

CALIBRACIÓN DE TRANSDUCTORES DE VIBRACIÓN DE BAJA FRECUENCIA UTILIZANDO UN INTERFERÓMETRO MICHELSON EN CUADRATURA

Arturo Ruiz R., Guillermo Silva P., Sergio R. Rojas R. y Noé Vidal M.
Centro Nacional de Metrología, División de Vibraciones y Acústica
km 4,5 Carretera a los Cués, El Marqués, Querétaro, CP 76241, México
Tel: (442) 2 110500, ext. 3577 Fax: (442) 2 110553
e-mail: arruiz@cenam.mx

Resumen: Recientemente se implementó en el CENAM el sistema primario para calibración de transductores de vibración a bajas frecuencias. El sistema incluye un excitador de vibraciones que alcanza frecuencias menores a 1 hertz y un interferómetro Michelson modificado en cuadratura como sistema de referencia. Se presentan resultados de transductores de contacto como acelerómetros y de no contacto como vibrómetros láser que han sido medidos en este sistema utilizando las técnicas de conteo de franjas y aproximación senoidal con desdoblamiento de fase.

1. INTRODUCCIÓN

La medición de vibraciones mecánicas a bajas frecuencias es importante en aplicaciones tales como sismología, y en comportamiento dinámico de grandes estructuras tales como puentes, presas y edificios. Las vibraciones a bajas frecuencias inciden también en aspectos de salud y confort de las personas, recientemente esto ha tomado importancia con la necesidad de cumplir con normas de este tipo; así como cumplir con requerimientos de instalaciones especiales, sobre todo de laboratorios de calibración y prueba. Además, se conoce que la mayoría de los equipos que operan en las industrias tales como, equipos mecánicos, eléctricos, rotatorios, etc., trabajan a frecuencias menores a 50 Hz y que muchos de ellos deben ser monitoreados.

Hasta el 2002 el CENAM contaba con sistemas de excitación que cubrían el intervalo de frecuencias de 50 Hz a 5 kHz; de tal forma, que era evidente la necesidad de desarrollar un sistema que cubriera frecuencias menores a 50 Hz.

El objetivo de la calibración de transductores de vibración es determinar la sensibilidad del transductor. La sensibilidad se refiere a la relación entre la señal de salida (carga o tensión eléctricas) y la señal de entrada (nivel de aceleración). Estas mediciones se realizan a diferentes frecuencias determinando así la linealidad del transductor.

Para generar el movimiento mecánico se utiliza un excitador electrodinámico que trabaja desde

fracciones de hertz hasta 160 Hz. Para medir el desplazamiento del elemento móvil del excitador se utiliza un interferómetro láser tipo Michelson modificado en cuadratura como sistema de referencia. Los métodos de aproximación senoidal y conteo de franjas son implementados para el procesamiento de la señal del interferómetro.

En el presente trabajo se presentan los primeros resultados de calibraciones a un acelerómetro piezoeléctrico y a un vibrómetro laser digital.

2. SISTEMA DE EXCITACIÓN

El movimiento de un excitador de vibraciones se puede describir con magnitudes dinámicas, tales como, aceleración, velocidad o desplazamiento. Un excitador del tipo electrodinámico consta de un elemento móvil con una bobina a través de la cual se hace pasar un flujo de corriente eléctrica alterna; la bobina se localiza en un campo magnético generado por un imán permanente. El campo electro-magnético genera una fuerza de aceleración llamada Fuerza de Aceleración de Lorentz, que es proporcional al producto del campo magnético y al flujo de corriente eléctrica a través de la bobina en el elemento móvil [1].

En la figura 1 se muestra el excitador de vibraciones utilizado como sistema de excitación para la calibración primaria de transductores de vibración a baja frecuencia. Este sistema opera en un intervalo de frecuencias desde fracciones de hertz hasta 160 Hz aproximadamente con un desplazamiento pico a pico máximo de 15 cm. Utiliza un amplificador

de potencia y un generador de señales para controlar los niveles de vibración generados.

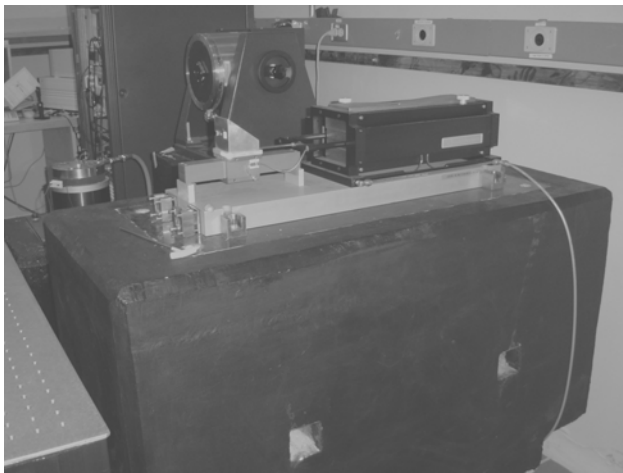


Fig. 1 Excitador de vibraciones de bajas frecuencias

3. INTERFERÓMETRO MICHELSON EN CUADRATURA.

La figura 2 muestra un diagrama esquemático del interferómetro Michelson modificado en cuadratura utilizado como sistema de referencia. En la figura 3 se muestra el arreglo experimental implementado cuando se calibra un vibrómetro laser.

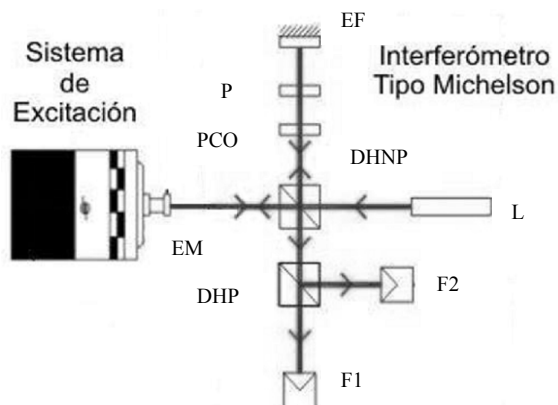


Fig. 2 Diagrama del Interferómetro en Cuadratura



Fig. 3 Arreglo experimental de Interferómetro Michelson en Cuadratura

Se utiliza un laser (L) He-Ne con una longitud de onda (λ) de 632,8 nm como fuente de luz, haciéndola incidir en un divisor de haz no polarizado (DHNP) el cual divide la luz incidente en dos haces, el haz de referencia y el haz de medición. Entre el divisor y el espejo fijo (EF) se coloca una placa de un cuarto de onda (PCO) para producir una luz con polarización circular y posteriormente un polarizador (P) para ajustar la fase del haz de referencia. El espejo fijo refleja nuevamente el haz de referencia hacia el divisor. El haz de medición incide sobre el espejo móvil (EM) y regresa al divisor de haz. Los haces de referencia y de medición se combinan para generar interferencia, este haz combinado pasa por un divisor de haz polarizado (DHP) que separa el haz en dos componentes con polarización perpendicular que producen interferencia con una diferencia de fase de aproximadamente 90° e inciden en dos fotodetectores (F1 y F2) [2].

4. MÉTODO DE CONTEO DE FRANJAS

En este método se miden dos frecuencias relacionadas con el desplazamiento instantáneo, $\xi(t)$, provocado por el excitador sobre el acelerómetro. La primera es la frecuencia de excitación mecánica definida por el generador de señales y la segunda es la frecuencia de la señal de salida de uno de los fotodetectores del interferómetro. Cuando la superficie de medición se acerca o se aleja del divisor de haz, una distancia $\lambda/2$, las franjas de interferencia, proyectadas sobre el fotodetector se desplazan el equivalente al espesor de una franja, es decir, existe un cambio de fase de 180° de la señal óptica de interferencia. Por tanto, a una frecuencia de excitación mecánica determinada y de amplitud constante, existirá un

número también constante de franjas, o pulsos ópticos, durante cada ciclo de vibración mecánica, en otras palabras, la frecuencia de corrimiento de las franjas es igual a la frecuencia de la excitación mecánica multiplicada por el número de franjas en un ciclo de la vibración, como se muestra en la figura 4. [1]

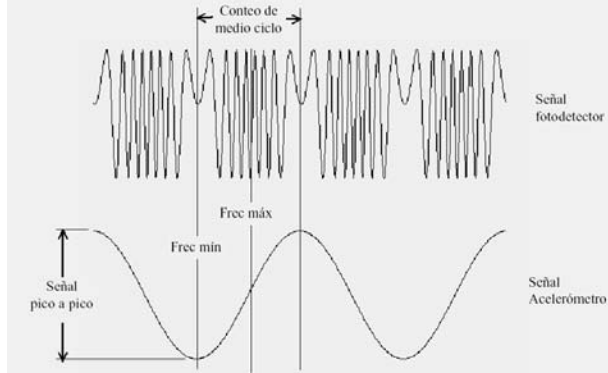


Fig. 4 Movimiento armónico simple (MAS) de la superficie de medición. Señal de salida armónica del fotodetector y del acelerómetro

Para determinar el número de franjas es necesario calcular la amplitud del desplazamiento pico ξ en el instante t , de la superficie de medición, esto se determina de acuerdo a la ecuación (1)

$$\xi = \frac{\lambda R_F}{8} \quad (1)$$

donde:

$$R_F = \frac{\text{frecuencia de corrimiento}}{\text{frecuencia MAS}} \quad (2)$$

la aceleración pico se calcula mediante la ecuación (3)

$$a = \frac{\xi}{\omega^2} \quad \text{donde: } \omega = 2\pi f \quad (3)$$

5. MÉTODO DE APROXIMACIÓN SENOIDAL

Cuando se genera un movimiento en la superficie de medición mediante el excitador se produce un patrón de franjas en ambos fotodetectores cuyas señales de salida se miden mediante una tarjeta adquisitoria de alta velocidad. Las ecuaciones 4 y 5 describen estas señales.

$$V_1(t) = V_1 \cos\left(\varphi_0 + \frac{4\pi}{\lambda} s(t)\right) + V_{1,0} \quad (4)$$

$$V_2(t) = V_2 \sin\left(\varphi_0 + \frac{4\pi}{\lambda} s(t) + \rho\right) + V_{2,0} \quad (5)$$

Donde t es el tiempo, V_1 y V_2 son las amplitudes pico de las tensiones eléctricas de salida de los fotodetectores $F1$ y $F2$, φ_0 es el ángulo de fase inicial, λ es la longitud de onda del láser, $s(t)$ es el desplazamiento del espejo móvil (EM), ρ es el error de fase y $V_{1,0}$ y $V_{2,0}$ son las componentes en corriente directa.

Los valores de fase φ_M se obtienen mediante la ecuación 6.

$$\varphi_M(t_i) = \arctan\left(\frac{V_2(t_i)}{V_1(t_i)}\right) + n\pi \quad n=0,1,2,\dots \quad (6)$$

Las señales en cuadratura de las ecuaciones (4) y (5) son muestreadas simultánea y equidistantemente dentro de un tiempo $t_0 < t < t_0 + T_{Med}$ teniendo un intervalo de muestreo $\Delta t = t_i - t_{i-1} = const$ [3].

Las componentes en corriente directa $V_{1,0}$ y $V_{2,0}$ se minimizan eliminando las señales de baja frecuencia en los acondicionadores A/D de los fotodetectores.

Se aplica un algoritmo de desdoblamiento de fase a la ecuación 6 para eliminar n tal que $\varphi_M(t_i)$ quede libre de cambios súbitos.

Después del desdoblamiento de fase de $\varphi_M(t_i)$ el desplazamiento se obtiene mediante la ecuación (7)

$$s(t_i) = \frac{\lambda}{4\pi} \varphi_M(t_i) \quad (7)$$

Para obtener la aceleración pico se generan vectores de señales senos y cosenos $A_{sen} = \sin(\omega t)$ $A_{cos} = \cos(\omega t)$ de longitud ($n \times 1$) y un vector unitario (1) de longitud igual a A_{sen} . Así, la aceleración pico se calcula con la ecuación (8)

$$a = \sqrt{d_1^2 + d_2^2} \quad (8)$$

los valores de d son valores de la matriz $D=BC$ sabiendo que

$$\begin{aligned} C &= s\omega^2 \\ B &= AX^T \\ A &= \text{inv}(X^T X) \\ X &= [(A \sin)(A \cos)1] \end{aligned} \quad (9)$$

6. CALIBRACIÓN DE TRANSDUCTORES DE VIBRACIÓN

El objetivo principal de la calibración de un transductor de vibración es determinar el factor de calibración (sensibilidad) dentro del intervalo de amplitud y frecuencia para el grado de libertad para el cual es utilizado el transductor. [4]. La sensibilidad para un transductor lineal se define como la relación entre la amplitud de la carga o tensión a la salida del transductor de vibraciones y la amplitud de la aceleración a la que es sometido el transductor durante una excitación paralela al eje de sensibilidad especificado en la superficie de montaje.

Se realizan mediciones para determinar la sensibilidad de un acelerómetro piezoeléctrico y de un vibrómetro laser utilizando el arreglo mostrado en la figura 5. Se utiliza un generador de señales y un amplificador de potencia para generar y controlar el MAS en el excitador de vibraciones. Sobre la superficie de medición del excitador se monta el acelerómetro bajo calibración y se hace incidir el haz de medición proveniente del interferómetro, se acondiciona la señal del acelerómetro mediante un amplificador de carga y se utiliza un multímetro de alta exactitud para la medición de la tensión eléctrica proveniente del amplificador. Para el caso de la calibración de un vibrómetro se hace incidir ambos haces en el mismo punto. Se utilizan tarjetas de adquisición de datos de alta velocidad para adquirir los datos tanto de los fotodetectores como del multímetro mediante el uso de software desarrollado en lenguaje Visual Basic.

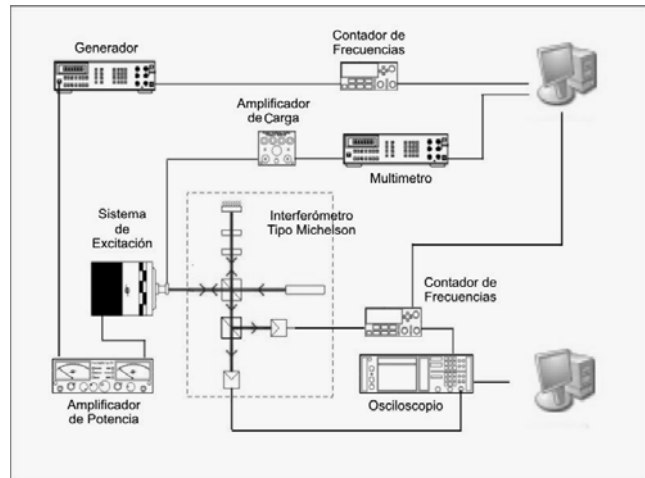


Fig. 5 Sistema utilizado para la calibración de transductores de vibración por interferometría laser

7. RESULTADOS

En este capítulo se presentan resultados de la calibración de un acelerómetro piezoeléctrico y de un vibrómetro digital utilizando las técnicas de conteo de franjas y aproximación senoidal descritas en los puntos 4 y 5.

7.1. Resultados en la calibración de un acelerómetro piezoeléctrico

Se realizan mediciones en doce frecuencias desde 2 Hz hasta 160 Hz con aceleraciones de $0,5 \text{ m/s}^2$ a 30 m/s^2 .

La sensibilidad del acelerómetro se obtiene mediante la ecuación (10)

$$S_A = \frac{E}{S_{AC}a} \sqrt{2} \quad (10)$$

donde:

S_A = Sensibilidad del acelerómetro (pC/m/s^2)

E = Tensión eléctrica a la salida del amplificador de carga (mV)

S_{AC} = Sensibilidad del amplificador de carga (mV/pC)

a = aceleración pico

Los resultados obtenidos con los métodos de conteo de franjas y aproximación senoidal se presentan en la figura 6.

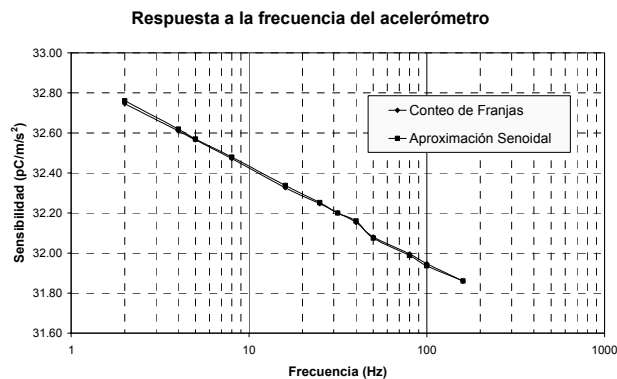


Fig. 6 Respuesta a la frecuencia del acelerómetro

La gráfica muestra una pendiente típica de respuesta a la frecuencia según la marca y modelo del acelerómetro. Las variaciones entre ambos métodos son menores al 0,05%.

7.2. Resultados en la calibración de un vibrómetro laser

Se determina la sensibilidad de un vibrómetro laser digital realizando mediciones en el mismo intervalo dinámico y de frecuencia utilizados en la calibración del acelerómetro.

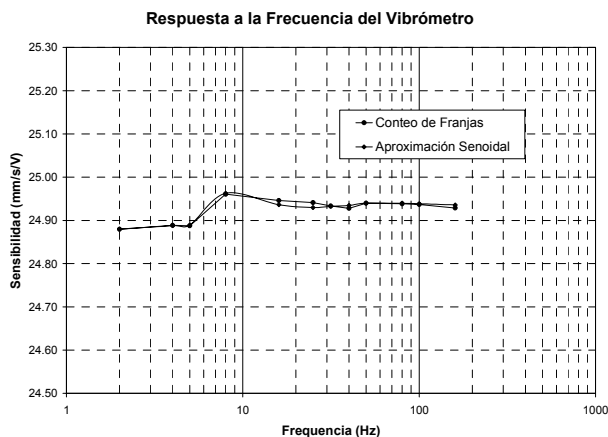


Fig. 7 Respuesta a la frecuencia del vibrómetro

La sensibilidad del vibrómetro se obtiene mediante la ecuación (11)

$$S_v = \frac{a}{\omega E \sqrt{2}} \quad (11)$$

donde:

S_v = Sensibilidad del vibrómetro

E = Tensión eléctrica a la salida del vibrómetro (mV)

$$\omega = 2\pi f$$

a = aceleración alternante (mm/s^2)

La gráfica de la figura 7 muestra la respuesta a la frecuencia del vibrómetro.

Igual que para el caso del acelerómetro las diferencias entre métodos en la calibración del vibrómetro son menores al 0,05%.

8. CONCLUSIONES

Se ha establecido satisfactoriamente un sistema de medición para vibraciones mecánicas en el intervalo de 2 Hz hasta 160 Hz.

Los resultados obtenidos en ambos transductores muestran desviaciones entre los métodos utilizados menores al 0,05%.

La implementación del método de aproximación senoidal con el interferómetro en cuadratura ha permitido mejorar la resolución del sistema de medición de $\lambda/2$ a $\lambda/512$ aproximadamente en el intervalo de frecuencia mencionado; sin embargo, esta resolución puede aumentar si así se requiere, utilizando la máxima velocidad de la tarjeta adquisidora de datos.

REFERENCIAS

- [1] Silva Pineda G., Ferrer Argote L. Interferometría laser y análisis de incertidumbres aplicados en vibraciones mecánicas, Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica, Colima, 2000.
- [2] Rojas Ramírez S., Silva Pineda G., Ruiz Rueda A. Quadrature Michelson interferometer used for shock calibration of accelerometers, SEM Annual Conference on Experimental Mechanics, Costa Mesa, California, USA, 2004
- [3] ISO 16063-11:1999 "Methods for the calibration of vibration and shock transducers. Part 11: Primary vibration calibration by laser interferometry".
- [4] ISO 16063-1:1998 "Methods for the calibration of vibration and shock transducers. Part 1: Basic concepts".
- [5] Alfred Link, Joachim Gerhardt, Hans-Jürgen von Martens. Amplitude and phase calibration of accelerometers in the nanometer range. SPIE Vol. 2868, pp 37-48. 1996.