

CARACTERIZAÇÃO DA BANCADA DE CIRCULAÇÃO NATURAL DE SISTEMAS DE RESFRIAMENTO DE EMERGÊNCIA EM REATORES NAVAIS E EM REATORES AVANÇADOS

Luiz Alberto Macedo

Benedito Dias Baptista Filho

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares IPEN-CNEN/SP, Divisão de Termo-Hidráulica
Cx. Postal 11049, CEP 05422-970, São Paulo SP, Brasil. E-mail : lamacedo@net.ipen.br

Resumo

O desenvolvimento de sistemas passivos de resfriamento de emergência de reatores avançados ainda depende de investigações de alguns processos de circulação natural. A Bancada de Circulação Natural do IPEN foi concebida para a realização de estudos considerando linhas de desvio, que interligam a saída da fonte fria com a saída da fonte quente. Este trabalho, além de descrever a bancada e resumir suas características de projeto, apresenta resultados da sua caracterização hidráulica, consistindo de medidas de perda de pressão e sua correlação em termos de fatores de atrito, apresenta ainda resultados de testes de calibração do sistema de medição de potência e de vazão e, dos primeiros experimentos em circulação natural. Esses experimentos envolveram transitórios em circulação natural com a aplicação de degraus de potência. Os resultados mostraram um comportamento não linear do medidor de vazão magnético, bem como uma dependência com a temperatura do fluido. O conjunto: circuito/instrumentação/sistema de aquisição de dados é adequado para os propósitos de pesquisa de sistemas passivos de resfriamento de emergência.

Palavras-chave: Circulação Natural, Segurança Passiva, PWR, ALWR.

1. INTRODUÇÃO

Aspectos econômicos e de segurança dirigiram o setor nuclear ao desenvolvimento de novos conceitos de reatores nucleares e de sistemas de segurança. Há alguns anos se iniciou o desenvolvimento dos conceitos de “reatores avançados,” com a introdução de aperfeiçoamentos tecnológicos, plantas com elevada padronização, redução na demanda de controle, redução na demanda de suprimento de energia elétrica de emergência, e o uso de componentes mais robustos, ou seja, imunes a falhas, conforme Layman *et al.* (1991). Na linha dos reatores de água pressurizada (PWR) destaca-se a adoção de conceitos de reatores navais militares que utilizam sistemas de resfriamento de emergência com características passivas, utilizando o fenômeno da circulação natural. O presente trabalho descreve uma bancada para experimentos em circulação natural (BCN) e resume suas características de projeto. Além disso apresenta os resultados da caracterização hidráulica da bancada, que consistiram em medidas de perda de pressão em diversos trechos, sua correlação em termos de fatores de atrito, os resultados de testes de calibração do sistema de medição de potência e o primeiro resultado de experimento em circulação natural. Esses resultados tratam de transitórios em circulação natural a baixas potências (até 2300 W), com a aplicação de degrau de potência iniciado em condições de equilíbrio. Existem diversos trabalhos sobre circulação natural, tais como apresentados por Zvirin, 1981 e Lavrador, 1994. As principais diferenças entre esses

trabalhos e os propostos para a BCN estão na utilização de linhas de desvio entre a fonte quente e a fonte fria, para controle de temperatura e, na concepção do trocador de calor. Os resultados utilizando as linhas de desvio não são apresentados nesse trabalho.

2. DESCRIÇÃO DA BANCADA

O Circuito de Circulação Natural apresentado em Baptista F. *et al.*(1999) e representado esquematicamente na Figura 1, foi concebido nos moldes de um sistema de remoção de calor residual de um reator PWR avançado. É composto de um aquecedor elétrico e um trocador de calor constituído por dois tubulões horizontais com um feixe vertical de tubos imersos em um tanque de água. O trocador de calor é alimentado por gravidade a partir de um 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 é de cobre, com 22 mm de diâmetro externo e 0,6 mm de espessura. O aquecedor e todas as tubulações são isolados com calhas de lã de vidro de 25 mm de espessura, encamisadas com alumínio. As válvulas instaladas nas linhas principais do circuito são do tipo esfera. Para o controle da vazão no secundário do trocador de calor foi instalada uma válvula globo e um rotâmetro devidamente calibrado.

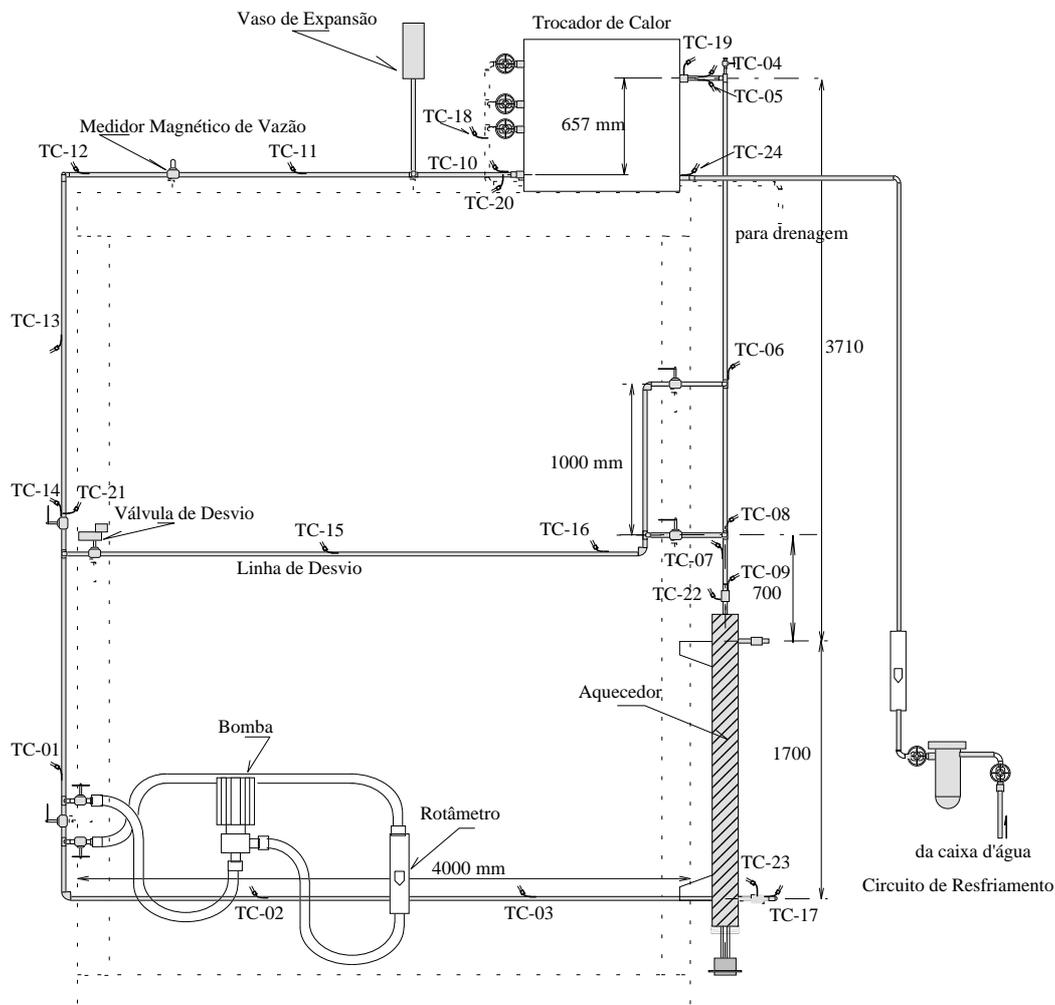


Figura 1. Esquema do Circuito de Circulação Natural

O aquecedor elétrico, projetado para uma potência máxima de 10 KW, é de aço inoxidável austenítico e possui três resistências tubulares em “U”. O trocador de calor 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. 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, contendo uma válvula 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. Ao longo do circuito foram instalados 24 termopares (TC), sendo 5 do tipo T de 1,5 mm e 19 do tipo K de 0,5 mm de diâmetro. O acompanhamento e registro das temperaturas e da vazão é feito por um sistema de aquisição de dados em plataforma PC. 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 um transmissor de pressão diferencial tipo capacitivo. O controle de potência é realizado por meio de uma fonte de alimentação variável. 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, um computador (PC), um bloco terminal isolado, um módulo condicionador de sinais e um bastidor.

3. RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA

A caracterização hidráulica do circuito foi feita circulando-se água ao longo de cada trecho, conforme Figura 2, onde se queria determinar a perda de carga (ΔP) para se determinar coeficientes de perda de pressão ou de atrito. As medidas de ΔP nos diversos trechos foram realizadas com um transmissor de pressão diferencial na faixa de 0 a 130 mmH₂O. Com as quatro tomadas de pressão foram selecionados onze (11) trechos de interesse. Os comprimentos equivalentes para perda de pressão (L_{eq}) obedecem a:

$$\Delta P = f L_{eq} / D_h \rho v^2 / 2 \quad (1)$$

onde ΔP é a perda de pressão (N/m²), f o fator de atrito, L_{eq} o comprimento equivalente (m), D_h o diâmetro hidráulico (m), ρ a massa específica da água (kg/m³) e v a velocidade de escoamento (m/s).

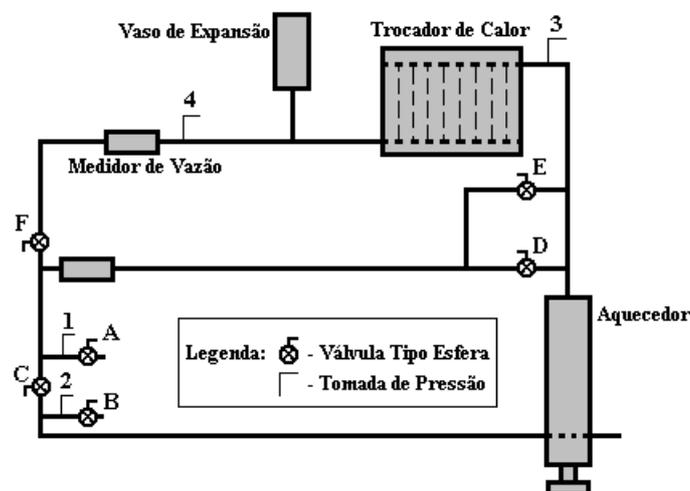


Figura 2 - Elementos para Caracterização Hidráulica da Bancada

Para correlacionar o fator de atrito (f) foi seguido o seguinte procedimento: em cada trecho selecionado foi variada a vazão, medida por meio de um rotâmetro previamente calibrado; a partir do início da faixa de medição do transmissor de pressão, iniciou-se o registro da correspondente perda de pressão; em cada condição foi registrada a temperatura da água para determinação das suas propriedades físicas; conhecida a vazão (Q), a perda de carga (ΔP), e as propriedades da água e, para o comprimento equivalente de cada trecho (L_{eq}), baseados em dados tabelados conforme Crane (1977), foi utilizada a Eq.(1) para se obter o valor do fator de atrito (f). Esse procedimento foi repetido para cada trecho (Tabela 1).

Tabela 1 - Trechos Selecionados da Bancada

Trecho	Vazão (kg/h)	Válvula A	Válvula B	Válvula C	Válvula D	Válvula E	Válvula F
2 - 1	23 - 167	Aberta	Aberta	Fechada	Fechada	Fechada	Aberta
2 - 3	25 - 207	Aberta	Aberta	Fechada	Fechada	Fechada	Aberta
3 - 4	25 - 206	Aberta	Aberta	Fechada	Fechada	Fechada	Aberta
4 - 1	26 - 123	Aberta	Aberta	Fechada	Fechada	Fechada	Aberta
1 - 2	25 - 167	Aberta	Aberta	Aberta	Fechada	Fechada	Fechada
2 - D - 1	25 - 210	Aberta	Aberta	Fechada	Aberta	Fechada	Fechada
2 - E - 1	28 - 220	Aberta	Aberta	Fechada	Fechada	Aberta	Fechada

A Figura 3 exemplifica o correlacionamento da perda de carga (ΔP) com o Número de Reynolds (Re) apresentando os resultados para o trecho 2-1 da Bancada. Podemos observar a mudança de comportamento da perda de carga no ponto em torno de $Re \approx 1500$.

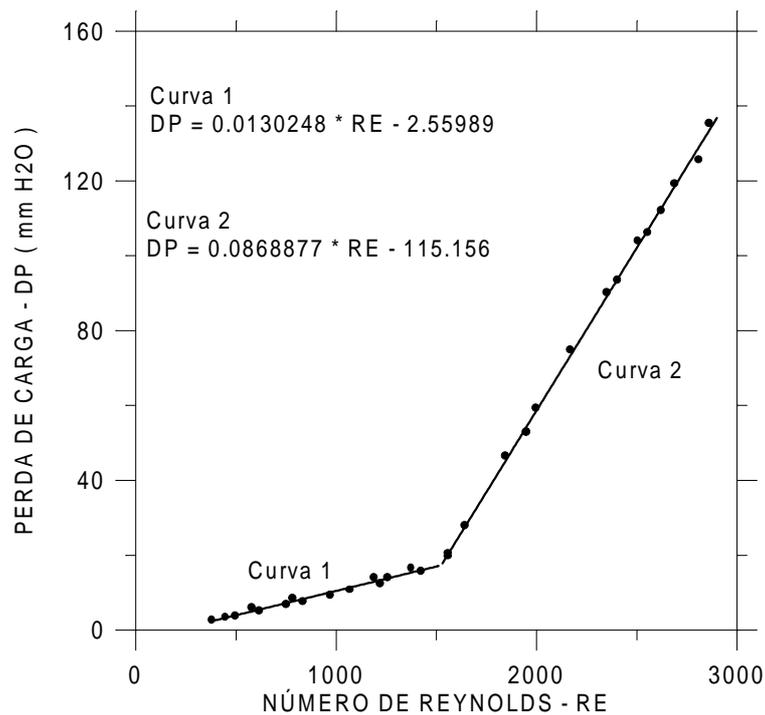


Figura 3 - Gráfico Perda de Carga vs. Número de Reynolds – Trecho 2 – 1

Na Figura 4 são mostrados os resultados na forma de correlação do fator de atrito. Observa-se que 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 ($f=64/Re$). Na zona de transição ($Re = 2000$ a 3000) a curva tende a manter o comportamento esperado porém atingindo valores pouco inferiores aos da curva de Blasius.

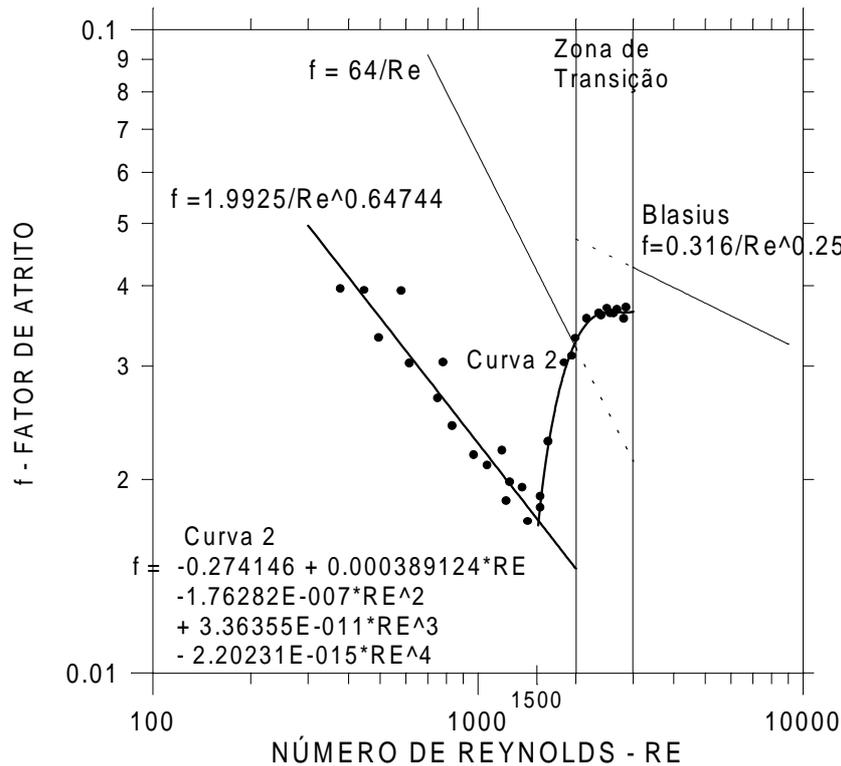


Figura 4 - Gráfico Fator de Atrito (f) vs. Número de Reynolds (Re) – Trecho 2-1

As correlações obtidas permitiram observar que o coeficiente de atrito é intrínseco à bancada, sendo dependente de características geométricas. Conclusões similares foram apresentadas por Zvirin, 1981.

4. CALIBRAÇÃO DE POTÊNCIA ELÉTRICA

A potência elétrica é registrada a partir de um sinal enviado pelo variador de potência ao sistema de aquisição de dados, sendo necessário uma calibração feita por meio de balanço térmico no aquecedor, em regime permanente. Foram realizados vários testes nos quais, para uma dada vazão e após constatação de regime permanente, eram registradas as temperaturas de entrada e saída do fluido no aquecedor (termopares TC-23 e TC-22 da Figura 1). Uma vez conhecidas as temperaturas são calculadas as entalpias do fluido na entrada e saída do aquecedor, e determinada a potência térmica. A Tabela 2 e a Figura 5 mostram os resultados dos testes que permitiram estabelecer uma relação matemática entre a potência elétrica medida (P) e potência térmica (PT) correspondente:

$$PT = 1101,11 - 3,36037P + 0,0053635P^2 - 2,46258 \cdot 10^{-6} P^3 + 3,81456 \cdot 10^{-10} P^4 \quad (2)$$

5. CALIBRAÇÃO DO MEDIDOR DE VAZÃO

Observou-se que o “zero” do medidor magnético de vazão depende da temperatura do sensor (há um “drift”). Apesar de pequena, essa variação é importante na faixa de vazão obtida em circulação natural. Para essa calibração foram realizados testes variando a temperatura da água, e correlacionando os resultados com a temperatura da superfície externa do tubo, lida através do termopar TC-11. Esta curva de calibração é mostrada na Figura 6.

Tabela 2 - Medidas de Potência Elétrica e Potência Térmica no Aquecedor

Vazão Calibrada (kg/h)	Potência Elétrica (W)	Potência Térmica (W)	Vazão Calibrada (kg/h)	Potência Elétrica (W)	Potência Térmica (W)
49.57142	478,8758	438,8363	76.62865	2037,572	2253,46
40.55234	526,3383	482,1864	40.55234	505,4192	468,8121
55.58414	548,757	513,5013	49.57142	565,3466	546,6509
68.61169	531,8062	488,739	45.56294	1509,442	1702,605
68.61169	622,0453	576,5872	59.59262	1930,816	2127,695
68.61169	839,3052	801,3026	89.65622	2221,587	2413,641
78.6329	957,3925	940,3346	90.65834	1255,77	1397,601
78.6329	1015,583	1035,852	92.66257	1391,145	1652,478
37.54598	941,5403	898,6062	92.66257	1614,425	1920,87
49.57142	960,7579	992,1406	92.66257	1771,631	2101,329
77.63078	964,6798	962,2681			

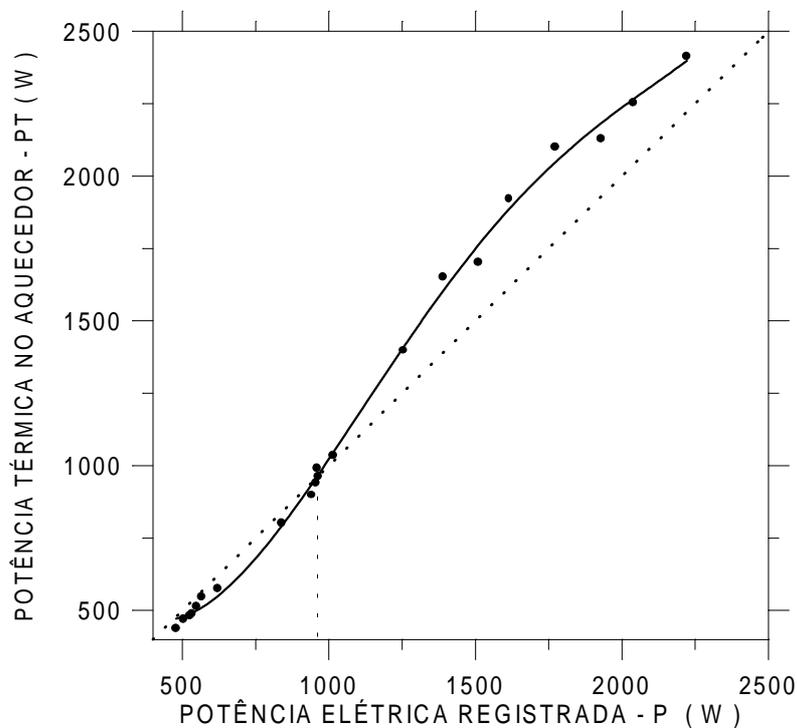


Figura 5 - Curva de Calibração de Potência da Bancada

6. EXPERIMENTO EM CIRCULAÇÃO NATURAL

Neste item é apresentado o primeiro experimento em circulação natural realizado após a calibração. O experimento consistiu de dois transitórios de aumento de potência, partindo-se da condição inicial de fluido parado na temperatura ambiente, e concluído antes de ser atingido o regime permanente com o desligamento do aquecedor. O primeiro degrau de potência foi de aproximadamente 1.500 W e o segundo elevou a potência a aproximadamente 2.200 W. Após duas horas do início o aquecedor foi desligado, sendo mantido o resfriamento e registrados os dados por mais 1:40h. As temperaturas registradas na entrada e saída do aquecedor ao longo do transitório são mostradas na Figura 7. Os valores registrados de potência e vazão, bem como a potência térmica fornecida ao fluido pelo aquecedor, calculada

por meio de balanço térmico, são mostrados na Figura 8. A potência térmica calculada, mostrada no diagrama da Figura 8, confirma que o sistema não atingiu regime permanente.

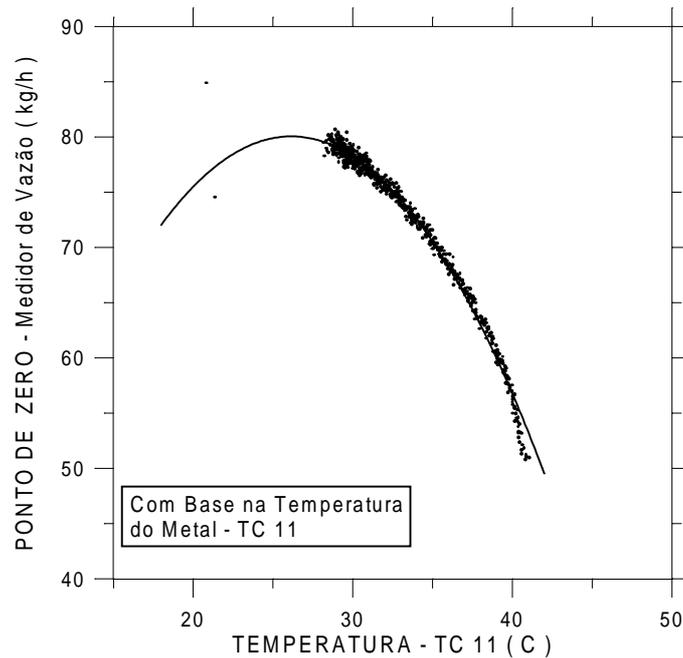


Figura 6 - Calibração do Ponto de Zero do Medidor de Vazão

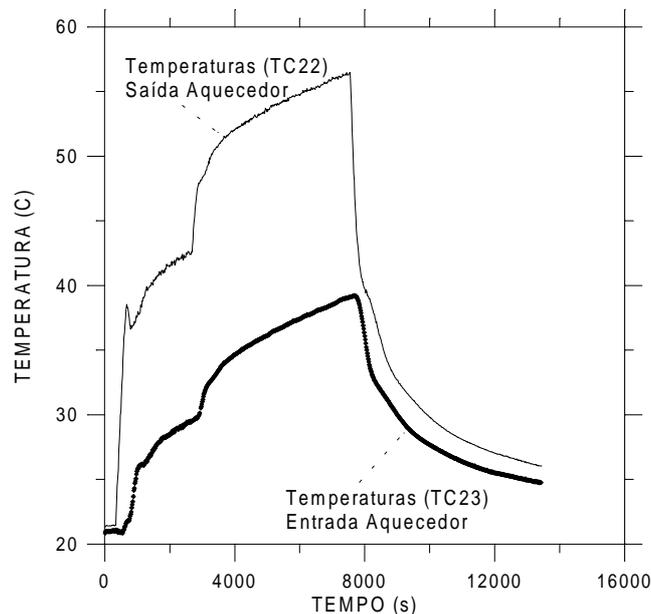


Figura 7 – Temperaturas de Entrada e Saída do Aquecedor ao longo do Transitório

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos na operação em circulação natural, após a calibração da bancada, demonstram que a instrumentação do circuito está adequada para os seus propósitos experimentais. 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. 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 a capacidade do trocador de calor é adequada para a realização dos experimentos idealizados. O sistema de controle de potência e o sistema de aquisição de dados operaram adequadamente, demonstrando precisão e estabilidade. Esta fase inicial demonstrou que medidores magnéticos de vazão são adequados para instalações experimentais em circulação natural, desde que tomados cuidados adicionais para sua calibração em função da temperatura. Essa conclusão deu início a uma nova pesquisa sobre utilização de medidores magnéticos sob condições de temperatura variável. Os resultados confirmaram ainda conclusões de outros autores quanto à diferença dos fatores de atrito, comprovando a necessidade de caracterização hidráulica de cada circuito experimental.

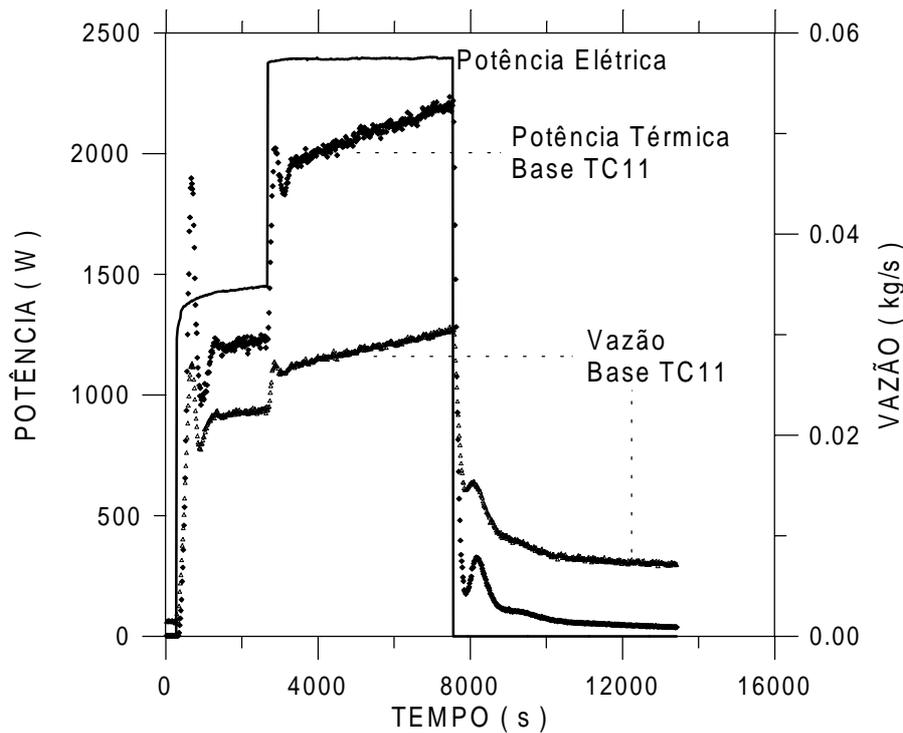


Figura 8 - Comparação entre Potências e Vazão ao longo do Transitório

6. REFERÊNCIAS

- Baptista F., B.D., Gonçalves, I.M.P., Macedo, L.A., Almeida, J.C. e Santos, S.C., 1999, “Circuito Experimental para Pesquisa de Sistemas de Resfriamento de Emergência de Reatores Avançados”, VII Congresso Geral de Energia Nuclear – CGEN, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.
- Crane Co., 1977, “Flow of Fluids through Valves, Fittings and Pipes”, England.
- Layman, W. H., Marston, T. U. e Sugnet, W. R., 1991, “Update on the ALWR Program: The Future of Nuclear Power in the USA”, Nuclear Engineering International, Advanced Reactors, USA, pp.23-31.
- Lavrador, M. B. , 1994, “Análise Experimental de Circulação Natural em um Circuito Fechado”, Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Zvirin, Y., 1981, “A Review of Natural Circulation Loops in Pressurized Water Reactors and Others Systems” , Nuclear Engineering and Design 67, p. 203-225, North Holland Publishing Company.