

# CALIBRAÇÃO DE ACELERÓMETROS POR INTERFEROMETRIA ÓPTICA: EXTENSÃO DA GAMA DE MEDIÇÃO EM FREQUÊNCIA E ACELERAÇÃO

M. I. A. Godinho<sup>1</sup>, A. Cabral<sup>2</sup>, M. C. Nunes<sup>1</sup>, J. M. Rebordão<sup>2</sup>, V. Oliveira<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratório de Medidas Eléctricas – INETI/LME

<sup>2</sup>Laboratório de Apoio às Actividades Aeroespaciais – INETI/LAER

INETI, Estrada do Paço do Lumiar, 22, 1649-038 Lisboa



## RESUMO

*Apresenta-se uma técnica interferométrica relativa com detecção heterodina, de elevada exactidão, para a calibração absoluta de acelerómetros padrão, de modo a efectuar uma extensão na gama de medição, em valor quer de frequência quer de aceleração. É efectuada uma breve síntese do método padrão de contagem de franjas, através de interferometria relativa com detecção homodina, implementado no INETI, numa gama limitada de valores de frequência.*

## 1 - INTRODUÇÃO

Em 1998 foi iniciada, no Laboratório de Medidas Eléctricas em colaboração com o Laboratório de Apoio às Actividades Aeroespaciais (ambos do INETI), a implementação de um sistema experimental de calibração absoluta de acelerómetros padrão por interferometria laser, com detecção homodina.

Esta iniciativa tinha como objectivo principal a calibração primária de acelerómetros padrão, assegurando deste modo a rastreabilidade nacional nesta área.

O método desenvolvido inicialmente permitiu determinar o valor da sensibilidade de carga de acelerómetros padrão na gama entre 20 Hz e 1 kHz, com valores de incerteza expandida inferiores a 1%.

A implementação - actualmente em fase avançada de testes - de um sistema experimental com base em interferometria relativa com detecção heterodina, viabilizará a calibração primária de acelerómetros numa gama de valores de frequência entre alguns Hz e as dezenas de kHz.

Em interferometria com detecção homodina é suficiente um detector para a aquisição do sinal óptico, o que permite determinar o valor do deslocamento em função de um número de máximos ou mínimos de franjas de interferência. Por outro lado, em interferometria com detecção heterodina, são necessários dois detectores ópticos, obtendo-se dois sinais distintos e o valor do deslocamento é, neste caso, proporcional à diferença de fase entre ambos. O primeiro método baseia-se assim na contagem de máximos de intensidade ao longo do tempo, e o segundo na medida da diferença de fase entre um sinal de referência e o sinal a medir.

## 2 - CALIBRAÇÃO PRIMÁRIA DE ACELERÓMETROS PADRÃO

### 2.1 - Interferometria com detecção homodina

O sistema de calibração absoluta de acelerómetros padrão inicialmente implementado no INETI [2-3] baseou-se essencialmente numa excitação sinusoidal e num interferómetro de *Michelson*.

Na figura 1 encontra-se representado o diagrama de blocos simplificado do interferómetro utilizado.

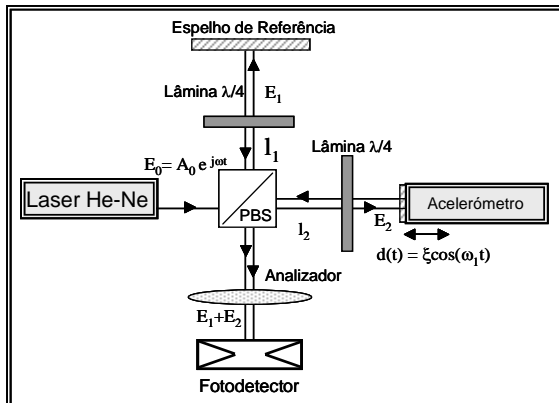


Fig. 1- Interferómetro de Michelson – Diagrama de blocos simplificado.

É utilizado um laser de He-Ne ( $\lambda = 0,6328 \mu\text{m}$ ) com uma potência óptica de 10 mW. O feixe incidente é dividido em dois feixes de igual intensidade através de um cubo polarizador (PBS). O analisador linear assegura que os dois feixes possuam a mesma polarização e interfiram. A inserção de uma lente positiva permite ampliar o padrão óptico obtido pelo fotodetector. Este padrão é constituído por franjas espaciais (alternância sinusoidal de máximos e mínimos de intensidade) e tem como princípio base o seguinte: sempre que o acelerómetro se desloca de  $\lambda/2$ , o sinal óptico obtido completa um período, dado que o percurso óptico efectuado pelo feixe corresponde a duas vezes o deslocamento do acelerómetro. Uma vez que o movimento do sensor a calibrar é acelerado, a frequência do sinal óptico não é constante.

Apresenta-se na figura 2 a forma de onda associada a um padrão de interferência obtido com uma frequência  $f = 1 \text{ kHz}$  e uma amplitude da aceleração  $a = 10 \text{ m*s}^{-2}$ .

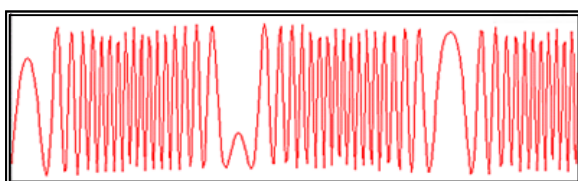


Fig. 2 - Padrão de interferência correspondente a um sinal de excitação com  $f = 1 \text{ kHz}$  e  $a = 10 \text{ m*s}^{-2}$ .

Os pares de valores tempo-intensidade são utilizados para determinar os valores de amplitude da aceleração através da seguinte equação:

$$a = \frac{\pi^2 \times \lambda}{2} \times f_f \times f \quad [1]$$

sendo:

$f_f$  – a frequência da franja;

$f$  – a frequência de excitação.

A sensibilidade do acelerómetro é calculada com base na razão entre a amplitude do sinal de saída do amplificador de carga (sinal em tensão) e a amplitude da aceleração. O modelo matemático da sensibilidade de carga é descrito pela seguinte equação:

$$S = \frac{V}{a} = \frac{2V}{\pi^2 \times \lambda \times f_f \times f} \quad [2]$$

O sistema de medição implementado, apresentado na figura 3, é composto essencialmente por um excitador de movimento sinusoidal, um sistema interferométrico e um sistema de aquisição e processamento de dados.

Todo este sistema experimental é controlado através de um computador pessoal com uma placa de aquisição PCI de 12 bit, taxa de amostragem de 5MS/s e 4 canais, com aplicações informáticas para a aquisição, tratamento e análise de dados desenvolvidas em ambiente *Windows - LabView*. É efectuada a aquisição do sinal óptico no fotodetector, do sinal de excitação proveniente do controlador de vibração e da amplitude do sinal de aceleração, à saída do pré-amplificador de carga, através de um voltímetro digital de elevada exactidão.

## 2.2 - Resultados Obtidos

Foram efectuados vários estudos de sensibilidade de carga de acelerómetros padrão por interferometria com detecção homodina. Apresentam-se na figura 4 alguns dos resultados e os respectivos valores de incerteza expandida, nomeadamente, o desvio da sensibilidade relativamente a um valor de referência igual a

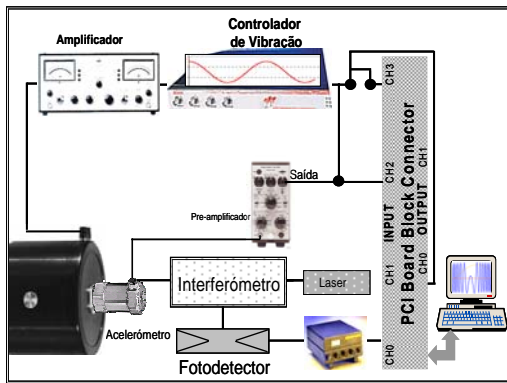


Fig. 3 - Sistema Experimental.

igual a 160 Hz e para uma calibração típica de um acelerômetro padrão, do tipo *single-ended*, de acordo com as seguintes condições:

- Frequência [Hz]: 40, 80, 160, 800 e 2000;
- Aceleração [ $m*s^{-2}$ ]: 100.

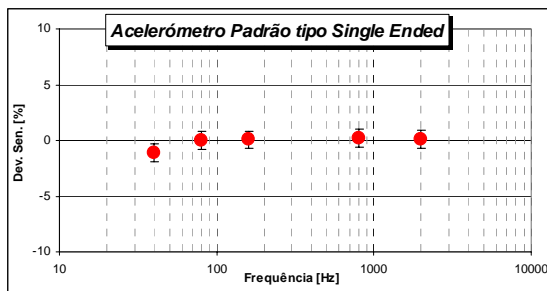


Fig. 4 - Representação gráfica do desvio da sensibilidade de carga e incerteza expandida de um acelerômetro padrão tipo *Single-ended*.

### 3 - INTERFEROMETRIA COM DETECÇÃO HETERODINA

#### 3.1 - Descrição do interferômetro heterodino

A figura 5 representa o interferômetro heterodino implementado.

Num interferômetro heterodino<sup>[1,4 - 6]</sup>, após a divisão do feixe inicial em dois pelo primeiro divisor de feixe (DF1), é introduzida uma diferença de frequência (óptica) entre os dois feixes através de dois moduladores acusto-ópticos (MAO1 e MAO2). Neste caso, essa diferença varia entre 50 e 100 kHz e é designada por frequência heterodina. A polarização inicial é vertical para ambos os feixes. Após a passagem de um dos feixes por uma lâmi-

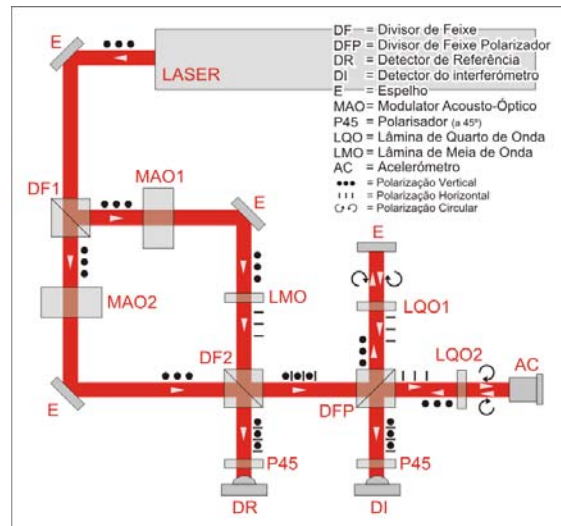


Fig. 5 - Interferômetro heterodino.

na de meia onda (LMO), os dois ficam com polarizações ortogonais. Um segundo DF recombina os dois feixes, com valores distintos de frequência, direccionando um deles (com ambas as frequências e polarizações ortogonais) para o detector de referência (DR) e o outro para o interferômetro de *Michelson*. No interferômetro, construído com um divisor de feixe polarizador (DFP), cada um dos feixes percorre um determinado ramo, de acordo com a respectiva polarização. A dupla passagem por lâminas de quarto de onda (LQO) força a que, depois de uma dupla passagem por cada ramo, os feixes sejam direccionados para o detector do interferômetro (DI). Antes de cada detector, um polarizador a 45° (P45) permite obter no detector a interferência entre os dois feixes com os dois valores de frequência. O sinal detectado corresponde a uma componente AC com a frequência heterodina e uma fase que varia com a variação da diferença de fase entre os dois sinais ópticos que interferem. Quando o acelerômetro se desloca no ramo de medição, a fase do sinal no DI varia em correspondência, enquanto que no DR se mantém constante. Medindo, através de um amplificador *lock-in* a diferença de fase entre o sinal de referência e o sinal do interferômetro, é possível obter a variação do deslocamento através do conhecimento do comprimento de onda da radiação laser,  $\lambda$ , através da seguinte equação:

$$d = \frac{\lambda}{2} \times \frac{\phi}{2 * \pi} \quad [3]$$

sendo  $\phi$  a diferença de fase entre os dois sinais obtidos.

Na figura 6 é representada a implementação óptica do interferómetro heterodino, onde se observam os percursos do feixe laser identificados na figura 5.

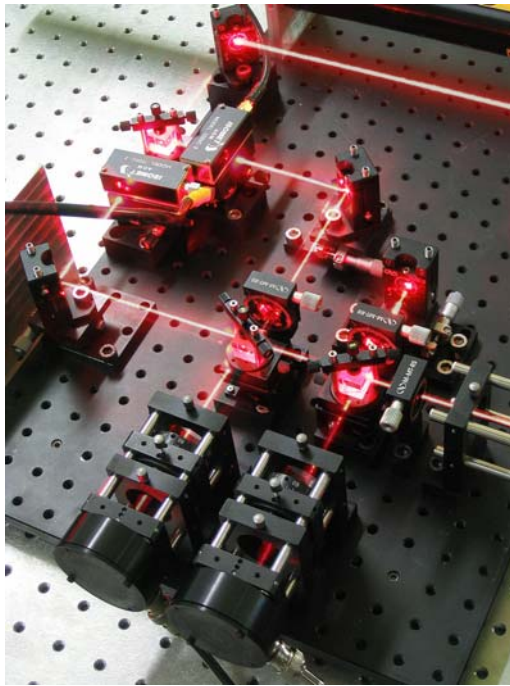


Fig. 6 - Implementação óptica do interferómetro heterodino.

### 3.2 - Gama de funcionamento

Os testes efectuados até ao momento com o interferómetro heterodino, permitem-nos determinar a gama de funcionamento previsível, tendo em conta as limitações do sistema.

De todos os constrangimentos, os mais relevantes são: o facto de o amplificador *lock-in* estar limitado a frequências heterodinas inferiores a 100 kHz e a taxa de amostragem do sinal de saída limitada a 25 kHz. Como consequência, o acelerómetro a calibrar não poderá ter velocidades superiores a 10 mm/s. Na figura 7 representa-se a zona de funcionamento tendo em conta esta limitação. Quando comparado com a zona de funcionamento do anterior método (interferómetro homodino), verifica-se que é possível estender a gama de valores de

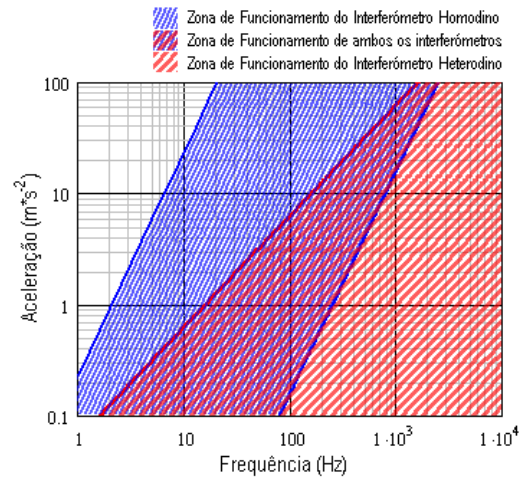


Fig. 7 - Zonas de funcionamento dos dois tipos de detecção.

frequência e aceleração, existindo mesmo uma zona de sobreposição que permitirá a passagem de um método para o outro de modo a abranger uma gama possível.

### 3.3 - Algoritmos de aquisição de dados e processamento de Sinal

Uma das aplicações desenvolvidas, em ambiente LabView, destina-se à aquisição dos dois sinais provenientes do lock-in, cujo painel frontal é apresentado na figura 8. Esta aplicação permite determinar a diferença de fase através do arco de tangente dos sinais obtidos (Y/X), e através de um multímetro digital de elevada exactidão, determinar o valor nominal da amplitude da aceleração à saída do pré-amplificador de carga.

O número de pontos adquiridos e a frequência de amostragem são calculados e otimizados de acordo com as condições do movimento (frequência e aceleração).



Fig. 8 – Aplicação para Aquisição dos sinais provenientes do *Lock-in*.

A figura 9 representa o painel frontal da aplicação utilizada para efectuar o tratamento e análise de dados e determinação do valor da amplitude da aceleração do acelerómetro padrão a calibrar.

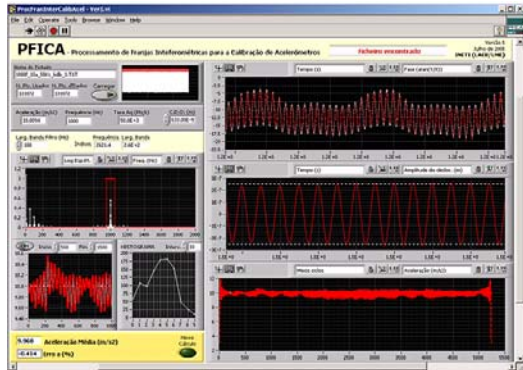


Fig. 9 - Aplicação para Processamento de Sinal e Determinação do valor da Aceleração.

A aplicação de processamento de sinal desenvolvida compreende essencialmente as seguintes fases:

- 1- Cálculo da variação de fase, utilizando “*phase unwrapping*” para remoção da ambiguidade do sinal;
- 2- Manipulação do sinal no domínio da frequência, de modo a filtrar o ruído de baixa e alta frequência, com filtro passa-banda centrado no valor da frequência de excitação;
- 3 - Determinação da amplitude do deslocamento de cada meio ciclo;
- 4 - Cálculo da aceleração a partir dos valores de deslocamento calculados;
- 5 - Selecção da janela útil para o cálculo da aceleração média e determinação do erro respectivo.

### 3.4 - Resultados Experimentais e Discussão

Nas figuras 10 e 11 encontram-se representados alguns resultados preliminares, obtidos por interferometria homodina e heterodina, para as zonas de funcionamento comum aos dois métodos, para valores de aceleração de 1 e 10  $m*s^{-2}$ .

Pela análise dos resultados obtidos, e tendo em consideração os valores limite para o interferómetro homodino, verifica-se uma boa concordância, para valores de frequência até 1 kHz.

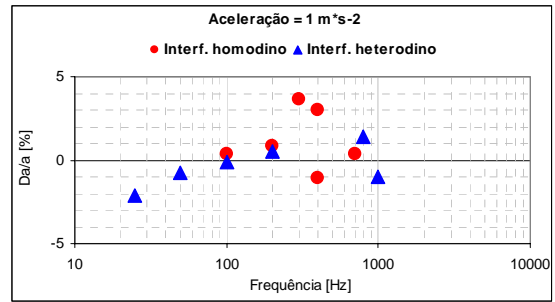


Fig. 10 - Desvio dos valores de aceleração obtidos por Int. Homodina e Heterodina, para aceleração nominal de 1  $m*s^{-2}$ .

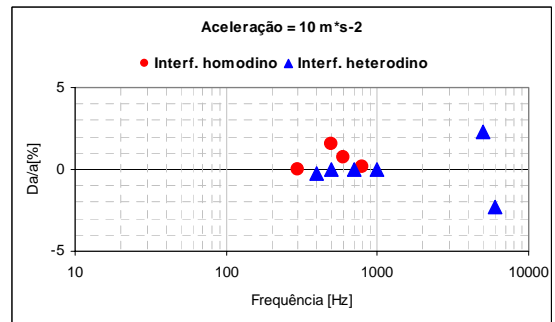


Fig. 11 - Desvio dos valores de aceleração obtidos por Int. Homodina e Heterodina, para aceleração nominal de 10  $m*s^{-2}$ .

Na figura 12, é apresentado o desempenho do interferómetro heterodino através da apresentação de alguns dos resultados preliminares obtidos. Observa-se que o valor ideal de funcionamento é dependente do binómio aceleração/frequência, de acordo com o previsto na figura 7. O aumento do valor absoluto do erro para valores máximos de frequência (1 kHz para 1  $m*s^{-2}$  e 6 kHz para 10  $m*s^{-2}$ ) é consequência do facto da amplitude do deslocamento atingir valores da mesma ordem de grandeza do ruído (dezena do nanómetro).

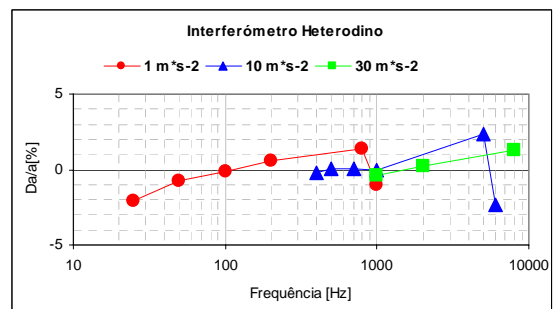


Fig. 12 - Desvio dos valores de aceleração obtidos por Int. Homodina e Heterodina, para valores nominais de 1, 10 e 30  $m*s^{-2}$ .

#### 4 – CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos até ao momento, pode concluir-se que é possível estender a gama de calibração de acelerómetros padrão por interferometria heterodina, tanto em valor de frequência como de aceleração.

Foram já atingidos resultados satisfatórios para valores de frequência até 8 kHz, embora, para este limite, apenas para acelerações superiores a  $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  (de modo a permitir que a amplitude do deslocamento seja superior ao ruído existente).

Os próximos passos incluem a optimização do sistema experimental, utilizando um outro amplificador de melhor especificação e melhorando a medição da diferença de fase pelo *Lock-in*, e o aperfeiçoamento e optimização dos algoritmos desenvolvidos.

Posteriormente proceder-se-á à avaliação da incerteza expandida da medição, identificando e caracterizando as diversas componentes presentes de acordo com o modelo matemático utilizado.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e Tecnologia o financiamento do Projecto POCTI / FAT / 41213 /2001 que permitiu desenvolver e implementar a referida técnica interferométrica.

#### REFERÊNCIAS

- [1] Link, Alfred, Gerhardt, J., von Martens, H. J., Amplitude and Phase Calibration of Accelerometers in the Nanometer Range, SPIE Vol. 2868, 37-48.
- [2] Nunes, M.; Godinho, M.; Rebordão, J.; Ribeiro, L.; Accelerometer Calibration by Laser Interferometry Using 'COTS' Components and Offline Data Processing, IMAC-XIX: Conference on Structural Dynamics, Florida – Laser Vibrometry II, Hyatt, Orlando, Florida, 734-739, February 5-8, 2001.
- [3] Godinho, I.; Rebordão, J.; Nunes, M.; Ribeiro, L.; "Calibração de Acelerómetros por Interferometria Laser – Interferómetro de Michelson", Ref. 646/160, 1º Congresso Nacional da Qualidade, Cidade Universitária, Lisboa, Junho 2000.
- [4] Sutton, C. M., Accelerometer Calibration by Dynamic Position Measurement Using Heterodyne Laser Interferometry, Metrologia 27, 133-138, 1990.
- [5] N. A. Massie, R. D. Nelson, S. Holly, High-performance real-time heterodyne interferometry, Applied Optics 18(11), 1979.
- [6] Chien-Ming Wu, John Lawall, Richard D. Deslattes, Heterodyne Interferometer with Subatomic Periodic Nonlinearity, Applied Optics 38(19), 1999.