

Artigo Original

Recebido em 10/06/2006, aceito em 11/12/2007

Métodos de calibração de hidrofones

Hydrophone calibration methods

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

João Carlos Machado

Programa de Engenharia Biomédica – COPPE/UFRJ

*Autor para correspondência

Resumo

O presente trabalho consta de uma revisão minuciosa dos métodos de calibração de hidrofones, aplicáveis tanto aos do tipo agulha quanto aos de membrana. São revistos os métodos mais utilizados, absolutos e por comparação, associados às diversas técnicas de calibração e destinadas à determinação da sensibilidade do hidrofone. Os métodos descritos são: Reciprocidade, Varredura Plana, Interferometria a *laser*, TDS (*Time Delay Spectrometry*) e da Propagação Não Linear ou da Geração de Harmônicos. É apresentado um quadro comparativo descrevendo a incerteza típica e a máxima frequência ultra-sônica inerentes a cada um dos métodos. A calibração de hidrofones com base no Método da Reciprocidade tem incerteza típica de cerca de $\pm 19\%$ (1,5 dB) entre 0,5 e 15 MHz. Com o Método da Varredura Plana, a incerteza é de cerca de $\pm 6\%$ (0,5 dB) até 5 MHz e de $\pm 18\%$ (1,4 dB) entre 5 e 15 MHz. O Método da Interferometria é considerado padrão primário para calibração de hidrofones, sendo sua incerteza típica de $\pm 4\%$ (0,3 dB) até 15 MHz, ou $\pm 15\%$ (1,2 dB) até 70 MHz. Para o Método TDS, as incertezas estão em torno de $\pm 7\%$ (0,7 dB) até 5 MHz e de $\pm 14\%$ (1,1 dB) até 30 MHz. Atualmente, o método interferométrico é considerado o melhor, mas não é de largo emprego devido ao seu alto custo de implementação.

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

Abstract

This paper presents a detailed review of the methods used to calibrate hydrophones, including needle and membrane types. The review considers the most used methods, based in both direct or comparison principles, associated to distinct calibrate methods applied in the hydrophone sensitivity determination. The methods depicted herein are: Reciprocity, Planar Scanning, Laser Interferometer, TDS (Time Delay Spectrometry) and Harmonic Generation or Nonlinear Propagation. Typical uncertainties and highest frequency covered by the aforementioned methods are compiled in a table for comparison. Hydrophone calibration based on reciprocity has typical uncertainty of about $\pm 19\%$ (1.5 dB) between 0.5 and 15 MHz. With the planar scanning method the uncertainty is about $\pm 6\%$ (0.5 dB) up to 5 MHz and of $\pm 18\%$ (1.4 dB) between 5 and 15 MHz. Interferometer method is considered the primary standard for hydrophone calibration, with typical uncertainties about $\pm 4\%$ (0.3 dB) up to 15 MHz, or $\pm 15\%$ (1.2 dB) up to 70 MHz. For TDS method, uncertainties are about $\pm 7\%$ (0.7 dB) up to 5 MHz and of $\pm 14\%$ (1.1 dB) up to 30 MHz. Hydrophone calibration based on the nonlinear method has uncertainties of $\pm 8\%$ (0.7 dB) up to 15 MHz. Presently, the interferometer method is considered the best one, but it is not widely used due its high cost for implementation.

Keywords: Metrology, Calibration, Ultrasound, Hydrophone, Transducer.

Extended Abstract

Introduction

Calibration of an ultrasonic transducer consists of determining its sensitivity, i.e., the correspondence between the acoustic pressure incident upon the transducer and the electric output signal, or vice-versa.

The applicability of a calibration method can be quantified, in a simple manner, by two main elements: uncertainty of the method employed and ranges (or limits) of its application.

This paper presents the most important methods for ultrasonic hydrophone calibration. The main sources of consultation were the standards from the International Electrotechnical Commission (IEC, 2007d).

Methods

The methods mainly used to calibrate hydrophones are described below:

Reciprocity – This is a well defined concept, and for a transducer it means a constant ratio between the reception sensitivity (conversion of the incident acoustic pressure into electric voltage – M) and transmission (conversion of the electric voltage applied at the transducer input terminals and the vibration speed of its face, which in turns generates the acoustic pressure field – generally represented by S). Standard IEC 62127-2:2007 (IEC, 2007b), which recently replaced IEC 60866:1987 (IEC, 1987), describes the method called self-reciprocity, based on reciprocity theory, which was developed to allow calibration of auxiliary transducers.

Planar scanning – This was the second method to have a standard for hydrophone calibration up to 15 MHz, as described in IEC (1991a). That standard had been recently replaced by both IEC 62127-1 (IEC, 2007a) and IEC 62127-2 (IEC, 2007b). The basic idea resides in a simple physical principle: the surface integral of intensity provides the power that propagates across the surface. Once power is the rate of transmitted energy and the acoustic pressure can be determined from the energy transmitted by the wave, then it becomes possible to obtain the pressure from the measured power. Regarding hydrophone calibration, the first step is to determine the irradiated power. This can be done using an ultrasonic power meter as described in IEC (2006a).

Laser interferometer – The physical principle generally used, Michelson's, refers to the beat generated between two light beams (laser) that have the same source (therefore coherent) and travel at different paths. One of the beams is called the reference beam and the other hits a membrane inserted across the beam of an ultrasound field inside a water tank. This membrane matches the acoustic impedance of water and at the same time is an optical reflector. The beam light reflects at this membrane and returns to a beam splitter, as well as the reference beam, giving rise to interference between both beams. The resulting light wave has the same frequency as the original one, but a phase that depends on the difference between the two lengths of the two paths propagated

by the light wave. This phase will change in time according to the membrane motion, with the phase speed being the same as the membrane speed $p = \rho_0 c_0 v_0$. With the membrane replaced by the hydrophone to be calibrated, and considering the acoustic field at the hydrophone surface the same as that when the membrane was present, then the hydrophone output electrical signal can be used to determine its sensitivity.

TDS (time delay spectrometry) – This method has been used since the 1980's on a secondary calibration of hydrophones (Ludwig and Brendel, 1988; Pedersen et al., 1988). It consists on generating a linear sweep (or chirp). The signal must be driven to the input of a Linear System Time-Invariant (LSTI), whose frequency response is to be determined. The system can be a hydrophone, a transducer, a signal generator or a combination of all of those devices. The outcome is the convolution between the system impulse response and the sinusoidal input with linear sweep. Considering the system to be an ultrasound transmitter and receiver, the response will be delayed, with respect to the input signal, because of the pathway between transmitter and receiver. The system output is multiplied by the input signal delayed by the same amount. The product signal contains the real part of the system Frequency Response (FR). Moreover, after multiplying the system output with the input signal delayed by 90° , the product contains the imaginary part of the FR.

Nonlinear propagation or harmonic generation – Ultrasound propagation in a liquid medium or biological tissue generates harmonics and this fact has been widely used. That phenomenon occurs as the wave penetrates a few wavelengths, being predominant at the transducer focal region (Zeqiri and Bond, 1992). The non-linearity causes the original sinusoidal wave to deform and present a saw tooth aspect. The resulting bandwidth may become 40 times the fundamental frequency (Smith and Bacon, 1990). This allows the emission of pure tone burst and the wave incident at the hydrophone to have 40 harmonics of the tone. This method provides a timesaving procedure.

Discussion

The previous methods have different uncertainties. Hydrophone calibration based on reciprocity has typical uncertainty of about $\pm 19\%$ (1.5 dB) between 0.5 and 15 MHz. According to IEC (1991a), uncertainty when using the planar scanning method is about $\pm 6\%$ (0.5 dB) up to 5 MHz and of $\pm 18\%$ (1.4 dB) between 5 and 15 MHz. Interferometer method is considered the primary standard for hydrophone calibration. Typical uncertainties are about $\pm 4\%$ (0.3 dB) up to 15 MHz, or $\pm 15\%$ (1.2 dB) up to 70 MHz. For the TDS method, uncertainties are about $\pm 7\%$ (0.7 dB) up to 5 MHz and of $\pm 14\%$ (1.1 dB) up to 30 MHz. Hydrophone calibration based on the nonlinear method has uncertainties of $\pm 8\%$ (0.7 dB) up to 15 MHz.

Introdução

Segundo o item 6.11 do “Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia”, o VIM (Inmetro e SENAI, 2000), calibração é um “conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados por um instrumento de medição (...) e os valores correspondentes das grandezas estabelecidas por padrões”. Ou seja, nada mais é do que determinar a relação entre o valor de uma grandeza fornecido por um equipamento ou instrumento e o valor “real” da grandeza medida. No caso do instrumento ser um transdutor, “calibrar” significa deixar acessível ao usuário o fator de conversão, direto ou indireto, entre as duas modalidades de energia sobre as quais opera o transdutor. Mais especificamente, calibrar um transdutor ultrassônico consiste em determinar sua sensibilidade, isto é, a relação entre a pressão que atinge o transdutor e a tensão elétrica na sua saída, ou vice-versa.

A calibração é uma atividade metrológica fundamental em qualquer Instituto Nacional de Metrologia (NMI, sigla em inglês), como também em laboratórios de ensaios e/ou calibração, acreditados ou não. A partir da calibração, é possível identificar a confiabilidade de um instrumento de medição ou padrão de trabalho, comparando os resultados da calibração com especificações de normas ou regulamentos técnicos. A qualidade de uma calibração pode ser quantificada, de maneira simplificada, por dois elementos principais, a saber: incerteza do método empregado e faixas (ou limites) de sua aplicação. Em linhas gerais, quanto menor a incerteza, melhor o método. De maneira análoga, tanto melhor e mais genérico será um determinado método quanto mais amplas forem suas faixas úteis, considerando as grandezas físicas verificadas.

Na área de ultra-som, os dois serviços de calibração mais bem consolidados são medição de potência ultra-sônica e calibração de hidrofonos. Para tanto, há uma diversidade considerável de técnicas de calibração de hidrofonos, algumas com várias décadas de utilização. Isso lhes confere uma confiabilidade metrológica suficiente para que um laboratório possa, de forma confiável, implementar qualquer uma sabendo de antemão o que se pode esperar quanto aos custos de implantação e execução, aos requisitos básicos de treinamento e qualificação de mão de obra especializada, ao tempo necessário para uma calibração, etc. Enfim, as variáveis necessárias para ofertar um serviço de calibração de hidrofonos estão disponíveis, tanto em nível primário quanto secundário. O Instituto Nacional de Metrologia,

Normalização e Qualidade Industrial (Inmetro, 2007), o NMI brasileiro, iniciou recentemente um projeto com a intenção de incrementar o sistema metrológico nacional com a oferta do serviço de calibração de hidrofonos (Costa-Félix e Azevedo, 2003). Tal iniciativa tem abrangência nacional, já que são diversos os laboratórios que utilizam hidrofonos, quer seja na área industrial (laboratórios e técnicos que realizam ensaios não destrutivos, por exemplo) ou da saúde (universidades, laboratórios acreditados pelo Inmetro, etc.).

Este artigo se insere nas atividades iniciais de implantação do laboratório nacional de referência na área de ultra-som. A revisão dos diversos métodos de calibração servirá não apenas ao NMI, mas também como guia para os laboratórios que venham fazer uso dos serviços oferecidos. O conhecimento dos métodos disponíveis de calibração de hidrofonos permitirá que seja feita uma escolha adequada do serviço, em função dos parâmetros descritos anteriormente.

As principais fontes de consulta foram as normas da *International Electrotechnical Commission* (IEC, 2007d), que tratam, basicamente, de calibração, e os artigos científicos nela citados. Essas normas são as usualmente utilizadas nos dois principais NMI do mundo: o *National Physical Laboratory* da Inglaterra (NPL, 2007) e o *Physikalisch-Technischen Bundesanstalt* da Alemanha (PTB, 2007). Até o momento não existe nenhuma norma para calibração de instrumentos de metrologia em ultra-som no órgão brasileiro de normalização, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2007).

Esta revisão encerra o ‘estado da arte’ em calibração de hidrofonos, uma vez que foram consultadas as mais recentes normas publicadas, compreendendo a série IEC 62127 (IEC 2007a, 2007b e 2007c). Estas normas cancelaram e/ou substituíram todas as normas anteriores relativas à caracterização de campos ultrassônicos na área da saúde, bem como a calibração e avaliação de transdutores, considerando frequências até 40 MHz. A fim de manter a correspondência entre as normas atuais e as originais, sempre ambas serão citadas ao longo do texto, ressaltando-se os casos em que determinado método não tenha sido anteriormente (ou não esteja atualmente) normalizado. Vale ressaltar que os fundamentos teóricos aplicáveis aos métodos apresentados são, naturalmente, os mesmos em ambas as gerações de normas, e sempre que possível serão referenciadas as publicações originais ou mais relevantes concernentes.

Fundamentos metodológicos: o hidrofone

O hidrofone é um transdutor eletromecânico para aplicações subaquáticas, como o nome sugere. Tal qual um microfone, ele é capaz de converter a variação de pressão, que incide em seu elemento ativo, em tensão elétrica (Chivers e Lewin, 1982; Lewin e Chivers, 1983). A tensão elétrica gerada nos terminais do hidrofone é relacionada com a intensidade do campo sonoro que incide sobre sua face receptora. Nos hidrofones modernos mais comuns, a conversão de energia é realizada devido ao efeito piezelétrico do elemento ativo, em geral o polímero di-fluoreto de polivinilideno (*polyvinylidene di-fluoride* – PVDF) (Harris, 1982), embora hidrofones que utilizam princípios ópticos estejam sendo atualmente desenvolvidos (Wilkens, 2002). O parâmetro que relaciona a conversão de energia mecânica em elétrica é denominado sensibilidade, e consiste exatamente no produto final da calibração de qualquer transdutor.

O hidrofone é caracterizado segundo os seguintes conceitos metrológicos:

- Resposta em frequência, isto é, como varia sua sensibilidade em função da frequência;
- Faixa útil de frequências, considerando uma relação sinal/ruído mínima;
- Linearidade, característica que o transdutor possui caso a variação da sua sensibilidade seja inferior a um determinado valor para diferentes níveis de amplitude do sinal de excitação, dentro de uma faixa de frequências considerada;
- Ruído elétrico, que determina qual a menor amplitude possível de se medir com o hidrofone.

Para uniformizar a linguagem, são apresentados a seguir conceitos ligados à calibração. Esses conceitos não se restringem ao ultra-som, mas são considerados de entendimento amplo em todas as áreas da metrologia. Serão apresentados, ainda, os dois tipos de hidrofones ultra-sônicos mais comuns, considerando sua disponibilidade comercial.

Hidrofone tipo agulha (*needle*) – Os hidrofones de agulha (Figura 1) são os mais simples, entre os tipos aqui apresentados. Basicamente, eles são montados usando-se um tubo metálico que por sua vez contém um disco de elemento piezelétrico (normalmente PVDF) em uma das extremidades. A face externa do disco faz contato elétrico com a parede do tubo e a face interna faz contato com um fio condutor introduzido através da luz do tubo.

O custo desse tipo de hidrofone oscila entre US\$ 1,500 e US\$ 3,000 quando calibrado em algumas frequências (PA, 2007), dependendo basicamente do diâmetro de seu elemento ativo (quanto menor, mais caro, PA, 2007). A Figura 2 mostra alguns hidrofones tipo agulha comerciais. Na Figura 3 é apresentada

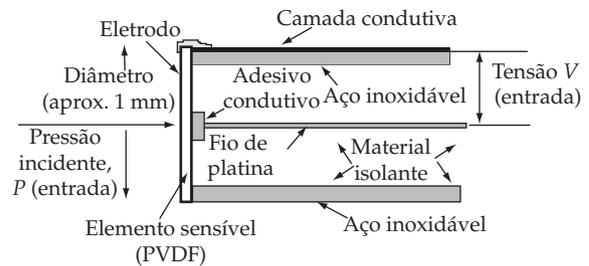


Figura 1. Diagrama estrutural de um hidrofone tipo agulha (*needle*). Na entrada aplica-se uma pressão P e na saída obtém-se uma diferença de tensão elétrica V . **Figure 1.** Structural diagram of a needle hydrophone. A pressure wave p is incident at the input and a voltage signal V is obtained at the output.

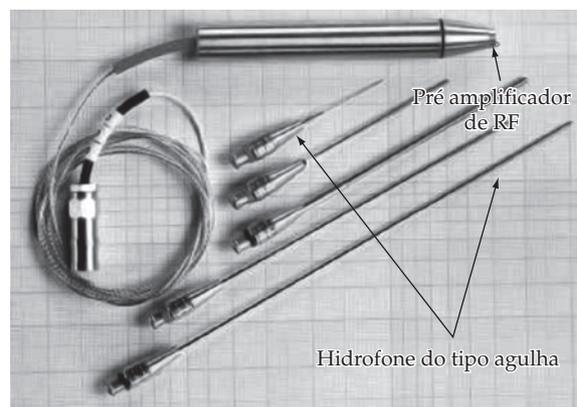


Figura 2. Exemplos de hidrofones tipo agulha disponíveis e do pré-amplificador de RF fabricados pela Precision Acoustics (PA, 2007). **Figure 2.** Examples of available needle hydrophones and the RF pre-amplifier made by Precision Acoustics (PA, 2007).

uma curva típica de sensibilidade de hidrofones de agulha.

Hidrofone de membrana – Esse tipo de hidrofone é considerado “padrão ouro” em ultra-som, por ser o transdutor que apresenta as melhores características metrológicas (Bacon, 1982). Sua estabilidade de longo tempo (*long term stability*) é considerada boa o suficiente para aplicações metrológicas, apresentando variações de sensibilidade geralmente inferiores a 0,5% ao ano. Além disso, sua resposta em frequência é bastante plana, com variação inferior a 9 dB entre 1 e 60 MHz, conforme se pode observar no gráfico da Figura 4. Por isso, eles são largamente utilizados nos NMI, e servem como padrão de transferência do método primário de calibração (geralmente o método interferométrico – ver descrição mais à frente). Em contrapartida, o custo desse tipo de hidrofone pode facilmente ultrapassar US\$ 14 mil, calibrados em algumas frequências (PA, 2007).

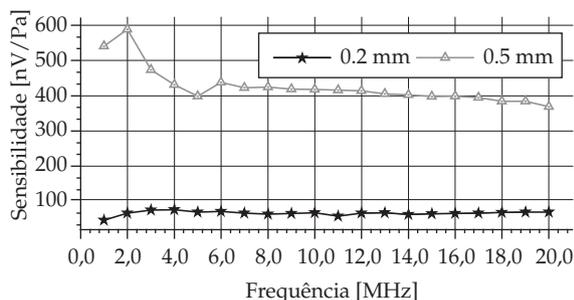


Figura 3. Curva de sensibilidade típica de hidrofone tipo agulha. O gráfico apresentado foi obtido para hidrofones de 0,2 mm e 0,5 mm de diâmetro e utilizando o método de propagação não linear para calibração, usando um sinal senoidal em 1 MHz. **Figure 3.** Typical sensitivity curve of a needle hydrophone. The plot was obtained for hydrophones with diameter of 0.2 mm and 0.5 mm and applying the nonlinear propagation method using a sinusoidal signal at 1 MHz.

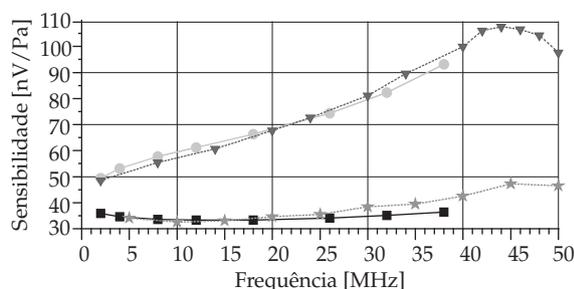


Figura 4. Curvas de sensibilidade teóricas e determinadas experimentalmente típicas para 2 modelos de hidrofones de membrana: IP904 (coplanar) e IP016 (bilaminar). Figura extraída de Costa-Félix (2005). **Figure 4.** Typical theoretical and experimentally determined sensitivity curves of 2 membrane hydrophone models: IP904 (coplanar) and IP016 (bilaminar). Extracted from Costa-Félix (2005).

A Figura 5 mostra um esquema de um hidrofone de membrana, e uma resposta em frequência típica aparece na Figura 4. A resposta em frequência mostrada nessa figura pode ser comparada diretamente com a da Figura 3 para um hidrofone tipo agulha.

Calibração (de transdutores) – Como já definido, calibrar um hidrofone é determinar sua sensibilidade, isto é, como a pressão que atinge o elemento ativo do

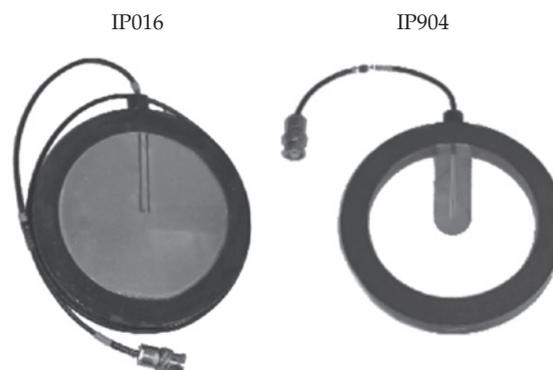
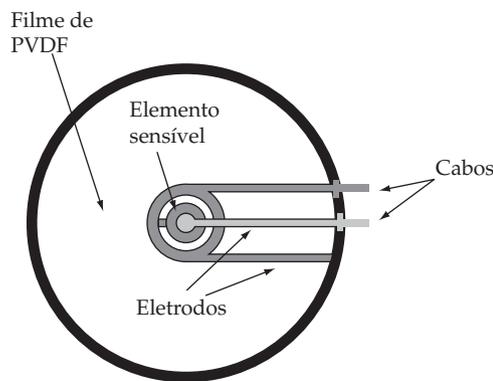


Figura 5. Modelo esquemático e foto de 2 tipos de hidrofones de membrana (adaptado de Costa-Félix, 2005). **Figure 5.** Structural diagram and picture of 2 membrane hydrophone models (adapted from Costa-Félix, 2005).

transdutor se transforma em tensão elétrica na sua saída. Matematicamente, define-se a sensibilidade M por:

$$M = \frac{V}{P} \quad (1)$$

onde V é a amplitude do sinal de tensão elétrica medida no cabo do hidrofone e P é a amplitude da onda de pressão incidente em seu elemento ativo. Geralmente, a sensibilidade é fornecida em nV/Pa (nanovolt por pascal).

A importância da calibração é evidente quando se pretende utilizar o hidrofone para medir o valor absoluto da pressão (ou alguma grandeza derivada, como potência ou intensidade). Menos evidente é a necessidade de se utilizarem hidrofones calibrados para medir grandezas relativas, por exemplo, a relação entre as intensidades em duas posições distintas dentro do campo ultra-sônico. Com um hidrofone calibrado pode-se garantir que as medições foram feitas dentro da sua faixa linear. Caso contrário, a razão obtida entre duas intensidades pode ser incorreta. Além do mais, somente com a calibração é possível estimar

a incerteza final de uma medição, já que a incerteza do hidrofone advém de sua calibração. Em linhas gerais, usar equipamentos ou instrumentos descalibrados exclui os benefícios inerentes à área da metrologia.

Método direto – É aquele em que a grandeza física de interesse (pressão, no caso da calibração de hidrofones) é obtida diretamente de outras grandezas físicas, podendo também ser chamado de método absoluto. A rastreabilidade da grandeza de interesse é obtida de outras áreas metrológicas, como elétrica, mecânica, óptica, dimensional, etc. Em ultra-som existem os seguintes métodos diretos de calibração:

- Varredura plana, com a qual a pressão é obtida basicamente da potência ultra-sônica, rastreada a padrões de massa, e da área da seção transversal do feixe, rastreada a padrões dimensionais (Corbett III, 1988; Herman e Harris, 1982; IEC, 1991a; IEC, 1991b; estas últimas normas foram substituídas pela IEC, 2007a e pelo item 10 da IEC, 2007b);
- Interferometria, na qual a pressão é obtida pela interferência óptica entre feixes coerentes de luz, cuja rastreabilidade é realizada a padrões ópticos e dimensionais (apresentada no item 11 da norma IEC, 2007b); e
- *Time Delay Spectrometry*, ou TDS e reciprocidade (Beissner, 1980; Bobber, 1966; Ludwig e Brendel, 1988), sendo a sensibilidade obtida de razões entre grandezas elétricas (tensão e corrente) e dimensionais (distâncias entre os transdutores e receptores...). Estes métodos estão normalizados e descritos, respectivamente, no Anexo H e no item 9 da norma IEC (2007b).

Método por comparação – Neste método, também chamado de método da substituição, é necessário um padrão (hidrofone) previamente calibrado. Mede-se a pressão do campo com o padrão, o que é feito a partir da sua conhecida sensibilidade. O passo seguinte consiste em substituir o hidrofone padrão pelo hidrofone a ser calibrado, colocando-o no mesmo lugar no campo que o padrão ocupava anteriormente. Da tensão (ou corrente, dependendo da técnica) medida na saída do hidrofone sob teste define-se sua sensibilidade, uma vez que a pressão fora definida experimentalmente com o auxílio do padrão. No item 12 da norma IEC (2007b) são feitas considerações sobre o emprego do método da comparação na calibração de hidrofones.

Na prática, os métodos diretos apresentam incertezas menores, uma vez que a cadeia de rastreabilidade é mais curta. Entretanto, esse não é o caso em calibração de hidrofones. Por exemplo, aplicando o método “Varredura Plana” com o método da substituição utilizando um padrão calibrado por interferometria *laser* com incerteza de cerca de 4% até 15 MHz obtém-se uma incerteza menor do que utilizando a “Varredura

Plana” como método absoluto, caso a potência ultra-sônica seja medida com uma balança comum (incertezas de até 10%). Mesmo com uma balança e metodologias extremamente precisas, com cerca de 4% de incerteza (Beissner, 1999) para a medição da potência, a incerteza final será da mesma ordem de grandeza. Isso acontece pela particularidade do método interferométrico apresentar incerteza muito menor do que qualquer outro método em calibração de hidrofones atualmente disponível.

Métodos de calibração de hidrofones

Geralmente, em um trabalho de revisão bibliográfica na área de metrologia, procura-se ater aos métodos normalizados internacionalmente. No entanto, no caso de calibração de hidrofones, alguns métodos utilizados em NMI de renome, como o PTB e o NPL, não são normalizados (entendendo como “normalizado” o método descrito em uma norma, e não apenas em algum de seus anexos informativos) na calibração de hidrofones até 40 MHz. Aliás, até recentemente alguns desses métodos não estavam sequer presentes em qualquer documento normativo. A despeito disso, eles vêm sendo utilizados há muito tempo, sendo em alguns casos o método mais usado na prestação de serviços de calibração, como o da Propagação Não Linear do NPL, e o TDS do PTB. Até mesmo o método considerado de melhor qualidade metrológica, o interferométrico, não constava em norma alguma. Mas após a recente publicação da norma para calibração de hidrofones para aplicações em alta frequência (até 40 MHz, IEC, 2001), todos os referidos métodos passaram a ser citados em seus anexos informativos. Mais recentemente, os principais métodos existentes foram compilados e explicitamente citados na norma IEC (2007b), e as normas anteriores foram canceladas ou substituídas. O significado disso é que os métodos e suas técnicas são considerados como viáveis, embora não obrigatórios, para realizar determinado serviço.

Método da reciprocidade

A primeira norma para calibração de hidrofones descrevia apenas o método da reciprocidade (IEC, 1977), tendo sido substituída pela IEC (2006b). Esta norma descreve o método da reciprocidade utilizando 3 transdutores, e não é apropriado para frequências acima de 1 MHz. Acima desta faixa de frequências, o item 9 da norma IEC (2007b) deve ser considerado. A reciprocidade é um conceito bem definido, e para um transdutor significa razão constante entre a sensibili-

dade de recepção (conversão da pressão incidente em tensão elétrica gerada – M) e de transmissão (conversão da tensão elétrica aplicada na entrada do transdutor em velocidade de vibração da sua face, que por sua vez gera a pressão no campo – representada geralmente pela letra S). Matematicamente, descreve-se o parâmetro geral da reciprocidade J como (Bobber, 1966):

$$J = \frac{M}{S} \quad (2)$$

onde M é definido pela equação (1), e $S = V/U$, sendo V a amplitude de tensão elétrica aplicada ao transdutor (na condição de transmissor) e U a velocidade de volume da sua face ($U = v \cdot A$), onde v é a velocidade da face do transdutor na direção normal e A é sua área efetiva). O parâmetro de reciprocidade J pode ser derivado a partir da equação (2) para diversas situações específicas, sendo que para calibração de hidrofonos geralmente se utiliza J para ondas planas J_p , de acordo com a seguinte equação (Bobber, 1966; IEC, 1987):

$$J_p = \frac{2A}{\rho_0 c_0} \quad (3)$$

sendo ρ_0 a densidade do meio de propagação e c_0 a velocidade de propagação da onda de ultra-som nesse meio. Daqui em diante, ρ_0 e c_0 terão sempre este significado.

A primeira norma de calibração de hidrofonos (IEC, 1977) sugeria o uso da reciprocidade de três transdutores, tal como é realizada a calibração absoluta de microfones para campo de pressão (IEC, 1992) e para campo livre (IEC, 1995). No entanto, observou-se empiricamente que para altas frequências não é possível utilizar a mesma técnica, pois é bastante difícil alinhar os pares de transdutores sendo calibrados. Recomendava-se utilizar a técnica dos três transdutores para frequências até 500 kHz ou, atualmente, até 1 MHz, segundo a norma IEC (2006b). Para resolver esse problema foi desenvolvida uma técnica denominada calibração por auto-reciprocidade, na qual a sensibilidade do transdutor é determinada a partir de um sinal acústico gerado pelo próprio transdutor, e que a ele retorna após refletir em um alvo apropriado (Reid, 1974). A limitação para o emprego dessa técnica é o tamanho do elemento ativo do transdutor, uma vez que a potência emanada é proporcional ao volume deslocado por sua face. Portanto, transdutores muito pequenos, como os hidrofonos utilizados na faixa dos MHz, não podem ser eficientemente calibrados por auto-reciprocidade. A recomendação da norma IEC (2007b) é utilizar auto-reciprocidade em transdutores com no mínimo 2 mm de diâmetro.

A partir dessas considerações, foi desenvolvido um método híbrido para calibrar hidrofonos para utilização até 15 MHz, descrito na IEC (1987) e no item 9 da IEC (2007b). Segundo esse método, inicialmente deve-se calibrar um transdutor auxiliar, que deve ser linear, passivo e reversível, pelo método da auto-reciprocidade. Em seguida, posiciona-se o receptor (o hidrofone a ser calibrado) no campo previamente determinado, obtendo-se então a sua sensibilidade. Na prática, o alvo utilizado na reflexão da onda ultrassônica é ligeiramente inclinado para que o feixe seja desviado na direção do hidrofone, conforme o esquema da Figura 6. Para evitar a formação de ondas de cisalhamento na face do alvo refletor, o que poderia alterar a sua impedância e, em consequência, o coeficiente de reflexão, a inclinação deve ser inferior a 10°.

O método da reciprocidade, em qualquer de suas variantes (utilizando-se 1, 2 ou 3 transdutores), é sempre um método direto por definição. A formulação matemática, após as simplificações necessárias, tais como a consideração de onda plana e campo livre, conforme desenvolvido por Beissner (1980) é dada por:

$$M = \sqrt{\frac{V_{Hid}^2}{V_{Tx} I_{Tx}}} \cdot \sqrt{\frac{2A_{Tx}}{\rho c R_{ref}}} \cdot \frac{\sqrt{G_{TxTx}}}{G_{TxHid}} e^{c \cdot d_{hr}} \quad (4)$$

onde V_{Hid} representa a amplitude de tensão elétrica gerada pelo hidrofone durante sua sensibilização, V_{Tx} é a amplitude de tensão elétrica aplicada ao transdutor para gerar o campo, I_{Tx} é a amplitude de corrente que percorre o transdutor, idêntica tanto na etapa de auto-calibração quanto na de calibração do hidrofone, A_{Tx} é a área efetiva de radiação do transdutor, R_{ref} é o coeficiente de reflexão em amplitude do refletor, G_{TxTx} é a perda por difração do campo gerado pelo transdutor na calibração por auto-reciprocidade, G_{TxHid} é a perda por difração do campo gerado pelo transdutor na calibração do hidrofone, α é o coeficiente de atenuação do som na água e d_{hr} é a distância entre o hidrofone e o refletor.

Como pode ser observado, além das grandezas elétricas do primeiro termo do lado direito da equação (4), são necessárias grandezas de massa, temperatura e dimensionais, ou delas derivadas, com exceção do coeficiente de reflexão R_{ref} . No entanto, segundo a IEC (1987), o coeficiente de reflexão pode ser considerado idealmente igual a 1,0 caso o refletor apresente certas características construtivas descritas na norma. A velocidade de propagação é função da temperatura da água, conforme descrito por Bilaniuk e Wong (1993) e Del Grosso e Mader (1972), e a absorção é uma função da frequência, estando também definida em IEC

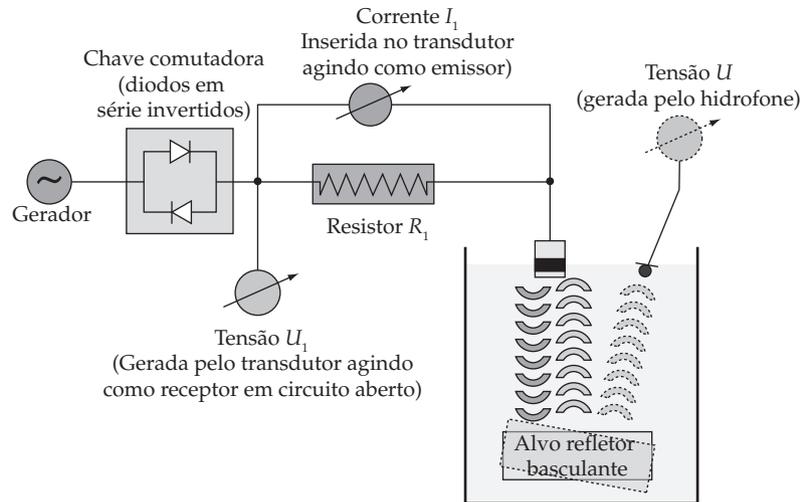


Figura 6. Desenho esquemático para calibração de hidrofonos pelo método da reciprocidade, conforme descrito na norma IEC 60866. O presente modelo é utilizado no Laboratório de Ultra-Som do Inmetro. **Figure 6.** Schematic layout for hydrophone calibration using the reciprocity method, according to standard IEC 60866. The model disclosed is used at Inmetro's Ultrasound Laboratory.

(1987) e IEC (2007b). Os coeficientes G caracterizam a perda por difração da emissão e recepção da onda sonora, quer seja na situação transdutor para transdutor ou transdutor para hidrofone. O desenvolvimento teórico do valor desses coeficientes foi desenvolvido por Fay em 1976, conforme informado na IEC (2007b) e Beissner (1980), e são obtidos basicamente a partir da razão entre as áreas do transdutor e do hidrofone e a separação (distância) entre eles.

Segundo a norma IEC (1987), a calibração de hidrofonos utilizando o método e as simplificações nele descritas levam a uma incerteza máxima de não mais do que $\pm 1,5$ dB (19%) entre 0,5 e 15 MHz.

Este método foi escolhido pelo Inmetro para ser o primeiro método absoluto de calibração de transdutores ultra-sônicos (Oliveira, 2007). Foi implementado para as frequências entre 1 e 3 MHz, e as incertezas combinadas típicas ficaram abaixo de 8%, exceto próximo a 3 MHz, conforme os gráficos da Figura 7. O gráfico apresentado é a composição dos resultados obtidos com 2 transdutores, um com frequência central de 1,0 MHz e outro com frequência nominal de 2,25 MHz. As incertezas obtidas são condizentes com a literatura e a norma utilizada (IEC, 1987).

Método da varredura plana (*planar scanning*)

O segundo método a ser normalizado para calibração de hidrofonos até a frequência de 15 MHz foi o da Varredura Plana, conforme descrito na norma IEC (1991a), esta substituída pelo item 10 da IEC (2007b).

Esta norma descreve os parâmetros que devem ser medidos para a calibração, e deve ser utilizada em conjunto com a IEC (2007a) quanto ao procedimento experimental para a geração do campo ultra-sônico. Na calibração de hidrofonos, a primeira etapa do método da varredura plana é conhecer a potência emitida por um sistema de geração de sinais (gerador, amplificador e transdutor). A maneira mais simples de executar essa etapa é utilizando uma balança, conforme descrito na norma IEC (2006a) por Beissner (1980) – ver Figura 8.

Uma vez determinada a potência do sistema de geração do sinal, o mesmo sistema é utilizado para gerar um campo em um tanque no qual seja possível posicionar o hidrofone a ser calibrado em diversas posições bem definidas. É feita então uma varredura sobre um plano paralelo à face do transdutor, sendo medida e armazenada a tensão elétrica gerada pelo hidrofone em cada ponto. A tensão é considerada proporcional à pressão no local, e a constante de proporcionalidade é a sensibilidade descrita na Equação 1. A energia propagada pela onda ultra-sônica é obtida da pressão da onda em cada ponto, aplicando a sensibilidade, o que gera uma relação direta entre a potência e a integral da sensibilidade em cada ponto do plano varrido. Com isso obtém-se a sensibilidade final do hidrofone. A Equação 5 descreve matematicamente o processo utilizado para calcular a sensibilidade M , em volt/pascal (Beissner, 1999):

$$M = \sqrt{\iint_S \frac{V_{PT}^2(\vec{r})}{2\rho c G_r V_{rms}^2} dS} \cdot e^{\alpha \cdot d_{hp}} \quad (5)$$

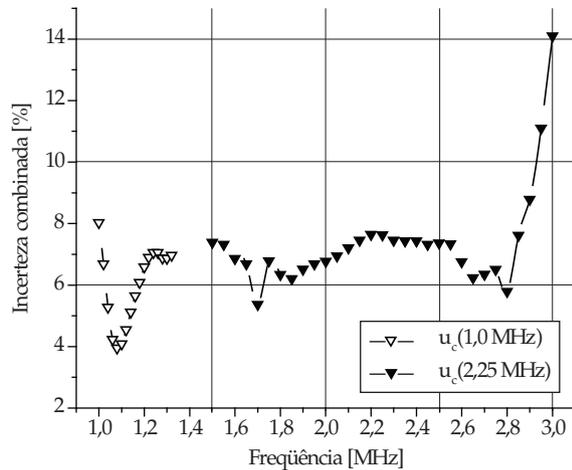


Figura 7. Incertezas combinadas típicas obtidas na implementação do método da auto-reciprocidade na calibração de transdutores ultra-sônicos no Laboratório de Ultra-Som do Inmetro (extraída de Oliveira, 2007). O gráfico foi obtido com a calibração de 2 transdutores, um com freqüência central nominal de 1,0 MHz e outro de 2,25 MHz. **Figure 7.** Typical combined uncertainty from the implementation of self-reciprocity method of ultrasonic transducers at Laboratory of Ultrasound of Inmetro (extracted from Oliveira, 2007). The graphic was assessed using two transducers, one with 1.0 MHz as central frequency and another with 2.25 MHz.

onde V_{pr} é a média temporal da tensão elétrica de pico gerada pelo hidrofone durante sua sensibilização e G_r é a condutância de radiação: $G_r = W/V_{rms}^2$, sendo W a potência do feixe, e V_{rms} o valor eficaz da tensão elétrica aplicada no transdutor, α é o coeficiente de atenuação do som na água e d_{hp} é a distância entre o hidrofone e o plano de varredura.

Segundo a norma IEC (1991a), as incertezas tipicamente obtidas calibrando hidrofones pelo método da varredura plana são de $\pm 6\%$ (0,5 dB) até 5 MHz e de $\pm 18\%$ (1,4 dB) entre 5 e 15 MHz.

Método da interferometria a laser

Técnicas que utilizam propriedades ópticas, como interferência e difração, têm sido empregadas com sucesso em diversas áreas da metrologia. Os métodos primários de calibração dimensional e de vibrações, por exemplo, utilizam interferometria óptica. Em ultra-som, interferômetros são utilizados para calibrar hidrofones, normalmente (mas não exclusivamente) hidrofones de membrana, já desde o princípio da década de 1980.

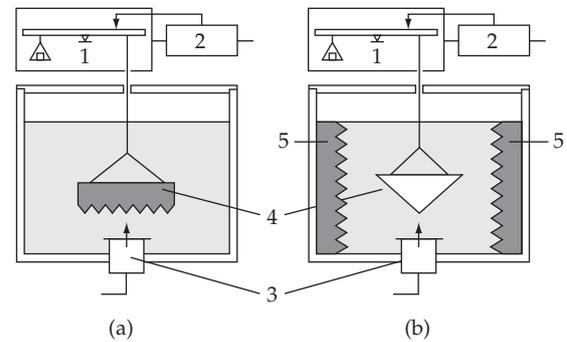


Figura 8. Esquema para medição de potência ultra-sônica, conforme apresentado em Beissner (1980). 1) balança; 2) controle da balança; 3) transdutor; 4) alvo; 5) absorvedor para evitar reflexões nas paredes do recipiente. Em a) o alvo utilizado é absorvedor, enquanto em b) utiliza-se um alvo refletor. **Figure 8.** Schematic layout for ultrasonic power determination, according to Beissner (1980). 1) scale; 2) scale control; 3) transducer; 4) target; 5) absorber to avoid reflections in the recipient walls. a) Absorber and b) reflective targets were used.

O princípio físico do interferômetro normalmente utilizado, o de Michelson, é o de geração de batimentos entre dois feixes de luz (*laser*) originados da mesma fonte, portanto feixes coerentes, mas que percorrem caminhos distintos. A Figura 9 apresenta um esquema de um interferômetro utilizado na calibração de hidrofones, segundo a montagem experimental do NPL. Percebe-se pela figura que o feixe é dividido em duas partes no espelho semitransparente (*beam splitter*). A porção da energia luminosa que atravessa o espelho em linha reta atinge uma película inserida no campo ultra-sônico, dentro do tanque com água. Essa película é especialmente construída para ser “acusticamente transparente”, por ter a mesma impedância acústica da água, e “ópticamente refletora” por ser revestida de um material espelhado. O feixe de luz refletido nessa película retorna ao *beam splitter*, assim como o feixe de luz que foi convencionalmente chamado de referência, ocorrendo então interferência entre ambos. A luz resultante é da mesma freqüência da luz original, mas com uma fase alterada, em função da diferença do percurso entre o feixe de referência e o que atingiu a película. Caso a película se movimente, a fase do feixe resultante da interferência irá variar proporcionalmente. A velocidade com que a fase varia é idêntica à velocidade com que a película se movimenta. Se a película for posta em movimento por um campo ultra-sônico originado de um transdutor exci-

tado por uma onda senoidal, a velocidade da variação da fase será idêntica à velocidade de deslocamento da partícula (considerando a amplitude de deslocamento da partícula muito menor do que o comprimento de onda do *laser*).

A partir da velocidade da partícula em um campo ultra-sônico é possível determinar a pressão, valendo a expressão $p = \rho_0 c_0 v_0$ (onde p é a pressão e v é a velocidade das partículas submetidas a uma onda ultra-sônica plana). Uma vez substituída a película pelo hidrofone que se pretende calibrar, e se o mesmo campo ultra-sônico for gerado na posição assumida pelo hidrofone, a tensão elétrica na saída do seu cabo pode ser diretamente utilizada para determinar a sensibilidade. A equação (6) formaliza as operações matemáticas para determinar a sensibilidade M , segundo:

$$M = \frac{V_{hid} V_0}{V_i} \cdot \frac{2\mu}{\rho c f_0 \lambda} \quad (6)$$

onde V_{hid} é a amplitude da tensão elétrica gerada pelo hidrofone durante sua sensibilização, V_0 é a amplitude da tensão elétrica de referência do interferômetro, V_i é a amplitude de tensão elétrica de saída do interferômetro devido ao deslocamento, sendo que $V_i = V_0 \cdot \text{sen}(4\pi\mu a/\lambda)$, onde a é o deslocamento da partícula no feixe ultra-sônico, medida na face da película; μ é o índice de refração do meio em que a película se encontra (água), f a frequência ultra-sônica e λ o comprimento de onda do feixe ótico. Para *laser*

He-Ne, $\lambda = 632,8$ nm.

Como no caso da Reciprocidade, a Interferometria a *laser* é um método absoluto. Como as incertezas de medição de deslocamento são muito baixas, a incerteza resultante na calibração de hidrofones com esse método é a menor possível entre os métodos disponíveis no momento. Por isso, esse método é considerado o padrão primário para a calibração de hidrofones. Incertezas típicas são de cerca $\pm 4\%$ (0,3 dB) até 15 MHz.

Uma outra aplicação bastante interessante desse método é a possibilidade de estender a faixa de frequência até 60 MHz, ou mesmo 70 MHz (Koch e Molkenstruck, 1999). Segundo o item 11 da norma IEC (2007b), o método pode ser utilizado para calibração de hidrofones até 40 MHz. As incertezas em Koch e Molkenstruck (1999) ficam em torno de $\pm 15\%$ (1,2 dB) até 70 MHz.

Como não poderia deixar de ser, o método apresenta um revés: o custo da infra-estrutura necessária. Um interferômetro de Michelson que opere nas faixas de frequências ultra-sônicas pode chegar a US\$ 75 mil, sem contar com os acessórios complementares, tais como tanque, sistemas de geração e aquisição de sinal, transdutores, etc. Talvez por esse motivo atualmente apenas 2 NMI possuam essa capacidade instalada: o PTB e o NPL.

Nos métodos descritos acima são utilizados em geral tons puros como sinais de excitação (metodo-

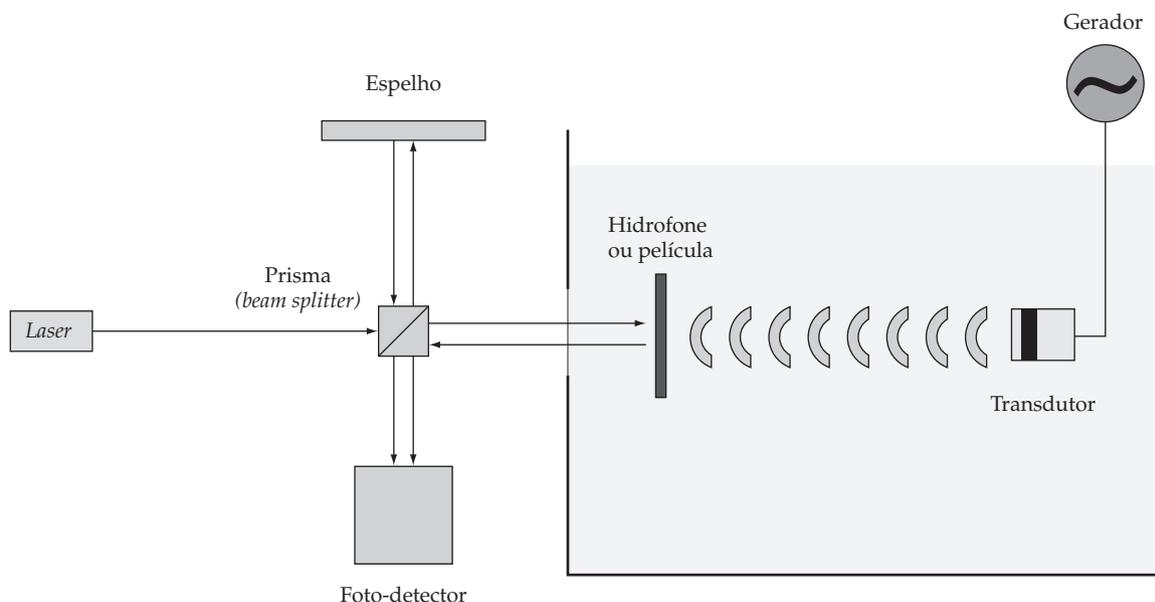


Figura 9. Desenho esquemático do interferômetro utilizado para calibração de hidrofones. **Figure 9.** Schematic diagram of the interferometer used for hydrophone calibration.

logia conhecida como *stepped sine*). Portanto, para se calibrar em uma banda larga de frequências, são necessárias várias medições, uma para cada frequência de interesse. Com os dois métodos descritos a seguir é possível realizar a calibração em diversas frequências com uma única medição. Com o emprego do TDS consegue-se calibrar em frequências contínuas, e com a Propagação Não Linear em frequências discretas, múltiplas da frequência fundamental (harmônicos superiores). A economia de tempo com o emprego desses 2 últimos métodos é notória.

Método do TDS (*time delay spectrometry*)

O TDS é um método empregado originalmente para determinar a Função de Transferência (FT) de alto-falantes, desenvolvida na segunda metade da década de 1960 (Heyser, 1967). Na ocasião o método teve boa aceitação por não precisar de transformada integral (passagem do domínio do tempo para domínio da frequência) para se obter o espectro da FT. A Transformada Rápida de Fourier (FFT sigla em inglês) tinha acabado de ser desenvolvida, mas os recursos computacionais de então ainda não facilitavam seu uso. Evitar transformar o sinal do tempo para frequência, o que é possível com o TDS, implicava em uma significativa economia de recursos computacionais. Mas, naturalmente, essa vantagem não se aplica mais hoje em dia, já que utilizar FFT é tão simples e rápido como a mais trivial das operações em um computador pessoal. Mesmo assim, o TDS tem sido utilizado desde a década de 1980 na calibração secundária de hidrofonos (Ludwig e Brendel, 1988; Pedersen *et al.*, 1988).

O método consiste em gerar uma varredura senoidal linear (*sweep* linear, ou *chirp*). O sinal deve ser conduzido pelo Sistema Linear Invariante no Tempo (SLIT) que se pretende determinar a resposta em frequência. O sinal resultante dessa operação é a varredura convoluída com a resposta impulsiva do SLIT, sendo que o sinal gerado terá um atraso devido ao caminho entre transmissor e receptor percorrido pelo sinal de ultra-som. A Figura 10 apresenta os sinais no tempo, isto é, a varredura linear e sinal resultante da convolução com uma resposta impulsiva hipotética (simulada) de um sistema, arbitrariamente projetada para ter espectro não uniforme.

Em seguida, o sinal obtido (convoluído) deve ser multiplicado pelo sinal original (varredura linear), sendo que o sinal original é atrasado um tempo igual (ou próximo) do atraso físico real do sinal convoluído. A multiplicação do sinal convoluído com o original

irá gerar a parte real da Resposta em Frequência (RF), e a multiplicação por um sinal defasado 90° do original, construído de forma idêntica, resultará na parte imaginária da RF. Com este artifício, as frequências instantâneas dos sinais multiplicados serão bem próximas, ou exatamente idênticas se o atraso imposto for igual ao atraso real. A multiplicação de dois senos com frequências próximas e mesma amplitude são dois cossenos, um com a frequência igual à diferença entre as frequências dos senos e o outro cuja frequência é a soma delas. A Figura 11 ilustra essa operação trigonométrica.

Em seguida, o TDS prevê que o sinal resultante da multiplicação seja filtrado para excluir os componentes de alta frequência. A frequência de corte deve ser superior à diferença entre duas frequências originais e, mais crítico, inferior à soma das frequências. Isso pode ser razoavelmente crítico para baixas frequências, já que a soma pode ser ainda bastante baixa e, em consequência, contaminar o sinal filtrado. A Figura 12 mostra o efeito de uma filtragem inadequada na curva do gráfico. Ela apresenta oscilações em baixa frequência que não podem ser evitadas no TDS.

Considerando que o método foi empregado com sucesso, o sinal após a filtragem “passa-baixa” terá seu eixo de tempo proporcional ao eixo de frequência, já que a variação da frequência do seno original com o tempo é conhecida, e a amplitude proporcional à RF do SLIT. No caso de calibração de hidrofonos, o SLIT é, na verdade, a soma das RF de todo o sistema

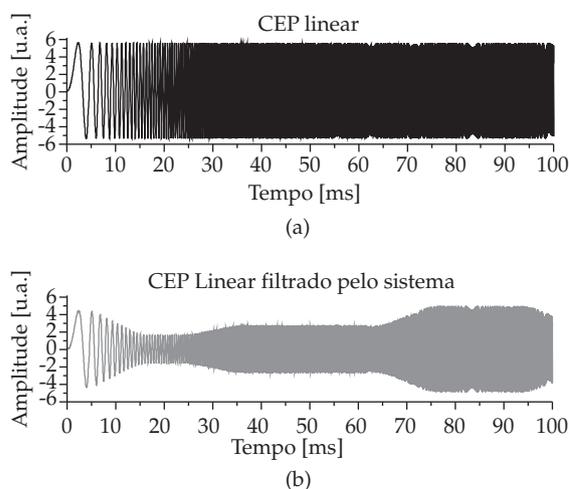


Figura 10. Sinais no domínio do tempo: a) Varredura linear; b) Sinal filtrado (convoluído) com a resposta impulsiva simulada de um sistema hipotético. **Figure 10.** Time domain signals: a) Linear chirp; b) Filtered signal (convolved) with the simulated impulse response of a hypothetical system.

(gerador, amplificador, cabos, transdutor, caminho acústico e sistema de aquisição do sinal). Na prática, as RF de todos esses componentes podem ser identificadas separadamente e compensadas na calibração do hidrofone.

Segundo a norma IEC (2001), as incertezas tipicamente obtidas calibrando hidrofones utilizando TDS são de $\pm 7\%$ (0,7 dB) até 5 MHz e de $\pm 14\%$ (1,1 dB) até 30 MHz.

Método da propagação não linear ou da geração de harmônicos

Um dos efeitos físicos bastante explorados da onda ultra-sônica é a geração de harmônicos (frequências múltiplas da fundamental) quando a propagação se dá em meio líquido. Isso acontece uma vez que as amplitudes das ondas ultra-sônicas na água (em tecidos biológicos também) são em geral grandes o suficiente para que efeitos não lineares tenham influência significativa na propagação da onda, não podendo ser desprezados teórica ou experimentalmente. Esse fenômeno acontece após a propagação por apenas alguns

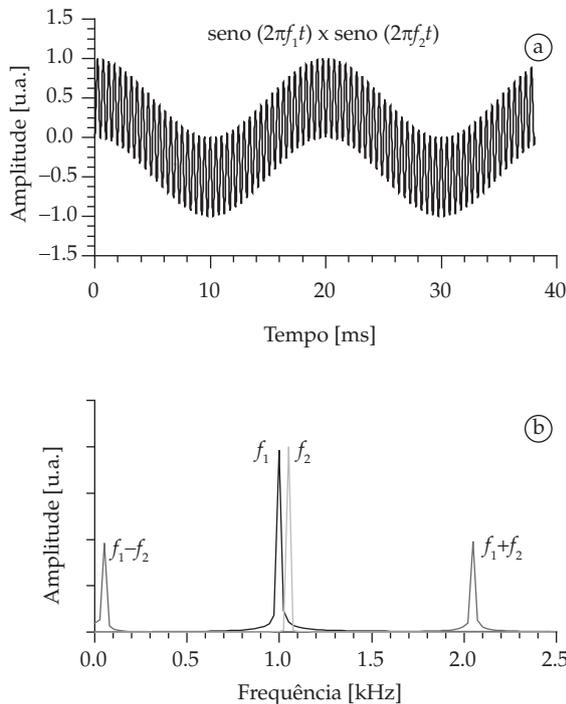


Figura 11. Resultado da multiplicação de dois senos: a) representação do sinal resultante no tempo; b) mesmo sinal representado em frequência. **Figure 11.** Product of two sines: a) signal represented in time domain; b) same signal in the frequency domain.

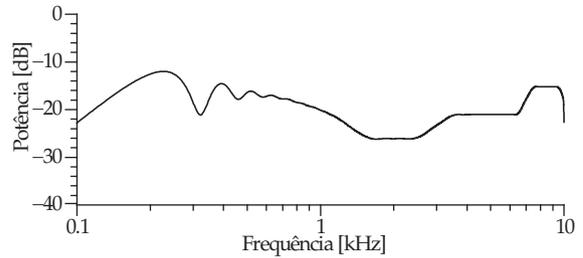


Figura 12. Simulação da obtenção da Resposta em Frequência de um sistema hipotético utilizando TDS. **Figure 12.** Simulation of a hypothetical system Frequency Response using TDS.

poucos comprimentos de onda, sendo mais evidente nas regiões após o foco do transdutor (Zeqiri e Bond, 1992). A não linearidade faz com que um trem de ondas contendo alguns ciclos de um seno perfeito (tom puro), rapidamente deforme seu perfil para uma onda tipo dente de serra, conforme ilustrado na Figura 13. A origem da observação desse fenômeno se deu no estudo da propagação do ultra-som em tecidos biológicos, sendo que a partir da década de 1980 o NPL investiu em pesquisa para desenvolver o método para calibrar hidrofones. Embora esse método fosse considerado para calibração até 40 MHz, conforme consta no Anexo E (informativo) da IEC (2001), a norma mais atual IEC (2007b) não o cita.

Originalmente, o espectro da onda exemplificada na figura 13 continha apenas energia na frequência fundamental da senóide, mas após parte da energia ser transferida para os componentes harmônicos, o espectro fica discretamente distribuído em uma banda mais larga. A banda final pode facilmente ter a largura de até 40 vezes a frequência fundamental (Smith e Bacon, 1990). Com isso, é possível emitir um único tom puro e sensibilizar o hidrofone com energia em até 40 harmônicos dessa frequência. A economia de tempo no emprego desse método é considerável. A Figura 14 mostra uma forma da onda real após a geração dos harmônicos, tanto no domínio do tempo quanto da frequência.

Em função da sua versatilidade, o método da Propagação Não Linear pode ser tanto utilizado em calibração absoluta de alta frequência (utilizando-se Interferometria a laser como método de calibração) quanto em calibrações por comparação (desde que se disponha de um hidrofone calibrado em altas frequências por um método absoluto, geralmente Interferometria).

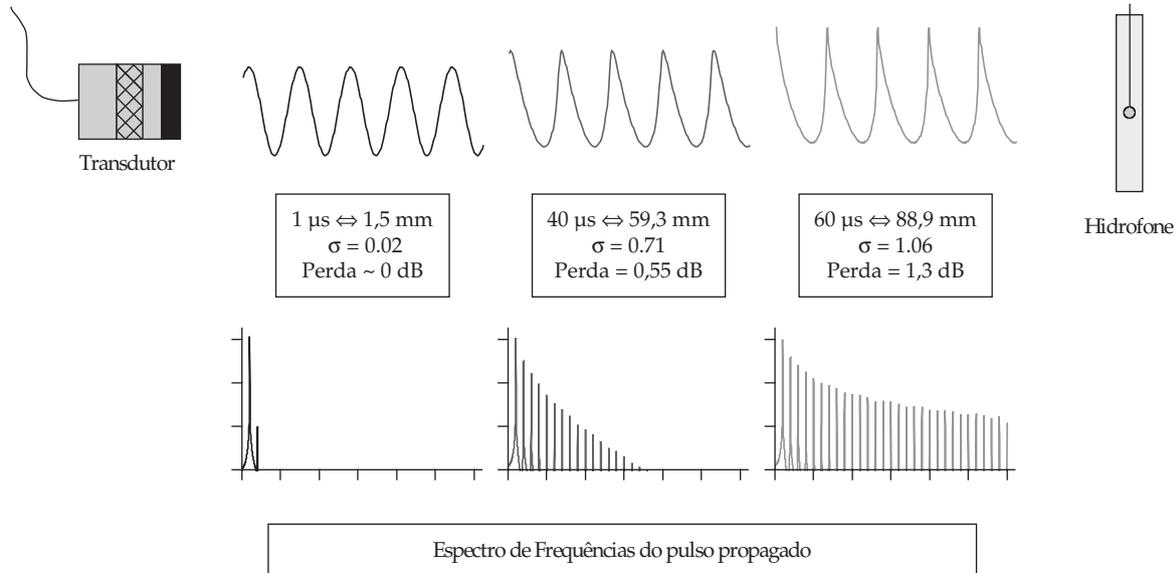


Figura 13. Ilustração do comportamento de uma onda ultra-sônica se propagando na água. A perda ilustrada é de energia da fundamental para formação dos harmônicos. O parâmetro σ diz respeito ao grau de distorção da onda, segundo a definição de Blackstock (1966) e Muir e Carstensen (1980). **Figure 13.** Illustration of an ultrasonic wave propagating in water. The energy loss disclosed is from the fundamental to the harmonics. Parameter σ concerns with the distortion grade of the ultrasonic wave, according to definition by Blackstock (1966) and Muir e Carstensen (1980).

Segundo Smith e Bacon (1990), as incertezas tipicamente obtidas calibrando hidrofonos utilizando o método da Propagação Não Linear são de $\pm 8\%$ (0,7 dB) até 15 MHz.

Considerações Finais

A Tabela 1 mostra um resumo das principais características dos métodos de calibração de hidrofone discutidas neste texto. Vale uma observação quanto às incertezas descritas nesta tabela: os dois primeiros métodos apresentados (Reciprocidade e Varredura Plana) trazem as maiores incertezas, mesmo se comparados com um método sabidamente suscetível a dificuldades experimentais na sua realização, o da Propagação Não Linear, conforme explicado no Anexo E da norma IEC (2001). Já os demais métodos (Interferometria e TDS) parecem ser bem mais precisos do que todos os outros. Embora isso possa ser verdade, não é possível garantir que as diferenças sejam tão expressivas quanto as apresentadas aqui. A explicação para isso é bastante simples. As fontes de onde foram obtidas as informações não foram sempre da mesma natureza. Com exceção do método da Propagação Não Linear, todos os demais estão normalizados na série IEC 62127, de agosto de 2007. As referências das quais foram extraídas as incertezas relatadas para os três últimos métodos são de artigos científicos. Em um artigo científico, em geral se relata a incerteza obtida

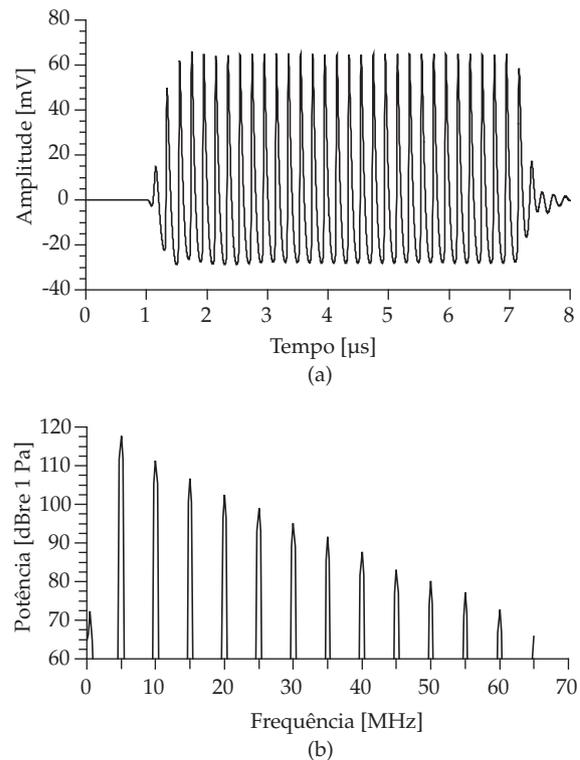


Figura 14. Onda ultra-sônica após a geração de harmônicos por propagação na água: a) forma de onda no tempo; b) espectro de frequência da onda representada em a). **Figure 14.** Ultrasonic wave after generation of harmonics due to non-linear propagation in water: a) time domain; b) frequency domain.

Tabela 1. Comparação entre os métodos de calibração de hidrofonos disponíveis nos principais NMI do mundo. **Table 1.** Comparison of hydrophone calibration methods available in the most important NMI in the world.

Método	Incerteza típica (95%)	Frequência máxima (usualmente praticada)	Método
Reciprocidade	± 19% (1,5 dB) até 15 MHz	15 MHz	Absoluto
Varredura Plana	± 6% (0,5 dB) até 5 MHz ± 18% (1,4 dB) até 15 MHz	15 MHz	Absoluto ou Comparação
Interferometria	± 4% (0,3 dB) até 15 MHz ± 15% (1,2 dB) até 70 MHz	60 MHz (PTB) 70 MHz (NPL)	Absoluto
TDS	± 7% (0,7 dB) até 5 MHz ± 14% (1,1 dB) até 30 MHz	40 MHz	Absoluto ou Comparação
Propagação Não Linear	± 8% (0,7 dB) até 15 MHz	40 MHz	Comparação

com o conjunto de equipamentos e a infra-estrutura disponível no laboratório que realizou a pesquisa. Já em uma norma internacional, o cuidado ao relatar uma incerteza é diferente, sendo necessário considerar, ou ao menos estimar, a influência na composição da incerteza que diversos tipos de configurações diferentes poderiam ter no resultado final, mesmo para um único procedimento experimental. Com isso, via de regra a incerteza relatada em uma norma é superestimada, ou seja, é a máxima incerteza que se espera encontrar caso o método seja seguido, independente da infra-estrutura e equipamentos disponíveis (desde que atendam aos pré-requisitos mínimos, geralmente descritos na norma). Na prática, para um determinado laboratório que domine a aplicação de um método específico, fatalmente a incerteza obtida será menor do que a mencionada na respectiva norma. Esse cuidado tem que ser tomado na análise das informações da Tabela 1.

Foram apresentados os principais métodos utilizados na calibração de hidrofonos. Seus aspectos metrológicos mais importantes, como incertezas e banda de frequências em que se aplicam, foram discutidos. Com esse documento, espera-se que os usuários brasileiros de metrologia na área de ultra-som, particularmente universidades e laboratórios secundários acreditados, possam escolher apropriadamente o método mais adequado às suas necessidades.

Vale ressaltar que, apesar dos métodos serem bem estabelecidos entre os laboratórios de metrologia, outros vêm se mostrando adequados ao desenvolvimento científico na área de calibração de hidrofonos. Apesar da evidenciada confiabilidade metrológica que as técnicas de calibração de hidrofonos dispõem, a ciência não pode se acomodar diante de um quadro aparentemente estável de conhecimento tecnológico, principalmente porque novas técnicas são constantemente desenvolvidas em outras áreas de conheci-

mento. Um exemplo que ilustra bem essa afirmação é o TDS, inicialmente desenvolvido para atender a uma demanda existente em acústica de salas e que foi adaptado com sucesso para faixas de frequências mais altas. Hoje em dia é um método que apresenta boa aceitação entre os laboratórios de calibração de hidrofone por permitir minimizar problemas de reflexão da onda ultra-sônica mesmo em tanques sem absorção adequada em suas paredes. A calibração por Interferometria a *laser* também foi derivada de estudos de outra área do conhecimento em metrologia, e tem uma gama de aplicações considerável. A busca por novas tecnologias deve ser permanente para garantir o aprimoramento do conhecimento científico e sua difusão. Por isso, novas metodologias para calibração de hidrofonos vêm sendo desenvolvidas ou aperfeiçoadas (Costa-Félix e Machado, 2003; Koch, 2003; Radulescu *et al.*, 2003).

O Laboratório de Ultra-som (Labus) do Inmetro é o responsável pela manutenção dos padrões nacionais em ultra-som, bem como da sua disseminação nacional. O Labus dispõe atualmente de 6 hidrofonos de agulha e 5 hidrofonos de membrana. Complementarmente, foi implementado no Labus o método da auto-reciprocidade para calibração absoluta de transdutores na faixa entre 1 e 3 MHz, com incertezas combinadas máximas em cerca de 9%. Está prevista a participação do Labus em uma comparação-chave em calibração de hidrofonos a iniciar-se em 2009, esperando-se que integre a lista de laboratórios com reconhecimento internacional. Para tanto, a faixa de frequências deve ser estendida para, pelo menos, 15 MHz, esforço ora em curso.

Agradecimentos

À CAPES, ao CNPq e ao PRONEX/FINEP pelo apoio financeiro, direto e indireto.

Referências

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007), In: www.abnt.org.br, acessado em 28/10/2007.
- Bacon, D.R. (1982), “Characteristics of a PVDF membrane hydrophone for use in the range 1-100 MHz”, *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, v. 29, n. 1, p. 18-25.
- Beissner, K. (1980), “Free-field reciprocity calibration in the transition range between near field and far field”, *Acustica*, v. 46, p. 162-167.
- Beissner, K. (1999), “Primary measurement of ultrasonic power and dissemination of ultrasonic power reference values by means of standard transducers”, *Metrologia*, v. 36, n. 4, p. 313-320.
- Bilaniuk, N., Wong, G.S.K. (1993), “Speed of sound in pure water as a function of temperature”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 93, n. 3, p. 1609-1612.
- Blackstock, D.T. (1966), “Connection between the Fay and Fubini solutions for plane sound waves of finite amplitude”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 39, n. 6, p. 1019-1026.
- Bobber, R.J. (1966), “General reciprocity parameter”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 39, n. 4, p. 680-687.
- Chivers, R.C., Lewin, P.A. (1982), “The voltage sensitivity of miniature piezoelectric plastic ultrasonic probes”, *Ultrasonics*, v. 20, n. 6, p. 279-281.
- Corbett III, S.S. (1988), “The influence of nonlinear fields on miniature hydrophones calibration using the planar scanning technique”, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, v. 35, n. 2, p. 162-167.
- Costa-Félix, R.B.P. (2005), *Aplicações metrológicas do ultra-som empregado em engenharia biomédica utilizando varredura de senos (chirps)*, Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Biomédica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 106 p.
- Costa-Félix, R.B.P., Azevedo, J.A. (2003), “O panorama nacional e perspectivas futuras em metrologia na área de ultra-som”, In: *Anais do III Congresso Brasileiro de Metrologia (Metrologia 2003)*, Recife, CD-ROM, artigo MA0280, p. 1-8, 01-05 Set.
- Costa-Félix, R.B.P., Machado, J.C. (2003), “Calibração de hidrofones utilizando sweeps”, In: *Anais do III Congresso Brasileiro de Metrologia (Metrologia 2003)*, Recife, CD-ROM, artigo MA0286, p. 1-5, 01-05 Set.
- Del Grosso, V.A., Mader, C.W. (1972), “Speed of sound in pure water”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 52, n. 5b, p. 1442-1446.
- Harris, G.R. (1982), “Sensitivity considerations for PVDF hydrophones using the spot-poled membrane design”, *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, v. 29, n. 6, p. 370-377.
- Herman, B.A., Harris, G.R. (1982), “Calibration of miniature ultrasonic receivers using a planar scanning technique”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 72, n. 5, p. 1357-1363.
- Heyser, R.C. (1967), “Acoustical measurements by time delay spectrometry”, *Journal of the Audio Engineering Society*, v. 15, n. 4, p. 370-382.
- IEC – International Electrotechnical Commission (1977), *Calibration of hydrophones*, IEC60565:1977, Geneva.
- IEC – International Electrotechnical Commission (1987), *Characteristics and calibration of hydrophones for operation in the frequency range 0.5 MHz to 15 MHz*, IEC60866:1987, Geneva.
- IEC – International Electrotechnical Commission (1991a), *Measurement and characterization of ultrasonic fields using hydrophones in the frequency range 0.5 MHz to 15 MHz*, IEC61102:1991, Geneva.
- IEC – International Electrotechnical Commission (1991b), *The absolute calibration of hydrophones using the planar scanning technique in the frequency range 0.5 MHz to 15 MHz*, IEC61101:1991, Geneva.
- IEC – International Electrotechnical Commission (1992), *Measurement microphones - Part 2: Primary method for pressure calibration of laboratory standard microphones by the reciprocity technique*, IEC61094:1992, Geneva.
- IEC – International Electrotechnical Commission (1995), *Measurement microphones - Part 3: Primary method for free-field calibration of laboratory standard microphones by the reciprocity technique*, IEC61094-3:1995, Geneva.
- IEC – International Electrotechnical Commission (2001), *Ultrasonics - Hydrophones - Characteristics and calibration in the frequency range from 15 MHz to 40 MHz*, IEC62092:2001, Geneva.
- IEC – International Electrotechnical Commission (2006a), *Ultrasonics – Power measurement – Radiation force balances and performance requirements*, IEC61161:2006, Geneva.
- IEC – International Electrotechnical Commission (2006b), *Underwater acoustics – Hydrophone calibration in the frequency range 0,01 Hz to 1 MHz*, IEC60565:2006, Geneva.
- IEC – International Electrotechnical Commission (2007a), *Ultrasonics – Hydrophones – Part 1: Measurement and characterization of medical ultrasonic fields up to 40 MHz*, IEC62127-1:2007, Geneva.
- IEC – International Electrotechnical Commission (2007b), *Ultrasonics – Hydrophones – Part 2: Calibration for ultrasonic fields up to 40 MHz*, IEC62127-2:2007, Geneva.
- IEC – International Electrotechnical Commission (2007c), *Ultrasonics – Hydrophones – Part 3: Properties of hydrophones for ultrasonic fields up to 40 MHz*, IEC62127-3:2007, Geneva.
- IEC – (2007d), *International Electrotechnical Commission*, In: www.iec.ch, acessado em 13/11/2007.
- Inmetro – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (2007), In: www.inmetro.gov.br, acessado em 30/07/2007.
- Inmetro, SENAI (2000), “Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia”, Eds.: Inmetro e SENAI, 2ª ed., Brasília, SENAI/DN, 75 p.
- Koch, C. (2003), “Amplitude and phase calibration of hydrophones by heterodyne and using time-gated time-delay spectrometry”, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, v. 50, n. 3, p. 344-348.
- Koch, C., Molkenstruck, W. (1999), “Primary calibration of hydrophones with extended frequency range 1 to 70 MHz using optical interferometry”, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, v. 46, n. 5, p. 1303-1314.

- Lewin, P.A., Chivers, R.C. (1983), "Voltage sensitivity of miniature ultrasonic probes", *Ultrasonics*, v. 21, n. 6, p. 282-283.
- Ludwig, G., Brendel, K. (1988), "Calibration of hydrophones based in reciprocity and time delay spectrometry", *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, v. 35, n. 2, p. 168-174.
- Muir, T.G., Carstensen, E.L. (1980), "Predictions of nonlinear acoustics effects at biomedical frequencies and intensities", *Ultrasound in Medicine and Biology*, v. 6, n. 4, p. 345-357.
- NPL – National Physical Laboratory (2007), In: www.npl.co.uk, acessado em 30/07/2007.
- Oliveira, E.G. (2007), *Validação de um sistema de calibração de transdutores de ultra-som por auto-reciprocidade*, Dissertação de Mestrado, CEFET-RJ, Rio de Janeiro, 82 p.
- PA – Precision Acoustics Ltd. (2007), In: www.acoustics.co.uk, acessado em 27/08/2007.
- Pedersen, P.C., Lewin, P.A., Bjorno, L. (1988), "Application of time delay spectrometry for calibration of ultrasonic transducers", *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, v. 35, n. 2, p. 185-205.
- PTB – Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (2007), In: www.ptb.de, acessado em 30/07/2007.
- Radulescu, E.G., Lewin, P.A., Wójcik, J., Nowicki, A. (2003), "Calibration of ultrasonic hydrophone probes up to 100 MHz using time gating frequency analysis and finite amplitude waves", *Ultrasonics*, v. 41, n. 4, p. 247-254.
- Reid, J.M. (1974), "Self-reciprocity calibration of echoranging transducers", *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 55, n. 4, p. 862-868.
- Smith, R.A., Bacon, D.R. (1990), "A multiple-frequency hydrophone calibration technique", *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 87, n. 5, p. 2231-2243.
- Wilkens, V. (2002), "Characterization of an optical multilayer hydrophone for use as broadband ultrasound reference receiver – Comparison with PVDF membrane hydrophones", In: *Proceedings of the 2002 IEEE International Ultrasonics Symposium*, Munique, CD-ROM, p. 752-755, 08-11 Oct.
- Zeqiri, B., Bond, A.D. (1992), "The influence of waveform distortion on hydrophone spatial-averaging corrections – Theory and measurement", *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 92, n. 4, p. 1809-1821.