

Calibración de un interferómetro fizeau: cálculo de incertidumbres

J. García-Márquez, N. Alcalá, M. Montoya, C. Pérez, M. Gutiérrez y J. Moya
Centro de Investigaciones en Óptica A.C.
Loma del Bosque 115, Col. Lomas del Campestre, C. P. 37150, León, Gto. México

Recibido el 11 de junio de 2004; aceptado el 28 de septiembre de 2004

Se presenta un estudio relativo a la calibración de un interferómetro tipo Fizeau para obtener su acreditación como instrumento de medición de planicidad. El interferómetro será utilizado para la medición y calibración de planos ópticos de hasta 15 cm de diámetro. Se muestra que la contribución a la incertidumbre, tanto del interferómetro como del método de medición, es pequeña comparada a la contribución debida a los planos utilizados en la calibración.

Descriptores: Interferometría; medición de planicidad; cálculo de incertidumbres.

A study on the calibration of Fizeau interferometer in order to obtain its accreditation as a flatness measuring instrument is presented. The interferometer will be used for measuring and calibrating optical flats with a maximum aperture diameter of 15 cm. It is shown here that the uncertainty contribution due to both, the interferometer and the measuring method employed is small as compared to the optical flats used in the calibration procedure.

Keywords: Interferometry; flatness determination; uncertainty calculation.

PACS: 06.30Bp; 06.60.Mr; 06.20.Fn; 07.60.Ly; 42.87.Bg

1. Introducción

La medición de la forma en componentes de altas especificaciones es una parte esencial en la ingeniería de control de calidad. Existen en la actualidad varios métodos para efectuar tales mediciones, entre los cuales está la interferometría. Ésta requiere de una superficie de referencia contra la cual será comparada la pieza que ha de ser medida. La superficie de referencia debe haber sido previamente calibrada con una técnica que incluya la incertidumbre asociada a su medición.

Existen básicamente dos técnicas para lograr una calibración absoluta de planos. Por un lado la intercomparación a partir de tres planos nominalmente idénticos y un interferómetro Fizeau [1-9]. El otro método consiste en utilizar la superficie de un líquido como referencia y nuevamente un interferómetro [10]. Hemos de mencionar que otra forma para evaluar planos es por medio del interferómetro de Newton; técnica descrita en ciertas normas [11, 12], aunque por las características mismas del método la incertidumbre de la medición puede ser evaluada sólo con poca exactitud. Cada uno de los métodos tiene sus ventajas y desventajas. Sus características no serán descritas aquí para no desviarnos de los objetivos relacionados con la calibración del interferómetro tipo Fizeau que nos ocupa.

1.1. Descripción del Interferómetro (Fizeau)

El proceso de medición de una superficie plana consiste en una comparación entre una superficie idealmente plana y la de prueba que es aparentemente plana [13, 22]. El primer paso es la recolección de la información proveniente de la comparación de las superficies ópticas por medio de una cámara CCD (*Coupled Charge Device*); información en intensidad que llegará a dicho dispositivo proveniente de un frente de onda. Si tanto la placa de referencia como la que está sujeta a

prueba son iluminadas con una fuente de luz estabilizada en frecuencia y coherente tanto espacial como temporalmente (v.g. un láser estabilizado en frecuencia), entonces la información proveniente de la comparación entre ambos planos será registrada en la cámara CCD (256×256 *pixeles*) en forma de intensidad luminosa. A esto se le conoce como patrón de interferencia y al registro de la interferencia como un interferograma. Cada *pixel* de la CCD registra una pequeña unidad de área debida a la comparación entre los planos y esa intensidad es función de la diferencia de caminos ópticos entre una placa y la otra. Se asume que la placa de referencia es el patrón de medición. Entonces las diferencias de camino óptico (DCO), es decir, la diferencia del trayecto que debería aparecer constante entre ambas superficies en cada diferencial de área, tendría que ser nula y una superficie embonaría perfectamente en la otra. En la práctica ese no es el caso y se observan dichas diferencias de camino óptico. Las diferencias llevan implícitas un retraso en la fase, luego la intensidad es función de la fase. La forma de la superficie, objeto de la medición, así como la forma de cualquier superficie, es obtenida en forma de un mapa de fase. Este mapa deberá ser numéricamente procesado a fin de que su fase, o forma superficial, sea desplegada como mapa topográfico. Debido a que la función de intensidad es dependiente del tipo de longitud de onda de iluminación, el resultado de la medición es generalmente expresado en la unidad de longitud del sistema internacional, el metro (o fracciones de él). La fuente de luz utilizada tiene una longitud de onda (λ) de 632.79×10^{-9} m [16].

En el interferómetro Fizeau (Fig. 1), la luz del láser emerge de un diafragma de aguja (*pinhole*) o fuente puntual, para ser enseguida colimado por medio de un sistema óptico. El haz de luz resultante tiene un frente de onda plano y de esa forma llega al plano óptico de referencia. El plano es a su vez ajustado por medio de tornillos de paso fino, de manera que

la imagen del diafragma de aguja reflejado por su superficie de referencia regrese nuevamente al diafragma de aguja mismo. La reflexión debida a la superficie posterior del plano de referencia es aislada, ya sea por medio de una capa o película antirrefletores o por una ligera cuña en el plano óptico de referencia. Para efectos de observación de las franjas se incluye un divisor de haz cercano al diafragma de aguja. Cuando el espacio libre (aire) entre el plano de referencia y el sujeto a prueba es grande se observan dos imágenes distintas del diafragma de aguja en el plano de la cámara CCD. Nuevamente mediante los dos tornillos micrométricos (situados en la montura del segundo plano) se ajusta la inclinación del segundo plano. Se busca que las dos imágenes del diafragma coincidan con la de la superficie de referencia ajustada previamente y en consecuencia que las franjas puedan ser observadas. Es de capital importancia lograr una perfecta colimación en el haz que tomará el camino de las superficies planas, ya que de ser mala se introduciría una fuente de error sistemático. Una vez que el haz ha sido colimado, se puede (es opcional) introducir una inclinación que permita observar franjas de interferencia. Se escoge un número de franjas de interferencia en función de varios parámetros considerados en el método de medición y/o el algoritmo de recuperación de la fase que ha de ser utilizado [7].

Para obtener la función de intensidad en el plano de la cámara CCD se parte del hecho de que una superficie con

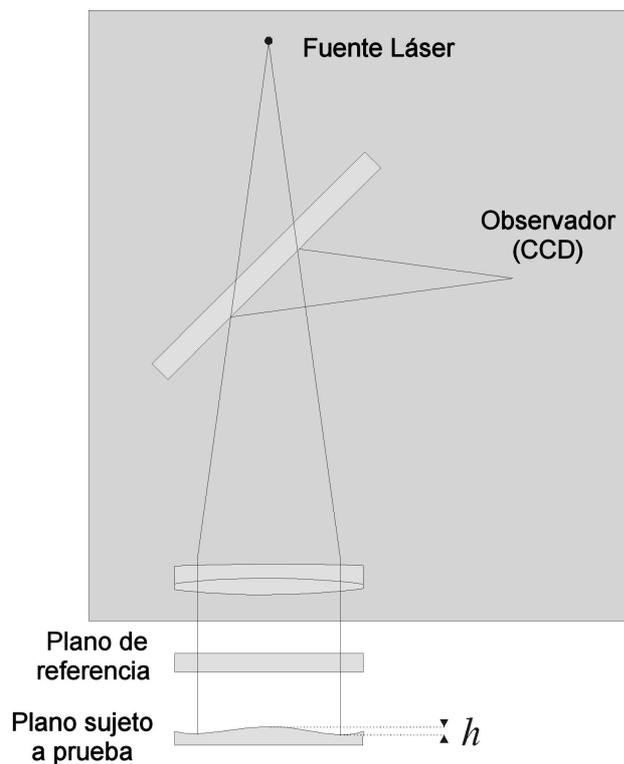


FIGURA 1. En un interferómetro Fizeau el primer plano funge como la referencia respecto a la cual es comparado el segundo. Las diferencias de altura h respecto al plano ideal son mostradas en el segundo plano.

irregularidades en su altura $h(x,y) = DCO$ respecto a una forma plana, probada por reflexión, tiene una fase en el frente de onda $\phi(x, y)$:

$$\phi(x, y) = 4\pi h(x, y)/\lambda, \tag{1}$$

donde x y y son las coordenadas espaciales y λ es la longitud de onda de la fuente de iluminación utilizada. La expresión es válida para incidencia aproximadamente normal. En óptica se acostumbra denominar a las aberraciones del frente de onda como $W(x, y)$ para indicar que éste depende de una posición determinada del plano (o cualquier otra superficie óptica) Este frente aberrado contiene la información de las deformaciones del frente de onda. En forma general, para los frentes de onda de referencia y de prueba en el interferómetro se escribe respectivamente,

$$W_r(x, y, t) = a_r(x, y) \exp[i(\phi_r(x, y) - \delta(t))] \tag{2}$$

y

$$W_p(x, y, t) = a_p(x, y) \exp[i\phi_p(x, y)],$$

donde $a_r(x, y)$ y $a_p(x, y)$ son las amplitudes del frente de onda, $\phi_r(x, y)$ y $\phi_p(x, y)$ son las fases del frente de onda y $\delta(t)$ es un desplazamiento en la fase variante en el tiempo introducido en el haz de referencia. Este desplazamiento $\delta(t)$ es en realidad el desplazamiento de fase relativo entre los dos haces y puede ser el resultado de los cambios en cualquiera de los dos haces, ya sea el de referencia o el de prueba. El patrón resultante de intensidad es

$$I(x, y, t) = |W_r(x, y, t) + W_p(x, y, t)|^2$$

o bien

$$I(x, y, t) = I^a(x, y) + I^b(x, y) \times \cos[\phi_p(x, y) - \phi_r(x, y) + \delta(t)]. \tag{3}$$

donde $I^a(x, y) = a_r^2(x, y) + a_p^2(x, y)$ es la intensidad promedio e $I^b(x, y) = 2a_r(x, y)a_p(x, y)$ es amplitud de la modulación de intensidad.

Si se define $\Delta\phi(x, y) = \phi_p(x, y) - \phi_r(x, y)$ como la diferencia de fase del frente de onda, la Ec. (3) se puede escribir como:

$$I(x, y, t) = I^a(x, y) + I^b(x, y) \cos[\Delta\phi(x, y) + \delta(t)], \tag{4}$$

ecuación fundamental para los métodos de análisis conocidos como interferometría de desplazamiento de fase y utilizados por nuestro sistema interferométrico. La intensidad en cada punto varía como una función senoidal del desplazamiento de fase introducido $\delta(t)$ con un DC (*bias*) temporal dado por la fase del frente de onda desconocido. Son necesarios un mínimo de tres desplazamientos de fase para resolver el número de variables que contiene la Ec. (4).

Los métodos para la recuperación de la fase a partir del análisis de interferogramas se pueden encontrar en textos de investigación centrados en el análisis de interferogramas [14,15]. Queda aún por mencionar que la diferencia de

fase es expresada en radianes y de ahí ser interpretada como longitud de onda o fracciones de ella. El interferómetro tipo Fizeau utilizado por nosotros (Wyko 6000 PC) tiene un láser cuya longitud de onda λ nominal del láser igual a 632.79 nm, misma que actúa como regla de medición y ha sido medida obtenida y verificada con un lambdametro [17]. La unidad primaria de longitud (m) obtenida en forma de longitud de onda es el mensurando, en este caso es la superficie óptica. Aunque el resultado de medición (del mensurando) se puede expresar ya sea en pico a valle (P-V) o como la raíz media cuadrática (P-V).

1.2. Procedimiento Experimental

Hemos seguido el siguiente procedimiento [7]:

- a) Establecimiento de las condiciones de operación.

El interferómetro ha sido colocado sobre una mesa anti-vibratoria. Un láser estabilizado, tanto en frecuencia como en intensidad con una aportación al balance de incertidumbres despreciable, actúa como la unidad de medición, un dispositivo de fuelle aísla el espacio entre los dos planos del interferómetro de las turbulencias de aire. La temperatura en la sala se mantiene dentro de un pequeño intervalo de variación ($\pm 1^\circ$ Celsius).

- b) Identificación al mensurando.

La superficie óptica

- c) Identificación de las variables que pueden influenciar los resultados de los mensurando.

(Ver la Sec. 2.2)

- d) Realización de las mediciones e interpretación de los resultados.

(Secs. 2.2 a 2.4)

Se han identificado las posibles variables de influencia [18,19] y –a partir de los resultados obtenidos por repetidas mediciones– se ha observado una contribución prácticamente nula de esas variables al balance de incertidumbres. Se ha obtenido la media de los valores pico a valle (P-V) para las desviaciones de la superficie, considerando cada una de las variables de influencia en forma independiente –con el resto de las variables de influencia mantenidas constantes–, sin embargo no hemos podido apreciar ningún cambio determinante respecto a las mediciones en repetibilidad o reproducibilidad. Esto nos ha llevado a suponer que estamos en el límite de resolución del instrumento.

Por otro lado, se sabe de acuerdo con el principio de ergodicidad [20] que el comportamiento estadístico del ruido en un *pixel* calculado mediante numerosas mediciones es igual al comportamiento estadístico del ruido en todos los *pixels* en una medición dada. De la misma manera, el comportamiento estadístico de las diferencias de fase en un *pixel*, medidas en múltiples ocasiones, es igual al comportamiento estadístico de las diferencias de fase calculadas en todos

los puntos de dos mediciones sucesivas. El resultado expresado en términos de desviación estándar puede ser calculado mediante la raíz media cuadrada y es independiente de las variaciones espaciales fijas del patrón. En otras palabras, según el principio de ergodicidad, cuando se calcula la fase basta tener acotadas todas las posibles variables de influencia para que una sola medición de planicidad nos permita su determinación.

Por el principio de ergodicidad podemos estar suficientemente seguros que la fase del interferograma es calculada en forma confiable, sin embargo resta aún por hacer un número N de mediciones (digamos 100) para calcular estadísticamente tanto la reproducibilidad como la repetibilidad del método de medición del instrumento.

De acuerdo con la Ref. 9 y a fin de incrementar la calidad de las mediciones, es necesario cuantificar y remover las contribuciones del interferómetro al frente de onda así como cuantificar y remover cualquier medición de errores sistemáticos como contribuciones del interferómetro o dispositivo experimental. De esta forma, la medición total del frente de onda se puede expresar como

$$W(x, y)_t = W(x, y)_r + W(x, y)_p, \quad (5)$$

con $W(x, y)_t$ como el frente de onda resultante, $W(x, y)_r$ el frente de onda de referencia calibrado y trazado y $W(x, y)_p$ el frente de onda de prueba calibrado y trazado.

Esto significa que el instrumento será calibrado como una caja negra a partir de dos superficies calibradas y trazadas. Cuando el interferómetro funja como un instrumento de calibración, la superficie con frente de onda $W(x, y)_p$ calibrada y trazada será sustituida por una superficie con frente de onda desconocido.

Supongamos entonces que dos planos ópticos con una planicidad P-V de $\lambda/20$ son utilizados para la calibración del interferómetro, entonces $W(x, y)_t$ será la suma de los frentes de onda de esos dos planos. Pero, si se desea hacer una medición, ya no para calibrar al interferómetro sino para calibrar una superficie plana cualquiera, lo más conveniente es contar con

$$W(x, y)_p = \langle W(x, y)_t \rangle - W(x, y)_r, \quad (6)$$

donde $\langle W(x, y)_t \rangle$ es la media de n mediciones del frente de onda con el que ha sido evaluado en reproducibilidad el interferómetro (se puede usar también la notación más abreviada \bar{W}) y $W(x, y)_p$ es ahora el frente de onda de la superficie sujeta a prueba que será calibrada por el interferómetro Fizeau ya calibrado.

2. Calibración del interferómetro

2.1. Definición del mensurando Y y de la incertidumbre de medición

El mensurando será cualquier superficie plana con frente de onda [$W(x, y)$] comparada contra la superficie de referencia [$W_r(x, y)$]. La unidad de medida, el metro (aunque

comúnmente se prefiere usar una magnitud más pequeña como el nanómetro), está representado por la longitud de onda del láser He-Ne del interferómetro (632.8 nm).

El valor de un mensurando estará completo hasta que la incertidumbre de medición sea determinada. Esta incertidumbre se compone de las variables de influencia que se mencionan en la Ec. (7). Incertidumbre clasificada como de tipo **A** más la reportada en los certificados de calibración para los planos ópticos, del tipo **B**. Otras posibles variables de influencia fueron investigadas aunque con la configuración que hemos empleado experimentalmente se concluye que no contribuyen al balance de incertidumbres.

El modelo matemático que nos permite determinar la forma de la superficie es

$$W(x, y) = W_r(x, y),$$

donde $W_r(x, y)$ es la lectura del comparador óptico.

La forma de la superficie será determinada en repetibilidad y en reproducibilidad y la dispersión de los valores razonablemente atribuidos al mensurando serán también expresados por la incertidumbre.

Hemos realizado un estudio para determinar la contribución al balance de incertidumbres aportada por cada una de las siguientes variables de entrada (en pico a valle P-V). Se determina que el mensurando es una función que depende del tiempo de estabilización mecánica de la mesa de experimentación χ_1 , el acercamiento o zoom de la pieza bajo prueba χ_2 , el enfoque del patrón de franjas χ_3 , la visibilidad de las franjas χ_4 y la inclinación de las franjas χ_5 . Se consideran variaciones de temperatura $T=\chi_6$ de hasta ± 1 grado Celsius. Aunque en el lenguaje metrológico las variables x_1, x_2, x_3, \dots representan las variables de entrada, aquí x y y han sido retenidas para representar un punto en la superficie y χ_N representará la variable N de entrada.

El mensurando es el frente de onda de la superficie a ser medida y está definido por

$$W(x, y) = f(\chi_1, \chi_2, \chi_3, \chi_4, \chi_5, \chi_6) \text{ (expresado en nm.)}$$

$W(x, y)$ es el frente de onda de la superficie a ser medida y la temperatura ha sido restringida a $23^\circ\text{C} \pm 1$. Se han obtenido mediciones para cada variable de entrada que forman parte de la función $W(x, y)$, manteniendo al resto de las variables constantes. Los resultados muestran el valor medio P-V $\bar{W}(x, y)$, la desviación estándar s y la varianza s^2 del mismo orden de magnitud.

Al aplicar la ley de propagación de errores [21] se obtiene la incertidumbre combinada para las variables de entrada no correlacionadas, entonces

$$u_c^2(W) = \left[\frac{\partial f}{\partial \chi_1} \right]^2 u^2(\chi_1) + \left[\frac{\partial f}{\partial \chi_2} \right]^2 u^2(\chi_2) + \left[\frac{\partial f}{\partial \chi_3} \right]^2 u^2(\chi_3) + \left[\frac{\partial f}{\partial \chi_4} \right]^2 u^2(\chi_4) + \left[\frac{\partial f}{\partial \chi_5} \right]^2 u^2(\chi_5).$$

Cada valor de incertidumbre $u(\chi_i)$ es calculado a partir de

$$u(\chi_i) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (\chi_k - \bar{\chi})^2}{n(n-1)}} \quad (7)$$

para $n=20$ mediciones.

Los coeficientes de sensibilidad $C_i = \partial f / \partial \chi_i$ describen lo sensible que es el mensurando respecto a las variaciones de la magnitud de entrada correspondiente y son calculados a partir de los datos de las 20 mediciones de la manera siguiente. Cada medición de la superficie (es decir, de la función f) se realiza manteniendo constantes (en la medida de lo experimentalmente posible) cada una de las otras variables de influencia. Los resultados para cada medida son ordenados de menor a mayor y por regresión estadística se obtiene la pendiente m , pendiente que es igual al valor de la derivada parcial. La ecuación que mejor ajusta los datos experimentales es $y = mx + b$, m es la pendiente resultante deseada.

2.2. Cuantificación de la variabilidad de cada entrada y asociación de una distribución

Se ha realizado una serie de mediciones experimentales bajo condiciones de repetibilidad para evaluar las siguientes variables de entrada que suponemos afectan al mensurando:

1. Tiempo de estabilización mecánica de la mesa. La prueba consiste en realizar una medición después de un tiempo t de estabilización mecánica de la mesa de experimentación (sobre la cual se encuentran el interferómetro y los planos ópticos, ver Fig. 2) igual a 30 s. El resto de las variables de influencia son experimentalmente constantes. Se obtiene:

$$\bar{\chi}_1 = 0.07985, \text{ la desviación estándar } s_1 = 0.00391, \text{ y la varianza } s_1^2 = 1.53 \times 10^{-5} \text{ y la incertidumbre } u(\chi_1) = 0.0008743 \text{ y el coeficiente de sensibilidad } c_1 = 6.504 \times 10^{-4}. \text{ Todas las unidades son fracciones de longitud de onda P-V y la longitud de onda de base es } \lambda = 632.8 \text{ nm.}$$

2. Acercamiento. Suponemos que el acercamiento lo fijaremos al diámetro necesario, tal que dé cobertura del plano de referencia, tanto para la calibración del interferómetro como después lo será para planos ópticos de diferente tamaño. Esta consideración se toma porque la calibración del interferómetro (visto como caja negra) la realizamos respecto a un conjunto de planos maestros (referencias uno y dos) a fin de no calibrar una a una todas las componentes del interferómetro [9]. Luego:

$$\bar{\chi}_2 = 0.08260, \quad s_2 = 0.00545, \quad s_2^2 = 2.97 \times 10^{-5}, \\ u(\chi_2) = 0.001219, \quad c_2 = 8.857 \times 10^{-4}.$$

3. Enfoque. Manteniendo el resto de las variables de influencia constantes, realizamos mediciones de planici-

dad para algunos grados de enfoque escogidos en forma aleatoria.

$$\bar{\chi}_3 = 0.07865. \quad s_3 = 0.00415. \quad s_3^2 = 1.723 \times 10^{-5}.$$

$$u(\chi_3) = 0.000928. \quad c_3 = 6.940 \times 10^{-4}.$$

4. Visibilidad de las franjas; Es otra de las variables de influencia acotada. La medición se realiza si y solo si la visibilidad se encuentra en el intervalo de 0,7 a 0,97. Se escoge este intervalo de valores para garantizar una buena relación señal a ruido en el detector CCD.

Se ha encontrado:

$$\bar{\chi}_4 = 0.08880. \quad s_4 = 0.00581. \quad s_4^2 = 3.37 \times 10^{-5}.$$

$$u(\chi_4) = 0.001299. \quad c_4 = 9.684 \times 10^{-5}.$$

5. Número de franjas (inclinación). Se busca que el número de franjas en el campo no sea menor de 0,5 ni mayor de 2,5. Dentro de este intervalo se efectúa la medición.

$$\bar{\chi}_5 = 0.08250. \quad s_5 = 0.00501. \quad s_5^2 = 2.51 \times 10^{-3}.$$

$$u(\chi_5) = 0.00112. \quad c_5 = 8.406 \times 10^{-4}.$$

Para cada uno de los estudios se ha considerado al número de mediciones $n=20$, excepto el de reproducibilidad basado en cinco jornadas de medición repartidas en 14 días con un total de 100 muestras.

De acuerdo al histograma de cada conjunto de resultados de las variables de entrada, la distribución en todos los casos se puede considerar como normal.

Otras mediciones han sido hechas basadas en lo reportado en la Ref. 7 y a partir de ellas se ha llegado a la decisión de acotar la mayoría de las variables que consideramos como de influencia. Este estudio nos ha permitido observar que las magnitudes de entrada no están correlacionadas.

Basados en la Ref. 7, y a partir de nuestros propios experimentos, hemos decidido mantener el número de franjas

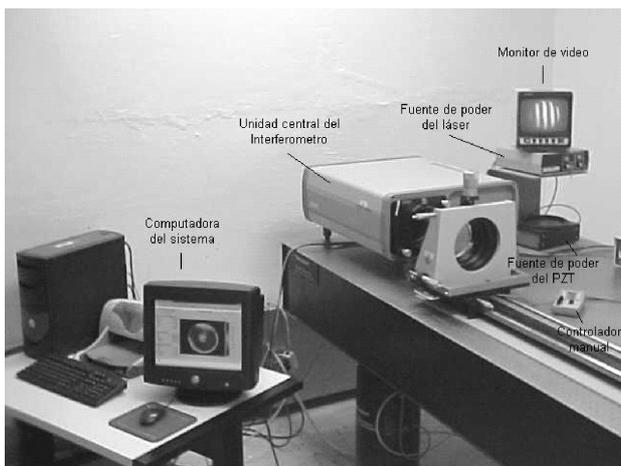


FIGURA 2. Laboratorio de medición de planicidad. Incluye láser estabilizado en frecuencia, interferómetro, monitor, planos de referencia 1 y 2 además de un ordenador para el procesamiento de los interferogramas.

entre una y dos, la temperatura en $23^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, la visibilidad (obtenida por la función intensidad del Wyko) en un valor no menor a 0,8 y menor a 0,95 en términos normalizados (más de 1 significa saturación), el espacio de aire entre los dos planos (cuña de aire) igual a $10\text{ cm} \pm 1\text{ cm}$.

La incertidumbre del **tipo A** es, en unidades métricas,

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N [c_i \cdot u(x_i)]^2} = 1.323 \times 10^{-3}\text{ nm}, \quad (8)$$

con un factor de cobertura $k=2$ y un nivel de confianza de aproximadamente el 95 %.

2.3. Incertidumbre combinada

Esta incertidumbre $u_c(y)$ se calcula por la suma geométrica de las contribuciones particulares de tipo **A** y de tipo **B** [21]. El certificado de calibración del plano patrón de referencia (por transmisión) identificado como 6TF0890-0131 [23] tiene una exactitud = 0.030 nm P-V y una incertidumbre $u_r = 20\text{ nm}$. Con un factor de cobertura $k=2$ y un nivel de confianza de aproximadamente 95 %. Mientras que el plano de prueba del plano bajo prueba (por reflexión), identificado como 6RF0590-0120 tiene una exactitud = 0.030 nm y una incertidumbre $u_r = 20\text{ nm}$ con un factor de cobertura $k=2$ y un nivel de confianza de aproximadamente 95 %. Considerando la Ec. (10) y la incertidumbre de los dos planos (referencia y prueba) se tiene que

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N [c_i \cdot u(x_i)]^2} = 28,284\text{ nm}. \quad (9)$$

Con un factor de cobertura $k=2$, para una distribución normal (nivel de confianza aproximadamente igual a 95 %).

2.4. Incertidumbre expandida

La incertidumbre expandida U considera un factor de cobertura k veces la incertidumbre combinada. En nuestro caso, los certificados de calibración consideran un factor de cobertura igual a dos por lo que

$$U = k \cdot u_c = 28,284\text{ nm P-V}. \quad (10)$$

Esto significa que el interferómetro en sí tiene contribuciones despreciables al balance de incertidumbres respecto a las contribuciones de los planos empleados para la calibración. Se trata de milésimas de nanómetro que comparado con el (los) plano(s) patrón de referencia, se concluye que todose reduce a calcular incertidumbre tipo B, es decir, las incertidumbres debidas fundamentalmente a las aportadas por los certificados de calibración de los planos ópticos [23].

2.5. Ejemplo numérico: Placa de cuarzo identificada como PL0010TO

Después de tomar 20 mediciones en pico a valle (p-v) con el interferómetro Wyko, se ha encontrado:

TABLA I. \diamond media para 20 mediciones del frente de onda (mensurando), \blacklozenge desviación estandar, \dagger Ec. (8) incertidumbre de un conjunto de N medidas, \ddagger Ec. (7) factor de sensibilidad, * Ec. (10a) Incertidumbre **tipo A**, \bullet Ec. (10b) Incertidumbre combinada $u_c(W)$. Dada para un factor de cobertura $k=2$ y un nivel de confianza de aproximadamente 95 %. Esta misma es la incertidumbre expandida: $U = u_c(W)$

N	$\langle W \rangle [\lambda] \diamond$	$s [\lambda] \blacklozenge$	$u(W) [\lambda] \dagger$	$c [\lambda] \ddagger$	$u(W) [\lambda] *$	$u_c(W) [\lambda] \bullet$
20	0.0841	2.43×10^{-3}	5.43×10^{-4}	3.955×10^{-4}	5.43×10^{-4}	—
	$\langle W \rangle [\text{nm}]$	$s [\text{nm}]$	$u(W) [\text{nm}]$	$c [\text{nm}]$	$u(W) [\text{nm}]$	$u_c(W) [\text{nm}]$
	53.22	1.54	0.34	0.25	0.34	20.00

$$\langle W \rangle = \bar{W} = 0.0841.$$

$$s = 0.002426.$$

$$s^2 = 5.88 \times 10^{-6}.$$

$$u(W) = 5.425 \times 10^{-4}.$$

$$c = 3.955 \times 10^{-4}.$$

$$cu(W) = 2.145 \times 10^{-7}.$$

Valores que deben ser multiplicados por 632.8 nm que es el valor de la longitud de onda del láser He-Ne del interferómetro para obtener los resultados en múltiplos de la unidad de longitud.

Sabemos que incertidumbre de medida del plano de referencia $u_r=20$ nm (Wyko modelo TF-060, S/N 6TF0890-0131 y cuyo certificado de calibración expedido por el National Physical Laboratory tiene como referencia: LR0101/04020^a/GEN13-131)

Luego, se tiene la Tabla I.

Finalmente se tiene al mensurando [25]

$$W = W \pm U = 53.22 \pm 20.00 \text{ nm pico a valle.}$$

3. Comentarios finales y conclusiones

La interferometría es la instrumentación adecuada para la evaluación absoluta de planos. Dos son los métodos usuales y convenientes, la calibración a partir de intercomparaciones de tres planos o aquella que utiliza una superficie líquida de referencia (con un radio de curvatura igual al de la tierra). En cualquiera de los dos casos se utiliza un interferómetro tipo Fizeau. Sin embargo el interferómetro debe ser alineado, evaluado y calibrado. Un factor que podría introducir errores sistemáticos importantes es una colimación de haces deficiente. Se debe utilizar como fuente de iluminación un láser estabilizado en frecuencia. Las vibraciones mecánicas y/o las turbulencias debidas al aire deben ser aisladas. Un ambiente adecuado en el laboratorio es aquel que mantiene un control

en la temperatura. En nuestro caso y después de varias pruebas hemos observado que la humedad no es un factor que pudiera alterar los resultados en las mediciones.

A pesar de que en un interferómetro Fizeau, en configuración para medir planos ópticos, uno de los planos funge como comparador y otro como plano bajo prueba, aquí hemos utilizado dos planos patrón para lograr establecer la calibración del interferómetro como un instrumento de medición. Uno de estos dos planos actúa como el plano de referencia, mientras que el otro plano calibrado funge como el sujeto a prueba. Mostramos que la exactitud y la incertidumbre de medida, tanto del plano patrón como del segundo plano patrón (los dos planos que se comparan en una configuración Fizeau típica), son las responsables de la exactitud del instrumento y de la incertidumbre de la medición. Es por esta razón que se recomienda tener una cadena de trazabilidad pequeña a fin de reducir la incertidumbre asociada a lo que se convertirá en el plano patrón. Esta cadena nos ha llevado a hacer calibrar nuestros planos en el NPL (Nacional Physics Laboratory), donde se trazan directamente a la curvatura de la tierra por medio de una solución de silicón en una alberca.

A pesar de que han aparecido últimamente varios artículos sobre calibración absoluta de planos, hasta donde sabemos no se ha publicado nada referente a la calibración de un interferómetro ni al método de medición para obtener una acreditación [26]. Mostramos aquí que un interferómetro comercial debidamente alineado y colimado puede darnos la confiabilidad adecuada para realizar mediciones de planicidad.

Finalmente se muestra un ejemplo numérico. En este ejemplo se utiliza una sola referencia, la de transmisión, puesto que el plano bajo prueba será ahora un plano a ser calibrado con el interferómetro acreditado.

Agradecimientos

Los agradecimientos están dirigidos a los doctores Eric Rosas y Wolfgang Schmid del Centro Nacional de Metrología por las amenas charlas sobre metrología.

1. K.-E. Elssner, A. Vogel, J. Grazna y G. Schulz, *Appl. Opt.* **33** (1994) 2437.
 2. C.J. Evans y R.N. Kestner, *Appl. Opt.* **35** (1996) 1015.
 3. C.J. Evans, *Opt. Eng.* **37** (1998) 1880.
 4. Ph.S. Fairman *et al.*, *Opt. Eng.* **39** (1999) 1371.
 5. V. Greco, R. Tronconi, C. Del Vecchio, M. Trivi y G. Molesini, *Appl. Opt.* **38** (1999) 2018.
 6. P. Hariharan, *Opt. Eng.* **36** (1997) 2478.
 7. B.F. Oreb *et al.*, *SPIE* **3744** (1999) 18.
 8. B.F. Oreb, D.I. Farrant, C.J. Walsh, G. Forbes y Ph.S. Fairman, *Appl. Opt.* **39** (2000) 5161.
 9. Ph. Stahl y J.A. Tome, *Proc. SPIE* **954** (1988) 78.
 10. I. Powell y E. Goulet, *Appl. Opt.* **37**, 2579-2588 (1998).
 11. Japanese Industry Standard, *Optical Flats JIS B 7430* (1977) 898.
 12. Japanese Industry Standard, *Instruments for the measurement of Surface Roughness by Interferometric Method, JIS B 0652* (1973) 893.
 13. D. Malacara, *Optical Shop Testing* (John Wiley and Sons, New York, 1992).
 14. Y. Surrel, "Fringe Analysis, in Photomechanics", P.K. Rastogi, ed., (*Springer Verlag*, Berlin/Heidelberg, 1999) p. 57.
 15. D. Malacara, M. Servin y Z. Malacara, *Interferogram Analysis for Optical Testing*, 1st edition (Marcel Dekker, Inc., New York, 1998) 169.
 16. Stabilized Helium-Neon Laser, model 117^a, Instruction Manual, Spectra-Physics International, Mountain View, CA
 17. λ -meter LRL-005 Technical Manual, versión 3.04, Cluster LTD (www.cluster.orc.ru), Moscú (2000).
 18. C. Perruchet, et M. Priel, *Estimer l'Incertitude: Mesures-Essais* (AFNOR, Paris, 2000); D.C. Baird, *Experimentation: An Introduction to Measurement Theory and Experiment Design*, 3ra edición (Prentice-Hall, New Jersey, 1995) (Es interesante como introducción a la teoría de las mediciones a pesar de no haber incluido algunos conceptos en uso como la reproducibilidad y la repetibilidad).
 19. F. Peste Sandoval y J. Mendoza Illescas, "Vocabulario Internacional de Términos Fundamentales y Generales de Metrología", (Publicación técnica CNM-MMM-PT-001, CENAM, Querétaro, 2000)
 20. J. Goodman, *Statistical Optics* (John Wiley and Sons, New York, 1985) 63.
 21. J.-C. Courtier, P. Giacomo, C. Ranson, B. Taylor y C. Kouyatt, *Guide Pour l'Expression de l'Incertitude de Mesure*, (BIPM, 1^{er}. Edition, Paris, 1995); Wolfgang Schmid y Rubén Lazos Martínez, "Guía para estimar la incertidumbre de medición" Centro Nacional de Metrología, <http://www.cenam.mx>, México, (2000).
 22. G. Schulz, and J. Schwider, *Progress in Optics*, ed. E. Wolf, **XIII** (1976) 95.
 23. National Physical Laboratory, "Certificate of Calibration: 150 mm WYKO Reference flat" Ref: LR0101/04020b/GEN13-131 (9 June 2004); National Physical Laboratory, "Certificate of Calibration: 150 mm WYKO Transmission flat" Ref: LR0101/04020a/GEN13-131 (9 June 2004)
 24. J. García Márquez y C. Pérez Santos "Procedimiento para calibración de superficies planas", Manual de procedimientos, Laboratorio de Pruebas Ópticas, DVDVT, CIO, (2004).
 25. El frente de onda es por notación **W**, en metrología se reserva la mayúscula para la expresión del mensurando, mismo que representamos aquí por **W**.
 26. Correspondencia personal con Bodzenko Oreb (CSIRO, Australia), Robert Polvani (NIST, EE. UU.), David Putland (NPL, Inglaterra), y Georges Vailleau (LNE, Francia).
- De cinco laboratorios internacionales de metrología, sabemos que el NIST (National Institute of Standards and Technology) ofrece una calibración basada en una norma cuyos resultados de medición se centran en los coeficientes de aberración de Zernike y no en P-V o RMS. El CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research organisation) no ha acreditado aún ninguno de sus dos interferómetros, el LIGO [8] y el Wyko 6000 y que el LNE (Laboratoire National d'Essais) no ofrece calibraciones de planos ópticos. Por tanto ninguno de esos laboratorios puede calibrar, con trazabilidad, al patrón materializado de longitud, un plano óptico según nuestras necesidades. Sin embargo tanto el NPL (National Physical Laboratory) como el PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) ofrecen trazabilidad al patrón primario de longitud.