

# CALIBRACIÓN ABSOLUTA DE UN INTERFERÓMETRO FIZEAU MEDIANTE UN PLANO LÍQUIDO

Adrián Gamboa Moreno, Gerardo Ruiz Botello, Rigoberto Nava Sandoval y Benjamín Valera Orozco  
Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, UNAM  
Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria, Coyoacán  
5622-8602 ext. 1147, [agamboa@weg.com.mx](mailto:agamboa@weg.com.mx) y [ruizg@aleph.cinstrum.unam.mx](mailto:ruizg@aleph.cinstrum.unam.mx)

**Resumen:** El presente trabajo propone una primera aproximación del uso de la superficie libre de un líquido (*PL*) como patrón para realizar la calibración absoluta de planitud a un interferómetro tipo Fizeau. en un laboratorio secundario acreditado. El desarrollo del Sistema Espejo Líquido (*SEL*) propuesto, tiene como base fundamental el análisis de las propiedades del líquido utilizado como patrón de planitud (*PL*), ya que debido a las vibraciones provenientes de la fuerza de gravedad y la facilidad con que se puede perturbar el *PL* ante la presencia de excitaciones externas, es necesario proveerlo de amortiguamiento para evitar que dichas perturbaciones impidan su estabilización. El recipiente que contiene al *PL* es flotado dentro de otro recipiente que contiene un líquido diferente que lo aísla de vibraciones externas, llamado Líquido Amortiguador (*LA*). Las propiedades del *LA* dependen de las propiedades y condiciones de trabajo del *PL*. Este dispositivo permite obtener interferogramas de buena calidad, que después son procesados digitalmente mejorando su definición de bordes, para que de esta manera se puedan realizar mediciones con una incertidumbre asociada en ciertas condiciones, de alrededor de 14 nm.

## 1. INTRODUCCIÓN

La utilización de un plano líquido como patrón de planitud, propuesta por Lord Rayleigh en la revista Nature en 1893, es desde hace buen número de años una práctica común en algunos laboratorios metrológicos nacionales en diversos países [1]. No obstante, su utilización en laboratorios secundarios es mucho menos frecuente y escasea en la literatura.

Los requisitos de trazabilidad impuestos por la normatividad vigente para laboratorios secundarios acreditados [2], hacen necesario contar con un patrón de planitud y un método de medición absoluto, que permitan idealmente evitar la dependencia hacia otros patrones de referencia, principalmente cuando no se cuenta con ellos en el País. Así pues, para obtener en forma absoluta la planitud de una superficie, se propone utilizar la superficie libre de un líquido [3], ya que éste al ser depositado en un recipiente, tiene la propiedad de esparcirse hasta que su superficie alcanza la curvatura de la tierra; es decir, que todos los puntos que componen su superficie se encuentran prácticamente en un mismo plano y físicamente poseen una misma energía potencial, o un mismo potencial gravitacional.

En este trabajo se utiliza un plano líquido como patrón para realizar la calibración del Interferómetro

Fizeau Davidson Optronics D305 del Laboratorio de Metrología del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) de la UNAM, con los recursos a su alcance.

## 2. DESARROLLO

Al utilizar un plano líquido para realizar la calibración del interferómetro Fizeau, es necesario considerar algunos factores que pueden afectar el funcionamiento del sistema diseñado para esta aplicación. A continuación se mencionan los más importantes:

- Un plano líquido se perturba fácilmente ante la presencia de fuerzas y vibraciones externas que actúan sobre él, por lo que hay que proveerlo de un sistema especial de amortiguamiento para reducirlas al máximo.
- La superficie libre de un líquido está sujeta a perturbaciones debidas a la fuerza de gravedad. Hay que dotar al sistema de aislamiento de vibraciones con base en su frecuencia natural de oscilación.
- Al aplicarle esfuerzos cortantes (por pequeños que sean), el plano líquido se perturba fácilmente provocando que la superficie oscile. Esto hace necesario protegerlo para evitar que las corrientes de aire perturben la superficie

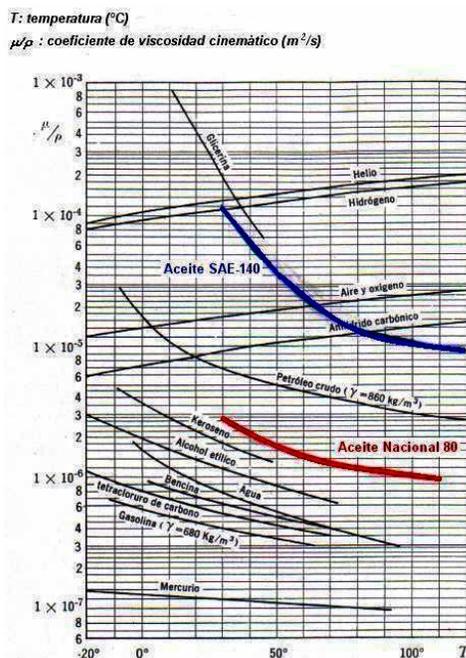
libre del líquido y provoque ondas en ella. Además, debe ser protegido contra partículas de polvo o de cualquier otra índole que puedan distorsionar el patrón de interferencia que se genere.

- El líquido utilizado como plano líquido, debe tener la propiedad de retornar a su estado de reposo lo más rápidamente posible después de sufrir perturbaciones externas. Además, el espejo formado por la superficie debe tener una buena reflexión de los rayos de la fuente de luz utilizada, en este caso, un láser He-Ne. Por otro lado, el líquido amortiguador debe ser capaz de aislar de vibraciones al plano líquido. Para ello, se eligieron dos aceites que poseen las mismas propiedades que los utilizados en [4].

- Funda protectora:** funda de plástico que protege al *PL* de corrientes de aire y partículas de polvo.



**Fig.2.** Disposición del interferómetro y el Sistema Espejo Líquido (SEL).



**Fig.1.** Propiedades de los aceites utilizados en el SEL.

Así pues, el SEL debe cumplir con los factores ya mencionados, y se compone de lo siguiente:

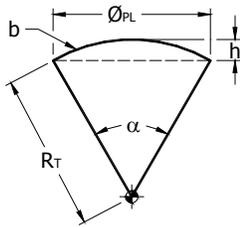
- PL:** Superficie libre del líquido. En este caso, un aceite con propiedades adecuadas es el Mexlub 0353, nacional 80.
- LA:** Aceite que provee de aislamiento de vibraciones externas al plano líquido, Mexlub 0151, SAE 140.

Existen algunas consideraciones que se deben cuidar para realizar un montaje correcto y con el mínimo de perturbaciones durante la medición; según la propia experiencia y lo recomendado por V. A. Grigor'ev [4]:

- El plano líquido se debe dejar reposar por un periodo de 24 horas, para garantizar que la superficie del plano líquido adopte la forma de un plano.
- El plano líquido debe tener un diámetro un poco mayor que el del plano óptico del interferómetro (200 mm), para abarcar completamente su superficie y eliminar los posibles efectos del menisco en las orillas.
- Evitar corrientes de aire, vibraciones y contaminación de la superficie libre del aceite.
- El rayo incidente sobre la superficie del plano líquido debe ser ligeramente oblicuo. La longitud de onda del láser utilizado es de 633nm.

**2.1 Curvatura del PL**

El recipiente que se utiliza para contener el PL (Fig. 3) es un recipiente cilíndrico con un diámetro ( $\phi_{PL}$ ) de 240mm, la distancia del centro de gravedad de la superficie del PL es el radio de la tierra ( $R_T$ ), aproximadamente 6400Km, y  $b$ , es la curvatura máxima de la superficie.



**Fig.3** Esquema de la geometría de un líquido sobre la superficie de la tierra.

La desviación de planitud resultante dada por h, es:

$$h = 2nm$$

Por lo tanto, es aceptable suponer que con un recipiente de 240mm de diámetro para el PL, la superficie libre del líquido puede considerarse un plano físico ideal para nuestros propósitos. Esta desviación se tomará en cuenta más adelante en el balance de incertidumbre.

**2.2 Efectos por menisco**

Cuando un fluido moja las paredes de su contenedor, se produce un menisco que posee cierta curvatura. El líquido que se utiliza como PL es un aceite y el recipiente es de aluminio, por lo que el aceite moja la pared del recipiente.

La altura del menisco, considerando efectos de capilaridad y de tensión superficial pueden considerarse despreciables [5].

**2.3 Frecuencia natural de oscilación**

Como se vio anteriormente, el PL puede considerarse como un plano físico ideal; pero la demostración anterior responde al caso en el que su superficie libre no tiene movimiento alguno. Esto es falso, ya que un líquido, cualquiera que éste fuera, sobre la superficie de la Tierra, tiene asociado un sistema coordinado no inercial, debido al movimiento de rotación de la Tierra, que se representa mediante la aceleración de Coriolís. Así, a mayor profundidad de líquido contenido, se generan ondas de mayor amplitud; por ende, en una altura menor de líquido, la amplitud de las ondas es más pequeña.

Esta perturbación inherente del PL, se tiene que cuantificar en términos de la frecuencia natural de vibración, en la dirección horizontal del líquido contenido. Está valoración se hace con la ayuda de

la dinámica de fluidos, para determinar la frecuencia de resonancia del PL y mediante este valor poder determinar que cantidad de LA se requiere para poder aislar el PL de las frecuencias que provoquen una perturbación de magnitud mayor que las producidas por su frecuencia natural,  $f_{ij}$  [6], dada por:

$$f_{ij} = \frac{\lambda_{ij}}{2\pi R} (gh)^{\frac{1}{2}} \text{ [Hz]} \tag{1}$$

donde h: altura del líquido, R: radio del recipiente, g: gravedad,  $\lambda_{ij}$ : modo principal de vibración. Esta ecuación proviene de una expresión para una función de potencial que describe el movimiento de un líquido contenido en un recipiente de pared rígida, en este caso, de geometría circular. Los subíndices i y j, representan el número de diámetros y círculos nodales, respectivamente

El cambio en las propiedades de los aceites utilizados respecto de la temperatura no es significativo en este caso, ya que los aceites se utilizan en un ambiente controlado, donde la variación de temperatura no excede a  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ . Para estos cambios de temperatura los aceites utilizados conservan las propiedades requeridas para su aplicación. (Fig. 1)

**2.4 Líquido Amortiguador (LA)**

Con la finalidad de proveer al SEL de una mayor estabilidad y aislamiento contra perturbaciones por contacto; se utiliza el aceite de transmisión SAE-140 ya mencionado.

Al estar depositado el PL en el seno del LA, la cantidad de LA necesaria depende del peso del PL y su recipiente, tomando en cuenta además que la frecuencia del LA en su recipiente sea 3/4 la del PL (por limitaciones de diseño) para evitar que éste alcance su frecuencia natural y tarde más tiempo en estabilizarse.

La frecuencia natural de oscilación que se muestra en la ecuación (1), se utiliza como frecuencia de excitación en el principio de flotación, para determinar la cantidad necesaria de LA y satisfacer la condición mencionada:

$$f_{LA} = \frac{3}{4} f_{PL} \tag{2}$$

donde  $f_{LA}$ : frecuencia natural de oscilación del LA,  
 $f_{PL}$ : frecuencia natural de oscilación del PL.

Los parámetros necesarios para la construcción del SEL son entonces:

- Frecuencia natural de oscilación del PL ( $f_{PL}$ ).
- Cantidad de LA para su flotación ( $h_{LA}$ ).
- Frecuencia natural de oscilación del LA ( $f_{LA}$ ), a partir de la  $h_{LA}$  obtenida.
- El diámetro requerido para el recipiente del LA ( $\phi_{LA}$ ).
- La altura del LA ( $h_{LA}$ ) y el diámetro del recipiente del LA ( $\phi_{LA}$ ), deben respetar la condición de la ecuación (2).

El último punto es de importancia porque al respetar dicha condición, se consigue disponer de

recipientes del LA de tamaño adecuado, de tal forma que los recipientes quedan coaxiales al plano óptico del interferómetro Fizeau, así como el contacto de las paredes del contenedor de LA con el interferómetro y la funda de plástico. En lo que se refiere a la  $h_{LA}$ , se obtienen alturas manejables y se asegura que exista una separación entre fondos de recipientes, para evitar transmisión directa de perturbaciones externas al contenedor del PL.

Tomando en cuenta estas consideraciones, a continuación se muestra una gráfica para la selección del SEL: En particular, se trabajó con los siguientes valores:

PL	LA
f=0,4 [Hz]	f=0,3 [Hz]
h=3 [mm]	h=3,03 [mm]
$\phi$ =240 [mm]	$\phi$ =330 [mm]

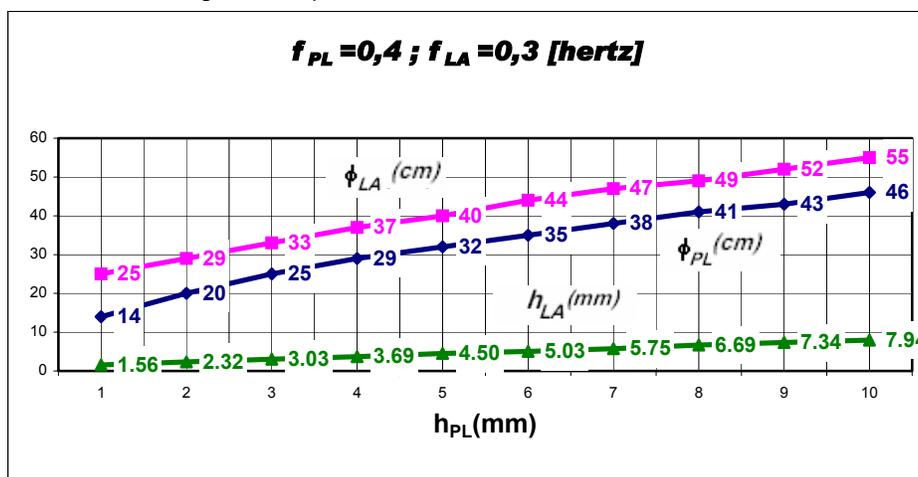


Fig.4 Gráfica de Selección del SEL

### 2.5 SEL

Para poder realizar la calibración absoluta del interferómetro Fizeau mediante un plano líquido, se tomaron en cuenta las consideraciones siguientes:

- El interferómetro Fizeau se colocó sobre una placa con tornillos niveladores, la cual estaba previamente acomodada sobre la mesa de granito soportada en colchones de aire de una máquina de medir por tres coordenadas, toda ella soportada a su vez por una cimentación aislada del resto del edificio.

- Se vertieron las cantidades necesarias de aceite para el PL y LA, en los recipientes de diámetro y a la altura especificados.
- Para lograr estabilidad del PL, el SEL se colocó con un día de anticipación a su utilización sobre la mesa de trabajo del interferómetro Fizeau.
- Se fijó la funda de plástico para proteger al PL de corrientes de aire y de partículas de polvo.
- Se seleccionó el mejor patrón de interferencia, con la mayor separación posible entre franjas.

- Se grabó por un minuto el patrón de interferencia con una cámara de video normal, evitando todo contacto con el arreglo experimental.

El video obtenido se descargó en una PC para después seleccionar cada 6 segundos (mediante la reproducción cuadro por cuadro), las once imágenes que presentaran la mayor desviación visual entre franjas.



**Fig.5** Interferograma.

La imagen anterior fue procesada digitalmente con ayuda de la teoría conocida como morfología matemática [7], para definir bordes y contar con imágenes útiles para realizar mediciones. Las etapas que se llevaron a cabo, desarrolladas en *MatLab*, fueron:

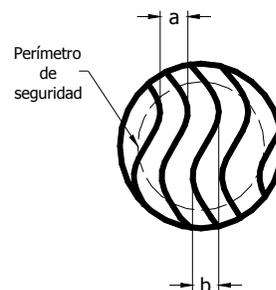
- Digitalización: la intensidad o nivel de color de la imagen se asocia a una función de dos variables independientes discretas,
- Conversión a niveles de gris: comúnmente, el procesamiento es aplicado a imágenes en escala de gris,
- Erosión: se aplica a la imagen en escala de gris este operador morfológico para disminuir la brillantez en los detalles oscuros,
- Dilatación de la erosión: con este operador aplicado a la imagen erosionada se eliminan los detalles claros y oscuros menos relevantes,
- Resta del fondo: el fondo de la imagen anterior, es restado de la imagen original, aislando las franjas de interferencia,
- Umbralización: transforma la imagen en niveles de gris a dos colores, blanco y negro, mediante la comparación del nivel de intensidad en la imagen contra un valor preestablecido de umbral,
- Apertura cierre: con este operador se suavizan los contornos de la imagen umbralizada, aislando las franjas de interferencia, como se ve en la *Fig. 6*.



**Fig.6** Imagen procesada del interferograma

Sobre las imágenes procesadas seleccionadas se realizaron las mediciones, para obtener los valores necesarios para determinar la desviación de planitud [5].

De acuerdo a la norma de referencia utilizada [8], la planitud debe medirse a partir de un interferograma producido mediante el uso de un plano de referencia, que en este caso es la superficie del *PL*, y la ec. (3). Se tiene entonces:



**Fig.7** Medición de planitud a partir del interferograma

$$F = \frac{\lambda b}{2 a} \tag{3}$$

donde:

- F*: desviación de planitud,
- $\lambda$ : longitud de onda utilizada,
- a*: magnitud de una franja de interferencia,
- b*: fracción de franja correspondiente a la desviación de planitud

Estas cantidades pueden estar expresadas en  $\mu\text{m}$ ,  $\text{nm}$  o fracciones de  $\lambda$ .

En la etapa del estudio que se presenta, las mediciones se realizaron sobre imágenes obtenidas con ayuda de una cámara de video de tipo comercial con una resolución espacial de 640X480 píxeles y del programa *Paint* de *Microsoft Windows*.

Dado que el sistema de captura y procesamiento de imágenes forma parte de la cadena de medición, es necesario calibrarlo. Según la calibración de la cámara llevada a cabo de acuerdo a [9], se observa que la distorsión radial máxima producida en la imagen por el arreglo óptico resulta de 2 píxeles en la periferia de la imagen. En [10] se describe también un método de calibración de cámaras que puede resultar útil. En una etapa posterior de este estudio, la incertidumbre asociada podría reducirse si se incrementa la resolución de la cámara empleada.

**3.RESULTADOS**

La obtención de la desviación de planitud sobre toda la extensión de la superficie del PL, se llevó a cabo mediante el análisis estadístico de los resultados provenientes de los 11 interferogramas procesados y medidos como se explicó en el punto 2.5 anterior y de acuerdo con la ec. (3).

La media y la desviación estándar de estas mediciones fueron:

$$\bar{F} = 57nm = \frac{1}{11} \lambda; S_F = 10nm = \frac{1}{63} \lambda$$

De acuerdo con la GUM [11], el proceso de medición puede ser descrito matemáticamente como

$$F_{INT} = F_{EST} + F_{PL} + F_{\lambda} + F_{CA} \quad (4)$$

donde:

$F_{INT}$ : resultado de la mejor estimación del valor de la medición de planitud en el interferómetro con una incertidumbre asociada,

$F_{EST}$ : variable aleatoria asociada a la repetibilidad en la medición, con el valor medio y la desviación estándar mencionados antes,

$F_{PL}$ : variable aleatoria asociada a la planitud del plano líquido,

$F_{\lambda}$ : variable aleatoria asociada a la estabilidad de la longitud de onda promedio de la fuente láser,

$F_{CA}$ : variable aleatoria asociada a la distorsión producida por la cámara.

Estas variables pueden tener una distribución de

probabilidad conocida, o bien, asignárseles una.

La siguiente tabla muestra el presupuesto de incertidumbres:

Fuente de incertidumbre	Distribución de probabilidad	Incertidumbre Estándar $u_i$ (nm)	Grados de libertad	Coef. De Sensibilidad $c_i$	$U_i = u_i \cdot c_i$
$F_{EST}$	Normal	3	10	1	3
$F_{PL}$	Rectang.	1,3	Infinito	1	1,3
$F_{\lambda}$	Rectang.	0	Infinito	1	0
$F_{CA}$	Normal	6	92	1	6

La incertidumbre combinada es:

$$U_{F_{INT}} = \sqrt{U_{F_{EST}}^2 + U_{F_{PL}}^2 + U_{F_{\lambda}}^2 + U_{F_{CA}}^2}$$

$$U_{COMB}(F_{INT}) = 7nm = \frac{\lambda}{90}$$

La incertidumbre expandida resulta, con un factor de cobertura  $k=2$ , igual a:

$$U = 14nm = \frac{\lambda}{45}$$

El resultado de la calibración del interferómetro Fizeau se puede expresar como:

$$F_{INT} = 57 \pm 14nm$$

o bien,

$$F_{INT} = \frac{\lambda}{11} \pm \frac{\lambda}{45}$$

**4.CONCLUSIONES**

Utilizar un plano líquido como patrón para calibrar en forma absoluta un interferómetro Fizeau permite a un laboratorio secundario con sus propios recursos, cuando no se cuenta con patrones nacionales de planitud, satisfacer el requisito de trazabilidad. El sistema propuesto permite además obtener interferogramas de buena calidad, que al ser procesados y medidos arrojan valores de desviación de planitud con dispersión muy pequeña y un excelente grado de repetibilidad, lo cual permite obtener cualquier número de repeticiones

del proceso de calibración en forma confiable y exacta, haciéndolo fácil de usar para quienes tienen experiencia previa en el manejo del Interferómetro.

Mediante el control de las perturbaciones del sistema y dotar al *SEL* de un procedimiento para su aplicación, se obtiene en una primera aproximación un muy buen resultado de incertidumbre asociado al sistema, que se podría revisar más detalladamente en el futuro.

Por otro lado, también como trabajo a futuro, la exactitud del resultado de la medición podría mejorarse si se aumenta la resolución espacial de las imágenes y si se ajustan curvas paramétricas al perfil de los contornos de las franjas del interferograma para suavizarlos, disminuyendo la frecuencia de oscilación del *PL* mediante un montaje mecánico antivibratorio más efectivo, controlando las dimensiones del *SEL* y la cantidad de líquidos más estrechamente, así como utilizando un aceite con propiedades físicas superiores para producir el *PL*.

Por tratarse de un método de calibración absoluto, su validación puede llevarse a cabo contrastando los resultados obtenidos con aquellos provenientes del certificado de calibración del plano óptico patrón del interferómetro, siempre y cuando se tuviera a la mano. Éste es el caso, teniéndose una planitud rms de  $0,013 \lambda$  y una desviación pico-valle máxima de  $0,08 \lambda$  para toda la superficie del plano óptico. Este último valor, equivalente a  $50 \text{ nm}$ , es consistente con el de  $57 \text{ nm}$  del resultado final de más arriba, lo cual es alentador para seguir adelante con este trabajo.

## 5.REFERENCIAS

- [1] Bunnagel, R., et al., "Fizeau interferometer for measuring the flatness of optical surface", en Applied Optics, USA, No. 2, febrero 1968.
- [2] ISO Std. 17025:1999. "General requirements for the competence of testing and calibration laboratories". Geneva, Switzerland.
- [3] Schulz, G. y Schwider, J.; "Precise measurement of planeness", en: Applied Optics, USA, No. 6, enero- junio, 1967.
- [4] Grigor'ev, V. A.; Zaborov, Ya.O.; et.al.; "Use of a liquid mirror for the calibration of an interferometer having a plane comparison wave front", en: Soviet Journal Optic Technology, USA, Vol.53, No.10, October, 1986.
- [5] Gamboa Moreno, Adrián,; TESIS: "Calibración absoluta de un Interferómetro Fizeau mediante un plano líquido", Facultad de Ingeniería, UNAM, mayo, 2004.
- [6] Blevins, Robert D.; "Formulas for natural frequency and mode shape", Van Nostrand Reinhold Co., USA, 1979.
- [7] Serra, J. "Image analysis and mathematical morphology". Vol. I. Ac. Press, London, 1982.
- [8] Japanese Industrial Std. JIS B7430-1977. "Optical Flats".
- [9] Valera, B.; et al.; "Graduated scale inspection using computer vision"; 8<sup>th</sup> Iberoamerican Congress on Pattern Recognition, CIARP 2003, Havana, Cuba Nov. 2003. Proceedings. pp 29-37.
- [10].- Zhang, Z., New Flexible Technique for Camera Calibration, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22(11), 1330-1334, 2000.
- [11] ISO "Guide to the expression of uncertainty in measurement. 1995. Geneva, Switzerland.