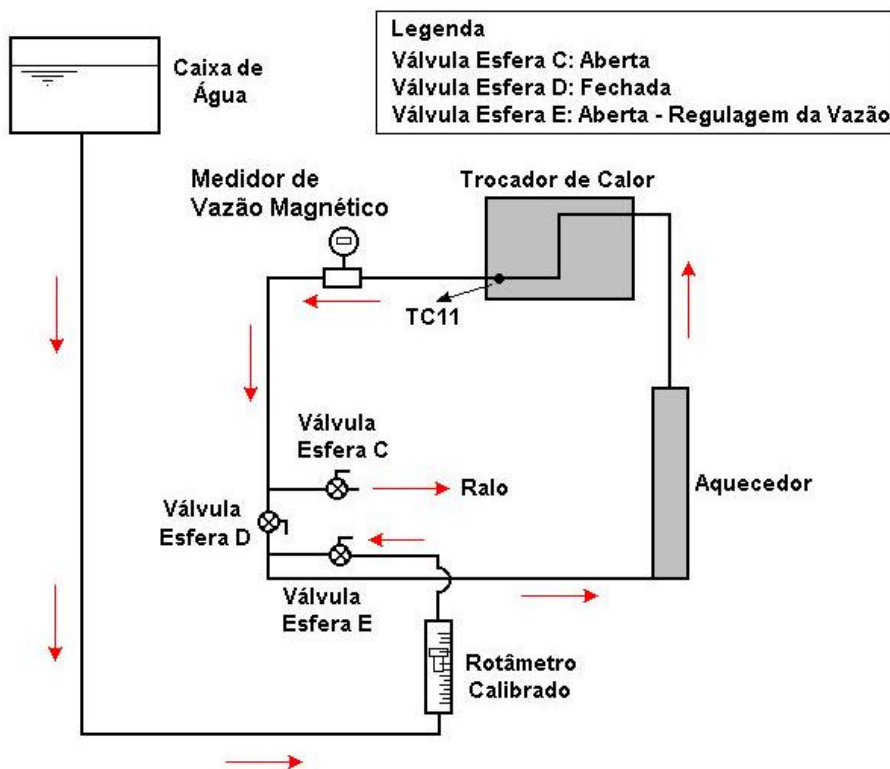


Figura 9. Esquema da BCN para aferição do medidor de vazão magnético.

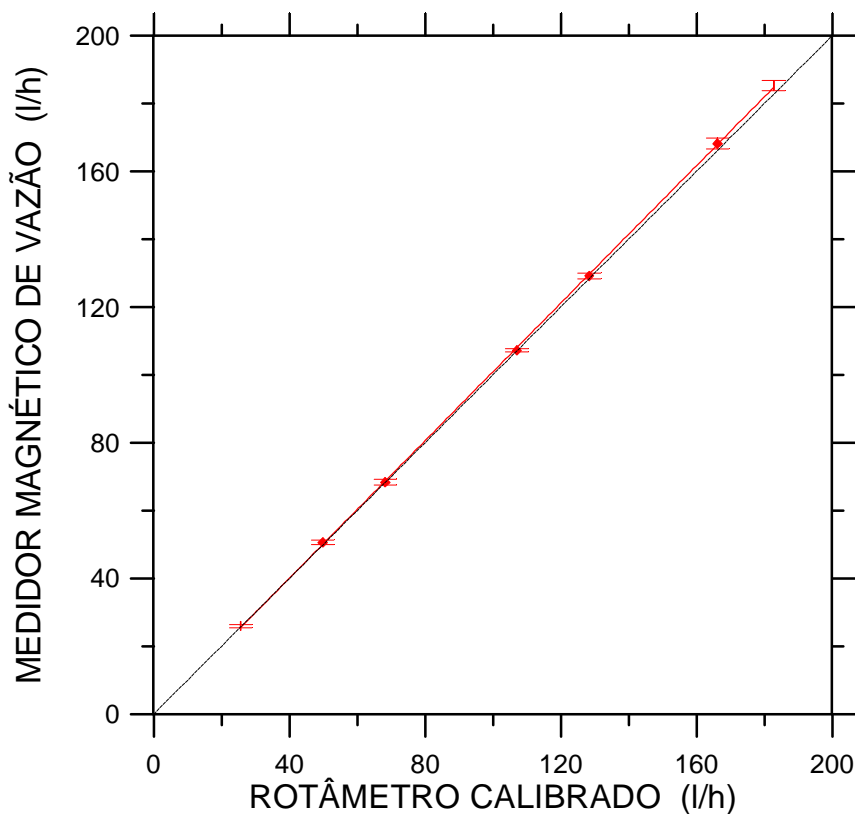


Figura 10. Aferição do medidor de vazão magnético com fluido quente (42 °C).



### 3. Resultados experimentais

O primeiro teste em circulação natural, na presença de gás não-condensável (ar), consistiu de um transitório de aumento de potência, partindo-se da condição inicial de fluido estacionário na temperatura ambiente. O experimento apresentado indica o período inicial do transitório (até 2.000 s). O esquema para a medida do nível inicial de ar no tubulão superior do trocador de calor da BCN é mostrado na Fig. 11. O nível de ar e a pressão (P2) iniciais foram respectivamente, 29 mm e 398 mm de coluna de água. Observou-se que a pressão medida pelo sensor P2 é bem próxima da medida geométrica entre a linha de centro do tubulão superior do trocador de calor e o nível de água no vaso de expansão (498 mm). Há um erro relativo de apenas 2,5 %. A precisão do sensor P2 é de  $\pm 5$  mm (0,25 % do fundo de escala). Se considerarmos a medida inicial registrada pelo sensor P2 (398mm) mais ou menos a incerteza do instrumento ( $\pm 5$  mm), teremos uma faixa de valores para a pressão que varia de 393 mm a 403 mm. A diferença entre a medida geométrica e a medida registrada pelo sensor P2, considerando a incerteza do instrumento, varia de 5 mm a 15 mm. Esses valores são bem aceitáveis, levando-se em conta, possíveis desníveis de alinhamento na montagem dos componentes da BCN. A equação dos gases perfeitos (Van Wylen, 1976), indicada pela Eq. (2), foi utilizada para o cálculo da massa inicial de ar (considerando o ar como um gás de baixa densidade).

$$P_i = \rho_i R T_i \quad (2)$$

onde  $P_i$  é a pressão absoluta (Pa),  $\rho_i$  é a densidade ( $\text{kg/m}^3$ ),  $R$  é a constante do gás ( $\text{ar} = 286,9 \text{ J/kg.K}$ ) e  $T_i$  é a temperatura (K). Como as medidas geométricas do trocador de calor são conhecidas, pode-se determinar a massa inicial de ar, que é igual a  $1,145 \times 10^{-3} \text{ kg}$ .

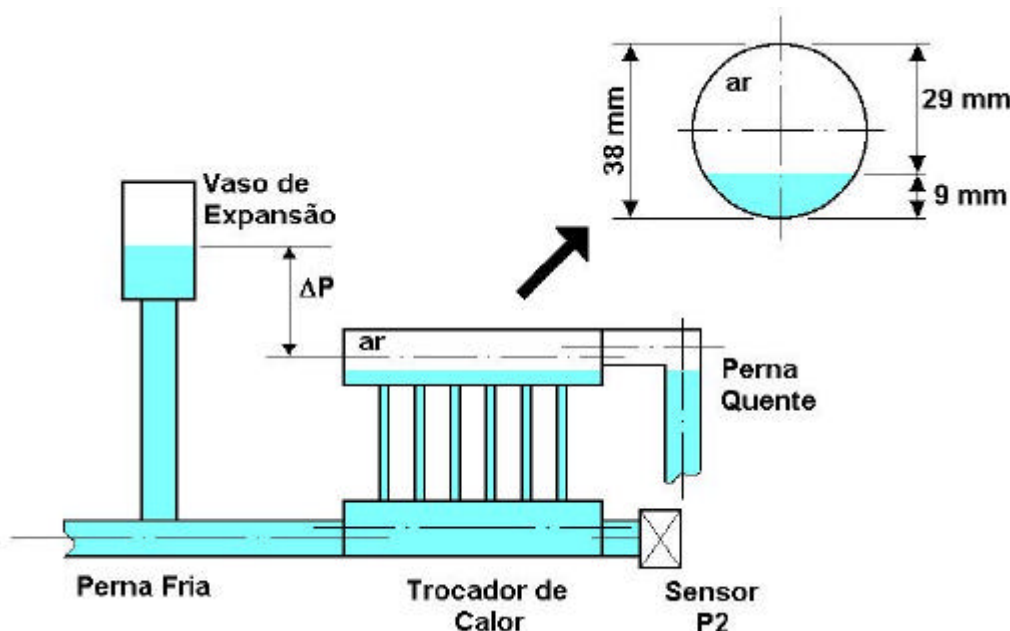


Figura 11. Nível inicial de ar no trocador de calor da BCN.

O degrau de potência foi de aproximadamente 1.400 W e foi aplicado no instante 154 s. A temperatura ambiente (TC26) ao longo do transitório foi de 15,6 °C. A vazão de resfriamento no trocador de calor foi de 78 l/h. A temperatura de saída do aquecedor elétrico (TC1), a vazão e a pressão no tubulão superior do trocador de calor (P2) são mostradas na Fig. 12. Com a aplicação da potência, a temperatura de saída do aquecedor elétrico (TC1) aumenta, variando de 16,4°C até 96,3°C. Do instante 154 s até aproximadamente 1.300 s, a temperatura TC1 apresenta um comportamento típico de “convecção natural”, com linhas de escoamento ascendentes (líquido quente) e descendentes (líquido frio) próximas às resistências do aquecedor elétrico. Nesse intervalo de tempo, com a ausência de vazão, há um pequeno acréscimo de 3,8 °C na temperatura de entrada do aquecedor elétrico (TC17), em função da transmissão de calor por condução na tubulação (região inferior do aquecedor elétrico). No intervalo de 1.300 s a 1.550 s, a temperatura TC1 apresenta uma taxa de aumento inferior ao período anterior, indicando um comportamento inicial de circulação natural. Estabelece-se um valor extremamente pequeno de vazão, não registrado pelo medidor de vazão magnético, mas suficiente para acontecer circulação de água na BCN. A queda na temperatura TC17 confirma o estabelecimento de uma pequena vazão, com a entrada de líquido frio no aquecedor elétrico. Essa pequena vazão inicial ocorre, pois existem oscilações no escoamento de água na parte superior do circuito (final da perna quente e entrada do trocador de calor), devido a mudanças de volume de fluido na perna quente da BCN, que são causadas por variações de

temperatura. O comportamento da temperatura TC17 mantém-se inalterado até o fim do transitório. A partir de 1.550 s, a temperatura TC1 aumenta até atingir o valor máximo de 96,3 °C, apresentando uma taxa de aumento menos acentuada, em função da vazão no circuito. O registro de vazão indica um valor máximo de 0,0118 kg/s no instante 1.690 s. A partir desse momento, os valores de vazão ficam progressivamente menores ao longo do transitório, até o instante 1.850 s, quando a vazão tende a aumentar novamente. Com o estabelecimento de circulação natural, a vazão segue o comportamento esperado, ou seja, existe uma maior aceleração no início, enquanto a perna quente está sendo preenchida com água aquecida e a perna fria ainda está totalmente preenchida com água mais fria. Há uma estabilização decorrente no trecho horizontal da parte superior da BCN e em seguida, um declínio na vazão quando a perna fria começa a receber água mais quente, o que diminui o potencial para circulação.

Observa-se que a pressão P2 aumenta quase que linearmente, de 398 mm para 418 mm de coluna de água, a partir o início do experimento até o instante 1.650 s. Com o aumento da vazão no circuito, a taxa de aumento da pressão P2 é maior, atingindo um valor de 417 mm de coluna de água. Com a diminuição da vazão, a taxa de aumento da pressão é menor, alcançando um valor máximo de 422 mm de coluna de água, no instante 2.000 s. A medida da pressão P2 indica a variação do volume de água e do ar no sistema, causado pela mudança de temperatura.

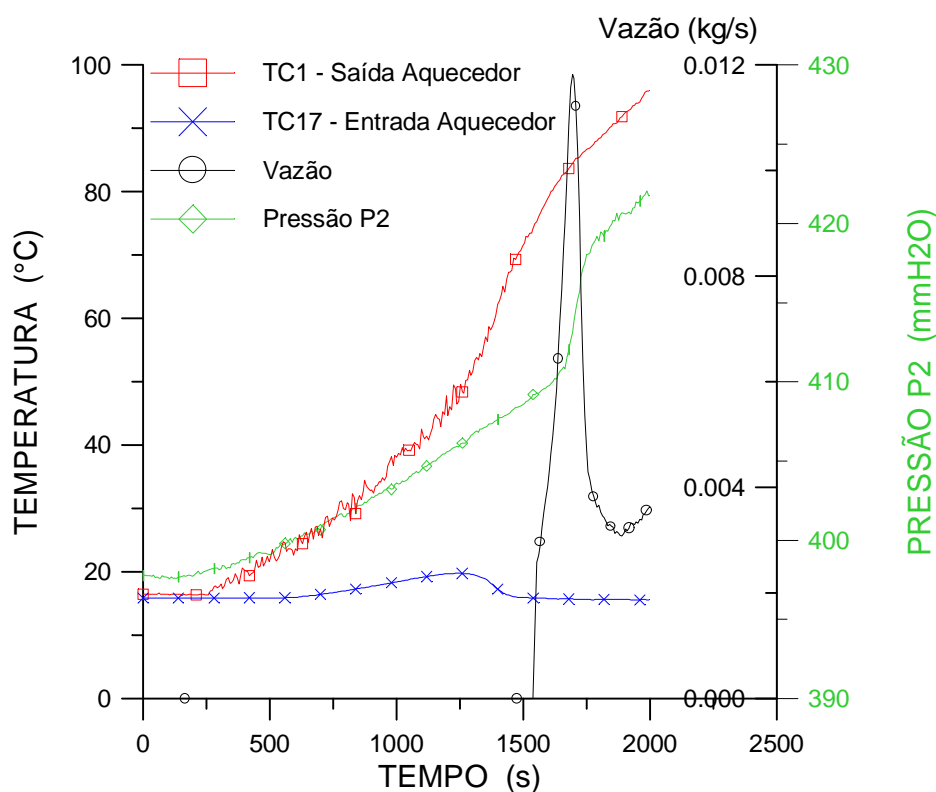


Figura 12. Temperatura TC1, vazão e pressão P2 ao longo do transitório.

#### 4. Conclusões

Os resultados obtidos no teste realizado na BCN foram suficientes para demonstrar que o circuito é adequado para os propósitos experimentais a que foi projetado, considerando que 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 magnético e para garantir um aumento da fração de vazão na perna quente (operação com escoamento bifásico).

O sistema de controle de potência e o sistema de aquisição de dados operaram adequadamente dentro do esperado, demonstrando estabilidade e precisão.

Apesar do experimento não ter atingido o regime permanente, mas considerando o fato de ter sido utilizada uma vazão de resfriamento bem inferior que a máxima possível para o trocador de calor, pode ser previsto que tanto a capacidade quanto a eficácia térmica do trocador de calor são adequados para a realização dos testes como idealizados.

Esta fase inicial demonstrou que a utilização de transdutores de pressão com relutância variável (Validyne) são adequados para instalações experimentais em circulação natural, desde que tomadas precauções adicionais como a correta e cuidadosa montagem do instrumento no circuito.

As próximas atividades na BCN prevêem a realização de diversos experimentos, considerando-se três níveis de potência a serem aplicados: baixo (1.500 W), médio (2.500 W) e alto (3.500 W). A quantidade inicial de ar no trocador de calor será variada para cada nível de potência.

## 5. Referências

- Aranha, F., "IRIS: O futuro é agora", Revista Brasil Nuclear n° 23, Abril-Set., 2001.
- Baptista Filho, B. D., Macedo, L. A., "Controle de Sistemas Passivos em Circulação Natural Por Meio de Linhas de Desvio", XIII ENFIR – National Meeting of Reactors Physics and Thermal Hydraulics, Rio de Janeiro, RJ, 2002.
- Bertolace, A. L. C., Baptista Filho, B. D., Implementação de Programa de Redes Neurais, em LabView, para Controle de Potência do Aquecedor da Bancada de Circulação Natural, XI Simpósio Internacional de Iniciação Científica da USP (SIICUSP), São Carlos, SP, 2003.
- Chung, Y. J., Yang, S. H., Kim, H. C., Zee, S. Q., "Thermal Hydraulic Calculation in a Passive Residual Heat Removal System of the SMART-P Plant for Forced and Natural Convection Conditions", Nuclear Engineering and Design, Vol. 232, pp. 277-288, 2004.
- Krohne – Conaut, "Manual de Medidores Magnéticos Indutivos de Vazão", Ver. 03/02, 24 p., São Paulo, SP, 2003.
- Macedo, L. A., "Controle de Sistemas Passivos de Resfriamento de Emergência de Reatores Nucleares por Meio de Linhas de Desvio", Dissertação de Mestrado, IPEN-CNEN/SP, São Paulo, 2001.
- National Instruments, "Instrumentation Reference and Catalogue - Test and Measurement Process Monitoring and Control", May Edition, USA, 1995.
- National Instruments, "LabVIEW User Manual", July Edition, USA, 2000.
- Polimi – Universidade Politécnica de Milão, "Projeto IRIS", disponível em <http://www.hulk.cesnef.polimi.it>, Itália, Abril, 2003.
- Uranium Information Centre – UIC, "Generation IV Nuclear Reactors", New Reactor Technology, UIC Briefing Paper # 77, Melbourne, Australia, disponível em <http://www.uic.com.au/nip77.htm>, 2002.
- Uranium Information Centre – UIC, "Small Nuclear Power Reactors", New Reactor Technology, UIC Briefing Paper # 60, Melbourne, Australia, disponível em <http://www.uic.com.au/nip60.htm>, 2003.
- Westinghouse Electric Company, "Nuclear Reactor AP600 – 600 MW", disponível em: <http://www.ap600.westinghousenuclear.com>, USA, 2002.
- Validyne Engineering, "DP15 Pressure Measurement System", disponível em: <http://www.validyne.com>, USA, 2005.
- Van Wylen, G. J., Sonntag, R. E., "Fundamentos da Termodinâmica Clássica", tradução da 2.<sup>a</sup> edição americana, Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo, SP, 1976.

### **EXPERIMENTAL FACILITY WITH TWO-PHASE FLOW AND WITH HIGH CONCENTRATION OF NON-CONDENSABLE GASES FOR RESEARCH AND DEVELOPMENT OF EMERGENCY COOLING SYSTEM OF ADVANCED NUCLEAR REACTORS**

Luiz Alberto Macedo

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP – Av. Prof. Lineu Prestes, 2242, São Paulo - SP  
lamacedo@ipen.br

Benedito Dias Baptista Filho

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP – Av. Prof. Lineu Prestes, 2242, São Paulo - SP  
bdbfilho@ipen.br

#### **Abstract**

The development of emergency cooling passive systems of advanced nuclear reactors requires the research of some relative processes to natural circulation, in two-phase flow conditions involving condensation processes in the presence of non-condensable gases. This work describes the main characteristics of the experimental facility called Bancada de Circulação Natural (BCN), designed for natural circulation experiments in a system with a hot source, electric heater, a cold source, heat exchanger, operating with two-phase flow and with high concentration of non-condensable gas, air. The operational tests, the data acquisition system and the first experimental results in natural circulation are presented. The experiments are transitory in natural circulation considering power steps. The distribution of temperatures and the behavior of the flow and of the pressure are analyzed. The experimental facility, the instrumentation and the data acquisition system demonstrated to be adapted for the purposes of research of emergency cooling passive systems, operating with two-phase flow and with high concentration of non-condensable gases.

Keywords: natural circulation, two-phase flow, condensation with non-condensable gases, advanced reactors.