

## Desenvolvimento de um sensor de impedância para medida de parâmetros em escoamentos bifásicos

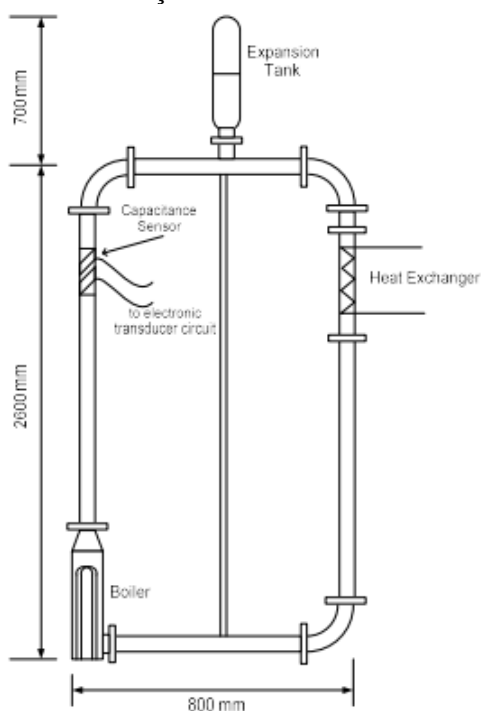
Arthur Flausino dos Santos, Marcelo da  
Silva Rocha e Lucas Frenzel

*arthurflausino@hotmail.com*

### 1. Introdução

A circulação natural em reatores nucleares é o regime de escoamento onde a força motriz é a força de empuxo gerada pela diferença de densidades no fluido em diferentes partes do circuito. Os circuitos operando em regime de circulação natural, também chamados termosifões, têm várias aplicações na engenharia: aquecimento de água através da energia solar, refrigeração em processos químicos, resfriamento de componentes eletrônicos, aplicações na energia geotérmica, reatores nucleares, etc. Em reatores nucleares o fenômeno de circulação natural é importante para a remoção de calor residual no caso de perda de alimentação das bombas do circuito primário e em operações a baixa potência. Os estudos de sistemas operando em regime de circulação natural ganharam força após acidentes como os ocorridos em Three Mile Island (Estados Unidos, 1979) e recentemente em Fukushima (Japão, 2011). Esses acidentes mostraram que os sistemas de segurança convencionais desses tipos de reatores não foram comprovadamente confiáveis para situações emergenciais extremas. Este estudo também se faz necessário, pois a nova geração de reatores nucleares compactos utiliza a circulação natural do fluido refrigerante como sistema de refrigeração e de remoção de calor residual em caso de partida, acidente ou desligamento da planta.

Como se pode observar na Fig. 1, o circuito de circulação natural é formado por uma seção de aquecimento, uma seção de escoamento do fluido quente (“perna quente”) contendo um tanque de expansão do fluido, uma seção de resfriamento e uma seção de retorno do fluido frio (“perna fria”).



**Figura 1.** Diagrama esquemático do circuito de circulação natural com o sensor capacitivo.

Na seção de aquecimento pode ocorrer a mudança de fase (ebulição) do fluido refrigerante (água desmineralizada) e a formação de um escoamento bifásico vapor-água ascendente. Esse tipo de escoamento caracteriza-se por ser bastante instável do ponto de vista hidrodinâmico. Um dos parâmetros associados a

esse tipo de escoamento, e de grande interesse nesse estudo, é a fração de vazio na seção de aquecimento do circuito, ou a razão volumétrica entre o vapor e a mistura no escoamento. O conhecimento desse parâmetro é fundamental para que se possam entender outros fenômenos que ocorrem nesse tipo de instalação além de permitir escrever o sistema de equações que regem esse fenômeno como, por exemplo, os balanços de massa, quantidade de movimento e de energia.

Existem diversas técnicas de medição da fração de vazio e de determinação do regime em escoamentos bifásicos. O desenvolvimento dessas técnicas é de grande importância para que se possa melhorar a aplicação dos modelos teóricos ou empíricos que têm sido propostos para os escoamentos bifásicos. Uma técnica que tem sido bastante pesquisada é a utilização de sensores de impedância para a medição da fração de vazio local ou média numa seção transversal, utilizando-se como princípio a diferença das propriedades elétricas dos fluidos envolvidos.

Essa técnica de medição da fração de vazio por impedância elétrica é eficiente e de baixo custo, tendo como princípio a relação entre a fração de vazio e a diferença das propriedades elétricas das fases ou dos fluidos da mistura. É possível obter-se uma relação de dependência entre a fração de vazio média numa seção transversal, por exemplo, e a impedância elétrica média da mistura bifásica naquela seção. Além disso, valores instantâneos e médios temporais podem ser obtidos.

Avaliando-se o contexto que se apresenta, grande justifica-se o desenvolvimento de um estudo dirigido ao aprimoramento da técnica de impedância para determinação da fração de vazio em escoamentos bifásicos do tipo gás-líquido, correlacionando-se as propriedades elétricas dos fluidos (condutividade elétrica e constante dielétrica) com aquela variável, utilizando-se sensores de impedância com o auxílio de circuitos eletrônicos de pré e pós-tratamento dos sinais. Análises serão realizadas com os dados obtidos através dos sensores e comparadas com dados obtidos do software RELAP5, para determinação de outros parâmetros relativos ao escoamento.

## 2. Metodologia

O circuito experimental é formado por tubos e equipamentos em vidro Pyrex com 2.600 mm de altura e 850 mm de largura, Com pode ser visto na Fig. 1, a fonte quente é um aquecedor elétrico situado na parte inferior da seção vertical de aquecimento do circuito (“perna quente”). A fonte fria é um trocador de calor com espiras helicoidais e encontra-se na parte superior da seção vertical oposta a do aquecedor (“perna fria”). O volume total de água no circuito, incluindo tanque de expansão e linha de surto é de, aproximadamente, 12 litros. O tanque de expansão, previsto para absorver as variações de densidade do fluido no circuito é conectado em um ponto intermediário da seção horizontal inferior. O bocal superior do tanque de expansão permanece aberto, mantendo o circuito a uma pressão próxima à pressão ambiente. O circuito não possui isolamento térmico, a menos da base do aquecedor, possibilitando assim a visualização do escoamento.

A potência elétrica aplicada nas resistências é feita com um variador de tensão alimentado com corrente alternada. São medidas as temperaturas em 15 pontos do circuito, com termopares do tipo K, três dos quais estão dispostos na superfície dos tubos e os demais se encontram no interior dos mesmos. Estes dados são registrados por um sistema de aquisição de dados instalado em microcomputador, com uma taxa de amostragem compatível com o fenômeno. Futuramente serão realizadas medidas experimentais de: potência elétrica (tensão), vazão de água do primário, temperatura ambiente, pressão no circuito e nível no tanque de expansão.

Nesse trabalho, um sensor de impedância tipo capacitivo foi projetado e construído, conforme se pode observar na Fig. 2. O elemento sensor é composto por dois eletrodos em forma de placas helicoidais montadas sobre a superfície do tubo de vidro de borossilicato (Pirex) de 38 mm de diâmetro interno (D), conforme já mencionado anteriormente. Os eletrodos possuem comprimento da ordem de  $2\pi D$  ( $\sim 4 D$ ) e o passo de hélice da ordem de  $\pi D$ , Fig. 3. Os eletrodos operam como duas placas entre as quais a mistura bifásica representa um meio dielétrico, o qual possui suas propriedades elétricas associadas a uma dada fração de vazio. A capacitância associada à mistura bifásica é da ordem de nano Faradays. Os eletrodos estão ligados ao circuito eletrônico de transdução do sinal por fios elétricos de baixa impedância

capacitiva (da ordem de  $10^{-9}$  F) para que sua impedância não seja superior à impedância da mistura bifásica.

Uma seção de testes em vidro, semelhante ao vidro utilizado no circuito de circulação natural, será adaptada separadamente para que se possa fazer a calibração do sensor de impedância. Isso se faz necessário porque os métodos de calibração a serem adotados (principalmente o método das válvulas de fechamento rápido) não podem ser montados no circuito de circulação natural. Isso poderia causar a quebra dos tubos e componentes de vidro do circuito. Assim, a seção de testes permitirá que se faça a calibração do sensor capacitivo simulando-se o escoamento bifásico utilizando-se o ar comprimido no lugar do vapor, com vazão de ar conhecida. Essa substituição não compromete os resultados uma vez que as propriedades elétricas do ar e do vapor são muito semelhantes.

A fração de vazio média da mistura bifásica água-vapor (real) será determinada de duas formas distintas, ou seja, utilizando-se duas técnicas diferentes: o método gravimétrico e o método das válvulas de fechamento rápido. O método gravimétrico é de simples execução e a seção de testes já está pronta para sua implementação. Consiste em obter as pressões da mistura bifásica em dois pontos distintos da seção vertical na qual o sensor está instalado e é válido somente para os regimes de escoamento em bolhas dispersas (fração de vazio da ordem de  $0 \sim 15\%$ ). O método das válvulas de fechamento rápido que implica na interrupção instantânea do fluxo da mistura bifásica na seção vertical, demandará a modificação da bancada experimental, sendo aplicado para medições da fração de vazio entre  $5 \sim 60\%$ . Para tal, um projeto de modificação da bancada já foi elaborado, submetido e seu orçamento já foi aprovado pela diretoria do IPEN. A compra dos componentes e a montagem da nova seção de testes estão em andamento. As incertezas da medição da fração de vazio utilizando-se essas duas técnicas é da ordem de  $5\%$ , de acordo com a literatura.

Um circuito eletrônico de geração e transdução dos sinais do sensor será especialmente desenvolvido e construído. O circuito eletrônico será composto, basicamente de seis partes principais, conforme se pode verificar na Fig. 4. A primeira parte é o circuito gerador de onda senoidal de  $5\text{ Vpp} / 1,0\text{ MHz}$ ,  $50\text{ mA}$ . A frequência da ordem de  $1\text{ MHz}$  garante que a impedância medida será quase que totalmente capacitiva. Esse sinal elétrico é aplicado aos eletrodos por um dos cabos coaxiais de baixa impedância capacitiva CS1, que medem a capacitância média da mistura bifásica CX. Esse sinal é, então, reconduzido ao circuito eletrônico pelo outro cabo coaxial CS2 e o sinal é amplificado, retificado, filtrado e, finalmente, amplificado a um nível desejado de tensão de saída que neste caso é de  $5\text{ Vcc}$ .

## References

- [1] Bastos, J. L. F. e Loureiro, L. V.; “Experimental Transient Analysis of Natural Circulation in a Complex Geometry”, *Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*, pp. 801-806, (1994).
- [2] LabView 7.0 Express, 2003, National Laboratory, USA.
- [3] Andrade, D. A.; Sabundjian, G.; Umbehaun, P. E.; Torres, W. M.; Belchior Jr., A.; Rocha, R. T. V.; Fernandes, T. D. J. e Carvalho, A. D.; “Simulação e Análise do Fenômeno de Circulação Natural Monofásica e Bifásica no Circuito Experimental Instalado na Engenharia Química POLI – USP, com o Código RELAP5”. INAC2005, 28/06-02/09/2005, Santos, Brasil.
- [4] Sabundjian, G.; Andrade, D. A.; Umbehaun, P. E.; Castro, A. J. A.; Torres, W. M.; Belchior Jr., A.; Rocha, R. T. V.; Damy, O. L. A. e Torres, E.; “Análise Experimental do Fenômeno de Circulação Natural”. ENCIT2006, 05-08/12/2006, Curitiba, Brasil.
- [5] Sabundjian, G.; Andrade, D. A.; Umbehaun, P. E.; Castro, A. J. A.; Torres, W. M.; Braz Filho, F. A.; Borges, E. M.; Belchior Jr., A.; Rocha, R. T. V.; Damy, O. L. A. e Torres, E.; “One and TwoPhase RELAP5 Simulation of the Natural Circulation Phenomenon in the Experimental Circuit of POLI/USP”. INAC2007, 30/09-05/10/2007, Santos Brasil.
- [6] Sabundjian, G.; Andrade, D. A.; Umbehaun, P. E.; Castro, A. J. A.; Torres, W. M.; Braz Filho, F. A.; Borges, E. M.; Conti, T. N.; Masotti, P. H. F.; Mesquita, R. N.; Paladino, A. P.; Belchior Jr., A.; Rocha, R. T. V. e Damy, O. L. A.; “Análise Teórico e Experimental do Fenômeno de Circulação Natural”. EBEC2008, 28-29/04/2008, Florianópolis, Brasil.
- [7] RELAP5/MOD3.2.2Gamma, NUREG/CR-5535, IDAHO LAB. SCIENTECH Inc., Idaho, June 1999.

- [8] Huang, S. M., Stott, A. L., Green, R. G., Beck, M. S.; “Electronic transducer for industrial measurement of low value capacitances”; *Journal of Physics E – Scientific Instruments*, v. 21, n. 3, p. 242-250, 1988.
- [9] Marioli, D., Sardini, E., Taroni, A.; “Measurement of small capacitance variations”; *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 40, n. 2, p.426-428, 1991.
- [10] Marioli, D., Sardini, E., Taroni, A.; “High-accuracy measurement techniques for capacitance transducers”; *Measurement Science and Technology*, v. 4 ,n. 3, p. 337-343, 1993.