



V CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
V NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
25 a 28 de agosto de 2008 – Salvador – Bahia - Brasil
August 25 – 28, 2008 - Salvador – Bahia – Brazil

CALIBRAÇÃO DE TRANSDUTORES DE VIBRAÇÃO

Gustavo P. Ripper, lavib@inmetro.gov.br¹

Ronaldo S. Dias, rsdias@inmetro.gov.br¹

Guilherme A. Garcia, gagarcia@inmetro.gov.br¹

¹ Inmetro - Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial, Divisão de Acústica e Vibrações, Laboratório de Vibrações, Av. N. Senhora das Graças, 50, CEP 25250-020, Xerém, RJ, Brasil

Resumo: Neste trabalho é apresentada a estrutura atual da metrologia de vibrações no País. São abordadas as técnicas de calibração de transdutores de vibração, a importância da rastreabilidade de medições, a capacidade de medição e calibração do Inmetro e dos laboratórios acreditados pela Rede Brasileira de Calibrações. Também são descritos os principais projetos de pesquisa e desenvolvimento de interesse do Laboratório de Vibrações do Inmetro.

Palavras-chave: metrologia, calibração, vibrações, acelerômetro.

1. INTRODUÇÃO

A engenharia mecânica requer a medição de vibrações mecânicas em diversas aplicações inerentes às suas atividades e responsabilidades. Dentre estas, destacamos atividades como: pesquisa e desenvolvimento, controle de processos produtivos, manutenção, usinagem de precisão, ensaios mecânicos, balanceamento, ensaios ambientais e de durabilidade, monitoração de máquinas, etc. Assim, a medição de vibrações está presente em áreas tão distintas como: indústrias aeronáutica e aeroespacial, automobilística, de bens de consumo, de petróleo, farmacêutica, além da produção e transmissão de energia, manutenção preditiva, saúde e segurança e transporte.

Estas medições devem ser realizadas por técnicos treinados e qualificados a usar a instrumentação de medição segundo procedimentos adequados. Também é recomendável que se usem equipamentos calibrados para assegurar a qualidade dos resultados obtidos. Estes são requisitos para a rastreabilidade dos resultados de uma medição às diferentes unidades do sistema internacional de unidades (SI, 2006).

Este trabalho aborda o estágio atual da calibração de transdutores de vibração no País.

2. CALIBRAÇÃO

O termo “calibração” se refere ao conjunto de procedimentos usados para verificar todas as características que podem influenciar a exatidão das medições feitas com um transdutor, equipamento, cadeia ou sistema de medição.

A calibração de um transdutor de vibrações tem como principal objetivo a determinação da sua sensibilidade a vibrações mecânicas nas amplitudes e frequências de interesse, para o grau de liberdade de movimento em que este foi projetado para ser usado. Toda calibração deve compreender a especificação de uma estimativa da incerteza de medição e de um nível da confiança associado a esta incerteza. As normas vigentes requerem que o cálculo desta incerteza seja feito e expresso de acordo com o Guia para Expressão de Incerteza de Medição (GUM, 2003).

Neste trabalho, é utilizado o termo “sensibilidade” para retratar o fator de calibração de um transdutor de vibrações, pois esta é a descrição normalmente empregada na área de vibrações. Sempre que o termo sensibilidade for tratado aqui de forma genérica, estaremos nos referindo à sensibilidade medida para o eixo principal de funcionamento de um transdutor de vibrações. Diversas outras características também podem ser medidas, como: linearidade de amplitude, sensibilidade transversal, sensibilidade à temperatura, sensibilidade ao torque de montagem, fator de amortecimento, etc. Entretanto, estas características secundárias não serão tratadas neste trabalho.

2.1. Sensibilidade

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, para condições de contorno específicas.

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

Considerando que um transdutor é basicamente um dispositivo que converte energia de uma forma em outra, temos que para este tipo de sistema o estímulo e a resposta correspondem a grandezas físicas distintas. Como exemplo, temos os transdutores de vibrações que geralmente relacionam grandezas de entrada de movimento mecânico, como aceleração, velocidade e deslocamento a grandezas de saída elétrica, como tensão elétrica, carga, corrente elétrica, resistência e capacitância.

No caso mais geral, a sensibilidade S_{yx} é uma grandeza complexa, contendo informações de magnitude e de fase em função da frequência. Pode também ser entendida como a função de transferência do sistema, 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 dadas 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 $(\hat{})$ representa amplitude e φ os ângulos de fase. Para efeito de simplificação, será omitido das equações apresentadas a seguir a função da frequência (f), mas ela deve estar subentendida.

A sensibilidade de um transdutor de vibrações é dada pela razão entre a grandeza elétrica de saída e a grandeza de movimento mecânico de entrada. Supondo um acelerômetro piezoelétrico, que gera um sinal de carga elétrica q , quando sujeito a uma aceleração a , temos que a sua sensibilidade de carga é dada por

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

expressa em pC/(m/s²).

A sensibilidade de um condicionador de sinais é dada pela razão entre as grandezas elétricas de saída e de entrada. Considerando um amplificador de carga que fornece um sinal de tensão u para uma dada carga elétrica q na sua entrada, a sensibilidade G , é

$$G = \frac{u}{q}, \quad (4)$$

expressa em mV/pC. Para um amplificador de tensão, filtro, atenuador, ou qualquer outro equipamento auxiliar em que ambos os sinais de entrada u_{in} e saída u_{out} sejam tensão elétrica, a sensibilidade (ou ganho adimensional) é

$$G = \frac{u_{out}}{u_{in}}, \quad (5)$$

expressa em V/V.

A sensibilidade da cadeia de medição é dada pela multiplicação das sensibilidades individuais dos elementos que a compõem. Considerando uma cadeia de medição de aceleração composta por um acelerômetro piezoelétrico e um amplificador de carga, a sensibilidade de tensão, expressa em mV/(m/s²), é

$$S_{ua} = S_{qa} \cdot G = \frac{q}{a} \cdot \frac{u}{q} = \frac{u}{a}. \quad (6)$$

3. NORMAS TÉCNICAS

A calibração de transdutores de vibração é tratada pelo conjunto de normas ISO 5347 e ISO 16063. A família de normas 5347 está sendo revisada e substituída pela família 16063 – *Methods for the calibration of vibration and shock transducers*. O estágio atual destas normas pode ser verificado na página da Organização de Normas Internacionais ISO (<http://www.iso.org>). Elas abrangem métodos de calibração primária, métodos de calibração comparativa e ensaios para determinação de características adicionais de transdutores para medição de vibração e choque.

Trataremos neste trabalho exclusivamente das partes da norma ISO 16063 que tratam da calibração primária por interferometria a laser e das calibrações de vibração e de choque por comparação a um transdutor de referência. É apresentado a seguir um resumo sobre o escopo destas partes relacionadas:

A parte 1 (ISO 16063-1:1998) 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) especifica a instrumentação e os procedimentos para a calibração de acelerômetros somente ou com condicionador, abrangendo a obtenção da magnitude e o atraso de fase da sensibilidade complexa empregando excitação senoidal e interferometria a laser. Ela descreve três métodos interferométricos para calibração de acelerômetros de referência.

A parte 21 (ISO 16063-21:2003) descreve a calibração de transdutores de vibração por comparação. Embora ela descreva principalmente a calibração por comparação direta a um padrão calibrado por métodos primários, os métodos descritos também podem ser aplicados em outros níveis da hierarquia metrológica.

A parte 22 (ISO 16063-22:2005) especifica a instrumentação e os procedimentos a serem usados para a calibração secundária de transdutores de vibração, empregando excitação por choque.

4. METROLOGIA DE VIBRAÇÕES NO PAÍS

A infra-estrutura metrológica de um país é estruturada segundo uma hierarquia, como a mostrada na Fig. 1. No primeiro nível está o Instituto Nacional de Metrologia (NMI) do País, que realiza as unidades de medida de determinadas grandezas e as dissemina para os clientes externos por meio de serviços de calibração de padrões. Em um segundo nível, os laboratórios acreditados e não-acreditados de calibração usam estes padrões para disseminar as unidades de medida para os equipamentos de medição e ensaio de seus clientes, os quais estão em um terceiro nível. Estes clientes geralmente estão distribuídos em indústrias, laboratórios de ensaio, universidades e empresas diversas, como: prestadoras de serviços metrológicos, de manutenção e monitoração de máquinas, consultoria, etc. Na base da pirâmide ficam os produtos e serviços que dependem das unidades da referida grandeza.

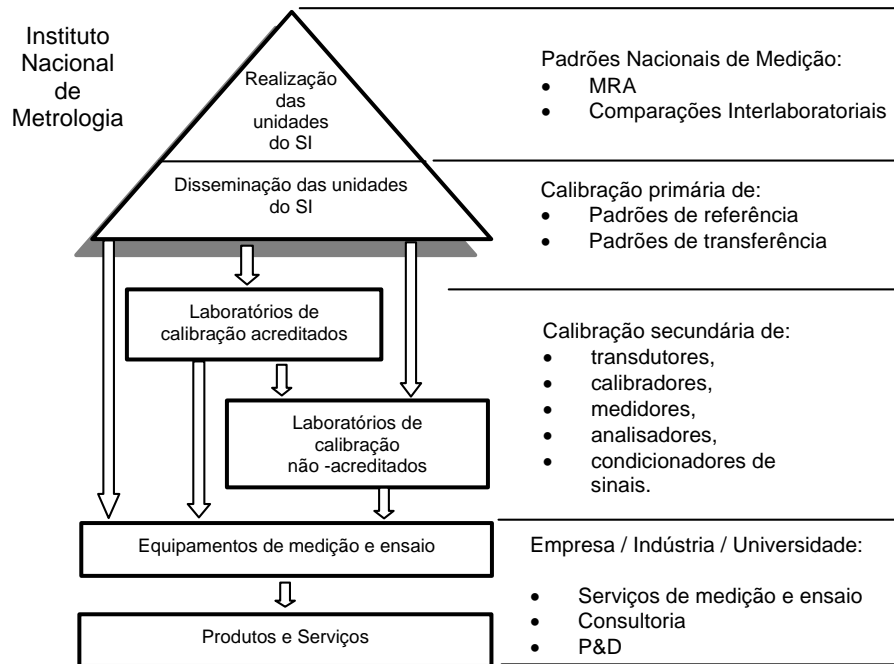


Figura 1. Árvore da hierarquia metrológica

Considerando que a rastreabilidade de padrões de medição e de equipamentos às unidades do Sistema Internacional de Unidades (SI, 2006) requer uma cadeia ininterrupta de calibrações ou comparações, sendo que para cada calibração deve estar associada uma incerteza de medição, ocorre que a incerteza de um nível inferior na hierarquia metrológica será sempre maior que a de um nível superior. Daí a importância de um NMI assegurar baixas incertezas para as calibrações primárias de padrões metrológicos. Além disto, para que os produtos e serviços situados na base da pirâmide tenham credibilidade e aceitação em um mercado global, é necessário que haja reconhecimento internacional da infra-estrutura metrológica nacional.

No âmbito dos NMIs, isto é garantido pelo Acordo de Reconhecimento Mútuo (MRA, 1999). Este acordo requer a implementação e a manutenção de um sistema de qualidade que atenda os requisitos da norma ISO/IEC 17025 e a participação em comparações interlaboratoriais para avaliação da conformidade dos resultados de calibrações segundo parâmetros quantitativos. O Laboratório de Vibrações (Lavib), da Divisão de Metrologia em Acústica e Vibrações (Diavi) da Diretoria de Metrologia Científica e Industrial (Dimci) do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Inmetro) é o laboratório primário brasileiro na área de metrologia de vibrações.

No âmbito dos laboratórios acreditados no Brasil, a Rede Brasileira de Calibração (RBC) mantém acordos de reconhecimento mútuo com diferentes organismos de acreditação internacionais. Entretanto, a acreditação de mais laboratórios ainda depende da demanda de clientes, para que estes se vinculem à RBC ou ao menos obtenham conformidade à norma ISO/IEC 17025. No caso de laboratórios independentes, que dependem da venda de serviços para terceiros, esta é a tendência natural. Já nas empresas e fábricas que verticalizaram as suas atividades, montando laboratórios de calibração próprios voltados exclusivamente para serviços internos, a tendência é que atendam aos critérios de qualidade da empresa e que se adequem à ISO/IEC 17025, mas não necessariamente que se acreditem.

A situação atual da infra-estrutura metrológica da área de vibrações no Brasil é apresentada na Fig. 2. Pode ser visto que devido à carência por laboratórios acreditados (apenas dois) e não-acreditados independentes na área de vibrações, o Lavib acaba tendo que se desviar da sua atividade fundamental para atender diretamente ao usuário final.

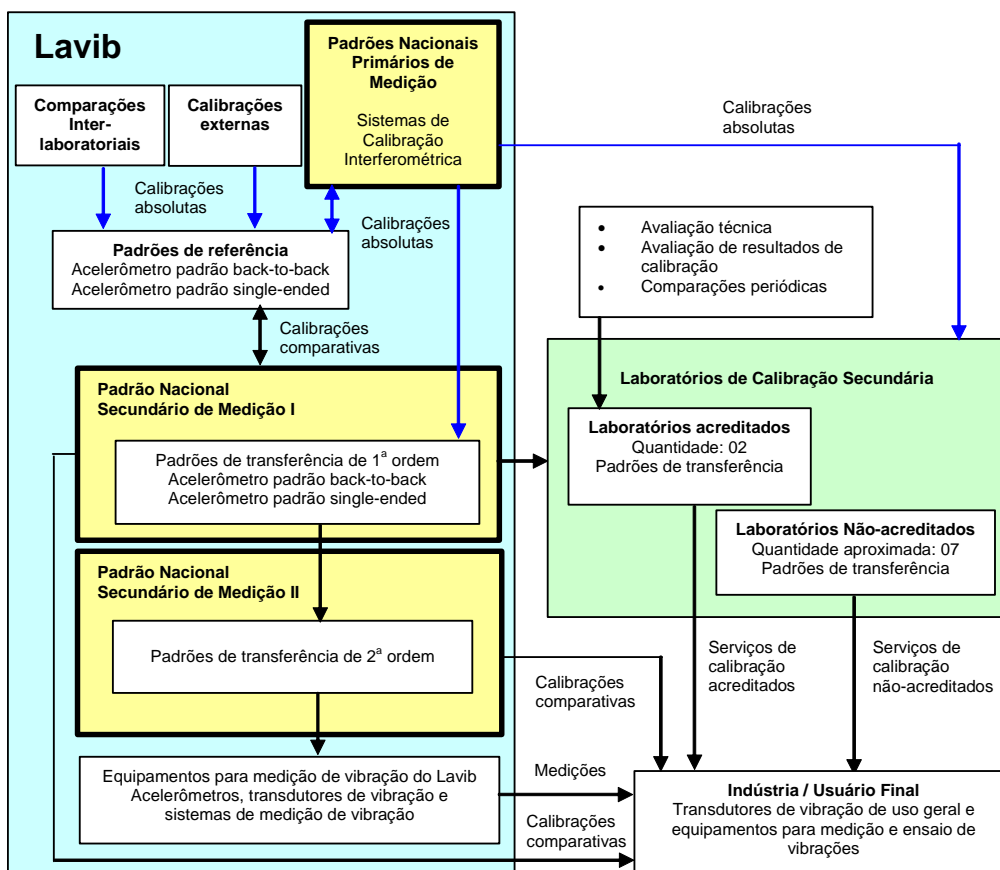


Figura 2. Infra-estrutura metrológica atual na área de vibrações

É extremamente importante que o Inmetro esteja capacitado a prover aos seus clientes serviços de calibração compatíveis com os oferecidos internacionalmente por outros NMIs. Desta forma, os laboratórios secundários de calibração e de ensaio brasileiros terão capacidade de prestar serviços reconhecidos internacionalmente e conseqüentemente endossar a manutenção de todo o processo de desenvolvimento no Brasil. Garantindo uma base metrológica sólida e reconhecida internacionalmente, busca-se dar condições à indústria nacional para melhorar a qualidade e a competitividade de seus produtos e serviços no mercado interno e externo, facilitando a transposição de quaisquer barreiras técnicas que possam ser levantadas contra as exportações brasileiras. Este reconhecimento da capacidade metrológica é fundamental, pois também fornece a base para a aceitação internacional de pesquisas, medições, ensaios, produtos e serviços realizados no País.

5. RASTREABILIDADE DE MEDIÇÃO

A rastreabilidade é definida no Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM, 2000) como a propriedade do resultado de uma medição ou valor de um padrão estar relacionado a referências estabelecidas, geralmente padrões nacionais ou internacionais, através de uma cadeia contínua de comparações, todas possuindo incertezas estabelecidas.

A rastreabilidade aos padrões nacionais de diferentes grandezas é obtida conforme o diagrama da Fig. 3. Os padrões e equipamentos de medição do Lavib são calibrados pelos laboratórios das Divisões de Metrologia Elétrica (Diele), Mecânica (Dimec), Óptica (Diopt) e Temperatura (Diter) do Inmetro e pelo Observatório Nacional. Comparações interlaboratoriais e calibrações de padrões realizadas em outros NMIs servem para verificar o grau de equivalência dos resultados obtidos pelos sistemas de calibração primária e secundária do Lavib.

Em nível primário, a realização da unidade de aceleração (m/s^2) é rastreada a grandezas mecânicas e de tempo por meio de medições interferométricas da grandeza de movimento. A medição do sinal de saída do acelerômetro de referência provê a rastreabilidade a grandezas elétricas (carga e tensão elétrica) e a sensibilidade do transdutor é determinada pela razão entre a sua saída elétrica e a entrada mecânica. Em nível secundário, a sensibilidade do transdutor padrão de referência (em $mV/(m/s^2)$ ou $pC/(m/s^2)$) fornece rastreabilidade das medições de movimento às grandezas elétricas, de comprimento e de tempo.

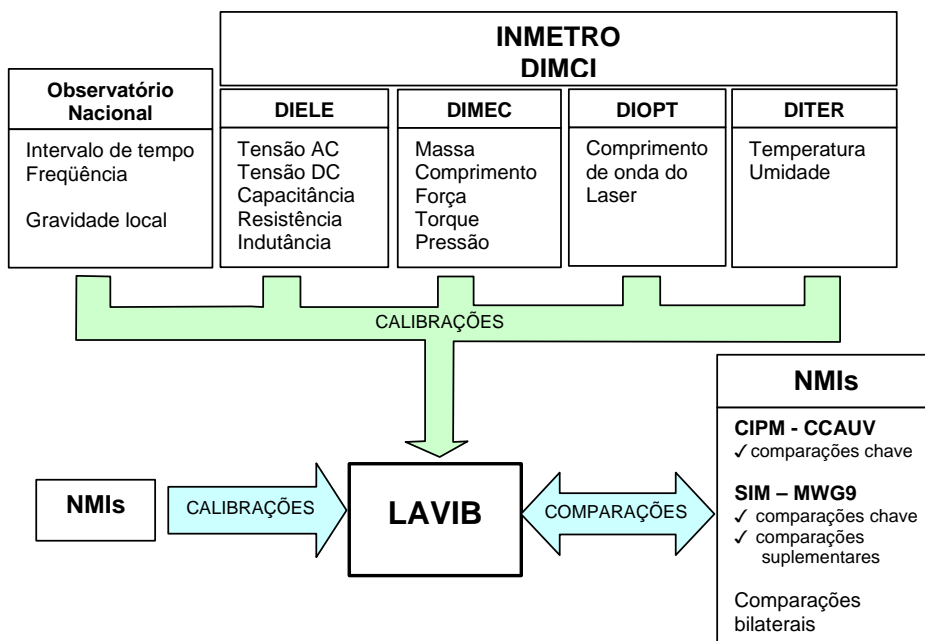


Figura 3. Fluxograma de rastreabilidade dos padrões de medição do Lavib.

6. O LABORATÓRIO DE VIBRAÇÕES DO INMETRO

O Laboratório de Vibrações (Lavib) do Inmetro é responsável pela padronização primária na área de vibrações no Brasil. Isto significa que ele deve desenvolver e manter os padrões nacionais de mais alto nível metrológico do país para assegurar a rastreabilidade de medição das grandezas relativas à área de vibrações mecânicas às respectivas unidades do Sistema Internacional de Unidades (SI) aos usuários nacionais.

Ele tem como atribuições o estabelecimento, validação e manutenção dos padrões nacionais de medição e a realização, reprodução e disseminação das unidades de medida relacionadas a grandezas de movimento de corpos sólidos, como aceleração, velocidade e deslocamento.

Além disto, o Lavib deve assegurar o reconhecimento internacional de seus serviços e certificados, conforme estabelecido no Acordo de Reconhecimento Mútuo (MRA, 1999) firmado entre Institutos Nacionais de Metrologia (NMI). Para tal, ele deve manter um sistema da qualidade em conformidade com normas internacionais como a ISO 17025, deve se submeter à avaliação externa por pares (*peer review*) e demonstrar com evidências objetivas as suas capacidades de medição publicadas no Apêndice C do MRA. Estas evidências geralmente são os resultados obtidos em comparações interlaboratoriais internacionais.

A participação do Inmetro em fóruns metrológicos de alto nível também contribui para o alcance do reconhecimento internacional pelos seus pares. Atualmente, o Inmetro participa do Comitê Consultivo em Acústica, Ultra-som e Vibrações (CCAUV) do Conselho Internacional de Pesos e Medidas (CIPM), do Grupo de trabalho em Acústica, Ultra-som e Vibrações (MWG-9) do Sistema Interamericano de Metrologia (SIM) e do Comitê Técnico de Vibrações (TC 22) da Confederação Internacional de Metrologia (IMEKO). A participação como membro efetivo do CCAUV requer a comprovação da atuação do Inmetro em atividades de pesquisa e desenvolvimento nas áreas de Acústica, Ultra-som e Vibrações e a disponibilização de uma lista da sua produção bibliográfica na página do Bureau Internacional de Pesos e Medidas (BIPM).

O Lavib oferece serviços de calibração primária de acelerômetros padrão, conjuntos padrão de medição de vibração (acelerômetro associado a um condicionador de sinais) e transdutores de força; calibração comparativa de calibradores de acelerômetros, transdutores de vibração, cadeias de medição de vibração e instrumentos de medição de vibrações (medidores e analisadores de vibração), transdutores de força, cabeças de impedância e martelos instrumentados; calibração elétrica de condicionadores de sinais e calibração comparativa de acelerômetros por choque. A lista de serviços do Lavib é disponibilizada na página do Inmetro na internet (<http://www.inmetro.gov.br>).

6.1. Padrões Nacionais de Medição de vibrações

Os padrões nacionais de medição de vibrações compreendem os sistemas de calibração primária (absoluta) usados para a sua realização e os sistemas de calibração secundária (comparativa) usados para a disseminação das unidades de medida das grandezas físicas relativas ao campo das vibrações mecânicas.

Calibração absoluta: a sensibilidade do transdutor é determinada por medições baseadas nas unidades fundamentais e derivadas do SI, para as grandezas físicas envolvidas.

Calibração comparativa: a sensibilidade do transdutor é determinada por comparação direta com um transdutor padrão de referência, quando ambos são submetidos a um mesmo movimento vibratório.

Os padrões nacionais primários de medição consistem basicamente em: um excitador de vibrações para gerar movimento harmônico senoidal, 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 implementou diferentes sistemas, usualmente denominados 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 de quadratura homodino - 10 Hz a 10 kHz

Estes sistemas são periodicamente avaliados por comparação com transdutores calibrados pelos diferentes sistemas e métodos disponíveis, por comparação com transdutores do Lavib calibrados por outros NMIs e por resultados de comparações interlaboratoriais. A superposição parcial das faixas de frequência de calibração dos diferentes sistemas do laboratório permite a verificação da conformidade entre estes. O grau de equivalência dos padrões nacionais de medição em relação aos de outros países vem sendo comprovado pela participação do Lavib em comparações interlaboratoriais tanto no âmbito do Sistema Interamericano de Metrologia (SIM) e do Comitê Consultivo em Acústica, Ultra-som e Vibrações (CCAUV), como em comparações bi e multilaterais com outros NMIs. Os resultados obtidos em diferentes comparações têm confirmado a compatibilidade das estimativas de incerteza de medição do Lavib.

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. Atualmente, o Método 1 – “Método de contagem de franjas” é usado desde a frequência de 1 Hz até a frequência de 1000 Hz (vide Fig. 4) e o Método 2 – “Método de ponto mínimo” é usado de 1 kHz a 10 kHz (vide Fig. 5). O Método 3 – “Método de aproximação por seno” permite a calibração de amplitude e fase com níveis constantes de aceleração de 10 Hz a 10 kHz (vide Fig. 6). 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.

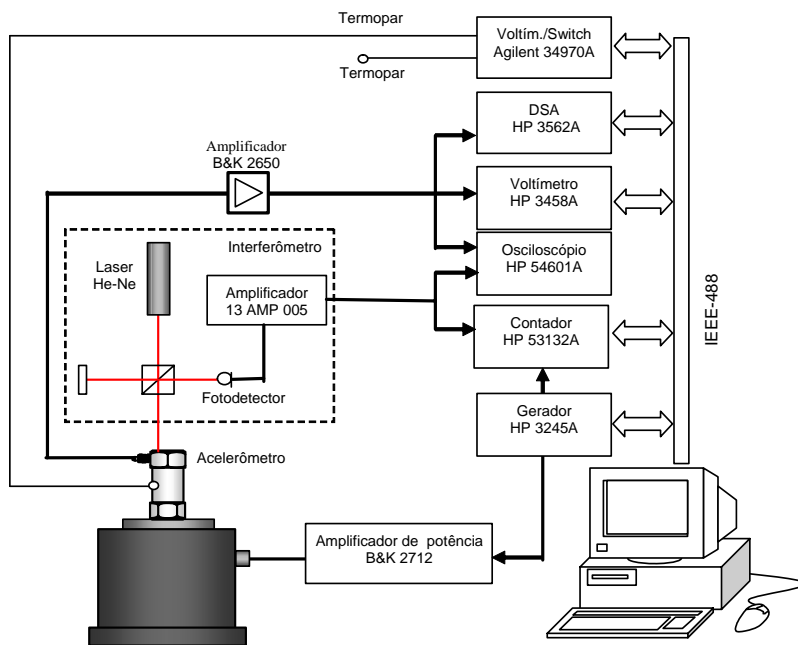


Figura 4. Sistema de calibração primária de acelerômetros pelo método de contagem de franjas (ISO 16063-11:1999, Método 1)

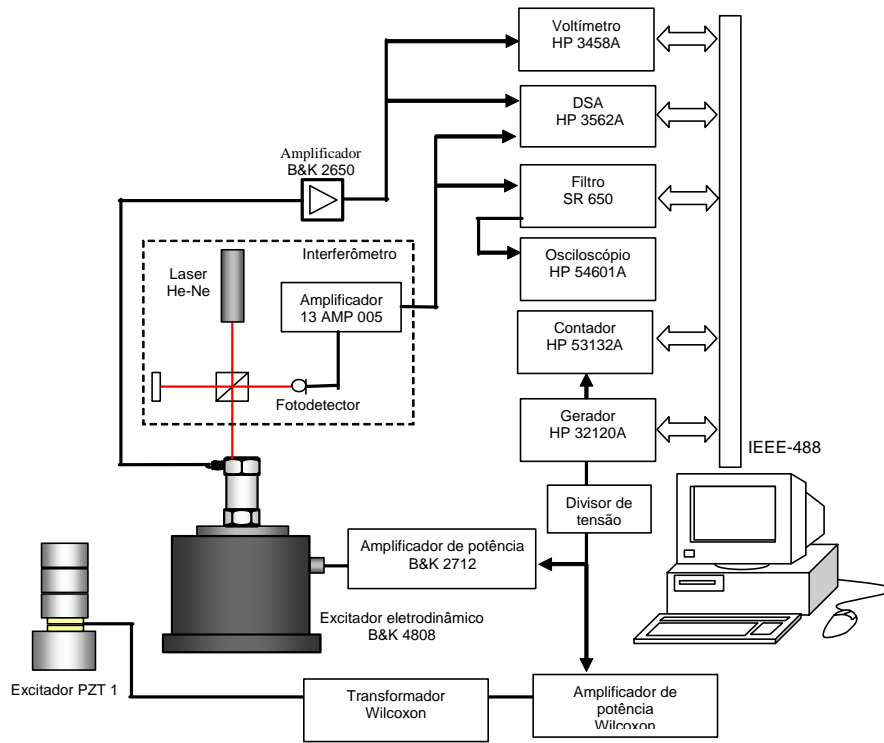


Figura 5. Sistema de calibração primária de acelerômetros pelo método de mínimos da função de Bessel (ISO 16063-11:1999, Método 2)

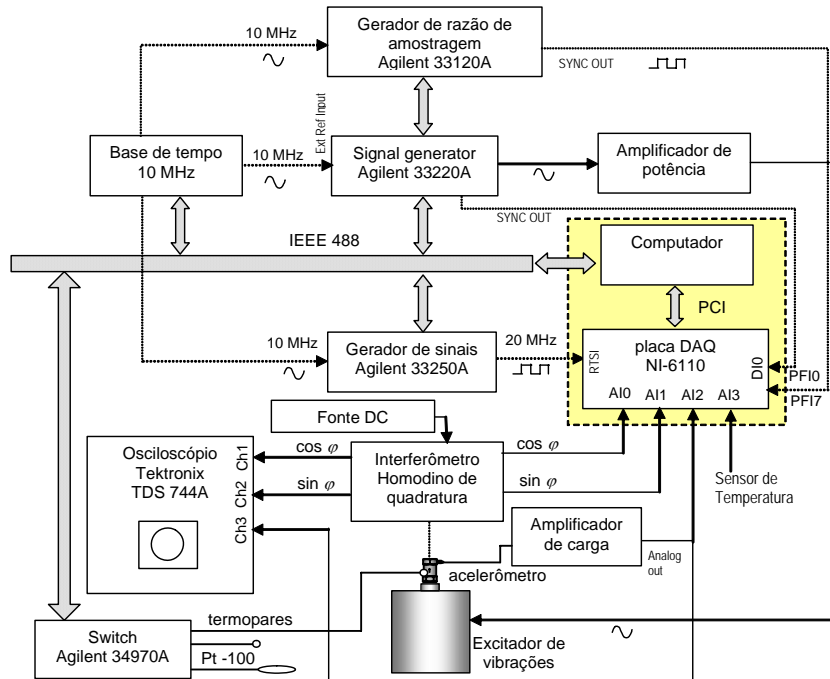


Figura 6. Sistema de calibração primária de acelerômetros pelo método de aproximação de senos (ISO 16063-11:1999, Método 3)

6.2. Padrões Nacionais Secundários de Medição

Os padrões nacionais secundários de medição de vibrações são compostos por um sistema de excitação de vibração ou choque para a geração de movimento mecânico, um acelerômetro padrão de trabalho previamente calibrado por métodos interferométricos e a instrumentação necessária para comparar os sinais de saída do transdutor de trabalho e do transdutor em calibração.

As calibrações comparativas empregando excitação senoidal de vibrações são realizadas de acordo com a norma ISO 16063-21. Elas incluem a calibração de cadeias de medição de vibrações, transdutores de aceleração, velocidade e deslocamento, calibradores de acelerômetros e transdutores de força dinâmica. Estes sistemas são empregados também para a verificação periódica de acelerômetros padrão de trabalho do Lavib.

Um sistema secundário para calibração comparativa de acelerômetros é mostrado na Fig. 7.

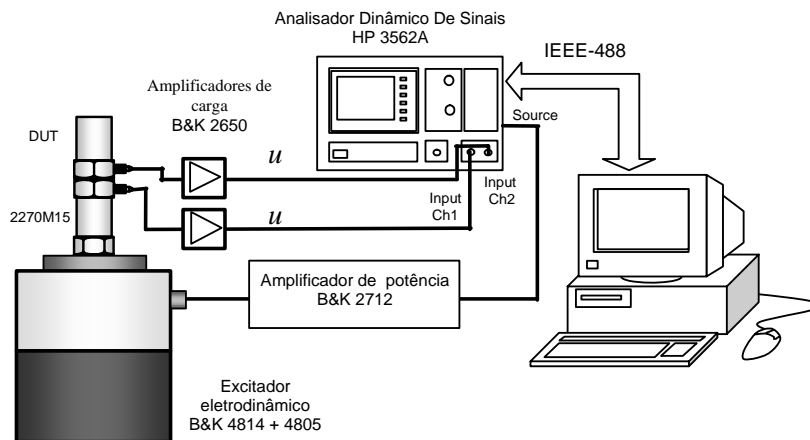


Figura 7. Sistema de calibração comparativa de acelerômetros (ISO 16063-21:2003).

6.3. Sistema de calibração elétrica do Lavib

As necessidades específicas de calibração elétrica e de verificação periódica dos equipamentos que integram os padrões nacionais de medição levaram o Lavib a se equipar para realizar algumas destas atividades internamente. Atualmente, o laboratório está equipado com padrões de grandezas elétricas e a instrumentação necessária para realizar diversas calibrações e verificações como de: condicionadores de sinais, atenuadores, filtros, cadeias de medição de vibrações, analisadores e medidores de vibração. Um sistema de calibração elétrica de amplificadores de carga é mostrado na Fig. 8.

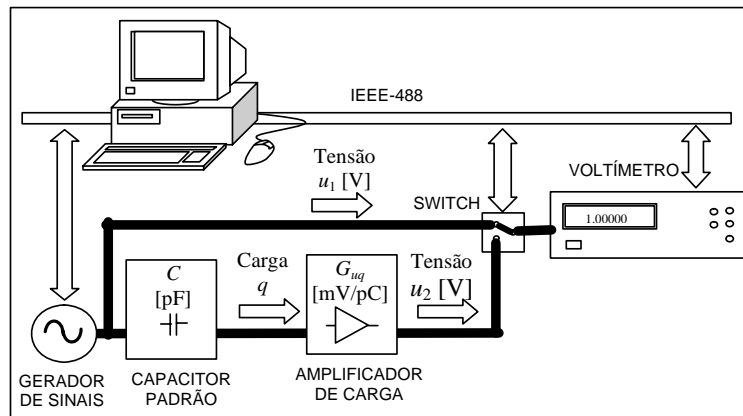


Figura 8. Sistema de calibração elétrica de amplificadores de carga.

6.4. Disseminação das unidades de medida de vibração pelo Lavib

As unidades de medida realizadas pelos padrões nacionais de medição são disseminadas para laboratórios de calibração acreditados e não-acreditados pela calibração de transdutores padrão de referência e de transferência realizadas em conformidade com as normas internacionais vigentes. Estes padrões são principalmente acelerômetros ou conjuntos compostos por um acelerômetro e um condicionador de sinais. Para acelerômetros piezoelétricos de alta impedância, é calibrada a sensibilidade de carga do transdutor em função da frequência. Para acelerômetros piezoelétricos de baixa impedância ou conjuntos padrão, é calibrada a sensibilidade de tensão do transdutor ou do conjunto em função da frequência. Calibradores de acelerômetros também são usados para a disseminação das unidades de movimento mecânico em medições de campo ou para verificações em laboratórios. Estes padrões de trabalho são calibrados por comparação direta a uma cadeia de medição de referência do Lavib.

Sistemas de calibração do Lavib:

- 1) Sistema absoluto de baixa frequência – freq.: 1Hz a 80 Hz (ISO 16063-11 Método 1)
 Incerteza: $\pm 1,5\%$ (1 Hz a 5 Hz); $\pm 1\%$ (6,3 Hz a 20 Hz), $\pm 0,5\%$ (25 Hz a 100 Hz)

- 2) Sistema absoluto de média frequência – freq.: 10 Hz a 5 kHz (ISO 16063-11 Métodos 1 e 2)
Incerteza: $\pm 1\%$ (10 Hz a 40 Hz); $\pm 0,5\%$ (50 Hz a 1 kHz); $\pm 1\%$ (1,25 kHz a 5 kHz)
- 3) Sistema absoluto de alta frequência – freq.: 4 kHz a 10 kHz (ISO 16063-11 Método 2)
Incerteza: $\pm 1\%$ (4 kHz a 5 kHz); $\pm 1,5\%$ (6,3 kHz a 10 kHz)
- 4) Sistema comparativo de transdutores de vibração (ISO 16063-21:2003)
Incerteza: $\pm 1,5\%$ (10 Hz a 50 Hz); $\pm 1\%$ (63 Hz a 1 kHz); $\pm 1,5\%$ (1,25 kHz a 5 kHz), $\pm 2\%$ (6,3 kHz a 10 kHz)
- 5) Sistema comparativo de medidores de vibração – freq.: 10 Hz a 5 kHz
Incerteza: dependente do tipo de equipamento e de sua resolução, $\pm 1,5$ to 5%
- 6) Sistema comparativo de choque (ISO 16063-22) – amplitude do pulso de 200 a 100.000 m/s², período de 0,1 a 3 ms
Incerteza: $\pm 3\%$
- 7) Sistema de calibração elétrica
Sensibilidade de amplificadores de carga e tensão - Incerteza: $\pm 0,2\%$
- 8) Sistema absoluto de quadratura homodino – freq.: 10 Hz a 10 kHz (ISO 16063-11 Método 3)
Incerteza: sistema sob avaliação, aguardando resultado de comparação interlaboratorial

Os sistemas acima 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 sofre 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 dos sistemas 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 curso 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.

A relação de usuários dos serviços prestados diretamente pelo Lavib abrange laboratórios acreditados de calibração e de ensaio, laboratórios não-acreditados, prestadores de serviços de calibração, institutos de pesquisa, forças armadas, indústria em geral e universidades.

7. LABORATÓRIOS ACREDITADOS PELA RBC

Atualmente, a Rede Brasileira de Calibração (RBC) possui dois laboratórios acreditados para a realização de serviços de calibração na área de vibrações. Estes laboratórios são o Centro de Tecnologia da Eletronorte (LACEN), situada em Belém/PA e o Laboratório de Integração e Testes (LIT) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), situado em São José dos Campos/SP. A lista detalhada de serviços acreditados e as incertezas expandidas de medição correspondentes à melhor capacidade de medição dos laboratórios para estes serviços estão disponíveis para consulta na página do INMETRO em <http://www.inmetro.gov.br/laboratorios/rbc/consulta.asp>. Resumidamente, a Eletronorte-LACEN está acreditada para serviços de calibração de acelerômetros de 20 Hz a 5 kHz e o INPE-LIT para calibração de acelerômetros, medidores de vibração e amplificador de carga e de tensão de 10 Hz a 10 kHz e calibrador de acelerômetros entre 50 e 250 Hz.

Vale ressaltar que nem todos os serviços oferecidos pelos laboratórios de calibração são acreditados. Geralmente, a lista de serviços oferecidos pelos laboratórios é superior em número aos serviços acreditados pela RBC. Estima-se que no decorrer deste ano de 2008 pelo menos mais dois laboratórios obtenham acreditação na área de vibrações, aumentando a oferta destes serviços no país.

A Rede Brasileira de Laboratórios de Ensaio (RBLE) abrange laboratórios acreditados para ensaios de vibração senoidal, de vibração aleatória e de choque mecânico. Atualmente existem laboratórios acreditados para ensaios de choque em capacetes automotivos e para ensaios de vibrações de produtos e equipamentos.

8. LABORATÓRIOS DE CALIBRAÇÃO NÃO-ACREDITADOS

O país dispõe de laboratórios de calibração de vibrações em institutos de pesquisa, em montadoras de automóveis, laboratórios de prestação de serviços metrológicos e representantes de fabricantes de equipamentos para medição de vibração. Alguns destes laboratórios já são acreditados pela RBC para outras grandezas e espera-se que venham a estender o escopo da acreditação para abranger os serviços de vibrações no futuro.

Algumas universidades dispõem de instrumentação adequada e pessoal qualificado para realização de calibrações, mas têm verificado dificuldades em atendimento a alguns requisitos da norma ISO/IEC 17025. Isto ocorre

especialmente em relação ao controle de uso da instrumentação e acesso de pessoal, uma vez que a função básica da universidade é o ensino e pesquisa e não a prestação de serviços metrológicos.

9. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado o estágio atual da metrologia de vibrações no País, com ênfase nos sistemas de calibração desenvolvidos pelo Laboratório de Vibrações (Lavib) do Inmetro. Foi demonstrado que estes sistemas impactam em toda a estrutura metrológica nacional na área de vibrações mecânicas e que formam a base para o reconhecimento internacional da capacidade de calibração e de medição de vibrações no Brasil, afetando diretamente laboratórios de calibração de vibrações em institutos de pesquisa, em montadoras de automóveis, laboratórios de prestação de serviços metrológicos e representantes de fabricantes de equipamentos para medição de vibração.

O Lavib tem como perspectivas futuras, a minimização das suas incertezas de medição e a extensão do escopo de serviços ofertados, principalmente em calibrações primárias. Foram apresentadas as principais linhas de pesquisa de interesse do laboratório, que poderão ser desenvolvidas de forma cooperativa com parcerias externas.

10. REFERÊNCIAS

- CMC, "Calibration and Measurement Capabilities (CMC)", BIPM Key Comparison Database, Appendix C, <http://kcdb.bipm.org/appendixC/default.asp>.
- GUM, "Guia para a Expressão da Incerteza de Medição: 3ª Edição 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.
- ISO/IEC 17025:2005, "General requirements for the competence of testing and calibration laboratories", International Organization for Standardization (ISO), Geneva, 2005.
- ISO 16063-1:1998, "Methods for the calibration of vibration and shock transducers – Part 1: Basic Concepts".
- ISO 16063-11:1999, "Methods for the calibration of vibration and shock transducers – Part 11: Primary vibration calibration by laser interferometry".
- ISO 16063-21:2003, "Methods for the calibration of vibration and shock transducers – Part 21: Vibration calibration by comparison to a reference transducer".
- MRA, "Mutual recognition of national measurement standards and of calibration and measurement certificates", CIPM, BIPM, Paris, France, 14 October 1999, <http://www.bipm.org/en/cipm-mra/>.
- SI, "The International System of Units (SI)", Bureau International de Poids et Mesures, 8th edition, , 2006, http://www.bipm.org/utis/common/pdf/si_brochure_8_en.pdf
- VIM, "Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia", Publicação SENAI / INMETRO, 2ª edição, Brasília, 2000.

11. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.

CALIBRATION OF VIBRATION TRANSDUCERS

Gustavo P. Ripper, lavib@inmetro.gov.br¹
Ronaldo S. Dias, rsdias@inmetro.gov.br¹
Guilherme A. Garcia, gagarcia@inmetro.gov.br¹

¹Inmetro - National Institute of Metrology, Standardization and Industrial Quality, Acoustics and Vibration Metrology Division, Vibration Laboratory, Av. N. Senhora das Graças, 50, CEP 25250-020, Xerém, RJ, Brazil

Abstract: *This paper presents the current metrologic structure in Brazil. It describes the methods used to calibrate vibration transducers, the importance of measurement traceability, the capability of measurement and calibration of the Vibration laboratory at INMETRO and of the Brazilian accredited laboratories in vibration calibration services. The current R&D projects of INMETRO's vibration laboratory are also presented.*

Keywords: *metrology, calibration, vibration, accelerometer.*

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.