



CALIBRAÇÃO DA SENSIBILIDADE, EM MÓDULO E FASE, DE HIDROFONES  
ULTRASSÔNICOS NA FAIXA DE 1 A 7 MHz PELO MÉTODO DA  
RECIPROCIDADE

Everande Gobira de Oliveira

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Biomédica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Biomédica.

Orientador(es): João Carlos Machado

Rodrigo Pereira Barretto da

Costa-Félix

Rio de Janeiro  
Dezembro de 2014

CALIBRAÇÃO DA SENSIBILIDADE, EM MÓDULO E FASE, DE HIDROFONES  
ULTRASSÔNICOS NA FAIXA DE 1 A 7 MHz PELO MÉTODO DA  
RECIPROCIDADE

Everande Gobira de Oliveira

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ  
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA BIOMÉDICA.

Examinada por:

---

Prof. João Carlos Machado, Ph.D.

---

Prof. Rodrigo Pereira Barretto da Costa-Félix, D.Sc.

---

Prof. Roberto Macoto Ichinose, D.Sc.

---

Prof. Julio Cezar Adamowski, D.Sc.

---

Prof. Carlos Roberto Hall Barbosa, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 2014

Oliveira, Everande Gobira de

Calibração da Sensibilidade, em Módulo e Fase, de Hidrofones Ultrassônicos na Faixa de 1 a 7 MHz pelo Método da Reciprocidade / Everande Gobira de Oliveira.

– Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2014.

XI, 97 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: João Carlos Machado

Rodrigo Pereira Barretto da Costa-Félix

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Biomédica, 2014.

Referências Bibliográficas: p. 91-97.

1. Ultrassom. 2. Transdutor. 3. Hidrofone. 4. Reciprocidade. 5. Fase. 6. Calibração. I Machado, João Carlos *et al.*. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Biomédica. III. Título.

Agradeço ao CNPq pelo apoio financeiro fornecido para a estruturação do Laboratório de Ultrassom do Inmetro-LABUS. Agradeço ao atual chefe da Divisão de Acústica Vibrações e Ultrassom do Inmetro, Gilmar Machado Ximenes, pelo apoio logístico destinado à implantação do LABUS. Agradeço ao orientador, professor João Carlos Machado, pelo empenho e orientação em prol da execução deste trabalho. Agradeço ao chefe do labus, Rodrigo Pereira Barretto da Costa-Félix, pelo apoio técnico-científico e orientação para a execução do trabalho.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

CALIBRAÇÃO DA SENSIBILIDADE, EM MÓDULO E FASE, DE HIDROFONES  
ULTRASSÔNICOS NA FAIXA DE 1 A 7 MHz PELO MÉTODO DA  
RECIPROCIDADE

Everande Gobira de Oliveira

Dezembro/2014

Orientadores: João Carlos Machado

Rodrigo Pereira Barretto da Costa-Félix

Programa: Engenharia Biomédica

Esta tese desenvolve um modelo experimental de calibração de hidrofones na faixa de frequência ultrassônica de 1 MHz a 7 MHz, em passo de 1,0 MHz. O procedimento de calibração proposto baseia-se no princípio da reciprocidade, especificamente usando o método de calibração por reciprocidade utilizando dois transdutores. Inicialmente, a função de transferência de um transdutor auxiliar é determinada pelo princípio da reciprocidade, utilizando um cilindro de aço inoxidável como alvo refletor. Em seguida, o hidrofone a ser calibrado é colocado na mesma posição do campo ultrassônico em que a pressão acústica fora previamente determinada. A pressão ultrassônica calculada na face do hidrofone em conjunto com a sua tensão de saída medida conduz a sua sensibilidade calibrada. A metodologia foi desenvolvida no Laboratório de Ultrassom do Inmetro para avaliar a sensibilidade de hidrofones em módulo e fase. O procedimento de calibração foi testado com dois hidrofones de membrana similares. Os resultados da calibração da sensibilidade em módulo, para o nível de confiança de 95%, são compatíveis com o resultado da calibração do mesmo hidrofone realizada pelo NPL (National Physical Laboratory). A fase da sensibilidade medida em 5,0 MHz com dois hidrofones e utilizando dois transdutores auxiliares distintos não apresentou diferença significativa dos resultados de medição. A incerteza expandida de medição variou entre 6,7% e 7,0% para o módulo da sensibilidade e para a fase da sensibilidade variou entre 6° e 13°.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

CALIBRATION IN MAGNITUDE AND PHASE OF ULTRASOUND  
HYDROPHONE SENSITIVITY IN THE RANGE 1 TO 7 MHz BY THE  
RECIPROCITY METHOD

Everande Gobira de Oliveira

December/2014

Advisors: João Carlos Machado

Rodrigo Pereira Barretto da Costa-Félix

Department: Biomedical Engineering

This thesis develops an experimental model calibration of hydrophones in ultrasonic frequency range 1 MHz to 7 MHz, in steps of 1.0 MHz. The calibration procedure proposed is based on the principle of reciprocity, specifically using the calibration method by reciprocity using two transducers. The method is based on the technique of reciprocity. Initially, the transfer function of an auxiliary transducer is determined by self-reciprocity using a stainless steel cylinder as reflector target. Then, the hydrophone to be calibrated is placed at the same position in which the sound pressure was previously determined. Ultrasonic pressure calculated on the hydrophone's face together with its output voltage leads to input sensitivity calibrated. The methodology developed in the Ultrasound Laboratory of Inmetro to assess the sensitivity of hydrophones in magnitude and phase. The method was tested with two similar membrane hydrophones. Results for magnitude sensitivity agree, within a confidence level of 95%, with those from previous calibration of same hydrophones at the National Physical Laboratory, in the UK. The phase sensitivities measured at 5.0 MHz for two similar hydrophones and employing two distinct auxiliary transducers presented no significant difference between the measurement results. The method yielded a relative expanded uncertainty for the sensitivity magnitude ranging between 6.7% and 7.0%, and ranging between 6° and 13° for the phase sensitivity.

## SUMÁRIO

1. Introdução	1
2. Revisão Bibliográfica	4
2.1. Hidrofone	6
2.2. Calibração de Hidrofones	9
2.3. Hidrofone como Padrão de Medição Primário	10
2.3.1. Método da Varredura Plana	10
2.3.2. Método Interferométrico	13
2.3.3. Método da Reciprocidade	16
2.4. Hidrofone como Padrão de Medição Secundário	20
2.4.1. Método TDS (Time Delay Spectrometry)	20
2.5. Calibração da Fase da Sensibilidade de Hidrofones	22
2.5.1. Hidrofone Óptico Multicamadas	24
2.5.2. Propagação Não Linear	27
3. Fundamentos Teóricos	29
3.1. Sensibilidade do Hidrofone	29
3.2. Considerações Sobre $ M_h $ e $\angle M_h$ do Hidrofone	32
3.2.1. Raio Efetivo do Transdutor	32
3.2.2. Termo da Difração $DS_{it}$ na Expressão de $T_t$	32
3.2.3. Análise do Coeficiente de Reflexão, $R$ , na Expressão de $T_t$	34
3.2.4. Análise do Termo $e^{-ik2d_1}$ na Expressão de $\angle T_t$	35
3.2.5. Expressão Final para a Fase da Função de Transferência do Transdutor $\angle T_t$	36
3.2.6. Análise do Termo $DS_{ih}$ na Expressão de $M_h$	37
3.2.7. Análise do Termo $e^{-jkd_1}$ na Expressão da Fase $\angle M_h$ do Hidrofone	38
3.3. Incerteza de Medição	39
3.3.1. Incerteza de Medição do Cálculo da Sensibilidade do Hidrofone	40
3.4. Erro Normalizado	42
4. Metodologia de Testes e Materiais	43
4.1. Arranjo Experimental de Medição	43
4.2. Protocolo para Montagem do Sistema de Medição	47
4.2.1. Verificação Periódica do Conjunto Gerador e Osciloscópio	53

4.2.1.1. Verificação Periódica do Parâmetro “Amplitude de Tensão Elétrica”	54
4.2.1.2. Verificação Periódica do Parâmetro “Frequência”	55
4.2.2. Alinhamento entre Transdutor e Alvo Refletor	57
4.2.3. Alinhamento entre Transdutor e Hidrofone	58
4.3. Transdutor, Hidrofone e Alvo Refletor Posicionados	60
4.4. Componentes de Incerteza do Tipo B do Módulo da Sensibilidade do Hidrofone	63
4.4.1. Contribuição de Incerteza Devida à Tensão do Hidrofone $V_h$	63
4.4.2. Contribuição de Incerteza Devida à Tensão de Excitação $V$	63
4.4.3. Contribuição de Incerteza Devida à Difração Transdutor Auxiliar Hidrofone $DS_{th}$	64
4.4.4. Contribuição de Incerteza Devida à Distância Transdutor Auxiliar – Hidrofone $d_1$	64
4.4.5. Contribuição de Incerteza Devida à Frequência $f$	65
4.4.6. Contribuição de Incerteza Devida à Densidade da Água $\rho_0$	65
4.4.7. Contribuição de Incerteza Devida à Tensão de Eco $V_{open}^*$	65
4.4.8. Contribuição de Incerteza Devida à Tensão de Curto-Circuito $V_k$	65
4.4.9. Contribuição de Incerteza Devida à Impedância $Z_k$	66
4.4.10. Contribuição de Incerteza Devida à Velocidade de Propagação $c_0$	66
4.4.11. Contribuição de Incerteza Relacionada à Difração do Transdutor Auxiliar $DS_{tt}$	66
4.4.12. Contribuição de Incerteza Devida ao Coeficiente de Reflexão $R$	67
4.4.13. Contribuição de Incerteza Devida ao Raio Efetivo $a$	67
4.5. Componentes de Incerteza do Tipo A do Módulo da Sensibilidade do Hidrofone	67
4.6. Incerteza de Medição do Módulo da Sensibilidade	68
4.7. Componentes de Incerteza do Tipo B da Fase da Sensibilidade do Hidrofone	68
4.7.1. Contribuição de Incerteza Devida à Fase da Tensão do Hidrofone $\angle V_h$	68
4.7.2. Contribuição de Incerteza Devida à Fase da Tensão de Eco $\angle V_{open}^*$	69
4.7.3. Contribuição de Incerteza Devida à Fase da Impedância $\angle Z$	69



4.7.4. Contribuição de Incerteza Devida à Fase de $\angle \frac{I_k}{I}$	70
4.7.5. Contribuição de Incerteza Devida à Velocidade do Ultrassom na Água $c_0$	70
4.7.6. Contribuição de Incerteza Devida ao Raio Efetivo $a$	70
4.7.7. Contribuição de Incerteza Devida à Distância $d_I$	70
4.7.8. Contribuição de Incerteza Devida à Frequência $f$	71
4.7.9. Contribuição de Incerteza devida ao Ruído de Medição do Sistema	71
4.8. Componentes de Incerteza do Tipo A da Fase da Sensibilidade do Hidrofone	72
4.9. Incerteza de Medição da Fase da Sensibilidade	72
4.9.1. Incerteza de Medição Sem Um Valor de Referência	72
4.10. Deriva da Calibração do Módulo da Sensibilidade Realizada pelo NPL	75
4.10.1. Deriva e Projeção do Módulo da Sensibilidade	75
5. Resultados Experimentais	77
5.1. Calibração do Módulo da Sensibilidade	77
5.1.1. Planilha de Incerteza para o Módulo da Sensibilidade	77
5.1.2. Resultado da Calibração para o Módulo da Sensibilidade	80
5.2. Calibração da Fase da Sensibilidade	82
5.2.1. Planilha de Incerteza para a Fase da Sensibilidade	83
5.2.2. Resultado da Calibração para a Fase da Sensibilidade	85
6. Discussão e Conclusão	88
Referências Bibliográficas	91

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Desenho esquemático de um hidrofone tipo agulha	6
Figura 2.2- Hidrofone de agulha	7
Figura 2.3 - Hidrofone de membrana	8
Figura 2.4 - Conjunto com hidrofone de membrana	9
Figura 2.5 - Balança de potência ultrassônica	11
Figura 2.6 - Esquema de um sistema interferométrico	14
Figura 2.7 - Desenho esquemático da calibração de hidrofones por reciprocidade	18
Figura 2.8 - Desenho esquemático de um sistema TDS	21
Figura 2.9 - Sensor óptico multicamadas	25
Figura 2.10 - Calibração por comparação utilizando um sensor óptico multicamadas	26
Figura 3.1 - Diagrama do arranjo de medição do sistema pulso eco	30
Figura 3.2 - Forma de onda normalizada com relação ao pico	36
Figure 4.1 - Diagrama do arranjo experimental usado	44
Figura 4.2 - Esboço do sistema de calibração por reciprocidade	49
Figura 4.3: Arranjo experimental de medição	60
Figura 4.4 - Vista superior do sistema de medição	61
Figura 4.5 - Sinais <i>janelados</i> no tempo	62
Figura 4.6 - Sinais <i>janelados</i> no tempo para a determinação do ângulo de fase	62
Figura 4.7 - Incerteza devida ao ruído de medição do sistema	71
Figura 5.1 - Módulo da contribuição de incerteza para o módulo da sensibilidade	79
Figura 5.2 - Resultado da calibração para o módulo da sensibilidade para o hidrofone UC 1604-029	81
Figura 5.3 - Resultado da calibração para o módulo da sensibilidade para o hidrofone UC 1604-068	82
Figura 5.4 - Módulo da contribuição de incerteza para a fase da sensibilidade	84

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Verificação do parâmetro amplitude de tensão elétrica	54
Tabela 4.2 - Verificação do parâmetro frequência	55
Tabela 4.3 - Planilha verificação periódica	56
Tabela 4.4 - Tensão de alinhamento transdutor auxiliar – alvo refletor	58
Tabela 4.5 - Tensão de alinhamento transdutor auxiliar – hidrofone	59
Tabela 5.1 - Planilha de incerteza do módulo da sensibilidade para o hidrofone UC 1604-029 em 5,0 MHz	78
Tabela 5.2 - Resultado da calibração para o módulo da sensibilidade para o hidrofone UC 1604-029	80
Tabela 5.3 - Resultado da calibração do módulo da sensibilidade para o hidrofone UC 1604-068	81
Tabela 5.4 - Planilha de incerteza para a fase da sensibilidade para o hidrofone UC 1604-029 em 5,0 MHz	83
Tabela 5.5 - Resultado da calibração da fase da sensibilidade dos hidrofones UC 1604-029 e UC 1604-068	85
Tabela 5.6 - Incerteza combinada de medição da fase em 5,0 MHz para os hidrofones UC 1604-029 e UC 1604-068.	86
Tabela 5.7 - Nomenclatura de resultados para incerteza combinada de medição da fase em 5,0 MHz para os hidrofones UC 1604-029 e UC 1604-068	86
Tabela 5.8 - Resultado da estatística qui-quadrado para a calibração da fase	86

## 1- Introdução

O hidrofone é parte importante da instrumentação de ultrassom, pois com a sua calibração é possível medir a onda de pressão do sinal de ultrassom. O ponto fundamental é a leitura do sinal elétrico na saída do hidrofone, o qual se relaciona com a onda de pressão incidente em sua face.

O conhecimento da componente de fase da sensibilidade de um hidrofone em um sistema de medição é importante para caracterizar a forma de onda dos sinais de ultrassom na área biomédica. Caso não seja feita uma medição correta, neste caso apropriadamente módulo e fase, não será possível saber qual a quantidade da grandeza física que de fato foi aplicada ao sistema biológico.

Embora as técnicas de calibração de hidrofones já sejam dominadas por diversos laboratórios de calibração, a sensibilidade é obtida, normalmente, em termos de seu valor absoluto para uma determinada faixa estreita de frequências. A relação de fase entre a onda incidente na face do hidrofone e o sinal elétrico em sua saída é ignorada e isto se torna um fator limitante para a calibração de hidrofones de ultrassom.

Assim o objetivo desta tese é estudar e desenvolver um método de calibração de hidrofones que determine a sua sensibilidade em módulo e fase utilizando um procedimento de medição primário. A calibração é realizada empregando um método de medição baseado no princípio da reciprocidade.

Um procedimento de medição primário, em conformidade com o Vocabulário Internacional de Metrologia – Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados – VIM 2012 [1], “é um procedimento de medição de referência utilizado para obter um resultado de medição sem relação com um padrão duma grandeza de mesma natureza”.

A calibração do módulo e principalmente da fase da sensibilidade utilizando o procedimento de medição da reciprocidade ainda é um desafio técnico-científico não

resolvido internacionalmente quanto à normalização, pois a norma atualizada [2] sobre o assunto não descreve a calibração da fase da sensibilidade de hidrofones utilizando o procedimento de medição por reciprocidade com dois transdutores.

O estudo e implementação da técnica baseou-se em realizações experimentais, procurando comparar, quando aplicável, procedimentos de calibração praticados com a técnica desenvolvida. A calibração da sensibilidade, em módulo, do hidrofone foi validada, para o nível de confiança de 95%, pela comparação dos resultados da calibração com os valores obtidos de sensibilidade calibrada em módulo declarada pelo NPL - National Physical Laboratory, que é o Instituto Nacional de Metrologia (INM) do Reino Unido. A calibração da fase da sensibilidade foi validada pela referência dos valores de fase obtidos, comparados com a fase obtida de outro hidrofone de membrana com as mesmas características construtivas para o nível de confiança de 95%.

No capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica, no qual foram estabelecidos os procedimentos de medição aplicáveis à calibração de hidrofones em módulo e fase, assim como a normalização aplicável à técnica de calibração. No capítulo 3 é apresentada a fundamentação teórica que suporta todo o desenvolvimento experimental abordado. Neste capítulo são estabelecidos os princípios teóricos, conforme embasamento descrito em literatura internacional, e a realização experimental desenvolvida no Inmetro. A determinação da função de transferência do transdutor de emissão utilizado no sistema de calibração implantado é explicitada, como passo intermediário para obtenção da função de transferência da sensibilidade do hidrofone em módulo e fase. No capítulo 4 são apresentados os materiais e métodos utilizados no procedimento de calibração, incluindo a avaliação da incerteza de fase do procedimento de medição desenvolvido, fato que o torna inédito. O capítulo 5 reúne os resultados

experimentais que validam a implementação do método. O capítulo 6 mostra a discussão e conclusão sobre o trabalho desenvolvido.

## **2- Revisão Bibliográfica**

A calibração, em conformidade com o VIM 2012 [1], é uma “Operação que estabelece, sob condições especificadas, numa primeira etapa, uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas; numa segunda etapa, utiliza esta informação para estabelecer uma relação visando a obtenção dum resultado de medição a partir duma indicação”. De outra forma, é um processo que visa determinar a relação existente entre o valor de um mensurando fornecido por um instrumento de medição e o valor verdadeiro do mensurando. No caso de um hidrofone, significa especificar como é feita a conversão da pressão do sinal ultrassônico incidente em seu elemento ativo em tensão elétrica de saída.

O valor de um mensurando é obtido através da calibração, que em termo nacional é realizada por um Instituto Nacional de Metrologia (INM). Com a calibração é possível comparar os resultados de medição com valores especificados por normas ou valores declarados para a grandeza, obtidos por calibração em outro Instituto Nacional de Metrologia, por exemplo.

Em metrologia a incerteza de medição [1] é um “Parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas”, que objetivamente torna melhor o procedimento de medição à razão direta da sua diminuição em valores absolutos. O custo do sistema de medição é um parâmetro importante para avaliação da incerteza, pois em linhas gerais mais caro será o equipamento de medição à razão direta da diminuição da sua incerteza de medição. Neste cenário a relação entre custo e benefício é um parâmetro a ser avaliado na montagem de um sistema de medição. Para um INM a calibração de um padrão primário de medição naturalmente deve incorporar instrumental e equipamentos de

medição compatíveis com níveis reduzidos de incerteza, o que certamente não se justificaria para um laboratório secundário ou em um ambiente fabril, onde o tempo de produção é por vezes mais importante do que a excelência de medição de um determinado mensurando presente na cadeia produtiva.

Um INM tem como principais atribuições a manutenção dos padrões metrológicos nacionais e o provimento da cadeia de rastreabilidade metrológica [1], que é a “sequência de padrões e calibrações utilizada para relacionar um resultado de medição a uma referência”, ou seja, garantir que o mensurando medido por uma segunda parte tenha uma cadeia contínua e ininterrupta de medição. No caso específico da calibração de hidrofones em módulo da sua sensibilidade, os resultados podem ser comparados em uma base de comparação [3] ampla, pois os princípios teóricos aplicados datam da década de 1950 [4].

A calibração da sensibilidade de hidrofones em módulo e fase teve o primeiro esforço de normalização [2] em 2013, mostrando quão recente é a determinação da sensibilidade do hidrofone em módulo e fase, sendo que nesta norma está mencionada a base normativa do princípio da reciprocidade para calibração do módulo da sensibilidade de hidrofones. O Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia - Inmetro, o INM do Brasil, direcionou esforços para desenvolver um procedimento de calibração de hidrofones através do levantamento do módulo e fase da sua sensibilidade, sendo esta diretriz importante e absolutamente atualizada e coerente com a normalização vigente [2]. Fato ainda mais importante é que a norma aplicável [2], não mostra o desenvolvimento da técnica aqui apresentada para a determinação da fase da sensibilidade do hidrofone utilizando o método de calibração da reciprocidade com dois transdutores, tornando assim este tema de pesquisa atual e inédito.



## 2.1- Hidrofone

O hidrofone é um transdutor para ser utilizado em meio aquático, que converte a pressão do sinal de ultrassom incidente em sua face em tensão elétrica [5,6]. Para realizar esta transdução o elemento sensor do hidrofone é construído com o polímero poly(vinylidene fluoride) – PVDF [7], existindo inclusive a possibilidade de hidrofones que utilizem princípios ópticos [8-10]. O parâmetro que caracteriza a conversão da forma de energia mecânica em elétrica é a sensibilidade de recepção [11,12].

Dois tipos de hidrofones são utilizados atualmente: o de agulha e o de membrana.

Os hidrofones de agulha [13] são compostos de uma abertura em um tubo de metal, sendo revestidos em uma das extremidades pelo elemento transdutor de energia.

A figura 2.1 é a representação esquemática de um hidrofone de agulha, onde o elemento sensível é apoiado no tubo de aço inoxidável.

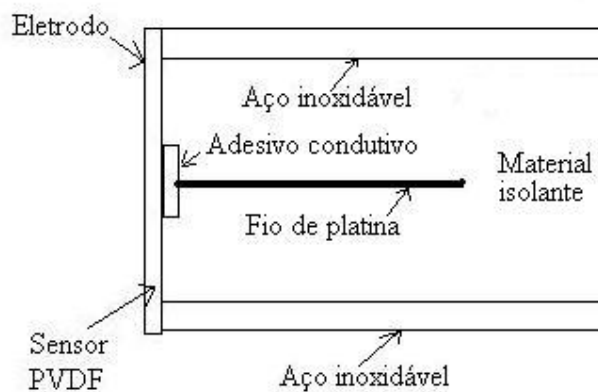


Figura 2.1 – Desenho esquemático de um hidrofone tipo agulha.

Uma montagem típica para um sistema de medição com hidrofone de agulha consiste da conexão do elemento sensor contido na agulha a um pré-amplificador submersível (8 dB de ganho), conectado a um acoplador CC para alimentação do pré-amplificador do hidrofone de agulha e opcionalmente conectado a um *Booster Amplifier* para aumentar o ganho de sinal (25 dB) [14]. A figura 2.2 mostra em detalhe as

conexões: hidrofone de agulha, amplificador submersível, acoplador CC e *Booster Amplifier*.

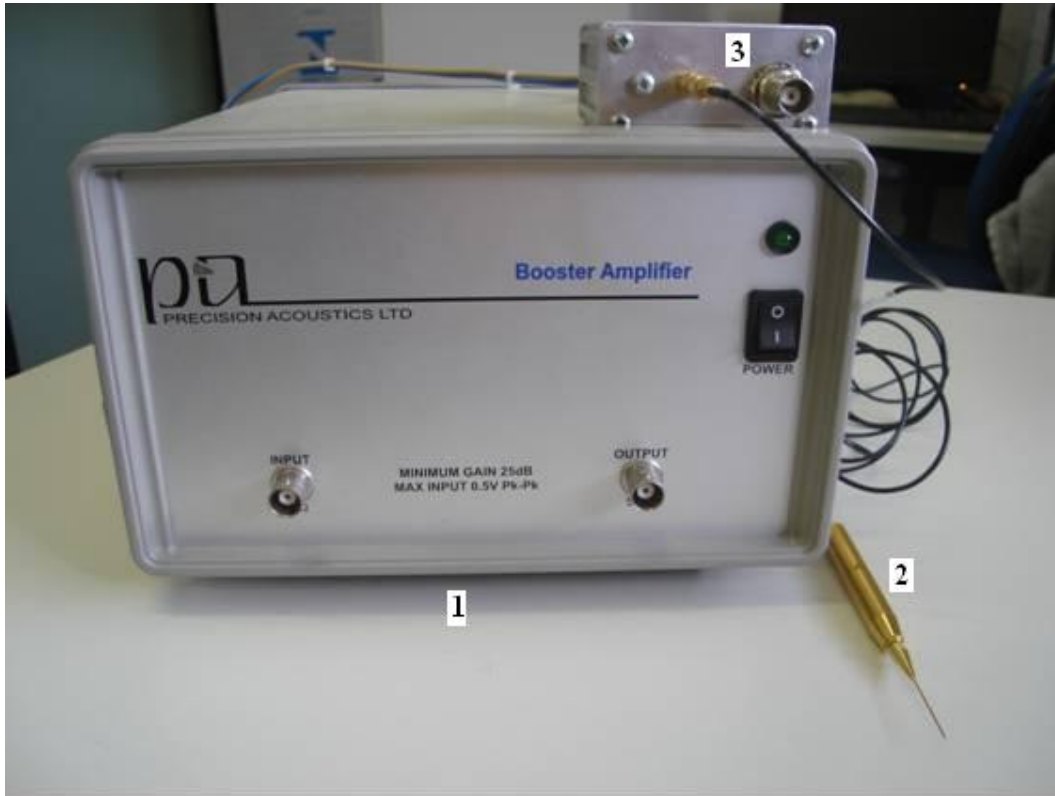


Figura 2.2 – Hidrofone de agulha (Precision Acoustics; Dorchester Dorset UK) utilizado no Inmetro: 1 – Booster Amplifier, 2- Hidrofone de agulha com pré-amplificador. 3- Acoplador CC.

Este hidrofone tem como característica importante a variação da sensibilidade de recepção ao longo do tempo, gerando impacto em sua rastreabilidade, onerando assim o sistema de medição ao longo do tempo [15].

O hidrofone de membrana apresenta melhor estabilidade ao longo do tempo quando comparado ao hidrofone de agulha [16] e é utilizado como padrão ouro nos INM's devido à sua resposta plana em frequência [17]. No entanto, o custo de aquisição

do hidrofone pode chegar a US\$ 10.000 [18]. O hidrofone de membrana, em camada única, é composto por uma camada de Fluoreto de Polivinilideno – PVDF com a região central do filme sensível a variações de pressão [19]. A figura 2.3 mostra os elementos construtivos de um hidrofone de membrana com elemento ativo de 1,0 mm de diâmetro. A figura 2.4 mostra um conjunto com hidrofone de membrana com elemento ativo de 0,4 mm e um *Signal Compensator* cuja função é reduzir o ruído e amplificar o sinal proveniente do hidrofone de membrana [20].

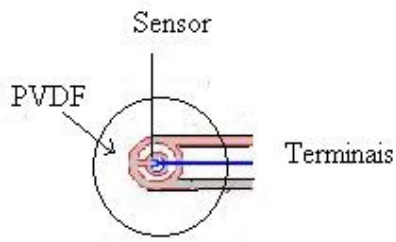


Figura 2.3 – Hidrofone de membrana

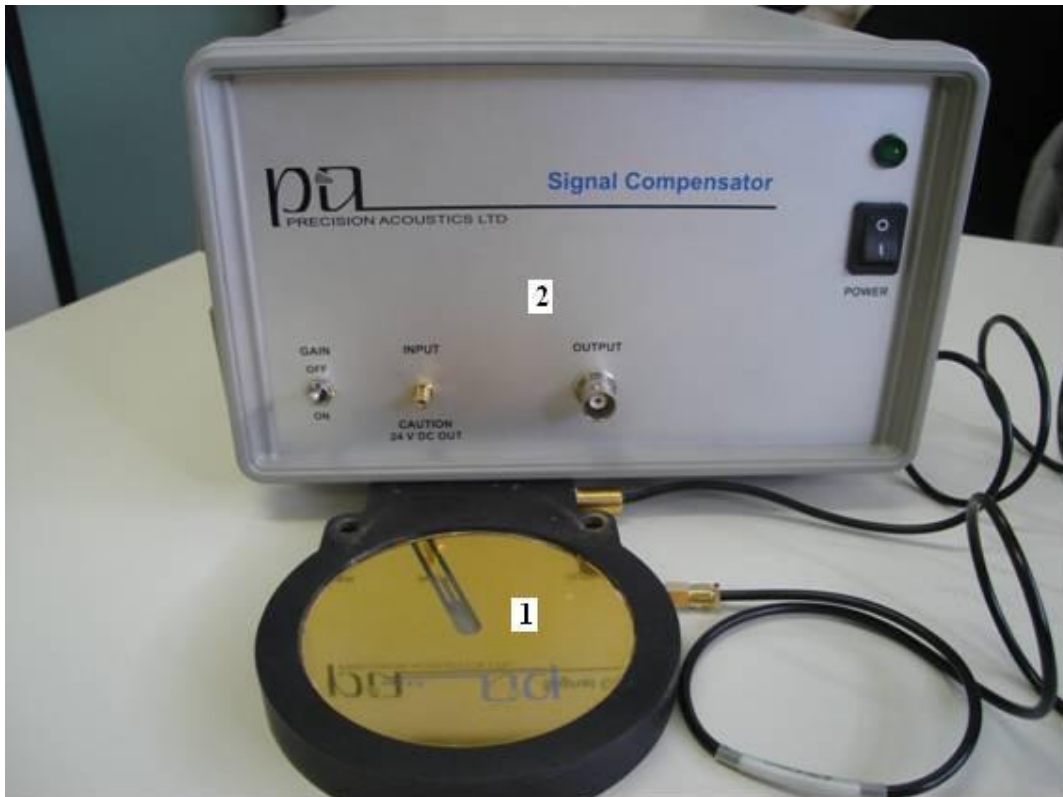


Figura 2.4 – Conjunto com hidrofone de membrana (Precision Acoustics; Dorchester Dorset UK) utilizado no Inmetro: 1- Hidrofone de membrana, 2- Signal Compensator

O elemento sensor do hidrofone de agulha necessita de mais energia incidente em seu elemento ativo, quando comparado ao de membrana, para a conversão eficiente de energia [18].

## 2.2- Calibração de Hidrofones

Calibrar um hidrofone é determinar a sua sensibilidade, ou seja, como a pressão incidente em seu elemento ativo é convertida em tensão elétrica em sua saída.

A sensibilidade de recepção [11,12] é determinada pela relação:

$$M = \frac{V}{P} \quad (2.1)$$

onde  $V$  é a amplitude do sinal de tensão de saída, medida na extremidade do cabo do hidrofone, e  $P$  é a amplitude da onda de pressão incidente no elemento ativo do hidrofone.

Metrologicamente o parâmetro mais importante na calibração de hidrofones é a determinação da incerteza de medição da calibração executada. O uso de um hidrofone calibrado é importante para mensurar o campo de pressão em um campo de ultrassom.

O hidrofone pode ser calibrado por um procedimento de medição primário [1], onde o resultado da medição é obtido sem relação com um padrão de uma grandeza de mesma natureza (sensibilidade do hidrofone). O hidrofone assim calibrado será um padrão de medição primário. O hidrofone também pode ser calibrado por uma medição estabelecida por intermédio de uma calibração referenciada a um padrão de medição primário de uma grandeza da mesma natureza, ou seja, outro hidrofone calibrado por um procedimento primário de calibração. Neste caso o hidrofone será um padrão de medição secundário [1].

### **2.3- Hidrofone como Padrão de Medição Primário**

Os hidrofones podem ser calibrados por procedimentos de medição primários diversos.

#### **2.3.1-Método da Varredura Plana**

No método de medição da varredura plana, a sensibilidade de recepção é obtida com base na determinação da potência ultrassônica irradiada por uma fonte de transmissão [21,22].

Com a pressão de uma onda ultrassônica determinada pode-se obter a potência propagada pela onda. Teoricamente a integral da intensidade de um campo é igual à

potência média que atravessa a superfície de integração, sendo possível relacionar a potência e a pressão em uma determinada região do campo. Inicialmente a maneira de se conhecer a potência emitida pelo sistema de ultrassom é utilizar uma balança de potência ultrassônica [23], para determinar a potência emitida por um transdutor de ultrassom em um plano perpendicular à direção de propagação da onda emitida pelo transdutor [2]. A figura 2.5 mostra um sistema com uma balança para medir a potência ultrassônica emitida por um transdutor, com suporte para o transdutor de emissão, alvo absorvedor apoiado abaixo do transdutor de emissão (estrutura retangular em azul) e medidor de temperatura.



Figura 2.5 – Balança de potência ultrassônica utilizada no Inmetro: 1- Transdutor de emissão, 2- Balança, 3- Alvo absorvedor, 4- Tanque com água, 5- Medidor de temperatura e umidade.

Com a potência ultrassônica determinada, o hidrofone é posicionado em várias localizações, fazendo-se uma varredura em plano paralelo à face do transdutor, para relacionar os valores da tensão de saída do hidrofone com o valor de potência ultrassônica medida no mesmo plano. Sendo assim a sensibilidade do hidrofone é obtida por medições de parâmetros relacionados ao transdutor de emissão e pela varredura da tensão de saída do hidrofone em um plano, onde está situado o alvo absorvedor para a determinação da potência do feixe ultrassônico. A equação 2.2 é a expressão da sensibilidade [22] para o hidrofone a ser calibrado.

$$M = \left[ \iint_{\text{sup}} \frac{V_{PT}^2(\vec{r}) dS}{2\rho_0 c_0 G_r V_{rms}^2} \right]^{\frac{1}{2}} e^{\alpha d_{hp}} \quad (2.2)$$

Onde a integral de superfície se realiza sobre a região delimitada por sup e contida em um plano perpendicular à direção de propagação da onda emitida pelo transdutor,  $V_{PT}$  é a tensão elétrica de pico na saída do hidrofone.  $G_r$  é a condutância de radiação.  $G_r = W/V_{rms}^2$ , com  $W$  representando a potência do feixe ultrassônico irradiado  $W = mgc_0$  [23],  $\rho_0$  e  $c_0$  são respectivamente a densidade e velocidade de propagação do ultrassom no meio,  $g$  é a aceleração da gravidade local,  $m$  é a indicação de massa na balança devida à incidência do campo ultrassônico no alvo absorvedor,  $V_{rms}$  é a tensão média quadrática de excitação do transdutor,  $\alpha$  é o coeficiente de atenuação do ultrassom na água e  $d_{hp}$  é a distância do hidrofone ao plano de varredura.

Este procedimento de medição primário resulta em incerteza de medição expandida de até 18% para frequências até 15 MHz [2].

### **2.3.2-Método Interferométrico**

No procedimento de calibração baseado na interferometria óptica o deslocamento em uma posição do campo acústico produzido pela onda emitida por um transdutor é medido. Este método de medição utiliza uma película fina, tipicamente com 100 mm de diâmetro e 5  $\mu\text{m}$  de espessura, posicionada em uma região do campo acústico emitido por um transdutor de ultrassom, que é acusticamente transparente e refletora à luz. Com a passagem da onda de ultrassom pela película, a mesma vibra em sintonia com a onda. Usando técnicas de interferometria óptica o deslocamento da película pode ser determinado e daí obtém-se a pressão acústica no local da película. A seguir o hidrofone a ser calibrado é posicionado no mesmo local onde se conhece a pressão acústica para então se obter a sua sensibilidade. A principal vantagem do sistema interferométrico é que a sensibilidade do hidrofone é obtida independentemente das características do transdutor emissor de ultrassom.

O método de medição para a calibração primária de hidrofone é baseada no interferômetro de Michelson (figura 2.6) [2], com a geração de batimento entre dois feixes de laser (He-Ne) originados de uma fonte coerente, as quais percorrem caminhos diferentes. A película está situada na superfície do líquido onde a sua vibração devido à incidência do campo acústico é determinada pelo sistema interferométrico [24].

Trabalhos de pesquisa das décadas de 1980 [25] e 1990 [26] abordam desenvolvimento similar.



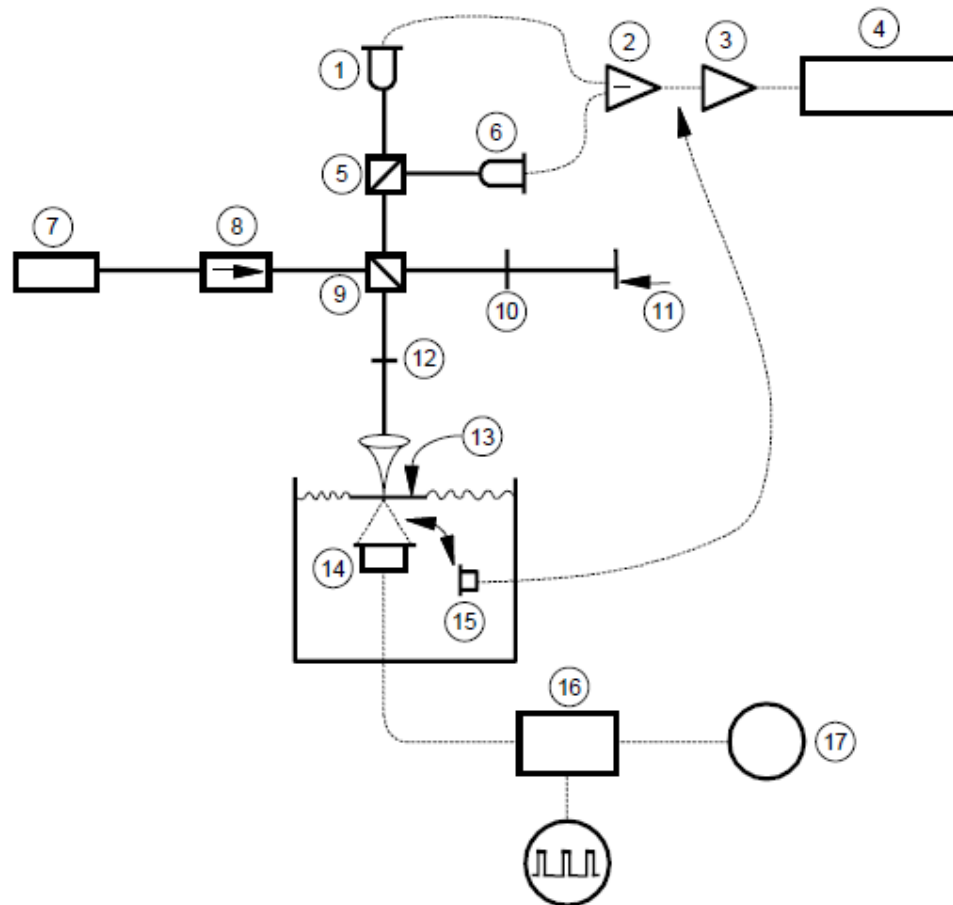


Figura 2.6 – Esquema de um sistema interferométrico [2], contendo: 1- fotodiodo, 2 – amplificador de transimpedância, 3- amplificador do hidrofone, 4- osciloscópio, 5- divisor óptico, 6- fotodiodo, 7- *laser*, 8- isolador óptico, 9- polarizador do divisor óptico, 10- placa de atraso de  $\lambda/4$ , 11- controlador do polarizador do divisor óptico, 12- placa de atraso de  $\lambda/4$ , 13- película, 14- transdutor, 15- hidrofone, 16- gerador de *burst*, 17 – gerador.

O feixe emitido pela fonte de *laser* é dividido em duas partes em um espelho divisor denominado *beam splitter* (9- polarizador do divisor óptico) (figura 2.6). Parte da energia luminosa que atravessa o espelho atinge uma película de *mylar* com 100 mm

de diâmetro, espessura típica de 5  $\mu\text{m}$  revestida com uma camada de 25 nm em ouro, inserida no campo ultrassônico, na superfície do tanque com água [27]. O feixe de luz refletido na película retorna ao *beam splitter*, assim como o feixe de luz de referência, ocorrendo então o fenômeno da interferência entre ambos. O sinal óptico resultante tem a mesma frequência do sinal original, porém com alteração de fase, surgida em função da diferença do percurso entre os feixes de referência e o que atingiu a película. Com a movimentação da película, a fase do sinal resultante da interferência varia proporcionalmente ao deslocamento da película, ou seja, a velocidade de variação da fase é igual à velocidade com que a película se movimenta. Caso o movimento da película seja devido a um campo ultrassônico originado por um transdutor excitado por uma onda senoidal, a velocidade da variação da fase será igual à velocidade de deslocamento da partícula, desde que a amplitude de deslocamento da partícula na película seja bem menor do que o comprimento de onda do laser.

Para pequenas amplitudes de deslocamento (5 nm ou menos) a tensão de saída varia linearmente com o deslocamento ( $\xi$ ), o qual é determinado [25] pela equação a seguir:

$$\xi = \frac{V_i}{V_0} \frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot n} \quad (2.3)$$

onde  $V_i$  é o sinal de saída do interferômetro,  $V_0$  é o sinal de referência do interferômetro,  $\lambda$  é o comprimento de onda óptico no vácuo, e  $n$  é o índice de refração do meio de propagação (água).

A tensão de referência  $V_0$  depende da quantidade de sinal refletido, e pode variar caso a película vibre devido a condições ambientais. Assim sendo, é recomendável que  $V_i$  e  $V_0$  sejam adquiridas no mesmo instante. Sendo  $P = \rho_0 c_0 \omega \xi$ , assumindo-se a condição de onda plana, a pressão acústica é obtida pela multiplicação

do deslocamento da película ( $\xi$ ) pela frequência angular ( $\omega$ ), densidade da água ( $\rho_0$ ), e velocidade de propagação do ultrassom no meio ( $c_0$ ).

Colocando-se o hidrofone (figura 2.6-15) no mesmo ponto onde a pressão acústica foi anteriormente determinada, a sua sensibilidade  $M$  pode ser determinada pela seguinte equação:

$$M \approx \frac{V_h V_0}{V_i} \frac{2n}{f \rho_0 c_0 \lambda} \quad (2.4)$$

onde  $V_h$  é a tensão de saída do hidrofone,  $f$  é a frequência ultrassônica.

Este procedimento de medição primário resulta em incerteza de medição expandida de até 8% para frequências até 20 MHz [2].

### 2.3.3-Método da Reciprocidade

O terceiro procedimento de medição primário para calibração de hidrofones é o que utiliza o método de calibração por reciprocidade. Entre os métodos de calibração, a reciprocidade é um método tradicional e de amplo conhecimento [4,12,28]. Para um transdutor linear, passivo e reversível, existe uma relação entre a sua sensibilidade e a sua resposta à excitação elétrica. Esta relação é expressa pelo coeficiente de reciprocidade e, para uma calibração baseada no princípio da reciprocidade, é necessário que o transdutor seja recíproco, isto é, atue como transmissor e receptor. A reciprocidade ( $J$ ) [12,28] para um transdutor é a determinação da razão entre a sua sensibilidade de recepção ( $M$ ) e transmissão ( $S$ ), ou seja:

$$J = \frac{M}{S} \quad (2.5)$$

A razão entre a tensão elétrica medida no cabo do transdutor e a pressão acústica incidente no elemento ativo do transdutor define a sensibilidade de recepção, ou seja, a conversão da pressão incidente em tensão gerada. A sensibilidade de transmissão é a relação entre a pressão acústica na face do transdutor ( $p$ ) para uma corrente de excitação ( $I$ ) [29]. O conhecimento da sensibilidade é importante, pois, a partir de uma excitação conhecida de tensão ou corrente elétrica, é possível chegar ao valor da pressão gerada em sua face.

O parâmetro de reciprocidade para ondas planas ( $J_p$ ) [12,30], na calibração de hidrofones, é expresso por:

$$J_p = \frac{2A}{\rho_0 c_0} \quad (2.6)$$

onde  $A$  é a área de radiação efetiva do transdutor,  $\rho_0$  é a densidade do meio de propagação e  $c_0$  é a velocidade de propagação do ultrassom no meio.

O procedimento de calibração por reciprocidade, conforme [2], pode ser implementado com três transdutores. No entanto, para frequências acima de 1 MHz não é possível utilizá-lo, devido à dificuldade de alinhamento entre os transdutores. Por este motivo a reciprocidade com três transdutores não será abordada nesta Tese.

A sensibilidade do transdutor é obtida pela medição de grandezas elétricas envolvidas no método, corrente de alimentação do transdutor e as tensões relativas ao sinal direto de alimentação do transdutor e o sinal de eco refletido no alvo refletor. Para frequências acima de 1 MHz utiliza-se o procedimento de calibração utilizando o princípio da reciprocidade com dois transdutores.

A calibração por autorreciprocidade 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, é recebido pelo mesmo transdutor [11]. Existem protocolos de medição baseados nesta técnica, conforme descritos na literatura [30-32].

Na calibração por autorreciprocidade, a grandeza física de interesse é a pressão ultrassônica, obtida a partir de grandezas elétricas (tensão e corrente) e outras grandezas derivadas presentes no parâmetro geral para reciprocidade  $J_p$ . Este método tem como principal vantagem o conhecimento da teoria que descreve o campo acústico gerado pelo transdutor em função de grandezas elétricas [33].

A limitação para o emprego deste método é o tamanho do elemento ativo do transdutor, pois a potência acústica emanada é proporcional ao volume do meio deslocado por sua face. Portanto, transdutores com elemento ativo pequeno como os hidrofones, utilizados na faixa dos MHz, não podem ser calibrados por autorreciprocidade. Conforme normalizado [2], a aplicação desta técnica requer a utilização de transdutores de emissão com no mínimo 2 mm de diâmetro.

A figura 2.7 mostra o método inicialmente proposto [2], para a calibração da sensibilidade, em módulo, de hidrofones até 15 MHz.

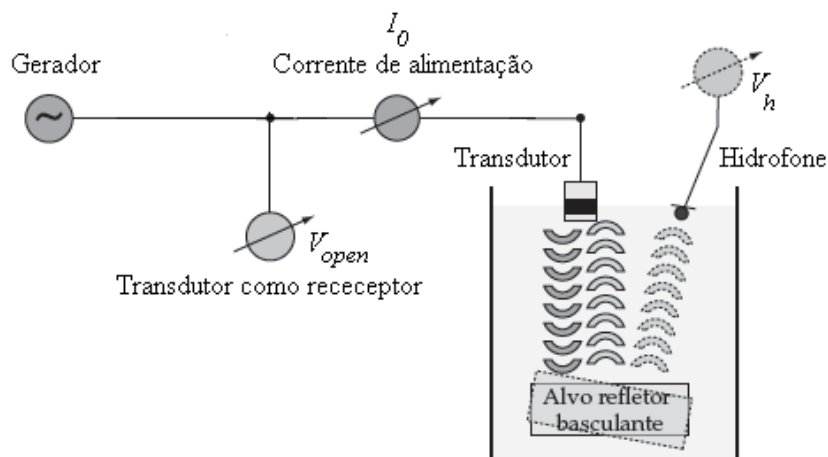


Figura 2.7 – Desenho esquemático da calibração de hidrofones por reciprocidade.

O transdutor auxiliar de emissão deve ser linear, passivo e reversível, pelo princípio da reciprocidade [32]. Em seguida, o hidrofone a ser calibrado é posicionado no campo de pressão previamente determinado por autorreciprocidade, obtendo-se então o módulo da sua sensibilidade. O alvo refletor utilizado para reflexão da onda ultrassônica é inclinado para que o hidrofone fique no centro do campo acústico refletido, 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° [2,31]. O método da reciprocidade requer a medição da tensão de circuito aberto do transdutor de emissão, quando este é utilizado no modo de recepção, para realizar a medição do sinal de eco após a reflexão em um alvo refletor [30].

A expressão final da sensibilidade do hidrofone, considerando onda plana em campo livre [30] é dada por:

$$M = \frac{\sqrt{V_h^2}}{\sqrt{V_{open} I_0}} \sqrt{\frac{2A}{\rho_0 c_0 R}} \frac{\sqrt{G_1}}{G_2} e^{\alpha d_1} \quad (2.7)$$

onde  $V_h$  é tensão de saída do hidrofone,  $V_{open}$  é a tensão do sinal de eco medida no transdutor,  $I_0$  é a corrente de alimentação do transdutor,  $A$  é a área efetiva de radiação do transdutor,  $\rho_0$  é a densidade do meio de propagação (água),  $c_0$  é a velocidade de propagação no meio (água),  $R$  é a amplitude do coeficiente de reflexão do alvo refletor,  $d_1$  é a distância entre transdutor e alvo refletor,  $G_1$  é a correção devida à difração do feixe associada à radiação do transmissor contabilizada para a distância  $2d_1$ ,  $G_2$  é contabilização dos efeitos de difração associada à radiação de TX e captadas por um hidrofone contabilizada para a distância  $d_1$ ,  $\alpha$  é o coeficiente de atenuação.

O procedimento de calibração por reciprocidade resulta no módulo da sensibilidade do hidrofone calibrado. Este procedimento de medição primário resulta em incerteza de medição expandida de até 16% para frequências até 15 MHz [2].

## **2.4- Hidrofone como Padrão de Medição Secundário**

Neste caso o hidrofone a ser calibrado é colocado em um ponto do campo ultrassônico previamente determinado pela utilização de um hidrofone calibrado por um procedimento primário de calibração, portanto de sensibilidade conhecida. Realizando este procedimento em condições de repetibilidade a calibração do hidrofone em teste será obtida. Condição de repetibilidade de medição [1] é a “condição de medição num conjunto de condições, as quais incluem o mesmo procedimento de medição, os mesmos operadores, o mesmo sistema de medição, as mesmas condições de operação e o mesmo local, assim como medições repetidas no mesmo objeto ou em objetos similares durante um curto período de tempo”.

Genericamente a calibração obtida por um procedimento primário de calibração tem incerteza menor do que a obtida por um procedimento secundário.

### **2.4.1-Método TDS (Time Delay Spectrometry)**

O método de medição baseado na técnica TDS (Time Delay Spectrometry) é utilizado para a caracterização de hidrofones para a medição do módulo da sensibilidade [33-38]. Um esquema da montagem experimental para o sistema TDS é mostrado na figura 2.8 [38]. O gerador é considerado linear, com a varredura em frequência dada por  $\cos(\omega t)$ .

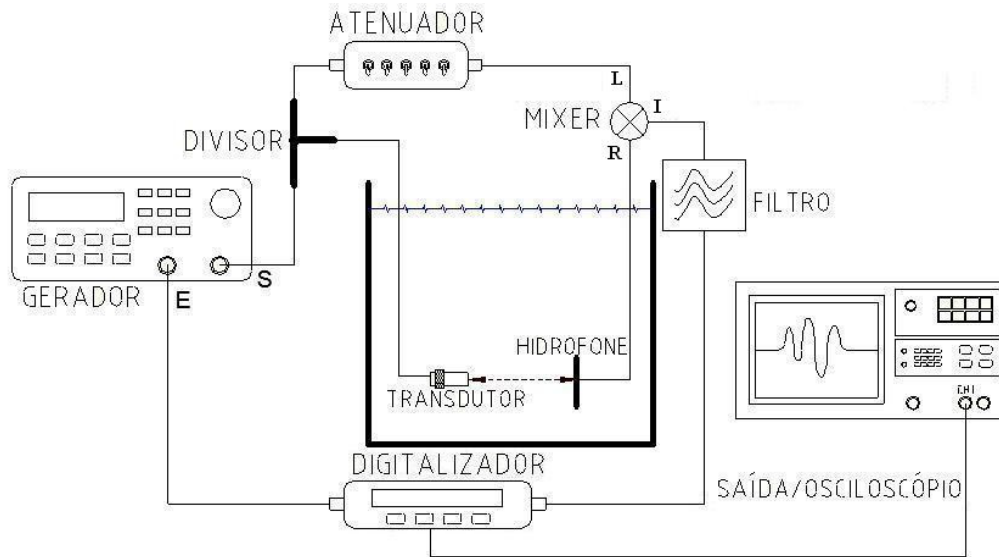


Figura 2.8 – Desenho esquemático de um sistema TDS.

*Mixer* é a representação de dispositivo que modula uma de suas entradas pela outra produzindo sinal com a adição e outro com a diferença de frequência em sua saída. O sinal de saída do hidrofone (R) é multiplicado pelo sinal do gerador (S). O sinal de saída do *mixer* contém os sinais somados e subtraídos em frequência.

O sinal de saída do *mixer* (I) passa por um filtro passa-baixa para remover a componente em soma de frequência, para produzir o sinal de saída dado por  $(\frac{1}{2})|A(\omega)|\cos[\Delta\omega t - \varphi_A(\omega)]$ , onde  $|A(\omega)|$  é a resposta do sistema em módulo,  $\varphi_A(\omega)$  é a fase do sistema,  $\Delta\omega$  é o *offset* em frequência do TDS [38].

O digitalizador seleciona o *offset* de frequência  $\Delta\omega$  para o gerador de varredura.

$B(\omega)$  é a função de transferência do sistema de medição excetuando-se o hidrofone. Considerando a função de transferência do hidrofone de referência como  $H_R(\omega)$  e  $H_T(\omega)$  a função de transferência do hidrofone sob teste, a resposta total do sistema de teste ( $A_T(\omega)$ ) e referência ( $A_R(\omega)$ ) é mostrada na equação (2.8):



$$\begin{aligned} A_T(\omega) &= B(\omega)H_T(\omega) \\ A_R(\omega) &= B(\omega)H_R(\omega) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Então, o módulo da sensibilidade do hidrofone sob teste é dada pela equação 2.9, com a utilização do método TDS para determinar a resposta total do sistema de teste e de referência em módulo.

$$H_T(\omega) = \left[ \frac{A_T(\omega)}{A_R(\omega)} \right] H_R(\omega) \quad (2.9)$$

A regra geral na calibração com hidrofone como padrão secundário de medição é colocar o hidrofone padrão calibrado, com função de transferência  $H_R(\omega)$  conhecida, em um campo de pressão ultrassônico reproduzível em condições de repetibilidade de medição e medir a pressão no campo com o padrão, uma vez que a sua sensibilidade é conhecida. A sensibilidade conhecida do hidrofone padrão calibrado é representada por  $H_R(\omega)$  na equação 2.9. Posteriormente o hidrofone padrão é substituído pelo hidrofone a ser calibrado, posicionado no mesmo local do campo onde o hidrofone padrão fora inicialmente posicionado.

## 2.5- Calibração da Fase da Sensibilidade de Hidrofones

Geralmente a calibração da sensibilidade de hidrofones envolvendo fase não é descrita, possivelmente devido às dificuldades experimentais envolvidas em sua determinação. Pequenos erros em distância, para o posicionamento da distância pulso eco, levam a erros consideráveis na determinação de fase.

Um trabalho inicial para determinar a fase da tensão de saída de hidrofones foi feito até 150 kHz utilizando o procedimento de calibração por reciprocidade com três transdutores [39]. O NPL, o Instituto Nacional Metrológico da Inglaterra, conduziu um trabalho [40] para avaliar a fase da sensibilidade de três hidrofones, baseados no método

descrito em [39]. É importante ressaltar que esta avaliação resultou em uma incerteza do Tipo A de 30° em 400 kHz, indicando uma grande variabilidade dos resultados. Conforme INMETRO [1] a incerteza do Tipo A é a “avaliação de uma componente da incerteza de medição por uma análise estatística dos valores medidos, obtidos sob condições definidas de medição”. Em 1981, LUCKER, BUREN [39] caracterizaram a fase da sensibilidade de hidrofones, utilizando o procedimento de calibração com três transdutores [41], declarou variação de até 28° em 500 kHz. No entanto, conforme fora afirmado, o procedimento de calibração com três transdutores por reciprocidade não é o foco principal deste trabalho pela limitação em frequência.

O procedimento de medição utilizando TDS pode ser utilizado em sistemas ultrassônicos para expressar a medição de fase da função de transferência do sistema [42].

Para o sistema TDS descrito na figura 2.8, a amplitude  $A(\omega)$  e a fase  $\varphi_A(\omega)$  do sistema são obtidas por demodulação em quadratura, que consiste na multiplicação do sinal de saída  $(\frac{1}{2})A(\omega)\cos[\Delta\omega t - \varphi_A(\omega)]$  por  $\cos(\omega_c t + \varphi_0)$  para obter  $I(\omega)$  e na multiplicação por  $\sin(\omega_c t + \varphi_0)$  para obter  $Q(\omega)$ , onde  $\omega_c$  é igual ao *offset* em frequência da portadora  $\Delta\omega$ .

Usando as identidades trigonométricas:

$$\cos(\alpha)\cos(\beta) = \left(\frac{1}{2}\right)[\cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta)] \quad (2.10)$$

$$\sin(\alpha)\cos(\beta) = \left(\frac{1}{2}\right)[\sin(\alpha + \beta) + \sin(\alpha - \beta)] \quad (2.11)$$

Resultando para  $I(\omega)$  e  $Q(\omega)$ , dados por:

$$I(\omega) = \left(\frac{1}{4}\right)A(\omega)\{\cos[(2\Delta\omega)t - \varphi_A(\omega) + \varphi_0] + \cos[\varphi_A(\omega) + \varphi_0]\} \quad (2.12)$$

$$Q(\omega) = \left(\frac{1}{4}\right)A(\omega)\{\sin[(2\Delta\omega)t - \varphi_A(\omega) + \varphi_0] + \sin[\varphi_A(\omega) + \varphi_0]\} \quad (2.13)$$

O sinal resultante de 2.12 e 2.13 é filtrado por um filtro passa-baixa com frequência de corte igual  $\Delta\omega$ , obtendo-se:

$$I_{LPF} = \left(\frac{1}{4}\right)A(\omega)|\cos[\varphi_A(\omega) + \varphi_0] \quad (2.14)$$

$$Q_{LPF} = \left(\frac{1}{4}\right)A(\omega)|\sin[\varphi_A(\omega) + \varphi_0] \quad (2.15)$$

Sendo  $I_{LPF}^2(\omega) + Q_{LPF}^2(\omega) = \left(\frac{1}{16}\right)A(\omega)^2$ , são obtidos o módulo e a fase do sinal:

$$|A(\omega)| = 4[I_{LPF}^2(\omega) + Q_{LPF}^2(\omega)]^{1/2} \quad (2.16)$$

$$\varphi_A(\omega) = \tan^{-1}\left[\frac{Q_{LPF}(\omega)}{I_{LPF}(\omega)}\right] - \varphi_0 \quad (2.17)$$

Assim, o módulo e a fase do sinal de saída são obtidas respectivamente por 2.16 e 2.17. Usando a equação 2.9 e um hidrofone padrão previamente calibrado em módulo e fase, com  $A(\omega)$  e  $\varphi_A(\omega)$  conhecidas, é possível calibrar o hidrofone sob teste em módulo e fase. A incerteza de medição expandida deste procedimento de medição até 20 MHz é de 13° [2].

### 2.5.1-Hidrofone Óptico Multicamadas

Outro procedimento de medição utiliza um hidrofone óptico multicamadas [43]. Estas camadas formam um micro interferômetro, onde a variação da sua refletância óptica é função da deformação das camadas pela incidência do sinal de ultrassom. O princípio de funcionamento baseia-se na deformação elástica das camadas que compõem o hidrofone óptico [43-46] com a incidência do sinal de ultrassom  $p_{in}$  e pela medição da variação da refletância óptica  $\Delta R$  por um circuito detector que consiste em um *laser* He-Ne, duas lentes e um fotodetector, mostrados na figura 2.9 [43].

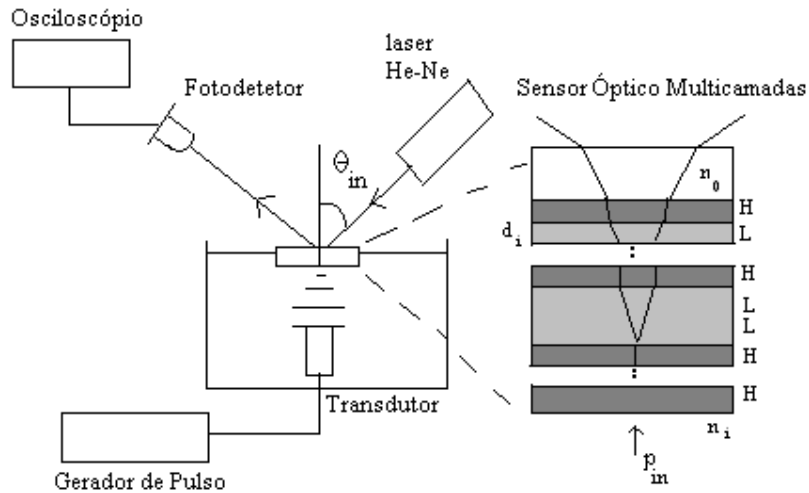


Figura 2.9 – Sensor óptico multicamadas:  $i=0$  camada de vidro plano (substrato) onde as camadas sucessivas são montadas,  $n_i$  índice de refração da  $i$ -ésima camada, camada H com alta refletividade, camada L com baixa refletividade. Adaptada (WILKENS, 2003)

A refletância óptica do sistema para incidência oblíqua do sinal de laser com comprimento de onda  $\lambda$  pode ser calculado utilizando o formalismo matricial para sistemas ópticos multicamada [47], onde a  $i$ -ésima camada com espessura  $d_i$ , índice de refração  $n_i$ , ângulo de propagação  $\theta_i$ , tem um desvio angular dependente da espessura da camada, dado por:

$$\phi_i = \frac{2\pi}{\lambda} n_i d_i \cos \theta_i \quad (2.18)$$

A pressão incidente  $p_{in}$  causa variação na espessura das camadas, que por sua vez variam a refletância óptica de todo o sistema. A conclusão [43] é que a variação da refletância mantém uma relação linear com a pressão do campo acústico de excitação, e que a grandeza que o fotodetector (figura 2.9) está medindo é a variação da intensidade da refletância, logo o sinal amostrado no osciloscópio da figura 2.9 é uma representação

no tempo da forma de onda da pressão naquele ponto. O hidrofone óptico multicamadas serve como referência de fase devido à sua resposta plana em fase [45].

O hidrofone de membrana óptico é excitado por um pulso ultrassônico gerado pelo transdutor que é alimentado pelo gerador de pulsos. A seguir é realizada a transformada de Fourier da onda de pressão, no domínio do tempo, proveniente do hidrofone de membrana óptico e da tensão de saída do hidrofone de membrana colocado no mesmo ponto onde estava o hidrofone de membrana óptico, conforme mostrado na figura 2.10 [45]. A divisão entre as transformadas de Fourier do sinal elétrico de tensão na saída do hidrofone pela onda de pressão fornece a sensibilidade complexa do hidrofone a ser calibrado

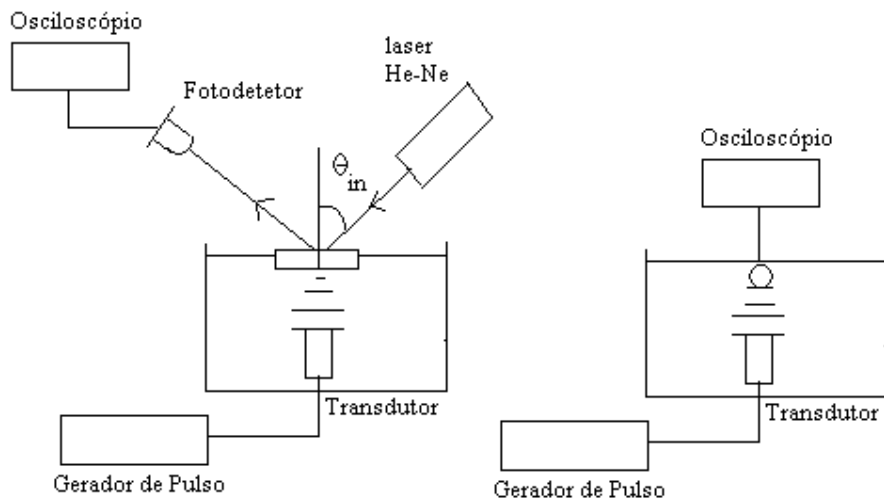


Figura 2.10 – Calibração por comparação utilizando um sensor óptico multicamadas.

Adaptada (KOCH, WILKENS, 2004).

Portanto, o hidrofone de membrana óptico pode ser caracterizado como uma referência para obtenção da forma de onda de pressão, que será a mesma que excitará o

hidrofone a ser calibrado. A incerteza de medição expandida deste procedimento de medição até 20 MHz é de 13° [2].

### **2.5.2-Propagação Não Linear**

Em 2011, BLOOMFIELD, GANDHI, LEWIN [48] utilizaram um procedimento de calibração baseado na propagação não linear da onda de ultrassom em um fluido para levantar as características de fase de hidrofones. A propagação não linear gera harmônicos, nas frequências múltiplas da fundamental, para um campo de pressão maior do que 300 kPa na água. Este trabalho [48] utilizou um modelo matemático para prever o campo de pressão não linear para o sistema. Os componentes harmônicos gerados tem relações de fase definidas com relação à fundamental, as quais foram previamente calculadas pelo modelo não linear. A fase da sensibilidade do hidrofone é obtida pela diferença entre a fase estimada pelo modelo não linear em conjunto com o modelo físico da função de transferência do hidrofone e a medição da fase da sensibilidade do hidrofone relativa ao harmônico considerado. Esta abordagem não é aplicável à calibração por reciprocidade, pois este procedimento é aplicado para a região linear do campo de pressão (3 kPa a 300 kPa) [2].

Em 2014, BLOOMFIELD, LEWIN [49] obtiveram a fase da sensibilidade do hidrofone através da transformada de Fourier-Hilbert. Nesta abordagem o hidrofone é assumido como de fase mínima, onde a fase da função de transferência é obtida a partir da amplitude. Um sistema é de fase mínima quando não ocorre atraso no tempo do sinal que passa por ele, ou seja, as componentes em frequência do sinal na saída do sistema tem idealmente uma variação de fase igual a zero grau. Um sistema de fase mínima é linear e causal. Para um sistema de fase mínima, a fase da função de transferência é

igual ao inverso da Transformada de Hilbert do logaritmo neperiano do módulo da função de transferência [38].

### 3- Fundamentos Teóricos

NEER, VOS, JONG [50], em 2011, desenvolveram um método para determinar a função de transferência de transmissão e recepção de transdutores ultrassônicos, utilizando o princípio da reciprocidade. A fundamentação teórica desenvolvida descreve uma atualização e modificação no método originalmente proposto [50], desenvolvendo um procedimento de calibração baseado no método de medição por reciprocidade com dois transdutores.

A característica inovadora deste desenvolvimento consiste na aplicação do procedimento de calibração utilizando o princípio da reciprocidade para determinar a sensibilidade de hidrofones em módulo e fase.

#### 3.1- Sensibilidade do Hidrofone

O desenvolvimento teórico desta Tese parte da determinação da função de transferência de transmissão de um transdutor auxiliar emissor de ultrassom,  $T_t$ , baseado na figura 3.1 e definido por Van Neer et al. [50].

$$T_t(\omega) = \frac{p_{tx}(\omega)}{V(\omega)} \quad (3.1)$$

onde  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  é a frequência de ultrassom,  $p_{tx}$  é a pressão média gerada na superfície do transdutor quando excitado com um sinal elétrico  $V$ .



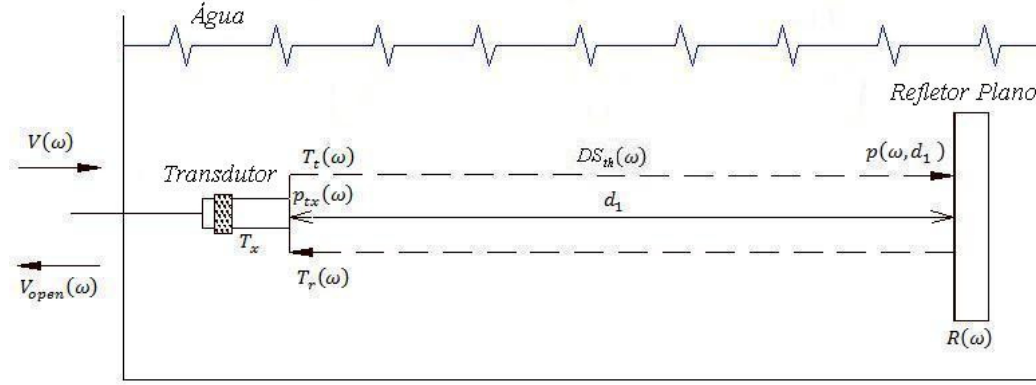


Figura 3.1 – Diagrama do arranjo de medição do sistema pulso eco para determinar a função de transferência complexa do transdutor auxiliar,  $T_x$ , baseada no eco proveniente do alvo refletor, ambos imersos na água. As variáveis  $V$ ,  $T_t$ ,  $DS_{th}$ ,  $R$ ,  $T_r$  e  $V_{open}$  são fasores em função da frequência angular,  $\omega$ , representando o sinal de excitação do transdutor de emissão, sua função de transferência complexa, a difração relativa ao percurso transdutor-hidrofone, o coeficiente de reflexão, a função de transferência complexa do transdutor na recepção e o sinal de saída do transdutor relativo ao sinal de eco, quando carregado por uma impedância infinita, respectivamente.

Considerando o transdutor auxiliar como recíproco e atuando como pistão plano, com raio efetivo  $a$ , e  $d_1$  a distância entre o transdutor e o refletor, então  $T_t$  é expressa [50].

$$T_t(\omega, d_1) = \sqrt{\frac{i\omega\rho_0 V_{open}(\omega, d_1)}{8\pi d_1 Z(\omega) V(\omega)} \frac{1}{e^{-2\alpha(\omega)d_1} e^{-ik2d_1} (1 - e^{-ika^2/4d_1}) DS_{th}(\omega, d_1) R(\omega)}} \quad (3.2)$$

onde  $\rho_0$  é a densidade do meio entre o transdutor e o alvo refletor,  $V_{open}$  é a tensão de eco recebida pelo transdutor quando carregado por uma impedância infinita,  $Z$  é a impedância elétrica de entrada do transdutor,  $\alpha$  é o coeficiente de atenuação do meio entre o transdutor e o alvo refletor,  $e^{-ik2d_1}$  é o termo de propagação da onda contendo a

variação de fase devido à distância percorrida pela frente de onda, com  $k = 2\pi/\lambda$  e  $\lambda$  igual ao comprimento de onda acústico,  $DS_{th}$  é o termo relacionado à difração, devido à abertura finita do transdutor auxiliar durante a transmissão, e também devido à correção espacial, devido ao fato da abertura finita do transdutor auxiliar receber uma onda acústica não plana e  $R$  é o coeficiente de reflexão do refletor plano.

Com o posicionamento do hidrofone à mesma distância  $d_1$  do transdutor de emissão, a sua tensão de saída,  $V_h$ , será expressa [51] por:

$$V_h(\omega, d_1) = T_h(\omega) \left[ V(\omega) T_t(\omega, d_1) e^{-\alpha d_1} e^{-ikd_1} DS_{th}(\omega, d_1) \right] \quad (3.3)$$

Onde  $T_h$  é a função de transferência do hidrofone na recepção,  $DS_{th}$  é o termo relativo a difração, devido à abertura finita do transdutor auxiliar (transmissor) e à correção espacial devido à abertura finita do hidrofone quando do recebimento de uma onda não plana.

A sensibilidade do hidrofone,  $M_h$ , é definida por:

$$M_h(\omega) = \frac{V_h(\omega, d_1)}{p(\omega, d_1)} \quad (3.4)$$

Com  $p(\omega, d_1)$  é a pressão acústica média incidente na face do hidrofone, que está contido nos colchetes da equação (3.3).

Portanto, das equações (3.3) e (3.4) segue:

$$M_h(\omega) = T_h(\omega) \quad (3.5)$$

Das equações (3.1-3.5), são obtidas as equações para o módulo,  $|M_h|$ , e a fase,  $\angle M_h$ , de  $M_h$  em termos de parâmetros medidos experimentalmente ou relacionados ao arranjo experimental de medição:

$$|M_h(\omega)| = \frac{|V_h(\omega, d_1)|}{|V(\omega)T_t(\omega, d_1)e^{-\alpha d_1}DS_{th}(\omega, d_1)|} \quad (3.6)$$

e

$$\angle M_h(\omega) = \angle V_h(\omega, d_1) - \angle V(\omega) - \angle T_t(\omega, d_1) - \angle e^{-ikd_1} - \angle DS_{th}(\omega, d_1) \quad (3.7)$$

### 3.2- Considerações Sobre $|M_h|$ e $\angle M_h$ do Hidrofone

#### 3.2.1- Raio Efetivo do Transdutor

O raio efetivo do transdutor é determinado por meio da modelagem do transdutor por um pistão plano circular simétrico, e pelo mapeamento da distribuição de pressão ao longo do seu eixo axial, com a determinação do último mínimo axial,  $d_m$ .

Neste caso o raio efetivo é determinado por [52]:

$$a = \sqrt{2\lambda d_m + \lambda^2} \quad (3.8)$$

#### 3.2.2- Termo da Difração $DS_{th}$ na Expressão de $T_t$

O módulo de  $DS_{th}$ ,  $|DS_{th}|$ , é um fator que corrige a amplitude da pressão da onda que retorna do alvo refletor e incide na superfície do transdutor auxiliar, levando em conta a distância entre o transdutor e o refletor assim como a sua abertura. Os valores tabulados de  $|DS_{th}|$  estão apresentados em BRENDEL E LUDWIG [15], e calculados conforme FAY [53].

A fase de  $DS_{it}$ ,  $\angle DS_{it}$ , pode ser considerada devida a dois efeitos, difração causada pela abertura finita do transdutor de emissão e a correção espacial do transdutor com abertura finita recebendo uma onda de pressão não plana. Portanto:

$$\angle DS_{it} = \phi_{itD} + \phi_{itA} \quad (3.9)$$

Em relação à  $\phi_{itD}$ , é um fator que relaciona o termo de fase da distribuição de pressão ao longo do eixo de um transdutor comportando-se como um pistão plano e o termo devido à difração. Conforme VAN NEER et al. [50] e considerando a atenuação imposta pelo meio de transmissão, a distribuição de pressão para a distância  $z = 2d_1$  da face do transdutor excitado por uma onda contínua, é dada por:

$$p(\omega, 2d_1) = 2p_{ix}(\omega) \sin\left(\frac{ka^2}{8d_1}\right) e^{-ik2d_1} e^{-i\left(\frac{ka^2}{8d_1} - \frac{\pi}{2}\right)} e^{-\alpha 2d_1} \quad (3.10)$$

A fase total na equação (3.10) tem dois termos; o primeiro,  $-2kd_1$ , refere-se à fase adicionada ao longo do caminho de propagação e o segundo,  $-\left(\frac{ka^2}{8d_1} - \frac{\pi}{2}\right)$ , refere-se a  $\phi_{itD}$ .

Com relação à fase  $\phi_{itA}$ , a mesma pode ser determinada através da diferença entre a fase da onda de pressão axial sobre a área de recepção do transdutor e a fase advinda da média da onda de pressão sobre a abertura do transdutor. A expressão geral para a onda de pressão emitida por um pistão circular plano, considerando a condição de campo distante, pode ser aproximada [54] por:

$$p(R_0, \theta, \omega) = \frac{i\omega\rho_0 v_0 a^2}{2R_0} e^{-\alpha R_0} e^{-ikR_0} \left[ \frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right] \quad (3.11)$$

onde  $v_0$  é a amplitude da velocidade de vibração de face do transdutor,  $R_0$  é a distância entre o ponto central da face do transdutor e um ponto sobre a face do transdutor de

recepção e afastado radialmente de  $r$  do seu ponto central. Com transdutores de transmissão e recepção distanciados por  $2d_1$ , então  $R_0 = \sqrt{(2d_1)^2 + r^2}$  e  $\sin \theta = r/R_0$ .

Assim considerado, a fase devida à correção espacial do transdutor com abertura finita, funcionando como receptor, e recebendo uma onda não plana é dada por:

$$\phi_{HA} = \angle p(2d_1, \theta = 0, \omega) - \angle \bar{p}(2d_1, \omega) \quad (3.12)$$

com

$$\angle p(2d_1, \theta = 0, \omega) = \frac{\pi}{2} - k2d_1 \quad (3.13)$$

Conforme RADULESCU [55] então:

$$\angle \bar{p}(2d_1, \omega) = \angle \frac{\iint_{abertura} p\left(R_0 = \sqrt{(2d_1)^2 + r^2}, \theta, \omega\right) \cdot r \cdot dr \cdot d\varphi}{\iint_{abertura} r \cdot dr \cdot d\varphi} \quad (3.14)$$

onde  $r$  e  $\varphi$  são coordenadas polares de integração.

Considerando a simetria circular da área de recepção do transdutor, então a equação (3.14) passa a ser expressa por:

$$\angle \bar{p}(2d_1, \omega) = \angle \frac{2 \cdot \int_0^a p\left(R_0 = \sqrt{(2d_1)^2 + r^2}, \theta = \sin^{-1}(r/R_0), \omega\right) \cdot r \cdot dr}{a^2} \quad (3.15)$$

### 3.2.3- Análise do Coeficiente de Reflexão, $R$ , na Expressão de $T_i$

Conforme VAN NEER et al. [50], o coeficiente de reflexão pode ser considerado com valor em módulo aproximadamente igual a 1, para uma onda de pressão com incidência normal em um refletor plano com impedância acústica maior do que o meio de propagação, considerando-se que o meio de propagação e o refletor são de mínima perda. Ainda, segundo COBBOLD [54], não ocorre alteração de fase da onda refletida no alvo refletor nestas condições.

### 3.2.4- Análise do Termo $e^{-ik2d_1}$ na Expressão de $\angle T_t$

O termo  $e^{-ik2d_1}$  contribui com a fase de  $2kd_1$  para a fase de  $\angle T_t$ , contabilizando a fase adicionada a  $\angle V_{open}$  devida à distância  $2d_1$ . O termo  $e^{-ik2d_1}$  pode ser ignorado na equação (3.2) desde que se considere o deslocamento no tempo do sinal de eco  $V_{open}$  para o mesmo instante de tempo,  $t_i$ , do início do sinal de excitação do transdutor  $V$ , conforme representado na figura 3.2. A aproximação proposta por VAN NEER et al. [50], permite medir a diferença de fase entre os sinais de  $V_{open}$  e  $V$ , representada por  $[\angle V_{open} - \angle V]$ , através da diferença de fase relativa entre ambos no instante  $t_f$ , considerando  $t_f$  grande o suficiente para que seja considerado o regime permanente de funcionamento do transdutor.

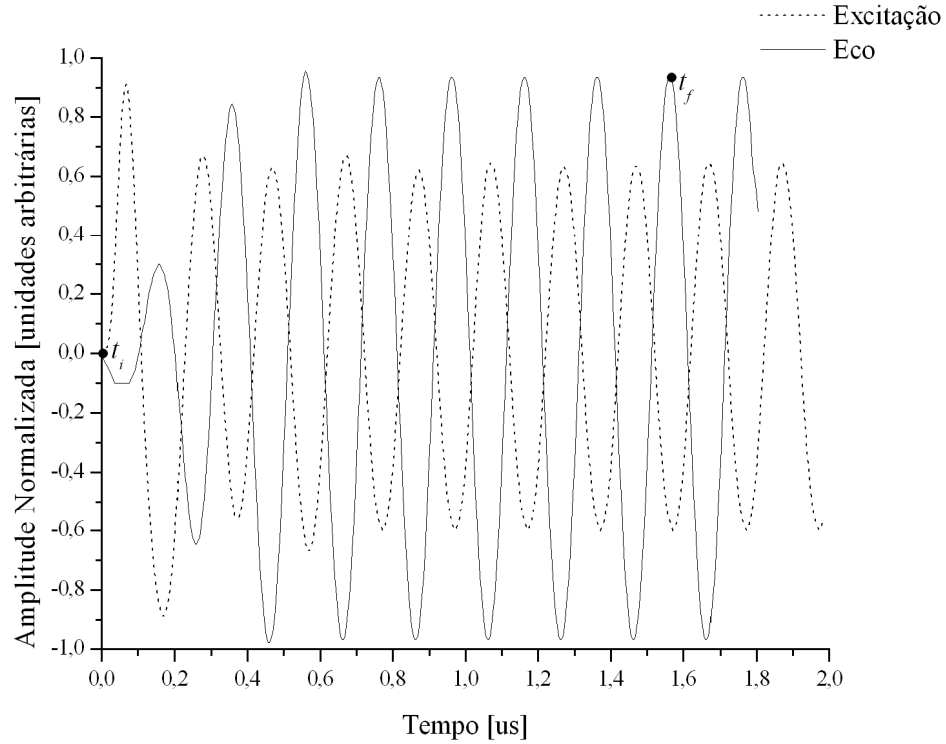


Figura 3.2 – Forma de onda, normalizada com relação ao pico, do sinal de excitação do transdutor e do sinal de eco, com deslocamento no tempo relativo de  $2d_1/c_0$  ( $c_0$  é a velocidade do som na água pura), ambos iniciando no instante  $t_i$ . A diferença de fase entre os dois sinais é proporcional ao seu atraso relativo no tempo para o instante  $t_f$ .

### 3.2.5- Expressão Final para a Fase da Função de Transferência do Transdutor $\angle T_i$

Assumindo as considerações prévias relacionadas aos termos de fase presentes na função de transferência de transmissão do transdutor auxiliar  $T_i$ , a fase é expressa por:

$$\angle T_i(\omega, d_1) = 0,5 \left\{ \frac{\pi}{2} + [\angle V_{open}(\omega, d_1) - \angle V(\omega)] - \angle Z(\omega) + \left( \frac{ka^2}{8d_1} - \frac{\pi}{2} \right) - \angle DS_n(\omega, d_1) \right\} \quad (3.16)$$

### 3.2.6- Análise do termo $DS_{th}$ na Expressão de $M_h$

O módulo de  $DS_{th}$ ,  $|DS_{th}|$ , é um fator que corrige a onda de pressão emitida pelo transdutor auxiliar e recebida pelo hidrofone, levando em conta a distância  $d_1$  entre o transdutor auxiliar de emissão e o hidrofone, assim como o elemento ativo de transmissão e recepção. BRENDEL E LUDWIG [15] mostram os valores de  $|DS_{th}|$  e os mesmos foram calculados conforme FAY [53].

A fase de  $DS_{th}$ ,  $\angle DS_{th}$ , pode ser representada pela distribuição de pressão sobre o eixo de transdutor do tipo pistão plano e devido à difração. Analogamente ao exposto por VAN NEER et al. [50] e considerando a distribuição de pressão mostrada na equação (3.10), a fase total adicionada ao longo do caminho de propagação entre o transdutor auxiliar de emissão e o transdutor de recepção (hidrofone) é obtida.

A fase de  $DS_{th}$ ,  $\angle DS_{th}$ , pode ser considerada como devida a dois efeitos, difração causada pela abertura finita do transdutor auxiliar e correção espacial devida à área de recepção do hidrofone quando da incidência de uma onda não plana. Portanto:

$$\angle DS_{th} = \phi_{thD} + \phi_{thA} \quad (3.17)$$

A contribuição de fase  $\phi_{thD}$  leva em conta a distribuição de pressão ao longo do eixo de um transdutor do tipo pistão plano e devido à difração. Analogamente à análise feita em 3.2.2 para  $\phi_{uD}$ , a fase  $\phi_{thD}$  é determinada da mesma maneira para a distância  $z = d_1$ , sendo portanto:

$$\phi_{thD} = -\left(\frac{ka^2}{4d_1} - \frac{\pi}{2}\right) \quad (3.18)$$

Para a análise de  $\phi_{thA}$ , pode ser utilizado o mesmo procedimento utilizado na análise de  $\phi_{tA}$ , considerando agora o transmissor e o receptor separados pela distância  $d_1$ , o que resulta em  $R_0 = \sqrt{d_1^2 + r^2}$ .



Portanto, a fase devida à correção espacial de um hidrofone com abertura finita recebendo uma onda de pressão não plana é definida por:

$$\phi_{thA} = \angle p(d_1, \theta = 0, \omega) - \angle \bar{p}(d_1, \omega) \quad (3.19)$$

com

$$\angle p(d_1, \theta = 0, \omega) = \frac{\pi}{2} - kd_1 \quad (3.20)$$

e

$$\angle \bar{p}(d_1, \omega) = \angle \frac{\iint_{abertura\_hidrofone} p(R_0 = \sqrt{d_1^2 + r^2}, \theta, \omega) \cdot r \cdot dr \cdot d\varphi}{\iint_{abertura\_hidrofhone} r \cdot dr \cdot d\varphi} \quad (3.21)$$

sendo  $r$  e  $\varphi$  as coordenadas polares de integração.

Considerando simetria circular do hidrofone, então a equação (3.21) é expressa por:

$$\angle \bar{p}(d_1, \omega) = \angle \frac{2 \cdot \int_0^{a_h} p(R_0 = \sqrt{d_1^2 + r^2}, \theta = \sin^{-1}(r/R_0), \omega) \cdot r \cdot dr}{a_h^2} \quad (3.22)$$

sendo  $a_h$  = raio do elemento ativo do hidrofone.

A equação (3.22) foi implementada computacionalmente e substituída na equação (3.19), resultou em  $\phi_{thA} \cong 0$ . Portanto:

$$\angle DS_{th} \cong - \left( \frac{ka^2}{4d_1} - \frac{\pi}{2} \right) \quad (3.23)$$

### 3.2.7- Análise do Termo $e^{-jkd_1}$ na Expressão da Fase $\angle M_h$ do Hidrofone

Utilizando uma análise análoga à que foi feita para a determinação da fase da função de transferência do transdutor auxiliar de emissão  $\angle T_t$ , o termo  $e^{-jkd_1}$  pode também ser ignorado na equação (3.7) que determina a fase da sensibilidade do

hidrofone. Assim a diferença de fase entre os sinais  $V_h$  e  $V$ , denotada por  $[\angle V_h - \angle V]$ , é obtida pela diferença de fase relativa entre ambos os sinais para um instante de tempo suficientemente afastado para que a análise seja feita em regime permanente. Desconsiderando o termo  $e^{-jkd_1}$  na equação (3.7), a fase  $\angle M_h$  é expressa por:

$$\angle M(\omega)_h = [\angle V_h(\omega) - \angle V(\omega)] - \angle T_r(\omega) + \left( \frac{ka^2}{4d_1} - \frac{\pi}{2} \right) \quad (3.24)$$

### 3.3- Incerteza de Medição

Quando se relata o resultado de medição de uma grandeza física é necessária alguma indicação quantitativa da qualidade do resultado de medição, para que o usuário final deste resultado de medição possa avaliar a sua confiabilidade. Na ausência desta indicação, resultados diversos de medição não podem ser comparados, sejam eles comparados entre si ou com outros valores assumidos como sendo de referência. É necessário um procedimento implementado, de aceitação geral para caracterizar a qualidade de um resultado de medição, para avaliar e expressar a incerteza de medição.

A incerteza de medição, segundo o VIM 2012 [1], “é um parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas”. A incerteza assim pode ser considerada como um parâmetro associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos a um mensurando.

A incerteza de um resultado de medição reflete a falta de conhecimento exato do valor do mensurando. Em muitas aplicações industriais, saúde e segurança, por exemplo, é necessário fornecer um intervalo de valores em torno do resultado de medição com o qual é esperado abranger uma parcela da distribuição de valores, o qual pode razoavelmente ser atribuído ao mensurando a ser medido.

A universalização do cálculo de incerteza é importante para garantir que as medições realizadas em locais diferentes possam ser comparadas. O Guia para a Expressão da Incerteza da Medição [56] foi o texto de referência utilizado para expressar a incerteza de maneira universalmente aceita.

De maneira geral, um mensurando  $Y$  não é obtido diretamente por medição, mas determinado a partir de  $N$  outras grandezas de entrada  $X_1, X_2, \dots, X_N$ , especificado por uma função  $f$ .

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (3.25)$$

### 3.3.1- Incerteza de Medição do Cálculo da Sensibilidade do Hidrofone

A incerteza de medição do cálculo da sensibilidade do hidrofone é feita em duas etapas, uma para o cálculo do módulo e outra para o cálculo da fase. Com  $m$  representando  $|M_h|$  ou  $\angle M_h$ , a incerteza padrão combinada de medição,  $u_c$ , é obtida conforme segue:

$$u_c = \sqrt{(u_{tipoA}^m)^2 + (u_{tipoB}^m)^2} \quad (3.26)$$

com  $u_{tipoA}^m$  e  $u_{tipoB}^m$  significando respectivamente as incertezas do Tipo A e do Tipo B.

Para  $n$  medições independentes de  $m$ , em condições de repetibilidade, a incerteza do Tipo A,  $u_{tipoA}^m$ , é calculada como:

$$u_{tipoA}^m = \frac{s(m_1, \dots, m_n)}{\sqrt{n}} \quad (3.27)$$

onde  $m_1, \dots, m_n$  são  $n$  medições independentes de  $m$  e  $s$  é o desvio padrão deste conjunto de medições.

Com relação à incerteza do Tipo B, a mesma é calculada por:

$$u_{\text{tipoB}}^m = \max(u_{\text{tipoB}_1}^m, \dots, u_{\text{tipoB}_n}^m) \quad (3.28)$$

onde  $\max(\cdot)$  refere-se ao valor máximo das incertezas do Tipo B de  $n$  medições de  $m$ .

Adicionalmente  $u_{\text{tipoB}_j}^m$ , para  $1 \leq j \leq n$ , é obtido por:

$$u_{\text{tipoB}_j}^m = \sqrt{\sum_{k=1}^L \left( \frac{\partial m_j}{\partial x_k} \right)^2 u_{x_k}^2} \quad (3.29)$$

com  $x_k$ , para  $1 \leq k \leq L$ , consistindo de todas as variáveis que fazem parte da equação representada por  $m$ , tal como descrito na equação (3.6) para  $|M_h|$  e equação (3.24)  $\angle M_h$ , e  $u_{x_k}$  representando a incerteza padrão do Tipo B na medição de  $x_k$ .

Em uma medição os graus de liberdade efetivos,  $\nu_{\text{eff}}$ , são obtidos por:

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u_c^4(y)}{\left( \frac{(u_{\text{tipoA}}^m)^4}{n-1} + \frac{(u_{\text{tipoB}}^m)^4}{\nu} \right)} \quad (3.30)$$

Para uma incerteza do Tipo B com distribuição retangular, os graus de liberdade  $\nu$  tendem ao infinito [56].

A incerteza expandida  $U_m$  de  $m$  com nível de confiança 95%, a qual corresponde a um fator de abrangência  $k$ , para um número de graus de liberdade efetivos especificado pela equação (3.30) [56], é expressa por:

$$U_m = k u_c \quad (3.31)$$

Na equação (3.31)  $k$  é o valor da distribuição  $t$  para, para  $\nu_{\text{eff}}$  graus de liberdade efetivos, que define um intervalo  $-k$  a  $+k$  para um nível de confiança especificado [56]. Para os casos em que o valor de  $k$  é menor do que 2, para simplificar os cálculos,  $k$  foi arredondado para 2, o que na prática garante um nível de confiança para o intervalo maior do que 95%.

A incerteza porcentual de toda a medição é expressa por:

$$U_m (\%) = \frac{100U_m}{\text{média}(m_1, \dots, m_N)} \quad (3.32)$$

### 3.4- Erro Normalizado

Um resultado de medição deve ser analisado com relação à qualidade, sendo para isto necessário que o laboratório executor disponha de meios e critérios objetivos para demonstrar que o procedimento de calibração executado produz resultados confiáveis e adequados ao nível de excelência metrológica dominada pelo próprio.

Dentro desse conceito um parâmetro estatístico utilizado para validação do resultado de medição ( $Y$ ) é o erro normalizado [57], comparado o resultado sob análise a um resultado de medição de referência ( $Y_{ref}$ ) com incerteza expandida ( $U_{ref}$ ). É determinado como segue:

$$E_n = \frac{|Y - Y_{ref}|}{\sqrt{U^2 + U_{ref}^2}} \quad (3.33)$$

Caso  $E_n$  seja menor ou igual a 1 o resultado de medição é considerado adequado [57].

## **4- Metodologia de Teste e Materiais**

Neste capítulo são descritas as etapas necessárias para a execução do procedimento de calibração da sensibilidade de hidrofones através do levantamento do módulo e fase da sua sensibilidade. O objetivo da realização experimental foi verificar se os valores medidos do módulo da sensibilidade estão em conformidade com os valores calibrados pelo NPL, usando o erro normalizado como parâmetro estatístico de comparação. Foi desenvolvido um arranjo experimental para execução do procedimento de calibração da sensibilidade de hidrofones de ultrassom por reciprocidade em módulo e fase.

### **4.1- Arranjo Experimental de Medição**

A figura 4.1 mostra um diagrama esquemático do arranjo experimental de medição. O procedimento consiste em inicialmente medir a impedância do transdutor,  $Z$  e a impedância de curto-circuito,  $Z_k$ , utilizando um analisador de impedância vetorial (4294A, Agilent Technologies, Santa Clara, CA). Posteriormente o transdutor auxiliar e o refletor (cilindro de aço inoxidável com diâmetro e comprimento de 80 mm) foram totalmente submersos no tanque acústico de medição, a uma profundidade maior ou igual a 100 mm da superfície da água, com a face do refletor perpendicular ao eixo de simetria do feixe transmitido pelo transdutor de ultrassom na região de campo distante. O alinhamento entre o transdutor e o refletor é baseado na maximização da amplitude do sinal de eco que retorna da face plana do alvo cilíndrico refletor.

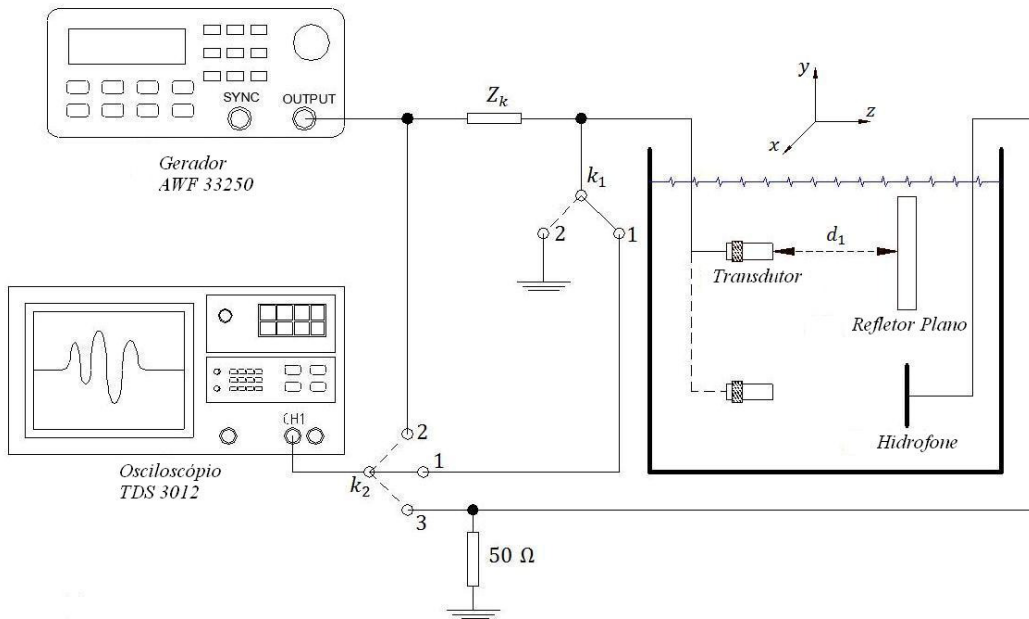


Figure 4.1: Diagrama do arranjo experimental usado para a calibração da sensibilidade de um hidrofone, com transdutor auxiliar, refletor e hidrofone imersos em um tanque com água. A função de transferência do transdutor auxiliar é determinada com as chaves  $k_1$  e  $k_2$  na posição 1 para detecção de  $V$  e  $V_{open}^*$ . Então  $k_1$  e  $k_2$  são movidas para a posição 2 para detecção de  $V_k$  e finalmente  $k_1$  e  $k_2$  são movidas para as posições 1 e 3, respectivamente, para detecção de  $V_h$  com o transdutor auxiliar colocado em frente ao hidrofone. Transdutor auxiliar e refletor e posteriormente transdutor auxiliar e hidrofone estão separados pela distância  $d_1$ . A impedância de entrada do osciloscópio foi ajustada para  $1M\Omega$  enquanto o hidrofone é carregado com  $50\Omega$ .

Em seguida um *burst* senoidal é aplicado ao transdutor auxiliar (20 ciclos de pulso e taxa de repetição de pulso de 100 Hz) com o uso de um gerador de ondas arbitrárias (AWF 33250, Agilent Technologies, Santa Clara, CA, EUA), com o nível do sinal de saída ajustado no painel do gerador para 20 V pico a pico com a saída do gerador em aberto. O sinal de saída,  $V$ , do gerador de ondas arbitrárias é aplicado ao

transdutor auxiliar e o sinal de eco refletido,  $V_{open}^*$ , que retorna do alvo refletor, assim como o sinal de tensão de excitação sobre o transdutor são detectados pelo osciloscópio digital TDS 3012B (Tektronix Inc., Beaverton, OR), com frequência de amostragem de 5 GS/s. O próximo passo consistiu na medição da tensão de curto circuito,  $V_k$ , sobre a impedância,  $Z_k$ , com o transdutor substituído por um curto-circuito.

Com  $V_k$  determinado, então,  $V_{open}$  é determinado como segue:

$$V_{open} = \frac{I_k}{I} V_{open}^* \quad (4.1)$$

onde  $I_k$  é a corrente circulante em  $Z_k$  com o transdutor substituído por um curto-circuito,  $I$  é a corrente circulante no transdutor quando excitado com tensão  $V$  do gerador.

Com a finalização das medições de  $V$ ,  $V_{open}^*$  e  $V_k$ , o procedimento passa à análise do hidrofone a ser calibrado, que também está imerso no tanque com água com o seu elemento ativo no mesmo plano da face do alvo refletor e distante 180 mm do eixo de simetria do alvo refletor. Posteriormente o transdutor auxiliar é movimentado lateralmente para ficar localizado em frente ao hidrofone, sendo este alinhado com o feixe de transmissão do transdutor auxiliar pela maximização da amplitude do seu sinal de saída. O transdutor auxiliar mantém a excitação  $V$  do gerador de ondas arbitrárias, com a tensão de saída,  $V_h$ , do hidrofone também detectada pelo osciloscópio.



A medição de  $V$ ,  $V_{open}^*$ ,  $V_k$  e  $V_h$  corresponde a tensão RMS calculada em intervalo de no mínimo 8 ciclos iniciados em um instante contado a partir do quinto ou sexto ciclo do sinal correspondente de RF. Esta é a condição de medição que garante que o transdutor esteja em seu estado permanente de funcionamento, uma vez que o período inicial do seu funcionamento é afetado pelo transiente de vibração da sua face provocado pelo degrau de tensão no início do pulso do sinal de RF. O transdutor inicia a vibração de face no mesmo instante de tempo inicial,  $t_i$ , a cada *burst* emitido independente da frequência da função seno. No instante de tempo final,  $t_f$ , depois de  $t_i$ , os efeitos transientes da função degrau para a vibração de face do transdutor são reduzidos, conseqüentemente o transdutor passa a vibrar devido à função seno (estado permanente).

Os sinais  $V_{open}^*$  e  $V_h$ , são deslocados no tempo para medir o atraso relativo de fase destes sinais com relação ao sinal de excitação  $V$ . O tempo inicial dos sinais do hidrofone e do eco são obtidos e sobrepostos no mesmo tempo inicial,  $t_i$ .

O procedimento adotado para obter o tempo inicial de cada sinal baseia-se na obtenção dos tempos  $t_{max}$  e  $t_{min}$ , relacionados ao primeiro máximo e mínimo local do sinal correspondente de RF que ultrapasse 2,7% do sinal normalizado com relação ao seu pico. Este valor foi obtido empiricamente durante a realização dos experimentos e é decorrente do ruído de medição do sistema. O período  $T = 2|t_{max} - t_{min}|$  do sinal de RF é medido e o tempo inicial  $t_i$  é determinado, conforme:

$$t_i = \begin{cases} t_{max} - T/4, & t_{max} < t_{min} \\ t_{min} - T/4, & t_{min} < t_{max} \end{cases} \quad (4.2)$$

A temperatura da água foi medida utilizando-se um termômetro (Hygropalm 3, Rotronic AG, Bassersdorf, Switzerland) com o probe de medição localizada a pelo menos 100 mm abaixo do nível da água. O coeficiente de reflexão do alvo refletor cilíndrico foi calculado baseado no procedimento para o cálculo e medição do coeficiente de reflexão ultrassônico de um cilindro de aço inoxidável [58]. A distância  $d_1$  foi escolhida satisfazendo o critério de que  $1,5N \leq 2d_1 \leq 3,0N$  [2], com  $N = a^2/\lambda$  sendo igual à distância a partir do transdutor de emissão para a qual o campo de pressão acústico e a velocidade de partícula estão em fase.

O coeficiente de atenuação da água,  $\alpha$  [ $\text{np}\cdot\text{m}^{-1}$ ] foi determinado conforme [2]:

$$\frac{\alpha}{f^2} = (568524 - 3,02545T + 0,117416T^2 - 2,954310^3 \cdot T^3 + 3,9698510^5 \cdot T^4 - 2,1109110^7 \cdot T^5) \cdot 10^{-15} \quad (4.3)$$

com  $f$  igual a frequência do sinal de ultrassom, em Hz,  $T$  a temperatura da água em °C.

A velocidade da onda de ultrassom na água,  $c_0$ , foi calculada [59], desconsiderando a dispersão [50], conforme a seguir:

$$c_0 = 1,402387440^3 + 5,0383617T - 5,811729160^2 \cdot T^2 + 3,346381170^4 \cdot T^3 - 1,482596720^6 \cdot T^4 + 3,16585020^9 \cdot T^5 \quad (4.4)$$

#### 4.2- Protocolo para Montagem do Sistema de Medição

A calibração do hidrofone utilizou seis transdutores auxiliares de imersão (Olympus Panametrics-NDT, Center Valley, PA, EUA), cinco deles com frequência nominal (MHz) de 1,0 (model A302s), 2,25 (A306s), 3,5 (A382s), 5,0 (A309s) e 7,5 (A320s). O transdutor de 1,0 MHz tem diâmetro nominal de 1,0 polegadas, enquanto que os demais têm diâmetro nominal de 0,5 polegadas. Adicionalmente foi utilizado um segundo transdutor auxiliar em 5,0 MHz (modelo V309) com diâmetro nominal de 0,5

polegadas para testar a robustez do procedimento de calibração proposto, ou seja, a independência do transdutor auxiliar de emissão.

Dois hidrofones de membrana de PVDF, com elemento ativo de 15  $\mu\text{m}$  de espessura e 0,4 mm de diâmetro, foram calibrados na faixa de 1 a 7 MHz, em intervalos de 1 MHz. Os hidrofones UC 1604-029 e UC 1604-068 (Precision Acoustics, Dorchester, Dorset, UK), foram previamente calibrados em módulo da sensibilidade no NPL.

Foram realizadas quatro medições (repetições) da tensão de saída do transdutor auxiliar na recepção do pulso (tensão devida à reflexão no alvo refletor), da tensão quando o transdutor é substituído por um curto-circuito e da tensão de saída do hidrofone em calibração. Para garantir a repetibilidade das medições, o hidrofone em calibração deve ser retirado e recolocado no sistema entre cada uma das quatro repetições. O hidrofone em calibração e o transdutor de emissão devem ficar imersos na água por pelo menos uma hora antes do início da primeira medição.

O transdutor e o alvo refletor devem ficar totalmente submersos, pelo menos 100 mm abaixo do nível de água do tanque. A figura (4.2) mostra um esboço do sistema de calibração por reciprocidade com a face do hidrofone localizado no mesmo plano da face do alvo refletor, e o transdutor de emissão com posicionadores para efetuar o alinhamento.

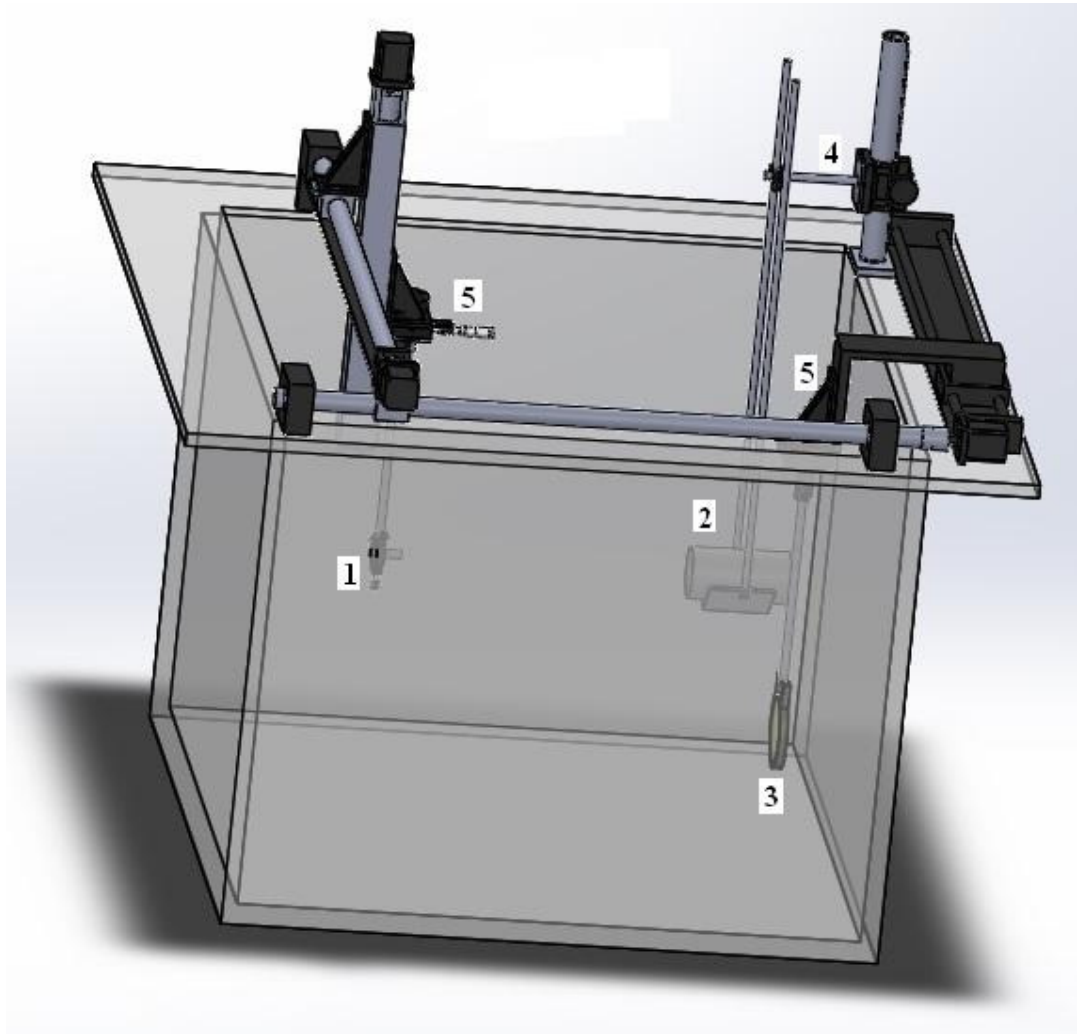


Figura 4.2: Esboço do sistema de calibração por reciprocidade: 1-Transdutor de emissão, 2- Alvo refletor, 3-Hidrofone, 4-Suporte para o alvo refletor, 5-Sistema de posicionamento.

O passo a passo para a realização das medições, baseando-se no esquema da figura 4.1, foi executado conforme a seguir:

- 1) ligar o computador, o osciloscópio, o gerador de funções, o termohigrômetro e aguardar pelo menos 1 hora para a estabilização térmica da instrumentação;
- 2) fixar o transdutor no suporte apropriado e este ao eixo de alinhamento;
- 3) fixar o alvo refletor no suporte apropriado;

- 4) ligar o transdutor à impedância série e esta à saída do gerador de funções;
- 5) ligar a saída “trigger” do gerador de funções à entrada “*external trigger*” do osciloscópio;
- 6) fixar o hidrofone no suporte apropriado e este ao eixo de alinhamento. A região central da face do elemento ativo do hidrofone deve estar localizada a aproximadamente 180 mm do centro geométrico da face do alvo refletor na direção do eixo horizontal (*eixo-x*);
- 7) realizar conexões do hidrofone com o osciloscópio e aguardar pelo menos uma hora para o início das medições;
- 8) realizar a verificação periódica do conjunto gerador e osciloscópio conforme descrito em 4.2.1. O osciloscópio, o gerador de funções e computador são interligados via interface de comunicação GPIB;
- 9) na aba “Ajusta Gerador” do programa Cal\_Hidrofone-Rec.vi, em LabView (LabView 2012, National Instruments Corporation, Austin, EUA), definir o parâmetro “Frequência” de acordo com a frequência em que o hidrofone será calibrado;
- 10) na aba “Ajusta Gerador” do programa Cal\_Hidrofone-Rec.vi definir o parâmetro “Amplitude” para 20 V pico a pico;
- 11) na aba “Ajusta Gerador” do programa Cal\_Hidrofone-Rec.vi definir o parâmetro “Ciclos” para 20;
- 12) na aba “Ajusta Gerador” definir o parâmetro “frequência do *burst*” para 100 Hz;
- 13) manter os demais parâmetros com os valores com os quais foram inicializados;
- 14) mover o transdutor no eixo  $z$  até a posição  $d_1$  de afastamento do alvo refletor. A distância  $d_1$  deve ser determinada usando-se a fórmula  $N = a^2 / \lambda$ , onde  $a$  é o raio efetivo do transdutor e  $\lambda$  é dado por  $\lambda = c / f$ , onde  $c$  é a velocidade de propagação do

ultrassom na água e  $f$  a frequência de operação do transdutor. A distância  $d_1$  deve estar no intervalo a seguir especificado  $1,5N \leq 2d_1 \leq 3,0N$  [2];

15) na aba “Calcula Sensibilidade”, clicar no botão [abrir] e selecionar o arquivo com a impedância do transdutor que está sendo utilizado;

16) na aba “Calcula Sensibilidade”, clicar no botão [abrir] e selecionar o arquivo da impedância série que está sendo utilizada ( $Z_k$ );

17) na aba “Calcula Sensibilidade”, inserir a temperatura da água e a posição do último mínimo do transdutor;

18) na aba “Medições” selecionar o Controle “Canal de Medição”; os parâmetros não mencionados da aba “Medições” deverão ser mantidos conforme inicializados;

19) no controle “Escala Vertical” selecionar a escala vertical para visualizar a forma de onda na tela do osciloscópio;

20) selecionar o Controle “Atraso” para o valor correspondente à distância  $2d_1$ ;

21) selecionar o Controle medições para “Atraso de eco – Delay [s]”;

22) clicar no botão [Registra Valor];

23) Na aba “Calcula Sensibilidade”, clicar no botão [Calcula  $G1$   $G2$ ]; onde  $G1 = DS_{th}$  e  $G2 = DS_{th}$ ;

24) selecionar o Controle medições para “Tensão de eco -  $V_{eco}[V]$ ”, onde  $V_{eco}[V] = V_{open}^*[V]$  selecionar os controles “Escala Horizontal” e “Atraso” de maneira que no mínimo 8 ciclos iniciados em um instante contado a partir do quinto ou sexto ciclo do sinal correspondente de RF (*Burst*) estejam centralizados na tela do osciloscópio;

25) alinhar o transdutor com o alvo refletor (conforme o item 4.2.2);

26) selecionar o Controle medições para “Tensão de Eco -  $V_{eco}[V]$ ”;

- 27) clicar no botão [Registra Valor];
- 28) substituir o transdutor por um curto-circuito;
- 29) selecionar o controle medições para “Tensão de curto-circuito –  $V_k$  [V]”;
- 30) clicar no botão [Registra Valor];
- 31) substituir o curto-circuito pelo transdutor;
- 32) selecionar o Controle medições para “Eco (*waveform*) - Fase”, selecionar o controle “Atraso” de maneira que seja mostrada a transição de início do sinal de eco com pelo menos 6 ciclos;
- 33) clicar no Botão [Registra Valor];
- 34) selecionar o Controle medições para “Tensão de Alimentação do Tx –  $V_{in}$  [V].  $V_{in}$  [V] =  $V[V]$ ”, selecionar os controles “Escala Horizontal” e “Atraso” conforme descrito em 24).
- 35) clicar no Botão [Registra Valor];
- 36) selecionar o controle medições para “Excitação *Waveform* – Fase”, selecionar o controle “Atraso” de maneira que seja mostrada a transição de início do sinal de excitação com pelo menos 6 ciclos;
- 37) clicar no Botão [Registra Valor];
- 38) deslocar o transdutor ao longo do eixo horizontal (*eixo-x*) até o alinhamento visual do centro geométrico da face do transdutor com a região central da face do elemento ativo do hidrofone, mantendo a posição do *eixo-z* e do *eixo-y* fixas;
- 39) alinhar o Transdutor com o Hidrofone (conforme o item 4.2.3);
- 40) selecionar o controle medições para “Tensão do hidrofone –  $V_h$  [V]”, selecionar os controles “Escala Horizontal” e “Atraso” conforme descrito em 24);
- 41) clicar no Botão [Registra Valor];

- 42) selecionar o controle medições para “Hidrofone *Waveform* – Fase”, selecionar o controle “Atraso” de maneira que seja mostrado a transição de início do sinal do hidrofone com pelo menos 6 ciclos;
- 43) clicar no Botão [Registra Valor];
- 44) na aba “Calcula Sensibilidade”, ajustar a escala de tempo no gráfico para que os sinais sejam mostrados a partir do sexto ciclo do sinal;
- 45) clicar no Botão [Cursores] para que as fases dos sinais de eco e do hidrofone sejam obtidas; e
- 46) realizar este procedimento completo 4 vezes para a determinação do valor do módulo da sensibilidade do hidrofone e respectiva incerteza.

#### **4.2.1- Verificação Periódica do Conjunto Gerador e Osciloscópio**

A verificação periódica do conjunto gerador e osciloscópio deve ser realizada antes da execução de cada procedimento de medição. Essa verificação periódica é evidenciada preenchendo-se a planilha verificação periódica (tabelas 4.1 e 4.2). Os dados contidos na aba “Verificação Referência” (tabela 4.3) devem ter sido preenchidos anteriormente a esta verificação. Os valores da Aba “Verificação Referência” constituem o histórico de valores para o equipamento utilizado, que irá definir a média ( $\mu$ ) e o desvio padrão ( $\sigma$ ) a serem utilizados para verificação do equipamento no dia de medição. Foram escolhidos três desvios padrão como critério para aceite do valor indicado pelo equipamento no dia da verificação. Três desvios padrão significam que para uma distribuição normal, o intervalo  $\mu \pm 3\sigma$  abrange 99,73% da distribuição de valores. Caso o gerador de sinais e o osciloscópio não sejam aqueles descritos na figura 4.1, os comandos e denominação dos canais podem diferir, mas sua funcionalidade deve ser a mesma.



#### 4.2.1.1.- Verificação Periódica do Parâmetro “Amplitude de Tensão Elétrica”

- 1) conectar a saída “Output” do gerador de funções ao *Shunt in line* de 50  $\Omega$  e este à entrada “CH1” do osciloscópio;
- 2) ligar a saída “trigger” do gerador de funções à entrada “external trigger” do osciloscópio
- 3) ajustar a frequência do gerador para 1 MHz;
- 4) anotar na aba “Verificação Periódica” da planilha o dia da medição;
- 5) ajustar o valor de tensão elétrica medida pico a pico para o menor valor constante na aba “Verificação Periódica”, medida pico a pico com alta impedância de saída (valor “High Z” no parâmetro “Load” no botão de ajuste “Utility” no painel frontal do gerador);
- 6) anotar na aba “Verificação Periódica” da planilha o valor de tensão elétrica eficaz;
- 7) repetir os itens 4) e 5) para as demais tensões elétricas da aba “Verificação Periódica”; e
- 8) caso a célula onde foi anotada a tensão na aba “Verificação Periódica” apresente-se na cor cinza claro, é o indicativo de que conjunto gerador e osciloscópio atende aos requisitos da verificação de acordo com este procedimento; caso a célula apresente-se sem a marcação cinza claro, o caso deve ser analisado em particular.

Tabela 4.1 - Planilha verificação periódica. Aba “Verificação Periódica”. Verificação do parâmetro amplitude da tensão elétrica.

Verificação do Conjunto Gerador e Osciloscópio - Tensões [V] - Referência 1 MHz -							
Valor nominal	Num DesvPad	0,0100	0,1000	1,0000	5,0000	10,0000	20,0000
Referência		0,0019	0,0174	0,1744	0,8814	1,7668	3,5399
$\mu\pm 3\sigma$	3	0,0001	0,0002	0,0015	0,0069	0,0163	0,0281
23/1/2014		0,0019	0,0173	0,1729	0,8848	1,7745	3,5370
27/2/2014		0,0019	0,0175	0,1753	0,8845	1,7690	3,5450
27/3/2014		0,0019	0,0175	0,1749	0,8829	1,7600	3,5300
24/4/2014		0,0019	0,0175	0,1749	0,8829	1,7600	3,5300
29/5/2014		0,0019	0,0174	0,1743	0,8806	1,7640	3,5350

#### 4.2.1.2. - Verificação Periódica do Parâmetro “Frequência”

- 1) conectar a saída “Output” do gerador de funções ao *Shunt in line* de 50  $\Omega$  e este à entrada “CH1” do osciloscópio;
- 2) ligar a saída “trigger” do gerador de funções à entrada “external trigger” do osciloscópio;
- 3) ajustar o parâmetro de amplitude do gerador para a tensão elétrica de saída de 20 V medida pico-a-pico com alta impedância de saída (valor “High Z” no parâmetro “Load” no botão de ajuste “Utility” no painel frontal do gerador);
- 4) anotar na aba “Verificação Periódica” da planilha o dia da medição;
- 5) ajustar a frequência do gerador para o menor valor constante na referida planilha de verificação;
- 6) anotar na aba “Verificação Periódica” da planilha “ o valor da frequência medida;
- 7) repetir os itens 4) e 5) para as demais frequências da planilha; e
- 8) caso a célula onde foi anotada a frequência apresente-se na cor cinza claro, é o indicativo de que o conjunto gerador e osciloscópio atende aos requisitos da verificação de acordo com este procedimento; caso a célula apresente-se sem a marcação cinza claro, o caso deve ser analisado em particular.

Tabela 4.2 - Planilha verificação periódica. Aba “Verificação Periódica”. Verificação do parâmetro frequência.

		Verificação do Conjunto Gerador e Osciloscópio - Frequências [MHz] - Referência 20 Vpp -					
Valor nominal	Num DesvPad 3	0,5000	1,0000	2,0000	3,0000	4,0000	5,0000
Referência $\mu\pm 3\sigma$		0,4997	0,9998	1,9999	2,9994	3,9989	5,0001
23/1/2014		0,4990	0,9998	1,9990	3,0000	3,9990	4,9990
27/2/2014		0,5000	0,9990	2,0000	3,0000	3,9990	5,0000
27/3/2014		0,4997	0,9990	2,0000	3,0010	3,9980	5,0010
24/4/2014		0,4996	0,9990	2,0010	3,0020	4,0000	4,9990
29/5/2014		0,5000	1,0000	1,9999	3,0010	3,9990	4,9990

Tabela 4.3 - Planilha verificação periódica. Aba “Verificação Referência”

Referência Gerador	1 MHz					
<b>Tensão Gerador [V]</b>	<b>0,0100</b>	<b>0,1000</b>	<b>1,0000</b>	<b>5,0000</b>	<b>10,0000</b>	<b>20,0000</b>
Medição 1	0,0018	0,0173	0,1740	0,8790	1,7600	3,5300
Medição 2	0,0019	0,0173	0,1739	0,8791	1,7610	3,5300
Medição 3	0,0019	0,0173	0,1739	0,8792	1,7610	3,5300
Medição 4	0,0019	0,0173	0,1740	0,8800	1,7700	3,5400
Medição 5	0,0019	0,0175	0,1751	0,8846	1,7740	3,5530
Medição 6	0,0019	0,0175	0,1753	0,8848	1,7745	3,5540
Medição 7	0,0019	0,0174	0,1748	0,8834	1,7700	3,5470
Medição 8	0,0019	0,0174	0,1747	0,8828	1,7690	3,5450
Medição 9	0,0019	0,0174	0,1743	0,8806	1,7640	3,5350
Medição 10	0,0019	0,0174	0,1743	0,8805	1,7640	3,5350
<b>Média [V]</b>	<b>0,0019</b>	<b>0,0174</b>	<b>0,1744</b>	<b>0,8814</b>	<b>1,7668</b>	<b>3,5399</b>
<b>Desvio padrão [V]</b>	<b>0,00003</b>	<b>0,0001</b>	<b>0,0005</b>	<b>0,0023</b>	<b>0,0054</b>	<b>0,0094</b>
Referência Gerador	20 V pico a pico					
<b>Frequência do Gerador [MHz]</b>	<b>0,5000</b>	<b>1,0000</b>	<b>2,0000</b>	<b>3,0000</b>	<b>4,0000</b>	<b>5,0000</b>
Medição 1	0,5000	1,0000	2,0000	3,0000	4,0000	5,0000
Medição 2	0,4990	1,0000	2,0000	2,9900	3,9990	5,0020
Medição 3	0,4990	0,9990	2,0010	3,0010	3,9970	5,0010
Medição 4	0,4990	1,0010	1,9980	3,0030	3,9980	5,0020
Medição 5	0,4997	1,0000	2,0000	2,9990	4,0010	4,9990
Medição 6	0,4998	0,9980	2,0000	3,0000	3,9990	5,0000
Medição 7	0,5002	0,9997	2,0010	2,9980	3,9990	4,9990
Medição 8	0,5001	0,9998	1,9990	3,0010	3,9980	5,0000
Medição 9	0,5000	1,0000	1,9999	3,0010	3,9990	4,9990
Medição 10	0,5000	1,0000	1,9999	3,0010	3,9990	4,9990
<b>Média [MHz]</b>	<b>0,4997</b>	<b>0,9998</b>	<b>1,9999</b>	<b>2,9994</b>	<b>3,9989</b>	<b>5,0001</b>
<b>Desvio padrão [MHz]</b>	<b>0,0005</b>	<b>0,0008</b>	<b>0,0009</b>	<b>0,0036</b>	<b>0,0011</b>	<b>0,0012</b>

#### 4.2.2- Alinhamento entre Transdutor e Alvo Refletor

O sistema de movimentação dos eixos do transdutor e do alvo refletor deve ser utilizado para maximizar o valor da tensão de saída eficaz do transdutor usando o parâmetro “measure” do osciloscópio, conforme descrito a seguir:

- 1) apoiar o alvo refletor no suporte apropriado com a face frontal paralela ao plano  $x$ - $y$ ;
- 2) aproximar o transdutor do alvo refletor, posicionar o centro geométrico da sua face paralelo ao centro geométrico da face do alvo refletor e posteriormente deslocar o transdutor (*eixo-z*) para a distância  $d_1$ . O *eixo-z* é o eixo de simetria do feixe (figura 4.1);
- 3) fixar o transdutor na distância  $d_1$ ;
- 4) realizar a rotação do transdutor em torno do eixo vertical (*eixo-y*) até a maximização da amplitude em tensão do sinal refletido no alvo refletor;
- 5) realizar o *tilt* do transdutor, sendo *tilt* a mudança da inclinação do eixo normal à face do transdutor em relação ao *eixo-z* do transdutor, até a maximização da amplitude em tensão do sinal refletido no alvo refletor;
- 6) repetir o item 4);
- 7) medir e anotar o valor da amplitude de tensão do sinal refletido no alvo refletor na tabela 4.4 ;
- 8) fixar o transdutor na distância  $(d_1 + 10)$ mm;
- 9) repetir os itens 4) a 6) deste procedimento;
- 10) deslocar o transdutor para a distância  $d_1$ ;
- 11) repetir os itens 4) a 6) deste procedimento;

- 12) medir e anotar o valor da amplitude de tensão do sinal refletido no alvo refletor na tabela 4.4. Caso o módulo da diferença entre o valor da tensão encontrada no passo 12) e a encontrada no passo 7) seja menor ou igual a 2% do valor da tensão encontrada no passo 7), o sistema está alinhado, caso contrário repetir do passo 3) em diante até a maximização da tensão; e
- 13) com o transdutor e alvo refletor alinhados, prosseguir no passo 26) do item 4.2.

Tabela 4.4 - Tensão de alinhamento transdutor auxiliar – alvo refletor

Tensão [V]	Alinhamento Transdutor Auxiliar - Alvo refletor			
	V	V	V	V
item 7) 4.2.2	0,540	0,540	0,545	0,545
2% da Tensão do item 7)	0,011	0,011	0,011	0,011
item 12) 4.2.2	0,550	0,549	0,550	0,551
Diferença	0,0100	0,0090	0,0050	0,0060

#### 4.2.3- Alinhamento entre Transdutor e Hidrofone

O sistema de movimentação dos eixos deve ser utilizado para maximizar o valor da tensão de saída eficaz do hidrofone usando o parâmetro “measure” do osciloscópio, conforme descrito a seguir:

- 1) deslocar o hidrofone ao longo do *eixo-z* para a distância  $d_1$  entre o transdutor e o hidrofone;
- 2) fixar o hidrofone na posição  $d_1$ ;
- 3) deslocar o hidrofone ao longo do eixo horizontal (*eixo-x*) até a maximização da tensão de saída eficaz do hidrofone;
- 4) deslocar o hidrofone ao longo do eixo vertical (*eixo-y*) até a maximização da tensão eficaz de saída do hidrofone;
- 5) realizar a rotação do hidrofone em torno do *eixo-y* até a maximização da tensão de saída do hidrofone;

- 6) realizar o *tilt* do hidrofone, sendo *tilt* a mudança da inclinação do eixo normal à face do elemento ativo do hidrofone com relação ao *eixo-z*, até a maximização da tensão de saída do hidrofone;
- 7) repetir o item 5);
- 8) anotar o valor da tensão de saída do hidrofone na planilha;
- 9) deslocar o hidrofone para a posição  $(d_1 + 10)$ mm;
- 10) repetir os itens 3) a 7) deste procedimento;
- 11) deslocar o hidrofone para a posição  $d_1$  ;
- 12) repetir os itens de 3) a 7) deste procedimento;
- 13) anotar o valor da tensão de saída do hidrofone (tabela 4.5). Caso o módulo da diferença entre o valor da tensão de saída do hidrofone encontrada na etapa 13) e a encontrada na etapa 8) seja menor ou igual a 2% do valor da tensão encontrada na etapa 8), o sistema está alinhado. Caso contrário:
- 14) realizar a rotação do hidrofone em torno do *eixo-y* até a maximização da tensão;
- 15) realizar o *tilt* do hidrofone, sendo *tilt* a mudança da inclinação do eixo normal à face do elemento ativo do hidrofone com relação ao *eixo-z*, até a maximização da tensão;
- 16) repetir do passo 2) em diante até o alinhamento entre o transdutor e o hidrofone;
- 17) com o transdutor e hidrofone alinhados, prosseguir no passo 40) do item 4.2.

Tabela 4.5 - Tensão de alinhamento transdutor auxiliar – hidrofone

Alinhamento Transdutor Auxiliar - Hidrofone				
Tensão [V]	V	V	V	V
item 8) 4.2.3	0,00360	0,00360	0,00360	0,00360
2% da Tensão do item 8)	0,00007	0,00007	0,00007	0,00007
item 13) 4.2.2	0,00365	0,00365	0,00363	0,00363
Diferença	0,00005	0,00005	0,00003	0,00003

### 4.3- Transdutor, Hidrofone e Alvo Refletor Posicionados

As figuras 4.3 e 4.4 mostram o arranjo experimental do sistema de medição montado com o posicionamento do transdutor, hidrofone e alvo refletor. As figuras 4.5 e 4.6 mostram o janelamento dos sinais para a determinação do instante inicial,  $t_i$ , para os sinais do hidrofone e do eco refletido no alvo refletor, em função do critério estabelecido na seção 4.1 e equação (4.2). Para a frequência de 5,0 MHz os níveis de tensão eficazes foram obtidos para o intervalo de tempo entre 1,0  $\mu$ s e 3,0  $\mu$ s, conforme definido na seção 4.1.



Figura 4.3 – Arranjo experimental de medição com o alvo refletor, hidrofone e transdutor de emissão submersos em água no tanque acústico.

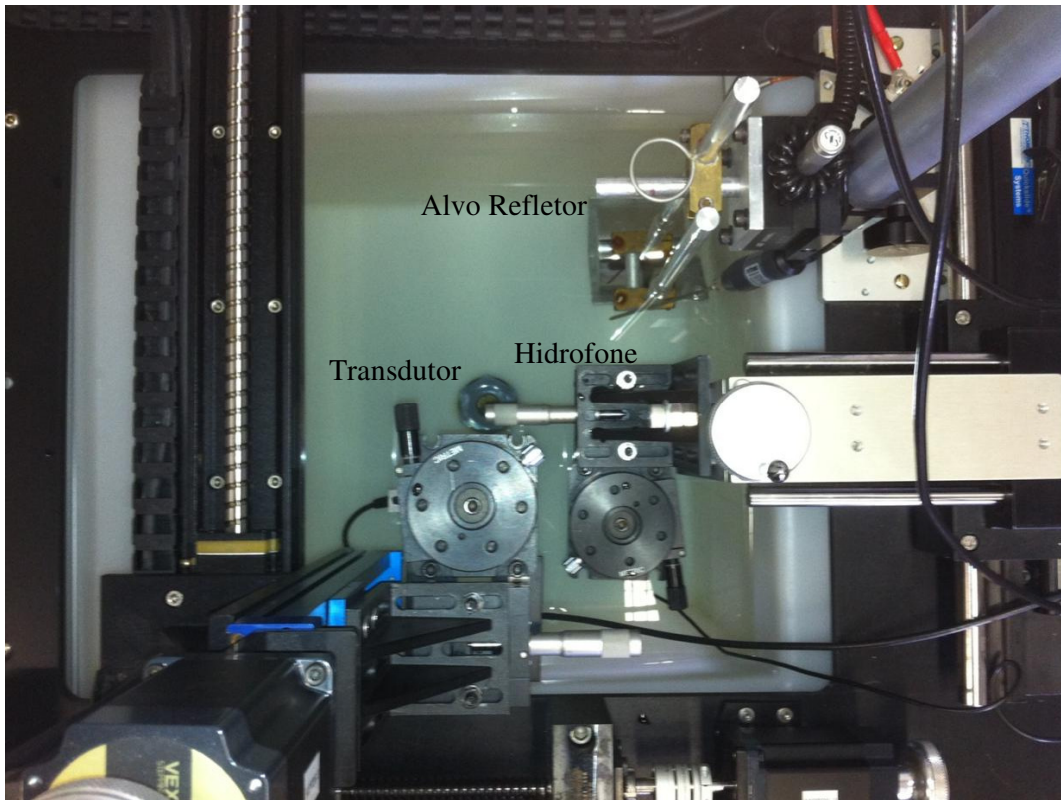


Figura 4.4 – Vista superior do sistema de medição montado com o hidrofone e o transdutor de emissão superpostos pelo sistema de posicionamento.

A figura 4.5 mostra os sinais *janelados* no tempo e superpostos para o mesmo instante inicial,  $t_i$ , do sinal de eco refletido no alvo (vermelho) e sinal do hidrofone (verde). As barras verticais em vermelho e verde indicam respectivamente o instante no tempo para a determinação do atraso de fase relativo do sinal de eco refletido e do hidrofone em estado permanente de funcionamento.



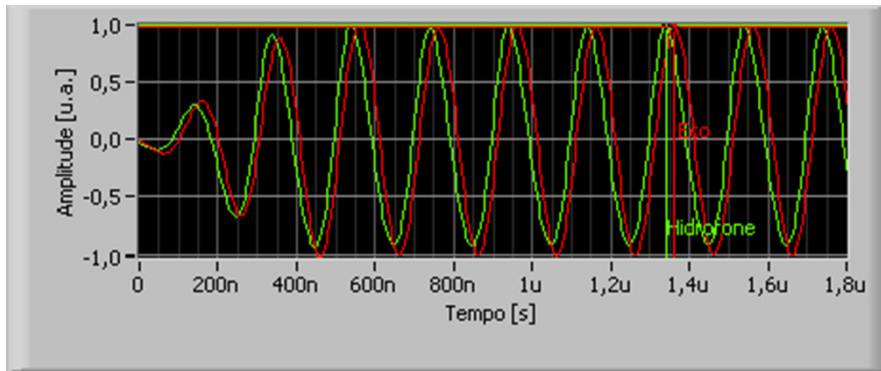


Figura 4.5 – Sinais *janelados* no tempo e superpostos para o mesmo instante inicial  $t_i$ .

A forma de onda em vermelho representa o sinal de eco refletido, a forma de onda em verde representa o sinal do hidrofone.

A figura 4.6 mostra os sinais *janelados* no tempo e superpostos para o mesmo instante inicial,  $t_i$ , destacando o instante de tempo para a determinação do atraso de fase relativo do sinal de eco refletido e do hidrofone em estado permanente de funcionamento.

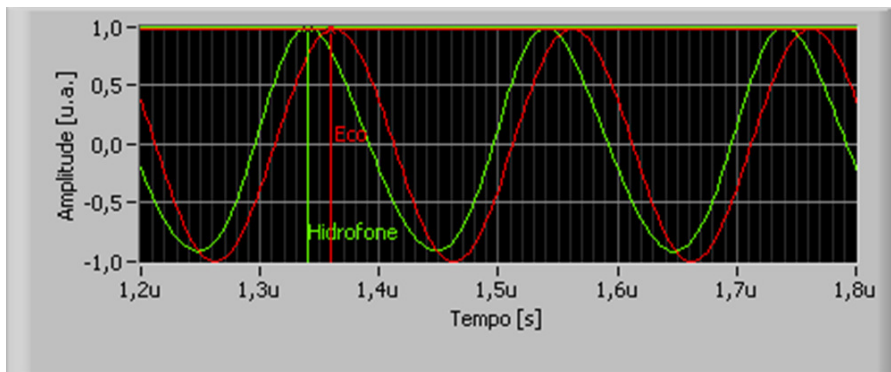


Figura 4.6 – Sinais *janelados* no tempo para a determinação do ângulo de fase dos sinais do hidrofone e do eco refletido no alvo refletor. A forma de onda em vermelho representa o sinal de eco refletido, a forma de onda em verde representa o sinal do hidrofone.

#### 4.4- Componentes de Incerteza do Tipo B do Módulo da Sensibilidade do

##### Hidrofone

Nesta seção são mostradas as componentes de incerteza do Tipo B que compõem a expressão do módulo da sensibilidade do hidrofone, definida na equação (3.6).

##### 4.4.1- Contribuição de Incerteza Devida à Tensão do Hidrofone $V_h$

A incerteza decorrente da tensão medida pelo hidrofone tem duas componentes do tipo B: uma decorrente do valor declarado no certificado de calibração do osciloscópio (0,3%) e outro do erro de medição a ser corrigido para o osciloscópio utilizado (1,7%) [60]. O coeficiente de sensibilidade do mensurando (módulo da sensibilidade) com relação à tensão do hidrofone é dado por  $\left[ \frac{\partial |M_h|}{\partial |V_h|} \right]$ , onde  $|M_h|$  é dada pela equação (3.6)

Neste caso a incerteza é dada por:

$$IP_{V_h} = \left( \left( \frac{0,3}{100} \right)^2 + \left( \frac{1,7}{100} \right)^2 \right)^{1/2} V_h \quad (4.5)$$

Assim a contribuição de incerteza Tipo B devida à tensão do hidrofone é

$$\frac{\partial |M_h|}{\partial |V_h|} IP_{V_h} .$$

##### 4.4.2- Contribuição de Incerteza Devida à Tensão de Excitação $V$

A incerteza para a medição de  $V$  é dada por:

$$IP_V = \left( \left( \frac{0,3}{100} \right)^2 + \left( \frac{1,7}{100} \right)^2 \right)^{1/2} V \quad (4.6)$$

A contribuição de incerteza devida à tensão de excitação do hidrofone é

$$\frac{\partial |M_h|}{\partial |V|} IP_V .$$

#### 4.4.3- Contribuição de Incerteza Devida à Difração Transdutor Auxiliar –

##### Hidrofone $DS_{th}$

A estimativa da incerteza do Tipo B, com distribuição uniforme em um intervalo retangular [56] é dada por  $IP_{DS_{th}} = \frac{4}{100} \frac{DS_{th}}{\sqrt{3}}$  [61]. Os valores de  $DS_{th}$  são calculados pelo programa LabView descrito em 4.2, passo 23) da realização das medições.

O coeficiente de sensibilidade é dado pela expressão  $\frac{\partial|M_h|}{\partial|DS_{th}|}$  e a contribuição de incerteza devida à difração  $DS_{th}$  é  $\frac{\partial|M_h|}{\partial|DS_{th}|} IP_{DS_{th}}$ .

#### 4.4.4- Contribuição de Incerteza Devida à Distância Transdutor Auxiliar –

##### Hidrofone $d_1$

A distância  $d_1 = c_0 t$ , onde  $c_0$  é a velocidade de propagação do ultrassom no meio (água) e  $t$  é o tempo para a frente de onda percorrer a distância  $d_1$ . A incerteza do Tipo B da distância do transdutor auxiliar tem duas componentes, mostradas na equação (4.7).

$$IP_{d_1} = \left( (0,2t)^2 + ((0,00002t)c_0)^2 \right)^{1/2} \quad (4.7)$$

onde 0,2 m/s é a incerteza padrão  $IP_{c_0}$  [59] decorrente da aplicação da equação (4.4) para o cálculo da velocidade de propagação e 0,00002t é a incerteza para o tempo de propagação do sinal de ultrassom na água [62]. A contribuição de incerteza devida à

distância  $d_1$  é  $\frac{\partial|M_h|}{\partial|d_1|} IP_{d_1}$ .

#### 4.4.5- Contribuição de Incerteza Devida à Frequência $f$

A incerteza para medição de frequência [63]  $IP_f$  para as frequências de 1 MHz a 7 MHz, variou de 3,3 Hz a 26 Hz. A contribuição de incerteza devida à frequência é

$$\frac{\partial|M_h|}{\partial|f|} IP_f.$$

#### 4.4.6- Contribuição de Incerteza Devida à Densidade da Água $\rho_0$

A incerteza de medição da densidade da água [61], para o fator de abrangência 2 é definida por:

$$IP_{\rho_0} = \frac{0,1}{100} \frac{\rho_0}{2} \quad (4.8)$$

A contribuição de incerteza devida à densidade da água é dada por  $\frac{\partial|M_h|}{\partial|\rho_0|} IP_{\rho_0}$ .

#### 4.4.7- Contribuição de Incerteza Devida à Tensão de Eco $V_{open}^*$

De maneira análoga ao mostrado em 4.4.1, a incerteza é dada por:

$$IP_{V_{open}^*} = \left( \left( \frac{0,3}{100} \right)^2 + \left( \frac{1,7}{100} \right)^2 \right)^{1/2} V_{open}^* \quad (4.9)$$

O coeficiente de sensibilidade é dado pela expressão  $\frac{\partial|M_h|}{\partial|V_{open}|}$ . A contribuição de

incerteza devida à tensão de eco é  $\frac{\partial|M_h|}{\partial|V_{open}|} IP_{V_{open}^*}$ .

#### 4.4.8- Contribuição de Incerteza Devida à Tensão de Curto-Circuito $V_k$

De maneira análoga ao mostrado em 4.4.1, a incerteza é dada por:

$$IP_{V_k} = \left( \left( \frac{0,3}{100} \right)^2 + \left( \frac{1,7}{100} \right)^2 \right)^{1/2} V_k \quad (4.10)$$

O coeficiente de sensibilidade é dado pela expressão  $\frac{\partial|M_h|}{\partial|V_k|}$ . A contribuição de incerteza devida à tensão de curto-circuito é  $\frac{\partial|M_h|}{\partial|V_k|} IP_{V_k}$ .

#### 4.4.9- Contribuição de Incerteza Devida à Impedância $Z_k$

A incerteza de medição da impedância [64]  $Z_k$  é dada por:

$$IP_{z_k} = \frac{2}{100} Z_k \quad (4.11)$$

O coeficiente de sensibilidade é dado pela expressão  $\frac{\partial|M_h|}{\partial|Z_k|}$ . A contribuição de incerteza devida à tensão de curto-circuito é  $\frac{\partial|M_h|}{\partial|Z_k|} IP_{z_k}$ .

#### 4.4.10- Contribuição de Incerteza Devida à Velocidade de Propagação $c_0$

A incerteza de medição da velocidade de propagação  $IP_{c_0}$  é 0,2 m/s [59]. O coeficiente de sensibilidade é dado pela expressão  $\frac{\partial|M_h|}{\partial|c_0|}$ . A contribuição de incerteza devida à velocidade de propagação do ultrassom na água é  $\frac{\partial|M_h|}{\partial|c_0|} IP_{c_0}$ .

#### 4.4.11- Contribuição de Incerteza Relacionada à Difração do Transdutor Auxiliar

$DS_{tt}$

A incerteza do Tipo B, com distribuição uniforme em um intervalo retangular [56] é dada por  $IP_{DS_{tt}} = \frac{2,5}{100} \frac{DS_{tt}}{\sqrt{3}}$  [61]. Os valores de  $DS_{tt}$  são calculados pelo programa LabView descrito em 4.2, passo 23) da realização das medições.

O coeficiente de sensibilidade é dado pela expressão  $\frac{\partial|M_h|}{\partial|DS_u|}$  e a contribuição de incerteza devida à difração ( $DS_u$ ) é  $\frac{\partial|M_h|}{\partial|DS_u|}IP_{DS_u}$ .

#### 4.4.12-Contribuição de Incerteza Devida ao Coeficiente de Reflexão $R$

A incerteza do Tipo B para o coeficiente de reflexão [58] é dada por:

$$IP_R = 4,2757 \cdot 10^{-4} \quad (4.12)$$

O coeficiente de sensibilidade é dado pela expressão  $\frac{\partial|M_h|}{\partial|R|}$ . A contribuição de incerteza devida ao coeficiente de reflexão é  $\frac{\partial|M_h|}{\partial|R|}IP_R$ .

#### 4.4.13- Contribuição de Incerteza Devida ao Raio Efetivo $a$

O raio efetivo do transdutor é determinado pela equação (3.8), que depende das variáveis  $\lambda = c_0 / f$  e o último mínimo  $d_m$ . As incertezas dos mensurandos  $f$  e  $c_0$  foram definidas respectivamente em 4.4.5 e 4.4.10. A incerteza do último mínimo  $d_m$ ,  $IP_{d_m} = 0,00038 \text{ m}$ , foi obtida com base na incerteza do sistema de posicionamento utilizado para realizar o mapeamento do transdutor [65]. Assim é obtida a incerteza do Tipo B para o raio efetivo  $IP_a$ . Logo, a contribuição de incerteza devida ao raio efetivo

$$\text{é } \frac{\partial|M_h|}{\partial|a|}IP_a.$$

### 4.5- Componentes de Incerteza do Tipo A do Módulo da Sensibilidade do

#### Hidrofone

A incerteza padrão do Tipo A, equação 3.27, é obtida a partir do desvio padrão de quatro medições do procedimento de medição, conforme descrito em 4.2, em condições de repetibilidade de medição.

#### 4.6- Incerteza de Medição do Módulo da Sensibilidade

Para a expressão do mensurando sensibilidade do hidrofone será adotada a expressão matemática mostrada na equação (4.13).

$$|M_h(\omega)| = f(x_1, x_2, \dots, x_N) + \delta_A + \delta_B \quad (4.13)$$

onde  $f(x_1, x_2, \dots, x_N)$  é a representação funcional das estimativas de entrada das  $N$  grandezas do mensurando sensibilidade descritos em 4.4. Para os demais termos de (4.13)  $\delta_A = u_{\text{tipoA}}^{|M_h(\omega)|}$  e  $\delta_B = u_{\text{tipoB}}^{|M_h(\omega)|}$  são representações matemáticas da incerteza do Tipo A e Tipo B do mensurando módulo da sensibilidade.

Aplicando a equação (3.26) é obtida a incerteza combinada do mensurando.

Posteriormente são calculados os graus de liberdade efetivos  $\nu_{\text{eff}}$  do mensurando com a utilização da equação (3.30) e a incerteza expandida pela equação (3.31).

#### 4.7- Componentes de Incerteza do Tipo B da Fase da Sensibilidade do Hidrofone

Nesta seção são mostradas as componentes de incerteza do Tipo B que compõem a expressão da fase da sensibilidade do hidrofone, definida na equação (3.24).

##### 4.7.1- Contribuição de Incerteza Devida à Fase da Tensão do Hidrofone $\angle V_h$

A incerteza do Tipo B com distribuição retangular decorrente da medição da fase da tensão do hidrofone é expressa em função da resolução da medição de atrasos de tempo com o osciloscópio utilizado [62], que depende da frequência  $f$  do sinal, expressa por:

$$IP_{\angle V_h} = \frac{2\pi f \cdot t_{osc}}{500\sqrt{12}} \quad (4.14)$$

onde  $t_{osc}$  é a base de tempo utilizado pelo osciloscópio para a medição da fase do sinal do hidrofone, conforme definido em 4.2, passo 40.

A contribuição de incerteza é dada pela equação por:

$$\frac{\partial \angle M_h}{\partial V_h} IP_{\angle V_h} \quad (4.15)$$

#### 4.7.2- Contribuição de Incerteza Devida à Fase da Tensão de Eco $\angle V_{open}^*$

Utilizando as mesmas considerações feitas em 4.7.1, a incerteza padrão é dada por:

$$IP_{\angle V_{open}^*} = \frac{2\pi f \cdot t_{osc}}{500\sqrt{12}} \quad (4.16)$$

onde  $f$  é a frequência do sinal de ultrassom e  $t_{osc}$  é a base de tempo utilizado pelo osciloscópio para a medição da fase do sinal da tensão de eco, conforme definido em 4.2 passo 32.

A contribuição de incerteza é dada por:

$$\frac{\partial \angle M_h}{\partial V_{open}^*} IP_{\angle V_{open}^*} \quad (4.17)$$

#### 4.7.3- Contribuição de Incerteza Devida à Fase da Impedância $\angle Z$

A incerteza de medição de fase da impedância  $Z$  utilizando o analisador de impedância [66] é dada por:

$$IP_{\angle Z} = \left( 0,012 + 100 \left( \frac{6}{|Z|} \left( 0,005 + \frac{0,1f}{10^8} \right) + \left( 6|Z| \left( \frac{0,00002f}{10^8} \right) \right) \right) \right) \quad (4.18)$$

A contribuição de incerteza é dada por:

$$\frac{\partial \angle M_h}{\partial Z} IP_{\angle Z} \quad (4.19)$$



#### 4.7.4- Contribuição de Incerteza Devida à fase de $\angle(I_k/I)$

A contribuição de incerteza é dada por  $\frac{\partial \angle M_h}{\partial \angle(I_k/I)} IP_{\angle(I_k/I)}$ . A correção  $\left(\frac{I_k}{I}\right)$  é definida em função da medição de tensões e impedâncias, conforme definidas respectivamente em 4.2 passo 29 e 4.2 passo 34. Os modelos de incerteza para tensão estão definidos em 4.4.2 e 4.4.8 e para impedância em 4.4.9.

#### 4.7.5- Contribuição de Incerteza Devida à Velocidade do Ultrassom na Água $c_0$

O coeficiente de sensibilidade do mensurando velocidade de propagação do ultrassom na água é dada por  $\frac{\partial \angle M_h}{\partial c_0}$ . A contribuição de incerteza é dada pela equação por  $\frac{\partial \angle M_h}{\partial c_0} IP_{c_0}$ . A incerteza padrão de  $c_0$  foi definida em 4.4.4.

#### 4.7.6- Contribuição de Incerteza Devida ao Raio Efetivo $a$

O coeficiente de sensibilidade do raio efetivo do transdutor é dado por  $\frac{\partial \angle M_h}{\partial a}$ .

A contribuição de incerteza é dada pela equação por  $\frac{\partial \angle M_h}{\partial a} IP_a$ . A incerteza padrão do raio efetivo,  $IP_a$ , foi definida em 4.4.13.

#### 4.7.7- Contribuição de Incerteza Devida à Distância $d_1$

O coeficiente de sensibilidade referente à distância  $d_1$  é dado por  $\frac{\partial \angle M_h}{\partial d_1}$ .

A contribuição de incerteza é dada pela equação por  $\frac{\partial \angle M_h}{\partial d_1} IP_{d_1}$ . A incerteza padrão da distância  $d_1$ ,  $IP_{d_1}$ , foi definida em 4.4.4.

#### 4.7.8- Contribuição de Incerteza Devida à Frequência $f$

O coeficiente de sensibilidade do raio efetivo do transdutor é dado por  $\frac{\partial \angle M_h}{\partial f}$

A contribuição de incerteza é dada por  $\frac{\partial \angle M_h}{\partial f} IP_f$ . A incerteza padrão da frequência  $f$ ,  $I_p f$ , foi definida em 4.4.5.

#### 4.7.9- Contribuição de Incerteza Devida ao Ruído de Medição do Sistema

De acordo com o descrito em 4.1, a incerteza devida ao ruído de medição do sistema corresponde à incerteza de localização do início do sinal do sinal de ultrassom ( $t_i$ ) determinado conforme a equação (4.2).

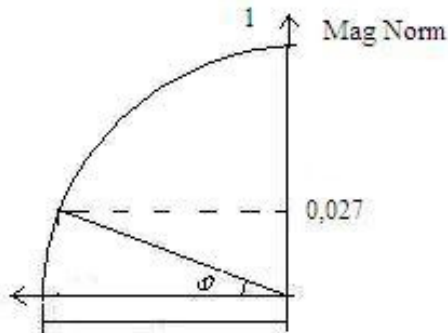


Figura 4.7: Incerteza devida ao ruído de medição do sistema decorrente do corte automático em  $\pm 2,7\%$  da amplitude normalizada da senóide.

Então a incerteza devida à quantização  $u_r^{\angle M_h}$  será dada por:

$$u_r^{\angle M_h} = \arcsen(2,7/100) \quad (4.20)$$

Existe um erro sistemático desconhecido, no entanto, o corte automático em  $\pm 2,7\%$  em amplitude normalizada do sinal irá gerar um desconhecimento proporcional em fase menor do que 2,0 graus.

#### 4.8- Componentes de Incerteza do Tipo A da Fase da Sensibilidade do Hidrofone

A incerteza padrão do Tipo A, equação 3.27, é obtida a partir do desvio padrão de quatro medições do procedimento de medição, conforme descrito em 4.2, em condições de repetibilidade de medição.

#### 4.9- Incerteza de Medição da Fase da Sensibilidade

Utilizando as mesmas considerações feitas em 4.6 é obtida a incerteza combinada da medição de fase da sensibilidade do hidrofone dada por:

$$\angle M_h(\omega) = f(x_1, x_2, \dots, x_N) + \delta_A + \delta_B \quad (4.21)$$

onde  $f(x_1, x_2, \dots, x_N)$  é a representação funcional das estimativas de entrada das  $N$  grandezas do mensurando sensibilidade descritos em 4.6,  $\delta_A = u_{\text{tipoA}}^{\angle M_h(\omega)}$  e  $\delta_B = u_{\text{tipoB}}^{\angle M_h(\omega)}$  são representações matemáticas da incerteza do Tipo A e Tipo B do mensurando fase da sensibilidade do hidrofone.

Aplicando a equação (3.26) é obtida a incerteza combinada do mensurando.

Posteriormente são calculados os graus de liberdade efetivos  $\nu_{\text{eff}}$  do mensurando com a utilização da equação (3.30) e a incerteza expandida pela equação (3.31).

##### 4.9.1- Incerteza de Medição Sem Um Valor de Referência

O erro normalizado pode ser generalizado como uma razão da diferença de dois valores para a incerteza padrão na diferença dos dois valores, dado por:

$$E_n = \frac{(x_i - x_j)}{u_c(x_i - x_j)} = \frac{(x_i - x_j)}{\sqrt{u_c^2(x_i) + u_c^2(x_j)}} \quad (4.22)$$

onde  $(x_i - x_j)$  é igual a diferença entre duas medições de um mesmo mensurando e  $u_c(x_i)$  é a incerteza combinada da medição  $(x_i)$  do mensurando e  $u_c(x_j)$  é a incerteza combinada da medição  $(x_j)$  do mensurando.

Esta definição pode ser aplicada para a diferença entre uma medição e um valor considerado como referência com incertezas declaradas ou para um conjunto de intercomparações bilaterais de resultados com incertezas declaradas [67].

Quando da existência de um valor de referência  $(x_j = x_r)$ , neste caso para um nível de confiança de 95%, o resultado de medição  $(x_i)$  será desqualificado para  $E_n$  maior do que 2. Caso a equação (4.22) seja expressa em termos da incerteza expandida de medição, o resultado de medição será desqualificado para  $E_n$  maior do que 1.

Assim na prática a equação (4.22) cria o conceito do erro normalizado bilateral para um par específico de resultados de medição [67]. A distribuição qui-quadrado é a estatística de teste utilizada para garantir que resultados de medições pareadas são equivalentes dentro do conjunto de suas incertezas associadas [68], sendo dada por:

$$\chi_{APD}^2 = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1, i \neq j}^N \frac{(x_i - x_j)^2}{(u_c^i)^2 + (u_c^j)^2} \quad (4.23)$$

A equação (4.23) mostra que a distribuição qui-quadrado soma todas as possíveis diferenças advindas das comparações bilaterais do mensurando. Esta abordagem propicia responder à seguinte questão metrológica: o resultado de medição  $x_j$  concorda com o resultado das demais medições dentro da incerteza reportada? Esta metodologia mostra a adequabilidade de um resultado de medição com relação aos

outros  $N-1$  resultados de medição, relativa à incerteza declarada, sem utilizar um valor de referência para o mensurando [68].

A distribuição qui-quadrado é utilizada para verificar se há diferença significativa entre diversos grupos, sendo a hipótese nula rejeitada se o valor calculado da estatística qui-quadrado for maior do que o valor crítico [69].

A estatística de teste assim chamada, diferença pareada com distribuição qui-quadrado, será aplicada nas seguintes etapas:

a) Formulação da Hipótese de Teste.

Hipótese nula:  $H_0 =$  Não há diferença significativa entre os  $N$  resultados de medição dentro da incerteza reportada para cada resultado de medição.

b) Calcular a estatística de teste  $\chi_{APD}^2 = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1, i \neq j}^N \frac{(x_i - x_j)^2}{(u_c^i)^2 + (u_c^j)^2}$ .

A estatística de teste  $\chi_{APD}^2$  corresponde ao somatório pareado dos  $N$  erros normalizados de medição ao quadrado dividido por  $N(N-1)$ . O subscrito APD significa *All Pairs Difference*.

A hipótese nula é rejeitada se o valor da estatística  $\chi_{APD}^2$  for maior do que o valor para a distribuição qui-quadrado com  $(N-1)$  graus de liberdade e nível de confiança (95%), logo  $\chi_{APD}^2 > \chi_{(N-1), crítico}^2$ .

c) Decisão:  $\chi_{APD}^2 < \chi_{(N-1), crítico}^2$ , não rejeitar  $H_0$ .

d) Aceitação de que não há diferença significativa dos resultados de medição dentro da incerteza reportada.

#### 4.10- Deriva da Calibração do Módulo da Sensibilidade Realizada pelo NPL

O procedimento de calibração primário foi aplicado em dois hidrofones de membrana conforme especificações apresentadas em 4.2, os quais foram previamente calibrados pelo NPL em módulo da sensibilidade. As calibrações foram realizadas nos anos de 2006 e 2010 para um hidrofone e nos anos de 2006 e 2011 para o outro. A calibração dos hidrofones apresentou uma deriva instrumental, a qual representa “a variação da indicação ao longo do tempo, contínua ou incremental, devida a variações nas propriedades metrológicas de um instrumento de medição” [1].

##### 4.10.1-Deriva e Projeção do Módulo da Sensibilidade

A deriva anual da calibração foi obtida por:

$$M_{\text{deriva,anual}} = \frac{M_{h,ano1} - M_{h,ano2}}{|Ano1 - Ano2|} \quad (4.24)$$

onde  $M_{h,ano1}$  e  $M_{h,ano2}$  representam o módulo da sensibilidade para o resultado da calibração para os anos 1 e 2.

A deriva total da calibração para 2014 foi calculada conforme equação (4.25)

$$M_{\text{deriva,total}} = (2014 - Ano2)M_{\text{deriva,anual}} \quad (4.25)$$

A projeção do módulo da sensibilidade para 2014 é dada por:

$$M_{h,2014} = (M_{h,ano2} + M_{\text{deriva,total}}) \quad (4.26)$$

A incerteza combinada da projeção do módulo da sensibilidade para o ano de 2014 é dada por:

$$u_{c,deriva} = \sqrt{\left(u_c^{M_{h,ano1}}\right)^2 + \left(u_c^{M_{h,ano2}}\right)^2 + \left(\frac{M_{\text{deriva,total}}}{\sqrt{12}}\right)^2} \quad (4.27)$$

onde  $(u_c^{M_{h,ano1}})$  e  $(u_c^{M_{h,ano2}})$  representam as incertezas combinadas do Tipo B devidas ao certificado de calibração declaradas pelo NPL e  $\left(\frac{M_{deriva,total}}{\sqrt{12}}\right)$  o componente de incerteza do Tipo B que representa a deriva total da calibração em 2014.

## 5- Resultados Experimentais

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais do procedimento de medição primário proposto que utiliza o método de medição da reciprocidade para a calibração da sensibilidade de hidrofones em módulo e fase. Os dois hidrofones de membrana foram calibrados no Laboratório de Ultrassom do Inmetro e no *National Physical Laboratory* (NPL).

### 5.1- Calibração do Módulo da Sensibilidade

A seguir são apresentados os resultados dos cálculos das estimativas das grandezas de entrada, incerteza padrão, coeficiente de sensibilidade e contribuição para a incerteza de cada uma das fontes de incerteza do mensurando módulo da sensibilidade do hidrofone. Os resultados são apresentados para a frequência de 5,0 MHz, com módulo da sensibilidade igual a 73,5 nV/Pa, uma vez que esta é a frequência de comparação para a validação da calibração do módulo da sensibilidade com dois transdutores de modelos diferentes para demonstrar a robustez do procedimento de calibração proposto.

A resolução do equacionamento foi feita utilizando o *software* Matlab R2013 A (Matworks Cor, Natik, USA).

#### 5.1.1- Planilha de Incerteza para o Módulo da Sensibilidade

A tabela 5.1 mostra os resultados dos cálculos equacionados em 4.4 a 4.6, para a determinação da incerteza expandida de medição para o hidrofone calibrado.

A unidade para cada de fonte de incerteza é:  $V_h$  [V],  $V$  [V],  $d_1$  [m],  $f$  [Hz],  $\rho_0$  [kg/m<sup>3</sup>],  $V_{open}^*$  [V],  $V_k$  [V],  $Z_k$  [ $\Omega$ ],  $c_0$  [m/s],  $a$  [m],  $u_{ippoA}^{M_h(\omega)}$  [V/Pa]. A estimativa e a



incerteza padrão têm a mesma unidade da respectiva fonte de incerteza.  $DS_{th}$ ,  $DS_{it}$  e  $R$  são adimensionais.

Tabela 5.1 - Planilha de incerteza do módulo da sensibilidade para o hidrofone UC 1604-029 em 5,0 MHz, usando-se com o transdutor auxiliar modelo A 382s.

Fonte da Incerteza	Estimativa	Incerteza. padrão	Coefficiente sensibilidade	Contribuição de Incerteza. [V/Pa]	Incerteza Combinada. [V/Pa]	$v_{\text{eff}}$	$k$	Incerteza Expandida [V/Pa]
$V_h$	$3,65 \times 10^{-3}$	$6,23 \times 10^{-5}$	$2,02 \times 10^{-15}$	$1,26 \times 10^{-9}$	$2,48 \times 10^{-9}$	$5,66 \times 10^5$	2	$5,0 \times 10^{-9}$
$V$	2,08	$3,55 \times 10^{-2}$	$6,62 \times 10^{-24}$	$2,35 \times 10^{-25}$				
$DS_{th}$	1,99	$4,61 \times 10^{-2}$	$-3,70 \times 10^{-8}$	$-1,70 \times 10^{-9}$				
$d_1$	0,126	$3,44 \times 10^{-5}$	$6,78 \times 10^{-8}$	$2,33 \times 10^{-12}$				
$f$	$5,0 \times 10^6$	18	$-1,71 \times 10^{-15}$	$-3,08 \times 10^{-14}$				
$\rho_0$	$1,0 \times 10^3$	0,5	$-3,69 \times 10^{-11}$	$-1,84 \times 10^{-11}$				
$V_{open}^*$	0,549	$9,4 \times 10^{-3}$	$-6,72 \times 10^{-8}$	$-6,3 \times 10^{-10}$				
$V_k$	0,2	$3,4 \times 10^{-3}$	$-1,84 \times 10^{-7}$	$-6,3 \times 10^{-10}$				
$Z_k$	1,74	$3,48 \times 10^{-2}$	$2,12 \times 10^{-8}$	$7,38 \times 10^{-10}$				
$c_0$	$1,486 \times 10^3$	0,2	$-1,91 \times 10^{-11}$	$-3,82 \times 10^{-12}$				
$DS_{it}$	0,749	$1,08 \times 10^{-2}$	$4,92 \times 10^{-8}$	$5,32 \times 10^{-10}$				
$R$	0,935	$4,28 \times 10^{-4}$	$3,94 \times 10^{-8}$	$1,69 \times 10^{-11}$				
$a$	$6,23 \times 10^{-3}$	$1,81 \times 10^{-5}$	$9,10 \times 10^{-6}$	$1,65 \times 10^{-10}$				
$u_{tipoA}^{M_h(\omega)}$		$1,19 \times 10^{-10}$	1	$1,19 \times 10^{-10}$				

A incerteza expandida calculada do módulo da sensibilidade, 5,0 nV/Pa, corresponde a 6,8%. A componente de incerteza do Tipo B é majoritária na determinação da incerteza expandida de medição quando comparada à componente de

incerteza do Tipo A ( $\delta_A = u_{\text{tipoA}}^{|M_h(\omega)|}$ ). A figura 5.1 mostra o módulo da contribuição de incerteza para as fontes de incerteza da tabela 5.1. As fontes de incerteza da tabela 5.1 não mostradas na figura 5.1 têm contribuição irrelevante para o cômputo final da incerteza expandida de medição.

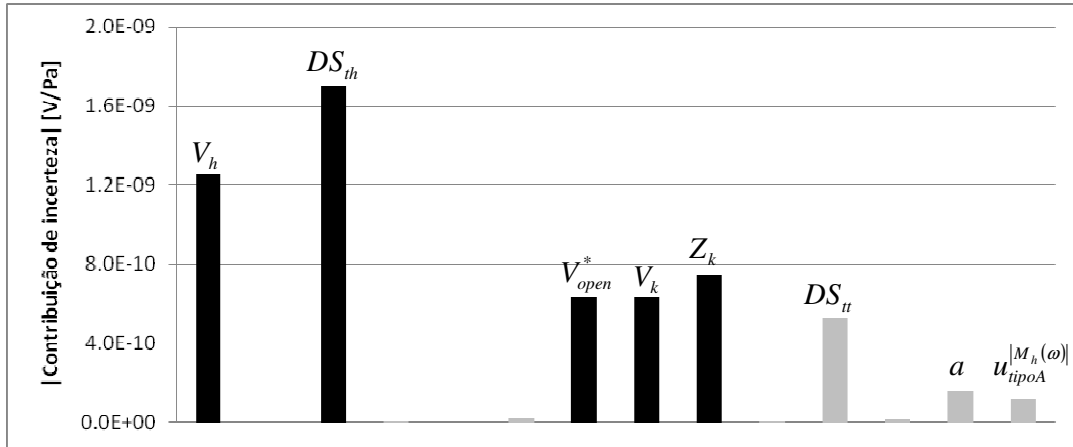


Figura 5.1: Módulo da contribuição de incerteza para as fontes de incerteza do módulo da sensibilidade para o hidrofone UC 1604-029 em 5,0 MHz, usando-se com o transdutor auxiliar modelo A 382s.

As contribuições de incerteza mais significativas são devidas às seguintes fontes de incerteza: difração transdutor auxiliar – hidrofone ( $DS_{th}$ ), tensão do hidrofone  $V_h$ , tensão de eco  $V_{open}^*$ , tensão de curto-circuito  $V_k$  e impedância  $Z_k$ .

A planilha de incerteza apresentada na Tabela 5.1 é representativa do procedimento de medição implementado, sendo que para as demais frequências são apresentados os resultados em 5.1.2, uma vez que a contribuição das fontes de incerteza apresenta similaridade porcentual ao que está apresentado na tabela 5.1.

### 5.1.2- Resultado da Calibração para o Módulo da Sensibilidade

As tabelas 5.2 e 5.3 mostram os resultados das calibrações do módulo da sensibilidade com respectivas incertezas expandidas, para os dois hidrofones descritos na seção 4.2. Nas tabelas a frequência demarcada por 5\* representa a calibração em 5,0 MHz com a utilização do transdutor auxiliar modelo V309. A coluna sensibilidade da calibração ( $M_h$  [nV/Pa]) mostra o resultado de duas calibrações realizadas pelo NPL e com a deriva da calibração calculada conforme seção 4.10. A coluna  $E_{nor}$  corresponde ao erro normalizado da calibração calculado conforme seção 3.4.

Tabela 5.2 - Resultado da calibração para o módulo da sensibilidade para o hidrofone de membrana UC 1604-029 (Precision Acoustics) calibrado por reciprocidade e calibrado pelo National Physical Laboratory (NPL).

UC 1604-029					
	Inmetro		National Physical Laboratory - NPL		
$F$ [MHz]	$M_h$ [nV/Pa]	$U_{M_h}$ [nV/Pa]	$M_h$ [nV/Pa]	$U_{M_h}$ [nV/Pa]	$E_{nor}$
1	64,3	4,4	63,8	6,6	0,06
2	64,3	4,5	69,8	5,6	0,77
3	67,7	4,5	70,8	5,7	0,43
4	70,0	4,7	70,2	5,9	0,03
5	73,5	5,0	71,8	5,8	0,22
5*	70,4	4,8	71,8	5,8	0,19
6	71,6	4,8	73,4	5,6	0,24
7	74,8	5,0	71,8	5,8	0,39

Na figura 5.2, NPL (Máx) e NPL (Mín), representam respectivamente o resultado da calibração realizada pelo NPL somado e subtraído da incerteza expandida de calibração. Em 5,0 MHz são apresentados os dois resultados da calibração com os dois transdutores auxiliares de emissão utilizados.

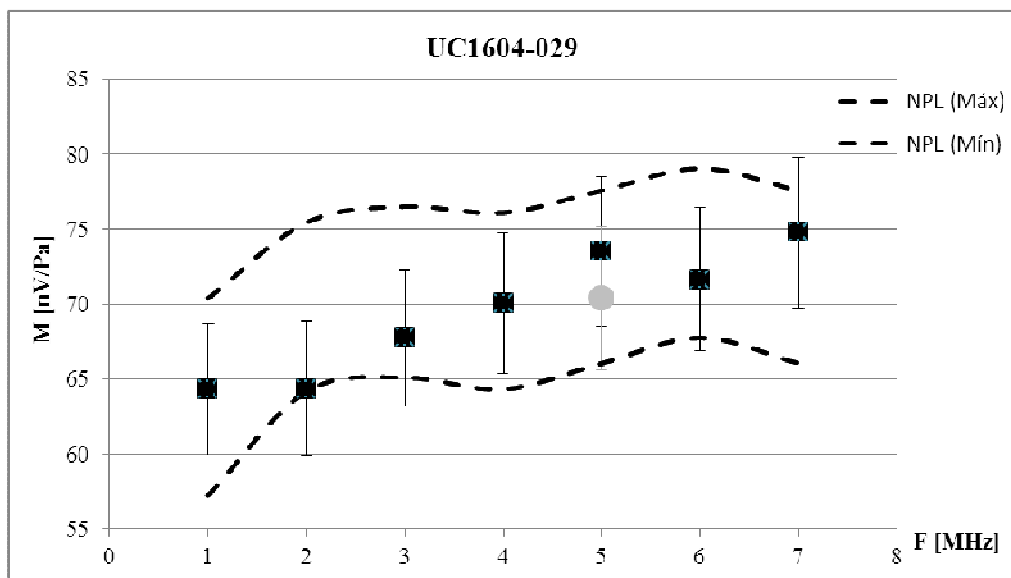


Figura 5.2: Resultado da calibração para o módulo da sensibilidade para o hidrofone UC 1604-029. O marcador circular, em cinza claro, mostra o resultado da calibração em 5,0 MHz para o transdutor auxiliar de emissão de modelo V309.

Tabela 5.3 - Resultado da calibração para o módulo da sensibilidade para o hidrofone de membrana UC 1604-068 (Precision Acoustics) calibrado por reciprocidade e calibrado pelo National Physical Laboratory (NPL).

UC 1604-068					
	Inmetro		National Physical Laboratory - NPL		
$F$ [MHz]	$M_h$ [nV/Pa]	$U_{M_h}$ [nV/Pa]	$M_h$ [nV/Pa]	$U_{M_h}$ [nV/Pa]	$E_{nor}$
1	48,3	3,3	51,0	4,0	0,52
2	49,0	3,4	56,0	3,6	1,41
3	51,3	3,5	55,0	3,7	0,73
4	53,5	3,7	57,0	3,7	0,67
5	55,8	3,8	56,0	3,6	0,04
5*	52,7	3,6	56,0	3,6	0,65
6	54,4	3,6	57,0	3,7	0,50
7	55,7	3,7	56,0	3,6	0,06

Na figura 5.3, NPL (Máx) e NPL (Mín), representam respectivamente o resultado da calibração realizada pelo NPL somado e subtraído da incerteza expandida

de calibração. Em 5,0 MHz são apresentados os dois resultados da calibração com os dois transdutores auxiliares de emissão utilizados.

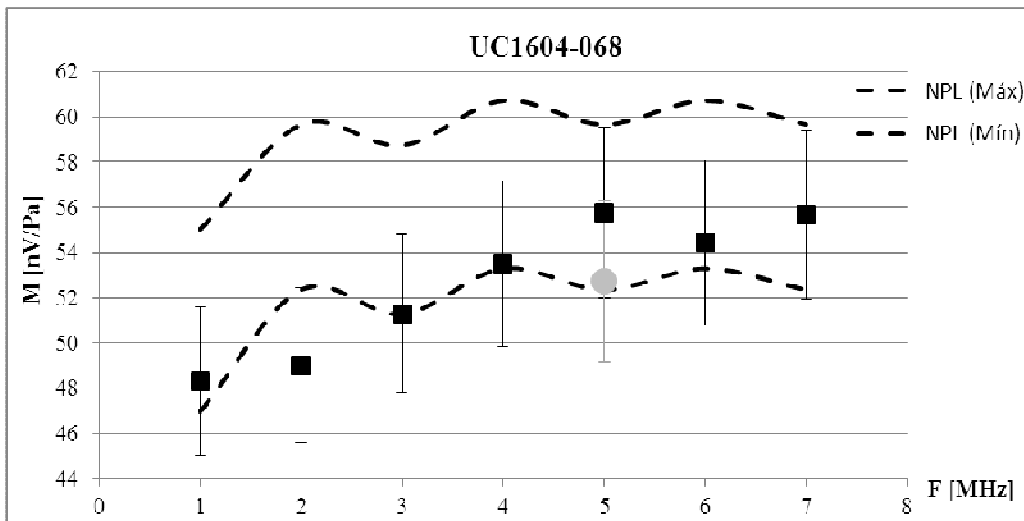


Figura 5.3: Resultado da calibração para o módulo da sensibilidade para o hidrofone UC 1604-068. O marcador circular, em cinza claro, mostra o resultado da calibração em 5,0 MHz para o transdutor auxiliar de emissão de modelo V309.

## 5.2- Calibração da Fase da Sensibilidade

A seguir são apresentados os resultados dos cálculos das estimativas das grandezas de entrada, incerteza padrão, coeficiente de sensibilidade e contribuição para a incerteza de cada uma das fontes de incerteza do mensurando fase da sensibilidade do hidrofone. Igualmente à determinação do módulo da sensibilidade os resultados foram apresentados para a frequência de 5,0 MHz, uma vez que esta é a frequência de comparação para a verificação da calibração da fase da sensibilidade com dois transdutores de modelos diferentes para demonstrar a robustez do procedimento de calibração proposto.

### 5.2.1- Planilha de Incerteza para a Fase da Sensibilidade

A tabela 5.4 mostra os resultados dos cálculos equacionados em 4.7 a 4.9, para a determinação da incerteza expandida de medição para a fase da sensibilidade do hidrofone calibrado. A incerteza expandida calculada da fase da sensibilidade, em 5,0 MHz, é de 7°. As fontes de incerteza:  $\angle V_h$ ,  $\angle V_{open}^*$ ,  $\angle Z$ ,  $\angle(I_k/I)$ ,  $u_r^{\angle M_h}$  e  $u_{tipoA}^{\angle M_h(\omega)}$  têm o grau [°] como unidade. A unidade das fontes de incerteza a seguir é:  $c_0$  [m/s],  $a$  [m],  $d_1$  [m],  $f$  [Hz]. A estimativa e a incerteza padrão têm a mesma unidade da respectiva fonte de incerteza.

Tabela 5.4 - Planilha de incerteza para a fase da sensibilidade para o hidrofone UC 1604-029 em 5,0 MHz com o transdutor modelo A 382S.

Fonte da Incerteza	Estimativa	Incerteza padrão	Coefficiente sensibilidade	Contribuição. Incerteza [°]	Incerteza. Combinada [°]	$v_{eff}$	$k_p$	Incerteza. Expandida [°]
$\angle V_h$	-162	2,08	1	2,08	3,45	74,94	2	7
$\cdot \angle V_{open}^*$	-191	2,08	-0,5	-1,04				
$\angle Z$	-7	0,154	0,5	0,077				
$\angle(I_k/I)$	2,65	0,079	-0,5	-0,0395				
$c_0$	$1,486 \times 10^3$	0,2	-0,0314	-0,0063				
$a$	$6,23 \times 10^{-3}$	$1,81 \times 10^{-5}$	$1,499 \times 10^4$	0,2715				
$d_1$	0,126	$3,44 \times 10^{-5}$	$-3,7 \times 10^2$	-0,0127				
$f$	$5,0 \times 10^6$	18	$9,34 \times 10^{-6}$	$1,68 \times 10^{-4}$				
$u_r^{\angle M_h}$		2	1	2				
$u_{tipoA}^{\angle M_h(\omega)}$		1,54	1	1,54				

As componentes de incerteza majoritárias na determinação da incerteza expandida de medição são: incerteza devida à fase da tensão do hidrofone ( $\angle V_h$ ), incerteza devida à tensão de eco ( $\angle V_{open}^*$ ), incerteza do Tipo A ( $u_{tipoA}^{\angle M_h(\omega)}$ ) e incerteza devida ao ruído de medição do sistema ( $u_r^{\angle M_h}$ ).

A figura 5.4 mostra o módulo da contribuição de incerteza para as fontes de incerteza da tabela 5.4. As fontes de incerteza da tabela 5.4 não mostradas na figura 5.4 têm contribuição irrelevante para o cômputo final da incerteza expandida de medição.

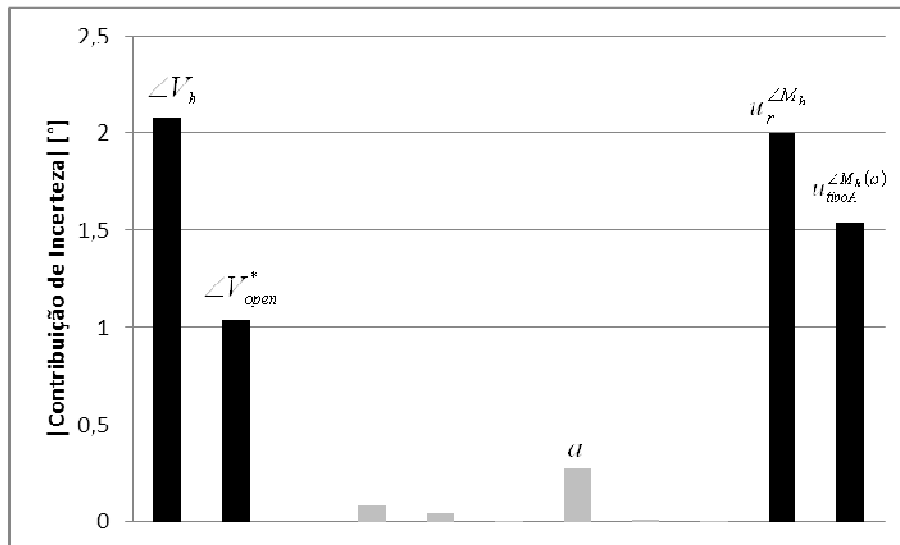


Figura 5.4: Módulo da contribuição de incerteza para as fontes de incerteza da fase da sensibilidade para o hidrofone UC 1604-029 em 5,0 MHz, usando-se com o transdutor auxiliar modelo A 382s.

### 5.2.2- Resultado da Calibração para a Fase da Sensibilidade

A tabela 5.5 mostra o resultado da calibração para a fase da sensibilidade com respectivas incertezas expandidas declaradas, para os dois hidrofones descritos na seção 4.2. Nas tabelas a frequência demarcada por 5\* representa a calibração em 5,0 MHz com a utilização do transdutor auxiliar modelo V309. O parâmetro estatístico utilizado para comparar os resultados de fase é a incerteza expandida de medição com fator de abrangência  $k=2$ .

Tabela 5.5 - Resultado da calibração da fase da sensibilidade dos hidrofones UC 1604-029 e UC 1604-068.

$F$ [MHz]	UC 1604-029		UC 1604-068		
	$\angle M_h$ [°]	$\angle U_{M_h}$ [°]	$\angle M_h$ [°]	$\angle U_{M_h}$ [°]	$E_{nor}$
1	-83	7	-87	7	0,40
2	-49	9	-48	6	0,09
3	-28	8	-27	9	0,08
4	-56	10	-55	13	0,06
5	-48	7	-48	7	0,00
5*	-36	7	-37	7	0,10
6	-75	9	-77	10	0,15
7	-53	7	-59	6	0,65

Com os resultados obtidos da calibração da fase da sensibilidade e a metodologia de teste da incerteza de medição sem um valor de referência, mostrada na seção 4.9.1, são mostrados os resultados de cálculo em 5,0 MHz para demonstrar que não há diferença significativa dos resultados de medição dentro da incerteza reportada para o nível de confiança especificado de 95%.

Os valores de incerteza combinada de medição para a fase estão mostrados na tabela 5.6, para a frequência de 5,0 MHz.



Tabela 5.6 - Incerteza combinada de medição da fase em 5,0 MHz para os hidrofones UC 1604-029 e UC 1604-068.

UC 1604-029			UC 1604-068	
$F$ [MHz]	$\angle M_h$ [°]	$u_{combinada}^{\angle M_h [\omega]}$	$\angle M_h$ [°]	$u_{combinada}^{\angle M_h [\omega]}$
5	-48	3,5	-48	3,5
5*	-36	3,5	-37	3,5

Para analisar os resultados da fase da sensibilidade conforme desenvolvimento da seção 4.9.1, é mostrada a tabela 5.7, cuja nomenclatura está relacionada aos resultados da tabela 5.6.

Tabela 5.7 - Nomenclatura de resultados para incerteza combinada de medição da fase em 5,0 MHz para os hidrofones UC 1604-029 e UC 1604-068.

UC 1604-029			UC 1604-068	
$F$ [MHz]	$\angle M_h$ [°]	$u_{combinada}^{\angle M_h [\omega]}$	$\angle M_h$ [°]	$u_{combinada}^{\angle M_h [\omega]}$
5	$M_{11}$	$u_{11}$	$M_{12}$	$u_{12}$
5*	$M_{21}$	$u_{21}$	$M_{22}$	$u_{22}$

A tabela 5.8 mostra os resultados para a determinação do resultado da estatística de teste qui-quadrado, conforme mostrado em 4.9.1.

Tabela 5.8 - Resultado da estatística qui-quadrado para a calibração da fase em 5,0 MHz

$M_{11}$	-48	3,5	$E_{n11-12}$	<b>0,00</b>
$M_{12}$	-48	3,5	$E_{n11-21}$	<b>2,42</b>
$M_{21}$	-36	3,5	$E_{n12-22}$	<b>2,22</b>
$M_{22}$	-37	3,5	$E_{n21-22}$	<b>0,20</b>
<b>Soma <math>E_n^2</math></b>				<b>10,86</b>
$\chi_{APD}^2$				<b>0,90</b>

Os valores  $E_{n11-12}, \dots, E_{n21-22}$  foram calculados conforme equação (4.22). O termo  $SomaE_n^2$  é igual a  $\sum_{i=1, i \neq j}^N \frac{(x_i - x_j)^2}{u^2(x_i - x_j)}$  e o valor da estatística qui-quadrado calculada  $\chi_{APD}^2 = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1, i \neq j}^N \frac{(x_i - x_j)^2}{(u_c^i)^2 + (u_c^j)^2}$ , para  $N=4$ .

O valor da estatística qui-quadrado para 3 graus de liberdade ( $\chi_{3, crítico}^2$ ), pois há quatro conjuntos de medições, é igual a 7,81 com nível de confiança de 95% [69]. O valor da estatística  $\chi_{APD}^2$  é igual a 0,90. Assim a hipótese ( $H_0$ ) nula não é rejeitada porque  $\chi_{APD}^2 < \chi_{(N-1), crítico}^2$ . Portanto, não há diferença significativa entre os 4 resultados de medição dentro da incerteza reportada para cada resultado de medição.

Nas demais frequências o teste qui-quadrado foi aplicado resultando na aceitação da hipótese nula, ou seja, não há diferença significativa entre os resultados de medição na incerteza reportada.

## 6- Discussão e Conclusão

As tabelas 5.2 e 5.3 relatam que os resultados com o método proposto para o módulo da sensibilidade e o valor calibrado pelo NPL não são estatisticamente diferentes, utilizando a incerteza expandida de medição como parâmetro de avaliação. A incerteza expandida de medição declarada pelo NPL é igual a 6% em toda a faixa de frequência, todos os valores medidos para o módulo da sensibilidade estão compreendidos no intervalo que engloba a soma das incertezas expandidas de medição do NPL somada à declarada pelo Inmetro.

Adicionalmente, a incerteza expandida de medição para o módulo da sensibilidade medida com o método proposto está entre 6,7% e 7,0%, a qual está próxima da incerteza expandida declarada de 5,8% obtida por YANG et al. [70] em 5,0 MHz e melhor do que a incerteza expandida de 13,4%, para medições na faixa de 2 a 5 MHz [46] e também melhor do que a variação de 13,2% a 16,5% na faixa de frequência de 1,0 a 5,0 MHz medida por WILKENS, KOCH [45].

Considerando esta abordagem, o método pode ser considerado validado no parâmetro módulo da sensibilidade, uma vez que em qualquer ponto de medição a diferença entre o valor obtido com a calibração realizada pelo Inmetro e a declarada pelo NPL é menor do que a respectiva soma das incertezas expandidas de medição.

Outro fator importante é que, com o procedimento de calibração desenvolvido, o alvo refletor não precisa ser inclinado, como proposto na calibração por reciprocidade, o que evita a possível formação de modos de propagação no alvo refletor. Adicionalmente, não é necessário o uso de absorvedores pelo uso de um *burst* com janelamento do sinal no tempo feito de forma a evitar a contaminação do sinal direto

pelo sinal refletido. O sinal com *burst* garante a não influência dos sinais refletidos nas paredes do tanque acústico.

A partir da análise da planilha de incerteza é possível concluir que a diminuição da incerteza de medição em tensão iria acarretar na redução da incerteza expandida de medição do procedimento de calibração.

Com relação à calibração da fase da sensibilidade, os resultados mostrados na tabela 5.5 não são estatisticamente diferentes para o nível de confiança de 95%. Adicionalmente, os resultados da tabela 5.8 mostram o resultado de 4 medições, sobre os quais foi aplicado o teste qui-quadrado em todos os pares de resultados, resultando em  $\chi^2_{APD}$  igual a 0,90, que é menor do que o valor crítico  $\chi^2_{APD} (7,81)$  para nível de confiança de 95% e 3 graus de liberdade. Portanto, esta estatística resulta na não rejeição da hipótese nula da igualdade de resultados em 5,0 MHz para os dois hidrofones calibrados independentemente do transdutor de emissão utilizado. A incerteza expandida da fase da sensibilidade variou entre 6° e 13°, a qual está próxima do valor de 15,9° obtido por KOCK e WILKENS [46] para medições na faixa de 2 a 5 MHz utilizando o método de calibração *time-delay spectrometry*. Resultados melhores para a incerteza de calibração da fase da sensibilidade, 10° e 7,2° na faixa de frequência de 1 a 2 e 2 a 5 MHz, respectivamente, foram obtidos por KOCH [71].

A determinação do instante de tempo inicial,  $t_i$ , é o ponto importante a ser considerado para a redução da incerteza de medição de fase da sensibilidade. A contribuição de incerteza devida ao ruído de medição do sistema ( $u_r^{\angle M_h}$ ) é importante, pois está relacionada à determinação do instante inicial  $t_i$ .

A característica inovadora deste procedimento de calibração primário consiste na aplicação do método da reciprocidade para determinar a sensibilidade de hidrofones em módulo e fase. A incerteza expandida de medição foi utilizada como parâmetro de

comparação para concluir que os resultados de medição não são estatisticamente diferentes para o intervalo com nível de confiança especificado de 95%.

A importância deste desenvolvimento consiste no apoio à área de instrumentação dos laboratórios que utilizam hidrofones como instrumento de medição.

Este procedimento conta ainda com a importante característica de ser robusto em termos de erros de alinhamento e utilizar equipamentos disponíveis na maioria dos laboratórios de ultrassom.

Possivelmente a contribuição mais importante deste trabalho do ponto de vista metrológico foi possibilitar a atualização da Norma para Calibração de Hidrofones [2], editada em sua versão 2013, de forma a incluir a calibração do módulo da sensibilidade de hidrofones por reciprocidade utilizando dois transdutores em sua forma integral.

## Referências Bibliográficas

- [1] INMETRO, 2012, *1º edição luso-brasileira do VIM 2012*. 1 ed, Duque de Caxias, Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia.
- [2] IEC, 2013, *Ultrasonics – Hydrophones – Part 2: Calibrations for Ultrasonics Fields up to 40 MHz 62127-2:2013*, 1.1 ed, Geneva, International Electrotechnical Commission.
- [3] COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES, 1991, *Intercomparison of Imm Hydrophone Calibrations in the Frequency Range 0.5 to 15 MHz*. Report EUR 13525 EN, Brussels, Luxemburg.
- [4] FOLDY, L.L.; PRIMAKOFF, H. “A general Theory of Passive Linear Electroacoustic Transducers and the Electroacoustic Reciprocity Theorem”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, v.17, n.2, pp.109–120, 1945.
- [5] CHIVERS, R.C., LEWIN, P.A. “The Voltage Sensitivity of Miniature Piezoelectric Plastic Ultrasonic Probes”, *Ultrasonics*, v. 20, pp. 279-281, 1982.
- [6] LEWIN, P.A., CHIVERS, R.C. “Voltage Sensitivity of Miniature Ultrasonic Probes”, *Ultrasonics*, v.21, pp. 282-283, 1983.
- [7] HARRIS, G.R. “Sensitivity Considerations for PVDF Hydrophones Using the Spot-poled Membrane Design”, *IEEE Transactions Sonics & Ultrasonics*, su-29, n.6, pp. 370-377, 1982.
- [8] WILKENS, V. “Characterization of an Optical Multilayer Hydrophone for use as Broadband Ultrasound Reference Receiver – Comparison with PVDF Membrane Hydrophone”, *Proceedings IEEE International Symposium on Ultrasonics Ferroelectrics Frequency Control*, pp. 773-776, 2002.
- [9] WURSTER, C., STAUDENRAUS, J., EISENMENGER, W. “The Fiber Optic Probe Hydrophone”, *Proceedings on Ultrasonics Symposium*, pp. 941-944, 1994.
- [10] WILKENS, V., KOCH, C. ” Fiber-Optic Multilayer Hydrophone for Ultrasonic Measurement”, *Ultrasonics*, pp. 45-49, 1999.
- [11] CARSTENSEN, E.L, “Self-reciprocity Calibration of Electroacoustic Transducers”, *The Journal of the Acoustical Society of America*”, v.19, n.4, pp. 961–965, 1947.
- [12] BOBBER, R. J. “General Reciprocity Parameter”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 39, n.4, pp. 680-687, 1966.

- [13] PRESTON, R.C., 1991, *Output Measurements for Medical Ultrasound*, Teddington, Springer-Verlag.
- [14] PRECISION ACOUSTICS, 2006. *HP Series High Performance Hydrophone Measurement System*, Precision Acoustics Ltd, Dorchester.
- [15] BRENDLELL, K., LUDWIG, G. "Calibration of Ultrasonic Standard Probe Transducers", *Acustica*, v.36, pp. 203-208, 1976.
- [16] BACON, B.R. "Characteristics of a PVdF Membrane Hydrophone for Use in the Range 1-100 MHz", *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, v. SU-29(1), pp. 18-25, 1981.
- [17] PRESTON, R.C., ROBINSON, S.P., ZEQRIRI, B., et al. "Primary Calibration of Membrane Hydrophones in the Frequency Range 0,5 MHz to 60 MHz", *Metrologia*, v. 36, pp. 331-343, 1999.
- [18] COSTA-FELIX, R.P.B. *Aplicações Metrológicas do Ultra-som Empregado em Engenharia Biomédica Utilizando Varreduras de Senos (Chirps)*, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.
- [19] PRESTON, R.C., BACON, D.R., LIVETT, A.J., et al. "PVDF Membrane Hydrophone Performance Properties and Their Relevance to the Measurement of the Acoustic Output of Medical Ultrasonic Equipment", *Journal of Physics E Scientific Instruments*, pp. 786-796, v. 16, 1983.
- [20] PRECISION ACOUSTICS, 2006, *Uncoated Coplanar Membrane Hydrophone Measurement System*, Precision Acoustics Ltd, Dorchester.
- [21] CORBETT III, S.S. "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, pp. 162-167, 1988.
- [22] HERMAN, B.A., HARRIS, G.R. "Calibration of Miniature Ultrasonic Receivers Using a Planar Scanning Technique", *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 72, n.5, pp. 1357-1363, 1982.
- [23] BEISSNER, K. "Primary Measurement of Ultrasonic Power and Dissemination of Ultrasonic Power Reference Values by Means of Standard Transducers", *Metrologia*, v. 36, pp. 313-320, 1999.
- [24] KOCH, C., MOLKENSTRUCK, W. "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, pp. 1303-1314, 1999.
- [25] BACON, D. "Primary Calibration of Ultrasonic Hydrophones Using Optical Interferometry", *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, v. 35, n.2, pp. 152-161, 1998.
- [26] PRESTON, R.C., ROBINSON, S.P., ZEQRIRI, B., et al. "Primary Calibration of Membrane Hydrophones in the Frequency Range 0.5 MHz to 60 MHz", *Metrologia*, v. 36, pp. 331-343, 1999.
- [27] HARLAND, A.R., PETZING, J.N., TYRER, J.R., et al. "Application and Assessment of Laser Doppler Velocimetry for Underwater Acoustic Measurement", *Journal of Sound and Vibration*, n.265, pp. 627-645, 2003.
- [28] EBAUGH, P., MUESER, R. E. "The Practical Application of the Theorem in the Calibration of Underwater Sound Transducer", *The Journal of the Acoustical Society of America*, v.19, n.4, pp. 695-700, 1947.
- [29] SHOU, W.; DUAN, S., HE, P., et al. "Calibration of a Focusing Transducer and Miniature Hydrophone as Well as Acoustic Power Measurement Based on Free-Field Reciprocity in a Spherically Focused Wave Field", *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectric and Frequency Control*, v. 53, n. 3, pp. 564-570, 2006.
- [30] BEISSNER, K. "Free-Field Reciprocity Calibration in the Transition Range Between Near Field and Far Field", *Acustica*, V.46, pp.162-167, 1980
- [31] LABUDA, C.; RAYMOND, J. L.; CHURCH, C. C., 2004, *Reciprocity calibration of hydrophones in the megahertz frequency range*. In: IEEE International Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control Joint 50TH Anniversary Conference, Montreal. Proceedings, v. 3, pp. 1595-1597, Ago. 2004.
- [32] REID, J.M. "Self-Reciprocity Calibration of Echo-Ranging Transducers", *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 55, n.4, pp. 862-868, 1974.
- [33] LUDWIG, G.; BRENDEL, K. "Calibration of Hydrophones Based on Reciprocity and Time Delay Spectrometry", *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectric and Frequency Control*, v. 35, n. 2, pp. 168-174, 1988.
- [34] LEWIN, PA., *Calibration and performance evaluation of miniature ultrasonic hydrophones using time delay spectrometry*, In IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings, pp. 660-664, 1981.
- [35] GAMMELL, P.M., MARUVADA, S, HARRIS, G.R. "An Ultrasonic Time-Delay Spectrometry System Employing Digital Processing", *IEEE Transactions*



- on Ultrasonics, Ferroelectric and Frequency Control*, v. 54, n. 5, pp. 1036–1044, 2007.
- [36] PEDERSEN, P.C., Lewin, P.A., Bjorno, L. “Application of Time Delay Spectrometry for Calibration of Ultrasonic Transducers”, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectric and Frequency Control*, v. 35, n. 2, pp. 185–205, 1988.
- [37] HARRIS, G.R., GAMMELL, P.M., LEWIN, P.A., RADULESCU, E.G. “Interlaboratory Evaluation of Hydrophone Sensitivity Calibration from 0.1 to 2 MHz Via Time Delay Spectrometry”, *Ultrasonics*, v.42, n. 1–9, pp. 349–353, 2004.
- [38] WEAR, K.A., GAMMEL, P.M., MARUVADA, S., et al. “Time-Delay Spectrometry Measurement of Magnitude and Phase of Hydrophone Response”, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectric and Frequency Control*, v. 58, n. 11, pp. 2325–2333, 2011.
- [39] LUCKER, L.D., BUREN, A.L.V. “Phase Calibration of Hydrophones”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 70, n.2, pp. 516-519, 1981.
- [40] HAYMANN, G., ROBINSON, S.P. *Phase calibration of hydrophones by the free-field reciprocity method in the frequency range 10 kHz to 400 kHz*, In: NPL Report AC-1, v. 3, pp. 1-23, Set. 2007.
- [41] ISAEV, A.E., MATEVEEV, A.N., POLIKARPOV, A.M., et al. “Measurement of the Sensitivity Phase Frequency Characteristics of Hydrophones by the Reciprocity Method”, *Measurement Techniques*, v. 56, n. 6, pp. 706-711, 2013
- [42] GAMMELL, P.M., LIU, Y., MARUVADA, S., WEAR, K.A., et al., *Phase measurement with a simplified ultrasonic time delay spectrometry*, In AIP Conference Proceedings, v. 1430, n.1, pp. 2013-2020, 2013.
- [43] WILKENS, V. “Characterization of an Optical Multilayer Hydrophone with Constant Frequency Response in the Range from 1 to 75 MHz”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 113, n.3, pp. 1431-1438, 2003.
- [44] WILKENS, V. and KOCH, C. ”Optical Multilayer Detection Array for Fast Ultrasonic Field Mapping”, *Optical Society of America*, 1999, v. 24, n. 15, pp. 1026-1028, 1999.
- [45] WILKENS, V., KOCH, C. “Amplitude and Phase Calibration of Hydrophones up to 70 MHz using Broadband Pulse Excitation and an Optical Reference Hydrophone”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 115, n.6, pp. 2892-2903, 2004.

- [46] KOCH, C., WILKENS, V. “Phase Calibration of Hydrophones: Heterodyne Time-Delay Spectrometry and Broadband Pulse Technique Using an Optical Reference Hydrophone”, *Journal of Physics Conference Series*, v.1, pp. 14-19, 2004.
- [47] MACLEOD, H.A., 2010, *Thin-Film Optical Filters*. 4ed. New York, CRC Press.
- [48] BLOOMFIELD, P.E., GANDHI, G., LEWIN, P.A. “Membrane Hydrophone Phase Through Nonlinear Acoustic Measurements”, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectric and Frequency Control*, v. 58, n. 11, pp. 2418–2437, 2011.
- [49] BLOOMFIELD, P.E., LEWIN, P.A. “Determination of Ultrasonic Hydrophone Phase From Fourier-Hilbert Transformed to 40 MHz Time Delay Spectrometry Amplitude”, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectric and Frequency Control*, v. 61, n. 4, pp. 662–672, 2014.
- [50] NEER, P.L.M.J.V., VOS, H.J., JONG, N.D. “Reflector-Based Phase Calibration of Ultrasound Transducers”, *Ultrasonics*, v.51, pp. 1-6, 2011.
- [51] NEER, P.L.M.J.V., VOS, H.J., DANILOUCHKINE, M.G., et al., *Simple method for measuring phase transfer functions of transducers*, In: Proceedings on Ultrasonics Symposium, pp. 1454-1457, 2010.
- [52] GOLDSTEIN, A., GANDHI, D.R., O'BRIEN, W. “Diffraction Effects in Hydrophone Measurements”, *Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics Frequency Control*, v. 45, n.4, pp. 972-979, Jul.1998.
- [53] FAY, B. “Numerische Berechnung der Beugungsverluste im Schallfeld von Ultraschallwandlern”, *Acustica*, v. 36, n.4, pp. 209-213, 1976.
- [54] COBBOLD, R.S.C., 2007, *Foundations of Biomedical Ultrasound*, New York, Oxford University Press.
- [55] RADULESCU, E.G., LEWIN, P.A., GOLDSTEIN, A., et al. “Hydrophone Spatial Averaging Corrections from 1 to 40”, *Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics Frequency Control*, v. 48, n.6, pp. 1575-1580, 2001.
- [56] INMETRO, 2012, *Avaliação de Dados de Medição: Guia para a Expressão da Incerteza de Medição – GUM 2008*, Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, Duque de Caxias, RJ.

- [57] INMETRO, 2011, *Orientação Sobre Validação de Métodos Analíticos – DOQ CGCRE 008*, Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, Duque de Caxias, RJ.
- [58] INMETRO, 2014, *Procedimento para o cálculo e medição do coeficiente de reflexão ultrassônico de um cilindro de aço inoxidável. R-0303/2014*, Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, Duque de Caxias, RJ.
- [59] NPL, 2000, *Speed of Sound in Pure Water*. Technical Guides, National Physical Laboratory, Teddington, UK.
- [60] INMETRO, 2011, *DIMCI 2167/2011*, Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, Duque de Caxias, RJ.
- [61] NPL, 2005, *BIPM/CIPM Key Comparison CCAUV.U-K2: Comparison of Imm Hydrophone Calibrations in the Frequency Range 1MHz to 15 MHzr*. NPL Report DQL-AC (RES) 13, National Physical Laboratory, Teddington, UK.
- [62] TEKTRONIX, 2008, *Osciloscópios de Fósforo Digital Série TDS3000B*, Oregon, Tektronix Inc.
- [63] INMETRO, 2011, *Implantação da Calibração em Frequência de Geradores Ultrassônicos R-2428/2011*, Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, Duque de Caxias, RJ.
- [64] INMETRO, 2012, *Calibração de Impedância de um Shunt Elétrico Utilizando um Analisador de Impedância Vetorial R-0065/2012*, Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, Duque de Caxias, RJ.
- [65] INMETRO, 2010, *Implantação e validação do sistema de mapeamento de transdutores de ultrassom de imersão aplicados em ensaios não destrutivos (END) para determinação da distância focal, do comprimento focal, da largura focal e da divergência do feixe R-0317/2010*, Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, Duque de Caxias, RJ.
- [66] AGILENT TECHNOLOGIES, 2003, *Agilent 4294A Precision Impedance Analyzer Operation Manual*, Santa Clara, CA, USA.
- [67] STEELE, A.G, DOUGLAS, R.J. “Extending En for Measurement Science”, *Metrologia*, pp. S235-S243, 2006.
- [68] DOUGLAS, R.J., STEELE, A.G. “Pair-Difference Chi-Squared Statistics for Key Comparisons”, *Metrologia*, pp. 89-97, 2006.
- [69] CHATFIELD, C., 1992, *Statistics for Technology*, London, Chapman & Hall.

- [70] YANG, P., XING, G., He, L. “Calibration of High-Frequency Hydrophone up to 40 MHz by Heterodyne Interferometer”, *Ultrasonics*, v.54, pp. 402-407, 2014.
- [71] KOCH, C. “Amplitude and Phase Calibration of Hydrophones by Heterodyne and Time-Gated Time-Delay Spectrometry”, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, v.50, pp. 344-348, 2003.