

DISEÑO TEÓRICO Y CONSTRUCCIÓN DE UN VELOCÍMETRO LÁSER DOPPLER PARA LA MEDICIÓN DE VIBRACIONES MECÁNICAS

THEORETICAL DESIGN AND BUILT UP OF A DOPPLER LASER VELOCIMETER FOR MECHANICAL VIBRATION MEASUREMENTS.

Andrade Powell Villena¹, Luís Mosquera Leiva².

RESUMEN

La riqueza de detalles que las técnicas ópticas proporcionan, a acelerado su difusión en diversas aplicaciones de la mecánica experimental, con destaque en las técnicas de ensayo no destructivos. Como parte de las recientes adquisiciones de material de laboratorio, en el marco de un proyecto de innovación tecnológica se ha implementado en el laboratorio de Física de Ingeniería Civil, un equipo óptico de velocimetría láser doppler, que permite medir la respuesta espectral a vibraciones de diversas estructuras y constituye una poderosa herramienta de metrología óptica.

Palabras clave: Velocimetría láser doppler, Metrología óptica, Vibraciones.

ABSTRACT

The wealth of details that the optic techniques provide has fastened their diffusion in diverse applications of experimental mechanics, with it highlights in the non destructive essay techniques. Because of the new laboratory material purchasing, as part of the new technological innovation project, set up at the Physics Laboratory of the Civil Engineering Faculty, it has been built up a doppler laser velocimetry equipment that allows to measure the spectral answer to vibrations of diverse structures and it constitutes a powerful tool of optic metrology.

Key words: Láser doppler velocimetry, Optic metrology, Vibration.

INTRODUCCION

Con la aceptación de la teoría de Fresnel para las ondas de luz, la comprensión de los fenómenos de interferencia y difracción, resultantes del comportamiento ondulatorio de la luz, se tornó posible el desenvolvimiento de un gran número de componentes y dispositivos ópticos ampliamente usados en la industria, medicina y comunicaciones [1, 2]. Además de eso, han sido desarrolladas numerosas técnicas ópticas de medidas, las que han sido aplicadas con éxito en varios campos de investigación [3, 4, 5, 6, 7]. Entre éstas se encuentra la técnica de velocimetría láser que permite la medida de velocidades de sistemas

físicos donde un método de medida no invasivo es requerido.

Son muchas y variadas las aplicaciones que hacen uso de velocimetría doppler [8-13]. Esta técnica óptica representa una verdadera revolución en la tecnología del análisis experimental de vibraciones y deformaciones.

Sus principales ventajas son:

Método no invasivo.- No hay necesidad de sensores que generalmente alteran el comportamiento del sistema medido.

¹Bachiller de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería, ²Dr. de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería.

Acción a distancia.- Permite medición en locales de difícil acceso, ambientes agresivos, etc.

Rapidez.- Por no necesitar de colocación de transductores e respectivo cableado, el tiempo de preparación y ejecución del ensayo es considerablemente reducido.

La técnica de velocimetría láser doppler, aún no es conocida en nuestro medio y este trabajo es el primero, a nuestro conocimiento, en haberse desarrollado, implementándose, en nuestro laboratorio un equipo de velocimetría láser doppler, de alta sensibilidad y amplia largura de banda, mostrando su aplicación a la medida de vibraciones.

TEORIA

La técnica LDV se basa en la variación de la frecuencia por efecto doppler de un haz de láser que se hace incidir sobre una superficie que oscila con una amplitud y frecuencia conocida. El montaje óptico utilizado es mostrado en la Fig. 1.

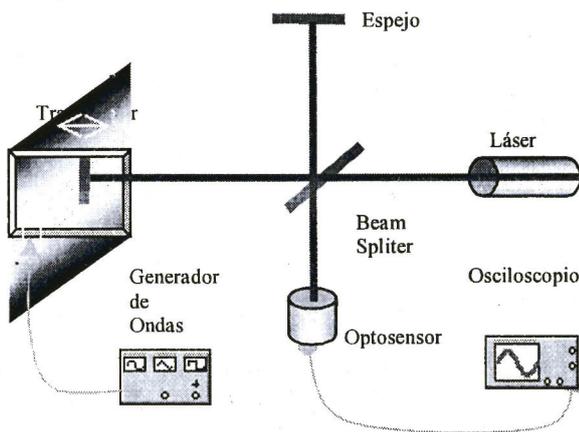


Fig. 1 Diagrama esquemático del velocímetro Doppler.

La luz láser es dividida en dos haces, I_1 e I_2 por un divisor de luz no polarizante. Uno de los haces (I_1) se hizo incidir sobre la superficie vibrante, la luz dispersada por la superficie es llevada a interferir con un segundo haz (I_2 , haz de referencia) sobre la superficie sensible de un fotodetector.

La irradiancia promedio en el fotodetector viene a estar expresada en éste caso como:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi) \quad (1)$$

$$\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} S(t) + \varphi_n$$

$$S(t) = S_0 \sin(2\pi ft)$$

Donde:

El símbolo φ representa la diferencia de fase de los haces de luz I_1 , I_2 , en el plano del detector. $S(t)$ representa aquí, el movimiento de amplitud S_0 y frecuencia f de la superficie vibrante. φ_n es la fase aleatoria introducida por ruido. λ es la longitud de onda del láser.

El cambio en la fase φ debido al movimiento de la superficie vibrante, expresado por $S(t)$, es convertido en variación de irradiancia en el fotodetector.

La derivada de la fase φ con respecto al tiempo $d\varphi/dt = (4\pi/\lambda) dS(t)/dt$, es proporcional a la velocidad de la superficie, y esta relacionada con la frecuencia angular instantánea $d\varphi/dt = w(t) = 2\pi v(t)$ del término a.c. en la ec. (1). Una señal de voltaje alterna es obtenida entonces a la salida del fotodetector [11 - 16]:

$$V_f(t) = 2k(v) \sqrt{I_1 I_2} \cos[(4\pi/\lambda) S(t) + \varphi_n] \quad (2)$$

Aquí $k(v)$ es el factor de conversión irradiancia-voltaje del fotodetector, y v es la frecuencia de la señal Doppler:

$$v = (4\pi/\lambda) S_0 \cos(2\pi ft) \quad (3)$$

Si la amplitud de vibración de la superficie (S_0) es grande comparada con la longitud de onda ($S_0 \gg \lambda/4$), la señal V_f pasa a través de sus valores máximos y mínimos muchas veces mientras la superficie realiza media oscilación. Se puede asumir que en éste corto lapso de tiempo I_1 , I_2 , y φ_n , son aproximadamente constantes, tal que toda la variación en la señal $V_f(t)$ es debida exclusivamente al desplazamiento de la superficie vibrante.

Una típica señal es mostrada en la Fig. 2, donde las flechas verdes apuntan las dos posiciones donde la velocidad de la superficie es cero, y una posición

(flecha negra) donde la frecuencia doppler v es máxima.

La amplitud S_0 de vibración de la superficie puede ser fácilmente calculada contando el número de ciclos que la señal doppler presenta durante un medio ciclo de vibración de la superficie. S_0 también puede ser calculada a partir del máximo de la frecuencia doppler v :

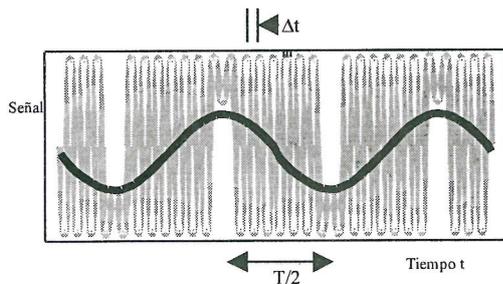


Fig. 2 Señal típica del fotodetector, mostrada en la pantalla de un osciloscopio, en un arreglo experimental de velocimetría Doppler.

La ec. (4) nos permite determinar la amplitud de vibración de la superficie para cada frecuencia de excitación, pudiendo a partir de ello conocer la respuesta espectral de la superficie en forma puntual, pronosticando y/o determinando sus frecuencias de resonancia [10, 11, 12].

$$v_{\max} = (4\pi / \lambda) S_0 f = \frac{1}{2\pi} (4\pi / \lambda) \left(\frac{dS}{dt} \right)_{\max} \quad (4)$$

$$\Rightarrow S_0 = \frac{\left(\frac{dS}{dt} \right)_{\max}}{2\pi f} = \frac{\lambda / 2}{2\pi f \Delta t}$$

DESARROLLO EXPERIMENTAL

En el marco de este proyecto de investigación, se construyó una mesa óptica y un velocímetro láser Doppler fue montado sobre ésta. La siguiente fotografía muestra el equipo construido.

Con este equipo, la señal Doppler es observada en un osciloscopio, tomándose datos a partir de las lecturas visuales. Con la idea de tener un velocímetro, de pequeñas dimensiones (20 cm x 30 cm x 10 cm), portátil, con salida digital, lectura de información en display, se construyó un pequeño velocímetro láser digital, basado en tecnología de microcontrolador PIC.



Fig. 3 Mesa óptica construida para implementar el Velocímetro Láser Doppler.

En la siguiente vista mostramos una fotografía del Velocímetro Láser Digital construido en el laboratorio de Física de la FIC.

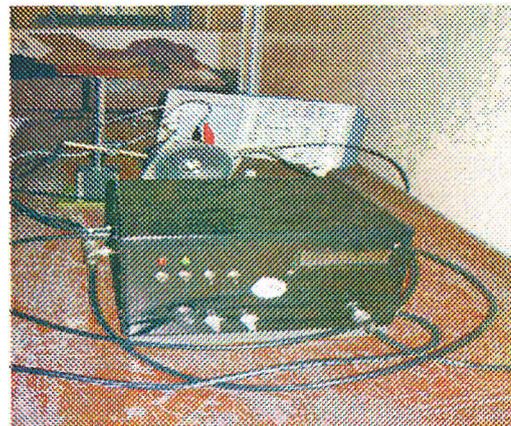


Fig. 4 Velocímetro Láser Doppler digital.

Este instrumento genera su propia señal de referencia, siendo su rango de trabajo programable, cubriendo el intervalo de 1Hz a 10 kHz, 150 nm a 2 mm de amplitud de vibración.

La señal proveniente del sensor y la señal de salida del sistema electrónico son mostradas en la Fig. 5, allí se puede observar la formación de picos que están “empaquetados” en grupos, los cuales son proporcionales al desplazamiento y velocidad de la vibración mecánica. Estas señales son procesadas por el sistema electrónico convirtiéndolas a señales TTL para poder ser luego tratadas por un microcontrolador cuya función principal es la de contar los picos en cada paquete e interpretarlo para luego mostrarlo un dispositivo de

visualización que en este caso es una pantalla LCD.

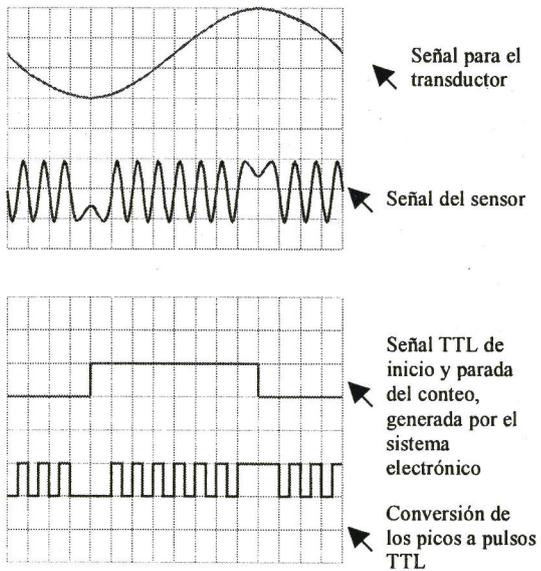


Fig. 5 La señal proveniente del sensor y la señal de salida del sistema electrónico convertidas a señales TTL.

El sistema electrónico esta compuesto por los bloques mostrados en la Fig. 6:

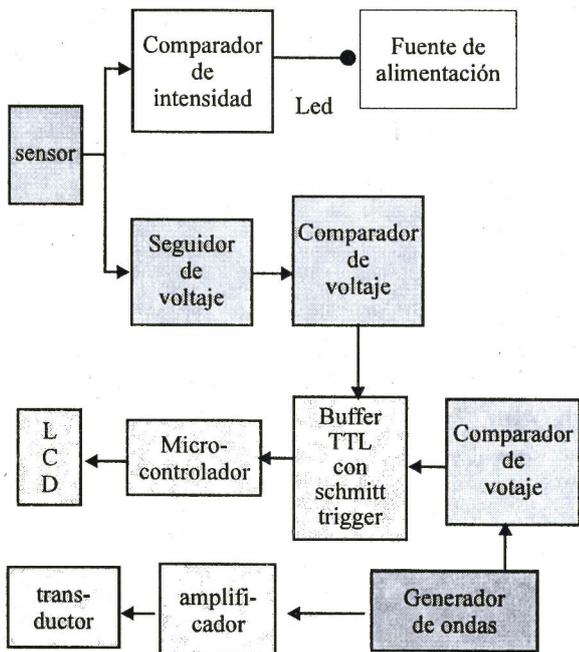


Fig. 6 Diagrama esquemático de la parte electrónica del velocímetro digital.

Con este velocímetro digital hemos realizado medidas de la respuesta espectral de parlantes comerciales en nuestro medio, en la Fig. 7 y 8 mostramos nuestros resultados experimentales.

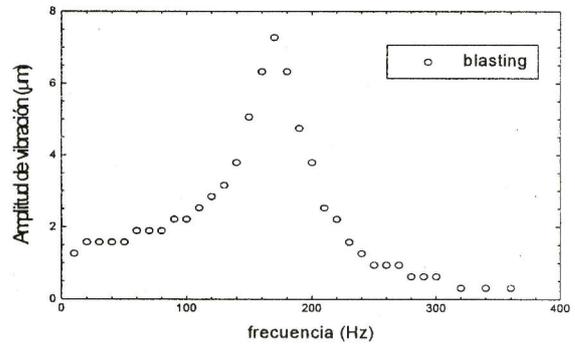


Fig. 7 Respuesta espectral de un parlante tipo blasting medida en el Laboratorio de Física de la FIC.

Usamos un modelo de oscilador amortiguado, forzado, para hacer un fitting de la curva experimental, determinando a partir de ello el factor de calidad del parlante:

$$A(f) = \frac{1}{4\pi^2} \frac{a}{\sqrt{(f_0 - f)^2 + (\Gamma f)^2}}$$

$a = F/m = 6.87785 \text{ ms}^{-2}$
 $f_0 = 171.929 \text{ Hz}$
 $\Gamma = 34.8156 \text{ Hz}$
 de donde, el factor de calidad del parlante,
 $Q = f_0 / 2\Gamma = 4.938$

Analizamos un segundo parlante comercial en nuestro medio, esta vez tipo twiter, obteniendo los siguientes resultados:

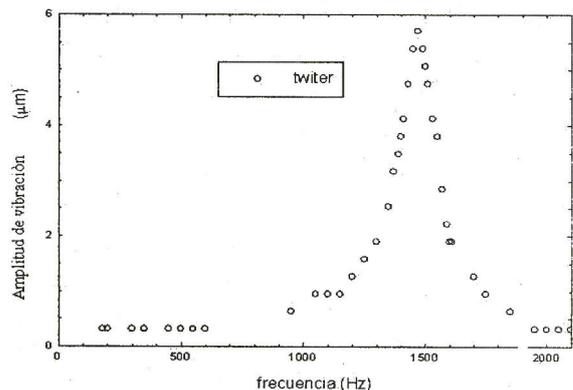


Fig. 8 Respuesta espectral de un parlante tipo twiter.

$$a = F/m = 151.617 \text{ ms}^{-2}$$

$$f_0 = 1472.1 \text{ Hz}$$

$$\Gamma = 112.669 \text{ Hz}$$

de donde, el factor de calidad del parlante,

$$Q = f_0 / 2\Gamma = 6.532$$

ANÁLISIS Y CONCLUSIONES

Los resultados experimentales obtenidos con el equipo de Velocimetría Doppler construido, observados en las Figuras 7 y 8, muestran una de sus posibles aplicaciones de metrología óptica, siendo múltiples las posibilidades de uso relacionado al estudio de la respuesta espectral de superficies y/o dispositivos que vibren con frecuencias en el rango de 0.1 Hz hasta 10 Mhz y con amplitudes de vibración de 0.1 μm hasta 2 mm. [11 – 19].

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto de Investigación y a la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería por el financiamiento de este trabajo como parte de un proyecto de investigación y desarrollo de tesis de Licenciatura de Powell Villena.

REFERENCIAS

1. **Polymers for electronic and photonic applications.**, edited by C. P. Wong (Academic, New York., 1993).
2. **Handbook of Advanced electronic and Photonic “Materials and Devices”**, edited by H. S. Nalwa Academic Press, 2001.
3. **Barbosa, E., Muramatsu, M.**, “Mapping of vibration amplitudes by time average holography in $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ crystals”. *Optics & Laser Technology*. V. 29. No 7. pp. 359-364. (1997).
4. **Suntak Park et all.**, “Thermal bias operation in electro-optic polymer modulators”, *Applied physics letters*. V. 83, No 5. pp. 827-829. (2003).
5. **Siegfried Bauer.**, “Poled polymers sensors and photonic applications”. *J. Applied physics* Vol. 80 (10), pp. 5531-5555. (1996).
6. **Arroyo Carrasco, M., Rodriguez Montero, P., Sanchez, M., Stepanov, S.**, “Depth resolution of a laser profilometer based on photo-emf detector”. *Optik* 112, No 4 (2001) 175-176.
7. **Mosquera, L., Frejlich, J. et all.**, “Enhanced photocurrent in photo-emf experiments in pure and doped absorbing photorefractive crystals”. *JOSA B*. V. 19. No 12. pp. 2904 – 2910. (2002).
8. **Korneev, N., Stepanov, S.**, “Measurement of small lateral vibrations of speckle patterns using a non-steady-state photo-emf in GaAs:Cr”, *Journal of Modern Optics*, (1991). Vol. 38. No 11. pp. 2153 - 2158.
9. **Barbosa, M., Mosquera, L., Frejlich, J.**, “Speed and diffraction efficiency in feedback-controlled running holograms for photorefractive crystal characterization. *Appl. Phys. B- lasers O. springer-Verlag*. V. 72, pp. 717-721. (2001).
10. **PTB.**, “Laser Doppler Anemometre calibration”, PTB – Physikalisch-Technische Bundesanstalt – Alemania; Braunschweig; (1999).
11. **Freschi, A., Kamshilin, A., Frejlich, J.**, “Doppler velocimetry for photodetector frequency response measurement”, *Optics Communications* 90. pp. 193-196. (1992).
12. **Barkov, A.**, “Optimization of Monitoring and Diagnostics Methods for Rotating Machines Using Vibration and Noise Measurements”, *Proceedings of the 4th International Congress on Sound and Vibration*, St. Petersburg, Russia, June 24-27, 1996, Volume 3, pp. 1573-1578
13. **Barkova, N. A.**, “The Current State of Vibroacoustical Machine Diagnostics”, <http://www.vibrotek.com/articles/state/index.htm>
14. **Doscher, J.** “Using MEMS Accelerometers in Instrumentation Applications”, *Proceedings of the 45th International Instrumentation Symposium*, May 1999, pp. 2-6
15. **Murray, A. Margio**, “New Low Cost DSP Motor Control IC”, *Italian DSP Conference*, November 1996, Milan, Italy.
16. **Mosqueira, L.**, “Construcción de un velocímetro láser Doppler”, *Proyecto de Investigación. UNI* 2004.
17. **Fieldhouse, J. D., Newcomb, T. P.**, “Self excited break noise investigation using the technique of classical holographic interferometry *SPIE-Vibration Measurements*”, Vol. 2358, pp. 346-358. (1994).

18. **Giuliani G. et al** "Self-mixing laser diode vibrometer Meas". Sci. Technol. 14 pp. 24-32 (2003).
19. **PTB**, "Laser Doppler Anemometre calibration"., PTB – "Physikalisch-Technische

Bundesanstalt – Alemanha; Braunschweig; (1999).

Correspondencia: lmosquera@uni.edu.pe

Recepción de originales: Diciembre 2005

Aceptación de originales: Marzo 2006