

Artigo Original

Recebido em 14/01/2008, aceito em 14/04/2008

Validação de um sistema de calibração de transdutores de ultra-som por auto-reciprocidade

Validation of an ultrasound transducer self-reciprocity calibration system

Everande Gobira de Oliveira
Rodrigo Pereira Barretto da Costa-Félix*

Divisão de Metrologia Acústica e de Vibrações,
Laboratório de Ultra-Som – Inmetro
Av. N. Sra. das Graças, 50 (Prédio 1), Xerém
25250-020 Duque de Caxias, RJ
E-mail: rpfelix@inmetro.gov.br

Carlos Henrique Figueiredo Alves

Departamento de Engenharia Elétrica e Programa de Pós-Graduação em Tecnologia / CEFET-RJ

*Autor para correspondência

Resumo

No método de calibração por auto-reciprocidade, a sensibilidade do transdutor é determinada a partir do conhecimento de parâmetros elétricos de excitação do transdutor (tensão e corrente), além de outras grandezas presentes no parâmetro geral de reciprocidade para ondas planas J_p . O objetivo deste trabalho é validar um sistema de calibração por auto-reciprocidade, conforme a norma IEC 60866:1987. A validação foi realizada utilizando-se um padrão de referência calibrado no *National Physical Laboratory* (NPL) em conjunto com transdutores com frequência central de 1,0 MHz e 2,25 MHz. Para a validação do sistema de calibração, a tensão de alimentação aplicada aos transdutores foi variada de 1 a 10 V, medidos pico a pico, na faixa de 0,80 a 1,32 MHz para o transdutor de 1,0 MHz e na faixa de 1,5 a 3,0 MHz para o transdutor de 2,25 MHz. Foram considerados válidos os pontos em frequência cujos resultados da calibração tiveram incerteza devido à linearidade máxima menor do que 10% e incerteza combinada menor do que 9%. O sistema foi validado na faixa de 1,04 a 1,32 MHz (com base nos resultados do transdutor de 1,0 MHz) e na faixa 1,55 a 2,90 MHz (utilizando-se o transdutor de 2,25 MHz). Nas frequências próximas à frequência de ressonância, a incerteza combinada típica do transdutor de 1,0 MHz foi de cerca de 5%, e a do transdutor de 2,25 MHz em torno de 8%. A faixa reduzida do primeiro transdutor deu-se por restrições do sistema experimental utilizado, particularmente pelos dados de calibração do padrão de referência utilizado. O sistema se mostrou adequado e os resultados foram considerados dentro do padrão esperado.

Palavras-chave: Metrologia, Ultra-som, Calibração, Transdutor, Hidrofone.

Abstract

According to the self-reciprocity calibration method, ultrasonic transducer sensitivity is depicted from the knowledge of electrical parameters of excitation (voltage and electric current), as well as other quantities expressed in the general reciprocity parameters for plane waves J_p . This work goal is to validate a self-reciprocity calibration system, as disclosed in IEC 60866:1987 standard. The validation was performed with the aid of a standard reference calibrated at the National Physical Laboratory (NPL) and transducers with 1.0 and 2.25 MHz central frequency. To validate the system, driven voltage varied from 1 to 10 V, measured peak to peak, in frequency range from 0.8 to 1.32 MHz for 1.0 MHz transducer and from 1.5 to 3.0 MHz for the 2.25 MHz. Frequency points were considered validated if maximum linearity was less than 10% and combined uncertainty less than 9%. The system was validated in the frequency range between 1.04 to 1.32 MHz (based on 1.0 MHz transducer results), and from 1.55 to 2.90 MHz (using the 2.25 MHz transducer). At frequencies points close to resonance, typical combined uncertainty was about 5% for the 1.0 MHz transducer, and 8% for the 2.25 MHz transducer. The reduced range of the first transducer was due to experimental system restrictions, particularly because of reference standard calibration data. The system was considered satisfactory to be used and results found were accordingly to expected behaviour.

Keywords: Metrology, Calibration, Ultrasound, Transducers, Hydrophones.

Extended Abstract

Introduction

Traceability is a well defined term in metrology. For any given quantity, it should be primarily guaranteed by a National Metrology Institute (NMI) absolute calibration. In ultrasound field, transducer calibration is a fundamental and basic service to be offered. Among many transducers calibration methods available, self-reciprocity accordingly to IEC 60866:1987 may be considered one of most reliable and easy to be implemented. This paper presents the validation of a self-reciprocity ultrasonic transducer calibration system. The validation was performed comparing results obtained both with self-reciprocity technique and with a reference standard hydrophone traced to National Physical Laboratory (NPL), United Kingdom NMI.

Materials and Methods

Measurements were undertaken in an acrylic walled water bath, and a stainless steel cylinder as reflecting target. Voltages were measured with an oscilloscope (NI PXI 5112, National Instruments) and the ultrasound signal was generated with an arbitrary function generator (NI PXI 5442, National Instruments). Current was calculated through the voltage difference in an in-line 56Ω nominal resistor, which was calibrated with the aid of a vector impedance meter (4294A, Agilent Technologies). All measurements were automatically performed, sensitivities were assessed and all data stored using a self build automation system developed in LabVIEW® platform. Devices under test were two ultrasonic transducer manufactured by Panametrics-NDT, model A303S ($\varnothing = 12.7$ mm, nominal frequency of 1.0 MHz) and A304S ($\varnothing = 25.4$ mm, nominal frequency of 2.25 MHz). A calibrated hydrophone (Precision Acoustics PVDF hydrophone with active element of 0.5 mm-diameter, with its own pre-amplifier, DC coupler and boost amplifier) was used as reference standard.

Five measurements were performed in repeatability conditions. In each measurement, driven voltage ranged from 1 to 10 V, measured peak to peak, in order to evaluate device linearity. Excitations consisted in stepped sine tone-burst. Uncertainties were assessed for each frequency, each measurement and for each driven voltage, and its budget was defined accordingly to ISO-GUM requirements.

For each frequency, sensitivity was considered validated if linearity was less than 10% and combined uncertainty was less than 9%. Besides, measurements performed with the reference standard should not be more apart than \pm twice the combined uncertainty. The system was considered valid to perform calibration just in those frequencies were all validation criteria applied.

A system's diagram is shown in Figure 1 for self-reciprocity and Figure 2 when using a reference hydrophone.

Results

According to the defined linearity criteria, 1.0 MHz transducer calibrations were considered valid from 0.98 up to 1.32 MHz, and from 1.0 to 1.32 MHz for the uncertainty criteria, as disclosed in Figures 3 and 4. Comparing against the reference standard, the final frequency range for the 1.0 MHz transducer is valid from 1.04 to 1.32 MHz (see Figure 5).

Figures 6, 7 and 8 depict results for the 2.25 MHz transducer. The final result for that transducer is this its calibration was validated from 1.50 to 2.90 MHz.

As a joint result, the self-reciprocity ultrasonic transducer calibration system was considered appropriated to be used from 1.04 to 2.90 MHz.

Discussion and Conclusion

Knowledge of a transducer sensitivity is essential as far as with it is possible to infer from a given voltage (or current) which will be the ultrasonic field propagated.

After this work, for the specific calibration system used, expanded uncertainties with a coverage factor of 95% were determined as less than 18%. Standard IEC 60866:1987 stated that a typical uncertainty for that procedure would be less than 1.5 dB, or approximately 18.8%. The first goal of implementing a calibration system is to be at least as good as the international reference standard states. From this point of view, the system shall be considered appropriated. Nevertheless, a question of frequency ranges remains. As the calibration system had just been established, the frequency range it covers is not as wide as it should. The self-reciprocity method employed here is known to be difficult to implement at high frequencies. That was exactly the difficulty found out in the course of that implementation. Frequency range broadening is a further necessary step.

A distinguishing point to be highlighted is the fully automated system's feature. The easy to develop platform used, LabVIEW®, made that possible. As consequence, an almost error-free measurement capability, assessment procedure and registration of data lead to a much more secure system as possible in former implementation of that method.

Despite high uncertainties were found far from the transducers' central frequencies, it is worthy to point out that close to transducer nominal frequencies differences of less than 1% were found. It increases the system confidence as a whole, as it is widely known that typical PVDF transducer have poor responses on that region.

Introdução

As técnicas derivadas do uso do ultra-som são utilizadas em diversas áreas, destacando-se as aplicações na área de saúde e ensaios não-destrutivos. Os equipamentos que utilizam ultra-som como princípio físico de funcionamento devem ser avaliados por instrumentos rastreáveis na área de ultra-som (Preston, 1991). Neste contexto, a calibração de transdutores de ultra-som tem importância fundamental no processo de medição para prover a confiabilidade necessária aos equipamentos que utilizam o ultra-som como princípio de funcionamento (Chivers e Lewin, 1982).

Em um processo de avaliação metrológica, a manutenção da rastreabilidade, conforme descrita no Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia – VIM (Inmetro-SENAI, 2007), é fator importante, pois informa quão próximo o resultado de uma medição está dos valores estabelecidos por padrões. A calibração é uma atividade fundamental em qualquer Instituto Nacional de Metrologia, embora não exclusivamente destes. A partir da calibração, é possível identificar a confiabilidade de um equipamento de medição ou padrão de trabalho, comparando os resultados da calibração com especificações de normas (Costa-Felix, 2005). Na calibração de um instrumento, é necessário expressar a incerteza associada ao resultado numérico declarado, considerada um parâmetro fundamental na quantificação da qualidade final do resultado da medição. A calibração de transdutores ultra-sônicos é de grande importância, pois, a partir da mesma, é possível calcular a pressão gerada no campo ultra-sônico a partir do nível de tensão ou corrente fornecida ao transdutor.

A calibração por auto-reciprocidade é uma técnica na qual a sensibilidade do transdutor é determinada a partir de um sinal acústico gerado e, após a reflexão em um alvo apropriado, recebido pelo mesmo transdutor (Carstensen, 1947; Ebaugh e Mueser, 1947). Diversos sistemas e protocolos de medição podem ser utilizados com base nesta técnica, conforme se encontram descritos na literatura (por exemplo, Abrunhosa, 2006; Beissner, 1980; Brendel e Ludwig, 1976; Labuda *et al.*, 2004). Para execução deste trabalho, foi desenvolvido um sistema de medição próprio, distinto dos existentes na literatura, compreendendo uma metodologia com base na técnica da auto-reciprocidade e utilizando instrumentação e protocolos de automação de medição modernos. Visando relatar a validação deste sistema de calibração de transdutores de ultra-som por auto-reciprocidade, foram calibrados dois transdutores de ultra-som, com frequência cen-

tral 1,0 MHz e 2,25 MHz, segundo a norma técnica IEC 60866:1987, internacionalmente reconhecida. Em seguida, os mesmos transdutores foram calibrados segundo uma técnica de comparação (Costa-Félix e Machado, 2007). Nesta, foi utilizado um padrão de referência calibrado no *National Physical Laboratory* (NPL), Instituto Nacional de Metrologia do Reino Unido. A validação do sistema, objetivo deste trabalho, foi feita comparando-se os resultados obtidos com ambos os métodos.

A norma IEC 60866:1987 estabelece diversos parâmetros a serem avaliados no transdutor, muitos dos quais são utilizados na sua especificação técnica (aprovação de modelo), e outros necessários apenas para uma calibração simples, realizada periodicamente. Neste trabalho as calibrações realizadas permitiram a validação do sistema entre, aproximadamente, 1 e 3 MHz, embora a norma seja aplicada até 15 MHz. Entretanto, a instrumentação utilizada apresenta resolução espacial menor que 0,1 mm e temporal melhor que 0,06 μ s, ambas exigências da norma para a faixa de frequência de aplicação. O hidrofone utilizado atende as especificações da norma no tocante a sua dimensão. Como o propósito deste trabalho foi validar o sistema de medição, e não caracterizar um ou alguns hidrofones em particular segundo a norma empregada, alguns ensaios não foram realizados, tais como a variação da temperatura entre 16 e 30 °C (ou 40 °C), variação temporal de longo termo (1 ano), diretividade, dependência com a frequência (além da faixa validada do sistema), entre outras características mecânicas e elétricas do hidrofone. Destaca-se que estas características são definidas em norma a fim de aprovar e classificar o modelo do hidrofone, sendo este serviço realizado ainda em estágio de protótipo pré-comercialização. Entende-se que, uma vez no mercado, o hidrofone passou por este tipo de avaliação previamente, e responde de acordo com sua classe. No entanto, a calibração como atividade corriqueira, objetivo do sistema de medição validado neste trabalho, é realizada apenas atendendo a certas características, normalmente àquelas com influência direta no resultado de sua medição, pressão ou intensidade ultra-sônica neste caso. Os parâmetros de campo ultra-sônico e elétricos da instrumentação foram especificados a fim de atender os requisitos normativos. Atenção especial foi dada à avaliação da linearidade dos transdutores empregados na validação do sistema, sendo descartadas as faixas de frequência cuja incerteza devido a este parâmetro fosse acima do estabelecido em norma (10%).

Fundamentos Teóricos

Calibração absoluta de transdutores por auto-reciprocidade – Um método absoluto de calibração é aquele cuja grandeza física de interesse é obtida diretamente de outras grandezas. Dentre os métodos absolutos está presente a calibração por auto-reciprocidade. No caso da calibração de transdutores de ultra-som por auto-reciprocidade, a grandeza física de interesse é a pressão ultra-sônica, obtida a partir de grandezas elétricas (tensão e corrente) e outras grandezas presentes no parâmetro geral para reciprocidade, J_p (Bobber, 1966; Reid, 1974). Esta técnica tem como principal vantagem o conhecimento da teoria que descreve o campo acústico gerado pelo transdutor em função de parâmetros elétricos (Ludwig e Brendel, 1988). Uma descrição detalhada, em português, do método pode ser encontrada em (Costa-Félix e Machado, 2007).

A Figura 1 mostra o esquema utilizado na calibração por auto-reciprocidade do sistema de medição utilizado neste trabalho. A função do circuito de comutação com diodos (“Chave comutadora”, na Figura 1) é tornar possível a medição das tensões elétricas V_0 e V_1 no sentido direto do pulso, e a medição do sinal de eco V_r , quando o transdutor funcionar como receptor. A corrente de alimentação do sistema I_1 é determinada pela diferença de potencial sobre a o resistor R em série no circuito, conforme equação (1).

$$I_1 = \frac{V_0 - V_1}{R} \quad (1)$$

onde I_1 [A] é a corrente de alimentação do transdutor, V_0 [V] é a tensão após os diodos no sentido direto do pulso ultra-sônico, V_1 [V] é a tensão após o resistor no sentido direto do pulso ultra-sônico e R [Ω] é o resistor em série para medição de corrente.

Correção para onda plana – Devido ao tamanho dos transdutores comparado com o comprimento de onda, e ao progressivo aumento da absorção acústica com a frequência, na faixa de MHz não é possível obter a condição de reciprocidade para onda plana. Conseqüentemente, o parâmetro da reciprocidade para ondas planas deve ser corrigido com relação aos efeitos dependentes da frequência (Brendel e Ludwig, 1976; Chivers e Lewin, 1982; IEC, 1987), tais como difração e atenuação, que modificam a condição de propagação da onda acústica para o percurso transdutor - alvo refletor - transdutor. O parâmetro de reciprocidade com a respectiva correção é apresentado na equação (2):

$$J_{PK} = \frac{2A}{\rho_0 c_0} k_{ul} e^{2\alpha d} \frac{G_1}{r} \quad (2)$$

onde J_{PK} é o parâmetro de reciprocidade corrigido, A [m²] é a área efetiva de radiação da face do transdutor, ρ_0 [kg/m³] é a densidade da água, c_0 [m/s] é a velocidade de propagação da onda ultra-sônica na água (calculada segundo NPL, 2000), $\alpha = 2,2 \cdot 10^{-14} f^2$ [m⁻¹] é o coeficiente de atenuação do ultra-som para água, sendo f [Hz] a frequência, d [m] é a distância percorrida pelo pulso, G_1 é a correção devida à abertura finita (difração) do transdutor na situação pulso-eco, sendo feita a implementação numérica do seu cálculo segundo Fay (1976), r é o coeficiente de reflexão para a interface alvo refletor e água, e k_{ul} é o fator pelo qual a tensão de saída do transdutor deve ser multiplicada para fornecer a tensão equivalente de circuito aberto. Com a implementação do circuito de comutação com diodos, $k_{ul} = 1$, uma vez que se garanta a condição de circuito aberto (IEC, 1987). No cálculo da área efetiva

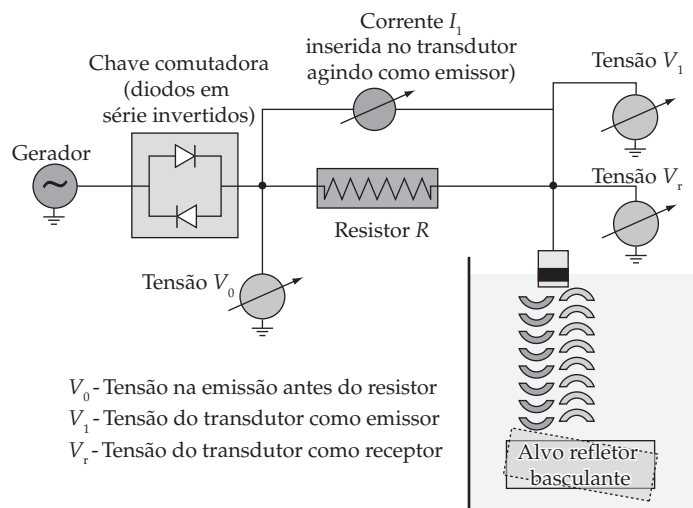


Figura 1. Esquema para calibração pelo método da auto-reciprocidade, adaptado de Abrunhosa, 2006. **Figure 1.** Diagram for the self-reciprocity calibration method, adapted from Abrunhosa, 2006.

de radiação do transdutor (equações 3 e 4), a_s [m] é o raio nominal do transdutor, a_e [m] é o raio efetivo do transdutor e f [Hz] é a frequência.

$$A = \pi a_e^2 \quad (3)$$

$$a_e = a_s^2 \frac{10^6}{4f^2} \quad (4)$$

A equação (5) é a expressão final adaptada para o cálculo da sensibilidade S_{ar} por auto-reciprocidade incluindo J_{PK} e com as devidas simplificações. Na definição apresentada na equação (5), S_{ar} tem dimensão de [Pa/V]:

$$S_{ar} = \frac{S \cdot I_1}{V_1} = \frac{V_r \cdot \left(\frac{V_0}{V_1^2} - \frac{1}{V_1} \right) \cdot \rho_0 c_0 r}{\sqrt{2\pi \left(a_s^2 + \frac{10^6}{4f^2} \right) \cdot R \cdot G_1}} \cdot e^{-2,2 \cdot 10^{-14} d \cdot f^2} \quad (5)$$

onde S [Pa/A] é a sensibilidade de transmissão, tal

$$\text{que } S = \sqrt{\frac{V_r}{I_1 \cdot J_{PK}}} \text{ (IEC, 1987).}$$

Calibração com padrão de referência – Nesta técnica, o valor da sensibilidade do transdutor emissor, colocado na mesma posição do campo ultra-sônico utilizada na calibração por auto-reciprocidade, é calculado indiretamente com o auxílio de um hidrofone previamente calibrado. O hidrofone padrão tem uma sensibilidade M_h [V/Pa] conhecida e declarada. Neste trabalho a sensibilidade foi calibrada para o conjunto hidrofone, pré-amplificador e acoplador DC. A tensão de saída V_B medida na saída de um amplificador, deverá ser corrigida com relação ao seu ganho de tensão G , para indicar a tensão de saída do hidrofone V_h proporcional ao campo de pressão p_1 incidente em seu elemento sensor:

$$V_h = \frac{V_B}{10^{G/20}} \quad (6)$$

$$p_1 = \frac{V_h}{M_h} \quad (7)$$

Na Figura 2 é mostrado o diagrama para calibração com padrão de referência, apresentando a confi-

guração utilizada neste trabalho. O gerador de sinais, transdutor ultra-sônico de emissão, conjunto hidrofone e pré-amplificador, amplificador e *shunt* colocado em linha com o sistema fazem parte da instrumentação empregada. O padrão de referência referido é o conjunto hidrofone, pré-amplificador e acoplador DC. O acoplador DC serve para alimentar o pré-amplificador, e não está presente na Figura 2 para simplificar o diagrama.

O valor do campo de pressão medido utilizando o hidrofone é corrigido devido aos efeitos de atenuação do sinal de ultra-som na água com a variação da frequência e difração, uma vez que estes modificam a condição de propagação da onda acústica no trajeto entre o transdutor e o hidrofone. Assim sendo, o valor da pressão p_1 deverá ser multiplicado por um fator k_{pr} (IEC, 1987) que leve em conta tais fatores, de sorte que:

$$k_{pr} = \frac{e^{\alpha d_2}}{k_u G_2} \quad (8)$$

onde k_{pr} é o fator de correção, α é o coeficiente de atenuação conforme definido na equação (2), d_2 é a distância entre o transdutor e o hidrofone, k_u é o fator de multiplicação da tensão de saída do hidrofone para a condição de circuito aberto, G_2 é o fator de correção devido às aberturas finitas do hidrofone e do transdutor de transmissão. Na equação (9), p_2 define o valor do campo de pressão, corrigido por k_{pr} , incidente na face do transdutor, e S_{pr} [Pa/V] na equação (10) expressa a sensibilidade em função da tensão V_t aplicada ao transdutor.

$$p_2 = p_1 k_{pr} \quad (9)$$

$$S_{pr} = \frac{p_2}{V_t} = \frac{V_B e^{\alpha d_2}}{10^{G/20} M_h G_2 V_t} \quad (10)$$

Caso o hidrofone seja utilizado em condições idênticas àquelas nas quais foi calibrado, ou seja, mesmo acoplador DC, amplificador e *shunt* em linha, o fator de correção k_u é unitário, conforme declarado na norma IEC 60866:1987.

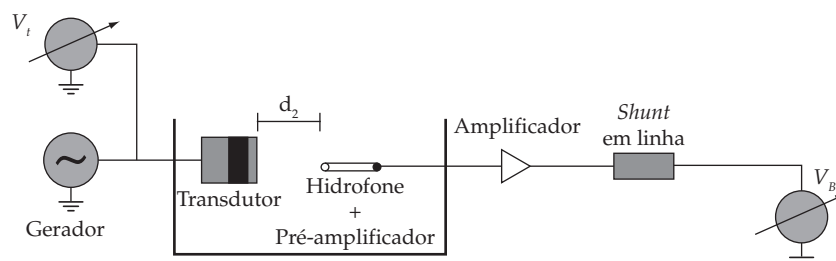


Figura 2. Esquema para calibração com padrão de referência (hidrofone + pré-amplificador). **Figure 2.** Diagram for the calibration using a reference standard.

Materiais e Métodos

As medições foram realizadas em um tanque ultra-sônico de acrílico (1.000 mm x 250 mm x 250 mm), utilizando-se um alvo refletor cilíndrico de aço ($\varnothing = 80$ mm e 80 mm de comprimento); diodos rápidos de silício (1N 4148) e um resistor com resistência nominal de 56Ω , este calibrado com um medidor vetorial de impedâncias (Agilent Technologies, 4294A). A geração e aquisição de dados foram realizadas utilizando-se as seguintes placas PXI (National Instruments): gerador de funções arbitrárias modelo NI PXI-5442 (16 bits, 200 MS/s) e osciloscópio modelo NI PXI 5112, (100 MHz, 2 canais). Umidade e temperatura foram medidas com um termo-higrômetro (Rotronic AG, Hygropalm 3). Os sistemas de posicionamento manual foram compostos por três posicionadores para deslocamento linear (translação) (Newport Corporation, M460P) e dois posicionadores de rotação (Newport Corporation, M-GON65-L e M-481-A). Todo o sistema de medição foi automatizado utilizando-se um aplicativo próprio, desenvolvido em LabVIEW® 7.1 (National Instruments). Seus módulos de geração e captação do sinal foram validados independentemente, e suas rotinas de processamento foram conferidas por 3 técnicos separadamente a fim de validar a funcionalidade do aplicativo como um todo. Foram calibrados dois padrões (transdutores), ambos de fabricação da Panametrics-NDT modelos A303S ($\varnothing = 12,7$ mm, frequência nominal de 1,0 MHz) e A304S ($\varnothing = 25,4$ mm, frequência nominal de 2,25 MHz). Adicionalmente, na calibração com padrão de referência, foi empregado um conjunto composto por hidrofone de agulha em PVDF com diâmetro nominal de 0,5 mm, pré-amplificador, acoplador DC e amplificador, fabricados por Precision Acoustics. O padrão de referência (hidrofone) foi calibrado no NPL.

Para cada técnica de calibração, absoluta ou por comparação, foram utilizadas tensões de alimentação de 1 a 10 V, em passos de 1 V, sempre medindo-se pico a pico. O mesmo gerador descrito anteriormente foi utilizado em ambos os métodos. Para cada transdutor foi escolhida uma faixa de frequência que excedesse em 15%, para mais e para menos, a largura de banda informada pelo fabricante. Para o transdutor de 1,0 MHz o passo em frequência escolhido foi de 20 kHz, e de 50 kHz para o de 2,25 MHz. Assim, a faixa de frequências de cada transdutor foi discretizada em torno de 30 pontos.

Na medição por auto-reciprocidade, o sinal de ultra-som gerado pelo transdutor se propaga no tanque

acústico, refletindo no alvo e retornando ao próprio transdutor. A tensão de eco V_r medida em circuito aberto e o valor da corrente que alimenta o transdutor são os parâmetros elétricos utilizados no cálculo da sensibilidade. A sensibilidade em [Pa/A] foi multiplicada pela corrente I_1 e dividida pela tensão V_1 , normalizando assim a sensibilidade com relação à tensão que efetivamente alimenta o transdutor, para expressar a sensibilidade em [Pa/V]. A normalização em função de V_1 (equação 5) é devida à utilização de um gerador de tensão em vez de um gerador de corrente para a alimentação do transdutor. As medições foram feitas na região de campo distante para evitar os problemas referentes à difração de campo próximo. Segundo a norma IEC 60866:1987, a distância entre o transdutor emissor e o hidrofone deve estar entre 1,5 e 3,0 vezes o ponto de separação entre campo próximo e campo distante. Foram escolhidas distâncias próximas de 1,5 vezes o ponto de separação a fim de minimizar perdas por atenuação durante a propagação. Para tanto, o pulso gerado pelo transdutor de 1,0 MHz percorreu a distância de 40 mm durante o trajeto transdutor - refletor - transdutor, e o gerado pelo transdutor de 2,25 MHz percorreu 350 mm. O sinal proveniente do gerador arbitrário é interligado ao circuito de comutação com diodos montados *back to back*. Um conector em "T" tipo BNC interliga o circuito de comutação com o resistor R para a medição de corrente, e o sinal deste ponto ao Canal 0 da placa do osciloscópio NI PXI-5112. Um segundo conector em "T" interliga o resistor ao transdutor, e este ponto ao Canal 1 da placa do osciloscópio. Uma vez seguido o protocolo de medição, a curva de sensibilidade em [Pa/V] é criada de maneira automática pelo programa de controle. Cada resultado de medição de tensão e/ou corrente elétrica é a média de 100 leituras realizadas pelo osciloscópio. A sensibilidade calculada para cada frequência e cada tensão de alimentação é a média de 5 medições, o que foi considerado uma repetição. Este procedimento foi realizado 5 vezes em condições de repetitividade. O resultado final da sensibilidade em cada frequência é a média das 5 repetições. Para garantir a repetitividade das medições, o sistema de medição foi desmontado e remontado entre cada uma delas. A sensibilidade normalizada S_{ar} (equação 5) será comparada com o resultado obtido utilizando-se o padrão de referência. O arquivo gravado contendo os dados com os resultados da medição é analisado em planilhas de dados e programas desenvolvidos em LabVIEW®, automatizando, deste modo, o processo de comparação.

Utilizando o padrão de referência, o sinal proveniente do gerador arbitrário é interligado por um conector BNC em "T" ao Canal 0 da placa do osciloscópio NI PXI-5112 e ao transdutor de emissão, conforme a Figura 2. A saída do pré-amplificador é ligada ao amplificador, e este ao Canal 1 da placa do osciloscópio através de um *shunt* de 50 Ω montado em linha. O sinal obtido do Canal 1 é referente à intensidade do campo ultra-sônico na posição do hidrofone. O valor calculado para a pressão foi corrigido segundo a equação (9). O valor da pressão corrigida, calculado para a face do transdutor, é dividido pela tensão de alimentação do transdutor para que se obtenha a sua sensibilidade, de acordo com a equação (10). Este é o valor de sensibilidade que será comparado com o resultado da medição pelo método da auto-reciprocidade. Como na auto-reciprocidade, a sensibilidade medida em cada frequência é a média de 5 repetições, cada uma sendo, por sua vez, a média de 5 medições, sendo as tensões medidas a média de 100 leituras. Ao término da varredura nas frequências de interesse, foi obtida a curva de sensibilidade do transdutor para a tensão de alimentação considerada. Para ambos os métodos, todo o procedimento foi repetido para todas as tensões de alimentação consideradas.

Validação da calibração absoluta de transdutores por auto-reciprocidade

Na calibração por auto-reciprocidade serão considerados validados os pontos em frequência quando satisfizerem as seguintes condições (IEC, 1987):

- 1) A incerteza devida à linearidade deverá ser menor do que 10%; e
- 2) A incerteza combinada deverá ser menor do que 9%.

A seguir serão definidas as incertezas utilizadas como parâmetros para a validação dos resultados.

Para cada frequência, a tensão de alimentação do transdutor foi variada de 1 a 10 V. A sensibilidade medida para uma frequência n e 1 V de alimentação é designada por $S_{arn,1}$. $S_{arn,2}$ é a medição na mesma frequência e 2 V de alimentação, e assim sucessivamente até $S_{arn,10}$ que é a medição de sensibilidade para 10 V de alimentação. Na calibração por auto-reciprocidade foram realizadas 5 medições. S_{arn}^1 é a sensibilidade por auto-reciprocidade para a primeira medição, na frequência n , conforme mostrada na equação (11). S_{arn}^2 é a sensibilidade para a segunda medição, e assim sucessivamente até S_{arn}^5 que é a sensibilidade para a quinta medição.

$$S_{arn}^1 = \frac{S_{arn,1} + S_{arn,2} + \dots + S_{arn,10}}{10} \quad (11)$$

S_{arn}^2 a S_{arn}^5 são calculadas de maneira análoga ao exposto na equação (11). S_{arn} é o valor da sensibilidade por auto-reciprocidade na frequência n , mostrada na equação (12).

$$S_{arn} = \frac{S_{arn}^1 + S_{arn}^2 + S_{arn}^3 + S_{arn}^4 + S_{arn}^5}{5} \quad (12)$$

O Guia para a Expressão da Incerteza da Medição (ISO-GUM) (ABNT, 2003) é o texto de referência que deve ser seguido para expressar a incerteza de maneira uniforme. A componente de incerteza do Tipo A $u(S_{arn,A})$ porcentual para a frequência n é expressa pela equação (13):

$$u(S_{arn,A}) = 100 \frac{\sigma_{arn}}{S_{arn} \sqrt{5}} \quad (13)$$

onde σ_{arn} é o desvio padrão das sensibilidades das 5 medições na frequência n .

Variando-se as tensões de alimentação de 1 a 10 V, ocorre uma dispersão dos resultados medidos de sensibilidade entre as dez medições. Esta dispersão quantifica a linearidade de medição (IEC, 1987). Seja σ_{arn}^1 o desvio padrão da medição de sensibilidade da primeira medição para a frequência n , tal que

$$\sigma_{arn}^1 = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^M (S_{arn}^1 - S_{arn,m}^1)^2}, \text{ onde } M = 10 \text{ é o número de diferentes tensões de alimentação empregadas na calibração. Define-se } Lin_{arn}^1 \text{ a incerteza devida à linearidade, expressa em porcentagem, da sensibilidade na frequência } n \text{ da primeira medição, conforme mostrada na equação (14).}$$

Define-se Lin_{arn}^1 a incerteza devida à linearidade, expressa em porcentagem, da sensibilidade na frequência n da primeira medição, conforme mostrada na equação (14).

$$Lin_{arn}^1 = 100 \frac{\sigma_{arn}^1}{S_{arn}^1} \quad (14)$$

As linearidades Lin_{arn}^2 , Lin_{arn}^3 , Lin_{arn}^4 e Lin_{arn}^5 são calculadas de maneira análoga à equação (14). O valor selecionado para compor a incerteza combinada é o valor máximo entre as cinco contribuições de incerteza, denominada Lin_{arn} . O mesmo procedimento foi adotado para se definir a incerteza devida à linearidade de utilizando-se o padrão de referência Lin_{prn} .

$c_{arn,m}^{i,j} = \frac{\partial S_{arn,m}^j}{\partial x_i}$ é o coeficiente de sensibilidade para a componente de incerteza i da medição j ($1 \leq j \leq 5$) e tensão de alimentação m ($1 \leq m \leq 10$). Cada uma das variáveis x_i da expressão de S_{arn} (equação 5) apresenta uma componente de incerteza $u(x_i)$, denominada incerteza padrão do Tipo B, segundo o ISO-GUM. Embora seja teoricamente possível atribuir, para uma determinada grandeza genérica, diferentes incertezas padrão do Tipo B em função da frequência, e até mesmo para cada diferente medição, neste modelo cada $u(x_i)$ foi considerada constante para as diversas

freqüências de interesse e distintas medições. Esta escolha foi feita, pois em função da instrumentação utilizada, na análise das incertezas padrão não foram identificadas diferenças nas faixas de freqüência de interesse neste trabalho. No entanto, vale lembrar que o valor final da incerteza da componente i de determinada medição j para cada diferente freqüência n e para cada diferente tensão de alimentação m poderá ser diferente, uma vez que o coeficiente de sensibilidade $c_{arn,m}^{i,j}$ pode variar em função destes parâmetros. Segundo o ISO-GUM, a contribuição de incerteza do Tipo B para N grandezas de entrada constantes da formulação de S_{ar} é expressa por:

$$u(S_{arn,m}^j) = \sum_{i=1}^N c_{arn,m}^{i,j} \cdot u(x_i) \quad (15)$$

Para cada medição foi selecionado o valor máximo de incerteza, na freqüência n , dentre as incertezas calculadas para cada tensão de alimentação. O valor máximo dentre as 5 medições, $u(S_{arn,B})$, é selecionado para compor a incerteza combinada do resultado final para cada freqüência.

$$u(S_{arn,B}) = \text{MAX}_{j,m} [u(S_{arn,m}^j)] \quad (16)$$

A incerteza combinada da medição da sensibilidade de $u_c(S_{arn})$, com base no ISO-GUM, é expressa por:

$$u_c(S_{arn}) = \sqrt{[u(S_{arn,A})]^2 + (Lin_{arn})^2 + [u(S_{arn,B})]^2} \quad (17)$$

$u_c(S_{arn})$ é a incerteza combinada referente às 5 medições para a freqüência n e faixa de tensão selecionada para calibração (1 a 10 V). Esta seqüência é executada para todas as freqüências, resultando na incerteza declarada de calibração para o transdutor.

Analogamente, a incerteza combinada da medição da sensibilidade com padrão de referência é expressa pela equação (18):

$$u_c(S_{prn}) = \sqrt{[u(S_{prn,A})]^2 + (Lin_{prn})^2 + [u(S_{prn,B})]^2} \quad (18)$$

Resultados

Para o transdutor de 1,0 MHz, segundo o critério estabelecido ($Lin_{arn} < 10\%$ e $Lin_{prn} < 10$), foram considerados válidos na calibração por auto-reciprocidade os pontos para os quais a freqüência é maior ou igual a 0,98 MHz até o limite superior de 1,32 MHz. A Figura 3 mostra a linearidade máxima para o método da auto-reciprocidade Lin_{arn} e com padrão de referência Lin_{prn} . Na calibração com padrão de referência, segundo o mesmo critério, toda a faixa de freqüência foi considerada para validação.

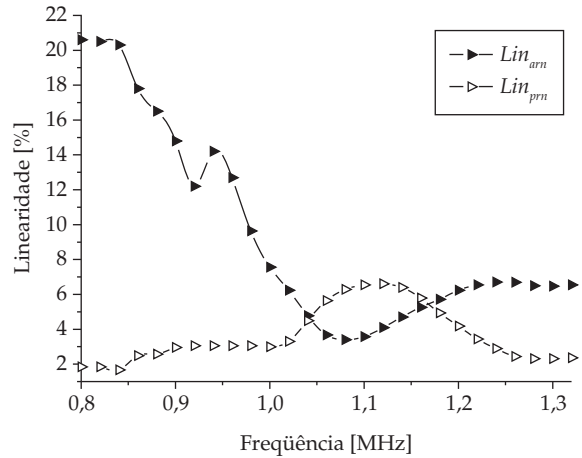


Figura 3. Incerteza devida à linearidade para o transdutor de 1,0 MHz. Lin_{arn} é a incerteza devida à linearidade para o método da auto-reciprocidade. Lin_{prn} é a incerteza devida à linearidade com padrão de referência. **Figure 3.** Uncertainty due linearity for the 1.0 MHz transducer. Lin_{arn} is the uncertainty due linearity for the self-reciprocity method. Lin_{prn} is the uncertainty due linearity using a reference standard.

A Figura 4 mostra a incerteza padrão combinada para o método da auto-reciprocidade $u_c(S_{arn})$ e com padrão de referência $u_c(S_{prn})$. Segundo o critério estabelecido ($u_c(S_{arn}) < 9\%$ e $u_c(S_{prn}) < 9\%$), foram considerados válidos na calibração por auto-reciprocidade os pontos para os quais a freqüência é maior ou igual a 1,0 MHz até o limite de 1,32 MHz. Na calibração com padrão de referência, segundo o mesmo critério, toda a faixa de freqüência foi considerada válida.

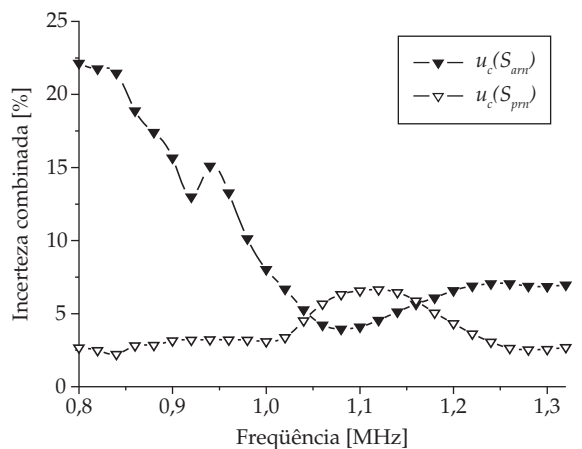


Figura 4. Incerteza combinada para o transdutor de 1,0 MHz. $u_c(S_{arn})$ é a incerteza combinada para o método da auto-reciprocidade. $u_c(S_{prn})$ é a incerteza combinada com padrão de referência. **Figure 4.** Combined uncertainty for the 1.0 MHz transducer. $u_c(S_{arn})$ is the combined uncertainty for the self-reciprocity method. $u_c(S_{prn})$ is the combined uncertainty using a reference standard.

A calibração por auto-reciprocidade foi considerada válida nos pontos para os quais um resultado de medição da calibração por auto-reciprocidade, expresso pelo intervalo $S_{arn} \pm 2u_c(S_{arn})$, estiver incluso no intervalo da calibração com padrão de referência $S_{prn} \pm 2u_c(S_{prn})$. Segundo os critérios estabelecidos, a calibração por auto-reciprocidade, em 1 MHz, foi considerada válida na faixa de 1,04 a 1,32 MHz, conforme mostrado na Figura 5.

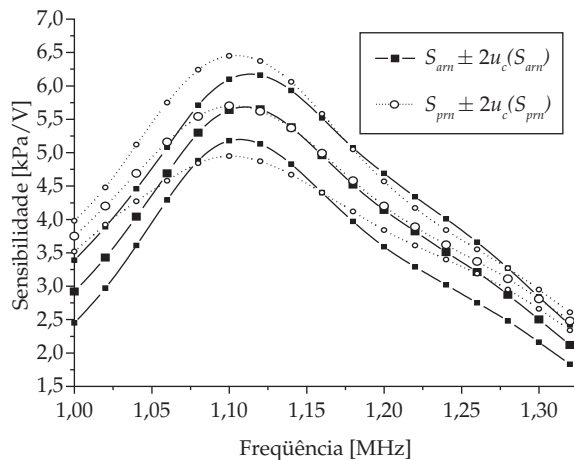


Figura 5. Validação da calibração por auto-reciprocidade para o transdutor de 1,0 MHz. $S_{arn} \pm 2u_c(S_{arn})$ é o intervalo do resultado de medição da calibração por auto-reciprocidade com nível de confiança de 95%. $S_{prn} \pm 2u_c(S_{prn})$ é o intervalo do resultado de medição da calibração com padrão de referência com nível de confiança de 95%. **Figure 5.** Validation of the calibration for self-reciprocity for the 1.0 MHz transducer. $S_{arn} \pm 2u_c(S_{arn})$ is the measurement result interval for self-reciprocity with a confidence level of 95%. $S_{prn} \pm 2u_c(S_{prn})$ is the measurement result interval using a reference standard with a confidence level of 95%.

Segundo o critério estabelecido para a linearidade máxima, a Figura 6 mostra que para o transdutor de 2,25 MHz foram considerados válidos na calibração por auto-reciprocidade os pontos para os quais a frequência é menor ou igual a 2,90 MHz até o limite de 1,5 MHz. Na calibração com padrão de referência, segundo o mesmo critério, toda a faixa de frequência foi considerada válida.

Segundo o critério estabelecido para a incerteza padrão combinada, a Figura 7 mostra que para o transdutor de 2,25 MHz foram considerados válidos na calibração por auto-reciprocidade os pontos para os quais a frequência é menor ou igual a 2,90 MHz até o limite de 1,5 MHz. Na calibração com padrão de

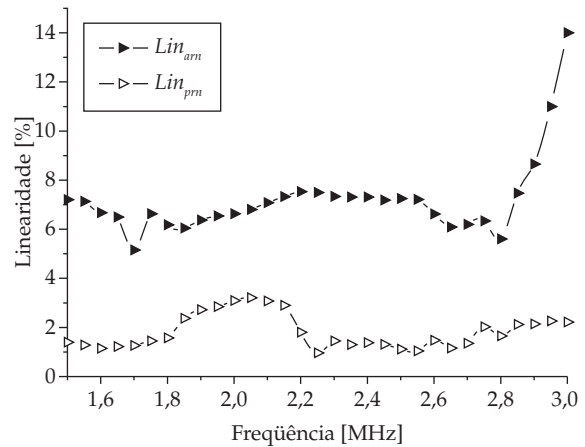


Figura 6. Incerteza devida à linearidade para o transdutor de 2,25 MHz. Lin_{arn} é a incerteza devida à linearidade para o método da auto-reciprocidade. Lin_{prn} é a incerteza devida à linearidade com padrão de referência. **Figure 6.** Uncertainty due linearity for the 2.25 MHz transducer. Lin_{arn} is the uncertainty due linearity for the self-reciprocity method. Lin_{prn} is the uncertainty due linearity using a reference standard.

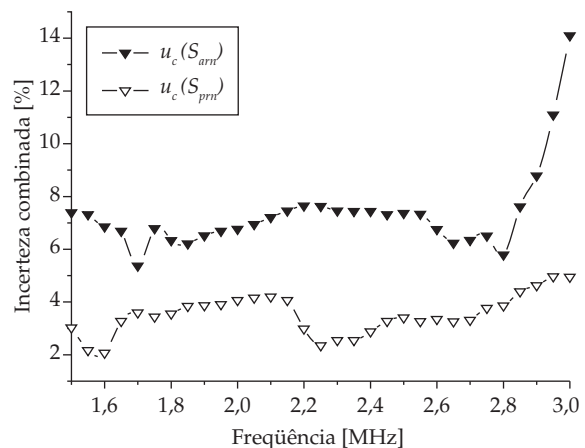


Figura 7. Incerteza combinada para o transdutor de 2,25 MHz. $u_c(S_{arn})$ é a incerteza combinada para o método da auto-reciprocidade. $u_c(S_{prn})$ é a incerteza combinada com padrão de referência. **Figure 7.** Combined uncertainty for the 2.25 MHz transducer. $u_c(S_{arn})$ is the combined uncertainty for the self-reciprocity method. $u_c(S_{prn})$ is the combined uncertainty using a reference standard.

referência, segundo o mesmo critério, toda a faixa de frequência foi considerada válida.

Segundo os critérios estabelecidos, a calibração por auto-reciprocidade em 2,25 MHz foi considerada válida na faixa de 1,55 MHz a 2,90 MHz, conforme mostrado na Figura 8.

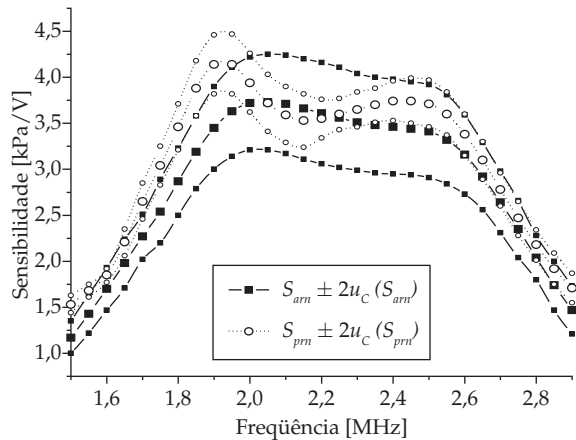


Figura 8. Sensibilidade para o transdutor de 2,25 MHz. S_{arn} é o valor da sensibilidade para o método da auto-reciprocidade. S_{prn} é o valor da sensibilidade para o padrão de referência. **Figure 8.** Sensitivity of the calibration for self-reciprocity for the 2.25 MHz transducer. S_{arn} is the sensitivity for the self-reciprocity calibration method. S_{prn} is the sensitivity using the reference standard.

Discussão e Conclusão

O conhecimento da sensibilidade de um transdutor é importante, pois a partir deste valor é possível avaliar o nível de tensão ou corrente que deverá ser aplicado ao transdutor para gerar um campo de pressão. Na área da saúde, por exemplo, o conhecimento da sensibilidade é essencial, uma vez que prescrições médicas que utilizam o ultra-som como princípio de funcionamento são feitas em função da potência e do tempo de exposição ao ultra-som.

O transdutor de 1,0 MHz utilizado tem largura de banda de meia potência especificada de 0,86 a 1,26 MHz, segundo catálogo do fabricante. A validação foi determinada em função das frequências para as quais um resultado da medição por auto-reciprocidade está incluso no intervalo do resultado da medição com padrão de referência. A Figura 3 mostra que para o critério da linearidade menor do que 10%, segundo a norma IEC 60866:1987, a calibração foi considerada satisfatória a partir de 0,98 MHz. Pelo critério da incerteza combinada menor do que 9%, que equivale a uma incerteza expandida de 18% e, portanto, menor do que aproximadamente 18,8% (1,5 dB) conforme declarado pela norma IEC 60866:1987, a calibração do transdutor de 1,0 MHz foi considerada satisfatória a partir de 1,0 MHz, conforme mostrado na Figura 4. A Figura 5 mostra a validação da calibração por auto-reciprocidade considerando o resultado de medição expresso em função do nível de confiança de 95% para a incerteza combinada $S_{arn} \pm 2u_c(S_{arn})$.

Este resultado, quando comparado ao resultado da calibração com padrão de referência $S_{prn} \pm 2u_c(S_{prn})$, valida o sistema de calibração na faixa de 1,04 a 1,32 MHz. A validação foi determinada em função das frequências para as quais um resultado da medição por auto-reciprocidade está incluso no intervalo do resultado da medição com padrão de referência. Em frequências inferiores a 1 MHz, é razoável que a diferença entre os métodos cresça, uma vez que abaixo de 1 MHz não estão declarados valores de sensibilidade no certificado de calibração do NPL para o hidrofone utilizado como padrão de referência. Os valores de sensibilidades para estas frequências foram atribuídos por interpolação numérica. Um resultado importante é que na frequência de máxima sensibilidade do transdutor (1,12 MHz), a diferença percentual entre os métodos de calibração foi de 0,43%.

O transdutor de 2,25 MHz tem largura de banda de meia potência especificada de 1,68 a 2,87 MHz, segundo o catálogo do fabricante. As Figuras 6 e 7 indicam, respectivamente, o resultado da calibração para os critérios de linearidade e incerteza combinada, onde os resultados são considerados válidos abaixo de 2,9 MHz. A Figura 8 mostra que a calibração por auto-reciprocidade, para o transdutor de 2,25 MHz, é considerada validada na faixa de 1,55 a 2,90 MHz. Os pontos para frequências inferiores a 1,55 MHz não foram validados por não pertencerem ao intervalo $S_{prn} \pm 2u_c(S_{prn})$, representativo do resultado de medição com padrão de referência em 2,25 MHz. Para o ponto de máxima sensibilidade do transdutor, 2,05 MHz, a diferença percentual entre os métodos de calibração foi de 0,39%.

O primeiro objetivo deste trabalho foi atingido, uma vez que foi validada uma faixa de frequências aproximadamente entre 1 e 3 MHz, mantendo a incerteza abaixo da estipulada pela norma em questão e mantendo-se a linearidade também dentro dos valores exigidos pela norma. Entretanto, a norma estabelece um método que pode ser empregado até a frequência de 15 MHz, o que não foi obtido com este trabalho. A dificuldade em se calibrar por auto-reciprocidade em altas frequências é notória. Cuidados com o ajuste dos transdutores ganham importância quanto mais altas forem as frequências consideradas, além de correções em função das perdas por propagação serem também maiores, inculindo erros nos resultados. No entanto, entende-se que aumentar a faixa de frequências válidas é uma necessidade futura importante.

Um ponto de destaque no trabalho é o protocolo totalmente automatizado de medição. O uso da pla-

taforma LabVIEW® foi imprescindível neste aspecto, possibilitando desenvolver e validar um aplicativo dedicado, minimizando a possibilidade de erro do usuário na manipulação dos dados.

Apesar de terem sido encontradas incertezas altas nas faixas de frequência consideradas, particularmente fora das proximidades das frequências de ressonância, vale destacar que a diferença entre os resultados com os 2 métodos foi inferior a 1% nesta região. No contexto geral, a proposta do trabalho foi atingida com sucesso.

Referências

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Guia para a expressão da incerteza da medição – ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements (GUM)**. Rio de Janeiro: Inmetro e ABNT, 2003. 120 p.
- ABRUNHOSA, V. M. **Caracterização da sensibilidade de transdutores ultra-sônicos de fisioterapia pelo método da auto-reciprocidade**. Rio de Janeiro, nov. 2006. 56 p. Dissertação – (Mestrado em Engenharia Biomédica), COPPE, UFRJ.
- BEISSNER, K. Free-field reciprocity calibration in the transition range between near field and far field. *Acustica*, v. 46, p. 162-167, 1980.
- BOBBER, R. J. General reciprocity parameter. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 39, n. 4, p. 680-687, 1966.
- BRENDEL, K.; LUDWIG, G. Calibration of ultrasonic standard probe transducers. *Acustica*, v. 36, p. 203-208, 1976.
- CARSTENSEN, E. L. Self-reciprocity calibration of electroacoustic transducers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 19, n. 6, p. 961-965, 1947.
- CHIVERS, R. C.; LEWIN, P. A. The voltage sensitivity of miniature piezoelectric plastic ultrasonic probes. *Ultrasonics*, v. 20, n. 6, p. 279-281, 1982.
- COSTA-FÉLIX, R. P. B. **Aplicações metrológicas do ultrassom empregado em engenharia biomédica utilizando varreduras de senos (Chirps)**. Rio de Janeiro, mar. 2005. 196 p. Tese (Doutorado em Engenharia Biomédica), COPPE, UFRJ.
- COSTA-FÉLIX, R. P. B.; MACHADO, J. C. Métodos de calibração de hidrofones. *Revista Brasileira de Engenharia Biomédica*, v. 23, n. 3, p. 277-292, 2007.
- EBAUGH, P.; MUESER, R. E. The practical application of the reciprocity theorem in the calibration of underwater sound transducers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 19, n. 4, p. 695-700, 1947.
- FAY, V. B. Numerische Berechnung der Beugungsverluste im Schallfeld von Ultraschallwandlern. *Acustica*, v. 36, p. 209-213, 1976.
- IEC – International Electrotechnical Commission. **Characteristics and Calibration of Hydrophones for Operation in the Frequency Range 0.5 MHz to 15 MHz – IEC 60866**. Geneva, 1987. 58 p.
- LABUDA, C.; RAYMOND, J. L.; CHURCH, C. C. Reciprocity calibration of hydrophones in the Megahertz frequency range. In: IEEE INTERNATIONAL ULTRASONICS, FERROELECTRICS AND FREQUENCY CONTROL JOINT 50TH ANNIVERSARY CONFERENCE, 2004, Montreal. *Proceedings...*, v. 3, p. 1595-1597, 24-27 aug. 2004.
- LUDWIG, G.; BRENDEL, K. Calibration of hydrophones based on reciprocity and time delay spectrometry. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, v. 35, n. 2, p. 168-174, 1988.
- NPL – National Physical Laboratory. **Speed of Sound in Pure Water: Technical Guides**. United Kingdom: National Physical Laboratory, 2000. 5 p.
- PRESTON, R. C. **Output Measurements for Medical Ultrasound**. London: Springer-Verlag, 1991.
- REID, J. M. Self-reciprocity calibration of echo-ranging transducers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 55, n. 4, p. 862-868, 1974.
- SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial. **Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia (VIM)**. 5ª ed. Brasília: Editora Senai, 2007. 72 p.

