

## A ADEQUAÇÃO DE UM MEDIDOR DE VAZÃO MAGNÉTICO PARA EXPERIMENTOS EM CIRCULAÇÃO NATURAL

**Benedito Dias Baptista Filho** – bdbfilho@net.ipen.br

**Walmir Maximo Torres** – wmtorres@net.ipen.br

**José Carlos de Almeida** – abolafio@net.ipen.br

**Luiz Alberto Macedo** – lamacedo@net.ipen.br

**Samuel Carraccioli Santos** – samuelcs@net.ipen.br

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares: IPEN-CNEN/SP, Divisão de Termo-Hidráulica  
Caixa Postal 11049 - CEP 05422-970 - São Paulo, SP, Brasil

***Resumo.** O trabalho descreve os problemas encontrados com um medidor magnético de vazão sujeito a vazões muito baixas e variações de temperatura. O trabalho discute o princípio de medição e aspectos relacionados com a instalação e operação do instrumento. São apresentados resultados encontrados com um medidor instalado em um circuito experimental de circulação natural e com outro medidor idêntico montado em uma bancada de laboratório preparada especificamente para esta investigação. Os resultados mostraram características não-lineares do instrumento, dependência do “offset” com a temperatura e a importância de um bom sistema de aterramento. Testes adicionais com a alimentação do instrumento por um sistema isolado da rede (baterias) serão realizados para verificar variações do “drift”. A integridade da blindagem do sinal também ainda será investigada.*

***Palavras-chave:** Medidores de Vazão Magnéticos, Circulação Natural*

### 1. INTRODUÇÃO

Aspectos econômicos e de segurança dirigiram o setor nuclear para o 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 alta 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. Em 1998 foi iniciada no IPEN-CNEN/SP, a operação de uma instalação experimental para investigação de sistemas de resfriamento de emergência, por circulação natural, típicos de reatores nucleares avançados. Essa instalação, descrita por Baptista et al. (1999), foi batizada de “Bancada de Circulação Natural” (BCN), foi concebida para estudar o comportamento de trocadores de calor de

sistemas passivos de remoção de calor residual típicos de reatores navais e investigar o comportamento de sistemas com linhas de desvio da fonte quente. A investigação desses processos envolve o uso de sistemas de medição de vazão com pouca incerteza, estáveis e principalmente que não interfiram no escoamento. Para a BCN foi escolhido um sistema magnético de medida de vazão. A fase inicial de operacionalização da BCN envolveu e realização de testes para o levantamento dos coeficientes de perda de pressão (caracterização hidráulica), calibração do sistema de medida de potência elétrica, e calibração do sistema de medida de vazão. O objetivo deste trabalho é a descrição dos problemas encontrados com esse sistema de medição de vazão no processo de circulação natural e a apresentação dos resultados da pesquisa desenvolvida para estudar esses problemas, tentando obter um sistema mais confiável e estável.

Na seção 2 é apresentado um histórico dos problemas com os fatos que levaram à investigação apresentada neste trabalho, incluindo a descrição do princípio de funcionamento dos medidores magnéticos e suas características de projeto e instalação. Na seção 3 são descritos a montagem experimental e apresentados os principais resultados. Na seção 4 são resumidas as principais conclusões.

## 2. HISTÓRICO DO PROBLEMA

Para a medida de vazão nos experimentos de circulação natural da BCN foram adquiridos dois medidores de vazão magnéticos. A escolha desses instrumentos foi baseada na sua característica de baixa perda de pressão – *não interferência no escoamento*. No projeto da BCN foram previstas vazões em massa na ordem de 25 a 30 g/s (até ≈100 kg/h), o que limitou em muito as opções de mercado. A aquisição só foi possível no mercado norte-americano. Os dois medidores comprados têm um diâmetro nominal de ½ polegada, com as demais características mostradas na Tabela 1. Eles foram fornecidos com calibração de fábrica e ajustados com constantes (Factory Set-Up) obtidas em um processo de calibração. Essas características são: a constante de proporcionalidade, K em pulsos/galão, e o Offset, em pulsos/s. Os transmissores permitem a alteração dos valores dessas constantes por meio de “software”, utilizando-se uma chave magnética,.

Tabela 1 – Características dos Medidores Magnéticos

<b>Característica</b>	<b>Medidor 1</b>	<b>Medidor 2</b>
Diâmetro Interno	0,452 pol.	0,452 pol.
Comprimento	130 mm	130 mm
Material de Isolamento	cerâmica	cerâmica
Eletrodos	Aço inoxidável	Aço inoxidável
Alimentação da Bobina	24 VDC 20 Hz	24 VDC 20 Hz
Faixa de Vazão	360 kg/h	360 kg/h
Constante de Proporcionalidade	5292,5 pulsos/galão	5227,0 pulsos/galão
Offset (*)	1,47	3,13

(\*) as informações do fabricante indicam a unidade do “offset” em pulsos/segundo e as demais unidades no sistema americano (pol., gpm, etc.)

## 2.1 Princípio de funcionamento do Medidor de Vazão Magnético

Os medidores de vazão magnéticos funcionam baseados na lei de indução magnética de Faraday (Miller, 1983). O princípio é o de um condutor que, quando se move através de um campo magnético, induz uma força eletromotriz que é perpendicular ao campo e à direção do movimento. No medidor de vazão magnético, o líquido que escoar na tubulação age como o condutor, induzindo a força eletromotriz ( $e$ ), medida por dois eletrodos sensores montados em posições diametralmente opostas (Fig. 1). Essa força eletromotriz é relacionada com a velocidade média de escoamento do fluido:

$$e = D B v \quad (1)$$

onde  $e$  é a força eletromotriz induzida;  $D$  a distância entre os eletrodos (o diâmetro interno do sensor);  $B$  é a densidade de fluxo magnético; e  $v$  a velocidade média de escoamento.

Esses sensores podem ser utilizados para medição de vazão em escoamentos de fluidos com condutividade elétrica maior ou igual a  $5 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Para líquidos limpos, recomenda-se uma velocidade mínima de escoamento de  $0,3 \text{ m/s}$ . Os eletrodos são normalmente fabricados de material não magnético, tais como: aço inoxidável AISI 316L, Platina com 10% de Irídio, Hastelloy C, Titânio ou Tântalo, a escolha dependendo do tipo de fluido.

É possível utilizar três formas distintas de se produzir o campo magnético: 1. utilizando ímãs permanentes ou eletroímãs com excitação DC; 2. utilizando eletroímãs com excitação senoidal AC; ou 3. utilizando eletroímãs com excitação pulsada DC de qualquer frequência.

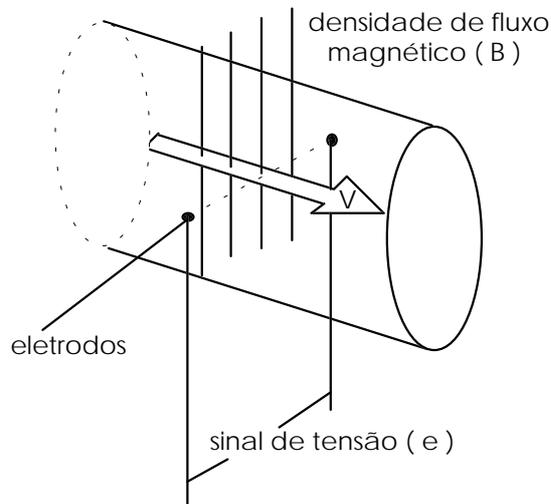


Figura 1 – Ilustração do princípio de funcionamento

A primeira forma é conveniente para medida de vazões onde o escoamento é pulsante ou para medida em fluidos com alta condutividade elétrica, tais como, sais fundidos ou mercúrio. Para fluidos de baixa condutividade, fluidos que conduzem íons, ocorre polarização nos eletrodos e por isso a excitação DC não é conveniente, sendo utilizada então a excitação AC ou DC pulsada.

Na maioria das aplicações o campo magnético é produzido por uma bobina disposta adequadamente em volta do sensor. Nesse caso o campo magnético é proporcional à corrente de alimentação ( $I$ ):

$$e = k D I v \quad (2)$$

onde  $k$  é uma constante dependente do meio e da geometria e  $I$  é a corrente que alimenta a bobina.

Se a geometria, as propriedades do meio e a corrente não se alterarem, a força eletromotriz será proporcional à velocidade média de escoamento e portanto à vazão. A geometria é fixa, no entanto a corrente pode sofrer alterações decorrentes de variações na resistência da bobina. A força eletromotriz pode ser influenciada por flutuações no potencial do meio condutor (o fluido), que em geral não sofre alterações tão acentuadas que provoquem mudanças substanciais no campo.

Em sistemas termo-hidráulicos as principais variações na corrente poderiam ser causadas por variações na temperatura da bobina, o que afetaria a resistência da bobina da seguinte forma:

$$R = R_0 [ 1 + \alpha(T - T_0)] \quad (3)$$

onde, para o cobre,  $\alpha = 0,00393 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  com  $T_0 = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Note que uma variação de  $10 \text{ } ^\circ\text{C}$  implica em uma variação de aproximadamente 4% na resistência, portanto na corrente e na medida da vazão.

Variações na vazão também podem afetar a temperatura da bobina em função da variação do coeficiente de transferência de calor entre o corpo do instrumento e o fluido. Devido a essa característica a eletrônica desses instrumentos deve controlar a corrente, independente do valor da resistência.

Testes em laboratório mostraram variações substanciais na temperatura da bobina entre condições de fluido parado e com escoamento. No caso específico dos instrumentos da BCN, o fabricante especifica um efeito de temperatura de 0,025% do Fundo de Escala /  $^\circ\text{C}$ , o que resultaria em 0,05 g/s /  $^\circ\text{C}$ . Os instrumentos utilizados foram testados verificando-se a tensão de alimentação da bobina em várias condições de temperatura. Foi constatada a alteração na tensão, não se concluindo ainda se a corrente foi estabilizada, uma vez que não se encontrou estabilidade nas medidas de vazão conforme será discutido na seção 2.2.

Uma outra característica que será discutida ainda se deve ao fato que as medidas também são afetadas por flutuações na tensão de alimentação, numa taxa de 0,3 % da Vazão / 10% de flutuação na tensão.

## 2.2 Problemas operacionais com o medidor instalado na BCN

A Fig. 2 representa a BCN, descrita por Baptista et al. (1999). A BCN foi concebida 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. O medidor de vazão magnético foi montado logo após o trocador de calor da BCN, seguindo todos os requisitos do fabricante, Sparling (1996) e utilizando um sistema de transmissão remota.

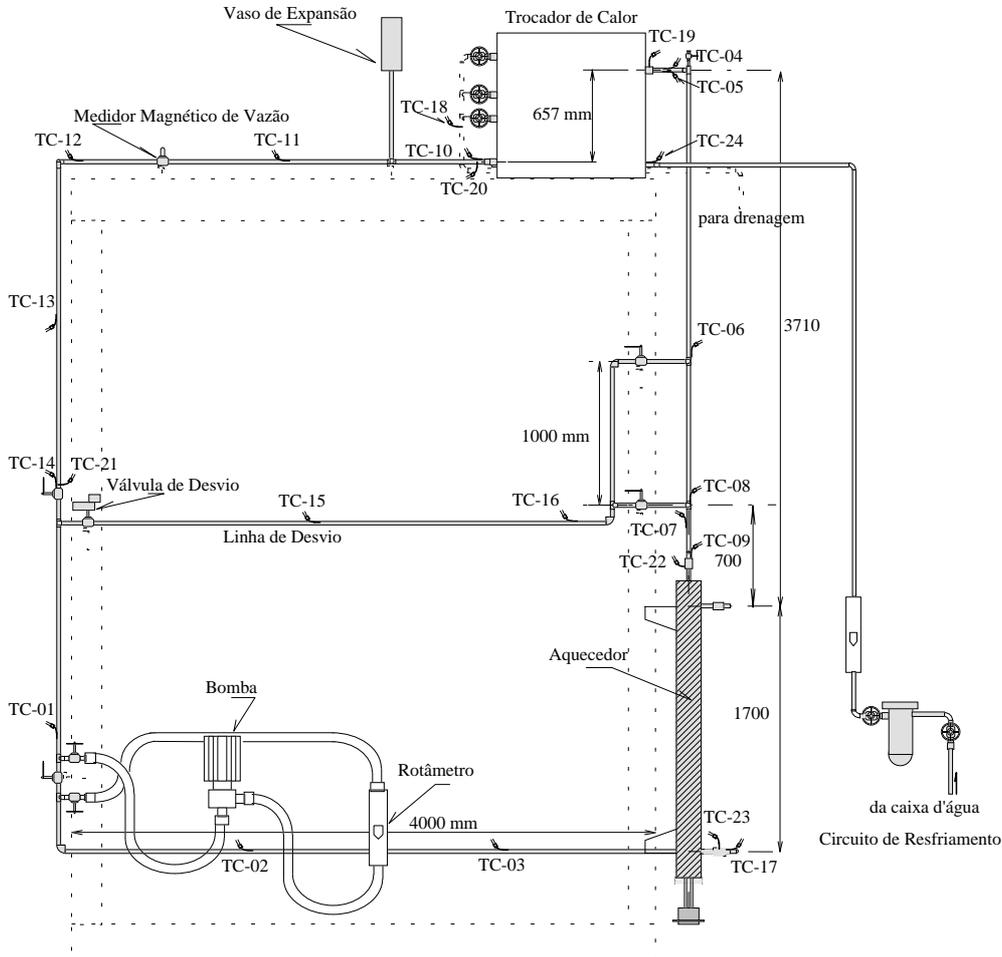


Figura 2 – Bancada de Circulação Natural

Além de transmitir o sinal de vazão para um sistema de aquisição de dados, o transmissor remoto exibe a vazão em um mostrador. Já na fase de testes de montagem foi observado que o mostrador não apresentava uma indicação estável da leitura. Com o fluido parado, a indicação de vazão oscilava em uma faixa muito superior ao especificado para o “cut-off” de 2% (que representa o valor da escala de vazão considerado nulo pelo instrumento). A princípio, foi suposto que o problema poderia ser decorrente de falhas no aterramento. Foi feita a verificação da montagem do cabo que liga o sensor no transmissor remoto do medidor de vazão e o aterramento foi refeito, sempre conforme o manual de instruções do instrumento, inclusive com a substituição de terminais especiais, porém o problema continuou. Também foi medida a condutividade elétrica da água, que sempre ficou dentro dos padrões estabelecidos pelo fabricante. A ação seguinte foi a substituição do medidor de vazão. Foi observado o mesmo problema, apenas com uma faixa menor entre os valores mínimo e máximo de oscilação. O sistema foi então alinhado para operar com alimentação de água constante, passando simultaneamente por um rotâmetro, em

seguida pelo aquecedor e pelo medidor magnético. Testes variando a vazão e a temperatura mostraram que o medidor de vazão apresentava um desvio dependente da temperatura do fluido. As diferenças observadas foram muito superiores ao esperado pela incerteza da correção da vazão com a temperatura, como será mostrado adiante. A partir dessa observação foi estabelecido um procedimento para uma calibração de compensação dos efeitos de temperatura. A Fig. 3 mostra os principais elementos envolvidos nessa calibração, que envolveu três etapas, chamadas: calibração a frio, calibração a quente e medida do desvio em função da temperatura. Na calibração a frio é circulada água, à temperatura ambiente, e são comparadas as leituras do rotâmetro calibrado com as do medidor magnético. Na calibração a quente o processo é repetido porém variando-se a temperatura. A medida do desvio sem escoamento foi iniciada a partir de uma temperatura aproximada de 45 °C, registrando-se o valor indicado de vazão durante o processo de resfriamento.

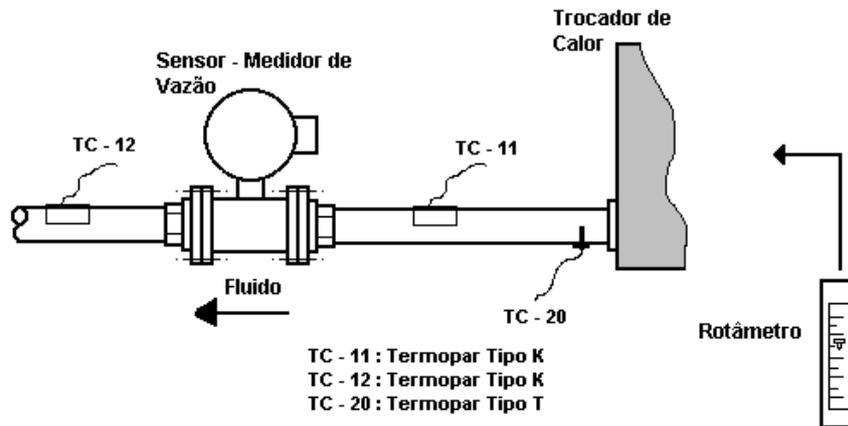


Figura 3 – Detalhe dos elementos utilizados na calibração

Os principais resultados estão nas Fig. 4 e 5. A Fig. 4 mostra a diferença entre o medidor magnético e um rotâmetro calibrado (curva corrigida), observa-se um desvio médio de 86 kg/h, com ligeira dependência da vazão. A Fig. 5 mostra a variação do desvio com a temperatura, tanto com base na temperatura da água quanto com base na temperatura da superfície da tubulação. Conclui-se desses resultados que o instrumento é levemente influenciado pela vazão, conforme mostra o erro de vazão na Fig. 5, e fortemente influenciado pela temperatura. Esses resultados inesperados nos levaram a preparar uma montagem para testes controlados no laboratório de termometria (seção 3).

Observa-se que, condicionado a procedimentos diários de determinação do “offset,” antes do início e após o término de cada experimento, o instrumento pôde ser utilizado para experimentos em circulação natural, admitindo-se erros de medida na ordem de 6 a 8%.

### 3 MONTAGEM EXPERIMENTAL E RESULTADOS

A montagem experimental no laboratório de termometria é mostrada na Fig. 6. Essa montagem consiste de um circuito fechado, onde água potável é bombeada do reservatório de um banho termostático, por meio de uma bomba submersa. Além da indicação no

mostrador, o instrumento gera dois tipos de sinal de saída, como função da faixa de vazão em que ele foi calibrado: a) sinal de corrente de 4-20 mA e b) sinal de frequência de pulsos de tensão. Para determinar a vazão através da medida desses sinais de saída foram utilizados respectivamente um multímetro digital e, um conjunto de contador de pulsos digital e osciloscópio. A medida de vazão fornecida por um rotâmetro, aferido por meio de um frasco calibrado e cronômetro, foi usada para os ajustes e determinação das características do medidor. O banho termostático, que possui um sistema de aquecimento por resistência elétrica, um sistema de homogeneização de temperatura através de bombeamento e um sistema de refrigeração, foi usado para a realização de testes do instrumento com temperatura do fluido constante e controlada. Dois termopares Omega, T1 e T2, do Tipo K de 0,5 mm de diâmetro com camisa de aço inoxidável, acoplados a um indicador portátil de temperatura, foram usados para medir respectivamente a temperatura do fluido no reservatório e na superfície externa do sensor do instrumento.

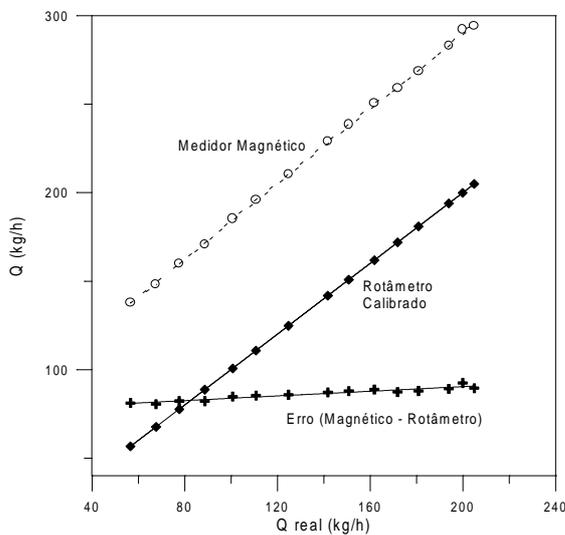


Figura 4 – Desvio a frio

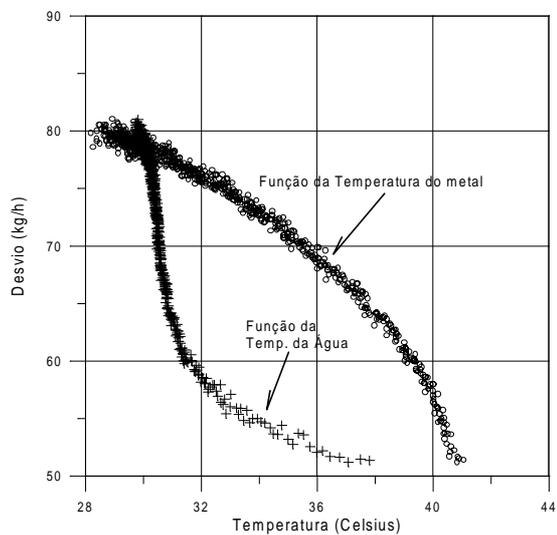


Figura 5 – Desvio sem vazão

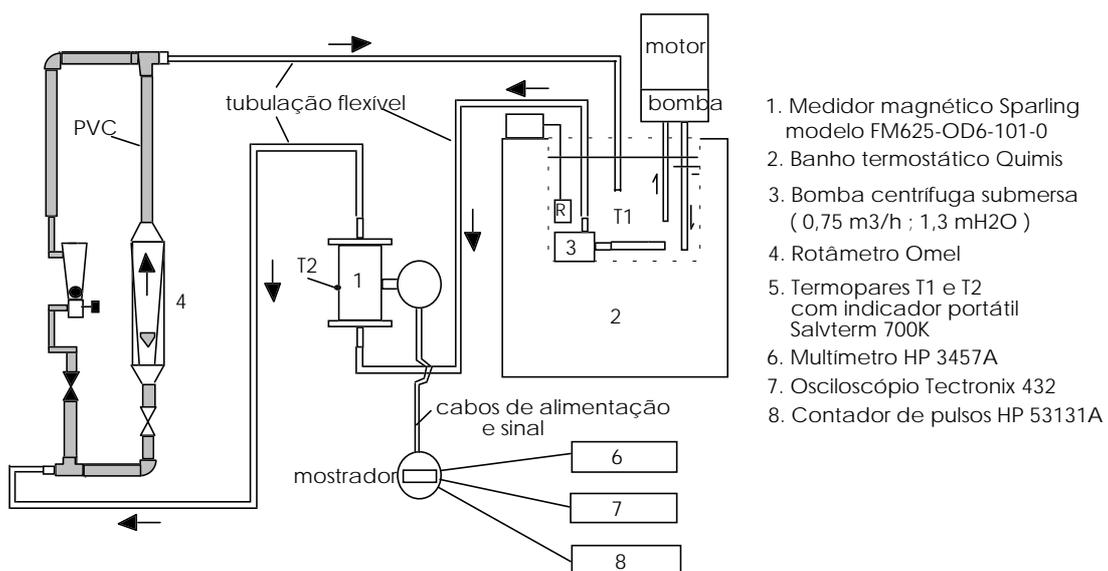


Figura 6 – Montagem no Laboratório

Durante a aferição observou-se que a bomba submersa usada na bancada experimental é capaz de manter a vazão constante no circuito, com um valor máximo igual a 195,37 kg/h (0,86 gpm). Vários testes foram realizados com o medidor, variando-se as constantes de calibração do instrumento e a temperatura do fluido. A seguir serão apresentados alguns dos resultados obtidos nos testes.

A Fig. 7 mostra os valores de vazão medidos pelo instrumento, num período de 5 dias, para uma vazão constante no circuito e igual a 195 kg/h. Durante esse período foram mantidas as constantes de calibração fornecidas pela fábrica, ou sejam,  $K = 5292,5$  pulsos/galão e “Offset” = 1,47. Pode-se notar dessa figura que, os valores medidos não se mantiveram constantes no período. Foi nesse período que se verificou a necessidade de modificações no sistema de aterramento, quando todo o conjunto passou a ser aterrado no neutro da subestação elétrica. Testes efetuados sem nenhum aterramento resultaram em valores totalmente instáveis e sem coerência.

Em 02/03, o teste foi realizado variando-se a temperatura do fluido, mantendo-se ainda as constantes de fábrica e a vazão. O fluido, inicialmente a 25,3 °C, passou por um processo de resfriamento até 15 °C e posteriormente por um processo de aquecimento até 45 °C. Os resultados podem ser vistos com mais detalhes na Fig. 8, onde pode-se observar a dependência da medida com a temperatura do fluido e também que não ocorre um retorno à condição inicial, ou seja, para uma mesma temperatura do fluido as medidas de vazão são diferentes durante as fases de resfriamento e aquecimento do fluido.

Foi feita uma verificação de possíveis flutuações na tensão de alimentação e, se essas flutuações poderiam estar afetando as medidas. Em 15/03 foi monitorada a tensão de alimentação acompanhando-se a operação do medidor. A variação nos valores de tensão máximo (117,9 V) e mínimo (114,9 V) foi de apenas 2,6%, não se correlacionando com as variações de medida do instrumento nem justificando variações maiores do que 0,1 % na medida de vazão.

Em outro teste (16/03) foram mantidos constantes a vazão (195,37 kg/h) com o valor da constante de proporcionalidade  $K=5292,5$ , e foi variado o valor do “Offset.” Os resultados podem ser vistos na Fig. 9. Este mesmo teste foi repetido (17/03), e os resultados podem ser vistos na Fig. 9, onde é possível observar a mudança do “Offset” de -48,7 para -52,73 (“drift”), porém mantendo-se praticamente constante de proporcionalidade.

Também em 17/03 foi realizado um teste mantendo-se constantes a vazão no circuito, igual a 189,6 kg/h, e  $K=5292,5$ , e variando-se a temperatura do fluido de 15 até 30°C. Para cada temperatura o “Offset” foi ajustado, de forma que  $Q_{instr.} \sim Q_{rot.} = 189,6$  kg/h. Os resultados são apresentados na Fig. 10. Mais uma vez, é possível notar a dependência com a temperatura.

É importante notar que, somente em alguns pontos tomados em 01/03, os resultados da vazão indicada pelo instrumento foram iguais aos valores indicados pelo rotâmetro quando se usou “Offset” = +1,47 e  $K=5292,5$ , valores fornecidos pelo fabricante.

Em 05/04 foi realizado um teste onde foram variadas a vazão e a constante  $K$  (5292,5 ou 5101,1), porém mantendo-se o “Offset” = 0. Os resultados podem ser vistos na Fig. 11. Ao final desse teste, o valor do “Offset” foi ajustado para que  $Q_{instr.} \sim Q_{rot.} = 183$  kg/h, obtendo-se o valor de -57. A Fig. 12 mostra a diferença entre os valores medidos pelo instrumento e pelo rotâmetro. É possível notar uma diminuição da ordem de 25% entre o início, onde a temperatura do fluido era 19,8 °C e o final do teste, com 23,2 °C.

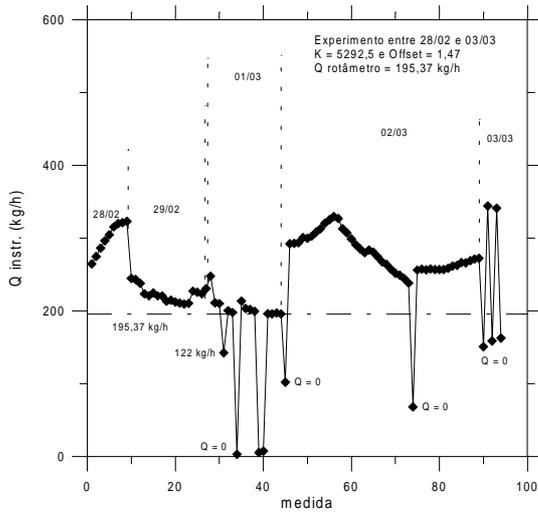


Figura 7 – Medidas entre 28/02 e 03/03/2000

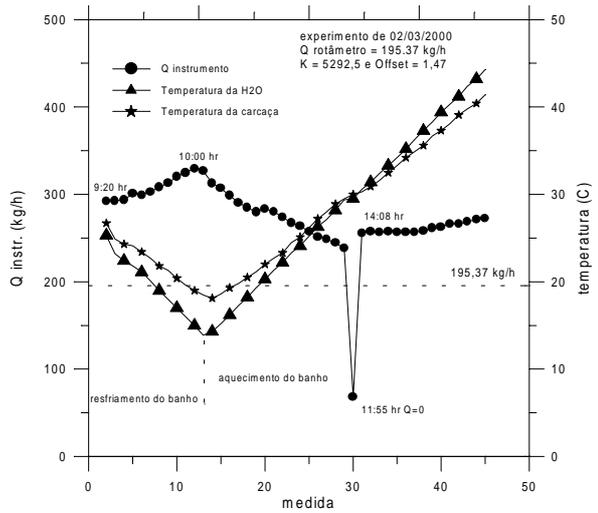


Figura 8 – Testes com variação de temperatura

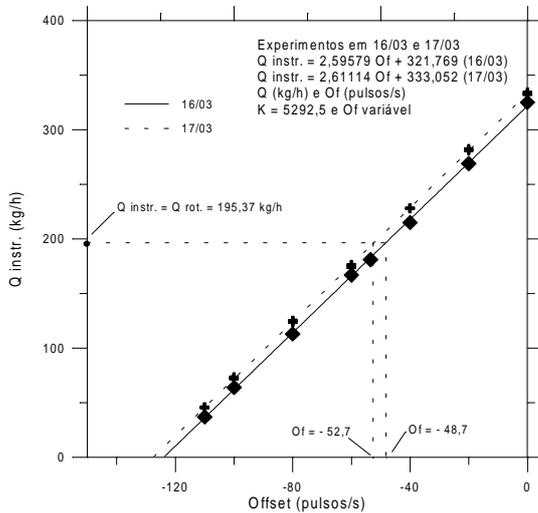


Figura 9 – “Drift” do instrumento

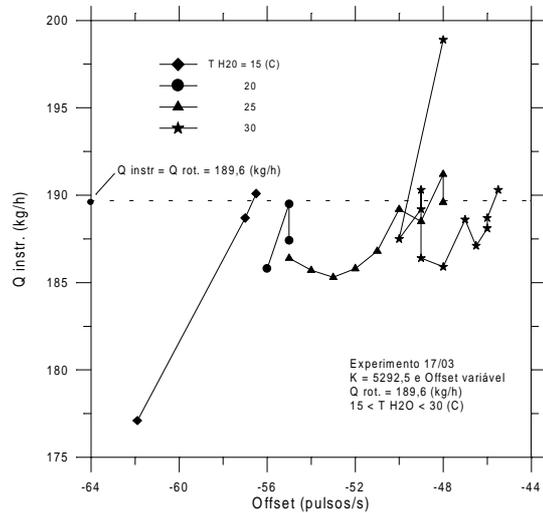


Figura 10 – Dependência com a Temp.

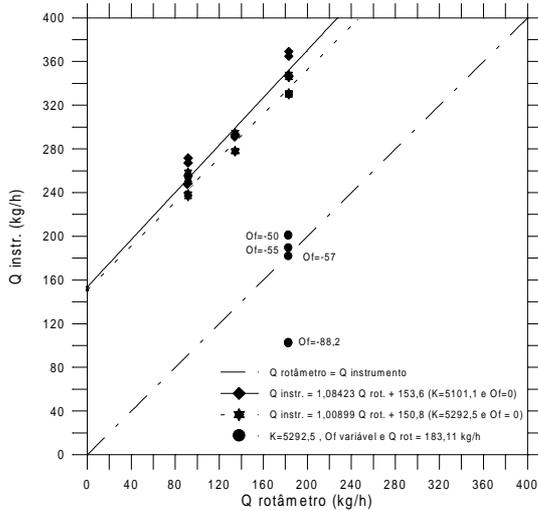


Figura 11 – Testes com “offset” = 0

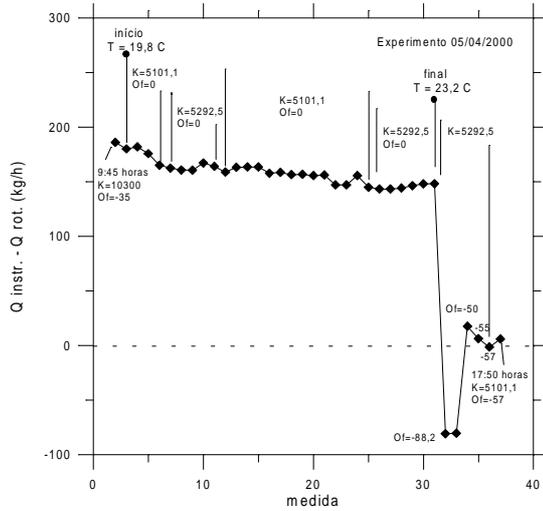


Figura 12 – Variação do “drift”

## 4 CONCLUSÕES

Os resultados discutidos mostram a existência e variação de um “drift” no instrumento. Ocorreram variações acentuadas no “offset”, porém não se observaram variações na constante de proporcionalidade. Foi verificada forte dependência do “offset” com a temperatura. Essa dependência pode ser causada por variações na resistência da bobina e portanto na corrente e intensidade de campo, não compensada pela eletrônica. É possível ainda a existência de problemas adicionais de aterramento ou de blindagem do sinal. A constante de proporcionalidade varia ligeiramente com a vazão, indicando alguma não-linearidade do instrumento, confirmada na folha de calibração fornecida pelo fabricante, que indica uma variação de aproximadamente 4% para uma variação de vazão entre 105 e 1150 kg/h. Essa variação pode também ser decorrente da variação da temperatura, causada pela variação no coeficiente de transferência de calor entre o fluido e o sensor.

A necessidade de valores elevados de “offset”, entre -40 e -60, nos levaram a acreditar na possibilidade de erro de “software”, na conversão de unidades de pulsos/s para pulsos/minuto (instrumento no padrão americano). Concluiu-se que o instrumento pode ser adequado para utilização em sistemas termo-hidráulicos necessitando porém de maiores estudos para se estabelecer ajustes adequados do “offset”, por meio de uma correlação com a temperatura. A pesquisa vai prosseguir com utilização de alimentação por um sistema isolado da rede (baterias) e com a investigação de falhas na blindagem.

## REFERÊNCIAS

- Baptista F., B.D.; Gonçalves, I.M.P.; Almeida, J.C.; Macedo, L.A.; Santos, S.C., (1999) “Circuito Experimental para Pesquisa de Sistemas de Resfriamento de Emergência de Reatores Nucleares”, Anais do VII CONGRESSO GERAL DE ENERGIA NUCLEAR (VII CGEN).
- Miller, R.W. (1983) “Flow Measurement Engineering Handbook”, Mc Graw-Hill Book Company, New York.
- Sparling Instruments CO. (1996) “Tigermag – Installation, Operation and Maintenance Manual”

### THE ADAPTATION OF A MAGNETIC FLOW METER FOR NATURAL CIRCULATION EXPERIMENTS

***Abstract.** The paper describes problems with a magnetic flow meter used in a natural circulation process, subjected to extremely low mass flows rates and temperature changes. The paper discuss the flow measurement principle, and also installation and operation issues. Experimental results with a sensor installed in a Natural Circulation Loop and with another sensor installed in a laboratory setup are presented. The results showed non-linear characteristics of the instrument, offset temperature dependence, and the need of an efficient grounding system. Additional tests with an electrical isolated system (batteries) will be performed to check if the drift variation is due grounding effect. Also the signal shielding integrity will be checked.*

**Keywords:** Magnetic Flow Meters, Natural Circulation