

VIBRÓMETRO LÁSER POR INTERFEROMETRÍA DE AUTO-MEZCLADO CON RESOLUCIÓN EN LA ESCALA MICRO Y NANOMÉTRICA

SELF-MIXING LASER VIBROMETER WITH RESOLUTION IN THE MICRO AND NANO METERS SCALE

L. E. Filgueira*¹ y C. T. Schmiegelow¹

¹Laboratorio de Iones y Átomos Fríos (LIAF) - Instituto de Física de Buenos Aires (IFIBA) – Universidad de Buenos Aires – CONICET, Intendente Güiraldes 2160 (1428), Buenos Aires, Argentina.

Recibido: 22/06/2020 ; Aceptado: 10/02/2021


Se describe el desarrollo de un interferómetro capaz de medir vibraciones sin contacto. Los resultados obtenidos demuestran su capacidad para medir desplazamientos micrométricos y/o nanométricos, sin la necesidad de estabilizar el láser. Si bien existen múltiples técnicas para llevar a cabo este objetivo, en este caso se utiliza una técnica cuya principal virtud es el bajo conteo de componentes y la capacidad de auto-alinearse. La técnica que describimos se basa en el efecto que produce la realimentación óptica en un diodo láser y la utilización de referencias internas para el calibrado.

Palabras Clave: interferometría, vibrometría, medición de desplazamientos, diodo láser, realimentación óptica.

We present the development of an interferometer capable of making contactless measurements of vibrations. The results show that we achieve micro- and/or nano-metric measurements without the stabilization of the laser. While there are multiple techniques to achieve this objective, in this case we use a method whose main virtue is the low component count and the self-alignment capacity. The method is based on the optical feedback effect in a laser diode which relies on the use of an internal reference for calibration.

Keywords: interferometry, vibrometry, displacement measurement, laser diode, optical feedback.

<https://doi.org/10.31527/analesafa.2021.32.1.15>

 ISSN 1850-1168 (online)

I. INTRODUCCIÓN

La interferometría láser es una técnica que permite la medición del desplazamiento de objetos sin realizar contacto con los mismos. Usualmente se utilizan distintos componentes (espejos, divisores de haz, fotodiodos, moduladores opto-acústicos, etc.), que requieren una cuidadosa alineación y suelen ser costosos. Algunos de los interferómetros más usados para medir desplazamiento son los de Mach-Zehnder, Michelson o los velocímetros láser Doppler [1-3]. En este trabajo describimos el desarrollo de un interferómetro más económico que permite medir desplazamientos micrométricos y sub-micrométricos, que será utilizado más adelante para medir las vibraciones en equipamiento sensible, por ejemplo láseres estabilizados en frecuencia [4].

Aquí trabajamos con una técnica llamada *self-mixing interferometry* (SMI), que permite medir desplazamientos sin contacto y con un conteo de partes mucho menor. Se basa en el efecto que se produce en la amplitud y frecuencia de salida de un diodo láser cuando se refleja una porción del haz emitido de vuelta a su cavidad. Esta técnica permite realizar la medición de desplazamientos, velocidades y distancias, sin mayor complejidad y con una resolución de media longitud de onda del láser utilizado [5]. Para medir desplazamientos por debajo de la longitud de onda del láser (típicamente 0.4 - 0.8 μm), en otros trabajos se han utilizado técnicas de estabilización activa del interferómetro. En tales casos, la señal de error del lazo de control da cuenta de los

desplazamientos del objeto con resolución nanométrica [6].

En este trabajo, logramos los mismos rangos de medición utilizando dos métodos distintos. Para desplazamientos mayores a media longitud de onda del láser utilizado se utilizan las técnicas existentes [5]. Para desplazamientos menores, se presenta una técnica nueva que consiste en la modulación de la corriente inyectada en el láser con el fin de mejorar la relación señal ruido (SNR) y tener una referencia constante que permita determinar la magnitud del desplazamiento medido.

En la siguiente sección se presenta la descripción teórica de la técnica de auto-mezclado. En la Sec. III se analizan los resultados de la medición correspondiente a desplazamientos del orden de los micrómetros, se describen las técnicas de procesamiento de datos y el equipamiento necesario para las mediciones. Luego en la Sec. IV se estudia una nueva técnica para medir desplazamientos nanométricos, se describe la metodología empleada y se evalúa la incertidumbre de los resultados obtenidos. Finalmente en las Secs. V y VI se discuten los resultados y conclusiones del presente trabajo.

II. DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA SMI

La técnica SMI se basa en el efecto que tiene realimentar una porción del haz emitido dentro de la cavidad de un diodo láser (LD). Esto ocurre cuando el láser es reflejado en un objeto distante y la reflexión (total o parcial) vuelve al mismo. La realimentación ocasiona una modificación en la amplitud y frecuencia de salida. En la Fig. 1 se ve una representación esquemática de esta técnica.

* lfilgueira@df.uba.ar schmiegelow@df.uba.ar

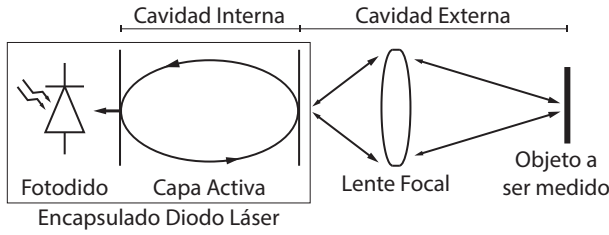


FIG. 1: Esquema de la técnica SMI. Las flechas dobles representan el haz generado en la cavidad del diodo láser que incide sobre el objeto y es reflejado de vuelta hacia la cavidad láser. El fotodiodo utilizado para monitorear la amplitud del haz proyectado se encuentra dentro del encapsulado del diodo láser. La lectura del fotodiodo permite caracterizar el desplazamiento del objeto.

En principio esta técnica no requiere una lente para su funcionamiento, pero su utilidad radica en que enfocando el haz sobre el objeto a medir, se genera una configuración tipo ojo-de-gato. La luz reflejada sobre él, también es reenfozada sobre el láser. De esta manera se logra llevar a cabo la medición de objetos no solidarios, es decir que tienen un índice de reflexión bajo y con baja reflectividad [5].

En la Fig. 1, se pueden ver representadas dos cavidades distintas. Esto se debe a que este fenómeno puede ser interpretado considerando al objeto como un tercer espejo, formando una cavidad externa acoplada a la cavidad interna Fabry-Perot (FP) del LD, de esta manera se genera una cavidad compuesta FP [7]. En este tipo de cavidades, la longitud de onda emitida dependerá de la distancia del objeto, y en caso de que el mismo no sea estático, variará de acuerdo a su desplazamiento. La onda incidente y la reflejada serán de frecuencias ligeramente distintas e interferirán dentro de la capa activa del diodo láser produciendo una modulación en amplitud. La modulación es registrada por el fotodiodo presente en la parte posterior dentro del encapsulado del diodo láser [8].

La modulación en amplitud producida, que afecta la potencia de salida del láser, la podemos modelar con la siguiente ecuación [9]:

$$P(t) = P_0 \{1 + m \cos[\phi_f(t)]\} \quad (1)$$

donde $P(t)$ y P_0 son las potencias de salida con y sin reflexión, respectivamente. El parámetro m es el índice de modulación, cuyo valor depende de la magnitud del desplazamiento del objeto y de la corriente inyectada en el LD [10], y $\phi_f(t)$ es la fase entre la onda incidente y la reflejada en el fotodiodo, y está dada por la siguiente ecuación:

$$\phi_f(t) = 2\pi \frac{D(t)}{\lambda_f(t)/2} \quad (2)$$

donde $D(t)$ representa la posición del objeto y $\lambda_f(t)$ es la longitud de onda emitida en presencia de realimentación.

La relación de la fase, respecto al láser sin perturbar, se halla en la siguiente ecuación, que se desprende de las posibles soluciones a una cavidad FP de tres espejos [7].

$$\phi_0(t) = \phi_f(t) + C \sin[\phi_f(t) + \arctan(\alpha)] \quad (3)$$

siendo, C el coeficiente de realimentación, α el factor de

ensanchamiento del ancho de banda del láser (suele tomar valores de 1 a 7) y $\phi_0(t)$ es la fase correspondiente al láser sin realimentación, donde λ corresponde a la longitud de onda del láser sin realimentar.

El coeficiente de realimentación C , está dado por la siguiente ecuación [7]:

$$C = \frac{\tau_{ext}}{\tau_L} k_{ext} \sqrt{1 + \alpha^2} \quad (4)$$

siendo τ_{ext} y τ_L , el tiempo que tarda en dar una vuelta completa el haz por ambas cavidades. k_{ext} es el coeficiente de acoplamiento con la cavidad externa y depende de las reflectividades de los espejos de la cavidad compuesta FP.

En la Fig. 2, se pueden ver simulaciones de la señal de intensidad en el fotodiodo $P(t)$ obtenida de un desplazamiento sinusoidal de 0.2 Hz y una amplitud de 2 μm pico a pico (representado en (a)). La longitud de onda del láser es de 405 nm. La simulación se lleva a cabo a través de la implementación en Python del trabajo realizado por R. Kliese et al. [11]. Las subfiguras (b,c,d) muestran los resultados de la simulación es para tres valores de C . Este parámetro describe la intensidad de la realimentación y especifica tres regímenes de comportamiento del sistema:

- $0 < C < 1$: débil. La señal $P(t)$, tiene la forma aproximada de un coseno distorsionado. Posee información de la magnitud del desplazamiento, pero no del sentido del mismo, equivalente a las franjas obtenidas con un interferómetro de Michelson [10]. Fig. 2b.
- $1 < C < 4.6$: moderado. Se ven una serie de discontinuidades (similares a dientes de sierra), que permiten determinar la magnitud y el sentido del desplazamiento a través de la identificación de las mismas. Fig. 2c.
- $C > 4.6$: fuerte. El nivel de realimentación es tan alto que la señal se ve altamente distorsionada, se reduce el nivel de la señal por lo que no es ideal para medir desplazamientos con exactitud. Fig. 2d.

Si se considera el sentido del desplazamiento representado en la Fig. 2a, donde la línea sólida indica que el objeto se acerca al láser y la línea rayada indica que se aleja, se ve que los dientes de sierra cambian de orientación con el sentido del movimiento. De esta manera se puede saber el sentido del desplazamiento analizando la pendiente y el sentido de los dientes.

A su vez, como puede verse en la Fig. 2 e intuirse de las ecuaciones discutidas, la señal obtenida es un coseno distorsionado por la variación de la fase del láser (ϕ_f). La forma depende de C . A medida que incrementa, aumentan las soluciones de la Ec. (3) [12] y la emisión del LD se vuelve multiestable. Esto genera la forma característica de dientes de sierra para $C > 1$. Cada diente corresponde a una rotación de fase de $\phi_f = 2\pi$, que equivale a que la cavidad externa se haya desplazado $\lambda_f/2$ (ver Ec. (2)). Asimismo, cada discontinuidad representa un desplazamiento de media longitud de onda del láser.

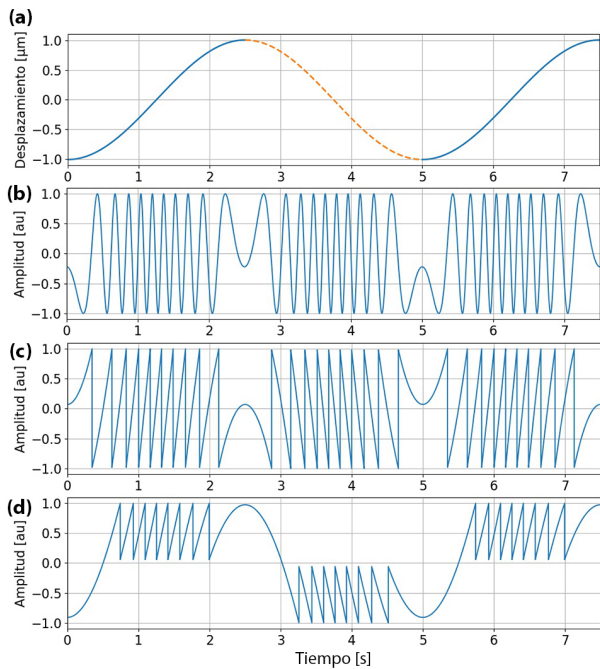


FIG. 2: Simulación de las señales obtenidas para distintas magnitudes de C : en (a) se ve el desplazamiento del objeto a medir, que consiste en $2 \mu\text{m}$ pico a pico y una frecuencia de 0.2 Hz , las secciones en línea sólida indican que el objeto se aleja del láser, en cambio la línea rayada indica que se acerca. Las figuras (b), (c) y (d), se corresponden con la señal $P(t)$ obtenida para los valores de $C = \{0.5; 1.1; 5\}$ respectivamente.

III. MEDICIÓN DE DESPLAZAMIENTOS MAYORES A MEDIA LONGITUD DE ONDA

Considerando lo expuesto previamente, a través de la evaluación de la señal SMI, se puede obtener la magnitud y sentido del desplazamiento del objetivo, siempre y cuando el mismo sea mayor a $\lambda/2$.

El procedimiento consiste en contar las franjas y sumar desplazamientos de $\lambda/2$. Si el sentido del movimiento cambia, la pendiente de la señal cambiará de signo y uno deberá restar desplazamientos franja por franja. Como se puede entender, la resolución de este método es de $\lambda/2$ y su exactitud se ve afectada por la interpolación que se lleve a cabo entre las franjas, para lograr una reconstrucción del desplazamiento del objetivo.

A partir de las cinco ecuaciones previamente representadas, podría realizarse una reconstrucción de la posición del objeto $D(t)$. Sin embargo, determinar el parámetro C es difícil de calcular, ya que es poco práctico determinar los coeficientes de reflexión. A su vez, α varía con el nivel de realimentación y la corriente inyectada (con lo cual se da una interdependencia entre ambos parámetros) [13]. Por estas razones, es más conveniente “contar franjas” que intentar reconstruir las trayectorias, determinando todos los parámetros del sistema en un dado momento y ajustando el modelo más completo. La importancia del control del parámetro C será solo para lograr el régimen moderado donde la señal contiene la mayor información sobre el desplazamiento.

A pesar de que la estimación precisa de C no es sencilla de hacer, se puede controlar su valor para que el mismo

esté en el régimen moderado con relativa facilidad. Para hacerlo se debe variar la cantidad de luz que reingresa en el LD. Esto se logra variando la posición del foco y/o la alineación del haz sobre el objetivo. En los experimentos que describimos, esto se llevó a cabo manualmente, pero existe la posibilidad de hacerlo automáticamente a través de la utilización de un control de foco [14].

Para llevar a cabo la calibración y evaluación del dispositivo se utilizó, como objeto de referencia, un actuador piezoeléctrico (PZT), PST 150/5x5/7 de Piezomechanik. Al cual se le puede adherir un espejo para maximizar la realimentación o una cinta de papel blanca para simular un objeto rugoso. El desplazamiento estimado en base a lo expresado por el fabricante es de 57 nm/V , para tensiones continuas. Sin embargo, se encuentra experimentalmente que el desplazamiento es de $46 \pm 8 \text{ nm/V}$ (con un intervalo de 95% de seguridad) excitando al mismo con una señal sinusoidal de 500 Hz . Esta medición se lleva cabo variando la tensión impuesta sobre el PZT y determinando los valores en los que aparece una nueva franja, es decir un salto de $\lambda/2$. Luego se toma el promedio de las distintas mediciones y se halla el desplazamiento en función de la tensión aplicada. Notamos que la respuesta de los piezoeléctricos con la amplitud de polarización, no suele ser lineal [15]. Sin embargo, mas adelante extrapolamos esta calibración para desplazamientos nanométricos, ya que se espera que en ese rango las no linealidades sean despreciables. La respuesta de los PZT también varía en función de la frecuencia [15], pero determinamos que en el rango por debajo de los 500 Hz esta dependencia es menor a la incertidumbre obtenida.

En la Fig. 3, se ve una representación esquemática del dispositivo utilizado para medir desplazamientos mayores a media longitud de onda. El láser utilizado es Sanyo DL-4146-1015 (405 nm), la fuente de corriente fue desarrollada por el LIAP (Laboratório de Integração Engenharia e Processos) de la UFCG (Universidade Federal de Campina Grande) y ensamblada en el LIAF y la CPU es una Raspberry PI 3 B+.

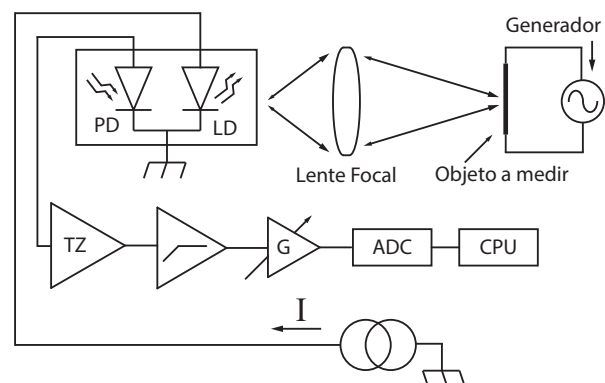


FIG. 3: Esquema del dispositivo utilizado para medir desplazamientos mayores a media longitud de onda. PD fotodiodo, LD diodo láser, TZ amplificador de transimpedancia, G etapa de ganancia posterior al filtro pasa altos, ADC conversor analógico digital, CPU unidad de procesamiento central e I fuente de corriente.

Se armó un amplificador de transimpedancia con un amplificador operacional Op27 (por su bajo ruido), una ganancia

cia de 3 k Ω y su ancho de banda fue acotado a aproximadamente 26 kHz. También se utilizó un filtro de cuarto orden construido usando dos filtros Sallen-Key en cascada, con una frecuencia de corte de 0.1 Hz, la utilización del mismo es para acoplar en corriente alterna (CA) la señal a la salida del fotodiodo. A la salida del filtro se agrega una etapa de ganancia variable, que permite aumentar el nivel de la señal para compensar la ganancia del amplificador. Esto permite llegar a los valores que recomiendan Graeme et al. [16].

El conversor análogo digital (ADC) es una placa de audio USB genérica de fabricación china. Debido a que su uso es para el audio tiene un ancho de banda de 20 Hz a 20 kHz. El límite superior es imposible de extender ya que es un filtro *anti-alias* para la frecuencia de muestreo de 44.1 kHz del conversor. La frecuencia de corte inferior está dada por un capacitor de desacople a la entrada del ADC, el mismo fue removido para extender la respuesta en frecuencia hasta 3.5 Hz. Sin embargo, debido a que el ADC es unipolar, se debió agregar una etapa de acople DC consistente en un amplificador diferencial que suma una tensión continua a la señal alterna. El límite en frecuencias bajas de 3.5 Hz, es ocasionado por un filtro pasa altos digital que se utiliza para corregir los errores de *offset* de la conversión, este filtro no es posible de eliminar en el ADC utilizado [17].

El CPU se encarga del procesamiento de los datos y la reconstrucción del desplazamiento a través de la señal digitalizada. Para esta tarea se utiliza el código de programación *Python*, a través de la aplicación web *Jupyter Notebook*. La interacción con la placa de audio se lleva a cabo a través de la biblioteca *sounddevice*.

Para la reconstrucción del desplazamiento es necesario identificar los dientes o saltos de $\lambda/2$, para lo cual se utiliza la transformada continua de ondas pequeñas (*continuous wavelets transform*), cuya implementación se basa en la biblioteca *Scipy* para *Python*. Esta herramienta permite encontrar patrones en un punto específico del tiempo de una señal analizada, ya que compara la misma con versiones modificadas de un patrón principal llamado *mother wavelet*, en este caso se utilizan dos patrones diferentes (uno para cada sentido de desplazamiento), basados en el trabajo realizado por Bernal et al. [18].

Previo a la reconstrucción del desplazamiento medido, se lleva a cabo una limpieza de la señal, aplicando filtros *moving average* y pasa altos (cuya frecuencia de corte es determinada por el operador del dispositivo), ya que el nivel de ruido presente en la misma es alto y afecta el desempeño de la utilización de *wavelets* al crear falsos positivos. Luego con el fin de hacer una reconstrucción cruda del desplazamiento, se cuentan la cantidad de saltos tomando en cuenta el sentido de los mismos y se lleva a cabo una interpolación cuadrática utilizando las bibliotecas de *Scipy*.

En la Fig. 4 se ve una medición del PZT siendo excitado con una onda sinusoidal de 30 Vpp y 100 Hz, correspondiente con un desplazamiento de 1395 ± 249 nm (95%). En la Fig. 4a se presenta la señal obtenida, luego se ve la misma señal filtrada y con los saltos demarcados en (b) y finalmente se ve la señal reconstruida (línea sólida) y el error respecto al desplazamiento teórico o esperado (líneas punteada y rayada respectivamente). El error fue tomado haciendo la

diferencia entre el desplazamiento reconstruido y el teórico.

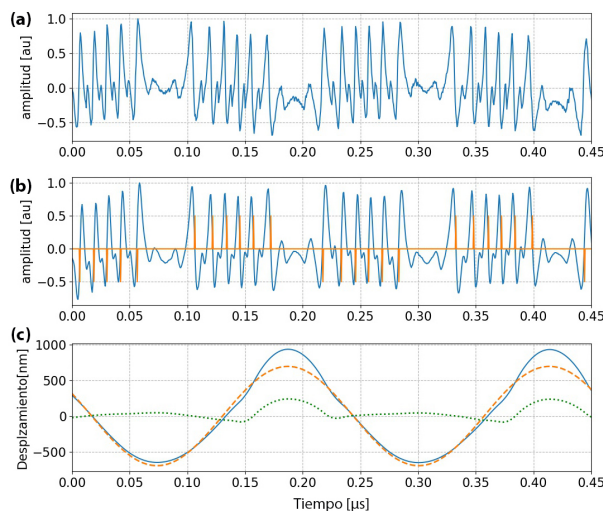


FIG. 4: Medición del PZT siendo excitado con una onda sinusoidal de 30 Vpp y 100 Hz, correspondiente con un desplazamiento de 1395 ± 249 nm (95%). (a) señal $P(t)$, (b) señal filtrada y con los saltos demarcados y (c) reconstrucción final (línea sólida), desplazamiento teórico del PZT (línea rayada) y el error de la reconstrucción (línea punteada).

IV. MEDICIÓN DE DESPLAZAMIENTOS MENORES A MEDIA LONGITUD DE ONDA

Para llevar a cabo la medición del orden de los nanómetros, aquí se estudia una técnica basada en la modulación de la corriente inyectada en el láser con *dos* frecuencias distintas.

La longitud de onda de emisión del láser es función de la corriente. Debido a esto, la modulación de la corriente produce, correspondientemente, bandas en la frecuencia de emisión del láser. Las modulaciones introducidas permiten medir en los puntos de máxima sensibilidad del interferómetro, así como auto-calibrar la señal medida sin necesidad de la intervención del usuario. Cada una de las frecuencias de modulación cumple uno de estos roles, como se describe a continuación:

- Barrido de sensibilidad: se modula el láser con una frecuencia baja, de gran amplitud. Esta modulación simula un desplazamiento del objetivo mayor a $\lambda/2$. La idea es que la vibración del objetivo se superponga con la simulada. De esta manera se puede medir en las zonas de máxima sensibilidad y mejorar la relación señal ruido de la medición. Este concepto se utiliza en los vibrómetros que utilizan la técnica de estabilización en media franja, como el desarrollado por Giuliani et al. [6].

Esta frecuencia debe estar por debajo de la mínima que se desea analizar y se debe ajustar al tamaño de la ventana que se va a utilizar para llevar a cabo la transformada de Fourier. Idealmente la frecuencia mínima de interés es de 0.1 Hz [19]. El dispositivo que aquí describimos tiene un límite inferior de 3.5 Hz debido al ADC. Por esta razón, se decidió utilizar un frecuencia

de 0.2 Hz y una amplitud de 330 μ App, equivalente a un desplazamiento de 2 μ m.

- Tono de referencia: es de muy baja amplitud y sirve como calibración permanente. Esta modulación permite la determinación de la magnitud de la vibración del objetivo, debido a una referencia en el espectro de la señal.

Su amplitud debe ser inferior a la necesaria para generar franjas y evitar interferencia con el proceso ya descrito. A su vez, cuanto menor amplitud tenga esta modulación menor será el enmascaramiento de las frecuencias aledañas permitiendo un mejor aprovechamiento del ancho de banda del sistema. Por esta razón, es recomendable que esta frecuencia esté por fuera del rango a ser estudiado y cuanto más alta sea la frecuencia, menor será la ventana requerida para evaluar su espectro. Optamos por utilizar una frecuencia de 17 kHz, ya que de acuerdo a la norma ISO 10811-1:2000 la máxima frecuencia de interés de análisis en recintos con equipamiento sensible es de 315 Hz.

La amplitud del tono utilizado es de 30 μ App. Se determinó que se corresponde con un desplazamiento de 180 ± 22 nm (95%). El cambio de la frecuencia del láser en función de la corriente, se obtuvo con el interferómetro presentado y un blanco fijo a una distancia 0.15 m, determinando el cambio de corriente necesario para generar un desplazamiento completo de una franja.

Una idea similar fue llevada a cabo por Lukashkin et al. [20], en el cual se utilizaba un desplazamiento mecánico (se hacía vibrar el láser con un PZT), de magnitud y frecuencia determinados para generar la referencia y así poder determinar el desplazamiento del objeto bajo estudio.

El dispositivo es igual al caso de la medición mayor a media longitud de onda (Fig. 3). El principal agregado es un convertor digital-analógico (DAC) que se utiliza para modular la corriente inyectada en el láser. El sistema es puesto a prueba, igual que en el caso anterior, mediante la medición del PZT que es excitado con una tensión de 2 Vpp @ 100 Hz, correspondiente con un desplazamiento de 93 nm.

El procesamiento de la medición es diferente al caso anterior, ya que no se basa en el análisis de la forma de la señal, sino en el espectro de la misma. Por lo tanto, no se obtiene una reconstrucción del desplazamiento, sino una magnitud RMS de su amplitud. En la Fig. 5, se ven en la primera fila las franjas generadas (en línea sólida azul), por la corriente inyectada (línea rayada naranja). A su vez, se ven demarcadas las zonas de máxima sensibilidad con círculos y con cruces se representan los puntos de menor sensibilidad.

Prosiguiendo, en la Fig. 5, se representan dos espectros distintos, correspondientes a un área de mayor y menor sensibilidad con relaciones señal ruido de 26.59 y 19.70 dB respectivamente. Cada uno es el espectro de una grabación de 250 ms, obtenida con el modo *stream* de la biblioteca *sounddevice* de *Python*.

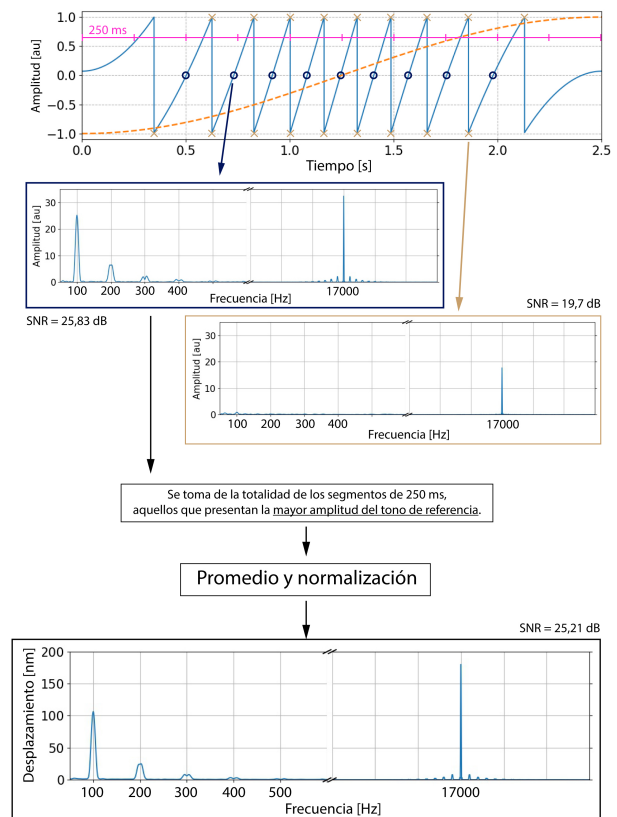


FIG. 5: Esquema de medición de desplazamientos menores a media longitud de onda. De arriba hacia abajo, en la primera figura se ven las franjas generadas por la corriente alterna inyectada (línea rayada naranja), con las áreas de máxima y mínima sensibilidad demarcadas con círculos y cruces respectivamente. Los dos espectros siguientes corresponden a medidas realizadas en los puntos de mayor y menor sensibilidad, con relaciones señal ruido de 26.83 y 19.70 dB, correspondientemente. El espectro en la última fila se obtiene luego de seleccionar las mediciones con mayor señal ruido, normalizarlas y promediarlas.

La SNR se calcula como el cociente entre las potencias de señal y ruido. Ambas son determinadas en función de un umbral con respecto a la amplitud del tono de referencia. Considerando las amplitudes típicas de las zonas de ruido y señales, se determinó que un umbral de 0.2 funciona bien para este procedimiento. Todo lo que esté por encima es considerado señal, lo que se encuentra por debajo es ruido.

La grabación de segmentos consecutivos de 250 ms prosigue hasta que se obtienen 100 muestras (25 s). Cada segmento se corresponde con distintos puntos de sensibilidad del instrumento. Como las zonas de mayor sensibilidad se corresponden con el centro de la rampa (demarcadas con un círculo en la Fig. 5), que aparecen intercalados con puntos de menor sensibilidad (cruces en la Fig. 5).

Para identificar los segmentos de mayor y menor sensibilidad, se registra la amplitud del tono de referencia para cada espectro medido. Luego se analiza esta secuencia de valores identificando aquellos en los que la amplitud es mayor al resto utilizando la función *find_peaks* de la biblioteca *Scipy* para *Python*. Una vez seleccionados los segmentos de mayor sensibilidad se lleva a cabo el promediado de sus espectros, obteniendo un único espectro, el cual no tiene unidades de desplazamiento.

Para obtener el desplazamiento final, se lo normaliza respecto a la señal de 17 kHz y 30 μ App, ya que se determinó previamente que esta corresponde a un desplazamiento de 180 ± 22 nm. De el espectro final se determina la SNR de 25.21 dB. Cabe destacar que la relación señal ruido disminuye, respecto de la mayor, debido a que la señal no es estacionaria.

De este modo, se determina, para una única medida, un desplazamiento de 106 ± 39 nm (95 %), excitando el PZT con una tensión de 2 Vpp @ 100 Hz. Para este caso, el desplazamiento esperado de la extrapolación de la medida a 500 Hz en el rango micrométrico es de 93 ± 16 nm (95 %), que coincide dentro de las incertidumbres correspondientes. La incertidumbre de esta medición fue estimada considerando el aporte de la longitud de onda del láser, la función de transferencia de la fuente de corriente, filtrados, y de las etapas de procesamiento de la señal. En esta última contribución se encuentra que el mayor aporte de incertidumbre se debe al ventaneo tipo Hann, que si bien permite mejorar la resolución en frecuencia, disminuye la exactitud de la magnitud obtenida [21].

Continuando el análisis, en la Fig. 6, se puede ver el resultado para distintas tensiones en el objeto de referencia. Para cada una de ellas se llevaron a cabo 40 mediciones, se reporta media y desviación estándar. También se indica en el gráfico los valores esperados y su rango de confianza, según la calibración hecha en el rango micrométrico. En todos los casos, se ve que estas coinciden dentro del intervalo de confianza. El cálculo de la media se lleva a cabo considerando que la distribución de probabilidad es normal, lo cual se verificó llevando a cabo un test K-S, obteniendo $p > 0.05$ en los tres casos [22]. Es importante notar que el análisis estadístico se efectúa para evaluar el desempeño del instrumento, pero no debe ser confundido con la incertidumbre de las mediciones individuales del mismo, que como se mencionó se evalúan con otro criterio.

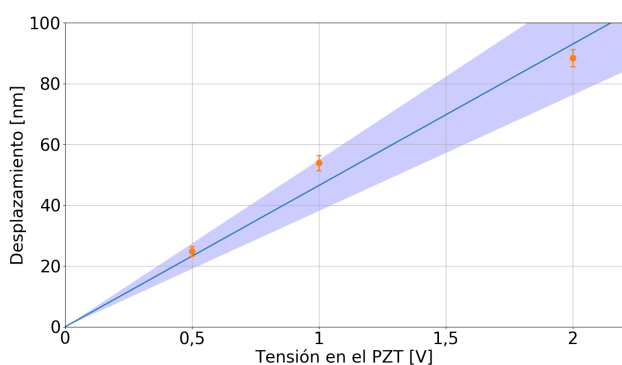


FIG. 6: Desplazamiento del objetivo en función de la tensión sobre el transductor piezoeléctrico en el rango nanométrico, la línea y área azules representan el desplazamiento teórico o estimado en el rango micrométrico de 46 ± 8 nm/V. Los puntos se corresponden con las mediciones de tres tensiones diferentes impuestas en el PZT, cada punto es el promedio de 40 muestras tomadas.

V. DISCUSIÓN

En esta sección se discutirán los principales puntos de interés mencionados a lo largo del desarrollo previo.

Calibración del objeto de referencia: El objeto de referencia utilizado es el actuador PZT ya descrito. Para caracterizar su desplazamiento se utilizó la medición de desplazamientos mayores a media longitud de onda y el valor medido para la longitud de onda del láser utilizado. La incertidumbre asociada limita la precisión de la calibración del interferómetro. En la siguiente etapa sería conveniente contar con un objeto de referencia trazable a patrones fundamentales.

Calibración en el rango nanométrico: Destacamos que debido a la ausencia de patrones que permitan la calibración trazable del dispositivo desarrollado, la incertidumbre evaluada en este rango es del Tipo B, de acuerdo a lo establecido por el Organismo Argentino de Acreditación (OAA) [23]. Este tipo de evaluación se basa principalmente en los manuales y certificados de calibración del instrumental utilizado y no se trata de repetir múltiples veces las mediciones, evaluando la incertidumbre de manera estadística. Por el contrario, se hace una única medición de desplazamiento y la incertidumbre se obtiene de manera indirecta, considerando las mediciones y aportes parciales de cada variable medida.

Filtrado de ruido: La presencia de ruido dificulta la detección de las discontinuidades en el caso de desplazamientos mayores a media longitud de onda. Para mitigar este efecto se requirió la utilización de filtros digitales. Un filtro pasa altos para remover el valor medio de la señal y un filtro *moving average*, que equivale a un pasa bajos, para remover el ruido de alta frecuencia. La limitación de utilizar estos recursos es que requiere un análisis cuidadoso de la señal y su espectro, ya que no son frecuencias de corte fijas. De esta manera se genera una dependencia de la experiencia del usuario para lograr los resultados obtenidos.

Reconstrucción de trayectorias: En el caso en que los desplazamientos son mayores a media longitud de onda, se puede reconstruir la trayectoria del objeto, tal como se muestra en la Fig. 4c. Es interesante notar que, en las secciones lineales, la reconstrucción se aproxima al desplazamiento esperable. En cambio en donde se da la ausencia de franjas, la interpolación cuadrática genera una sobre-estimación del desplazamiento, dando lugar a un incremento del error y distorsión en la señal medida.

Distorsión: En el caso de los desplazamientos nanométricos aparecen, como se puede ver en la Fig. 5, armónicos de la frecuencia de excitación del objeto de prueba. Hasta el momento no es posible determinar si los mismos se deben solamente al funcionamiento del interferómetro, ya que las zonas de máxima sensibilidad no son perfectamente lineales o existe un aporte del objeto de referencia desplazándose. Un objeto de prueba calibrado permitiría resolver esta incertidumbre.

Modulación en frecuencia: Finalmente notamos la aparición de frecuencias bien definidas alrededor de la frecuencia de calibración de 17 kHz, debido a la modulación en

frecuencia. Estas bandas laterales se corresponden con la información que se busca obtener, lo que abre la posibilidad de utilizar un sistema de detección heterodino, lo que eliminaría el límite inferior impuesto por los filtros pasa altos analógicos y permite seleccionar la zona espectral donde se encuentre el menor piso de ruido del sistema a ser medido, ya que la frecuencia de modulación puede ser seleccionada arbitrariamente.

VI. CONCLUSIONES

Desarrollamos un nuevo tipo de vibrómetro láser capaz de medir desplazamientos micrométricos y/o nanométricos. Los resultados obtenidos demuestran ser coincidentes con los esperables para ambos rangos de medición, ya que las magnitudes medidas se encuentran dentro de los desvíos esperables de un objeto de referencia no calibrado.

La técnica de medición SMI demuestra ser robusta debido a su bajo conteo de partes, no requerir la estabilización del láser y su capacidad de alinearse sin dificultad. En una etapa siguiente mejoraremos la caracterización de la exactitud del dispositivo mediante la utilización de patrones que permitan llevar a cabo una trazabilidad a estándares internacionales.

Quedan trabajos a futuro como el reemplazo de los conversores ADC y DAC por otros que permitan ampliar el ancho de banda, mejorar la SNR y expandir la resolución del dispositivo. También exploraremos la utilización de un sistema heterodino de detección, permitiendo expandir el rango de frecuencias medibles y cumplir con las normativas y criterios de laboratorios internacionales.

REFERENCIAS

- [1] P. Hariharan. *Basics of interferometry*, Elsevier (Elsevier, 2007).
- [2] H. E. Albrecht, M. Borys, N. Damaschke y C. Tropea. *Laser Doppler and phase Doppler measurement techniques*, Springer (Springer, 2002).
- [3] S. Donati. *Electro-Optical instrumentation: Sensing and measuring with lasers*, Bernard Goodwin (Bernard Goodwin, 2004).
- [4] J. Keller, S. Ignatovich, S. Webster y T. Mehlstäubler. Simple vibration-insensitive cavity for laser stabilization at the 10^{16} level. *Appl. Phys. B* **116**, 203-210 (2014).
- [5] S. Donati. Developing self-mixing interferometry for instrumentation and measurements. *Laser Photonics Rev.* **6**, 393-417 (2012).
- [6] G. Giuliani, S. Bozzi-Pietra y S. Donati. Self-mixing laser diode vibrometer. *Meas. Sci. Technol.* **14**, 24-32 (2003).
- [7] K. Petermann. *Laser Diode Modulation and Noise* (Springer Netherlands, 1988).
- [8] S. Donati, G. Giuliani y S. Merlo. Laser Diode Feedback interferometer for Measurement of Displacements without Ambiguity. *Laser Photonics Rev.* **31**, 113-119 (1995).
- [9] C. Bes, G. Plantier y T. Bosch. Displacement measurements using a self-mixing laser diode under moderate feedback. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **55**, 1101-1105 (2006).
- [10] W. Wang, K. Grattan, A. Palmer y W. Boyle. Self-Mixing interference inside a single-mode diode laser for optical sensing applications. *J. Light. Technol.* **12**, 1577-1587 (1994).
- [11] R. Kliese, T. Taimre, A. Bakar, Y. Lim, K. Bertling, M. Nikolic, J. Perchoux, T. Bosch y A. Rakic. Solving self-mixing equations for arbitrary feedback levels: a concise algorithm. *Appl. Opt.* **53**, 3723-3736 (2014).
- [12] C. Plantier, C. Bes y T. Bosch. Behavioral model of a Self-Mixing laser diode sensor. *IEEE J. Quantum Electron.* **41**, 1157-1166 (2005).
- [13] C. Chuang, Y. Liao, C. Lin, S. Chen, F. Grillot y F. Lin. Linewidth enhancement factor in semiconductor lasers subject to various external optical feedback conditions. *Opt. Express* **22**, 5651-5658 (2014).
- [14] U. Zabit. *Optimisation of a Self-mixing Laser Displacement Sensor* Tesis doct. (University of Toulouse, 2010).
- [15] L. Scalise, Y. Yu, G. Giuliani, G. Plantier y T. Bosch. Self-mixing laser diode velocimetry: application to vibration and velocity measurement. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **53**, 223-232 (2004).
- [16] J. Graeme. *Photodiode Amplifiers: op-amp solutions* (McGraw-Hill, 1996).
- [17] Burr-Brown Products from Texas Instruments. *PCMI802: SINGLE-ENDED ANALOG-INPUT 24-BIT,96-kHz STE-REO A/D CONVERTER (SLES023C)* (2005).
- [18] O. Bernal, H. Seat, U. Zabit, F. Surre y T. Bosch. Robust Detection of Non-Regular Interferometric Fringes From a Self-Mixing Displacement Sensor Using Bi-Wavelet Transform. *IEEE Sens. J.* **16**, 7903-7910 (2016).
- [19] B. Besson, C. Madshus, H. Froystein y H. Kolbjornsen. Vibration Criteria for metrology laboratories. *Meas. Sci. Technol.* **1**, 1009-1014 (1999).
- [20] A. Lukashkin, M. Bashtanov e I. Russell. A self-mixing laser-diode interferometer for measuring basilar membrane vibrations without opening the cochlea. *J. Neurosci. Methods* **148**, 122-129 (2005).
- [21] F. J. Harris. On the use of windows for harmonic analysis with the discrete fourier transform. *IEEE Proceedings* **66**, 51-83 (1978).
- [22] M. A. Stephens. Use of Kolmogorov-Smirnov, Cramer-Von Mises and related statistics without extensive tables. *J. R. Stat. Soc. Series B (Methodological)* **32**, 115-122 (1970).
- [23] Organismo Argentino de Acreditación. *GUI-LE-01: Expresión de la Incertidumbre de Medida en las Calibraciones / Ensayos* (2013).