

Medición de Bloques Patrón a partir de un Interferómetro de Tipo Twyman-Green

Gloria Sofía Pinilla Carreño¹

¹Departamento de Física, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

5 de diciembre de 2022

Abstract

Uno de los retos fundamentales para la ciencia en Colombia es la mejora de sus sistemas de medición a medida que avanza la tecnología. Hoy en día, instituciones como el BIPM presentan requisitos de precisión cada vez más estrictos. Por esto, asegurar la precisión y exactitud de las medidas de un observable no sólo beneficia el avance de la ciencia, sino también permite formar una ciencia más general y homogénea. En particular, una de las medidas más universales es el metro. Este es definido como “La longitud del camino recorrido por la luz en el vacío durante un intervalo de tiempo de $1/299792458$ de segundo” [Quinn \(1996\)](#) y puede ser medido experimentalmente por medio de bloques patrón. Los bloques *gauge* son bloques de metal o cerámica que han sido rectificados con precisión bajo una longitud específica, y son usados como estándares para la calibración de equipos de medición. Dicho proceso puede realizarse a partir de un interferómetro de tipo Twyman-Green. El cual, al contar con un haz de luz homogéneo permite analizar los efectos de las dimensiones del bloque *gauge* sobre un patrón de interferencia base. Así pues, en este proyecto se busca caracterizar la medida de un bloque patrón en la Universidad de los Andes en Bogotá, tomando en cuenta la incidencia de parámetros como la homogeneidad de la intensidad, la paralelidad de la superficie y las aberraciones del frente de onda. En consecuencia, se obtendrá independencia y se logrará definir la trazabilidad del metro en Colombia.

1 Introducción

1.1 Marco Teórico

Uno de los primeros pasos en un experimento científico es la calibración de los equipos a utilizar. Este proceso permite minimizar errores sistemáticos, asegurando la fiabilidad y trazabilidad de los datos medidos. Es decir, mejorar los procesos de medición es un paso directo hacía una ciencia más exacta. En particular, una de las medidas que ha sido definida globalmente es el metro. Éste puede ser verificado por medio de bloques patrón. En consecuencia, en este trabajo se busca determinar la longitud experimental de un bloque patrón de 30,000mm mediante las franjas de interferencia obtenidas en un interferómetro de tipo Twyman-Green, considerando sus debidas correcciones producto del frente de onda.

1.1.1 Bloques gauge

En primer lugar, los bloques *gauge* son bloques de metal o cerámica que han sido rectificados con precisión bajo una longitud específica, y son usados como estándares para la calibración de equipos de medición. Estos son empleados para procesos de calibración desde hace más de 80 años [Doiron & Beers \(2005\)](#), y han reportado medidas precisas con mínima variabilidad desde sus inicios.

Su longitud hace referencia a la altura del bloque patrón tras excluir la incidencia de una película *wring* (PW), la cual permite el acople de múltiples bloques para alcanzar un tamaño determinado. Es decir, la longitud medida es menor que la longitud nominal estipulada por el fabricante. La [Figura 1](#) ilustra dichas dimensiones.

En particular, la longitud del bloque es medida interferométricamente, y debe ser corregida a condiciones estándar. Puesto que, la medición de la longitud del bloque patrón es una comparación con la longitud de onda de la luz. La cual depende de manera directa en parámetros como temperatura,

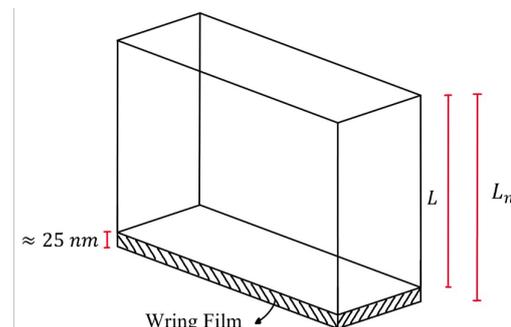


Figure 1. Dimensiones de un Bloque Patrón

presión barométrica, presión de vapor de agua, y concentración de CO_2 . Particularmente, solamente la temperatura tiene un efecto medible sobre la longitud física del bloque. En consecuencia, la longitud de un bloque *gauge* está definida bajo una temperatura de 20°C , presión barométrica de $101,325\text{Pa}$, presión de vapor de agua de $1,333\text{Pa}$ y un contenido de CO_2 en el aire de $0,03\%$.

Asimismo, la longitud de los bloques patrón está definida a partir de una PW pues es necesario considerar la incidencia de la luz que penetra en la superficie del bloque patrón. Si la PW y el bloque patrón están hechos del mismo material, y tienen el mismo acabado superficial, entonces la luz penetrará por igual en la superficie superior del bloque y en el plano de referencia, causando así que los errores se cancelen. En consecuencia, se reduciría la precisión de la calibración.

1.1.2 Patrón de Interferencia

Los patrones de interferencia en ondas mecánicas y electromagnéticas son consecuencia del principio de superposición, en el cual a partir de dos ondas, se obtiene otra onda resul-

tante que puede tener una amplitud, mayor, menor o incluso anularse completamente Eugene (2002). El origen del patrón de interferencia observado en el interferómetro se da gracias a la diferencia de caminos ópticos y el ángulo de inclinación del espejo móvil.

Ahora bien, la manera en la que se busca cuantificar esta dimensión del bloque *gauge* recae en la imagen del patrón de interferencia capturada por medio de una cámara CCD.

Así pues, es necesario contar con un instrumento que permite alcanzar un patrón de interferencia lo suficientemente grande para observar toda la superficie del bloque *gauge*. La siguiente sección describe el equipo necesario para este proceso.

1.1.3 Interferómetro de Twyman-Green

El interferómetro de Twyman-Green es una variante del clásico interferómetro de Michelson, diseñado y patentado por Frank Twyman y Arthur Green en 1916. Originalmente fue diseñado para el testeo de prismas, objetivos microscópicos y lentes para cámaras Malacara (1992).

Inicialmente, se tiene una fuente de luz cuasi-monocromática (láser), la cual es colimada¹ y separada en dos rayos perpendiculares a través del *beam splitter*. Estos rayos se reflejan completamente en los espejos M_1 y M_2 , regresando al divisor de haz donde se vuelven a encontrar los rayos previamente separados. A partir de esto, se forma un patrón de interferencia hacia el lente L_2 y luego hacia el *observing eye*, el cual para efectos del presente trabajo, es un Dispositivo de Carga Acoplada (CCD, por sus siglas en inglés).

En este proyecto es óptimo implementar un interferómetro de tipo Twyman-Green, pues este permite iluminar toda la región de los espejos con una distribución de intensidades homogénea, de modo que cada máximo del patrón de interferencia tiene aproximadamente la misma intensidad en el diámetro del espejo usado. De esta manera, la imagen capturada por la cámara presentará una cantidad uniforme de píxeles en la zona de estudio, que al ser analizada partir de un modelo sinusoidal permitirá encontrar la posición de máximos en el patrón. Los cuales, describirán la fracción de longitud F , que posteriormente será usada para calcular la longitud experimental de los bloques patrón.

2 Objetivos

2.1 Objetivo General

- Medir la longitud experimental de bloques de calibración usando un interferómetro tipo Twyman-Green en la Universidad de los Andes.

2.2 Objetivos Específicos

1. Implementar un interferómetro tipo Twyman-Green.
2. Determinar la corrección necesaria producto del frente de onda a partir de un elemento piezoeléctrico.
3. Establecer la medida de longitud experimental de un bloque de calibración bajo las condiciones específicas en la Universidad de los Andes.

¹ Los rayos incidentes son transformados de manera que sus frentes de onda sean planos.

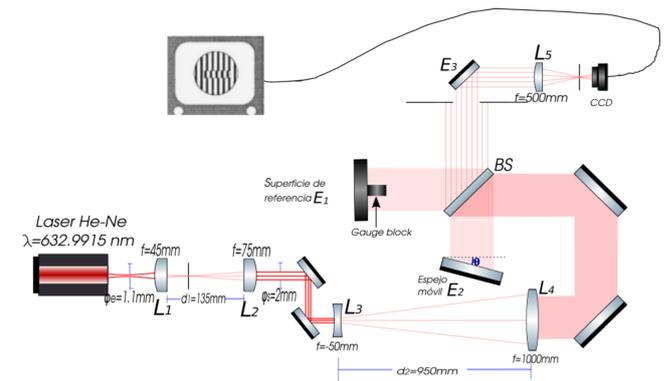


Figure 2. Diagrama Esquemático del interferómetro usado en la Universidad de los Andes para la medición de longitudes de gauge blocks. Imagen tomada de Gómez Guzmán (2020)

3 Metodología

3.1 Implementación del Interferómetro

Para realizar la medición de bloques *gauge* en la Universidad de los Andes se busca implementar un interferómetro de tipo Twyman-Green. Este interferómetro tiene como fuente de luz un láser de He-Ne, con una longitud de onda de $\lambda = 632,99 \pm 0,001 \text{ nm}$, y un sistema de magnificación de dos fases. La primera de ellas consta de los lentes L_1 , L_2 , y el segundo por L_3 , L_4 que permiten alcanzar un *waist* de 20mm. Tras esto, el haz de luz pasa por un divisor de haz (BS), donde su intensidad es dividida en dos caminos ópticos. El primero de ellos se dirige hacia un espejo móvil (E_2), mientras el segundo es reflejado en una superficie plana donde es colocado el bloque patrón. Finalmente, ambos caminos ópticos vuelven a unirse y una imagen es capturada tras pasar por una lente (L_5) en una cámara CCD. Este proceso está representado en la figura 2.

El sistema de magnificación apropiado para realizar las mediciones de longitud de *gauge blocks* debe satisfacer que la distribución de intensidad del haz de luz en el interferómetro sea homogéneo. Así pues, se debe garantizar que tanto la superficie completa de los bloques como la superficie del espejo de referencia en donde se colocarán los bloques, estén iluminadas completamente. Para asegurar que cada uno de los lentes quedó correctamente posicionado, se debe encontrar mínimos en la distancia focal de cada uno de ellos, y una cintura uniforme posterior al segundo y cuarto lente.

El segundo proceso por el cual debe pasar el haz es un interferómetro de tipo Twyman-Green. Este está conformado por un divisor de haz (BS) y dos espejos altamente reflectivos ante luz roja. En el interferómetro, el haz de luz es dividido en dos, los cuales recorren distancias iguales. Después de ser reflejados en cada espejo, la intensidad vuelve a combinarse en una sola ruta, la cual presenta un patrón de interferencia producto de la diferencia del camino óptico y la inclinación del espejo móvil. Dicho patrón es posteriormente capturado bajo un sistema de imagen a través de un lente plano-convexo. Esta señal es detectada por una cámara CCD y enviada a un computador donde se pueden observar las franjas de interferencia.

Para verificar que el patrón de interferencia obtenido cuenta con la calidad suficiente para su estudio, es necesario considerar factores como la paralelidad entre las líneas de interferencia, la intensidad/píxeles en la imagen y la correcta centralización de las imágenes. Si estas condiciones se satisfacen, entonces se da paso al análisis de ellas.

En tal caso en que la imagen del patrón de referencia no cumpla con estas condiciones se debe adecuar el montaje para presentar un *waist* menor que mantenga la homogeneidad de la intensidad de la luz, variando la distancia focal de los lentes previos al producto del haz colimado.

3.2 Correcciones del Patrón de interferencia

En primer lugar, se debe encontrar una sección de la imagen que se encuentre con una distribución homogénea de intensidad. Si este no es el caso, es necesario considerar un conjunto de columnas consecutivas y promediar su intensidad. Para así, disminuir la incertidumbre producto de la sensibilidad de cada píxel, del ruido y de la resolución de la CCD. Estos datos van a seguir un patrón sinusoidal que va a ser modelado según la Ecuación 1.

$$I_0 + A \sin(K_f x + \varphi) \quad (1)$$

Donde los parámetros I_0 representa la intensidad inicial, A la amplitud, K_f la frecuencia espacial, y φ la fase de la función de ajuste. En detalle, K_f es un factor de la frecuencia y 2π que debe permanecer constante en el tiempo. Similarmente, φ describe la inclinación de las franjas del patrón con respecto a la horizontal y también debe permanecer constante.

3.3 Error-Compensating Five Position Technique

El siguiente aspecto a considerar es la homogeneidad del frente de onda del haz. Para esto, se implementará la técnica a pasos propuesta en Lewis (1994), donde sostiene que el frente de onda puede caracterizarse a partir de cinco pasos que cambien el voltaje en el elemento piezoeléctrico de forma uniforme, minimizando el error de paso de fase.

Para esto, supongamos que los pasos de fase tienen fases relativas de $\pm 2\alpha$, $\pm\alpha$, 0. Donde cada una de sus intensidades pueden describirse en términos de las intensidades de cada brazo, es decir:

$$I(x, y) = I_{01} + I_{02} + 2\sqrt{I_{01}I_{02}} \cos(\varepsilon + \phi) \quad (2)$$

donde I_{01} es la intensidad que proviene del primer brazo, I_{02} la intensidad del segundo brazo, y ϕ es la fase del frente de onda reflejado en la superficie de referencia.

En consecuencia, es posible reescribir la fase del frente de onda ε a partir de la intensidad de cada paso,

$$\varepsilon = \arctan \left[\frac{1}{\beta} \left(\frac{I_2 - I_4}{2I_3 - I_5 - I_1} \right) \right] \quad (3)$$

Bajo los parámetros α y β que pueden entenderse matemáticamente como:

$$\beta = \frac{\sin(\alpha)}{1 - \cos(2\alpha)} \quad (4)$$

$$\cos(\alpha) = \frac{I_5 - I_1}{2(I_4 - I_2)} \quad (5)$$

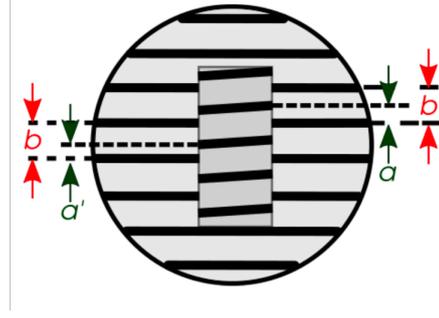


Figure 3. Diagrama Esquemático de un patrón de interferencia producido de un bloque gauge. Tomado de Decker E. (1996) Gauge Block Calibration by Optical Interferometry at the National Research Council of Canada

3.4 Cálculo de la Longitud Experimental

Finalmente, se aplicará un procedimiento análogo al puesto en Gómez Guzmán (2020) para determinar la longitud experimental del bloque patrón. La longitud de estos bloques se logra determinar mediante,

$$L = \frac{\lambda}{2}(N + F) \quad (6)$$

en donde λ es la longitud de onda del láser y N el número de longitudes de onda. Por lo cual, se debe determinar el valor de N a partir de la longitud estipulada del bloque *gauge* l_p , considerando que:

$$N = \frac{2l_p}{\lambda} \quad (7)$$

Con esta información es posible calcular la fracción F por medio de comparación interferométrica. Para determinar el valor de F se debe estudiar las regiones encontradas en la imagen del patrón de interferencia, identificando las posiciones de dos máximos (o mínimos) consecutivos del espejo y el máximo (o mínimo) del bloque que se encuentra entre los del espejo y se tomará su diferencia, como la Figura 3 ilustra.

De esta manera, puede encontrarse una expresión para la fracción en términos de la ubicación de sus máximos:

$$F_i = \frac{a_i}{b_i} \quad (8)$$

Para poder contar con una colección de datos más homogénea se realizará un mapeo de la imagen promediando dicha diferencia en máximos y mínimos.

4 Consideraciones Éticas

Al trabajar bajo un valor esperado de la longitud de los bloques gauge pueden ocurrir sucesos en los que se traten valores cercanos al esperado a partir de datos irreales. Es por esto que se busca mencionar que este trabajo estudiará imágenes tomadas en el laboratorio que podrán ser encontradas en repositorios abiertos¹. Adicionalmente, en el trabajo no se afectó la vida de ningún organismo, no se presentó ningún conflicto de intereses. Finalmente, me gustaría agradecer al Instituto Nacional de Metrología por el préstamo de los bloques *gauge* que permitieron el desarrollo de este proyecto.

¹ <https://github.com/pinillags/Measuring-Gauge-Blocks>

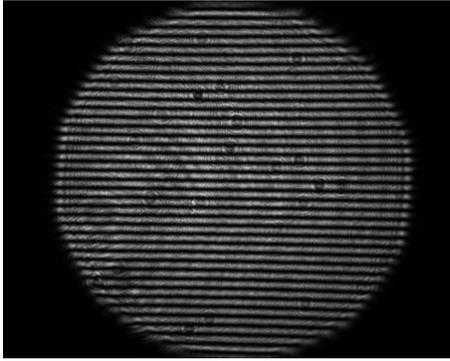


Figure 4. Patrón de interferencia obtenido en el laboratorio a partir de la cámara CCD y el elemento piezoeléctrico bajo 0,00V.

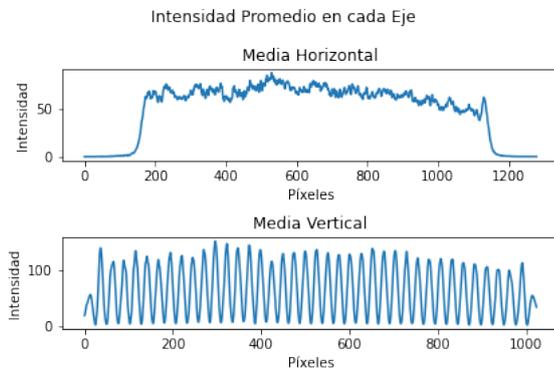


Figure 5. Intensidad del patrón de interferencia en el píxel 641 de tanto el eje vertical como el eje horizontal considerando un muestreo de ± 25 píxeles bajo un voltaje de 0,00V.

5 Resultados

5.1 Análisis de Imágenes del Patrón de Interferencia

En primer lugar se revisó el patrón de interferencia en ausencia del bloque de *gauge* a un voltaje de 0,00V. El patrón de interferencia obtenido puede ser visto en la Figura 4.

Esta imagen cuenta con una dimensión de 1280×1024 píxeles, y en su centro exhibe el patrón de interferencia producto de la incidencia de ambos caminos. La primera verificación que se debe hacer sobre ésta es asegurar que la intensidad se homogénea a lo largo de la imagen. Para esto se debe ubicar el máximo de intensidad en el centro de la imagen y considerar tanto en la fila como en la columna correspondiente a esta sección. Para obtener unos resultados con menor desviación se promedió la intensidad de las filas y columnas aledañas en cada caso. Este proceso permite disminuir la incertidumbre producto de la sensibilidad de cada píxel, del ruido y de la resolución de la cámara CCD.

De esta manera, se determinó la intensidad en el centro de tanto el eje vertical como el eje horizontal a partir del promedio de 25 píxeles. Como lo muestra la Figura 5, al revisar la intensidad media del eje vertical este se asemeja a un comportamiento sinusoidal. El cual no está condicionado notoriamente por la envolvente del haz, pues debido al proceso de amplificación que ocurre en el interferómetro, la imagen estudiada refleja el comportamiento del centro del haz. Así pues, es pertinente modelar los datos experimentales por medio de un ajuste sinusoidal.

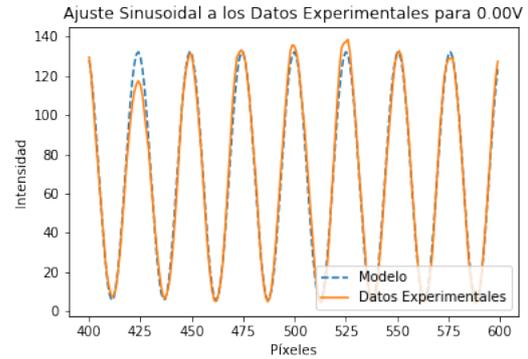


Figure 6. Ajuste del modelo sinusoidal (Ver Ec. 1) a la región más intensa del patrón de interferencia, conformada por 25 columnas consecutivas.

5.1.1 Ajuste Sinusoidal

Ahora bien, con una colección de intensidades correctamente delimitada es posible ajustar a los datos experimentales una función que tenga en cuenta no sólo su periodicidad sino también que describa características físicas del patrón de interferencia. El modelo propuesto sigue la Ecuación 1, y su correlación con los valores experimentales es presentada en la Figura 6.

En particular, la función que describe la intensidad en el centro del patrón de interferencia está dada por la expresión:

$$y = 68,96 + 63,36 \sin(0,25x + 198,05)$$

Donde cada parámetro corresponde respectivamente a: la intensidad inicial (I_0), la amplitud (A), la frecuencia espacial (K_f) y la fase del ajuste φ . Cada uno de estos describe alguna característica del patrón de interferencia, pero principalmente es de vital importancia revisar que el valor de K_f y φ de este centro coincida con los valores de estos parámetros para el resto de la patrón de interferencia, pues estos deben permanecer constantes para realizar la medición de bloques *gauge*.

5.1.2 Análisis de los parámetros K_f y φ para toda la imagen

Después de haber revisado el comportamiento de la intensidad en el centro del patrón de interferencia, este mismo proceso fue aplicado a todo el eje horizontal en la imagen.

Cada uno de los 1280 píxeles fue modelado a partir de una función sinusoidal que semeja la forma de la Ecuación 1. Donde cada sección toma en cuenta la intensidad de sus 25 columnas aledañas, recopilando los valores de K_f y φ en cada modelo. Promedio de este proceso se busca verificar que ambos parámetros permanezcan constantes, o cuenten con la mínima variabilidad a lo largo de la imagen. Puesto que estos describen características físicas del patrón de interferencia. La distribución obtenida está expuesta en la Figura 7. La cual demuestra que a lo largo de la imagen tanto el parámetro K_f , como el parámetro φ no presentan una variación notoria. Lo cual, coincide con la literatura y es un paso más hacia la medición apropiada de los bloques patrón.

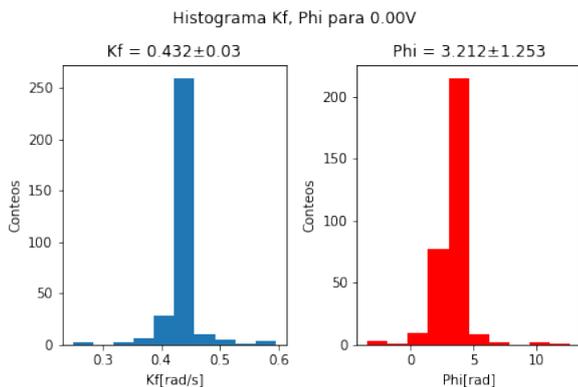


Figure 7. Distribución de datos para la frecuencia K_f y la fase φ de un patrón de interferencia bajo $0,00V$

5.2 Caracterización del Frente de Onda a partir de un Elemento Piezoeléctrico

La siguiente consideración que debe tomarse es la caracterizar del frente de onda en el interferómetro. Puesto que, un frente de onda plano puede alterarse al pasar por elementos ópticos con aberraciones como los son las deformidades en su superficie o la heterogeneidad en su índice de refracción [Born & Wolf \(1999\)](#).

Para esto, es necesario implementar la técnica de saltos de fase para comparar el frente de onda entre dos superficies. Sin embargo, primero se debe caracterizar el elemento piezoeléctrico que generará el voltaje suficiente para cada paso, asegurándonos de no anexar errores adicionales en el momento de hacer mediciones de longitudud.

5.2.1 Caracterización del Elemento Piezoeléctrico

En primer lugar, el elemento piezoeléctrico genera una traslación opuesta a la dirección de las franjas del patrón de interferencia. Es decir, si una fila con misma intensidad es fijada, entonces, al variar el voltaje por medio del piezoeléctrico está se desplazará hacia arriba en la imagen. Por lo cual, para realizar la caracterización de este debemos cuantificar el cambio de voltaje necesario para pasar del máximo de intensidad de una franja, al máximo de la franja siguiente.

Bajo el patrón de interferencia expuesto en la [Figura 4](#), el voltaje necesario para el paso de máximo a máximo fue de $1,05 \pm 0,05V$. De modo que, para conocer el desplazamiento del piezoeléctrico bajo la presión ejercida se realizó una toma de datos con un paso de $0,05 \pm 0,001V$, donde para cada paso una imagen del patrón de interferencia fue estudiada en una región fija, determinado la traslación del máximo inicial. La [Figura 8](#) evidencia el desplazamiento de un máximo fijo al aumentar el voltaje.

5.2.2 Caracterización del Frente de Onda

Ahora bien, tras haber definido el desplazamiento producto del piezoeléctrico fue posible caracterizar el frente de onda. Como se mencionó anteriormente, para esto se aplicó la técnica *error-compensating five position technique*.

Esta busca mover el espejo de referencia en cinco pasos. En este caso, cada cambio corresponde a los voltajes $0,50V$, $0,75V$, $1,00V$, $1,25V$ y $1,5V$, para los cuales se capturó una imagen del patrón de interferencia producido. Sobre cada uno de estos se realizó un ajuste sinusoidal análogo a la primera

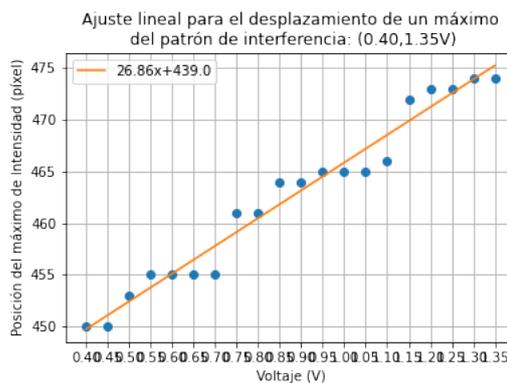


Figure 8. Desplazamiento de un máximo del patrón de interferencia como función del voltaje en el piezoeléctrico.

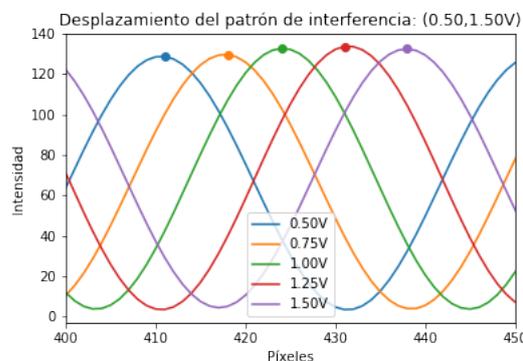


Figure 9. Desplazamiento de un máximo de intensidad de un subgrupo de ajustes para los voltajes $0,50V$, $0,75V$, $1,00V$, $1,25V$ y $1,5V$.

sección de resultados. Estos modelos se presentan en la [Figura 9](#), la cual exhibe el cambio en la posición de un máximo en el subconjunto de voltajes.

En consecuencia, podemos establecer la posición inicial del máximo como el pixel en el primer patrón de interferencia, es decir, el patrón producto de $0,50V$, y cuantificar su desplazamiento de a pasos de $0,25V$. Así, podemos determinar el valor del desplazamiento promedio de máximo a máximo, este fue de $6,75$ píxeles. Estos resultados nos permiten calcular una primera aproximación al valor de α . Puesto que este, puede entenderse como el promedio del desplazamiento total en la cantidad de pasos. Por tanto, $\alpha \approx 51,5^\circ$.

Después de esta primera aproximación, se quiso verificar su cercanía con el valor de α para cada punto en la imagen. Para esto se revisó la intensidad píxel a píxel acorde con la [Ecuación 5](#), y sus intensidades correspondientes en cada paso de voltaje. En el primer caso, se graficó la matriz bi-dimensional $\cos(\alpha)$, excluyendo las zonas donde su valor fuera nulo. Como lo muestra la [Figura 10](#), la superficie del espejo presenta un valor uniforme para $\cos(\alpha)$ y por tanto para α . Éste corresponde a

$$\alpha = 50,3 \pm 2,39^\circ$$

Lo cual, va acorde con lo expuesto por [Lewis \(1994\)](#), pues se espera un valor uniforme de α a lo largo de la superficie. En consecuencia, la constante β toma un valor acorde con la [Ecuación 4](#), $\beta = 0,65$.

Más aún, es posible determinar el mapa de fase de onda considerando los resultados para β y las intensidades, en la

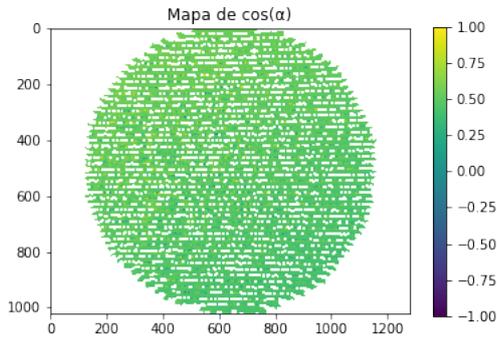


Figure 10. Mapa de $\cos(\alpha)$ para la superficie del espejo móvil.

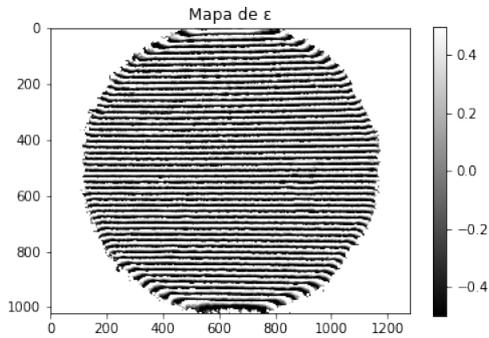


Figure 11. Mapa de Fase obtenido usando las intensidades de los patrones de interferencia por medio del paso en cinco posiciones ($0,50V$, $0,75V$, $1,00V$, $1,25V$ y $1,5V$).

Ecuación 3. Puede observarse las aberraciones de los elementos ópticos usados en el interferómetro.

5.3 Medición de un Bloque Gauge

Después de haber comprobado la homogeneidad del haz, la planitud de los espejos de referencia y haber realizado las debidas correcciones producto de los errores del frente de onda es posible cuantificar la medida experimental de un bloque patrón. En este caso, se trabajó sobre un bloque patrón de longitud $l_p = 30,000\text{mm}$. Éste fue colocado en el segundo brazo del interferómetro, sobre una superficie de su mismo material (acero), como puede ser visto en la Figura 12. Lo cual, permitió garantizar buena planitud, y correcta adherencia del bloque.

En primer lugar, es posible usar la Ecuación 7 para determinar el número de longitudes de onda. Según el fabricante del láser He-Ne, este cuenta con una longitud de onda $\lambda = 632,99 \pm 0,001\text{nm}$. Por lo cual,

$$N = 94788,0431$$

Tras esto, debemos trabajar sobre los patrones de interferencia para establecer el valor de la fracción F . A diferencia de las secciones anteriores, al colocar un bloque patrón en el interferómetro el patrón de interferencia producido presenta un cambio de fase que distingue parte la imagen en dos secciones principales y la región del bloque, como se ve en la Figura 13.

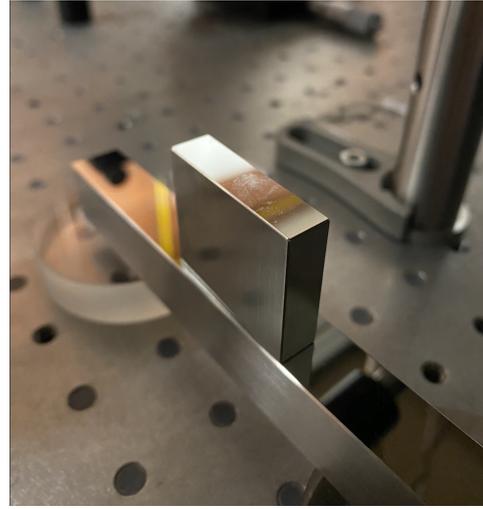


Figure 12. Ubicación de un bloque patrón de 30 mm en interferómetro implementado, éste se encuentra sobre una superficie reflectiva del mismo material, y dos planos paralelos entre sí para garantizar un mismo nivel.

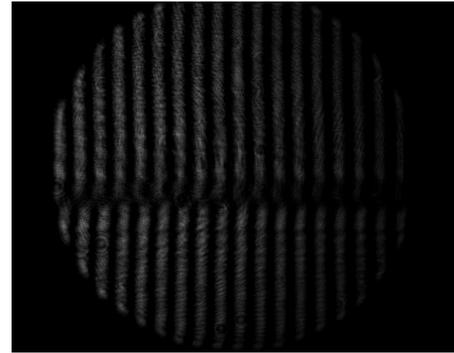


Figure 13. Patrón de interferencia producto de un bloque patrón de 30,000mm en un interferómetro de Twyman-Green bajo un voltaje de $0,00V$.

Previo a determinar la fracción F , debemos asegurar que la frecuencia espacial permanece constante en cada región del patrón. Puesto que, la fracción es una medida que depende de la posición de los máximos de intensidad, y esta posición cambia si la frecuencia espacial del patrón de interferencia no permanece constante.

En consecuencia, se realizó un proceso análogo al mostrado en la primera parte del análisis para determinar la distribución de la frecuencia espacial en cada una de las zonas del patrón de interferencia. Los resultados alcanzados para la sección superior (denotada bajo \uparrow), la región inferior (\downarrow) y la región del bloque fueron:

$$K_{f_{\uparrow}} = 0,111 \pm 0,001 \text{ rad/s}$$

$$K_{f_{\downarrow}} = 0,111 \pm 0,001 \text{ rad/s}$$

$$K_{f_b} = 0,110 \pm 0,001 \text{ rad/s}$$

Así pues, es posible realizar un ajuste sinusoidal a cada una de las zonas de la imagen, como lo muestra la Figura 14.

En consecuencia se podrá cuantificar la distancia entre dos máximos del modelo para la parte superior, como también la

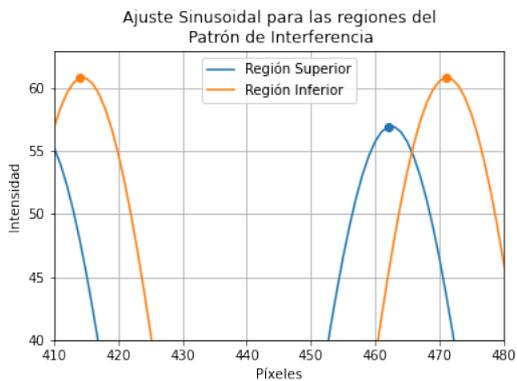


Figure 14. Ajuste sinusoidal para las dos regiones del patrón de interferencia tomando como foco el píxel 300 y 700 respectivamente. La distancia entre estos máximos representa los insumos para obtener el valor de la fracción F .

diferencia entre un máximo de la región superior y uno de la inferior. Esta información corresponde a b y a respectivamente, como se ve en la Figura 3. De este modo, es posible calcular la fracción para un patrón de interferencia dado.

Adicionalmente, para alcanzar una medida precisa consideramos una colección de patrones producto de cambios en el voltaje, esta tomaba valores desde 0,50V hasta 1,50V, bajo un paso de 0,10V.

Así, se obtuvo con una colección de fracciones que permitió determinar la longitud experimental del bloque a partir de un promedio de longitudes. Cada uno de los valores de L fue calculado usando la Ecuación 6, y su promedio fue:

$$L = 30,0004432 \pm 0,000316 \text{ mm}$$

Lo cual, coincide con el valor estipulado para el bloque patrón, junto con los errores debido a el índice de refracción del aire, la temperatura, la presión, la humedad y demás factores ambientales que no fueron eliminados. Para mejorar esta medida se recomienda estudiar cada una de estas variables y corregirlas al momento de medir.

6 Conclusiones

En este proyecto se construyó un interferómetro de tipo Twyman-Green para la medición de bloques patrón. La primera corrección realizada aplica la técnica del paso de fase para evaluar el error de fase del frente de onda. El cual, valida el interferómetro como un instrumento apto para la medición de bloques *gauge*. En particular, al medir un bloque de longitud nominal 30,000mm se alcanzó una medida con una incertidumbre correspondiente a 0,000443mm. La cual es producto de diversas fuentes de error. Por lo cual, se recomienda para el trabajo futuro considerar todas las correcciones necesarias para validar dichas mediciones desde un punto de vista metrológico.

Referencias

- Born M., Wolf E., 1999, Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light, 7th expanded edn. Cambridge University Press, Cambridge; New York
- Doiron T. D. D., Beers J. S., 2005, The Gauge Block Handbook
- Eugene H., 2002, Optics, 4 edn. Addison Wesley
- Gómez Guzmán W. A., 2020, Medición de longitudes de Gauge blocks en Colombia por interferometría: fase uno

- Lewis A. J., 1994, Imperial College, London
- Malacara D., 1992, Optical shop testing, 2, 46
- Quinn T., 1996, Metrologia, 33, 81