

Estudo Experimental da Circulação Natural Bifásica Utilizando uma Técnica de Visualização

Pedro A. M. Vinhas¹, José L. H. Faccini² e Jian Su³

¹Departamento de Engenharia Nuclear - Escola Politécnica
Universidade Federal do Rio de Janeiro
21941-909, Rio de Janeiro - RJ - Brasil
Pedro_mvinhas@poli.ufrj.br

²Instituto de Engenharia Nuclear - IEN / CNEN
21941-906, Rio de Janeiro - RJ - Brasil
faccini@ien.gov.br

³Programa de Engenharia Nuclear - COPPE
Universidade do Federal do Rio de Janeiro
21941-972, Rio de Janeiro - RJ - Brasil
sujian@lasm.coppe.ufrj.br

ABSTRACT

Este trabalho apresenta um estudo experimental da circulação natural bifásica em um circuito que simula, em escala reduzida, um sistema passivo de remoção de calor residual típico de reatores APWR (*Advanced Pressurized Water Reactor*). O circuito foi formado por um aquecedor, um trocador de calor e tubulações. O estudo experimental consistiu na aplicação de uma técnica de visualização, empregando uma filmadora de alta velocidade, para a medição do tamanho e velocidade de bolhas de vapor geradas no aquecedor com diferentes potências de aquecimento. A filmadora foi posicionada na região central da tubulação que liga o aquecedor ao trocador de calor, onde existe um trecho transparente. As imagens dos escoamentos foram processadas e analisadas através de um software comercial, que permitiu a determinação do comprimento e velocidade das bolhas. Os resultados obtidos foram então comparados com correlações disponíveis na literatura.

1. INTRODUÇÃO

Escoamentos multifásicos são encontrados em diversas indústrias como petróleo, química, aeronáutica e também nuclear. Na indústria nuclear acontece mais especificamente o escoamento bifásico água-vapor. Tal escoamento pode ocorrer p. ex. no núcleo do reator, com o fluido refrigerante em circulação forçada ou natural. A circulação natural é utilizada em reatores modernos como um meio de remoção de calor de forma passiva. Sendo um fenômeno independente da ação humana, ele se baseia na diferença de densidade da água em função da temperatura, onde a água mais fria tende a descer e a mais quente a subir estabelecendo assim uma troca de calor por circulação natural do fluido. Tal fenômeno ocorre tanto na forma de escoamento monofásico como bifásico. Este trabalho estuda a forma *slug* do escoamento bifásico, através de uma técnica de visualização, utilizando uma filmadora de alta velocidade e um programa em *MatLab* [1,2] para relacionar o tamanho das bolhas de vapor formadas no aquecedor com sua respectiva velocidade. Através destas

relações é possível entender melhor as características do escoamento bifásico, importantes para o cálculo de diversos parâmetros de transferência de calor e fundamentais para manutenção da segurança do reator nas mais diversas situações.

O presente estudo foi realizado em um circuito de circulação natural que simula em escala reduzida 1:10 em altura, um sistema de remoção de calor residual de um reator do tipo APWR (*Advanced Power Water Reactor*) [3-5], no Laboratório de Termo-hidráulica Experimental do Instituto de Engenharia Nuclear (LTE-IEN/CNEN).

2. MONTAGEM EXPERIMENTAL

A montagem experimental divide-se em duas partes: o circuito de circulação natural e o sistema de visualização.

2.1. Circuito de Circulação Natural

O circuito de circulação natural, Fig. 1, é composto por aquecedor, trocador de calor, tanque de expansão e tubulações.

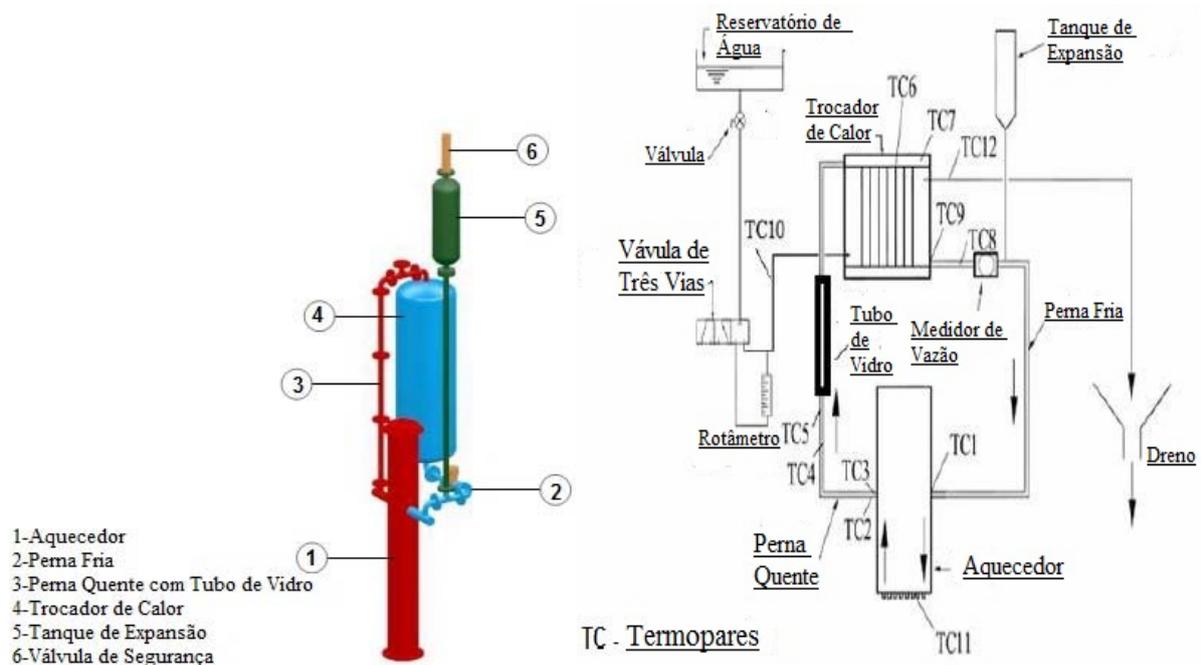


Figura 1. Vista geral do Circuito de Circulação Natural.

O aquecedor é composto por um cilindro de aço inox com 0,20 m de diâmetro interno e 1,0984 m de altura, contendo cinquenta e dois resistores elétricos, *downcomer* e plena inferior e superior. O trocador de calor é constituído por sete tubos de aço inox de 0,031 m de diâmetro interno, em arranjo triangular, com 0,60 m de altura. A água de resfriamento do lado secundário do trocador de calor se encontra à temperatura ambiente e a sua vazão pode ser ajustada na faixa de 0-25 l/h. O aquecedor e o trocador de calor são ligados por tubos de aço inox denominados de perna quente e perna fria do sistema. Os tubos têm o mesmo diâmetro interno, aproximadamente 0,0254 m. Na perna quente, um tubo de vidro permite a

vizualização e filmagem dos tipos de escoamentos que ocorrem no circuito. Uma coluna de expansão instalada na perna fria permite a expansão da água no circuito durante o aquecimento. Na extremidade da coluna um tanque de cilíndrico de aço inox com 0,20 m de diâmetro interno, atua como um regulador de pressão através de uma válvula de alívio de pressão instalada na sua extremidade superior.

O circuito possui também um sistema de controle de potência e aquisição de dados de temperatura e vazão. O sistema é constituído por um controlador de potência, termopares, medidor de vazão do tipo eletromagnético, módulos (placas) de aquisição de dados e um computador. O controlador de potência permite o fornecimento de corrente elétrica para os resistores dentro do aquecedor. O nível de potência elétrica pode ser ajustado na faixa de 0-1400 W, através de um software instalado no computador. Os termopares são posicionados ao longo do circuito e fornecem sinais em milivolts para um módulo amplificador/condicionador conectado a uma placa A/D instalada no computador, o medidor de vazão também envia sinais analógicos para o módulo. O software processa os sinais que são visualizados numa tela gráfica em função do tempo.

2.2. Sistema de Visualização

O sistema de visualização é formado por uma câmera de vídeo de alta velocidade *Olympus i-Speed 2* (resolução máxima de 800 x 600 pixels), lentes de zoom, um programa de aquisição e análise de imagem e um laptop. A filmadora foi posicionada em frente ao tubo de vidro da perna quente, Fig. 2. Uma régua graduada posicionada junto ao tubo de vidro foi utilizada como referência para medição das imagens. As imagens são armazenadas em arquivos do tipo avi e posteriormente analisadas e processadas. A análise e o processamento foram feitos por um software comercial de processamento de imagens e um programa em *MatLab* que calcula a velocidade e tamanho das bolhas.

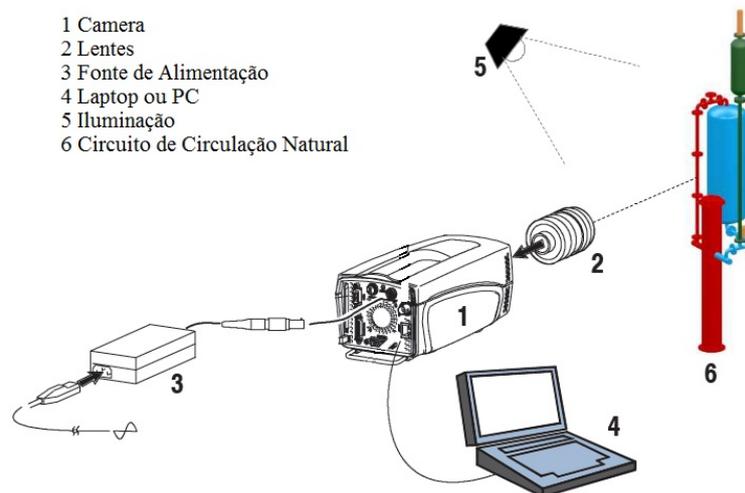


Figura 2. Sistema de visualização.

3. METODOLOGIA

A técnica de processamento e análise das filmagens consiste em converter as imagens armazenadas em matrizes de pixels padronizadas, com valores de 255 (branco), que

caracterizam os contornos das bolhas ou 1 (preto), que caracterizam o restante da imagem, Fig. 3. Essa padronização é feita utilizando um software comercial através da utilização de filtros apropriados.

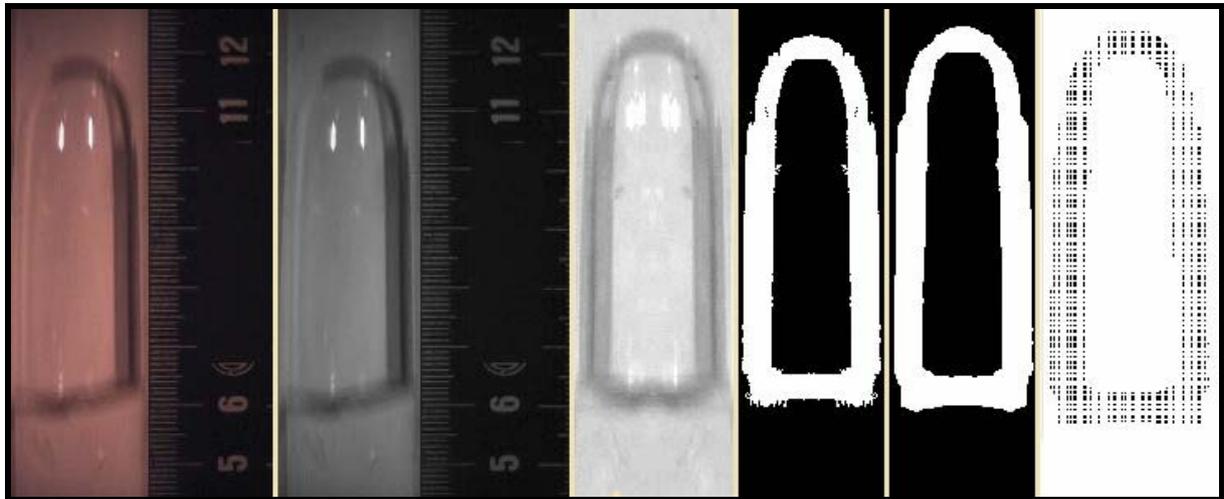


Figura 3. Processo de edição da imagem.

Essas matrizes são processadas por um programa em *MatLab*, Fig. 4, desenvolvido no laboratório, que isola todas as bolhas de forma independente e calcula a quantidade de pixels de cada uma, incluindo eventuais vazios formados na matriz pelo reflexo da luz, e sua velocidade de ascensão característica. A quantidade de pixels e a velocidade são convertidos para metros e metros por segundo respectivamente utilizando valor de calibração de 7116,64 pixels/metro. Posteriormente os valores foram parametrizados, fornecendo um tamanho e uma velocidade relativos, os quais permitem verificar a influência do tamanho na velocidade de ascensão da bolha.

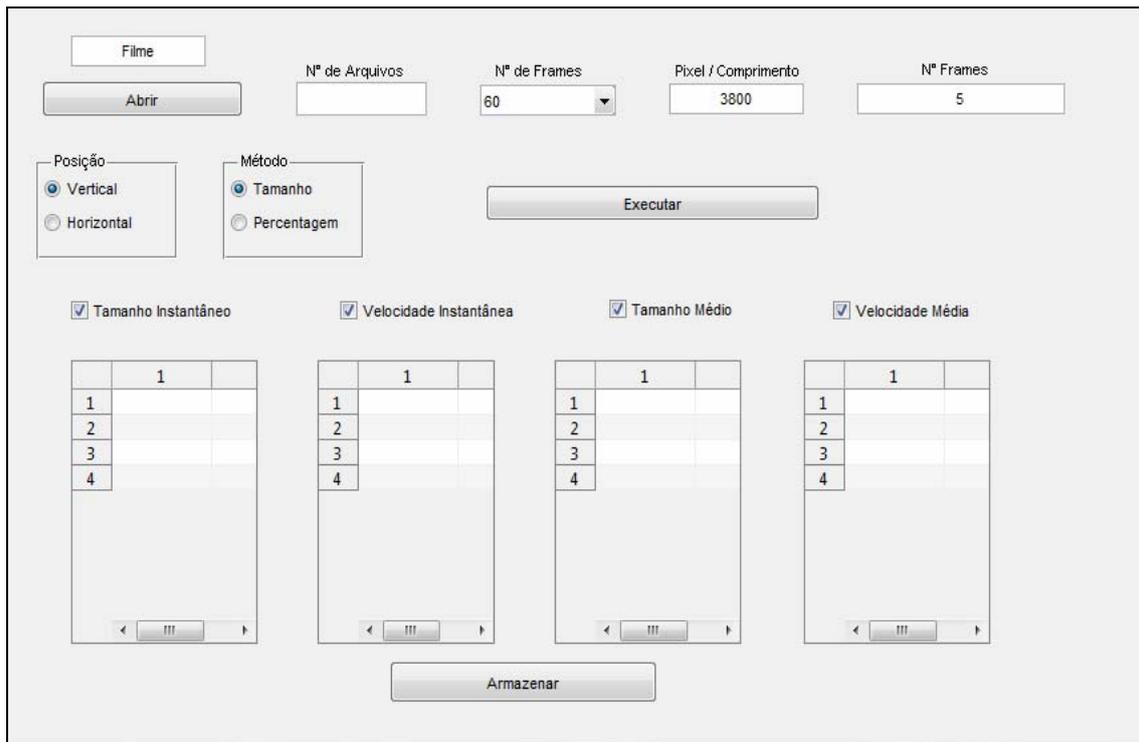


Figura 4. Layout do Programa em MatLab.

Os experimentos foram realizados a uma potência de 1100 W do aquecedor, com a vazão do lado secundário do trocador de calor de 2,0 l/h, o que permitiu chegar-se ao regime de escoamento bifásico, produzindo quatro regimes distintos de escoamento: monofásico, bolhas dispersas, *slug* e *churn*. Este trabalho estudou o escoamento do tipo *slug*, supondo o diâmetro da bolha de Taylor [6] aproximadamente igual ao diâmetro do tubo e a bolha um cilindro perfeito, desprezando assim a espessura do filme entre a bolha e a parede do tubo. Desta forma, qualquer variação no tamanho da bolha ocorre no seu comprimento.

Os videos foram feitos com a mesma taxa de filmagem, 60 quadros por segundo, e a máxima resolução. Para cada bolha foram determinados números de velocidades pontuais e de quantidades de pixels características em diferentes pontos. O número de pontos variou de acordo com o tempo de exposição de cada bolha na área de filmagem, sendo a média dos valores pontuais encontrados usada para a determinação da velocidade e da quantidade de pixels características da bolha.

As velocidades de ascensão foram medidas através da diferença entre a posição inicial na matriz de pixels e a posição final nessa matriz, para uma dada variação de tempo escolhida durante o processamento. A quantidade de pixels foi calculada pela média entre as quantidades encontradas para duas posições diferentes na matriz, de acordo com o tempo utilizado, assim como a velocidades. As variações de tempo escolhidas estão de acordo com a Eq. 1.

$$\Delta t = N_{Frames} / fps \quad (1)$$

onde N_{Frames} é o numero de quadros entre dois pontos de análise sucessivos, e a fps é o número de quadros por segundo.

Após o processamento da velocidade e do comprimento de cada bolha, calculou-se a velocidade média V_{AV} e o tamanho médio L_{AV} de todas as bolhas no escoamento *slug*. Esses valores foram utilizados como valores de referência e para normalizar os valores dimensionais de acordo com a Eq.2 e Eq.3.

$$V_B^* = V_B / V_{AV} \quad (2)$$

$$L_B^* = L_B / L_{AV} \quad (3)$$

4. RESULTADOS

Foram analisadas 46 amostras, em diferentes instantes, todas durante o escoamento do tipo *slug*. A Tabela 1 apresenta os valores médios de velocidade e comprimento para todas as amostras estudadas, e a Tabela 2 apresenta os valores normalizados de velocidade e comprimento das bolhas.

Tabela 1: Comprimento e Velocidade Médios das Bolhas

L_{AV} (m)	Desvio Padrão(m)	V_{AV} (m/s)	Desvio Padrão (m/s)
0,057	0,025	0,40	0,14

Tabela 2: Comprimento e Velocidade Normalizados das Bolhas

Amostra	L_B^*	V_B^*	Amostra	L_B^*	V_B^*	Amostra	L_B^*	V_B^*
1	0,24	0,53	17	0,85	0,64	33	1,16	1,16
2	0,30	0,80	18	0,85	0,82	34	1,19	1,25
3	0,36	0,38	19	0,87	0,59	35	1,24	1,34
4	0,36	0,71	20	0,88	0,65	36	1,27	1,33
5	0,46	0,85	21	0,93	0,73	37	1,27	0,98
6	0,52	0,82	22	0,94	0,74	38	1,39	1,43
7	0,54	0,51	23	1,00	0,72	39	1,42	1,09
8	0,55	0,62	24	1,00	0,85	40	1,43	1,41
9	0,59	0,88	25	1,05	1,12	41	1,46	1,36
10	0,59	0,72	26	1,05	0,89	42	1,52	1,69
11	0,65	0,51	27	1,07	1,16	43	1,55	1,83
12	0,71	0,59	28	1,08	1,19	44	1,63	1,80
13	0,73	0,75	29	1,08	0,78	45	1,77	1,60
14	0,79	0,58	30	1,09	0,82	46	1,79	1,42
15	0,84	0,50	31	1,09	1,09			

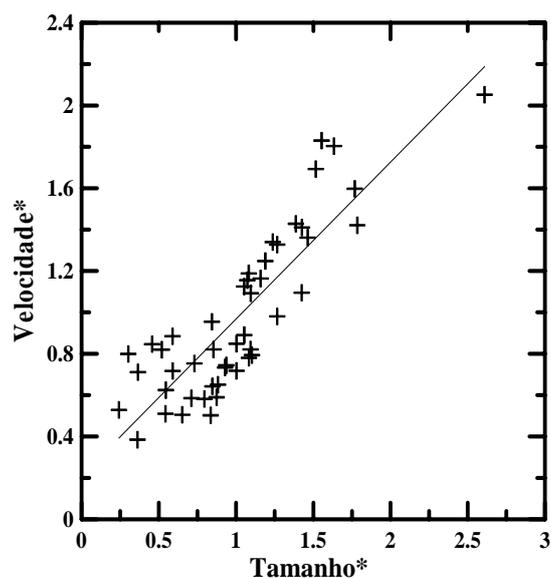


Figura 5. Velocidade Normalizada em função do Comprimento Normalizado

Fig. 5 mostra a velocidade normalizada em função do comprimento normalizado. Podemos observar que existe uma forte correlação entre a velocidade e o comprimento das bolhas, de acordo com a Eq. 4 (desvio médio de $\pm 20\%$), o que está de acordo com Nicklin *et al.* [7], onde o comprimento da bolha influencia sua velocidade de ascensão, em um tubo aberto, de maneira inteiramente linear. Ainda de acordo com Nicklin *et al.* [7] a velocidade do *slug* de líquido entre as bolhas também influencia a velocidade de ascensão. No presente trabalho, esta influência não foi estudada.

$$V_B^* = 0,76 L_B^* + 0,21 \quad (4)$$

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos foram considerados satisfatórios, de acordo com Nicklin *et al.* [7], mostrando a dependência da velocidade de ascensão das bolhas em relação a seu comprimento para tubos não fechados no topo. Além do comprimento, observou-se que outros parâmetros também devem ser melhor estudados em trabalhos futuros, como por exemplo a velocidade dos *slugs* de líquido entre as bolhas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPERJ e CNPq pelo apoio financeiro. O primeiro autor agradece ao CNPq e a CNEN pela bolsa de iniciação científica.

REFERÊNCIAS

1. Hanselman, D., Littlefield, B., “*MATLAB 6-Curso Completo*”, Pearson Education Brasil, São Paulo, Brasil (2004).
2. McAndrew, A., “*An Introduction to Digital Image Processing with Matlab-Notes for SCM2511 Image Processing I.*”, School of Computer Science and Mathematics-Victoria University of Technology, Canadá (2004).
3. IAEA, “Natural circulation in water cooled nuclear power plants: phenomena, models, and methodology for system reliability assessments”, *IAEA-TECDOC – 1474* (2005).
4. Schulz, T.L., “Westinghouse AP1000 advanced passive plant”, *Nuclear Engineering and Design*, vol. 236, pp. 1547–1557 (2006).
5. Lemos, W.F., Su, J., Faccini, J.L.H., “Experimental study of natural circulation circuit”, *Proceedings of INAC2011*, Belo Horizonte, Brasil (2011).
6. Davies, R. M. and Taylor, G. I., “The mechanics of large bubbles rising through extended liquids and through liquids in tubes”. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, 200, pp. 375 – 390 (1950).
7. Nicklin, D. J., Wilkes, J. O., and Davidson, J. F., “Two-phase flow in vertical tubes”. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, Vol.40, pp. 61-68 (1962).
8. Todreas, N.E., Kazimi, M.S., “*Nuclear Systems II- Elements of Thermal Hydraulic Design*”, Taylor & Francis, Boston, EUA (2001).