

# MEDIÇÃO DE NÍVEL DE LÍQUIDO EM UM CIRCUITO DE CIRCULAÇÃO NATURAL UTILIZANDO UMA TÉCNICA ULTRASSÔNICA

Amanda Cardozo Barbosa<sup>1</sup>, José L. H. Faccini<sup>2</sup> e Jian Su<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Nuclear – Escola Politécnica  
Universidade Federal do Rio de Janeiro  
21941-909 Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
amandabarbosa@poli.ufrj.br

<sup>2</sup>Instituto de Engenharia Nuclear (IEN / CNEN)  
21941-906, Rio de Janeiro – RJ – Brasil  
faccini@ien.gov.br

<sup>3</sup>Programa de Engenharia Nuclear, COPPE  
Universidade Federal do Rio de Janeiro  
21941-909 Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
sujian@lasm.coppe.ufrj.br

## RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo experimental sobre a medição por uma técnica ultrassônica, do nível de água no tanque de expansão do Circuito de Circulação Natural (CCN) do Laboratório de Termo-hidráulica Experimental do Instituto de Engenharia Nuclear. Na operação do CCN em regime monofásico o nível de água no tanque de expansão é estável. Entretanto, ao longo da operação em regime bifásico, ocorrem oscilações no nível de água decorrentes de variações da temperatura e da fração de vazio. Desse modo, o desenvolvimento de uma técnica que possibilite a medição destas oscilações, permitirá uma estimativa da variação da fração de vazio do circuito ao longo do tempo. A montagem experimental foi realizada em uma bancada de testes, utilizando um conjunto transdutor de ultrassom – sapata, fixado na base de um tanque similar ao tanque de expansão do CCN. A técnica ultrassônica utilizada é por pulso-eco, em que um mesmo transdutor é emissor e receptor de sinal. O conjunto transdutor-sapata é parte de um sistema ultrassônico formado por uma placa geradora de sinais ultrassônicos, transdutores e um computador (PC) com um programa em LabView para controlar o sistema. O programa é capaz de calcular o tempo de trânsito que os sinais ultrassônicos levam para atravessar a parede da base do tanque, a camada (nível) de líquido e retornar ao transdutor. Sabendo a velocidade do ultrassom na parede e no líquido é possível calcular a espessura da parede e a altura do líquido. As medições foram realizadas enchendo-se o tanque com um volume conhecido de água e em condições de temperatura variável, desde a temperatura ambiente até 90 °C. As alturas de líquido são determinadas e o volume de água calculado, medindo-se a temperatura com um termômetro digital. Os volumes medidos foram altamente precisos quando comparados com os volumes conhecidos.

## 1. INTRODUÇÃO

O estudo da circulação natural é de grande importância na Engenharia Nuclear, visto que a sua aplicação no projeto de reatores nucleares avançados requer o seu controle durante a refrigeração do núcleo do reator, em operações normais ou em operações emergenciais.

O objetivo desse trabalho é desenvolver uma metodologia que permita medir o nível de água no tanque de expansão do Circuito de Circulação Natural (CCN) do Laboratório de Termohidráulica Experimental do Instituto de Engenharia Nuclear. O CCN é um modelo em escala de 1:10 de altura, similar ao protótipo de um sistema de remoção de calor residual de um reator do tipo APWR (Advanced Power Water Reactor). É composto por um aquecedor, um trocador de calor, tubulações (perna quente e perna fria) e um tanque de expansão. Na operação do CCN em regime monofásico o nível de água no tanque de expansão é estável. Entretanto, ao longo da operação em regime bifásico, ocorrem oscilações no nível de água decorrentes de variações da temperatura e da fração de vazio [1,2]. Desse modo, o desenvolvimento de uma técnica que possibilite a medição destas oscilações, permitirá uma estimativa da variação da fração de vazio do circuito ao longo do tempo.

Dentre as várias técnicas disponíveis para medição de nível, a técnica ultrassônica por pulso eco têm se mostrado uma das mais confiáveis [3,4]. Esta técnica baseia-se no princípio de um mesmo transdutor exercendo simultaneamente a função de receptor e emissor de ondas ultrassônicas. Esses pulsos são emitidos em intervalos periódicos, atravessam a parede do tanque, a camada de líquido e são refletidos ao encontrar com a interface ar-água. Para medir a camada de líquido é necessário que a velocidade de propagação da onda ultrassônica no meio seja conhecida. Utilizaram essa técnica [5], para avaliar a fração de vazio em um circuito de circulação natural na temperatura ambiente. Na literatura diversos trabalhos experimentais têm procurado medir a velocidade do som na água em função da temperatura. De acordo com [6], a velocidade do som ( $c$ ), pode ser calculada pela Eq. (1)

$$c = 1404,3 + 4,7T - 0,04T^2 \quad (1)$$

No entanto, essa correlação é válida apenas para a faixa de temperaturas de 15 a 35 °C não cobrindo toda a faixa de operação do CCN, que é desde a temperatura ambiente até a temperatura de saturação da água na pressão atmosférica.

Segundo [7], foram utilizados pulsos ultrassônicos para medir a velocidade do som na água destilada para os intervalos de temperatura de 0,9 °C a 91,2 °C. Os resultados experimentais encontrados foram ajustados utilizando o método de mínimos quadrados, obtendo assim, uma equação de quarto grau.

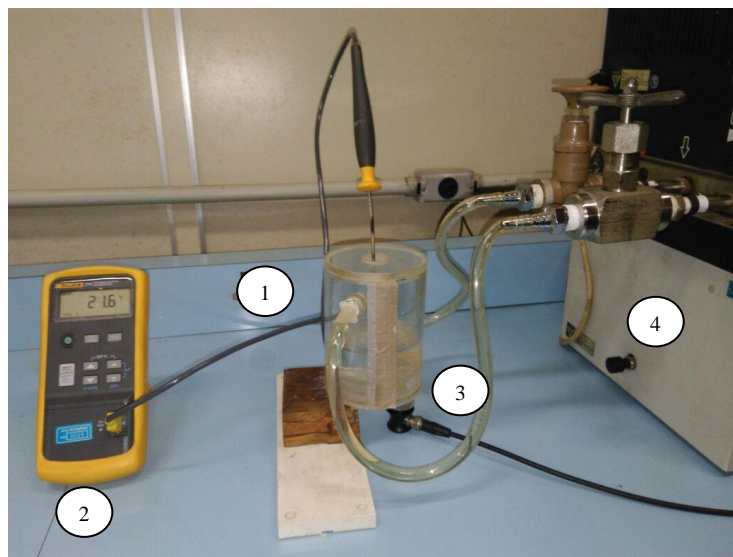
Já para [8], foi encontrado um ajuste para a velocidade do som em relação à temperatura como uma equação de quinta ordem. Foram realizadas 148 observações entre 0,001 °C e 95,126 °C com desvio padrão máximo de 0,0028 (m/s). A acurácia foi de 0,0015 (m/s).

Enquanto [9], obteve medições precisas da velocidade do som na água, combinando uma técnica de detecção de fase e um interferômetro de comprimento variável. Entretanto, só foram realizadas medições na faixa de temperatura de 20 °C até 75 °C.

Sendo assim, foi possível comparar os resultados de [7,8] com os obtidos por meio dos experimentos, com o objetivo de validar a metodologia aplicada para que seja utilizada futuramente no CCN.

## 2. MONTAGEM EXPERIMENTAL

Este trabalho foi realizado no Laboratório de Termo-Hidráulica Experimental, localizado no Instituto de Engenharia Nuclear (LTE/IEN). Uma bancada de testes foi montada para realizar os experimentos. A medição dos parâmetros foi obtida utilizando-se a técnica ultrassônica de pulso-eco.



**Figura 1: Montagem experimental (1- Tanque; 2- Termômetro digital; 3- Transdutor de ultrassom-sapata; 4- Banho termostático).**

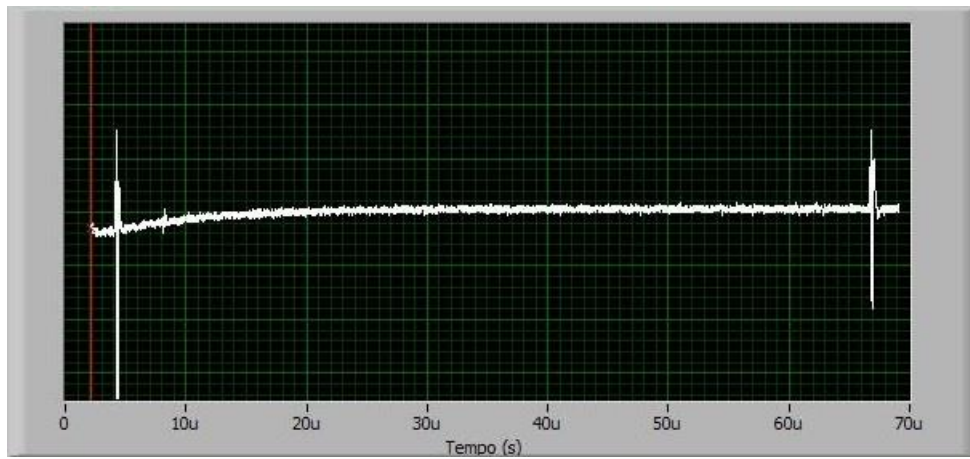
A montagem experimental é formada por um tanque de acrílico (1) de 100,1mm de diâmetro e 136,65mm de altura. O tanque possui uma escala em milímetros que serviu de referência a medição da altura de líquido. O tanque possui também dois bocais em sua lateral para conexão, através de mangueiras de silicone, com um banho termostático (4) da marca HAAKE, modelo N 2-B. Pela tampa superior do tanque foi inserido um termômetro digital (2) da marca FLUKE, modelo 714, equipado com um termopar do tipo K com incerteza de 0,93 °C. No banho termostático há duas válvulas para o controle da circulação de água pelo tanque. A válvula conectada no bocal lateral superior é responsável por controlar a vazão de entrada de água, enquanto uma outra válvula conectada no bocal lateral inferior é responsável por controlar a vazão de saída.

Para medição da altura de líquido no interior do tanque de acrílico, foi utilizado um conjunto transdutor de ultrassom-sapata (3). A sapata é transparente aos sinais ultrassônicos e tem como objetivo minimizar a transferência de calor para o transdutor evitando que a temperatura ultrapasse o valor máximo suportado pelo transdutor.

O transdutor de ultrassom utilizado é da marca Olympus do tipo piezoelétrico de 10 MHz e 13 mm de diâmetro. O transdutor foi posicionado na base do tanque, usando-se vaselina em pasta como acoplante. Um suporte de madeira foi utilizado para dar sustentação ao tanque de

acrílico, tomando-se cuidados para que o conjunto ficasse perfeitamente nivelado em relação à bancada. Para isto foi utilizado um nível de bolha da marca Mitutoyo e incerteza de 0,05 mm/m.

O transdutor de ultrassom foi conectado a uma placa geradora/multiplexadora de sinais ultrassônicos, da marca Ultrateke modelo DSPUT5000-4. A placa é responsável por gerar e adquirir os sinais ultrassônicos que são digitalizados a uma taxa de amostragem equivalente a intervalos de tempo de 10 ns. Os sinais são emitidos e recebidos continuamente pelo mesmo transdutor, caracterizando assim o modo pulso-eco. A placa fica instalada em um computador com um aplicativo em LabView que calcula o tempo de trânsito dos sinais ultrassônicos, entre o transdutor e a interface água-ar no interior do tanque. Esses dados são gravados em arquivos do tipo.txt para posterior tratamento e análise.



**Figura 2: Ecograma típico registrado pelo sistema ultrassônico.**

Na Fig. 2, observa-se um ecograma típico do sistema ultrassônico. O primeiro pulso representa a reflexão de parte dos sinais ultrassônicos na interface parede interna-água. O segundo pulso representa a reflexão do restante dos sinais ultrassônicos na interface água-ar. É possível também observar na Fig. 2 alguns ruídos de fundo entre os pulsos, que foram minimizados fazendo-se uso de filtros passa-alta e passa-baixa.

### 3. PROCEDIMENTOS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para o cálculo da altura de líquido no interior do tanque de acrílico, foi utilizada a expressão dada pela Eq. (2).

$$L_l = \frac{c_l T_l}{2} \quad (2)$$

onde:

- $L_l$  é a altura de líquido;
- $c_l$  é a velocidade do som na água;
- $T_l$  é o tempo de trânsito de ida e volta adquirido pelo sistema ultrassônico na água.

A primeira etapa do experimento consistiu na calibração estática da escala de referência do tanque. Foram realizadas 10 (dez) medições de altura de líquido, com 3 (três) repetições, de 10 a 100 mm com intervalos de 10 mm e na temperatura ambiente. Inicialmente a água foi colocada no tanque até a marca de 10 mm. A altura de água foi então calculada, a partir da medição do tempo de trânsito dada pelo sistema ultrassônico, descontando-se o tempo de trânsito na base do tanque e usando a Eq. 2. Para a determinação da velocidade do líquido ( $c_l$ ) foi usada a correlação de [6], que é válida para a faixa de temperaturas de 15-35 °C. Esse procedimento foi repetido para as 10 medições, até que se atingisse o último valor na escala de referência. Os resultados da calibração da escala de referência são mostrados na Fig. 3. Conforme observamos no ajuste da curva da Fig. 3, a calibração da escala de referência apresentou ótimo resultado, mostrando-se adequada com os valores reais encontrados pelos processamentos feitos por meio do ultrassom.

Na avaliação das incertezas, utilizaram-se valores dos erros de medição dos equipamentos envolvidos na calibração. A incerteza da calibração da velocidade pode ser definida como a soma das incertezas associadas aos equipamentos sendo expressa pela Eq. (3) [10]:

$$\delta_c^2 = \delta_{Ll}^2 + \delta_{Tl}^2 + \delta_{Tc}^2 \quad (3)$$

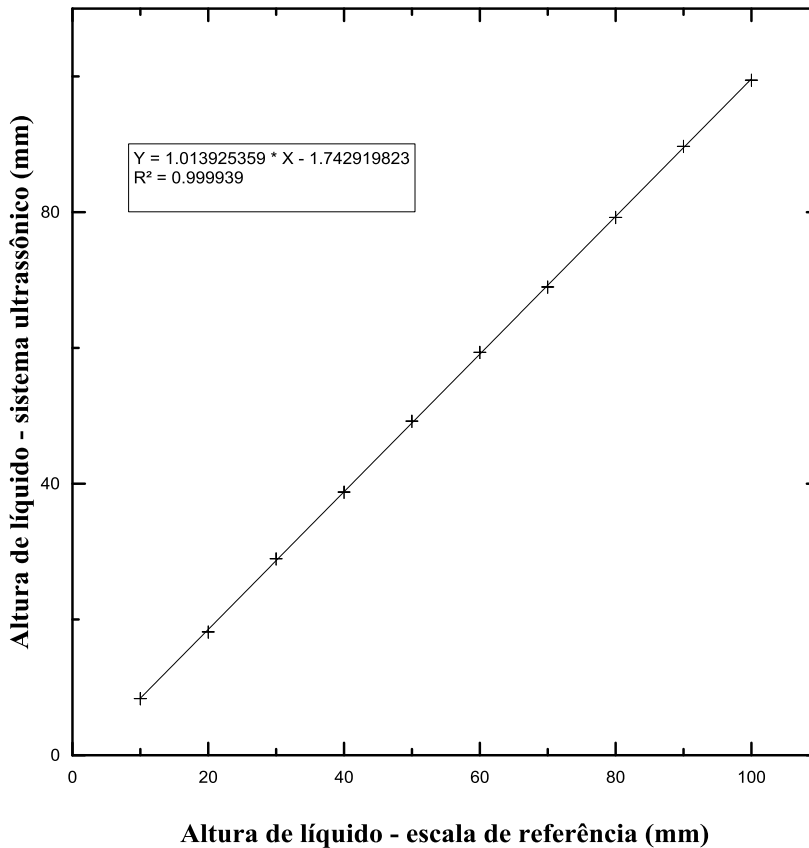
Onde  $\delta_c$  é a incerteza da velocidade,  $\delta_{Ll}$  é a incerteza na leitura da escala de referência,  $\delta_{Tl}$  é a incerteza na medida do tempo de trânsito e  $\delta_{Tc}$  é a incerteza na medida da temperatura. Os erros dos equipamentos dados pelos fabricantes encontram-se na Tab.1.

**Tabela 1: Erros dos equipamentos usados na calibração**

| Instrumentos         | Incerteza |
|----------------------|-----------|
| Termômetro digital   | 0,93 °C   |
| Escala de Referência | 0,5 mm    |
| Sistema ultrassônico | 20 ns     |

O erro de leitura da escala de referência de +/- 0,5mm resultou em uma incerteza associada  $\delta_{Ll} = 9,42$  m/s. O erro na determinação do tempo de trânsito de +/- 20ns acarretou uma incerteza  $\delta_{Tl} = 0,30$  m/s. E finalmente o erro do termômetro digital de +/- 0,93 °C resultou em uma incerteza de  $\delta_{Tc} = 2,47$  m/s.

Então a incerteza na determinação da velocidade, pela Eq. (3), é  $\delta_c = +/- 47,51$  m/s.



**Figura 3: Calibração da escala de referência.**

A segunda etapa consistiu na determinação da velocidade do som, em função da temperatura, a partir das medições do tempo de trânsito na água e para uma altura de líquido fixa. Nesta etapa o tanque de acrílico foi completado com água até a indicação na escala de referência correspondente a 90 mm de altura. Em seguida a temperatura era lida no termômetro e os tempos de trânsito dos sinais ultrassônicos gravados no computador. Após isso, o banho termostático foi posto em funcionamento, aquecendo a água e mantendo a temperatura controlada. O procedimento anterior foi repetido para as seguintes temperaturas: 30°C, 40°C, 50°C, 60°C, 70°C, 80°C e 90°C, sendo feitas 3 (três) repetições para cada temperatura. O cálculo da velocidade do som em função da temperatura foi realizado através da Eq. (2), de onde obteve-se que

$$\bar{c}_l = \frac{2\bar{L}_l}{\bar{T}_l} \quad (4)$$

sendo  $\bar{c}_l$  a velocidade média do som,  $\bar{L}_l$  a altura média do líquido lida na escala de referência e  $\bar{T}_l$  o tempo médio de trânsito dado pelo sistema ultrassônico.

A Tab. 2 apresenta os dados experimentais obtidos através da Eq. (4) para a velocidade do som em função da temperatura.

**Tabela 2: Velocidade do som em função as temperatura, calculada pela Eq. (4)**

| Temperatura Média (°C) | Velocidade Média (m/s) |
|------------------------|------------------------|
| 24,1                   | 1513,51                |
| 30,0                   | 1518,69                |
| 40,1                   | 1544,09                |
| 50,2                   | 1562,86                |
| 60,0                   | 1573,28                |
| 70,0                   | 1576,06                |
| 80,2                   | 1586,82                |
| 90,1                   | 1582,55                |

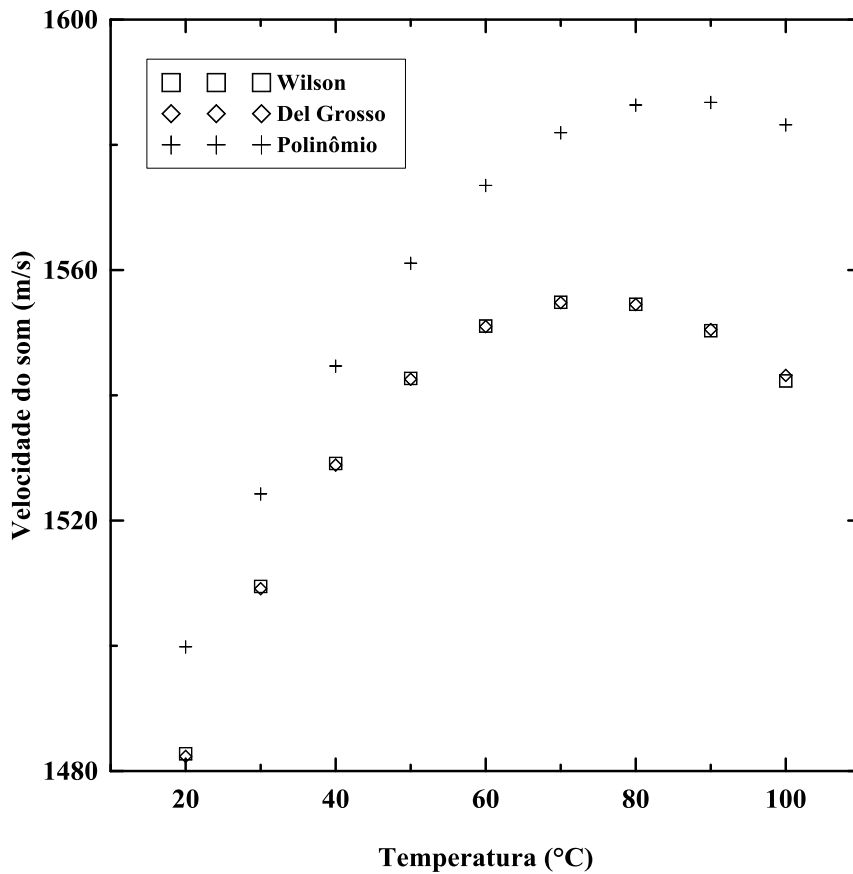
Os valores experimentais de  $\bar{c}_l$  foram ajustados por um polinômio de acordo com a Eq. (5). Os coeficientes  $a_i$  são mostrados na Tab. 3, junto com os dados de [7] e [8].

$$c_l = \sum_{i=0}^n a_i T^i \quad (5)$$

**Tabela 3: Coeficientes para o polinômio de ajuste dado pela Eq. (5)**

| Coeficientes | Wilson    | Del Grosso | Polinômio |
|--------------|-----------|------------|-----------|
| $a_0$        | 1,40E+03  | 1,40E+03   | 1,44E+03  |
| $a_1$        | 5,02E+00  | 5,04E+00   | 3,44E+00  |
| $a_2$        | -5,69E-02 | -5,81E-02  | -2,00E-02 |
| $a_3$        | 2,88E-04  | 3,35E-04   | -         |
| $a_4$        | -8,24E-07 | -1,49E-06  | -         |
| $a_5$        | -         | 3,24E-09   | -         |

Na Fig. 4 são apresentados os resultados do presente trabalho em comparação com os dados dos trabalhos de [7] e [8]. É possível observar na Fig. 4 que os valores encontrados para a velocidade do som na água em função da temperatura apresentam uma razoável concordância com os resultados de [7] e [8]. Na Tab. 3 essa concordância pode ser melhor avaliada através das diferenças percentuais apresentadas no presente trabalho, em comparação com os resultados destes autores. Os dados da Tab. 4 do presente trabalho foram gerados coma Eq. (5), apresentando diferença máxima de 2,65 %.



**Figura 4: Velocidade do som em função da temperatura.**

**Tabela 4: Diferenças percentuais dos resultados do presente trabalho em relação a [6] e [7]**

| T(°C)  | Velocidade (m/s)  |  |                       |  |             |
|--------|-------------------|--|-----------------------|--|-------------|
|        | Wilson et al. [7] | Diferença em relação a Wilson et al. [7] | Del Grosso et al. [8] | Diferença em relação a Del Grosso et al. [8] | Equação (5) |
| 20,00  | 1482,75           | 1,15%                                    | 1482,34               | 1,18%  | 1499,84     |
| 30,00  | 1509,48           | 0,98%                                    | 1509,13               | 1,00%  | 1524,26     |
| 40,00  | 1529,12           | 1,02%                                    | 1528,86               | 1,03%  | 1544,68     |
| 50,00  | 1542,70           | 1,19%                                    | 1542,55               | 1,20%  | 1561,10     |
| 60,00  | 1551,07           | 1,45%                                    | 1550,99               | 1,45%  | 1573,52     |
| 70,00  | 1554,86           | 1,74%                                    | 1554,80               | 1,75%  | 1581,94     |
| 80,00  | 1554,53           | 2,05%                                    | 1554,49               | 2,05%  | 1586,36     |
| 90,00  | 1550,33           | 2,35%                                    | 1550,49               | 2,34%  | 1586,78     |
| 100,00 | 1542,29           | 2,65%                                    | 1543,17               | 2,59%  | 1583,20     |



## 4. CONCLUSÕES

O presente trabalho foi realizado em uma montagem experimental que simulou o comportamento do tanque de expansão do CCN/IEN. Foram feitas medições de altura de líquido com temperatura variável, utilizando uma metodologia baseada na técnica ultrassônica de pulso-eco. As seguintes conclusões foram obtidas:

- a metodologia empregada mostrou-se adequada para os objetivos do trabalho.
- os resultados obtidos para a velocidade do som na água, em função da temperatura, foram satisfatórios levando-se em conta as diferenças percentuais desses resultados em comparação aos resultados da literatura.
- introduzindo-se pequenas melhorias na montagem experimental, tais como: escala de referência mais confiável, melhor controle das temperaturas, acoplamento do transdutor ultrassônico etc., será possível reduzir as diferenças percentuais em relação às correlações da literatura.
- a metodologia também mostrou-se adequada para futura aplicação no tanque de expansão do CCN/IEN, próxima etapa deste trabalho.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPERJ e ao CNPq pelo apoio financeiro. Amanda C. Barbosa agradece ao CNPq e a CNEN pela bolsa de iniciação científica.

## REFERÊNCIAS

1. A. C. Barbosa, P. A. M. Vinhas, W. F. Lemos, J. L. H. Faccini, S. Jian, “Diagnóstico de Regimes Bifásicos em um Circuito de Circulação Natural através de uma Técnica de Visualização”, *International Nuclear Atlantic Conference – INAC*, São Paulo, 4-9 de outubro (2015).
2. A. L. B. Vianna, J. L. H. Faccini, J. Su, “Experimental Study of Two-Phase Flow Oscillations in a Natural Circulation Loop”, *Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering – ENCIT*, Vitória, 7-10 de novembro (2016).
3. J. Chang, Y. Ichikawa, e G. Irons, “Flow Regime Characterization and Liquid Film Thickness Measurement in Horizontal Gas-Liquid Two-Phase Flow by an Ultrasonic Method”, *Measurements in Polyphase Flow*, T.R. Heidrick and B.R. Patel eds., pp. 7–12 (1982).
4. J. S. Chang e E. C. Morala, “Determination of Two-Phase Interfacial Areas by an Ultrasonic Technique”, *Nuclear Engineering and Design*, **Volume 122**, pp. 143–156 (1990).
5. J. L. H. Faccini, J. S. Chang, G. D. Harvel, P. A. B. De Sampaio and J. Su, “Measurement of Natural Circulation Two-Phase Flow by Hybrid Doppler Contrapropagating and Pulse Echo Ultrasonic Techniques”, *ICONE17: 17th International Conference on Nuclear Engineering*, Bruxelas (Bélgica), July 12-16 (2009).

6. J. Lubbers, R. Graaff, “A Simple and Accurate Formula for the Sound Velocity in Water”, *Ultrasound in Med. & Bio*, **Volume 24**, pp.1065-1068 (1998).
7. W. D. Wilson, “Speed of Sound in Distilled Water as a Function of Temperature and Pressure”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, **Volume 31**, pp. 1067-1072 (1959).
8. V. A. Del Grosso, C., W. Mader, “Speed of Sound in Pure Water”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, **Volume 52**, pp. 1442-1446 (1972).
9. K. Fuji, R. Masui, “Accurate Measurements of the Sound Velocity in Pure Water by Combining a Coherent Phase-Detection Technique and a Variable Path-Length Interferometer”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, **Volume 93**, pp. 276-282 (1993).
10. S. J. Kline, F. A. McClintock, “Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments”, *Mechanical Engineering*, **Volume 75**, pp. 3-8 (1953).