

Sistema de calibração primária de acelerômetros por aproximação de senos em baixas frequências

Primary calibration system of accelerometers at low frequencies by sine approximation method

C.D. Ferreira, G.P. Ripper, R.S. Dias, G.B. Micheli, D.B. Teixeira

Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia - Inmetro

E-mail: lavib@inmetro.gov.br

Resumo: Este trabalho apresenta resultados do sistema de calibração primário de acelerômetros em baixas frequências pelo método de aproximação de senos. O sistema implementado permitiu a extensão da faixa de frequência até 0,2 Hz, assim como a participação do Inmetro na comparação interlaboratorial chave CCAUV.V-K3. São apresentados também os resultados preliminares do projeto que visa expandir o limite inferior de frequência até 0,1 Hz.

Palavras-chave: Calibração; Aproximação de Senos; Baixas Frequências; Acelerômetros.

Abstract: This paper presents results of the primary calibration system of vibration transducers at low frequencies using the sine approximation method. This system is currently able to calibrate transducers down to 0.2 Hz and allowed Inmetro to participate in the interlaboratorial key comparison CCAUV.V-K3. Preliminary results of the project to expand the lowest frequency limit down to 0.1 Hz are also presented.

Keywords: Calibration; Sine Approximation; Low Frequencies; Accelerometers.

1. INTRODUÇÃO

Esse sistema de calibração busca atender a demanda de alguns setores da indústria nacional, principalmente o de aero geração, que necessitam de medidas de vibração confiáveis nas frequências inferiores a 100 Hz. O método de aproximação de senos é capaz de medir tanto a magnitude quanto a fase da sensibilidade complexa de transdutores e de cadeias de medição de vibração. Com o intuito de avaliar a

capacidade metrológica implementada e determinar o grau de equivalência entre o padrão nacional brasileiro e de outros países, o Inmetro participou em 2015 da comparação interlaboratorial chave CCAUV.V-K3 [1], reportando na época dados na faixa de frequências de 0,2 Hz a 40 Hz. Os resultados obtidos demonstraram que o Laboratório de Vibrações (Lavib) do Inmetro está apto a oferecer este serviço à indústria nacional com incertezas de medição compatíveis

com as praticadas internacionalmente pelos principais institutos nacionais de metrologia.

Estudos para a expansão do limite inferior de frequências até 0,1 Hz foram iniciados em 2017. São apresentados neste trabalho resultados preliminares de uma calibração na faixa de 0,1 Hz a 10 Hz.

2. SISTEMA DE CALIBRAÇÃO

Uma visão geral do sistema de calibração é apresentada na figura 1. Ele possui um interferômetro homodino de quadratura que permite a realização de medições primárias por interferometria a laser tanto pelo Método 1 (contagem de franjas), como pelo Método 3 (aproximação de senos), foco deste trabalho, descritos na norma internacional ISO 16063-11 [2]. Maiores detalhes do interferômetro homodino são descritos em [3].

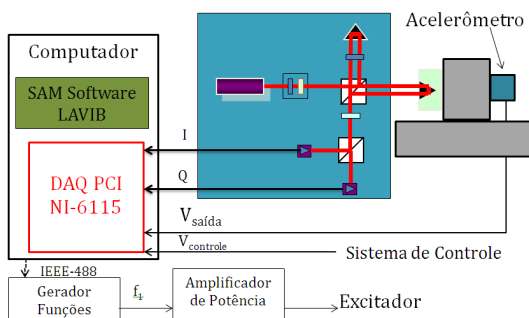


Figura 1 – Esquemático do sistema de calibração absoluta de acelerômetros em baixas frequências.

O interferômetro homodino de quadratura fornece como saída dois sinais analógicos de tensão em quadratura (I&Q), os quais são obtidos por meios ópticos usando um cubo divisor de feixes polarizado e dois fotodetectores. Esses são digitalizados por uma placa de aquisição simultânea de dados de quatro canais NI PCI-6115 com capacidade de amostragem de 10×10^6 Sa/s. A amostragem típica feita com a rotina LabVIEW desenvolvido no Lavib foi de 2×10^6 Sa/s para toda a faixa de frequência analisada (0,1 Hz a 160 Hz). Devido ao processo

de separação óptico e a diferenças de sensibilidade dos fotodetectores, pode haver desvios de ortogonalidade e de amplitude nos sinais I&Q. Para correção dessa influência antes da demodulação arco-tangente é aplicado o algoritmo proposto por Heydemann [4].

O computador usado no sistema de calibração foi configurado com um processador de 4 núcleos e frequência de *clock* de 3,6 GHz, 32 GB de memória RAM, um disco rígido de 1 TB e um SSD de 240 GB. O sistema operacional usado é o Windows 7 Pro de 64 bits e o ambiente de programação para automação é o LabVIEW na versão de 32 bits.

Um problema encontrado foi que, aliado à elevada taxa de amostragem dos sinais interferométricos de alta frequência, é necessário capturar o sinal de saída do transdutor por um tempo que inclua pelo menos dez períodos do movimento oscilatório. Isso gera vetores de dados de grandes dimensões, o que requer capacidade de gerenciamento de memória estendida do sistema operacional de 64 bits.

Para otimização do uso de memória e de capacidade de processamento computacional, a rotina desenvolvida captura pacotes de dados em intervalos de tempo específicos de forma cíclica e ininterrupta, salvando-os diretamente no disco SSD. Depois, esses dados são recuperados em pacotes menores para sua demodulação em fase, decimados, dispostos em sequência e então novamente gravados no disco SSD. Essa sequência é então processada por um algoritmo de DFT. Para eliminar quaisquer efeitos de derivas de baixíssimas frequências ou *offsets* é aplicada uma janela *flat top* nos sinais.

O painel frontal do programa é apresentado na figura 2. Nessa tela é possível avaliar os sinais de quadratura do sistema interferométrico plotados no formato XY. Os parâmetros de correção usando o algoritmo de Heydemann. As formas de onda dos sinais enjanelados e originais de saída do acelerômetro e do sistema interferométrico no

domínio do tempo, que por sua vez é obtido após os processamentos da demodulação arco-tangente e do desdobramento de fase. Os sinais também são apresentados no domínio da frequência, o que permite uma melhor avaliação de diversos parâmetros como distorções harmônicas, distribuição do ruído e de vazamento de energia.

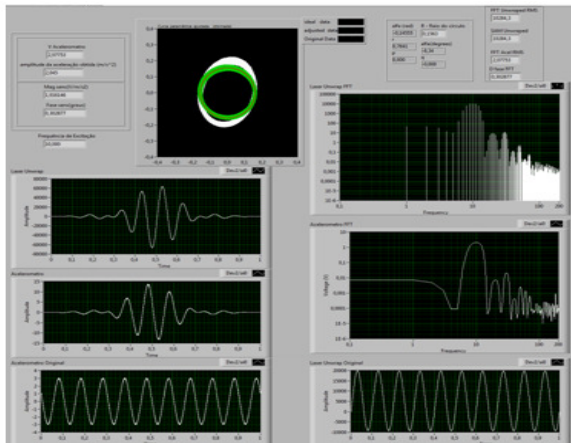


Figura 2 – Painel frontal do programa de calibração.

3. RESULTADOS

3.1. Comparação entre dois sistemas independentes

Com o sistema implementado, foi realizada uma calibração de um servo acelerômetro Honeywell modelo QA-3000. Foram comparados os resultados de magnitude e fase obtidos em relação aos fornecidos por um sistema comercial de vibrometria a laser Polytec VDD660. Os desvios entre esses resultados são apresentados na figura 3.

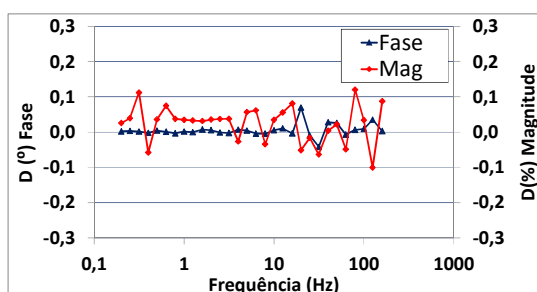


Figura 3 – Desvios dos resultados da calibração do acelerômetro QA-3000.

Podemos verificar que os dois sistemas são metrologicamente equivalentes, com desvios inferiores às atuais incertezas de medição de 0,35 % para magnitude e 0,35° para fase.

3.2. Resultados da comparação interlaboratorial chave CCAUV.V-K3

O Inmetro participou, usando o presente sistema de calibração, da comparação interlaboratorial chave CCAUV.V-K3, na qual um conjunto padrão composto por um servo-acelerômetro e um condicionador de sinais foi circulado por diferentes institutos nacionais de metrologia para obtenção de sua sensibilidade complexa. Os desvios dos resultados reportados pelo Inmetro em relação aos valores de referência da comparação chave (KCRV) e as suas incertezas expandidas, são apresentados na figura 4.

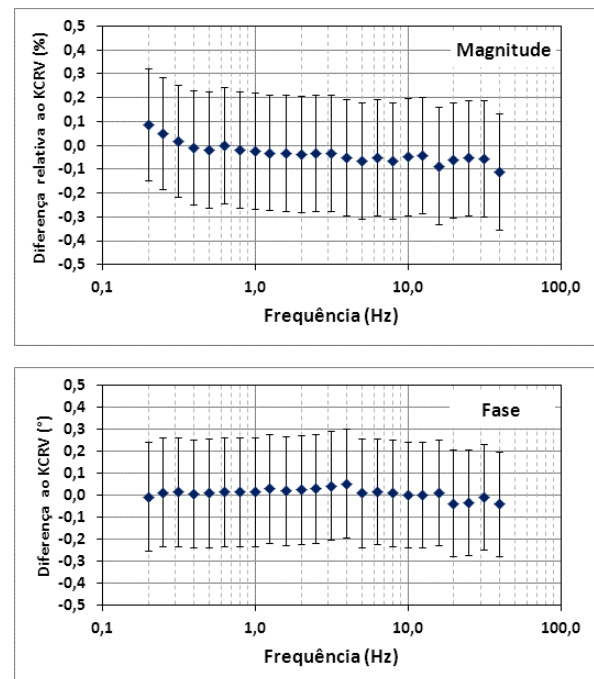


Figura 4 – Desvios dos resultados do Inmetro em relação ao KCRV da comparação CCAUV.V-K3.

A incerteza expandida estimada pelo Inmetro para os resultados reportados para esta intercomparação foi de 0,25 % para magnitude e 0,25° para fase, comprovando a capacidade de

redução das incertezas atuais no CMC (Capacidade de Medição e Calibração).

3.3. Resultados preliminares da extensão da faixa de frequência

Atualmente está em curso a extensão da faixa de frequência do presente sistema até 0,1 Hz. Já foi realizada a calibração do acelerômetro QA-3000 no sistema implementado com uma nova versão do programa, incluindo os pontos de 0,1 Hz até 0,16 Hz. Os resultados obtidos são comparados aos da versão original do programa e apresentados na figura 5.

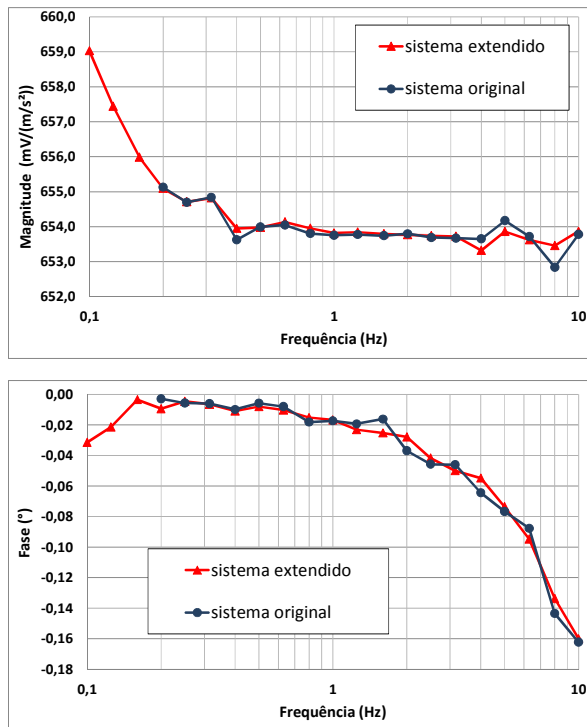


Figura 5 – Resultados de uma calibração de magnitude e fase da sensibilidade do acelerômetro QA-3000.

Podemos constatar assim a viabilidade da extensão da capacidade de calibração da sensibilidade complexa até 0,1 Hz, entretanto mais estudos são necessários, incluindo a calibração de outros tipos de transdutores para uma validação final.

4. CONCLUSÃO

Este artigo apresenta a implementação do sistema de calibração primária de transdutores de vibração em baixa frequência, que possibilita mensurar a sensibilidade complexa de transdutores e cadeias de medição usados em diversos setores da economia, como o de aero geração. Os resultados apresentados, principalmente os da intercomparação chave CCAUV.V-K3, serão utilizados para justificar a redução da incerteza apresentada no CMC do Inmetro junto ao Bureau Internacional de Pesos e Medidas (BIPM), dos atuais 0,35 % para 0,25 % em magnitude e de 0,35° para 0,25° em fase, ambas na faixa de frequências de 0,4 Hz até 8 Hz. Estudos estão em desenvolvimento para a futura extensão do escopo até 0,1 Hz.

5. REFERÊNCIAS

- [1] Sun Q., *et al.*, "Final report of CCAUV.V-K3: key comparison in the field of acceleration on the complex charge sensitivity", Metrologia, Vol. 54, Technical supplement 09001, 2017
- [2] ISO, International Standard 16063-11, "Methods for the calibration of vibration and shock transducers – Part 11: Primary vibration calibration by laser interferometry", International Organization for Standardization, Geneva, 1999.
- [3] Ripper G.P. *et al.*, "Estudos preliminares para implementação do sistema de calibração de acelerômetros por aproximação de senos em baixas frequências", Anais do 3º Congresso Internacional de Metrologia Mecânica, Gramado, 2014.
- [4] Heydemann L.M.: "Determination and correction of quadrature fringe measurement errors in interferometers", Applied Optics, Vol. 20, No. 19, pp. 3382-3384, October 1981.