

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

Facultad de Ciencias

Escuela Profesional de Ingeniería Física



INFORME DE SUFICIENCIA
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO FÍSICO

**PROCEDIMIENTO PARA LA VERIFICACIÓN INTERMEDIA DE
BLOQUES PATRÓN PLANOPARALELOS USANDO
INTERFEROMETRÍA LÁSER**

Presentado por:

Moisés Adolfo Inga Chucos

Asesor:

Dr. Abel Gutarra E.

LIMA - PERÚ

2012

PROCEDIMIENTO PARA LA VERIFICACIÓN INTERMEDIA DE BLOQUES PATRÓN PLANOPARALELOS USANDO INTERFEROMETRÍA LÁSER

Moisés A. Inga Chucos

moisesinga@unimetrosac.com

Laboratorio de Física Intermedia, Escuela de Ingeniería Física FC – UNI

Mayo 2011

Resumen

Se llevó a cabo un estudio de aplicación del interferómetro en la configuración de Michelson como un medio de comparación para verificación de bloques patrón planoparalelos clase 2. Previamente se utilizó dicho arreglo para calibrar el nonio del tornillo micrométrico tomando el valor conocido de la longitud de onda del láser He-Ne como patrón de medida. Se corroboró la mayor precisión de resolución del interferómetro basado en la longitud de onda del láser como unidad de medida frente a las tolerancias de los bloques patrón longitudinales clase 2, logrando con esto mediciones que sirven para verificar la relación entre la longitud nominal de un bloque patrón planoparalelo clase 2 respecto a otro bloque similar de referencia y la tolerancia, en el tiempo.

Abstract

We conducted a study of application of the interferometer in the Michelson configuration as a means of comparison for plane-parallel gauge blocks check class 2. Before this arrangement was used to calibrate the micrometer Vernier taking the known value of the wavelength of He-Ne laser as a standard value. The highest accuracy resolution was confirmed of the interferometer based on the wavelength of the laser as a unit of measurement compared to the tolerances of the gauge block class 2, thus achieving measurements that are used to verify the relationship between the nominal length of a block class 2 coplanar pattern over another similar reference block and tolerance over time.

Palabras-clave (Keywords) Experimento de Michelson-Morley. Calibración, Verificación intermedia de la Calibración. Tolerancias para bloques planoparalelos de longitud clase 2.

INDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	DEFINICIONES.....	1
1.1.1	Calibración.....	1
1.1.2	Verificación.....	2
1.1.3	Verificación intermedia (o Verificación de la Calibración).....	3
1.1.4	Bloques Patrón.....	4
1.2.	IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	7
1.3.	ANTECEDENTES.....	8
1.4.	OBJETIVO GENERAL.....	8
1.5.	OBJETIVO ESPECÍFICO.....	8
2.	FUNDAMENTO TEÓRICO.....	9
2.1	INTERFERENCIAS DE LAS ONDAS DE LUZ. CALIBRACIÓN DEL TORNILLO MICROMETRICO.....	9
2.2	INTERFERÓMETRO DE MICHELSON.....	10
3.	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	13
3.1	PROCEDIMIENTO PARA LA VERIFICACIÓN INTERMEDIA DE BLOQUES PATRONES PLANO PARALELOS GRADO 2.....	13
4.	RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIONES.....	19
4.1	CALIBRACIÓN DEL TORNILLO MICROMETRICO.....	19
4.2	CÁLCULO DEL VALOR DE LA DIFERENCIA RELATIVA DE LA LONGITUD DE LOS BLOQUES PATRONES PLANO PARALELOS CALIBRADO Y DE REFERENCIA Y DE LA INCERTIDUMBRE ASOCIADA.....	23
5.	CONCLUSIONES Y PROYECCIONES.....	26
5.1	CONCLUSIONES.....	26
5.2	TRABAJO A FUTURO.....	27
6.	ANEXOS	
A:	NORMA ASME B89.1.9-2002.....	28
B:	CONFIRMACIÓN METROLÓGICA.....	29
	REFERENCIAS.....	30

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

A continuación se define algunos conceptos relacionados a la metrología y al tema central del presente trabajo.

1.1 DEFINICIONES

1.1.1 Calibración [1]

Operación que bajo condiciones especificadas establece, en una primera etapa, una relación entre los valores y sus incertidumbres de medida asociadas obtenidas a partir de los patrones de medida, y las correspondientes indicaciones con sus incertidumbres asociadas y, en una segunda etapa, utiliza esta información para establecer una relación que permita obtener un resultado de medida a partir de una indicación.

NOTA 1 — Una calibración puede expresarse mediante una declaración, una función de calibración, un diagrama de calibración, una curva de calibración o una tabla de calibración. En algunos casos, puede consistir en una corrección aditiva o multiplicativa de la indicación con su incertidumbre correspondiente.

NOTA 2 — Conviene no confundir la calibración con el ajuste de un sistema de medida, a menudo llamado incorrectamente “autocalibración”, ni con una verificación de la calibración.

NOTA 3 — Una calibración puede también servir para determinar otras propiedades metroológicas tales como los efectos de las magnitudes de influencia.

NOTA 4 — Los resultados de una calibración pueden consignarse en un documento denominado a veces, **certificado de calibración** o **informe de calibración**.

NOTA 5 — Frecuentemente se interpreta que únicamente la primera etapa de esta definición corresponde a la calibración.

1.1.2 Verificación [1]

Aportación de evidencia objetiva de que un elemento satisface los requisitos especificados

EJEMPLO 1 La confirmación de que un material de referencia declarado homogéneo lo es para el valor y el procedimiento de medida correspondientes, para muestras de masa de valor hasta 10 mg.

EJEMPLO 2 La confirmación de que se satisfacen las propiedades de funcionamiento declaradas o los requisitos legales de un sistema de medida.

EJEMPLO 3 La confirmación de que puede alcanzarse una incertidumbre objetivo.

NOTA 1 — Cuando sea necesario, es conveniente tener en cuenta la incertidumbre de medida.

NOTA 2 — El elemento puede ser, por ejemplo, un proceso, un procedimiento de medida, un material, un compuesto o un sistema de medida.

NOTA 3 — Los requisitos especificados pueden ser, por ejemplo, las especificaciones del fabricante.

NOTA 4 — En metrología legal, la verificación, tal como la define el VIML, y en general en la evaluación de la conformidad, puede conllevar el examen, marcado o emisión de un certificado de verificación de un sistema de medida.

NOTA 5 — No debe confundirse la verificación con la calibración.

NOTA 6 — En química, la verificación de la identidad de una entidad, o de una actividad, requiere una descripción de la estructura o las propiedades de dicha entidad o actividad.

OBSERVACIÓN 1 [9] — La Norma Técnica ISO 10012:2003 [9] utiliza el término de verificación como parte de la confirmación metrológica del Sistema de Gestión de las Mediciones.

El Sistema de Gestión de las Mediciones establece como premisa que se identifiquen los requisitos de medición para los diferentes procesos de realización del producto y que a partir de estos requisitos

se definan los requisitos metrológicos del uso previsto de los equipos que se utilizan en dichos procesos.

Después de la calibración del equipo de medición sus características metrológicas son comparadas con los requisitos metrológicos del uso previsto del equipo como parte de la confirmación metrológica del equipo. Tal comparación directa entre las características metrológicas del equipo de medición y los requisitos metrológicos del uso previsto del equipo se denomina verificación.

Mientras que en la Calibración, se puede incluir una declaración de cumplimiento con especificaciones metrológicas conocidas (por ejemplo el error máximo permisible del equipo de medición).

1.1.3 Verificación intermedia (o Verificación de la Calibración) [2]

Los programas de calibración periódica de instrumentos y equipos de medición son ampliamente conocidos en muchas compañías con sistemas de calidad bien establecidos, sin embargo, el concepto de verificaciones intermedias no lo es.

La verificación periódica podría considerarse como una calibración reducida, por ejemplo, en el número de puntos calibrados, debe ser interna y no llevada a cabo por un laboratorio externo.

Un informe de calibración no es requerido, pero si debe haber registro de la verificación realizada. Es conveniente que los resultados obtenidos sean graficados, para observar el comportamiento a través del tiempo entre periodos de calibración. Si una situación fuera de los límites especificados es detectada, una calibración completa debe ser llevada a cabo. Procediendo según el resultado obtenido, por ejemplo, seguir utilizándolo, ajustarlo, repararlo o sustituirlo por uno nuevo.

Como requerimiento para laboratorios de calibración, las verificaciones intermedias son indicadas, por ejemplo, en 5.5.10 y 5.6.3.3 de ISO 17025:

“5.5.10 Cuando se necesiten comprobaciones intermedias para mantener la confianza en el estado de calibración de los equipos, éstas se deben efectuar según un procedimiento definido.” [3]

“5.6.3.3 Verificaciones intermedias

Se deben llevar a cabo las verificaciones que sean necesarias para mantener la confianza en el estado de calibración de los patrones de referencia, primarios, de transferencia o de trabajo y de los materiales de referencia de acuerdo con procedimientos y una programación definidos.” [3]

Otro caso es la ISO 10360-2 sobre evaluación del desempeño de Máquinas de Medición por Coordenadas (CMM), en que también, son recomendadas las verificaciones intermedias. Sin importar si se trata de un instrumento sencillo tal como un calibrador o un equipo complejo, un programa adecuado de verificaciones intermedias asegura el mantenimiento de la exactitud de las mediciones realizadas con ellos.

Un adecuado programa de verificaciones intermedias y calibraciones, permite ajustar de manera más confiable los periodos de calibración para cada equipo de medición.

El establecimiento de la periodicidad de las verificaciones intermedias, depende del tipo de instrumento o equipo de medición, la exactitud requerida en las mediciones, la frecuencia de uso y la tendencia al desgaste o desajuste. Pudiendo establecerse de manera trimestral, mensual o hasta semanal.

La verificación intermedia debe poder ser realizada en corto tiempo de manera que no afecte las operaciones de medición.

Un ejemplo muy simple, sería el de un micrómetro al que se le verifica el ajuste del cero y luego el error de indicación con un solo bloque patrón, con una medida nominal cercana al valor más frecuentemente medido con este micrómetro. La calibración requiere el uso de 10 bloques patrón distribuidos adecuadamente dentro del intervalo de medición del tornillo micrométrico.

1.1.4 Bloques Patrón [7]; [11]

Un bloque patrón es un estándar de longitud con superficies opuestas planas y paralelas. La sección transversal no es muy importante, aunque la norma ISO 3650:1998 “Geometrical Product Specifications (GPS) - Length standards - Gauge blocks ” da dimensiones recomendadas para secciones transversales rectangular, cuadrada y de sección circular. Los bloques patrón, tienen una longitud nominal definido en el sistema métrico (milímetros) o en el sistema Inglés (1 pulgada = 25,4 mm).

La longitud de un bloque patrón se define a condiciones de referencia estándar:

temperatura = 20 °C (68 °F)

presión barométrica = 101,325 Pa (1 atmosfera)

presión de vapor de agua = 1,333 Pa (10 mm de columna de mercurio)

concentración de CO₂ en el aire = 0.03%.

De estas condiciones sólo la temperatura tiene un efecto mensurable sobre la longitud física del bloque patrón. Las otras condiciones son necesarias porque la medición primaria de la longitud del bloque es una comparación con la longitud de onda de la luz. Para fuentes de luz estándar la frecuencia de la luz es constante, pero la longitud de onda depende de la temperatura, presión, humedad, y contenido de CO₂ en el aire.

La longitud de un bloque patrón se define como la distancia desde un punto seleccionado de unas de sus caras de medida hasta la superficie de una base plana, del mismo material y acabado superficial que el bloque, sobre la que éste se halla adherido.

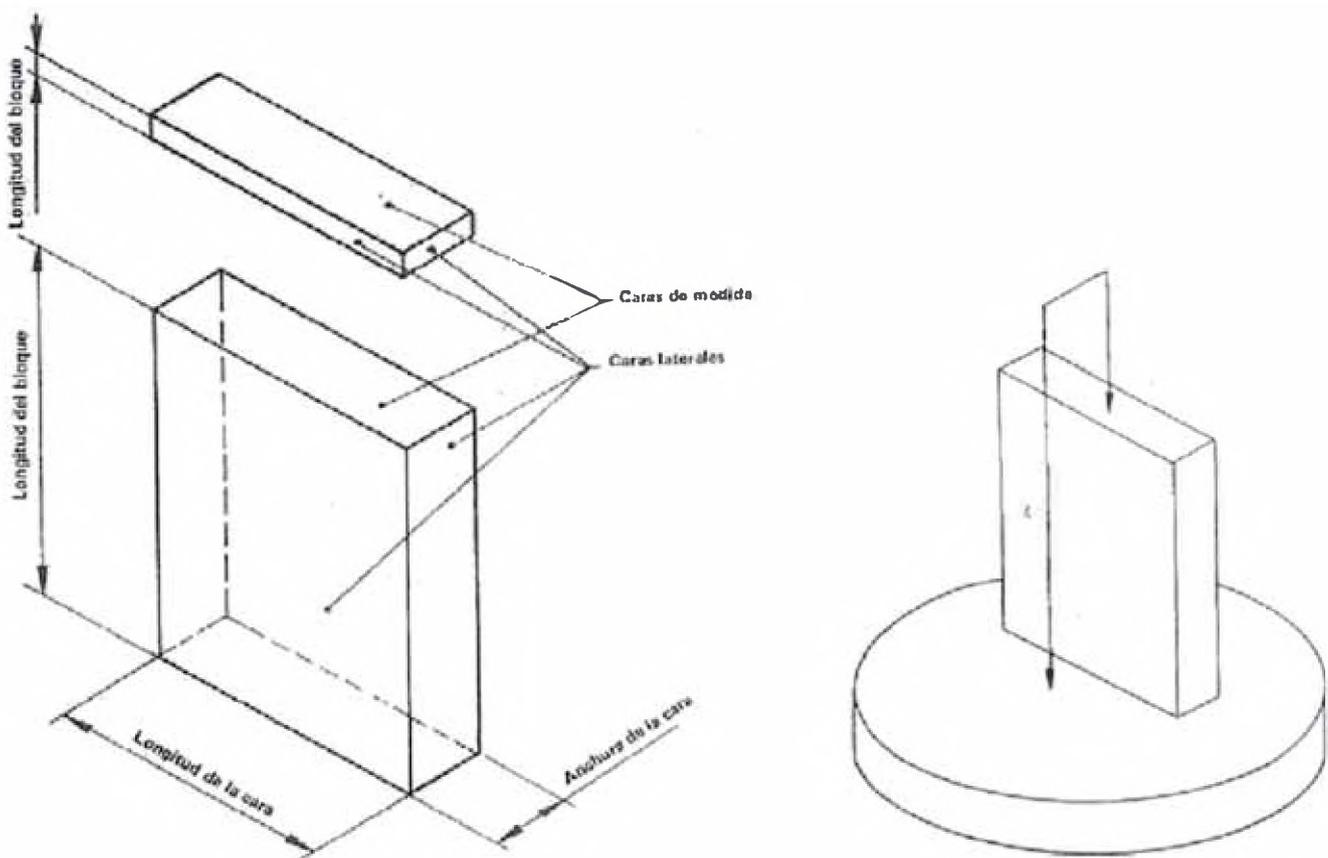


Figura 1: Terminología de un bloque patrón y definición de su longitud (Norma ISO 3650)

Bajo estas condiciones ideales de la definición, los errores por contacto sobre las superficies y los debidos a la distinta rugosidad resultan eliminados. Se asume implícitamente que la superficie del bloque es lo suficientemente plana como para que la simetría de la zona de adherencia se mantenga.

La norma ISO 3650:1998 "Geometrical Product Specifications (GPS) - Length standards - Gauge blocks" define todas las propiedades físicas relevantes de los bloques patrón hasta 500 mm de largo.

Las propiedades incluyen la geometría de bloque (longitud, paralelismo, planitud y acabado de la superficie), longitud nominal estándar, y un sistema de grados de tolerancia para clasificar el nivel de precisión de los bloques y conjuntos de bloques.

El Sistema de tolerancias fue inventado como una forma de simplificar el uso de bloques.

Por ejemplo, suponga que los bloques patrón se utilizan para calibrar un bloque de tamaño fijo, y la precisión requerida del bloque es de 0,5 micras. Si el tamaño del bloque requiere un arreglo de cinco bloques patrones para alcanzar el tamaño nominal del bloque, la exactitud de cada bloque patrón debe ser del orden de $0,5 / 5$ o 0,1 micras. Esto es cercano a la precisión promedio de un bloque patrón industrial de calibración, y la tolerancia requerida puede ser lograda con éstos bloques patrones de longitud industriales siempre que hayan sido previamente calibrados y determinar la longitud total del arreglo considerando las correcciones reportadas en el certificado de calibración de los bloques patrón. Pero tener el certificado de calibración para los bloques patrón en la mano para llevar a cabo el cálculo de la longitud total del arreglo de los bloques patrón es muy tedioso.

Supongamos que tenemos un conjunto de bloques patrón que están garantizados que tienen la propiedad de que cada bloque está dentro de 0,05 m de su longitud nominal. Con este conocimiento podemos utilizar los bloques patrón, y asumir las longitudes nominales sin considerar las correcciones individuales y aún así tener la suficientemente precisión para la medición.

Hay 4 grados de tolerancias: Grado K, Grado 0, Grado 1 y Grado 2.

Los usos según esta clasificación pueden ser los sgtes:

Grado: K

Para el laboratorio como medida patrón

Grado: 0

Como medida patrón para el control de bloques patrón de taller y para el ajuste de aparatos y máquinas de medición de alta precisión.

Grado: 1

Para el control de aparatos de verificación, medición de longitudes y para trabajos de verificación en el área de metrología

Grado: 2

Como medida de ajuste y de trabajo en el taller y para la verificación de instrumentos de medida como micrómetros, relojes comparadores, pie de rey, etc.

1.2 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

El propósito de la calibración periódica es, asegurar la exactitud de los equipos de medición cada determinado tiempo, por ejemplo, cuando se empieza a usar un instrumento o equipo nuevo y después cada año.

La calibración en muchos casos, es realizada por un laboratorio externo, aunque algunas compañías tienen bien establecidos procedimientos de calibración interna.

Muchas veces, los informes de calibración indican que los errores de indicación están dentro de valores aceptables para el uso al que se destina, sin embargo, ocasionalmente algún instrumento o equipo de medición arroja resultados inaceptables. Cuando esto sucede, la pregunta es ¿desde cuando ese instrumento o equipo de medición esta fuera de los límites aceptables? ¿Unos pocos días antes de que se calibrara o unos pocos días después de la calibración anterior?

El tiempo como se ve, puede variar desde muy pocos días hasta casi todos los días del periodo de calibración establecido para ese instrumento o equipo. Al estar fuera de los límites especificados, se entiende que las piezas medidas con ese instrumento o equipo, pueden haber sido mal clasificadas, es decir, piezas malas aceptadas como buenas.

Si las piezas han sido enviadas al cliente la situación se complica, ya que habría que notificarle la situación detectada y volver a medir las piezas para determinar si realmente están dentro de especificación o no. Si el cliente se da cuenta de la situación al tener problemas de ensamble el problema es mayor.

Una alternativa, es reducir los periodos de calibración para prevenir el riesgo de una situación como la descrita, sin embargo, el costo puede ser alto. Otra opción es implementar un programa de verificaciones intermedias.

Esto es, establecer un procedimiento para verificar que los instrumentos o equipos se mantienen dentro de límites especificados de error de indicación entre periodos de calibración.

1.3 ANTECEDENTES

Como antecedentes figura el trabajo del Dr. Emilio Prieto Esteban con la tesis presentada para la obtención del grado de Doctor de la Universidad Politécnica de Madrid, titulado:

“Desarrollo de Comparador Interferométrico Universal para la Calibración de patrones materializados de longitud” Ing. Emilio Prieto Esteban, Universidad Politécnica de Madrid, 2007.

1.4 OBJETIVO GENERAL

Implementar en UNIMETRO S.A.C. un programa y procedimiento de verificación intermedia a los bloques patrón planoparalelos usados en la calibración para pie de rey, que ya cuenta con un programa periódico de calibración anual en el laboratorio de longitud del SNM-INDECOPI, adoptado como laboratorio externo.

1.5 OBJETIVO ESPECÍFICO

Verificar y asegurar que los bloques patrón planoparalelos se mantienen dentro de límites especificados de error de indicación entre períodos de calibración, y como requisito técnico a cumplir para el proyecto a corto plazo de UNIMETRO S.A.C. de acreditación en el alcance de Calibración de Pie de Rey, usando los bloques patrón planoparalelos grado 2 como patrones de medición.

CAPÍTULO 2

2. FUNDAMENTO TEORICO [4] [10]

2.1 INTERFERENCIAS DE LAS ONDAS DE LUZ. CALIBRACIÓN DEL TORNILLO MICROMETRICO.

Las ecuaciones de Maxwell describen matemáticamente las ondas electromagnéticas. Estas ondas resultan ser campos ondulatorios eléctricos E y magnéticos B mutuamente perpendiculares que se propagan en el espacio con la misma velocidad, longitud de onda, frecuencia y fase.

El espectro electromagnético corresponde al rango de longitudes de onda λ ($k=2\pi/\lambda$) y frecuencia ν ($\nu=\omega/2\pi$) que nos resultan de mayor interés. El rango de frecuencias que pueden detectarse con el ojo humano se denomina espectro visible. Una onda electromagnética armónica caracterizada por una determinada frecuencia contenida en el espectro visible constituye una luz monocromática. Un haz de luz designa una onda (o conjunto de ondas) de campos eléctricos y magnéticos oscilantes que viajan en una dirección del espacio. Cuando dos o más haces de luz se encuentran en un punto del espacio, estos campos se suman de acuerdo con el principio de superposición. Así, en ese punto, se producen interferencias.

Si cada haz de luz se origina a partir de una fuente separada, generalmente, no hay una relación constante entre las oscilaciones electromagnéticas de los haces. En cualquier instante de tiempo, habrá puntos del espacio donde los campos se suman para producir un máximo de intensidad de luz. Sin embargo, las oscilaciones de la luz visible son más rápidas de lo que el ojo humano puede apreciar. Puesto que no hay relación entre las oscilaciones, un punto en el cual hay un máximo en un instante dado puede tener un mínimo en el siguiente instante. El ojo humano promedia estos resultados y percibe una intensidad uniforme de luz.

Si dos haces de luz se originan a partir de la misma fuente, generalmente, hay algún grado de correlación entre la frecuencia y la fase de ambas oscilaciones. En un punto del espacio, las luces de los dos haces pueden estar continuamente en fase. En este caso, el campo resultante siempre tendrá un máximo en ese punto y se verá como un punto brillante estable.

La interferencia que se produce es permanente (y, por tanto, el ojo humano puede observarla). Esto se debe a que los dos haces de luz presentan una buena coherencia espacial.

Thomas Young fue uno de los primeros que diseñó un método para producir tal patrón de interferencia. De una fuente luminosa que llegaba a una rendija estrecha hizo incidir el haz de luz emergente sobre dos rendijas estrechas y próximas y colocó enfrente de ellas una pantalla. Cuando la luz procedente de las dos rendijas incide en la pantalla, se observa un patrón regular de bandas de luz y oscuridad (esto supone una evidencia de la naturaleza ondulatoria de la luz). Las rendijas de Young pueden ser utilizadas como un interferómetro sencillo. Si el espaciado entre las rendijas es conocido, el espaciado de máximos y mínimos puede ser utilizado para determinar la longitud de onda de la luz y viceversa.

2.2 INTERFERÓMETRO DE MICHELSON

En 1881, 78 años después de que Young introdujese su experimento de doble rendija, A. Michelson diseñó y construyó un interferómetro utilizando un principio similar. Aunque, originalmente, Michelson diseñó su interferómetro como un medio para probar la existencia del éter, con posterioridad, fue ampliamente utilizado como instrumento para medir la longitud de onda de una luz, para medir distancias extremadamente pequeñas y para investigar propiedades de medios ópticos.

La Fig. 2 muestra un diagrama de un interferómetro de Michelson y su respectivo montaje experimental.

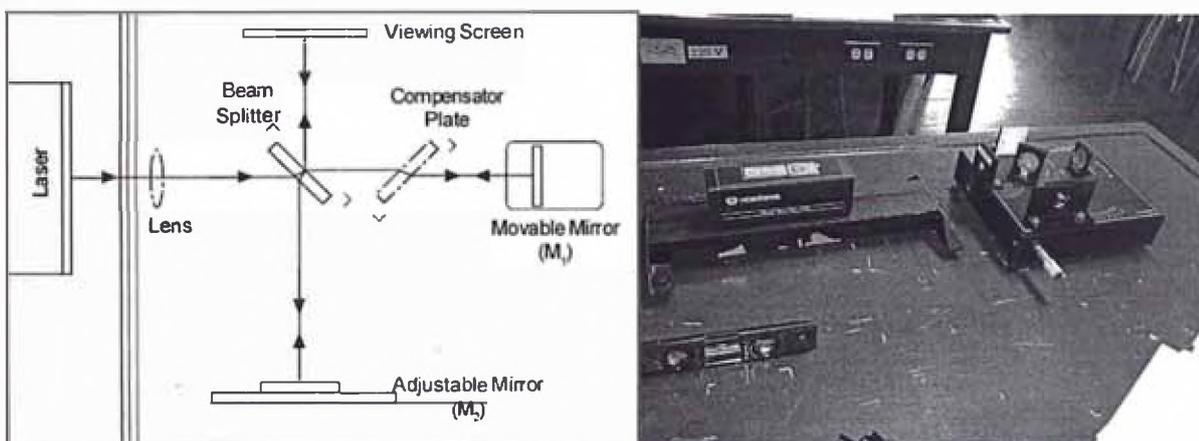


Figura 2: Esquema del dispositivo interferométrico de Michelson (izquierda-Tomada del manual 012-07137A de PASCO) y el montaje experimental (derecha).

El haz de luz láser atraviesa el separador de haz, el cual refleja el 50% de la luz incidente y transmite el otro 50%. Así, el haz incidente se divide en dos haces. Un haz se transmite hacia el espejo móvil M1 y el otro se refleja hacia el espejo fijo M2. Ambos espejos reflejan la luz hacia atrás, hacia el

separador del haz. La mitad de la luz procedente de M1 se refleja desde el separador hacia la pantalla y la mitad de la luz procedente de M2 se transmite a través del separador del haz hacia la pantalla. De esta forma, el haz original de luz se separa y parte de los haces resultantes se vuelven a reunir. Puesto que los haces proceden de la misma fuente, sus fases están altamente correlacionadas. Cuando se coloca una lente entre la fuente de luz y el separador, el haz se dispersa y en la pantalla se observa un patrón de interferencias de anillos brillantes (haces en fase) alternados con anillos oscuros (haces en oposición de fase).

Puesto que los dos haces de luz que interfieren proceden del mismo haz inicial, estaban inicialmente en fase. Su fase relativa, cuando se encuentran en cualquier punto de la pantalla, depende, por tanto, de la diferencia en la longitud de sus caminos ópticos cuando alcanzan ese punto:

$$\frac{\Delta\phi}{2\pi} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \quad (1)$$

Donde $\Delta\phi$: Diferencia de fase de los haces de luz que interfieren sobre la pantalla.

$\Delta\lambda$: Diferencia de camino óptico de los haces de luz al alcanzar la pantalla.

la diferencia de fase y la diferencia de camino son directamente proporcionales.

Moviendo M1, la longitud del camino de uno de los haces puede ser modificada. Puesto que el haz atraviesa el camino entre M1 y el separador dos veces, moviendo M1 hacia el separador $\frac{1}{4}$ de longitud de onda, el separador reducirá el camino óptico de ese haz en $\frac{1}{2}$ de longitud de onda. El patrón de interferencia cambiará. Los radios de los máximos se reducirán de manera que ahora ocuparán la posición de los mínimos. Si M1 se mueve otro $\frac{1}{4}$ de longitud de onda hacia el separador, los radios de los máximos se volverán a reducir, de manera que máximos y mínimos intercambian sus posiciones, pero esta nueva disposición de los anillos será indistinguible del patrón original.

Moviendo lentamente el espejo M1 una distancia d_m (de manera que la diferencia de camino sea $2 d_m$ y contando m , el número de veces que el patrón de anillos recupera su forma original (para que la diferencia de fase sea un número entero de veces 2π), según la ecuación (1.1), la longitud de onda de la luz, λ , puede ser calculada como:

$$\lambda = 2d_m / m \quad (2)$$

o bien, conocida λ , se puede calcular d_m . En la Fig. 3 se muestra un patrón de interferencia adquirido sobre una pantalla formada por una hoja de papel a una distancia aproximada de 1 metro desde el separador de haces.



Figura 3. Franjas del patrón de interferencia sobre una pantalla ubicada a 1 metro del separador de haces.

CAPÍTULO 3

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.1 PROCEDIMIENTO PARA LA VERIFICACIÓN INTERMEDIA DE BLOQUES PATRÓN PLANO PARALELOS GRADO 2

1. Objetivo

Este procedimiento establece las reglas generales que deberá cumplir el metrólogo para efectuar la verificación intermedia de bloques patrón plano paralelos grado 2.

2. Campo de Aplicación

Este procedimiento se aplica a bloques patrón grado 2 desde 0,5 mm hasta 100 mm.

3. Documentos de Referencia

1. PC-012 Procedimiento de Calibración de Pie de Rey 2da Ed. – diciembre 2001 [5]
2. “Guía para la expresión de la incertidumbre en la medición”. ISO/INDECOPI (1º Ed. Junio 1999) [6]
3. Tesis: Desarrollo de Comparador Interferométrico Universal para la calibración de patrones materializados de longitud. Ing. Emilio Prieto Esteban, Universidad Politécnica de Madrid, 2007. [7]

4. Definiciones

1. Bloque planoparalelo [5]:

Medida materializada de longitud en forma de paralelepípedo rectangular con dos caras de medición planas y paralelas entre sí.

Se denomina **bloque patrón** a aquel bloque planoparalelo que se usa para la verificación de instrumentos de medida como micrómetros, relojes comparadores, pie de rey, etc.

Se denomina **bloque patrón de referencia** a aquel bloque planoparalelo que se usa para verificar en el tiempo la longitud nominal de los bloques patrón que se usan en el trabajo de la metrología industrial.

2. Incertidumbre de medición: [1]

Parámetro, asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que podrían razonablemente ser atribuidos al mensurando.

NOTA 1 — La incertidumbre de medida incluye componentes procedentes de efectos sistemáticos, tales como componentes asociadas a correcciones y a valores asignados a patrones. Algunas veces no se corrigen los efectos sistemáticos estimados y en su lugar se tratan como componentes de incertidumbre.

NOTA 2 — En general, la incertidumbre de medida incluye numerosas componentes. Algunas pueden calcularse mediante una evaluación tipo A de la incertidumbre de medida, a partir de la distribución estadística de los valores que proceden de las series de mediciones y pueden caracterizarse por desviaciones típicas. Las otras componentes, que pueden calcularse mediante una evaluación tipo B de la incertidumbre de medida, pueden caracterizarse también por desviaciones típicas, evaluadas a partir de funciones de densidad de probabilidad basadas en la experiencia u otra información.

5. Fundamento del método

La verificación intermedia de un bloque patrón planoparalelo consiste en determinar la diferencia relativa en la longitud del valor nominal entre éste bloque y un bloque patrón de referencia planoparalelo de igual valor nominal, utilizando el interferómetro como medio de comparación. Dicha diferencia se compara luego con la diferencia obtenida en un periodo anterior, y posterior a la última calibración de dicho bloque.

6. Instrumentos y equipos de medición

1. Interferómetro de precisión (modo Michelson) de PASCO Scientific, con las siguientes partes o componentes:

- Plataforma base (5 kg) con tornillo micrométrico
- Espejo ajustable
- Espejo móvil
- Separador de haz
- Dos soportes magnéticos
- Pantalla con escala
- Lente de 18 mm de distancia focal
- Difusor
- Láser con soporte de PASCO Scientific

2. Bloques patrón planoparalelos Grado 2 calibrados

3. Bloques patrón de referencia planoparalelos Grado 2 (no es necesario que estén calibrados)

7. Materiales y/o equipos auxiliares

1. Guantes limpios de algodón.
2. Termómetro de contacto, con exactitud de $\pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$.
3. Termómetro para ambiente, con exactitud de $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$
4. Higrómetro, con exactitud de $\pm 10 \%$

8. Condiciones de la Verificación Intermedia

Temperatura ambiente: $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$

Humedad relativa del aire: $55 \% \pm 10\%$

Variación de temperatura: Menor a $2 \text{ }^\circ\text{C/h}$

9. Limpieza

Seleccionar los bloques planoparalelos patrones a utilizar durante la verificación intermedia y limpiarlos con etanol o bencina, utilizando guantes para evitar tocar éstos con las manos.

10. Consideraciones generales

- Mantener los bloques juntos en el ambiente donde se realice la verificación, no menos de 3 h para alcanzar la estabilidad térmica.
- Ajuste y alineación del láser [8]

Alinee el láser PASCO de la manera siguiente:

- Sitúe la base del interferómetro sobre una mesa de laboratorio con el mango del micrómetro apuntando hacia usted.
- Coloque el banco de alineación del láser a la izquierda de la base del interferómetro, aproximadamente perpendicular a la base y coloque el láser sobre el banco.
- Fije el espejo móvil en el orificio empotrado en la base del interferómetro.
- Encienda el láser. Con los tornillos de nivelación en el banco del láser, ajustar su altura hasta que el rayo láser quede aproximadamente paralela a la parte superior de la base del interferómetro e ilumine el espejo móvil en el centro. (Para comprobar que el haz es paralelo a la base, coloque un pedazo de papel en la trayectoria del haz, con el borde del papel hasta la base. Marque la altura de la luz en el papel y luego cheque con el pedazo de papel, que la altura del haz es el mismo en ambos extremos del banco del láser.)
- Ajuste la posición XY del láser hasta que el rayo sea reflejado por el espejo móvil de regreso a la apertura del láser. Esto se hace más fácilmente haciendo deslizar suavemente y transversalmente la parte trasera del láser respecto del eje del banco de alineación, como se muestra en la Figura 4.

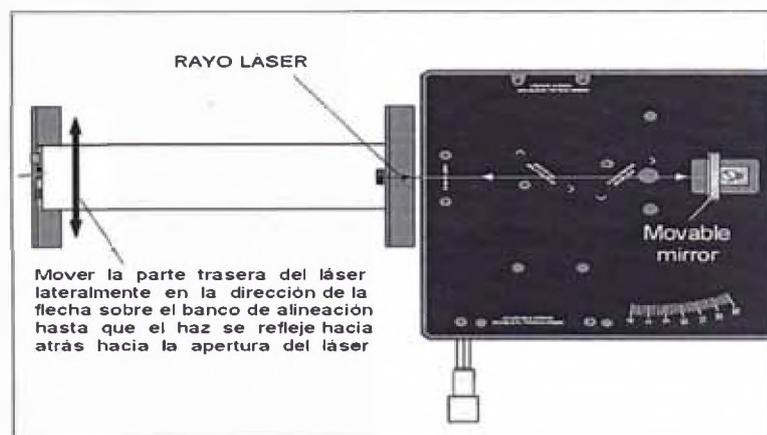


Figura 4. Alineación del láser

11. Procedimiento de verificación intermedia

Determinación de la diferencia relativa del valor de la longitud del valor nominal.

1. Seleccione los bloques entre los bloques patrón calibrados y los bloques patrón de referencia con los que han de llevarse a cabo la verificación intermedia.
2. Seleccione el primer par de bloques, entre los bloques patrón calibrados y los bloques patrón de referencia, ambos del mismo valor nominal.
3. Coloque el bloque de referencia sobre la base del interferómetro en la zona a desnivel donde se posiciona el espejo móvil (ver Figura 5). Viendo la base con el tornillo micrométrico hacia nuestro frente, coloque el bloque a la derecha del espejo y deslícelo empujándolo con el espejo móvil y base del espejo móvil hacia la derecha vía el giro en sentido horario del tornillo micrométrico hasta que el bloque quede en reposo y en contacto con el extremo derecho del desnivel. Está preparado el sistema para el inicio del conteo.
4. Gire el tornillo micrométrico en sentido antihorario hasta la marca de “15” en el nonio del tornillo micrométrico, contando simultáneamente el número de franjas que pasan en un punto referencial de la pantalla. Anotar este valor que representa al número de franjas contadas al deslizamiento del espejo usando el bloque patrón de referencia.
5. Verificar la repetibilidad del sistema procediendo en forma inversa a lo descrito en 4. Girar el tornillo micrométrico en sentido horario regresando de “15” hasta “0” en el nonio y verificar que se cumple el obtener un número de conteo de franjas igual o cercano al valor obtenido anteriormente. (Nota: se puede verificar que si uno sigue girando en sentido horario mas allá del “0” el patrón de anillos sufre una desaceleración y luego cambia de sentido la alternación de luz y sombra sobre la pantalla. Esto nos indica que se llegado al “0” que es donde habíamos partido inicialmente y ya no avanza más el espejo móvil por más que se desee o intente seguir girando el nonio del tornillo micrométrico. Esto es bastante útil para el procedimiento que sigue en 7.)
6. Colocar el nonio en “0” y volver a contar las franjas al ir de “0” a “15” confirmando un número de conteo similar a 4 y 5.
7. Estando en la posición de “15” el bloque referencial queda “suelto”, es decir se puede retirar verticalmente sin tocar o evitar tocar al espejo móvil, y luego reemplazar por el bloque patrón de trabajo a verificar, igualmente colocándolo evitando tocar o empujar el espejo móvil.

8. Proceder como en 5 contando en sentido inverso, de “15” en dirección a “0” pero sin mirar el nonio, sólo contando las franjas hasta el punto en que se note el cambio de giro en las franjas sobre la pantalla precedido por la desaceleración ya conocida, es de esperar que si ha habido un cambio significativo en las distancias relativas de ambos bloques, éste último conteo no llegue a “0” sino a otro valor que será proporcional a la desviación efectiva del bloque patrón de trabajo respecto al bloque patrón de referencia.
9. Repetir de 3 a 8 unas cuatro tomas más.

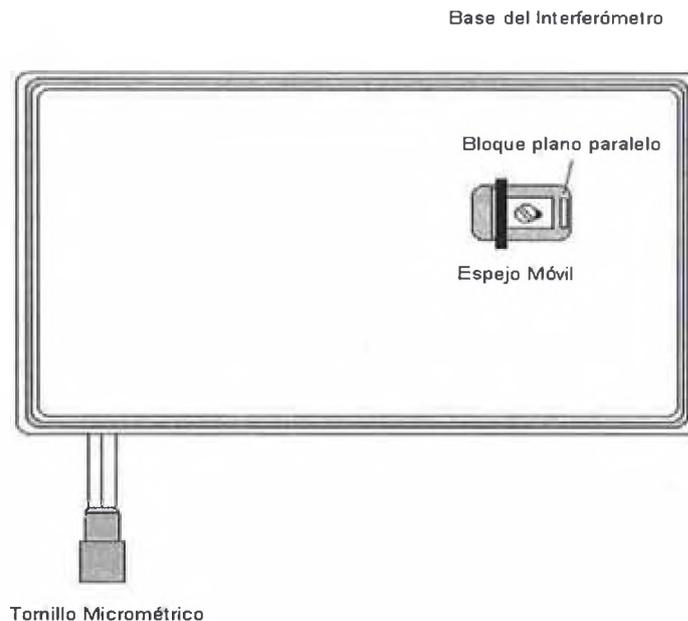


Figura 5. Posición del bloque plano paralelo respecto al espejo móvil.

10. Calcular la diferencia relativa del valor nominal de los bloques, según la ecuación 13.

12. Tratamiento de los resultados

1. Concluida la verificación intermedia, realizar los cálculos para determinar la diferencia relativa entre pares de bloques patrones similares, es decir de iguales valores nominales, entre los bloques calibrados en laboratorio externo y los bloques de referencia.
2. Comparar los errores de diferencia obtenidos con las tolerancias dadas en las normas. Los errores en todos los casos deberán ser menores a los indicados en las normas (ver Anexo A).

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIONES

4.1 CALIBRACIÓN DEL MICRÓMETRO DEL INTERFERÓMETRO DE PRECISIÓN PASCO.

Dado que vamos a hacer uso del interferómetro como un medio para llevar a cabo la comparación de dos bloques patrón planoparalelos, requerimos verificar la graduación del nonio y su relación con respecto al movimiento lineal que transmite al espejo móvil cuando se gira el nonio en algún sentido. Para ello tomamos el valor conocido de un láser estándar He-Ne, que es: $0,6328 \mu\text{m}$ [12] (con una incertidumbre de $2.5 \times 10^{-11} \text{ m}$) y que usaremos luego en la fórmula 2.

Procedemos como sigue:

- Una vez dispuesto el interferómetro en el modo Michelson, alinee el láser de manera que se observe claramente el patrón de interferencias en la pantalla.
- Ajuste el micrómetro en una posición intermedia de la longitud del nonio. En esta posición, la relación entre la lectura del micrómetro y el movimiento del espejo es relativamente más lineal (recomendación del fabricante).
- Gire el micrómetro una vuelta completa en sentido antihorario.
- Continúe girando el tornillo hasta que el cero del tornillo esté alineado con la marca índice. (Estos giros en una misma dirección son para eliminar el efecto mecánico de retroceso, presente en todo sistema mecánico que sufre una inversión en la dirección del movimiento).
- Ajuste la posición de la pantalla de manera que las marcas de la escala milimétrica estén alineadas con uno de los anillos del patrón de interferencia.
- Será más fácil contar los anillos si la marca de referencia está uno o dos anillos alejada del centro del patrón.
- Anote la lectura inicial del micrómetro.
- Gire el micrómetro lentamente en sentido antihorario. Cuente los anillos cuando pasen por la marca de referencia. Continúe hasta que un predeterminado número de anillos hayan pasado la marca (al menos cuente 20).

- Al terminar de contar, el patrón debe ser el mismo que al principio, cuando empezó a contar. Anote la lectura final del micrómetro.
 - Anote dm , la distancia que el espejo se ha movido hacia el separador del haz, de acuerdo con las lecturas del tornillo micrométrico.
 - Anote el número N de anillos que han pasado.
- Repita este procedimiento tres veces.

Dispusimos el interferómetro en el modo Michelson, como se muestra en la Figura 6

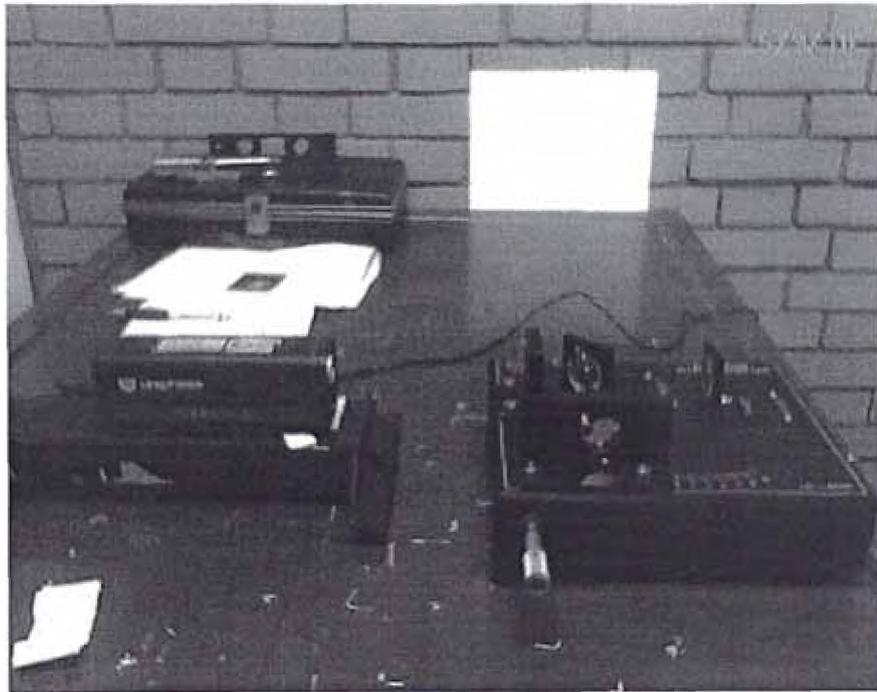


Figura 6. Interferómetro de Michelson. Calibración del tornillo micrométrico.

Los datos experimentales medidos fueron:

Tabla 1. Datos experimentales, Cuentas del número de anillos realizada por tres observadores independientes

Conteo del N° de anillos			dm (u)
Moises	Salvador	Ellis	
76	80	80	25 - 50
76	79	80	50 - 75
77	78	79	75 - 100

Del tratamiento de los datos obtenemos:

Tabla 2. Tratamiento de los datos experimentales de la tabla 1.

Promedio Cuentas "m"	dm neta (u)	dm (um)	μ_{dm} (um)	u (um)
78,7	25	24,9	0,3	1,0
78,3	25	24,8	0,3	1,0
78,0	25	24,7	0,3	1,0

Para el cálculo de incertidumbre en nuestras mediciones, hemos considerado las siguientes fuentes de incertidumbre:

- Incertidumbre debido al error de conteo de las franjas luminosas $\mu(dm)$. (Ver. Tabla 3)

Tabla 3. Estudio del error cometido en el conteo de franjas.

Referencia	Cuentas del N° de anillos				Promedio
	Moises	Salvador	Jorge	Ellig	Cuentas "m"
50	50	51	50	50	50,3
75	74	75	74	74	74,3
100	99	101	99	100	99,8
$\Delta m = m - m_{prom}$	-0,3	0,8	-0,3	-0,3	
	-0,3	0,8	-0,3	-0,3	
	-0,8	1,3	-0,8	0,3	
$\Delta m / M$	0,005	0,015	0,005	0,005	
	0,003	0,010	0,003	0,003	
	0,008	0,012	0,008	0,003	
$(\Delta m/m)_{max}$ parcial	0,0147				
	0,0100				
	0,0124				
$(\Delta m/m)_{max}$	0,015				

Luego, la incertidumbre en la medición de la dm según la fórmula 2:

$$\mu_{(dm)} = \left(\frac{\lambda}{2} \right) \left(m \left(\frac{\Delta m}{m} \right)_{max} \right) \quad (3)$$

De lo anterior se concluye que la unidad mínima del nonio del micrómetro equivale a:

$$1 \text{ u equivale a } (1 \text{ um } \pm 0,3 \text{ um })$$

Con lo cual hemos calibrado la escala del nonio del micrómetro, utilizando la longitud de onda del láser He-Ne como unidad de medida patrón.

4.2 CÁLCULO DEL VALOR DE LA DIFERENCIA RELATIVA DE LA LONGITUD DE LOS BLOQUES PATRONES PLANO PARALELOS Y SU INCERTIDUMBRA ASOCIADA.

Para determinar el valor de la diferencia relativa entre las longitudes nominales de los dos bloques patrones, se utiliza la siguiente fórmula:

$$\nabla_i = d_{xi} - d_{refi} \quad (4)$$

Donde:

$$d_{xi} = \frac{N_{xi}\lambda}{2} + L\alpha(t_{xi} - 20) \quad (5)$$

$$d_{refi} = \frac{N_{refi}\lambda}{2} + L\alpha(t_{refi} - 20) \quad (6)$$

$$\nabla_i = \left(\frac{N_{xi}\lambda}{2} + L\alpha(t_{xi} - 20)\right) - \left(\frac{N_{refi}\lambda}{2} + L\alpha(t_{refi} - 20)\right) \quad (7)$$

$$\nabla_i = \frac{\lambda}{2}(N_{xi} - N_{refi}) + L\alpha(t_{xi} - t_{refi}) \quad (8)$$

$$\nabla_{20} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \nabla_i \quad (9)$$

$$D = \nabla_{20} - g \quad (10)$$

Donde: ∇_i : Diferencia relativa del valor nominal de los bloques en cada medición

L : Longitud Nominal del par de bloques planoparalelo grado 2, en estudio.

α : Coeficiente de expansión térmica del bloque.

d_{refi} : Distancia recorrida del espejo móvil usando el bloque de referencia.

d_{xi} : Distancia recorrida del espejo móvil usando el bloque calibrado.

N_{ref_i} : Número de franjas contadas correspondiente a d_{ref_i} .

N_{x_i} : Número de franjas contadas correspondiente a d_{x_i} .

g : Corrección debida al espejo separador de haz (divisor de amplitud) que es “plano” dentro de $\frac{1}{4}$ del valor de la longitud de onda en ambos lados. Su contribución al valor de la diferencia relativa ∇_i es nulo por la naturaleza aleatoria alrededor del eje de movimiento, pero sí conlleva una incertidumbre asociada.

∇_{20} : Diferencia relativa promedio del valor nominal de los bloques en cada medición a la temperatura de referencia de 20 °C.

D : Diferencia relativa del valor nominal de los bloques.

Entonces la relación funcional a partir de la cual se expresará el cálculo de la incertidumbre de la diferencia relativa de longitudes nominales, estará dada por:

$$D = f(\nabla_{20}; \lambda; N_x; N_{ref}; \alpha; t_x; t_{ref}; g) \quad (11)$$

A partir de (13) tenemos que la incertidumbre estándar combinada $\mu_c(D)$ de la diferencia relativa de longitudes nominales ∇_{20} está dada por la Ley de Propagación de Incertidumbres, ec. (3)

Desarrollando para la ecuación 14 tenemos:

$$\mu_1 = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (\nabla_i - \nabla_{20})^2}$$

$$\mu_2 = \left| \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N (Nx_i - Nref_i) \right| * \mu_{(\lambda)}$$

$$\mu_3 = \frac{\lambda}{2} * \mu_{(Nx)}$$

$$\mu_4 = \frac{\lambda}{2} * \mu_{(N_{ref})}$$

$$\mu_5 = \left| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N L * (t_{x_i} - t_{ref_i}) \right| * \mu_{(a)}$$

$$\mu_6 = \alpha * L * \mu_{(t_x)}$$

$$\mu_7 = \alpha * L * \mu_{(t_{ref})}$$

$$\mu_8 = \mu_{(g)} =$$

Con:

$$U = 2 * \sqrt{\sum_{i=1}^N \mu_i^2} \quad (12)$$

Numéricamente, usando una hoja Excel calculamos el valor de la diferencia entre los valores de longitud obtenida relativa a los dos bloques y la reportamos en micrómetros, así como de su incertidumbre asociada en la misma unidad de medida.

Tabla N° 4. Evaluación de la incertidumbre en hoja de cálculo de Excell.

Datos					
$\lambda =$	638.305	nm	\pm	8.603	nm : Longitud de onda del láser
$\alpha =$	1.15E-05	$^{\circ}\text{C}^{-1}$	\pm	1.0E-06	$^{\circ}\text{C}^{-1}$: Coeficiente de expansión térmica para bloques de acero
$t_{ref} =$	20	$^{\circ}\text{C}$	\pm	0.035	$^{\circ}\text{C}$: Temperatura de referencia
$a =$	0	m			
N =	5				: Número de mediciones
L =	1.0	mm			: Valor nominal del bloque

Cálculo de la corrección											
N° de mediciones N	N_d	N_{ref}	t_{d1}	t_{ref1}	d_{d1}	d_{ref1}	V_1	$V_{20} (\mu\text{m})$	$V_{20} (\mu\text{m})$	$(N_{d1} - N_{ref1})/2$	$t_{d1} - t_{ref1}$
1	15	12	22.1	22.0	4.81E-06	3.85E-06	9.59E-07	8,62E-07	0,88	1,5	0,1
2	15	12	22.1	22.0	4.81E-06	3.85E-06	9.59E-07			1,5	0,1
3	15	12	22.0	22.0	4.81E-06	3.85E-06	9.57E-07			1,5	0,0
4	14,5	12,5	22.1	22.1	4.65E-06	4.01E-06	6.38E-07			1,0	0,0
5	14,5	12	22.0	22.1	4.65E-06	3.85E-06	7.97E-07			1,3	-0,1

Cálculo de la incertidumbre de la Verificación intermedia									
Repetibilidad (μ_1)	Longitud de onda del láser (μ_2)	Conteo de franjas del bloque a verificar (μ_3)	Conteo de franjas del bloque de referencia (μ_4)	Coeficiente de expansión térmica (μ_5)	Temperatura del bloque a verificar (μ_6)	Temperatura del bloque de referencia (μ_7)	Gradiente (1 franja en repetibilidad acelerada) (μ_8)	U_V (m)	U_V (μm)
6,41E-08	5,8072E-09	6,94626E-08	5,679E-08	1,2E-11	2,01E-10	2,01E-10	9,21313E-08	1,4379E-07	0,29

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y PROYECCIONES

5.1 CONCLUSIONES

1. Se corroboró la mayor precisión de resolución del interferómetro basado en la longitud de onda del láser como unidad de medida frente a las tolerancias de los bloques patrones longitudinales clase 2, logrando con esto mediciones que sirven para verificar la relación entre la diferencia de longitud calculada entre un bloque patrón plano paralelo calibrado y otro de referencia, de iguales valores nominales de longitud de fábrica e igual clase 2, versus la tolerancia para el bloque calibrado según la norma ASME B89.1.9-2002 en un instante dado y en el tiempo.
2. Para dos bloques patrones plano paralelos con una diferencia relativa de longitud nominal de fábrica entre ellos de 1 μm , la diferencia medida con el presente método fué de 0,86 μm con una incertidumbre de 0,29 μm , resultado que considerando la incertidumbre reproduce el valor nominal de la diferencia inicial de 1 μm .
3. Es de esperar que para bloques de igual valor nominal de longitud de fábrica, la diferencia medida por este método tenga validez dado el caso extremo estudiado y mencionado en 2.
4. La incertidumbre obtenida en el método, calculado una única vez, para poner a uso el método es de menor valor que las tolerancias correspondiente a los bloques de grado 2 (0,45 μm para bloque de 0,5 mm grado 2)
5. El interferómetro configurado en el modo de Michelson sirve para poder medir la longitud de onda de una luz monocromática de fuente desconocida o para poder calibrar el tornillo micrométrico usando como patrón la longitud de onda del láser. Dado que el valor de la longitud de onda para el láser He-Ne ya ha sido bien medido, tomamos ésta referencia para calibrar el nonio del tornillo micrométrico, corroborando la información del fabricante que una unidad mínima del nonio equivale a 1 μm (dentro de la incertidumbre estimada).

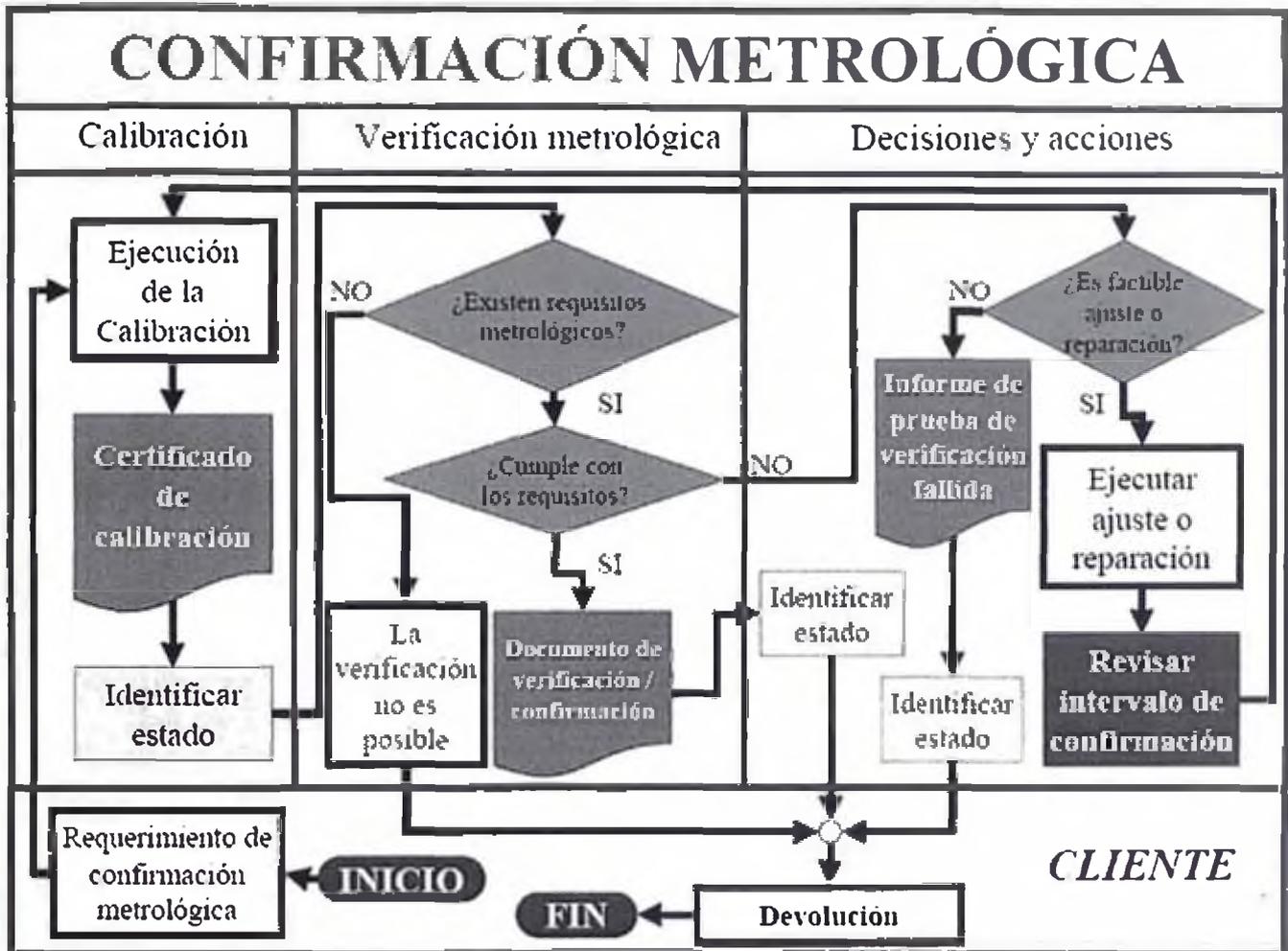
5.2 TRABAJO A FUTURO

El presente trabajo si bien se pensó para un alcance de bloques que van desde 0,5 mm hasta 100 mm, con la configuración actual del experimento y/o mesa de trabajo, el espacio entre el espejo móvil y el extremo derecho de su carril en la base del interferómetro (ver esquema 1), permite únicamente que se pueda insertar y hacer pruebas con bloques menores a 3 mm de longitud nominal. Se propone modificar la base del interferómetro de tal manera que pueda insertarse de manera lo más fija y estable posible respecto a la base del interferómetro, un “tope” auxiliar a la derecha respecto al espejo móvil viendo la base del interferómetro con el tornillo micrométrico a nuestro frente, de tal manera que pueda insertarse en el espacio intermedio, bloques de mayores longitudes hasta 100 mm.

ANEXO A

Tabla N° 5: Tolerancias de desviación al nominal y de variación de longitud, según grado de calidad de los bloques patrón (Norma ISO 3650).

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud nominal mm		Desviaciones al nominal y diferencias de longitud máximas admisibles, μm							
		Grado K		Grado 0		Grado 1		Grado 2	
		Desviaciones	Diferencias	Desviaciones	Diferencias	Desviaciones	Diferencias	Desviaciones	Diferencias
Más de	Hasta inclusive								
-	10	- 0,20	0,05	- 0,12	0,10	- 0,20	0,16	- 0,40	0,30
10	25	- 0,30	0,05	- 0,14	0,10	- 0,30	0,16	- 0,60	0,30
25	50	- 0,40	0,06	- 0,20	0,10	- 0,40	0,18	- 0,80	0,30
50	75	- 0,50	0,06	- 0,25	0,12	- 0,50	0,18	- 1,00	0,35
75	100	- 0,60	0,07	- 0,30	0,12	- 0,60	0,20	- 1,20	0,36
100	150	- 0,80	0,08	- 0,40	0,14	- 0,80	0,20	- 1,60	0,40
150	200	- 1,00	0,09	- 0,50	0,16	- 1,00	0,25	- 2,00	0,40
200	250	- 1,20	0,10	- 0,60	0,16	- 1,20	0,25	- 2,40	0,45
250	300	- 1,40	0,10	- 0,70	0,18	- 1,40	0,25	- 2,80	0,50
300	400	- 1,80	0,12	- 0,90	0,20	- 1,80	0,30	- 3,60	0,50
400	500	- 2,20	0,14	- 1,10	0,24	- 2,20	0,35	- 4,40	0,60
500	600	- 2,60	0,16	- 1,30	0,26	- 2,60	0,40	- 5,00	0,70
600	700	- 3,00	0,18	- 1,50	0,30	- 3,00	0,45	- 6,00	0,70
700	800	- 3,40	0,20	- 1,70	0,30	- 3,40	0,50	- 6,50	0,80
800	900	- 3,80	0,20	- 1,90	0,35	- 3,80	0,50	- 7,50	0,90
900	1 000	- 4,20	0,25	- 2,00	0,40	- 4,20	0,60	- 8,00	1,00



Cuadro N° 2: Relación entre ajuste, calibración y verificación de un equipo de medición.

REFERENCIAS

- [1] Vocabulario Internacional de Metrología Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM) 3ra edición JCGM 200:2008
- [2] MITUTOYO Boletín Técnico Enero 2010 N° 4
- [3] NORMA TÉCNICA PERUANA NTP-ISO/IEC 17025: 2006
- [4] Melissinos an J. Napolitano GUÍA DE LABORATORIO “INTERFEROMETRÍA: ”Experiments in modern physics”, A. C, , 2da ed., Academic Press, USA (2003), ISBN 0-12-489851-3.
- [5] SNM-INDECOPI, PC-012 Procedimiento de Calibración de Pie de Rey 2da ed. – Dic. 2001
- [6] “Guía para la expresión de la incertidumbre en la medición”. ISO/INDECOPI (1º Edición Junio 1999)
- [7] Ing. Emilio Prieto Esteban, Tesis: Desarrollo de Comparador Interferométrico Universal para la calibración de patrones materializados de longitud. Universidad Politécnica de Madrid, 2007.
- [8] Instruction Manual and Experiment Guide for the PASCO scientific Models OS-9255A thru OS-9258A “PRECISION INTERFEROMETER” 1990 PASCO scientific
- [9] Nota Técnica NT 005/03 L&S CONSULTORES C.A. “Verificación y Calibración: Mitos y Realidades” , 2009.
- [10] E. Hetch, A.. Zajac Óptica Addison Wesley, Masachutes. Pag. 304-308, (1974)
- [11] Ted Doiron and John Beers. The Gauge Block Handbook, National Institute of Standards and Techn 1974)
- [12] <http://en.wikipedia.org/wiki/Metre> (Artículo de Wikipedia sobre el Metro)