

## **O ESTÁGIO ATUAL DA PADRONIZAÇÃO PRIMÁRIA DE VIBRAÇÕES MECÂNICAS NO PAÍS**

*Gustavo P. Ripper, Ronaldo da Silva Dias, Guilherme de A. Garcia*

Inmetro/Diavi/Lavib, Av. Nossa Senhora das Graças 50, Xerém, D. Caxias, 25250-020 RJ, Brasil  
lavib@inmetro.gov.br

**Resumo:** Este trabalho apresenta o estágio atual da padronização primária de vibrações mecânicas no país. São descritos os principais sistemas de calibração absoluta de acelerômetros implementados no Laboratório de Vibrações do Inmetro. São apresentados alguns resultados típicos de calibração obtidos e são abordadas as recentes comparações interlaboratoriais que o Inmetro participou usando estes sistemas. Também são relacionados alguns projetos de pesquisa e desenvolvimento na área de vibrações e choque.

**Palavras chave:** Vibrações, Calibração, Acelerômetro, Interferometria.

### **1. INTRODUÇÃO**

O Laboratório de Vibrações (Lavib) do Inmetro vem desenvolvendo e implementando sistemas de calibração primária de vibrações desde meados dos anos 90. Atualmente, possui sistemas que lhe permitem prestar serviços de calibração de acelerômetros padrão utilizando interferometria a laser em conformidade com a norma internacional ISO 16063-11 [1] na faixa de frequências entre 10 Hz e 10 kHz com incertezas de medição comparáveis às oferecidas pelos principais Institutos Nacionais de Metrologia (NMIs) de outros países atuantes na área.

A padronização primária de vibrações é de importância estratégica para o país, pois aumenta a sua autonomia metrológica na área. Ela capacita o Inmetro a passar do estágio de rastreamento dos padrões nacionais no exterior a um nível mais elevado, no qual exerce participação ativa em comparações interlaboratoriais de alto nível metrológico com outros NMIs. Estas comparações servem para avaliação da qualidade dos resultados obtidos pelos participantes segundo critérios objetivos e em última instância, fornecem uma ferramenta de comparabilidade entre as diversas implementações e serviços metrológicos avaliados. Isso é feito através das tabelas com os graus de equivalência entre um NMI e o valor de referência de uma intercomparação chave e das tabelas com o grau de equivalência entre diferentes NMIs. Assim, essas comparações fornecem as evidências objetivas de adequação da efetiva Capacidade de Medição e de Calibração (CMC) [2] de um NMI a aquela declarada no Apêndice C do Acordo de Reconhecimento Mútuo [3].

A incerteza reportada atualmente pelo Inmetro para os seus clientes varia entre 0,5 % e 1,5 %, conforme a frequência de calibração. Entretanto, o laboratório vem demonstrando a capacidade de redução substancial destas incertezas em um futuro breve.

### **2. TRANSDUTOR DE VIBRAÇÕES**

Um transdutor de vibrações é um dispositivo que fornece uma grandeza de saída que tem uma determinada correlação com a grandeza de movimento mecânico de entrada. As grandezas de movimento de translação são: deslocamento, velocidade e aceleração e as grandezas de saída geralmente são elétricas, como: carga, tensão, corrente, resistência e capacitância.

O transdutor mais utilizado atualmente para medição de vibrações é o acelerômetro piezoelétrico. Este tipo de transdutor consiste em um sistema massa-mola de 1 grau de liberdade, onde a mola é composta por um conjunto de elementos piezoelétricos de alta rigidez mecânica, os quais sofrem o efeito da força gerada por uma massa rígida quando o sistema é submetido a uma dada aceleração. Estes elementos geram um sinal de carga elétrica proporcional à força e conseqüentemente à aceleração a que são submetidos.

Acelerômetros padrão são transdutores de características construtivas específicas que incluem modelos “single-ended” (SE) e “double-ended” (DE). Os modelos DE são conhecidos também como “back-to-back” (BTB) e possuem duas faces de montagem: uma inferior, para fixação ao excitador de vibrações e uma superior, para montagem do transdutor a ser calibrado. O conjunto sensor geralmente é montado de forma invertida, de forma que a superfície de referência do padrão seja a sua face superior, usada para montagem do transdutor a ser calibrado. Modelos SE são muito usados como referências internas de excitadores de calibração ou sob mesas de calibração. Além disso, são empregados para verificação periódica de acelerômetros BTB.

Os acelerômetros padrão geralmente empregam elementos sensores especiais, visando tanto uma elevada estabilidade temporal como características superiores de

linearidade em amplitude daquelas observadas em transdutores comuns.

Acelerômetros piezoelétricos de alta impedância geram sinais de carga que necessitam ser convertidos em sinais de tensão de baixa impedância adequados à instrumentação de medição. A amplificação e a conversão de impedância são feitas com um condicionador de sinais.

Uma cadeia padrão de medição de aceleração compreende um acelerômetro padrão, um cabo especial de baixo ruído e um condicionador de sinais.

Laboratórios secundários de calibração na área de vibrações normalmente solicitam ao Inmetro a calibração primária de cadeias padrão de medição de aceleração ou acelerômetros padrão para posteriormente usá-los como padrões de referência em calibrações comparativas de transdutores de vibração, cadeias e sistemas de medição de vibração e calibradores portáteis de acelerômetros.

### 3. FUNDAMENTOS DE CALIBRAÇÃO

#### 3.1. Sensibilidade de um transdutor

A característica de principal interesse a ser determinada para um transdutor de vibrações é a sua sensibilidade, medida ao longo da faixa de amplitude e frequência, para o grau de liberdade em que o transdutor foi desenvolvido para ser usado. Toda calibração compreende a especificação de um resultado, ao qual deve ser associada uma estimativa da incerteza de medição para dado nível da confiança. Esta incerteza deve ser calculada e expressa de acordo com o Guia para Expressão de Incerteza de Medição [4].

A sensibilidade  $S_{yx}$  é definida como a razão entre a resposta  $Y$  de um sistema qualquer, gerada por um estímulo  $X$ , em uma frequência  $f$ . No caso de transdutores, geralmente o estímulo e a resposta correspondem a grandezas físicas distintas, portanto a sensibilidade representa a razão entre as grandezas físicas de saída e de entrada:

$$S_{yx} = Y / X \quad (1)$$

sendo que  $S_{yx}$  é expressa nas unidades dadas pela razão das unidades das grandezas de saída e de entrada.

No caso mais geral, a sensibilidade é uma grandeza complexa, contendo informações de magnitude e de fase em função da frequência. Pode ser entendida como a função de transferência do sistema, que pode ser expressa na forma de uma Função de Resposta em Frequência (FRF). A magnitude da sensibilidade e o atraso de fase entre a excitação e a resposta são dados por

$$\begin{aligned} \hat{S}_{yx}(f) &= \hat{Y}(f) / \hat{X}(f) \\ \Delta\varphi_{yx}(f) &= \varphi_y(f) - \varphi_x(f) \end{aligned} \quad (2)$$

sendo que  $(\hat{\phantom{x}})$  representa amplitude e  $\varphi$  os ângulos de fase.

Para simplificar as equações apresentadas ao longo do texto, será omitida a função da frequência ( $f$ ), mas ela deve estar subentendida. Para diversas aplicações, o conhecimento da magnitude da sensibilidade em função da frequência é o suficiente. Já, quando se requer determinar a direção do movimento, necessita-se da informação de fase.

A sensibilidade de um transdutor é dada pela razão entre a grandeza elétrica de saída e a grandeza que caracteriza o movimento mecânico imposto a este. Considerando um acelerômetro piezoelétrico, que gera um sinal de carga elétrica  $q$ , em picocoulombs (pC), quando sujeito a uma aceleração  $a$ , em  $m/s^2$ , a sua sensibilidade de carga é dada por

$$S_{qa} = \frac{q}{a}, \quad (3)$$

expressa nas unidades de  $pC/(m/s^2)$ .

#### 3.2. Classificação de sistemas de calibração

Nos sistemas de calibração primária, a sensibilidade do transdutor é determinada por medições das grandezas envolvidas, com base nas unidades fundamentais e derivadas do Sistema Internacional de Unidades (SI). Sistemas para calibração por interferometria, reciprocidade e gravimetria estão incluídos nesta família.

Em sistemas de calibração de acelerômetros padrão por interferometria, a aceleração é determinada em relação ao comprimento de onda  $\lambda$  de um laser e à frequência ( $f = 1/T$ ), logo, às unidades básicas do SI para comprimento (m) e tempo (s). A saída do transdutor é determinada em relação às unidades de grandezas elétricas, como capacitância e tensão elétrica.

Normalmente, sistemas de calibração primária estão restritos a Institutos Nacionais de Metrologia (NMIs) e são utilizados para a calibração de acelerômetros padrão de referência ou de cadeias de medição de aceleração de referência.

Sistemas de calibração secundária empregam a comparação direta dos sinais de saída de dois transdutores, um de referência e o outro, o objeto a ser calibrado, quando ambos são submetidos a um mesmo movimento vibratório.

O presente trabalho se limitará aos sistemas primários implementados no Laboratório de Vibrações do Inmetro.

### 4. NORMAS TÉCNICAS

A calibração de transdutores de vibração é tratada atualmente pelas famílias das normas internacionais ISO 5347 e ISO 16063. Como a família de normas 5347 está em processo de revisão e substituição pela família 16063 – *Methods for the calibration of vibration and shock transducers*, é indicado que o *status* destas normas seja verificado na página da organização de normas internacionais ISO (<http://www.iso.org>). Estas normas abrangem métodos de calibração primária, métodos de calibração comparativa e ensaios para determinação de características adicionais de transdutores para medição de vibração e choque. Neste trabalho, serão tratadas exclusivamente as partes da norma ISO 16063, relacionadas à calibração primária de transdutores de vibração por interferometria a laser.

A parte 1 (ISO 16063-1:1998) [5] apresenta os conceitos básicos relativos à calibração de transdutores de vibração e as diretrizes relativas ao cálculo de incerteza que são válidos para todas as demais partes.

A parte 11 (ISO 16063-11:1999) [1] especifica a instrumentação e os procedimentos para a calibração de acelerômetros (com ou sem condicionador de sinais) para a obtenção da magnitude e o atraso de fase da sensibilidade complexa por excitação senoidal e interferometria a laser. Ela descreve três métodos primários para calibração de acelerômetros de referência: o método de contagem de franjas (método 1), o método de mínimos da função de Bessel J1 (método 2) e o método de aproximação de seno (método 3).

## 5. MÉTODOS INTERFEROMÉTRICOS A LASER

Os métodos 1 e 2 descritos em [1] requerem o uso de um interferômetro de Michelson, que é composto por dois braços ópticos: um de referência e um de medição. Será considerado aqui, um laser de He-Ne para geração de luz com um comprimento de onda de 632,8 nm. Passando o feixe de luz emitido pelo laser por um cubo divisor não polarizado, este é dividido em dois feixes ortogonais, um de referência que é direcionado a um espelho plano fixo e um de medição que é direcionado à superfície vibrante. As reflexões dos dois feixes retornam em direção ao cubo divisor que os realinha, de forma a permitir a interferência destes em um fotodetector, usado para converter o sinal óptico em elétrico.

O movimento relativo entre o braço de medição e o de referência gera as chamadas franjas de interferência, que são usadas para medição do movimento mecânico no ponto de incidência do feixe de medição.

### 5.1. Método 1 - Contagem de franjas

Considerando uma oscilação harmônica do espelho móvel de um interferômetro de Michelson com uma frequência angular  $\omega_1$  e amplitude  $\hat{s}$ , o deslocamento temporal é dado por

$$s(t) = \hat{s} \cos \omega_1 t \quad (4)$$

e a irradiância incidente no fotodetector toma a forma

$$I_{12}(t) = A + B \cos \left[ \frac{4\pi}{\lambda} (L + \hat{s} \cos \omega_1 t) \right] \quad (5)$$

sendo que  $A$  e  $B$  são constantes,  $L$  é diferença entre os caminhos ópticos dos dois braços do interferômetro,  $\lambda$  é o comprimento de onda do laser e o termo entre colchetes, que é conhecido como a fase total do sinal interferométrico  $\varphi_{Mod}(t)$ , representa a diferença de fase entre os dois feixes de luz do interferômetro. Este termo toma a forma de uma função variante no tempo que pode ser decomposta em dois termos:

$$\varphi_{Mod}(t) = \left( \frac{4\pi}{\lambda} \right) L + \left( \frac{4\pi}{\lambda} \right) s(t) = \varphi_0 + \varphi_M(t) \quad (6)$$

onde  $\varphi_0$  é a diferença de fase inicial, que depende da diferença de caminho óptico com o sistema em repouso e

$\varphi_M(t)$  é a diferença de fase modulada associada ao deslocamento do espelho móvel.

A figura 1 apresenta um exemplo da variação da irradiância no tempo, devido ao deslocamento senoidal do espelho móvel. Esta irradiância resultante varia como uma senóide modulada em frequência, onde os máximos e mínimos são visíveis como bandas, ou franjas de interferência.

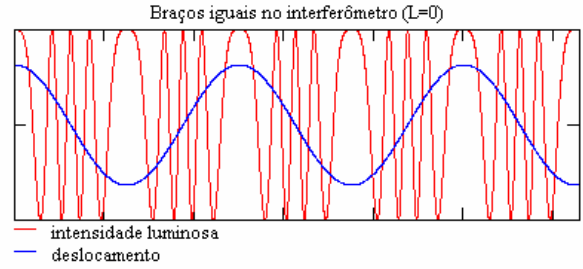


Fig. 1. Franjas de interferência geradas pelo movimento harmônico senoidal de um dos espelhos de um interferômetro de Michelson

Como a amplitude da fase modulada é dada por

$$\hat{\varphi}_M = (4\pi / \lambda) \hat{s}, \quad (9)$$

a distância entre duas franjas de interferência é de meio comprimento de onda, pois corresponde a um ciclo de variação da fase do sinal interferométrico ( $\hat{\varphi}_M = 2\pi$ ).

Para que o espelho móvel complete um período completo de oscilação ( $T = 2\pi / \omega_1$ ), é necessário que ele percorra 4 vezes a distância dada pela amplitude  $\hat{s}$ . Portanto, o número de máximos por período de vibração  $R_f$  é dado por

$$R_f = \frac{4\hat{s}}{(\lambda/2)} = \hat{s} \frac{8}{\lambda}. \quad (7)$$

Esta equação mostra que a amplitude do deslocamento da vibração  $\hat{s}$  pode ser determinada a partir da contagem do número de franjas de interferência por ciclo de oscilação. Uma vez determinado  $\hat{s}$ , as amplitudes da velocidade  $\hat{v}$  e da aceleração  $\hat{a}$  podem ser então obtidas a partir das relações:

$$\begin{aligned} \hat{v} &= 2\pi f_1 \hat{s} \\ \hat{a} &= (2\pi f_1)^2 \hat{s} \end{aligned} \quad (8)$$

Como o método 1 se baseia na contagem do número de franjas de interferência, que é diretamente proporcional à amplitude do deslocamento do braço de medição do interferômetro, é um método aplicável em baixas frequências, tipicamente inferiores a 1 kHz.

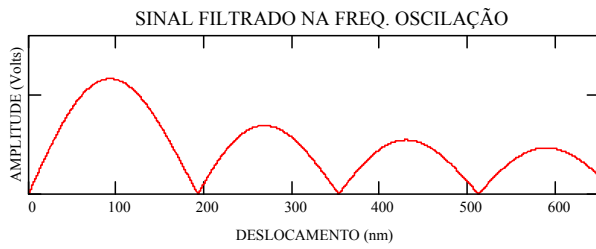
### 5.2. Método 2 - Mínimos da Função de Bessel J1

Filtrando o sinal do fotodetector com um filtro passa-banda estreito, centrado na frequência da oscilação  $f_1$  e tomando apenas a parte AC do sinal, é obtido o sinal de tensão elétrica

$$U_1(t) = K J_1\left(\frac{4\pi\hat{s}}{\lambda}\right), \quad (9)$$

onde  $K$  é uma constante e  $J_1$  representa a função de Bessel de 1ª espécie e 1ª ordem. Este sinal filtrado alterna máximos e pontos de mínima tensão, que são associados à irradiância zero, correspondente aos zeros da função de Bessel  $J_1(\hat{\phi}_M)$  conforme pode ser visto na figura 2. A medição da saída de um transdutor no deslocamento correspondente à condição de zero da função de Bessel permite a determinação da magnitude da sua sensibilidade para esta condição específica.

$$J_1(\hat{\phi}_M) = 0 \Rightarrow \hat{s} = \frac{\lambda}{4\pi} \hat{\phi}_M. \quad (10)$$



**Fig. 2.** Variação da tensão de saída do sistema fotodetector, filtrado em torno de  $f_1$ , em função da variação do deslocamento do espelho móvel

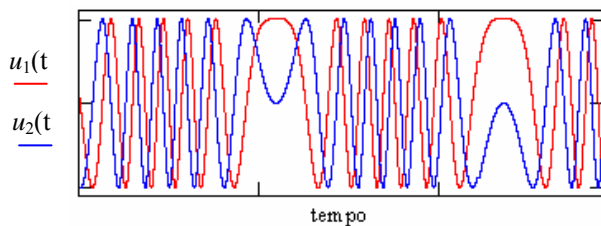
Como a condição de mínimos da função de Bessel é alcançada em deslocamentos específicos, este é um método discreto. Normalmente é aplicado em frequências superiores a 1 kHz. Para um laser de He-Ne, o deslocamento correspondente ao primeiro mínimo da função  $J_1$  é de 193 nm, requerendo elevadas acelerações em altas frequências, como por exemplo: 762 m/s<sup>2</sup> em 10 kHz.

### 5.3. Método 3 - Aproximação de senos

Este método requer o uso de um interferômetro homodino de quadratura ou um interferômetro heterodino do tipo Mach-Zender. Trataremos aqui apenas do interferômetro de quadratura, que é basicamente um interferômetro de Michelson modificado para uso de óptica polarizada, e que fornece dois sinais de saída defasados de 90 graus, ou seja, em quadratura:

$$\begin{aligned} u_1(t) &= \hat{u}_1 \cos \varphi_{Mod}(t) \\ u_2(t) &= \hat{u}_2 \sin \varphi_{Mod}(t) \end{aligned} \quad (11)$$

Na figura 3 é apresentado um exemplo de dois sinais interferométricos em quadratura.

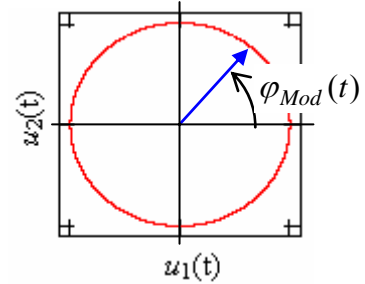


**Fig. 3.** Sinais de saída do interferômetro de quadratura

A partir destes sinais, a fase total do sinal interferométrico pode ser obtida mediante o uso da seguinte relação

$$\varphi_{Mod}(t) = \tan^{-1}\left(\frac{u_2(t)}{u_1(t)}\right). \quad (12)$$

Como uma rotação de  $2\pi$  do vetor da fase total corresponde a um deslocamento do espelho móvel de  $\lambda/2$ , a medição de deslocamentos inferiores a este valor pode ser feita a partir da medição de  $\varphi_{Mod}(t)$ , conforme exemplificado na figura 4.



**Fig. 4.** Gráfico X-Y dos sinais de saída do interferômetro de quadratura

A implementação deste método é normalmente feita através do processamento digital dos sinais interferométricos. Para tal, os sinais de saída dos fotodetectores são amostrados simultaneamente com intervalos equidistantes, fornecendo séries discretas de valores de medição  $u_1(t_i)$  e  $u_2(t_i)$  durante um período de amostragem  $T$ . O sinal discreto no tempo da fase total de modulação  $\varphi_{Mod}(t_i)$  é então calculado por

$$\varphi_{Mod}(t_i) = \tan^{-1}\left(\frac{u_2(t_i)}{u_1(t_i)}\right) + n\pi, \quad \text{onde } n = 0, 1, 2, \dots \quad (13)$$

O valor de  $n$  é escolhido de modo que não haja descontinuidades de  $\varphi_{Mod}(t_i)$  em  $n\pi$ .

Resolvendo um sistema de  $N + 1$  equações

$$\varphi_{Mod}(t_i) = b_0 + b_1 \cos \omega_1 t_i - b_2 \sin \omega_1 t_i. \quad (14)$$

onde  $N + 1$  denota o número de amostras sincronamente amostradas, podemos determinar os parâmetros  $b$  calculados pelo método de aproximação de seno por mínimos quadrados.

Os valores da amplitude da fase modulada  $\hat{\phi}_M$  e da fase  $\varphi_s$  do deslocamento são então calculados segundo as equações

$$\hat{\phi}_M = \sqrt{b_1^2 + b_2^2}. \quad (15)$$

$$\varphi_s = \tan^{-1}\left(\frac{b_2}{b_1}\right). \quad (16)$$

A amplitude do deslocamento é obtida pela equação (9) e a amplitude  $\hat{a}$  e fase  $\varphi_a$  da aceleração da vibração, por

$$\hat{a} = \pi \lambda f^2 \hat{\varphi}_M. \quad (17)$$

$$\varphi_a = \varphi_s + \pi. \quad (18)$$

O mesmo procedimento de aproximação de seno por mínimos quadrados é aplicado ao sinal de saída do transdutor, fornecendo valores para os parâmetros  $b_u$  a serem usados para o cálculo da amplitude  $\hat{u}$  e da fase  $\varphi_u$  do sinal de saída do transdutor.

A magnitude da sensibilidade  $\hat{S}_{ua}$  e a diferença de fase  $\Delta\varphi$  são então determinadas por

$$\hat{S}_{ua} = \frac{\hat{u}}{\hat{a}}, \quad (19)$$

$$\Delta\varphi_{ua} = (\varphi_u - \varphi_a). \quad (20)$$

## 6. SISTEMAS DE CALIBRAÇÃO INTERFEROMÉTRICA A LASER

Os padrões nacionais primários de medição consistem basicamente em: um excitador de vibrações para gerar as grandezas de movimento, um sistema interferométrico para quantificar este movimento mecânico e instrumentação para medição do sinal de saída do transdutor sob calibração. Devido às limitações dos excitadores de vibração, não é possível empregar um único equipamento para a geração de movimento harmônico puro em uma ampla faixa de frequências. Para minimizar a influência de perturbações no movimento gerado, o Lavib emprega diferentes sistemas, usualmente chamados de:

- Sistema de baixas frequências – 1 Hz a 100 Hz;
- Sistema de médias frequências – 10 Hz a 5 kHz;
- Sistema de altas frequências – 4 kHz a 10 kHz;
- Sistema homodino de quadratura - 10 Hz a 10 kHz.

A calibração primária da magnitude da sensibilidade de acelerômetros padrão e de cadeias de medição de aceleração padrão é realizada conforme os requisitos da norma ISO 16063-11:1999 [1]. Atualmente, o Método 1 – “Método de contagem de franjas” é usado desde a frequência de 1 Hz até 1 kHz (vide fig. 5) e o Método 2 – “Método de ponto mínimo” é usado de 1 kHz a 10 kHz (vide fig. 6). O Método 3 – “Método de aproximação por seno” permite a calibração da sensibilidade com níveis constantes de aceleração de 10 Hz a 10 kHz (vide fig. 7). Os dois primeiros métodos usam um interferômetro de Michelson, que só permite a determinação da magnitude da sensibilidade do objeto sob calibração, enquanto o terceiro usa um interferômetro homodino de quadratura, que permite a determinação tanto da magnitude, quanto do atraso de fase da sensibilidade complexa. O sistema desenvolvido pelo Lavib para a realização do Método 3 também é capaz de calibrar de forma automatizada vibrômetros a laser com saída analógica.

Estes padrões primários de medição são normalmente usados para calibração dos acelerômetros padrão de referência e de trabalho do Lavib, calibração de padrões de clientes e em comparações interlaboratoriais com outros NMIs.

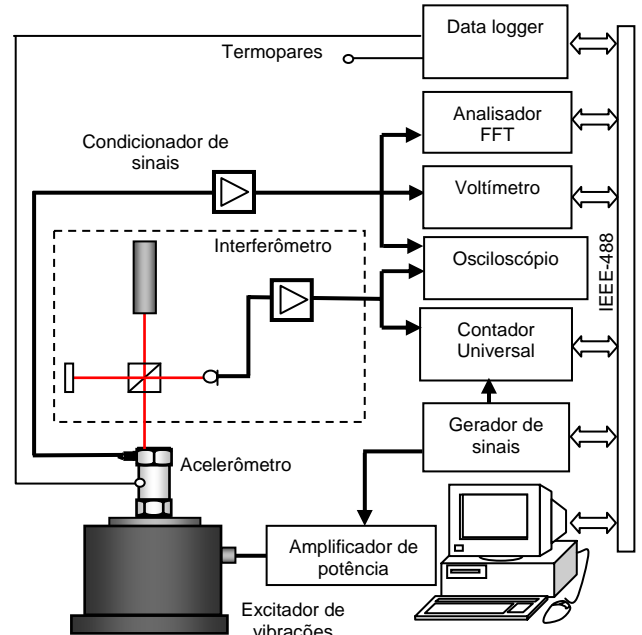


Fig. 5. Sistema de calibração primária de acelerômetros pelo método de contagem de franjas (ISO 16063-11:1999, Método 1)

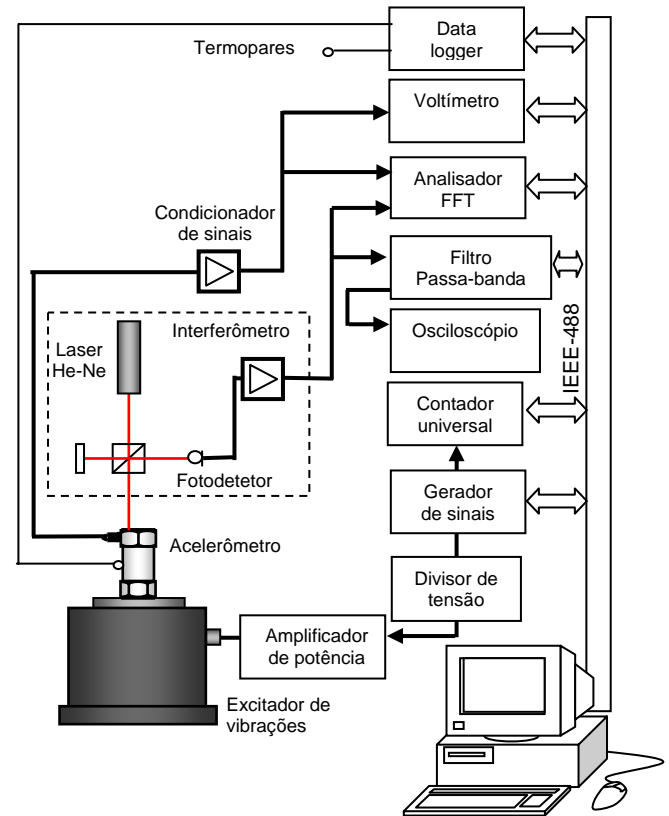


Fig. 6. Sistema de calibração primária de acelerômetros pelo método de mínimos da função de Bessel (ISO 16063-11:1999, Método 2)



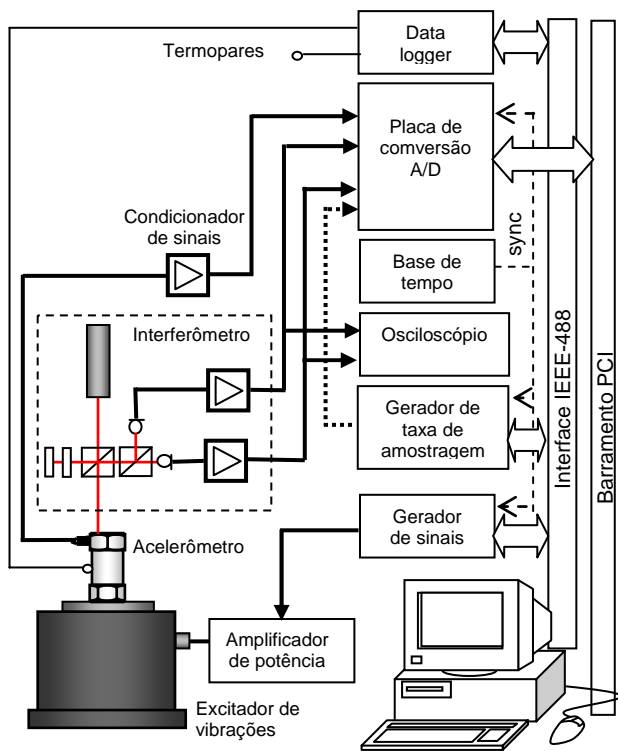


Fig. 7. Sistema de calibração primária de acelerômetros pelo método de aproximação de senos (ISO 16063-11:1999, Método 3)

## 7. COMPARAÇÕES INTERLABORATORIAIS

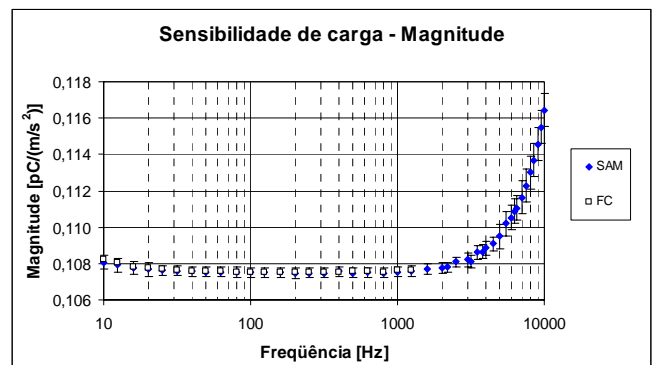
O Acordo de Reconhecimento Mútuo [3] firmado entre NMIs, do qual o Inmetro é signatário, requer a manutenção de um sistema de qualidade que atenda os requisitos da norma ISO/IEC 17025 [6] e a participação em comparações interlaboratoriais para avaliação da conformidade dos resultados de calibrações segundo parâmetros quantitativos.

A conformidade dos serviços de calibração absoluta oferecidos pelo Lavib é periodicamente verificada usando transdutores de referência calibrados por outros NMIs e pelos resultados obtidos em comparações interlaboratoriais. Os desvios obtidos têm demonstrado boa concordância com as incertezas de medição estimadas pelo Lavib, comprovando o elevado nível de confiabilidade dos resultados reportados em seus certificados de calibração.

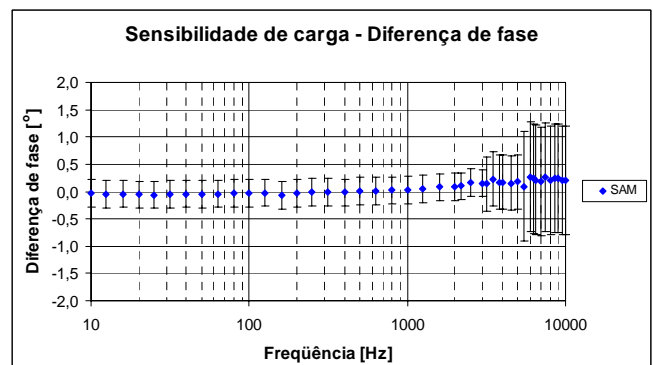
As comparações mais recentes nas quais o Lavib participou foram a comparação bilateral SIM.AUV.V-K1.1, realizada entre o CENAM/México e o INMETRO/Brasil e a comparação CCAUV.V-K1.1, realizada entre PTB/Alemanha, NIM/China, NPLI/Índia e INMETRO/Brasil. Estas duas comparações abrangeram a calibração da sensibilidade complexa de acelerômetros padrão entre 10 Hz e 10 kHz. Resultados parciais da comparação bilateral SIM.AUV.V-K1.1 já foram apresentados em congresso internacional e estão disponíveis na página do IMEKO [7]. Após a conclusão dos relatórios finais destas comparações, os resultados obtidos e os graus de equivalência verificados entre os participantes serão disponibilizados para consulta pública na página do Bureau International des Poids et Mesures (<http://www.bipm.org>).

## 8. RESULTADOS

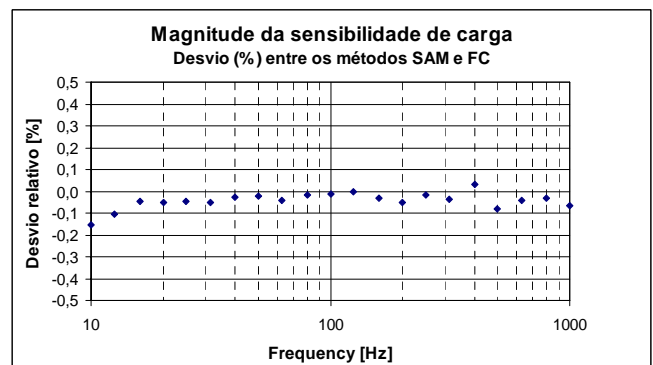
Resultados obtidos para o mesmo acelerômetro padrão com os sistemas primários das figuras 5 e 7, usando respectivamente o método de contagem de franjas e o método de aproximação de seno são apresentados na figura 8. Os valores de magnitude da sensibilidade são apresentados na figura 8(a) e de diferença de fase na figura 8(b). O desvio relativo observado para a magnitude da sensibilidade entre os dois sistemas de calibração é mostrado para a faixa de frequências entre 10 Hz e 1 kHz na figura 8(c). Desvios inferiores a 0,2 % podem ser evidenciados entre 10 e 12,5 Hz e inferiores a 0,1 % entre 16 Hz e 1 kHz, demonstrando o elevado grau de equivalência entre estes sistemas.



(a) Magnitude da sensibilidade obtida por contagem de franjas e SAM



(b) Diferença de fase obtida por SAM



(c) Desvio relativo (%) entre os resultados obtidos nos dois sistemas

Fig. 8. Resultados de calibração primária de acelerômetros pelos métodos de contagem de franjas (FC) e de aproximação de senos (SAM) com os sistemas das figuras 5 e 7, respectivamente.

As incertezas de medição para a calibração de um acelerômetro padrão com o sistema homodino de quadratura estão atualmente em processo de avaliação por meio de comparações interlaboratoriais internacionais. Estima-se que, para calibrações sob condições especiais com este sistema, incertezas expandidas de medição inferiores às apresentadas na tabela 1, são obtidas. A tabela 1 apresenta as incertezas expandidas de medição considerando um fator de abrangência  $k = 2$ , que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95 %.

**Tabela 1. Incerteza expandida da medição ( $k = 2$ )**

<b>Frequência [Hz]</b>	<b><math>U</math> [%]</b>
de 10 a 20	0,35
de 25 a 2500	0,25
de 3000 a 4500	0,35
de 5000 a 6500	0,60
de 7000 a 10000	0,80

<b>Frequência [Hz]</b>	<b><math>U</math> [graus]</b>
de 10 a 3000	0,25
de 3150 a 5000	0,50
de 5500 a 10000	1,0

## 9. CONSIDERAÇÕES

Os sistemas aqui apresentados foram plenamente desenvolvidos pelo corpo técnico do Lavib, que optou pela integração de componentes comerciais com programas de controle e automatização desenvolvidos internamente. Desta forma, o Lavib não está sujeito a limitações impostas tipicamente por sistemas fechados do tipo “caixa-preta” ou por *softwares* proprietários. O domínio de todas as etapas do processo de medição também fornece ao laboratório uma elevada capacidade de adaptação do sistema a diversas aplicações. Assim, não há grandes problemas para substituição de equipamentos, configuração de condições especiais de medição, avaliação de diferentes técnicas de processamento de sinais, exportação de resultados de medição, etc. Dentre os projetos de P&D em andamento e as possibilidades futuras de implementações pelo Lavib, destacamos os seguintes projetos de interesse do laboratório:

- Desenvolvimento de um sistema primário de choque;
- Implementação de um sistema interferométrico heterodino para calibração de acelerômetros em altas frequências;
- Sistema de calibração comparativo de baixa frequência;
- Desenvolvimento de um sistema primário para calibração de vibrômetros com saída digital;
- Aprimoramento do sistema de calibração de quadratura homodino;
- Minimização da incerteza de calibração;
- Desenvolvimento de excitadores de vibração.

Os acelerômetros calibrados pelo Lavib podem ser empregados no desenvolvimento de sistemas de calibração comparativa na área de metrologia dinâmica, como por

exemplo: força, torque e pressão dinâmicas. A tecnologia aplicada à calibração primária de acelerômetros também pode ser aplicada ao desenvolvimento de sistemas primários para estas mesmas grandezas mecânicas.

Por isso, pode-se afirmar que é altamente benéfica uma interação estreita entre as áreas de metrologia de vibrações e de metrologia mecânica, o que poderá levar a uma substancial expansão da gama de serviços metrológicos oferecidos pelo Inmetro. A metrologia de grandezas mecânicas dinâmicas (variantes no tempo) também oferece um vasto campo para o desenvolvimento de pesquisas, desenvolvimentos e inovações, tanto pelo corpo técnico do Inmetro, como por pesquisadores bolsistas atuantes em seus laboratórios. Estes desenvolvimentos poderão gerar impactos significativos em diversos segmentos, como automobilístico; petróleo e gás; de processos de fabricação; aeronáutico; serviços metrológicos; etc.

## 10. CONCLUSÃO

Foi apresentado neste trabalho uma revisão dos métodos primários de calibração de transdutores de vibração e os sistemas disponíveis no Laboratório de Vibrações do Inmetro. Os sistemas implementados permitem a calibração primária por interferometria a laser da sensibilidade complexa de acelerômetros para a faixa de 10 Hz a 10 kHz. Os resultados parciais obtidos em comparações interlaboratoriais com outros Institutos Nacionais de Metrologia vêm comprovando a expansão da capacidade de medição na área de metrologia de vibrações do Inmetro e a sua equivalência internacional.

A tecnologia empregada para a metrologia de vibrações também pode ser aplicada à diversas grandezas da área de metrologia mecânica dinâmica, o que pode propiciar uma futura expansão da gama de serviços disponibilizados pelo Inmetro.

## REFERÊNCIAS

- [1] ISO 16063-11:1999, “Methods for the calibration of vibration and shock transducers – Part 11: Primary vibration calibration by laser interferometry”.
- [2] CMC, “Calibration and Measurement Capabilities (CMC)”, BIPM Key Comparison Database, Appendix C. Disponível em: <<http://kcdb.bipm.org/appendixC/default.asp>>.
- [3] MRA, “Mutual recognition of national measurement standards and of calibration and measurement certificates”, CIPM, BIPM, Paris, France, 1999.
- [4] GUM, “Guia para a Expressão da Incerteza de Medição: 3ª Ed. Brasileira, edição em língua portuguesa do Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)”, INMETRO / ABNT, ISBN 85-07-00251-X, Rio de Janeiro, R.J., agosto de 2003.
- [5] ISO 16063-1:1998, “Methods for the calibration of vibration and shock transducers – Part 1: Basic Concepts”.
- [6] ISO/IEC 17025:2005, “General requirements for the competence of testing and calibration laboratories”,

International Organization for Standardization (ISO),  
Geneve, 2005.

- [7] Ripper, G.P., Silva-Pineda, G., “A bilateral acceleration comparison between CENAM and INMETRO”, IMEKO 20<sup>th</sup> TC3, 3<sup>rd</sup> TC16 and 1<sup>st</sup> TC22 International Conference, 27-30<sup>th</sup> November 2007, Merida, MEXICO. Disponível em :  
<<http://www.imeko.org/publications/tc22-2007/IMEKO-TC22-2007-051u.pdf>>