

GUIA PARA LA CALIBRACIÓN DE MICRÓMETRO PARA EXTERIORES

INM/GTM-L/02

Bogotá

Fecha publicación 2021-12-28

Versión No.1



CONTENIDO

1. OBJETIVO.....	6
2. ALCANCE	6
3. ABREVIATURAS, SIGLAS Y SÍMBOLOS	6
4. DEFINICIONES.....	8
5. GENERALIDADES	10
6. DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES	12
6.1. Método de calibración.....	12
6.2 Equipamiento y materiales.....	12
6.2.1. Equipamiento.....	12
6.2.2. Materiales.....	12
6.3. Condiciones ambientales.....	13
6.4. Proceso de calibración.....	13
6.4.1 Documentación y limpieza instrumental.....	13
• Registro Documental.....	13
• Limpieza Instrumental	13
6.4.2. Revisión Integridad mecánica del micrómetro.....	13
• Legibilidad de la lectura.....	14
• Sistema de fijación	14
• Aislante térmico (cuando aplique).....	14
• Presencia y funcionalidad del trinquete	14
6.4.3. Revisión de la funcionalidad y operatividad del micrómetro.....	14
• Movilidad del husillo	14
• Desajuste del husillo.....	15
• Planitud	15
6.4.4. Estabilización Térmica.....	17
6.4.5 Proceso de medición y toma datos	17
6.5. Estimación de la incertidumbre de medición	18
6.5.1. Fuentes de incertidumbre de medición	21
6.5.2. Incertidumbre expandida de medición.	28

6.6. Presentación de los resultados	29
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	30
Bibliografía	30
8. ANEXOS	31

PRESENTACIÓN

Esta guía es el resultado del trabajo conjunto entre el Instituto Nacional de Metrología de Colombia - INM, miembros de la Red Colombiana de Metrología - RCM (Grupos de Trabajo por Magnitud) y el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia – ONAC con el fin armonizar los métodos de calibración y propender por la uniformidad y coherencia en criterios técnicos mínimos a emplear por los laboratorios de calibración y usuarios de estos métodos. Esta guía presenta metodologías reconocidas internacionalmente y se ha elaborado recogiendo el conocimiento y la experiencia de los miembros del equipo de trabajo, de tal forma que pueda ser usada como base para la elaboración de procedimientos e instructivos prácticos por parte de los laboratorios de calibración y ensayo.

En este sentido lo consignado en esta guía se constituye en un referente para:

- a. El Organismo Nacional de Acreditación de Colombia - ONAC.
- b. Los laboratorios de calibración y ensayo que involucren los métodos o criterios técnicos consignados en esta guía.
- c. Los laboratorios internos de las organizaciones o fabricantes que requieran el uso de estos métodos de calibración o criterios técnicos.

EQUIPO DE TRABAJO

Este documento fue elaborado en el espacio del Grupo Técnico por Magnitud de Longitud de la Red Colombiana de Metrología. Para el desarrollo del documento se contó con la participación del Instituto Nacional de Metrología de Colombia - INM profesional Víctor Hugo Gil Gil, David Alonso Plazas Fernández, Jonnathan Fernando González Martínez, Jorge Luis Galvis Arroyave el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia - ONAC y los laboratorios de calibración que han desarrollado la magnitud relacionada y que han participado en las reuniones del grupo técnico.

REVISIÓN

Mesa de Trabajo Técnico Científico de la Subdirección de Metrología Física

1. OBJETIVO

Este documento tiene como objetivo proporcionar **una guía técnica para los procedimientos de calibración de micrómetros de exteriores**, para los sectores educativos e industriales involucrados en la metrología de la magnitud de longitud.

Esta guía está estructurada y redactada de acuerdo con los términos establecidos en el Vocabulario Internacional de Metrología (VIM) y los procedimientos para la estimación de incertidumbre presentes en la Guía para la Estimación de Incertidumbre (GUM)

2. ALCANCE

La presente guía está dirigida a todo los sectores educativos e industriales que desean realizar procedimientos de calibración de **micrómetros de exteriores** tanto analógicos como digitales. Para micrómetros digitales se debe tener presente que la incertidumbre por paralaje no se incluye dentro del procedimiento de calibración.

Esta guía se aplica a micrómetros con valor de división de escala superior o igual a 0.001 mm con un intervalo de medición de 0 mm a 25 mm

Fuera del alcance de la presente guía de calibración se encuentran los micrómetros de interiores, de espesor, de tres contactos y los que tienen su escala en unidades de pulgadas.

3. ABREVIATURAS, SIGLAS Y SÍMBOLOS

μm	Símbolo que denota el micrómetro
$u(x)$	Incertidumbre típica
$u_c(x)$	Incertidumbre combinada
U	Incertidumbre expandida
U_{cert}	Incertidumbre de calibración del bloque reportado en el certificado de calibración
k	Factor de cobertura
p	Nivel de confianza
v_{eff}	Grados efectivos de libertad
α_p	Coefficiente de expansión térmica del bloque patrón

α_i	Coefficiente de expansión térmica del instrumento (micrómetro)
$\Delta\alpha_i$	Variación del coeficiente de expansión térmica del material con que está fabricado el micrómetro
$\Delta\alpha_p$	Variación del coeficiente de expansión térmica del material con que está fabricado el bloque parón
n	Número de mediciones realizadas
θ_p	Diferencia de temperatura del patrón respecto a la temperatura de referencia (20 °C)
θ_i	Diferencia de temperatura del instrumento (micrómetro), respecto a la temperatura de referencia (20 °C)
e	Error de medida
s_p	Desviación estándar
l_i	Valor medio de las lecturas indicadas por el instrumento
bp	Valor del bloque patrón según el certificado de calibración
rep	Repetibilidad
res	Resolución del instrumento
res_t	Resolución del indicador de temperatura
$u(e_{par})$	Incertidumbre por el efecto de paralaje
$u(e_{pla})$	Incertidumbre debida a la planitud de las superficies de medición
$u(e_{ps})$	Incertidumbre por paralelismo en las superficies de medición
v_i	Número de grados de libertad
e_{par}	Error por paralaje
DO	Desplazamiento del observador respecto a la línea perpendicular de observación
DF	Distancia entre el observador y el instrumento o distancia focal
h	Holgura entre el cilindro principal y el tambor
dh	Desplazamiento lineal del husillo en una revolución del tambor
U_{ct}	Incertidumbre que indica el certificado del termómetro
Δt_l	Variación de temperatura del laboratorio

e_{pla}	Error de planitud de las superficies de medición
e_{ps}	Error de paralelismo entre las superficies de medición

4. DEFINICIONES

Calibración (1) (2.39): 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 Frecuentemente se interpreta que únicamente la primera etapa de esta definición corresponde a la calibración.

Error de medida (1) (2.16).

Diferencia entre un valor medido de una magnitud y un valor de referencia.

Incertidumbre de medida (1) (2.26).

Parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando, a partir de la información que se utiliza

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

NOTA 2 El parámetro puede ser, por ejemplo, una desviación típica, en cuyo caso se denomina incertidumbre típica de medida (o un múltiplo de ella), o la semiamplitud de un intervalo con un probabilidad de cobertura determinada.

NOTA 3 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.

NOTA 4 En general, para una información dada, se sobreentiende que la incertidumbre de medida está asociada a un valor determinado atribuido al mensurando. Por tanto, una modificación de este valor supone una modificación de la incertidumbre asociada.

Verificación (1) (2.44).

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

Intervalo de medida (1) (4.7)

Conjunto de valores de magnitudes de una misma naturaleza que un instrumento o sistema de medida dado puede medir con una incertidumbre instrumental especificada, en unas condiciones determinadas.

Resolución de un dispositivo visualizador (1) (4.15)

Mínima diferencia entre indicaciones visualizadas, que puede percibirse de forma significativa.

Repetibilidad de medida (1) (2.21)

Precisión de medida bajo un conjunto de condiciones de repetibilidad.

Trazabilidad metrológica (1) (2.41)

Propiedad de un resultado de medida por la cual el resultado puede relacionarse con una referencia mediante una cadena ininterrumpida y documentada de calibraciones, cada una de las cuales contribuye a la incertidumbre de medida.

NOTA 1 En esta definición, la referencia puede ser la definición de una unidad de medida, mediante una realización práctica, un procedimiento de medida que incluya la unidad de medida cuando se trate de una magnitud no ordinal, o un patrón.

NOTA 2 La trazabilidad metrológica requiere una jerarquía de calibración establecida.

NOTA 3 La especificación de la referencia debe incluir la fecha en la cual se utilizó dicha referencia, junto con cualquier otra información metrológica relevante sobre la referencia, tal como la fecha en que se haya realizado la primera calibración en la jerarquía.

NOTA 4 Para mediciones con más de una magnitud de entrada en el modelo de medición, cada valor de entrada debiera ser metrológicamente trazable y la jerarquía de calibración puede tener forma de

estructura ramificada o de red. El esfuerzo realizado para establecer la trazabilidad metrológica de cada valor de entrada debería ser en proporción a su contribución relativa al resultado de la medición.

NOTA 5 La trazabilidad metrológica de un resultado de medida no garantiza por sí misma la adecuación de la incertidumbre de medida a un fin dado, o la ausencia de errores humanos.

NOTA 6 La comparación entre dos patrones de medida puede considerarse como una calibración si ésta se utiliza para comprobar, y si procede, corregir el valor y la incertidumbre atribuidos a uno de los patrones.

NOTA 7 La ILAC considera que los elementos necesarios para confirmar la trazabilidad metrológica son: una cadena de trazabilidad metrológica ininterrumpida a un patrón internacional o a un patrón nacional, una incertidumbre de medida documentada, un procedimiento de medida documentado, una competencia técnica reconocida, la trazabilidad metrológica al SI y los intervalos entre calibraciones (véase ILAC P-10:2002).

NOTA 8 Algunas veces el término abreviado “trazabilidad” se utiliza en lugar de “trazabilidad metrológica” así como para otros conceptos, como trazabilidad de una muestra, de un documento, de un instrumento, de un material, etc., cuando interviene el historial (“traza”) del elemento en cuestión. Por tanto, es preferible utilizar el término completo “trazabilidad metrológica” para evitar confusión.

5. GENERALIDADES

Los micrómetros de exteriores son instrumentos de alta precisión, diseñados para realizar mediciones directas de magnitudes lineales asociadas a mensurandos de diversas dimensiones y geometrías. En la actualidad, existen micrómetros de diferentes tipos como: exteriores, interiores y profundidad. Los micrómetros son comúnmente empleados cuando la resolución y exactitud de un pie de rey son insuficientes para los requerimientos de la medición.

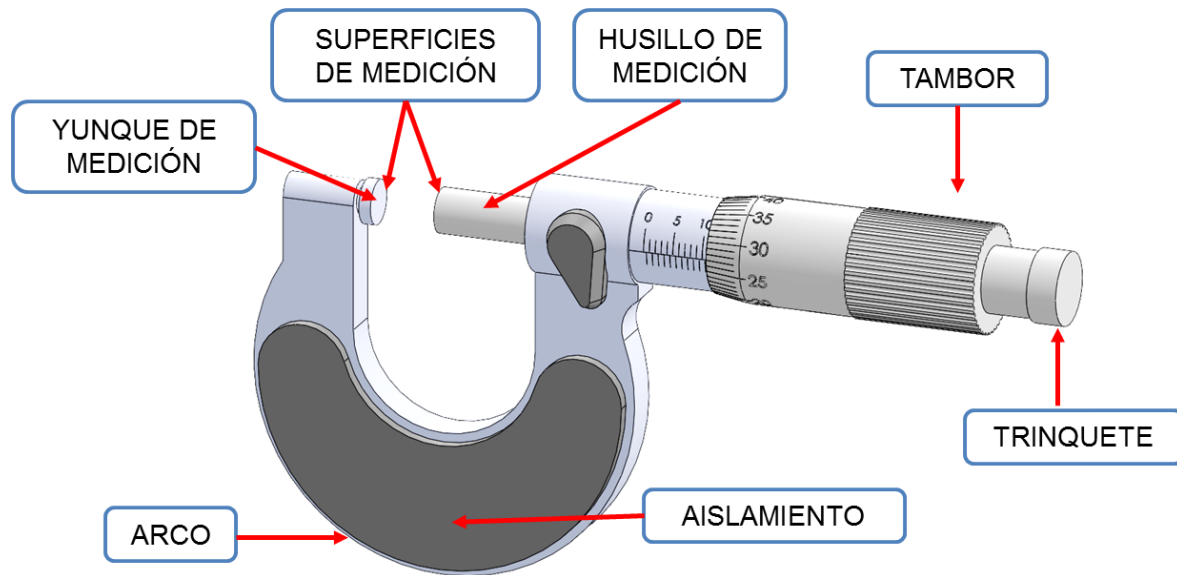
Como se observa en la figura 1 y 2 un micrómetro de exteriores está compuesto por partes tanto fijas como móviles; las partes fijas son aquellas que durante el proceso de medición no presentan ningún desplazamiento y las partes móviles son aquellas que permiten ajustar las superficies de medición a las caras externas del mensurando.

Partes fijas del micrómetro:

- **Yunque de medición** es una de las superficies planas empleadas para las mediciones.
- **Arco** usualmente se encuentra recubierto por un material aislante que evita la transferencia de calor entre del usuario y el instrumento de medición.
- **Cilindro de escala fija** se emplea para visualizar la parte entera de la longitud del mensurando.

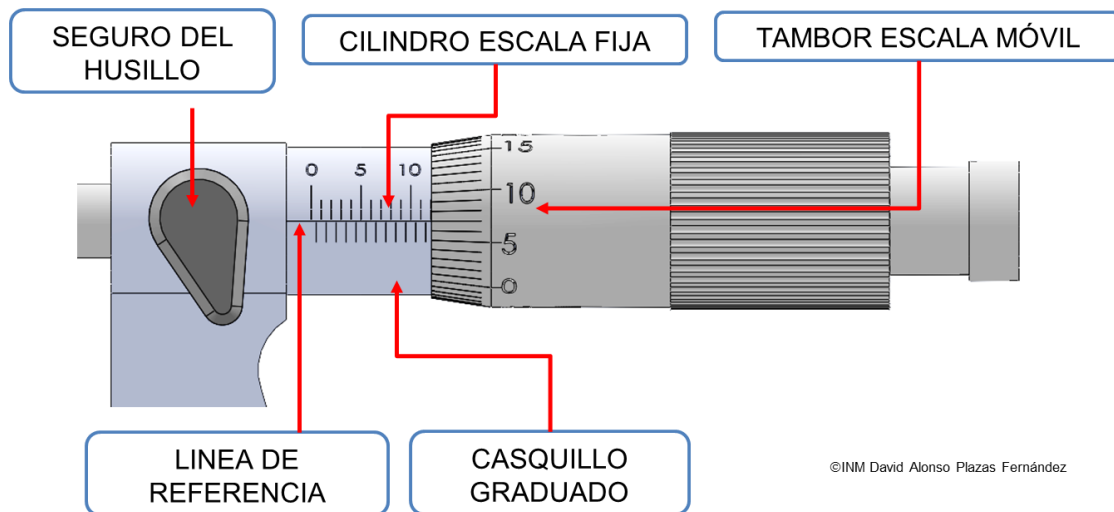
Partes móviles del micrómetro:

- **Husillo de medición** se encarga de fijar el mensurando entre las superficies de medición del micrómetro.
- **Tambor de escala móvil** se emplea para desplazar el husillo y permite visualizar la parte decimal del valor de longitud asociado al mensurando
- **Trinquete** sirve ajustar el tambor y controlar la fuerza que se aplica sobre la superficie del mensurando.



©INM David Alonso Plazas Fernández

Figura 1 Partes del micrómetro



©INM David Alonso Plazas Fernández

Figura 2 Partes del micrómetro

6. DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES

6.1. Método de calibración

El método de calibración es comparación directa. Consiste en realizar mediciones con el micrómetro teniendo como referencia bloques patrón debidamente calibrados.

6.2 Equipamiento y materiales

6.2.1. Equipamiento

Antes de iniciar el proceso de calibración de un micrómetro se debe revisar la resolución del instrumento (*res*), ya que esta determina el grado de exactitud que deben poseer los bloques patrón; De modo que, para micrómetros con una $res > 0.010$ mm se deben emplear bloques patrón de grado 2 o mejor, y para micrómetros con una $res \leq 0.010$ mm se deben emplear bloques patrón grado 1 o mejor. Luego de elegir el grado de los bloques patrón, se seleccionan los **puntos de calibración** que corresponden a valores nominales de longitud equidistantes y que permiten abarcar todo el intervalo de medición del instrumento. Para los micrómetros existen juegos de bloques patrón específicos que no permiten que haya posiciones homólogas del tambor de escala móvil y evitan que la cifra decimal de la longitud de cada bloque se repita. A continuación se presentan los valores nominales de uno de estos juegos de bloques patrón: 2.5 mm , 5.1 mm , 7.7 mm , 10.3 mm , 12.9 mm , 15 mm , 17.6 mm , 20.2 mm , 22.8 mm , y 25 mm . Esto con el fin de evaluar el comportamiento del tornillo a lo largo de todo el intervalo de medición y en varios puntos de la circunferencia de las superficies del husillo y el yunque.

Posterior a la selección del juego de bloques que se empleará en la calibración, se deberá seleccionar un indicador de temperatura con resolución 0.1 °C o mejor, debidamente calibrado; y un indicador de humedad relativa con resolución de 1 % HR o mejor.

6.2.2. Materiales

- Guantes de algodón o nitrilo
- Solvente para limpieza
- Vaselina
- Bomba de aire
- Mármol o superficie plana de referencia
- Paño suave

6.3. Condiciones ambientales

Las condiciones ambientales de las instalaciones donde se realiza la calibración, deben permanecer a una temperatura de $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ y humedad relativa de $50\% \text{ HR} \pm 10\% \text{ HR}$. Durante la calibración la variación de la temperatura no debe superar 1 °C .

6.4. Proceso de calibración

6.4.1 Documentación y limpieza instrumental

Previo a realizar el proceso de calibración es necesario realizar el registro documental y la limpieza del micrómetro de acuerdo con el siguiente procedimiento:

- **Registro Documental**

Registrar la información básica que le permita al personal del laboratorio la plena identificación del instrumento de medición. Se sugiere anotar los siguientes datos: el nombre del fabricante o marca comercial, número de serie o de identificación, modelo, intervalo de medida y resolución.

- **Limpieza Instrumental**

Limpiar los bloques patrón con una solución en partes iguales de varsol y alcohol al 70%, debido a que para protegerlos de la corrosión se les suele aplicar aceites lubricantes como vaselina en su superficie.

Limpiar la superficie de medición del micrómetro, ya que dependiendo de las condiciones de almacenamiento o de uso estas superficies, pueden estar cubiertas por partículas de polvo o suciedad que pueden afectar las mediciones realizadas con el instrumento.

6.4.2. Revisión Integridad mecánica del micrómetro

Posterior a la limpieza tanto del instrumento de medición como de los elementos de calibración se debe revisar el buen funcionamiento de las piezas mecánicas que componen al micrómetro debido a que estos instrumentos suelen ser propensos a desajustarse por la manipulación inapropiada o la frecuencia de uso que se les suele dar. A continuación, se enumeran las revisiones que se deben hacer previas a la calibración.

- **Legibilidad de la lectura**

Con el tiempo las escalas numéricas marcadas sobre el cilindro fijo y el tambor móvil de los micrómetros analógicos van perdiendo su legibilidad, es por esto por lo que se debe validar si las escalas del instrumento se encuentran en condiciones óptimas de medición.

En el caso de micrómetros digitales se debe verificar que la pantalla LCD funcione correctamente, de lo contrario, se sugiere cambiar la batería del instrumento y validar si el instrumento se encuentra en condiciones óptimas de medición.

- **Sistema de fijación**

Luego de validar la legibilidad de la lectura se debe verificar el buen funcionamiento del sistema de fijación de la medición que se realiza por medio de un tornillo o de una palanca. Si el dispositivo de fijación funciona adecuadamente, el husillo no se debe desplazar. Esta revisión es necesaria para garantizar que el instrumento es capaz de fijar los valores de medición y evitar errores aleatorios o sistemáticos por el libre desplazamiento del husillo.

- **Aislante térmico (cuando aplique)**

Verificar que el aislante del arco esté bien adherido y asegurado al instrumento de medición, para evitar errores en las mediciones debidos a la transferencia de calor entre el usuario y el micrómetro.

- **Presencia y funcionalidad del trinquete**

Puesto que la fuerza de medición aplicada con los micrómetros de exteriores sobre los mensurandos debe ser constante para asegurar resultados repetibles, es necesario verificar la existencia y el buen funcionamiento del trinquete; Para esto, se debe posicionar el husillo a la mitad de su recorrido, accionar el dispositivo de fijación del micrómetro y posteriormente hacer girar el trinquete, si este se encuentra en buen estado, producirá un sonido ocasionado por el pasar de los dientes sobre el piñón del micrómetro y el husillo conservará la posición en la cual fue fijado.

6.4.3. Revisión de la funcionalidad y operatividad del micrómetro.

Luego de verificar la integridad mecánica del micrómetro se deben realizar las siguientes pruebas para determinar la correcta funcionalidad del micrómetro:

- **Movilidad del husillo**

Para verificar que el husillo tiene un movimiento libre y no presenta dificultad en su desplazamiento, se debe desplazar con movimientos suaves y continuos a lo largo de todo su recorrido al menos dos (2) veces.

- **Desajuste del husillo**

Para determinar si el husillo presenta algún desajuste, este debe ser desplazado cerca a la marcación de cero del cilindro de escala fija evitando que las superficies de medición estén en contacto. Con los dedos pulgar e índice ejerciendo la menor fuerza posible intentar mover la superficie de medición del husillo de forma transversal al eje de desplazamiento del mismo .

- **Planitud**

La planitud de las superficies de medición de los micrómetros de exteriores (e_{pla}) se puede comprobar utilizando planos ópticos, como lo ilustra la figura 3.

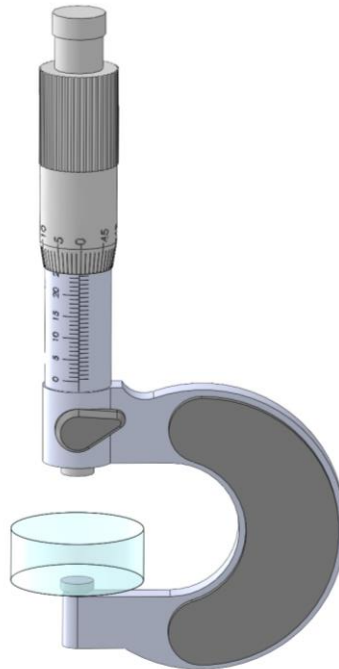


Figura 3 Prueba de planitud

Se cuenta el número de franjas, cada franja equivale a $0.32 \mu\text{m}$ como lo indica el catálogo Mitutoyo (2), esta prueba se realiza tanto para el yunque como para el husillo.

- **Paralelismo**

Para verificar el paralelismo entre las superficies; existe un juego de paralelas ópticas el cual cuenta con 4 paralelas ópticas con longitudes que aumentan escalonadamente en pasos de 0.125 mm , esto permite que se pueda realizar la prueba en 4 posiciones diferentes en una vuelta completa del tambor.

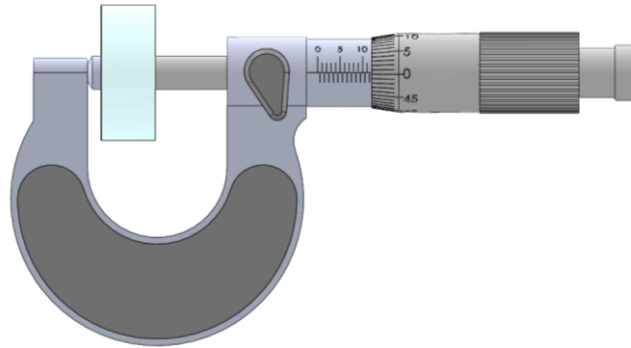


Figura 4 Prueba de paralelismo entre superficies

Cada paralela óptica se debe sujetar con el micrómetro de forma que sus caras queden en contacto con las superficies de medición tanto del husillo como del yunque, y para garantizar que las paralelas ópticas queden bien sujetas se debe aplicar presión sobre estos con dos vueltas de trinquete. Posteriormente se debe realizar una revisión visual para determinar la cantidad de franjas o anillos de interferencia que se forman sobre cada superficie de medición; entre mayor sea esta cantidad mayor va a ser el error asociado a cada superficie.

Para micrómetros con intervalos de medición de 0 mm a 25 mm ninguna de las dos superficies de medición debe tener más de 6 franjas o anillos de interferencia de acuerdo a la norma NTC-4352 (3). La ausencia de franjas indica que está muy plana la superficie de medición, esto se observa cuando el micrómetro está nuevo o bien conservado. También puede ocurrir que la superficie de medición tenga un desgaste demasiado profundo haciendo que no se puedan visualizar las franjas.



Figura 5 Paralelas ópticas y franjas de interferencia

Para finalizar la verificación del micrómetro se recomienda limpiar nuevamente las superficies de medición para evitar posibles errores en las lecturas durante el proceso de calibración.

6.4.4. Estabilización Térmica

Como consecuencia de la manipulación durante el proceso de revisión de funcionalidad y operatividad, el micrómetro debe dejarse en reposo junto con los bloques patrón sobre el mármol o la mesa de planitud hasta alcanzar la temperatura ambiente. El tiempo de estabilización térmica tanto de los instrumentos como de los bloques patrón debe ser como mínimo de 2 horas ya que esta evita errores o desviaciones en los valores de medición. Los micrómetros de 0 mm a 25 mm se deben posicionar junto con el bloque patrón a medir sobre un soporte como el presentado en la figura 4



Figura 6 Soporte para micrómetro

6.4.5 Proceso de medición y toma datos

Luego de que el micrómetro y los bloques patrón se encuentren a la misma temperatura, se verifica que el micrómetro se encuentre en cero, de no ser así, con ayuda del trinquete se debe ajustar la lectura hasta alcanzar este valor.

Para el proceso de calibración del micrómetro se sugiere tomar en total cinco mediciones por cada bloque patrón. Se sugiere que las mediciones se realicen en ciclos consecutivos ascendentes y luego descendentes, con el fin de que el husillo y el tambor no se encuentren en la misma posición en dos mediciones consecutivas. Esta metodología permite disminuir la influencia asociada al error de lectura del operario. Finalmente, cada valor medido debe ser registrado en la tabla de calibración u hoja de cálculo diseñada para este propósito.

Ejemplo:

1.) Ciclo ascendente:

2.5 mm , 5.1 mm , 7.7 mm , 10.3 mm , 12.9 mm , 15 mm , 17.6 mm , 20.2 mm , 22.8 mm , y 25 mm

2.) Ciclo descendente:

25 mm , 22.8 mm , 20.2 mm , 17.6 mm , 15 mm , 12.9 mm , 10.3 mm , 7.7 mm , 5.1 mm , y 2.5 mm

3.) Ciclo ascendente:

2.5 mm , 5.1 mm , 7.7 mm , 10.3 mm , 12.9 mm , 15 mm , 17.6 mm , 20.2 mm , 22.8 mm , y 25 mm

4.) Ciclo descendente:

25 mm , 22.8 mm , 20.2 mm , 17.6 mm , 15 mm , 12.9 mm , 10.3 mm , 7.7 mm , 5.1 mm , y 2.5 mm

5.) Ciclo ascendente:

2.5 mm , 5.1 mm , 7.7 mm , 10.3 mm , 12.9 mm , 15 mm , 17.6 mm , 20.2 mm , 22.8 mm , y 25 mm

Para cuantificar (θ_i) y (θ_p) se debe registrar las variaciones térmicas durante la calibración y seleccionar la temperatura que se desvió más respecto a 20°C.

De esta manera se finaliza la calibración de micrómetro.

6.5. Estimación de la incertidumbre de medición

Para la estimación de la incertidumbre se parte de la ecuación básica de error:

$$e = l_i - bp_i \quad (1)$$

Donde:

e = Error de medida

l_i = Valor medio de las lecturas indicadas por el instrumento para el i -ésimo punto de calibración

bp_i = Valor nominal del bloque

A esta ecuación es necesario adicionar la corrección por temperatura del instrumento y del patrón

$$e = l_i(1 + \alpha_i\theta_i) - bp_i(1 + \alpha_p\theta_p) \quad (2)$$

α_i = Coeficiente de expansión térmica del micrómetro

θ_i = Diferencia de temperatura del micrómetro respecto a la temperatura de referencia (20 °C)

α_p = Coeficiente de expansión térmica del patrón

θ_p = Diferencia de temperatura del patrón respecto a la temperatura de referencia (20 °C)

NOTA: La incertidumbre expandida U , será evaluada en cada punto de medición.

Según el numeral **5.1.2. De la GUM** (4), la incertidumbre típica es:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) \quad (3)$$

Para cumplir con la ecuación (3) es necesario hallar los coeficientes de sensibilidad de la ecuación (2) de la siguiente manera:

$$e = l_i(1 + \alpha_i\theta_i) - bp_i(1 + \alpha_p\theta_p) \quad (2)$$

$$e = f(l_i, \alpha_i, \theta_i, bp_i, \alpha_p, \theta_p)$$

$$\frac{\partial e}{\partial l_i} = (1 + \alpha_i\theta_i)$$

El factor $\alpha_i\theta_i$ es tan pequeño respecto a uno que tiende a cero por lo tanto se anula quedando de la siguiente manera:

$$\frac{\partial e}{\partial l_i} = 1$$

Este es el primer coeficiente de sensibilidad.

El segundo coeficiente de sensibilidad es:

$$\frac{\partial e}{\partial \alpha_i} = l_i\theta_i$$

El tercer coeficiente de sensibilidad es:

$$\frac{\partial e}{\partial \theta_i} = l_i\alpha_i$$

El desarrollo del cuarto coeficiente de sensibilidad es el siguiente:

$$\frac{\partial e}{\partial bp_i} = -(1 + \alpha_p\theta_p)$$

Como el factor $\alpha_p\theta_p$ es tan pequeño respecto a 1, éste se puede anular quedando de la siguiente manera:

$$\frac{\partial e}{\partial bp_i} = -1$$

Este sería el cuarto coeficiente de sensibilidad.

El quinto coeficiente de sensibilidad es:

$$\frac{\partial e}{\partial \alpha_p} = -bp_i \cdot \theta_p$$

El sexto coeficiente de sensibilidad es:

$$\frac{\partial e}{\partial \theta_p} = -bp_i \cdot \alpha_p$$

Retomando la ecuación (3) perteneciente a la GUM, la incertidumbre combinada para el micrómetro quedará de la siguiente manera:

$$u_c^2 = u^2(l_i) + u^2(bp_i) + u^2(\alpha_i)(l_i\theta_i)^2 + u^2(\theta_i)(l_i\alpha_i)^2 + u^2(\alpha_p)(-bp_i \cdot \theta_p)^2 + u^2(\theta_p)(-bp_i \cdot \alpha_p)^2 \quad (4)$$

6.5.1. Fuentes de incertidumbre de medición

De la ecuación (4) y debido a que la incertidumbre por indicación del micrómetro $u(\bar{l}_i)$ se obtiene de un procedimiento de múltiples mediciones, se tienen que considerar fuentes de incertidumbre que afectan este proceso como son: la repetibilidad, la resolución, paralaje y planitud de la superficies de medición.

Por lo tanto, la incertidumbre por indicación del micrómetro $u(\bar{l}_i)$ se define como:

$$u^2(l_i) = u^2(rep) + u^2(res) + u^2(e_{par}) + u^2(e_{pla}) + u^2(e_{ps})$$

Remplazando en la ecuación (4) quedará:

$$u_c^2 = u^2(rep) + u^2(res) + u^2(e_{par}) + u^2(e_{pla}) + u^2(e_{ps}) + u^2(bp_i) + u^2(\alpha_i)(l_i\theta_i)^2 + u^2(\theta_i)(l_i\alpha_i)^2 + u^2(\alpha_p)(-bp_i \cdot \theta_p)^2 + u^2(\theta_p)(-bp_i \cdot \alpha_p)^2 \quad (5)$$

A continuación, se explica cada fuente de incertidumbre.

Incertidumbre por repetibilidad $u(rep)$: Debido a que esta incertidumbre es obtenida a través de observaciones repetidas bajo condiciones de repetibilidad, la función de distribución de probabilidad

de los datos es aproximadamente normal, y su dispersión se representa a través de la desviación estándar experimental de la media.

$$s_p = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum (p_i - p_l)^2}$$

$$u(rep) = \frac{s_p}{\sqrt{n}}$$

Donde

s_p : Es la desviación estándar en cada punto

n : Es el número de mediciones por cada punto de medición

La incertidumbre por repetibilidad es tipo A y su coeficiente de sensibilidad es uno.

Incertidumbre por resolución $u(res)$:

Para micrómetros digitales la incertidumbre por resolución será:

$$u(res) = \frac{res}{2\sqrt{3}}$$

Para micrómetros analógicos la incertidumbre por resolución será:

$$u(res) = \frac{res}{\sqrt{3}}$$

Donde:

res : Es la resolución de apreciación y depende de la persona que está realizando la calibración.

Para un micrómetro analógico, según la agudeza visual de la persona que está calibrando se considera razonable dividir la resolución en 10 partes como máximo. Para el caso de micrómetros digitales la resolución será la mínima variación de medida que da lugar a una variación perceptible en la indicación.

La incertidumbre por resolución es tipo B con una distribución rectangular.

Incertidumbre por paralaje $u(e_{par})$:

La incertidumbre por paralaje es un error que puede presentarse al momento de realizar la lectura del micrómetro y se produce por la separación entre el operario y el micrómetro. Debido a la separación que existe entre el tambor de escala móvil y el cilindro escala fija, al no estar el operario apropiadamente posicionado respecto a la superficie del cilindro se abre la posibilidad de tomar una lectura errónea. De modo que la incertidumbre por paralaje es ocasionada por la DO distancia del

observador respecto al eje perpendicular de observación, DF distancia entre el observador y el instrumento, h la holgura entre el tambor y el cilindro escala y X la longitud del arco del cilindro de escala.

Para estimar la incertidumbre por paralaje $u(e_{par})$ es necesario determinar el error por paralaje e_{par} :

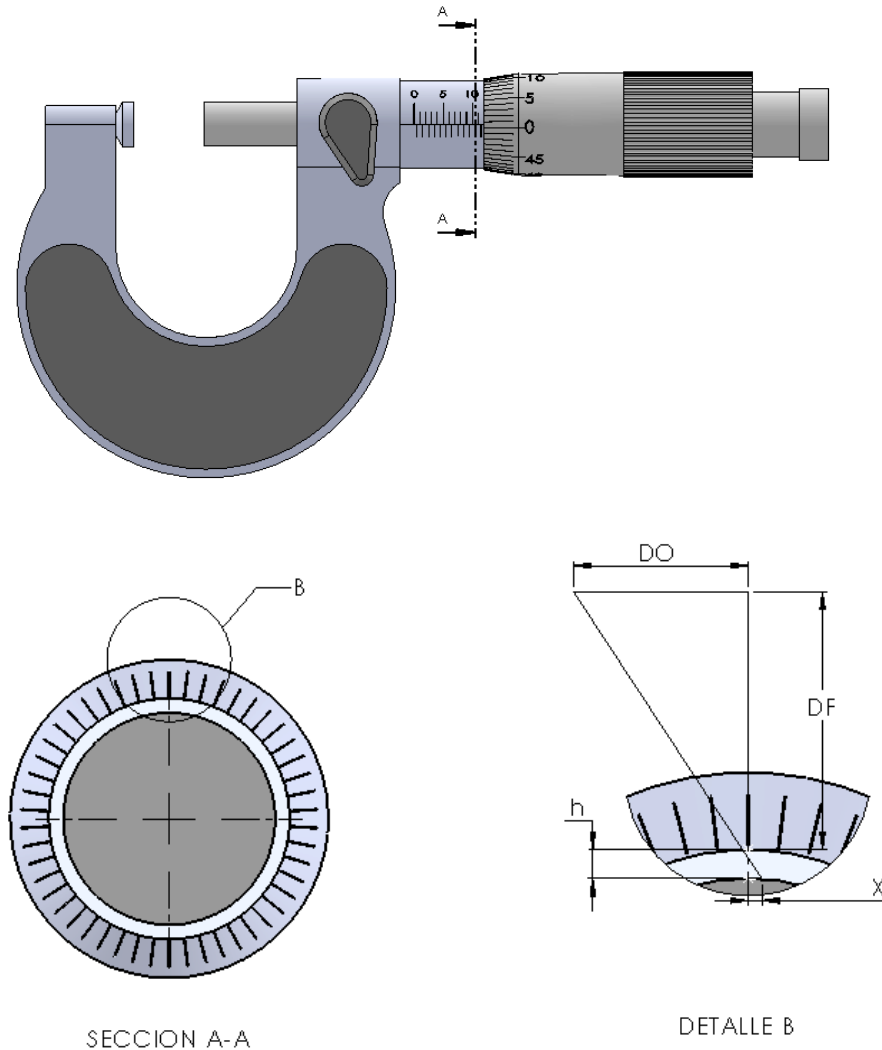


Figura 7 Error por paralaje

De la figura 4 del detalle B se puede observar el fenómeno que sucede con el efecto de paralaje en el micrómetro. De allí se utiliza la siguiente relación para encontrar X :

$$X = \frac{h \times DO}{DF}$$

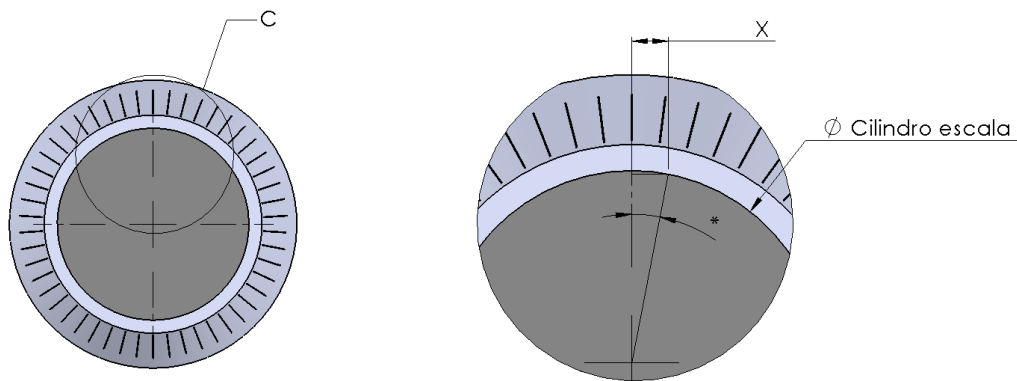
Donde:

DO Desplazamiento del observador respecto a la línea perpendicular de observación

DF Distancia entre el observador y el instrumento

h Holgura entre el cilindro principal y el tambor

X Es la longitud del arco del cilindro de la escala como se observa en la figura 5.



DETALLE C

Figura 8 Ángulo de giro y desplazamiento

Se requiere encontrar la longitud de desplazamiento del husillo equivalente a la longitud de arco formado por X para lo cual se hace la relación de la longitud de arco completo del cilindro que equivale a una revolución, es decir $2\pi r$ o $\pi\phi$, donde r y ϕ son el radio y el diámetro del cilindro escala, dicha revolución equivale a un desplazamiento longitudinal del husillo dh .

Teniendo esto presente se puede realizar la siguiente relación:

$$\frac{\pi \cdot \phi}{dh} = \frac{X}{e_{par}}$$

Despejando e_{par}

$$e_{par} = \frac{dh \cdot X}{\pi \cdot \phi}$$

Remplazando X en la ecuación anterior quedará:

$$e_{par} = \frac{dh \cdot h \cdot DO}{\pi \cdot \phi \cdot DF}$$

$$u(e_{par}) = \frac{e_{par}}{\sqrt{3}}$$

La fuente de incertidumbre por paralaje posee una función de distribución rectangular tipo B y su coeficiente de sensibilidad es uno.

Incertidumbre por planitud de las superficies de medición $u(e_{pla})$

$$u(e_{pla}) = \sqrt{\left(\frac{e_{pla1}}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{e_{pla2}}{2\sqrt{3}}\right)^2}$$

Donde:

e_{pla1} : Es el error por planitud de una de las superficies de medición

e_{pla2} : Es el error por planitud de la otra superficie de medición

La fuente de incertidumbre por planitud de las superficies de medición es de tipo B y posee una función de distribución rectangular.

Incertidumbre por paralelismo de las superficies de medición $u(e_{ps})$:

$$u(e_{ps}) = \sqrt{\left(\frac{e_{ps1}}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{e_{ps2}}{2\sqrt{3}}\right)^2}$$

Donde:

e_{ps1} : Es el error por paralelismo de una de las superficies de medición

e_{ps2} : Es el error por paralelismo de la otra superficie de medición

Para hallar el valor correspondiente al error por paralelismo de las superficies de medición, se tiene en cuenta el mayor número de franjas obtenidas en las cuatro ópticas paralelas, esto se realiza tanto para el yunque como para el husillo.

La fuente de incertidumbre por paralelismo de las superficies de medición es de tipo B y posee una función de distribución rectangular.

Incertidumbre del bloque patrón $u(bp)$:

Esta incertidumbre contempla la variación de la longitud del bloque patrón con el transcurrir del tiempo o deriva (*der*) y la incertidumbre del bloque patrón reportada en los certificados de calibración. La variación en el tiempo de la longitud se puede estimar a partir de: estudios experimentales, de la tabla 1 de la norma ISO 3650 (5) o el límite permisible que indica esa misma. Los certificados de calibración de los bloques patrón usualmente reportan la incertidumbre expandida para cada bloque con una confianza del 95% y un coeficiente de cobertura $k = 2$.

$$u(bp) = \sqrt{\left(\frac{U_{cert}}{k}\right)^2 + \left(\frac{der}{\sqrt{3}}\right)^2}$$

U_{cert} : Incertidumbre de calibración del bloque reportado en el certificado de calibración

k : Factor de cobertura

der : Deriva del bloque patrón

El límite permisible que indica la norma ISO-3650 (5) se presenta en la siguiente tabla.

Grado	Cambio máximo de longitud permisible por año
K	$\pm(0.02 \mu\text{m} + 0.25 \times 10^{-6} \times l_n)$
0	
1	$\pm(0.05 \mu\text{m} + 0.5 \times 10^{-6} \times l_n)$
2	
Nota: l_n es expresado en milímetros	

Tabla 1. Máxima variación de deriva permitida para bloques

Incertidumbre por el coeficiente de expansión térmica del material del micrómetro $u(\alpha_i)$

Debido a que el micrómetro es construido en materiales como el acero, éste presentará cambios en sus dimensiones físicas ocasionadas por las variaciones térmicas del laboratorio de medición. Estas variaciones estarán regidas por el coeficiente de expansión térmica del material α_i , el cual a su vez tiene una incertidumbre determinada en la siguiente ecuación:

$$u(\alpha_i) = \frac{\Delta\alpha_i}{\sqrt{3}}$$

Donde:

$\Delta\alpha_i$: Es la variación del coeficiente de expansión térmica del material con que está fabricado el micrómetro.

El material del micrómetro es acero, su coeficiente de expansión térmica es $11.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \pm 1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ es decir, puede variar entre $9.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ y $12.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, por lo tanto la variación del coeficiente de expansión térmica del material del micrómetro serán: $\Delta\alpha_i = 1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

La incertidumbre en la medición por el coeficiente de expansión térmica del micrómetro es tipo B, con una función de distribución rectangular y su coeficiente de sensibilidad es igual a $l_i\theta_i$.

Incertidumbre por el medidor de temperatura del micrómetro $u(\theta_i)$

La incertidumbre debida al medidor de temperatura está compuesta por la incertidumbre de resolución del instrumento, la incertidumbre debida a la calibración del termómetro y la incertidumbre debida a la variación de la temperatura del laboratorio.

$$u(\theta_i) = \sqrt{\left(\frac{res_t}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{U_{ct}}{k}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t_l}{\sqrt{3}}\right)^2}$$

Donde:

res_t Resolución del indicador de temperatura

U_{ct} Incertidumbre que indica el certificado del termómetro

Δt_l Variación de temperatura del laboratorio

Las componentes de la incertidumbre combinada del medidor de temperatura son tipo B y su coeficiente de sensibilidad es $l_i\alpha_i$

Incertidumbre por el coeficiente de expansión térmica del bloque patrón $u(\alpha_p)$

$$u(\alpha_p) = \frac{\Delta\alpha_p}{\sqrt{3}}$$

Donde:

$\Delta\alpha_p$: Es la variación del coeficiente de expansión térmica del material con que está fabricado el bloque patrón

En la mayoría de los casos en las especificaciones técnicas del bloque se encuentra especificado el coeficiente de expansión térmica, en caso de no contar con dicha especificación técnica, el coeficiente de expansión térmica será de $11.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \pm 1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ siempre que sea de acero, por lo tanto $\Delta\alpha_p = 1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ para esos casos.

La incertidumbre por el coeficiente de expansión térmica del bloque patrón tiene una función de distribución rectangular, tipo B y su coeficiente de sensibilidad es $-bp \cdot \theta_p$

Incertidumbre por el medidor de temperatura del bloque patrón $u(\theta_p)$

En esta incertidumbre se tiene en cuenta la resolución del indicador de temperatura, el certificado de calibración del mismo y la variación de temperatura del laboratorio.

$$u(\theta_p) = \sqrt{\left(\frac{res_t}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{U_{ct}}{k}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t_l}{\sqrt{3}}\right)^2}$$

Donde:

res_t	Resolución del indicador de temperatura
U_{ct}	Incertidumbre que indica el certificado del termómetro
Δt_l	Variación de temperatura del laboratorio

La incertidumbre por el medidor de temperatura está compuesta por la incertidumbre de resolución del instrumento, la incertidumbre debida a la calibración del termómetro y la incertidumbre debida a la variación de la temperatura del laboratorio. Las componentes de la incertidumbre combinada del medidor de temperatura son tipo B y su coeficiente de sensibilidad es $-bp \cdot \alpha_b$

6.5.2. Incertidumbre expandida de medición.

La incertidumbre expandida U indica un intervalo que representa una fracción p de los valores que puede probablemente tomar el mensurando. El valor de p es llamado nivel de confianza y puede ser elegido a conveniencia. Por ejemplo, un $k = 1$ corresponde a $p = 68,27\%$, $k = 2$ a $p = 95,45\%$.

$$U = u_c \cdot k$$

Donde:

U Incertidumbre expandida

u_c Incertidumbre combinada

k Factor de cobertura

Para hallar el factor de cobertura k se utilizan los grados efectivos de libertad v_{eff} para lo cual se hace uso de la ecuación de Welch Satterthwaite **G.2b de la JCGM (4)** del anexo G.4.

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(x)}{v_i}}$$

Donde:

u_c Incertidumbre combinada

u_i Fuentes de incertidumbre

v_i Grados de libertad

Para hallar los grados de libertad se utiliza la ecuación G.3 del anexo G.4 de la JCGM (4).

$$v_i \approx \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta u(x_i)}{u(x_i)} \right]^{-2}$$

Ejemplo: Se tiene una fuente de incertidumbre con una duda del 10%, dicho porcentaje se deduce de acuerdo a la experiencia que se tiene, no hay una regla para esto.

Remplazando en la ecuación quedará:

$$v_i \approx \frac{1}{2} [0,1]^{-2}$$

$$v_i \approx 50$$

Lo cual da como resultado 50 grados de libertad.

Cuando se han encontrado los grados efectivos de libertad v_{eff} a través de la tabla T de Student o haciendo uso de Excel con la función de "DISTR.T.INV" se encuentra el factor de cobertura k .

6.6. Presentación de los resultados

El certificado o informe de calibración debe cumplir con los requisitos indicados en ISO/IEC 17025. Los resultados se deben presentar de manera exacta, clara, inequívoca y objetiva. Se debe incluir toda información necesaria para la interpretación de los resultados de medición y una descripción del método utilizado (6)

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bibliografía

1. **CENTRO ESPAÑOL DE METROLOGÍA CEM.** Vocabulario Internacional de Metrología Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados. s.l. : 3a edición, 2012.
2. **MITUTOYO.** Catálogo de Instrumentos de medición. 2012. E2012.
3. **ICONTEC.** NTC 4352. Micrómetros para Mediciones Exteriores, Construcción Normal. Conceptos, Requisitos y Ensayos. 1997.
4. **CENTRO ESPAÑOL DE METROLOGÍA CEM.** JCGM 2008 Evaluación de datos de medición. Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida . Edición digital 1 (Sept. 2008). NIPO EDICIÓN DIGITAL 1: 706-10-001-0.
5. **International Organization Standardization ISO.** ISO 3650:1998. Geometrical Product Specifications (GPS)- Length Standards - Gauge Blocks. 1998.
6. —. ISO/IEC 17025, Requisitos Generales para la Competencia de los Laboratorios de Ensayo y Calibración, . 2017.
7. **CENAM-ema.** Guía Técnica de Trazabilidad Metrológica e Incertidumbre de Medida en Metrología Dimensional. México : s.n., 2013.
8. **CENTRO ESPAÑOL DE METROLOGÍA CEM.** DI-005 PROCEDIMIENTO PARA CALIBRACIÓN DE MICRÓMETRO DE EXTERIORES DE DOS CONTACTOS.

8. ANEXOS

Ejemplo numérico

NOTA: Los datos aquí consignados corresponden a un ejemplo ilustrativo.

Se tiene un micrómetro con un intervalo de medición de 0 mm a 25 mm, con una resolución de 0.01 mm. Las temperaturas tomadas durante la calibración fueron: 20.5 °C, 20.7 °C y 20.6 °C. El certificado de calibración del bloque patrón dice que tiene una incertidumbre $U = (0.03 + 6 \times 10^{-4} L) \mu\text{m}$, L en mm, con un factor de cobertura $k = 2$. La resolución del indicador de temperatura es de 0.1 °C, el certificado de calibración de este dice que tiene una incertidumbre de 0.3 °C con un factor de cobertura $k = 2$. El bloque patrón es grado 0 el cual tiene 1 año de calibrado, el coeficiente de expansión térmica del bloque patrón es de $10.8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \pm 0.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, el coeficiente de expansión térmica del micrómetro es de $11.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \pm 1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. La medición de la planitud del yunque dio 6 franjas y la superficie del husillo dio 4 franjas.

Para el error por paralaje e_{par} de acuerdo a la figura No.2 de la norma técnica colombiana NTC-4352 (3) la distancia h deberá ser máximo de 0.3 mm, la distancia de desplazamiento del observador DO es aproximadamente de 4 cm, la distancia focal DF se estima en 25 cm, el diámetro del cilindro principal ϕ es de 14.8 mm. Cada revolución del tambor equivale a 500 μm de desplazamiento.

El laboratorio tiene una temperatura de $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$.

En la siguiente tabla se observan los resultados obtenidos en la calibración con el promedio, la desviación estándar y el error:

Patrón (mm)	1	2	3	4	5	Promedio (mm)	s_p (μm)	Error (μm)
0.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0	0.0
2.5	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	0.0	0.0
5.1	5.100	5.100	5.100	5.100	5.100	5.100	0.0	0.0
7.7	7.700	7.700	7.700	7.700	7.700	7.700	0.0	0.0
10.3	10.302	10.300	10.302	10.300	10.300	10.301	1.1	0.8
12.9	12.900	12.900	12.900	12.900	12.900	12.900	0.0	0.0
15.0	15.000	14.998	15.000	14.998	15.000	14.999	1.1	-0.8
17.6	17.600	17.600	17.600	17.600	17.600	17.600	0.0	0.0
20.2	20.200	20.202	20.200	20.200	20.202	20.201	1.1	0.8
22.8	22.800	22.800	22.802	22.802	22.802	22.801	1.1	1.2
25.0	25.000	25.002	25.002	25.002	25.000	25.001	1.1	1.2

Tabla 2. Resultados de la calibración

Para estimar la incertidumbre de los errores se realiza los siguientes pasos que se describen a continuación:

NOTA: Para el ejemplo se toma solamente el punto de 25 mm

Incertidumbre por repetibilidad $u(rep)$:

En el punto de 25 mm la desviación estándar fue 1.1 μm y se realizaron 5 mediciones, por lo tanto:

$$u(rep) = \frac{s_p}{\sqrt{n}}$$

$$u(rep) = \frac{1.1 \mu\text{m}}{\sqrt{5}}$$

$$u(rep) = 0.492 \mu\text{m}$$

El coeficiente de sensibilidad es uno.

Incertidumbre por resolución $u(res)$:

La menor lectura que se puede apreciar de acuerdo a la capacidad visual de la persona que realiza la calibración, para este caso la persona está en capacidad de leer 2 μm por lo tanto la resolución quedará:

$$u(res) = \frac{res}{\sqrt{3}}$$

$$u(res) = \frac{2 \mu\text{m}}{\sqrt{3}}$$

$$u(res) = 1.155 \mu\text{m}$$

El coeficiente de sensibilidad es uno.

Incertidumbre por el efecto de paralaje $u(e_{par})$

Para estimar la incertidumbre por paralaje es necesario determinar le error por paralaje con la siguiente ecuación:

$$e_{par} = \frac{dh \cdot h \cdot DO}{\pi \cdot \phi \cdot DF}$$

Donde:

- dh*: Es el desplazamiento del husillo al girar el tambor una revolución o una vuelta, en este caso es de 500 μm
- h*: Holgura entre el cilindro principal y el tambor la cual es de 0.4 mm (7)
- DO*: Desplazamiento del observador respecto a la línea perpendicular de observación, se estima en 4 cm (7)
- ϕ : Diámetro del cilindro de la escala principal, para efectos del ejemplo es de 14.8 mm
- DF*: Distancia entre el observador y el instrumento, se estima en 25 cm (7)

$$e_{par} = \left[\frac{500 \cdot 400 \cdot 40\,000}{\pi \cdot 14\,800 \cdot 250\,000} \right] \mu\text{m}$$

$$e_{par} = 0.688 \mu\text{m}$$

La incertidumbre por paralaje será:

$$u(e_{par}) = \frac{e_{par}}{\sqrt{3}}$$

$$u(e_{par}) = \frac{0.688 \mu\text{m}}{\sqrt{3}}$$

$$u(e_{par}) = 0.397 \mu\text{m}$$

El coeficiente de sensibilidad es uno.

Incertidumbre por planitud en las superficies $u(e_{pla})$

Para hallar la incertidumbre por planitud en las superficies $u(e_{pla})$ se tiene en cuenta la planitud de las dos superficies, se trata de una distribución rectangular y se suman cuadráticamente:

$$u(e_{pla}) = \sqrt{\left(\frac{e_{pla1}}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{e_{pla2}}{2\sqrt{3}}\right)^2}$$

La medición del planitud del yunque dio 3 franjas equivalentes a 1 μm y la superficie del husillo dio 4 franjas equivalente a 1.28 μm .

$$u(e_{pla}) = \sqrt{\left(\frac{1}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{1.28}{2\sqrt{3}}\right)^2}$$

$$u(e_{pla}) = \sqrt{0.219866}$$

$$u(e_{pla}) = 0.469 \mu\text{m}$$

El coeficiente de sensibilidad es uno.

Incertidumbre por paralelismo $u(e_{ps})$

Para hallar la incertidumbre por paralelismo de las superficies $u(e_{ps})$ se tiene en cuenta que tan paralelas están las dos superficies de medición (yunque y husillo), dicha incertidumbre tiene una distribución rectangular y se suman cuadráticamente:

$$u(e_{ps}) = \sqrt{\left(\frac{e_{ps1}}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{e_{ps2}}{2\sqrt{3}}\right)^2}$$

La medición del planitud del yunque dio 4 franjas equivalentes a 1.28 μm y la superficie del husillo dio 5 franjas equivalente a 1.6 μm .

$$u(e_{po}) = \sqrt{\left(\frac{1.28}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{1.6}{2\sqrt{3}}\right)^2}$$

$$u(e_{po}) = \sqrt{0.350}$$

$$u(e_{po}) = 0.591 \mu\text{m}$$

El coeficiente de sensibilidad es uno.

Incertidumbre del bloque patrón $u(bp)$:

$$u(bp) = \sqrt{\left(\frac{U_{cert}}{k}\right)^2 + \left(\frac{der}{\sqrt{3}}\right)^2}$$

U_{cert} : Incertidumbre de calibración del bloque reportado en el certificado de calibración

k : Factor de cobertura

der : Deriva del bloque patrón

El certificado de calibración reporta que la incertidumbre es:

$$U_{cert} = [0.03 + 6 \times 10^{-4}L] \mu\text{m } L \text{ en mm}$$

$$U_{cert} = 0.03 + 6 \times 10^{-4} \cdot 25 \text{ mm}$$

$$U_{cert} = 0.045 \mu\text{m}$$

Y $k = 2$

De acuerdo a la tabla de la norma ISO 3650 (5)

Grado	Cambio máximo de longitud permisible por año
K	$\pm(0.02 \mu\text{m} + 0.25 \times 10^{-6} \times l_n)$
0	
1	
2	$\pm(0.05 \mu\text{m} + 0.5 \times 10^{-6} \times l_n)$
Nota: l_n es expresado en milímetros	

Tabla 3 Máxima variación de deriva permitida para bloques

$$der = 0.02 \mu\text{m} + 0.25 \times 10^{-6} l_n$$

Los bloques utilizados para la calibración son grado cero y la calibración fue realizada hace un año por lo tanto:

$$der = 0.02 \mu\text{m} + 0.25 \times 10^{-6} \cdot 25 \text{ mm}$$

$$der = 0.020 006 25 \mu\text{m}$$

Por lo tanto:

$$u(bp) = \sqrt{\left(\frac{0.045 \mu\text{m}}{2}\right)^2 + \left(\frac{0.020\ 006\ 25 \mu\text{m}}{\sqrt{3}}\right)^2}$$

$$u(bp) = \sqrt{(0.022\ 5)^2 + (0.011\ 550\ 613)^2}$$

$$u(bp) = 0.025 \mu\text{m}$$

El coeficiente de sensibilidad para esta incertidumbre es uno.

Incertidumbre por coeficiente de expansión térmica del material del micrómetro $u(\alpha_i)$.

El coeficiente de expansión térmica del instrumento es de $11.5 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \pm 1 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Por lo tanto quedará de la siguiente manera:

$$u(\alpha_i) = \frac{\Delta\alpha_i}{\sqrt{3}}$$

$$u(\alpha_i) = \frac{1 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}}{\sqrt{3}}$$

$$u(\alpha_i) = 5.77 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

El coeficiente de sensibilidad para esta incertidumbre es $l_i\theta_i$:

Las temperaturas registradas durante la calibración fueron $20.5 \text{ }^\circ\text{C}$, $20.7 \text{ }^\circ\text{C}$ y $20.6 \text{ }^\circ\text{C}$, de estos tres valores se toma $20.7 \text{ }^\circ\text{C}$ que es el que más se aleja de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ por lo tanto:

$$\theta_i = 20.7 \text{ }^\circ\text{C} - 20.0 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\theta_i = 0.7 \text{ }^\circ\text{C}$$

El producto $l_i\theta_i$ quedará:

$$l_i \theta_i = (25\,000 \mu\text{m})(0.7 \text{ } ^\circ\text{C})$$

$$l_i \theta_i = 17\,500 \mu\text{m } ^\circ\text{C}$$

$u(\alpha_i)(l_i \theta_i)$ quedará:

$$u(\alpha_i)(l_i \theta_i) = 5.77 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \cdot 17\,500 \mu\text{m } ^\circ\text{C}$$

$$u(\alpha_i)(l_i \theta_i) = 0.010 \mu\text{m}$$

Incertidumbre por temperatura del instrumento $u(\theta_i)$:

A continuación se tiene la siguiente ecuación para la estimación de la incertidumbre por temperatura del instrumento:

$$u(\theta_i) = \sqrt{\left(\frac{res_t}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{U_{ct}}{k}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t_i}{\sqrt{3}}\right)^2}$$

Donde:

res_t Resolución del indicador de temperatura

U_{ct} Incertidumbre que indica el certificado del termómetro

Δt_i Variación de temperatura del laboratorio

$$u(\theta_i) = \sqrt{\left(\frac{0.1 \text{ } ^\circ\text{C}}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0.3 \text{ } ^\circ\text{C}}{2}\right)^2 + \left(\frac{0.2 \text{ } ^\circ\text{C}}{\sqrt{3}}\right)^2}$$

$$u(\theta_i) = \sqrt{0.028^2 + 0.150^2 + 0.115^2}$$

$$u(\theta_i) = 0.191 \text{ } ^\circ\text{C}$$

El coeficiente de sensibilidad para esta incertidumbre es $l_i \alpha_i$:

$$l_i \alpha_i = 25\,000 \mu\text{m} \cdot 11.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$l_i \alpha_i = 0.288 \mu\text{m } ^\circ\text{C}^{-1}$$

La incertidumbre $u(\theta_i)$ por el coeficiente de sensibilidad $l_i \alpha_i$ quedará:

$$u(\theta_i)(l_i \alpha_i) = 0.191 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot 0.288 \mu\text{m } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$u(\theta_i)(l_i \alpha_i) = 0.055 \mu\text{m}$$

Incertidumbre por el coeficiente de expansión térmica del material del bloque patrón $u(\alpha_p)$

La variación del coeficiente de expansión térmica del material de los bloques es de $10.8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, por lo tanto la incertidumbre por el coeficiente de expansión térmica del material del bloque $u(\alpha_p)$ será:

$$u(\alpha_p) = \frac{\Delta \alpha_p}{\sqrt{3}}$$

$$u(\alpha_p) = \frac{0.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}}{\sqrt{3}}$$

$$u(\alpha_p) = 2.887 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$$

El coeficiente de sensibilidad de esta incertidumbre es $-b_p \cdot \theta_p$.

La temperaturas registradas durante la calibración fueron $20.5 \text{ } ^\circ\text{C}$, $20.7 \text{ } ^\circ\text{C}$ y $20.6 \text{ } ^\circ\text{C}$, de estos tres valores se toma $20.7 \text{ } ^\circ\text{C}$ que es el que más se aleja de $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ por lo tanto:

$$\theta_p = 20.7 \text{ } ^\circ\text{C} - 20.0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\theta_p = 0.7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

El producto $-bp \cdot \theta_p$ será:

$$-bp \cdot \theta_p = -25\,000 \mu\text{m} \cdot 0.7 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$-bp \cdot \theta_p = -17\,500 \mu\text{m } ^\circ\text{C}$$

La incertidumbre $u(\alpha_p)$ multiplicada por el coeficiente de sensibilidad $-bp \cdot \theta_p$ será:

$$u(\alpha_p)(-bp \cdot \theta_p) = 2.887 \times 10^{-7} /^\circ\text{C} \cdot (-17\,500 \mu\text{m } ^\circ\text{C})$$

$$u(\alpha_p) \cdot (-bp \cdot \theta_p) = -5.052 \times 10^{-3} \mu\text{m}$$

Incertidumbre por el medidor de temperatura del bloque patrón $u(\theta_p)$

A continuación se tiene la siguiente ecuación para la estimación de la incertidumbre por temperatura del instrumento:

$$u(\theta_i) = \sqrt{\left(\frac{res_t}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{U_{ct}}{k}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t_l}{\sqrt{3}}\right)^2}$$

Donde:

res_t	Resolución del indicador de temperatura
U_{ct}	Incertidumbre que indica el certificado del termómetro
Δt_l	Variación de temperatura del laboratorio

$$u(\theta_i) = \sqrt{\left(\frac{0.1 \text{ }^\circ\text{C}}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0.3 \text{ }^\circ\text{C}}{2}\right)^2 + \left(\frac{0.2 \text{ }^\circ\text{C}}{\sqrt{3}}\right)^2}$$

$$u(\theta_i) = \sqrt{0.028^2 + 0.15^2 + 0.115\,47^2}$$

$$u(\theta_i) = 0.191 \text{ }^\circ\text{C}$$

El coeficiente de sensibilidad para esta incertidumbre es $-bp \cdot \alpha_p$:

$$-bp \cdot \alpha_i = -25\,000 \mu\text{m} \cdot 10.8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$-bp \cdot \alpha_p = -0.27 \mu\text{m } ^\circ\text{C}^{-1}$$

La incertidumbre $u(\theta_p)$ por el coeficiente de sensibilidad $-bp \cdot \alpha_p$ quedará:

$$u(\theta_p)(-bp \cdot \alpha_p) = 0.191 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot -0.27 \mu\text{m } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$u(\theta_p)(-bp \cdot \alpha_p) = -0.052 \mu\text{m}$$

El siguiente paso es encontrar la incertidumbre combinada:

$$u_c = \sqrt{u^2(rep) + u^2(res) + u^2(e_{par}) + u^2(e_{pla}) + u^2(e_{ps}) + u^2(bp) + u^2(\alpha_i)(l_i\theta_i)^2 + u^2(\theta_i)(l_i\alpha_i)^2}$$

$$+ u^2(\alpha_p)(-bp \cdot \theta_p)^2 + u^2(\theta_p)(-bp \cdot \alpha_p)^2$$

$$u_c = \sqrt{0.492^2 + 1.155^2 + 0.397^2 + 0.469^2 + 0.591^2 + 0.025^2 + 0.010^2 + 0.055^2}$$

$$(-5.052 \times 10^{-3})^2 + (-0.052)^2$$

$$u_c = \sqrt{2.311\,852\,523}$$

$$u_c = 1.52 \mu\text{m}$$

Ahora se procede a encontrar los grados efectivos de libertad v_{eff} :

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(x)}{v_i}}$$

$$v_{eff} = \frac{1.087^4}{\frac{0.492^4}{4} + \frac{1.155^4}{200} + \frac{0.397^4}{50} + \frac{0.469^4}{50} + \frac{0.592^4}{50} + \frac{0.025^4}{200} + \frac{0.010^4}{200}}$$

$$\frac{0.055^4}{50} + \frac{(-5.052 \times 10^{-3})^4}{200} + \frac{(-0.052)^4}{50}$$

$$v_{eff} = \frac{5.337\ 948\ 16}{0.027\ 468\ 158}$$

$$v_{eff} = 193.322$$

193.332 grados efectivos de libertad equivalen a un k de 1.99 para un nivel de confianza del 95 %

$$U = u_c \cdot k$$

$$U = 1.52\ \mu\text{m} \cdot 1.96$$

$$U = 3.0\ \mu\text{m}$$

Balance de incertidumbres.

Fuente de incertidumbre	Incertidumbre típica	Tipo de distri.	C.S	Contribución	Grados de libertad	% de aporte
Rep.	$u(rep) = \frac{s_p}{\sqrt{n}}$	A	1	0.492 μm	4	10.5
Res.	$u(res) = \frac{res}{2\sqrt{3}}$	B	1	1.155 μm	200	57.8
Paralaje	$u(e_{par}) = \frac{e_{par}}{\sqrt{3}}$	B	1	0.397 μm	50	6.8
Planitud de superficies	$u(e_{pla}) = \sqrt{\left(\frac{e_{pla1}}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{e_{pla2}}{2\sqrt{3}}\right)^2}$	B	1	0.469 μm	50	9.5
Paralelismo	$u(e_{ps}) = \sqrt{\left(\frac{e_{po1}}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{e_{po2}}{2\sqrt{3}}\right)^2}$	B	1	0.591 μm	50	15.1
Patrón	$u(bp) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{Ucal}{k}\right)^2 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{der_i}{\sqrt{3}}\right)^2}$	B	1	0.025 μm	200	0.0
Coefficiente de expansión térmica del micrómetro	$u(\alpha_i) = \frac{\Delta\alpha_i}{\sqrt{3}}$	B	$l_i\theta_i$	0.010 μm	200	0.0

Fuente de incertidumbre	Incertidumbre típica	Tipo de distri.	C.S	Contribución	Grados de libertad	% de aporte
Del instrumento de temperatura	$u(\theta_i) = \sqrt{\left(\frac{rest}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{U_{ct}}{k}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t l}{\sqrt{3}}\right)^2}$	B	$l_i \alpha_i$	0.055 μm	50	0.1
Coefficiente de expansión térmica del patrón	$u(\alpha_p) = \frac{\Delta \alpha_p}{\sqrt{3}}$	B	$-bp \cdot \theta_p$	$-5.052 \times 10^{-3} \mu\text{m}$	200	0.0
Del instrumento de temperatura	$u(\theta_p) = \sqrt{\left(\frac{rest}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{U_{ct}}{k}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t l}{\sqrt{3}}\right)^2}$	B	$-bp \cdot \alpha_p$	$-0.052 \mu\text{m}$	50	0.1
Incertidumbre combinada			$u_c(x)$	1.52 μm		
Factor de cobertura			k	1.93		
Incertidumbre expandida			U	3.0 μm		

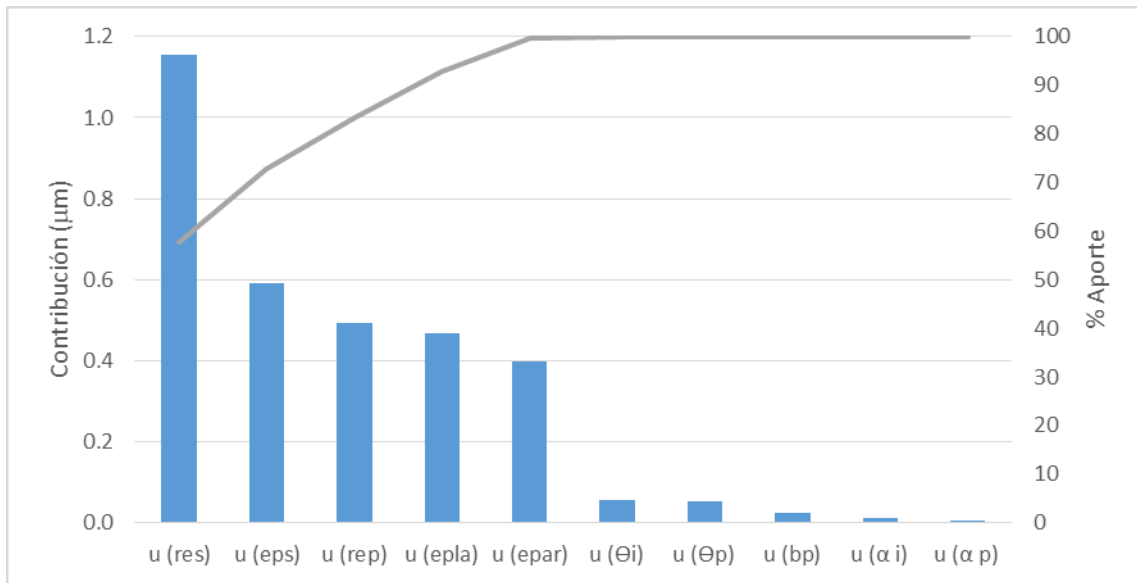


Figura 9 Diagrama de contribuciones

Instituto Nacional de Metrología de Colombia - INM
Subdirección de Metrología Física, Red Colombiana de Metrología.
Av. Cra 50 No 26-55 Int. 2 CAN - Bogotá, D.C. Colombia
Conmutador: (57) 601254 22 22
E-mail: contacto@inm.gov.co
www.inm.gov.co

Organismo Nacional de Acreditación de Colombia - ONAC
Av. Calle 26 # 57 – 83, Torre 8, Oficina 1001 - Bogotá, D.C. Colombia
PBX: +571 742 7592
E-mail: onac@onac.org.co
www.onac.org.co