

IMPLANTAÇÃO DA CALIBRAÇÃO DE TRANSDUTORES DE ULTRA-SOM PELO MÉTODO DA AUTO-RECIPROCIDADE NO INMETRO

Everande Gobira de Oliveira¹, Rodrigo P.B. da Costa-Félix²

¹ Laboratório de Ultra-som, Diavi/Dimci/Inmetro, Duque de Caxias, Brasil
egobira@inmetro.gov.br

² Laboratório de Ultra-som, Diavi/Dimci/Inmetro, Duque de Caxias, Brasil
rpfelix@inmetro.gov.br

Resumo

A calibração por auto-reciprocidade é um método no qual a sensibilidade do transdutor é determinada a partir de um sinal ultra-sônico, gerado e recebido pelo transdutor, após a reflexão em um alvo. Visando relatar a incerteza de medição de um sistema de calibração de transdutores de ultra-som por auto-reciprocidade, foram calibrados dois transdutores de ultra-som, com frequências centrais de 1,0 MHz e 2,25 MHz. Na calibração foram considerados válidos os pontos em frequência que satisfizeram as condições declaradas na norma IEC 60866:1987 [1], incerteza devida à linearidade menor do que 10% e incerteza expandida menor do que 19%. A incerteza de medição foi calculada conforme o Guia para a Expressão da Incerteza de Medição [2]. A incerteza expandida no ponto de máxima sensibilidade para o transdutor de 1,0 MHz foi de 9,1% e de 13,9% para o transdutor de 2,25 MHz.

Palavras-chave: metrologia, ultra-som, calibração, transdutor.

Abstract

Self-reciprocity is a calibration method in which a transducer's sensitivity is determined from ultrasound signal, generated and received by the transducer, after the reflection on a reflecting steel target. Aiming to report the measurement uncertainty of a system of calibration of ultrasound transducer by self-reciprocity, two transducers were calibrated with central frequencies of 1.0 MHz and 2.25 MHz. Calibration points were considered valid at those frequencies satisfying the conditions stated in the standard IEC 60866:1987 [1], uncertainty due to the linearity less than 10% and expanded uncertainty less than 19%. The measurement uncertainty was calculated accordingly to the Guide to the Expression of the Uncertainty of Measurement [2]. The expanded uncertainty at the point of maximum sensitivity to the transducer of 1.0 MHz was 9.1% and 13.9% for the transducer of 2.25 MHz.

Keywords: metrology, ultrasound, calibration, transducer.

1 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. 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.

Em um processo de avaliação metrológica, a manutenção da rastreabilidade, conforme descrita no Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia – VIM [3] é fator importante, pois informa quão próximo o resultado de uma medição está em concordância com 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 [4]. Na calibração de um instrumento, é necessário expressar a incerteza associada ao resultado numérico declarado, a qual quantifica a 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 gerada pelo 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. Diversos sistemas e protocolos de medição podem ser utilizados com base nesta técnica, conforme se encontram descritos na literatura ([5], [6], [7]). Para execução deste trabalho, foi desenvolvido um sistema de medição próprio, compreendendo uma metodologia com base na técnica da auto-reciprocidade e utilizando-se de instrumentação e protocolos de automação de medição modernos. Visando relatar a execução deste sistema de calibração de transdutores de ultra-som por auto-reciprocidade, foram calibrados dois transdutores de ultra-som, com frequências centrais de 1,0 MHz e 2,25 MHz segundo norma técnica internacionalmente reconhecida [1].

2 Fundamentos Teóricos

A calibração por auto-reciprocidade é um método absoluto de calibração, ou seja, aquele cuja grandeza física de interesse é obtida diretamente de outras grandezas. No caso da calibração de transdutores de ultra-som por auto-reciprocidade, a grandeza física de interesse é a pressão ultra-sônica, obtida por grandezas elétricas (tensão e corrente) e outras grandezas presentes no parâmetro geral para reciprocidade, J_p . Esta técnica tem como principal vantagem o conhecimento da teoria que descreve o campo acústico gerado pelo transdutor em função de parâmetros elétricos. Uma descrição do método pode ser encontrada em [4] e [8].

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 é tornar possível a medição das tensões 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 o resistor R em série no circuito, conforme equação (1).

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

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

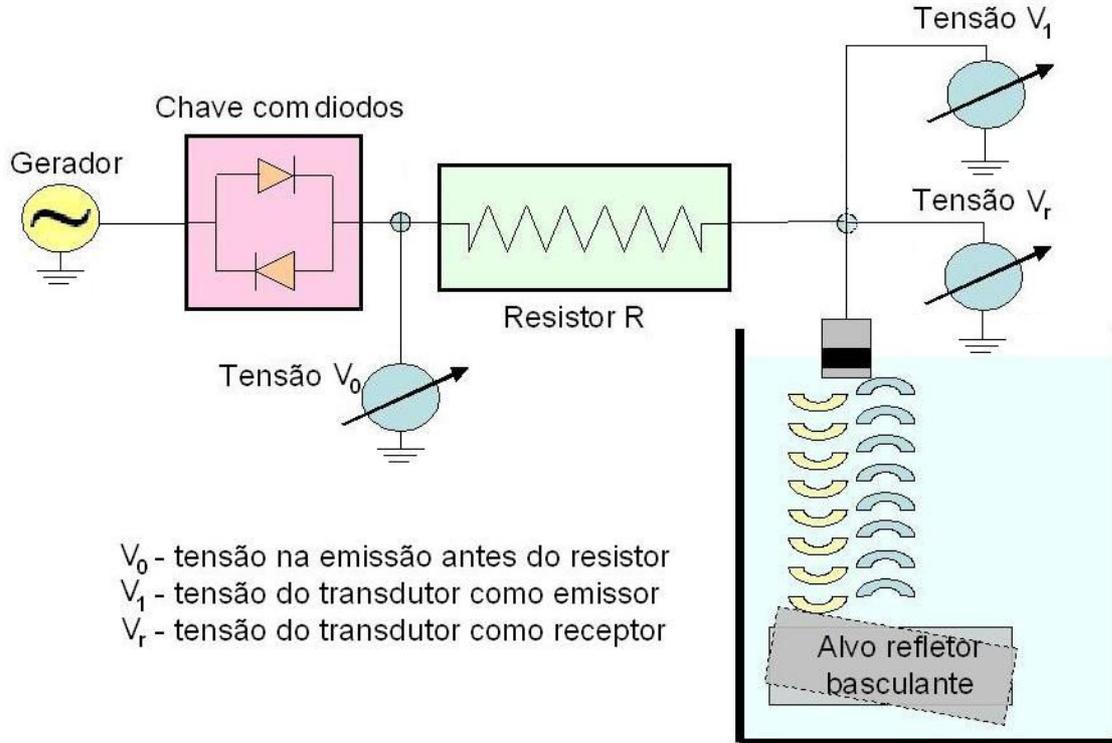


Figura 1 – Esquema para calibração pelo método da auto-reciprocidade

2.1 Correção para onda plana

Devido ao tamanho dos transdutores comparados 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 [1] e [5], 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 é a área efetiva de radiação da face do transdutor [m^2], ρ_0 é a densidade da água [kg/m^3], c_0 é a velocidade de propagação da onda ultra-sônica na água [m/s], $\alpha = 2,2 \times 10^{-14} f^2$ é o coeficiente de atenuação do ultra-som para água [m^{-1}], sendo f a frequência [Hz], d é a distância percorrida pelo pulso [m], G_1 é a correção devida à

abertura finita (difração) do transdutor na situação pulso-eco, sendo feita a implementação numérica do seu cálculo [9], 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 [1]. No cálculo da área efetiva de radiação do transdutor (equações 3 e 4), a_g é o raio nominal do transdutor [m], a_e é o raio efetivo do transdutor [m] e f é a frequência [Hz].

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

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

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

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

onde S é a sensibilidade de transmissão, em [Pa/A], tal que $S = \left[\frac{V_r}{I_1 \cdot J_{pk}} \right]^{1/2}$ [1].

3 Materiais e Métodos

3.1 Instrumentação

As medições foram realizadas em um tanque ultra-sônico de paredes de acrílico (1.000 mm × 250 mm × 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 56 Ω , este calibrado com um analisador de impedâncias modelo 4294A (Agilent Technologies, USA). A geração e aquisição de dados foram realizadas utilizando-se as seguintes placas PXI (National Instruments, USA): 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 modelo Hygropalm 3 (Rotronic AG, Suíça). Os sistemas de posicionamento manual foram compostos por dois posicionadores para deslocamento linear (translação) modelo M460P (Newport Corporation, USA) e dois posicionadores de rotação modelos M-GON65-L e M-481-A (Newport Corporation, USA). Todo o sistema foi automatizado utilizando-se um aplicativo de desenvolvimento próprio, desenvolvido em LabVIEW[®] 7.1 (National Instruments, USA). Foram calibrados dois padrões

(transdutores), ambos de fabricação da Panametrics-NDT (USA), modelos A303S ($\varnothing = 12,7$ mm, frequência nominal de 1,0 MHz) e A304S ($\varnothing = 25,4$ mm, frequência nominal de 2,25 MHz).

3.2 Métodos

Para a execução da técnica de calibração foram utilizadas tensões de alimentação de 1V a 10 V pico a pico, em passos de 1 V. 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 largura de banda de cada transdutor foi discretizada em 27 pontos para o transdutor de 1,0 MHz e 31 pontos para o transdutor de 2,25 MHz.

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. Para garantir a condição de campo distante, o pulso gerado pelo transdutor de 1,0 MHz percorreu a distância de 40 mm durante o trajeto transdutor – refletor – transdutor, e o transdutor de 2,25 MHz percorreu 350 mm. O alinhamento do transdutor com o alvo refletor, para maximização do sinal de eco, é realizado conforme procedimento descrito em [8]. 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, em série, para 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 considerada 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.

4 Incerteza 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 [1]:

- 1) A incerteza devida à linearidade deverá ser menor do que 10%;
- 2) A incerteza combinada deverá ser menor do que 9,5%, que corresponde a uma incerteza expandida menor do que 19%.

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 V a 10 V, medidos de pico a pico. 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 6. 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.

$$S_{arn}^1 = \frac{S_{arn,1} + S_{arn,2} + \dots + S_{arn,10}}{10} \quad (6)$$

S_{arn}^2 a S_{arn}^5 são calculadas de maneira análoga ao exposto na equação 6. S_{arn} é o valor da sensibilidade por auto-reciprocidade na frequência n , mostrada na equação 7.

$$S_{arn} = \frac{S_{arn}^1 + S_{arn}^2 + S_{arn}^3 + S_{arn}^4 + S_{arn}^5}{5} \quad (7)$$

O Guia para a Expressão da Incerteza da Medição [2] é o texto de referência que deve ser seguido para expressar a incerteza de maneira uniforme. A componente de incerteza do Tipo A $u(S_{arn,A})$ percentual para a frequência n é expressa pela equação 8:

$$u(S_{arn,A}) = 100 \frac{\sigma_{arn}}{S_{arn} \sqrt{5}} \quad (8)$$

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

Variando-se as tensões de alimentação de 1 V a 10 V, ocorre uma dispersão dos resultados medidos de sensibilidade entre as dez medições. Esta dispersão quantifica a linearidade [1] de medição. Seja σ_{arnl}^1 o desvio padrão da medição de sensibilidade da primeira medição para a frequência n , tal que $\sigma_{arnl}^1 = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^M (S_{arn}^1 - S_{arn,m}^1)^2}$, onde $M = 10$ é o número de diferentes tensões de alimentação empregadas na calibração.

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 9.

$$Lin_{arn}^1 = 100 \frac{\sigma_{arnl}^1}{S_{arn}^1} \quad (9)$$

As linearidades Lin_{arn}^2 , Lin_{arn}^3 , Lin_{arn}^4 e Lin_{arn}^5 são calculadas de maneira análoga à equação 9. O valor selecionado para compor a incerteza combinada é o valor máximo entre as cinco contribuições de incerteza, denominada Lin_{arn} .

$c_{arn,m}^{i,j} = \partial S_{arn,m}^j / \partial x_i$ 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_{ar} (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 frequências 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 frequência de interesse neste trabalho.

No entanto, vale lembrar que o valor final da incerteza da componente i de determinada medição j para cada diferente frequência 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:

$$u(S_{arn,m}^j) = \sum_{i=1}^N c_{arn,m}^{i,j} \cdot u(x_i) \quad (10)$$

Para cada medição, é selecionado o valor máximo de incerteza, na frequência 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 frequência.

$$u(S_{arn,B}) = \text{MAX}_{j,m} [u(S_{arn,m}^j)] \quad (11)$$

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

$$u_c(S_{arn}) = \sqrt{[u(S_{arn,A})]^2 + (Lin_{arn})^2 + [u(S_{arn,B})]^2} \quad (12)$$

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

A medida adicional de incerteza que satisfaz o resultado de fornecer um intervalo em torno do resultado da medição com o qual se espera abranger uma extensa fração da distribuição de valores que poderiam ser razoavelmente atribuídos ao mensurando é a incerteza expandida. Com base no ISO-GUM, a incerteza expandida é expressa por:

$$U = k u_c(S_{arn}) \quad (13)$$

Para um intervalo com nível de confiança de aproximadamente 95%, o valor de k é igual a 2.

5 Resultados

Para o transdutor de 1,0 MHz, segundo o critério estabelecido ($Lin_{arn} < 10\%$), foram considerados válidos na calibração por auto-reciprocidade os pontos para os quais a frequência é maior ou igual a 0,98 MHz até o limite superior de 1,32 MHz, conforme figura 2. Para a incerteza padrão combinada $u_c(S_{arn})$, segundo o critério estabelecido ($u_c(S_{arn}) < 9,5\%$), foram considerados válidos na calibração por auto-reciprocidade os pontos para os quais a frequência é maior ou igual a 1,0 MHz até o limite de 1,32 MHz.

A figura 3 mostra a curva de sensibilidade (S_{arn}) para o transdutor de 1,0 MHz. O gráfico apresenta os valores de sensibilidade a partir de 1,0 MHz, em virtude da aplicação dos critérios definidos para incerteza combinada e incerteza devida à linearidade. O valor máximo da sensibilidade (5,65 kPa/V) foi obtido em 1,12 MHz.

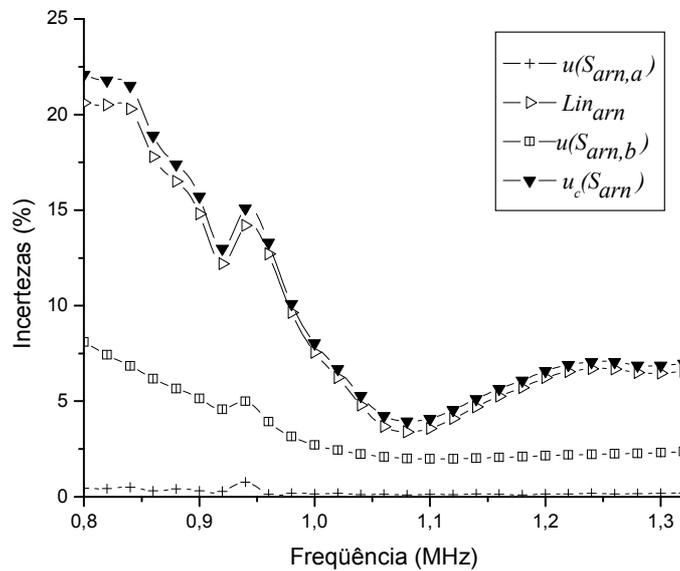


Figura 2. Incerteza da calibração por auto-reciprocidade para o transdutor de 1,0 MHz. $u(S_{arn,a})$, Lin_{arn} , $u(S_{arn,b})$ e $u_c(S_{arn})$ identificam respectivamente as componentes de incertezas do Tipo A, de linearidade, do Tipo B e combinada.

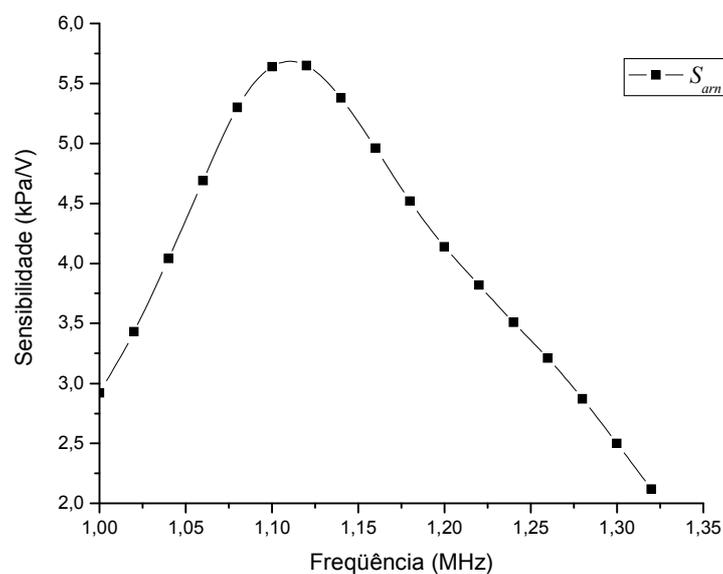


Figura 3 – Sensibilidade para o transdutor de 1,0 MHz.

Para o transdutor de 2,25 MHz, segundo o critério estabelecido ($Lin_{arn} < 10\%$), foram considerados válidos na calibração por auto-reciprocidade os pontos para os quais a frequência é menor ou igual a 2,9 MHz até o limite de 1,5 MHz, conforme figura 4. Para a incerteza padrão combinada, segundo o critério estabelecido ($u_c(S_{arn}) < 9,5\%$), foram considerados válidos na calibração por auto-reciprocidade os pontos para os quais a frequência é menor ou igual a 2,9 MHz até o limite de 1,5 MHz. A figura 5 mostra a curva de sensibilidade (S_{arn}) para o transdutor de 2,25 MHz. O gráfico apresenta os valores de sensibilidade para os pontos onde a frequência é menor ou igual a 2,90 MHz, em virtude da aplicação dos critérios definidos para incerteza combinada e incerteza devida à linearidade. O valor máximo da sensibilidade (3,73 kPa/V) foi obtido em 2,05 MHz.

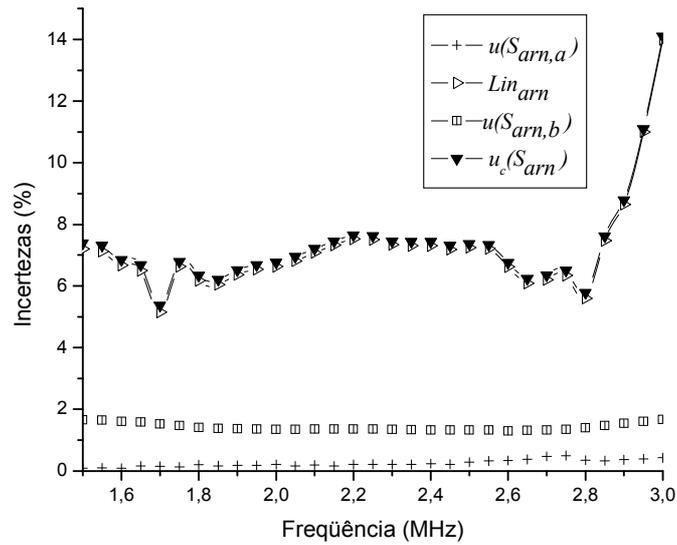


Figura 4. Incerteza da calibração por auto-reciprocidade para o transdutor de 2,25 MHz. $u(S_{arn,a})$, Lin_{arn} , $u(S_{arn,b})$ e $u_c(S_{arn})$ identificam respectivamente as componentes de incertezas do Tipo A, de linearidade, do Tipo B e combinada.

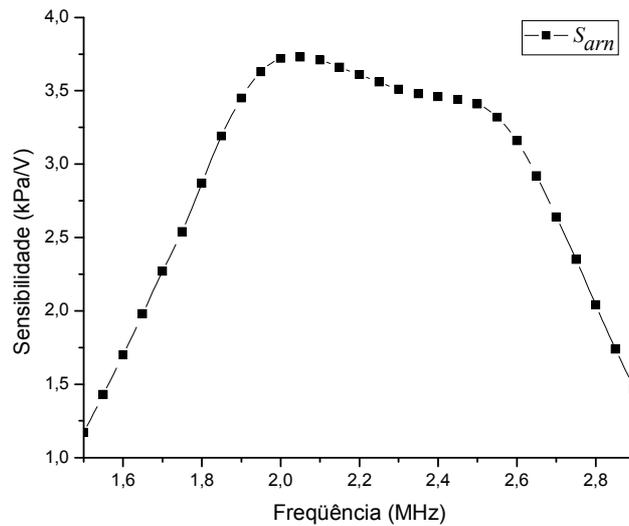


Figura 5 – Sensibilidade para o transdutor de 2,25 MHz.

6 Conclusões

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 aplicada ao transdutor para gerar um campo de pressão. Na área de 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 tem largura de banda de meia potência especificada de 0,86 MHz a 1,26 MHz, segundo catálogo do fabricante. Pelo critério da incerteza combinada menor do que 9,5%, que equivale a uma incerteza expandida de 19% conforme declarado pela norma IEC 60866, a calibração do transdutor de 1,0 MHz foi considerada satisfatória a partir de 1,0 MHz, conforme mostrado na Figura 3.

O transdutor de 2,25 MHz tem largura de banda de meia potência especificada de 1,68 MHz a 2,87 MHz, segundo catálogo do fabricante. Pelos critérios estabelecidos, a figura 5 mostra que a calibração por auto-reciprocidade, em 2,25 MHz é considerada satisfatória na faixa de 1,50 MHz a 2,90 MHz.

Referências

- [1] International Electrotechnical Commission (IEC). *Characteristics and Calibration of Hydrophones for Operation in the Frequency Range 0,5 MHz to 15 MHz - IEC 60866*, International Electrotechnical Comisión, Switzerland, 1987.
- [2] Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Inmetro)/Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). *Guia para a expressão da incerteza da medição – ISO GUM*, Inmetro/ABNT, Rio de Janeiro, 2003.
- [3] Inmetro e Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (Senai). *Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia (VIM)*, Inmetro e Senai, Rio de Janeiro, 2007.
- [4] Costa-Félix, R.P.B. *Aplicações metrológicas do ultra-som empregado em engenharia biomédica utilizando varreduras de senos (Chirps)*, Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Biomédica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.
- [5] Brendel, K.; Ludwig, G. Calibration of ultrasonic standard probe transducers. *Acustica*, Vol. 36, 1976/77, pp. 203-208.
- [6] Beissner, K. Free-field reciprocity calibration in the transition range between near field and far field. *Acustica*, Vol. 46, 1980, pp. 162-167.
- [7] Labuda, C.; Raymond, J.L.; Church, C.C. Reciprocity calibration of hydrophones in the megahertz frequency range. *IEEE International Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control joint 50th Anniversary Conference*, 2004, pp. 1595-1597.
- [8] Oliveira, E.G. *Validação de um sistema de calibração de transdutores de ultra-som por auto-reciprocidade*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, CEFET-RJ, Rio de Janeiro, 2007.
- [9] Fay, V.B. Numerische berechnung der beugungsverluste im schallfeld von ultraschallwandlern. *Acustica*, Vol. 36, 1976, pp. 209-213.