

Instituto Nacional de Metrología
de Colombia

Subdirección de
METROLOGÍA FÍSICA

Bogotá - 2022

GUÍA PARA LA CALIBRACIÓN DE

PIE DE REY



www.inm.gov.co



INMdeColombia



Guía para calibración de pie de rey /
David Alonso Plazas Fernández [y otros cuatro] -- Bogotá, (Colombia) : Instituto Nacional de Metrología, 2022.

43 páginas.

Incluye referencias bibliográficas, tablas y fotos

ISBN e-Book: 978-958-53642-1-9

1. Método de calibración 2 Equipos y materiales 3. Condiciones ambientales 4. Proceso de calibración 5. Estimación de la incertidumbre de medición 6. Presentación de resultados (Colombia).

U.A.E. Instituto Nacional De Metrología (978-958-53642)

Instituto Nacional de Metrología - INM.

Av. Carrera 50 No 26 - 55 Int. 2, Bogotá.

Código Postal: 111321 - Colombia.

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 Técnicos Temáticos o Grupos Técnicos por Magnitud) y el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia – ONAC con el fin armonizar 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.

Fecha de recepción: 8 de Octubre de 2020.

Fecha de evaluación: 18 de noviembre de 2021.

Fecha de aceptación: 10 de diciembre de 2021.

Preparación editorial

U.A.E. Instituto Nacional De Metrología
(978-958-53642)

Edición:

Instituto Nacional de Metrología - INM. Organismo Nacional de Acreditación de Colombia - ONAC. Laboratorios de calibración.

Corrección de estilo:

Instituto Nacional de Metrología - INM. Organismo Nacional de Acreditación de Colombia - ONAC. Laboratorios de calibración.

Diagramación:

Instituto Nacional de Metrología - INM. Organismo Nacional de Acreditación de Colombia - ONAC.

Línea de atención al cliente: +57 (601) 254 2222.

Línea Nacional: 01 8000112542.

contacto@inm.gov.co

www.inm.gov.co

Citación sugerida:

Plazas Fernández, D. A., Gil Gil, V. H. González, J.F., Galvis Arroyave, J. L. & Quijano, R (2022) Guía para la calibración de pie de rey. Instituto Nacional de Metrología.

Publicado en Bogotá, Colombia, julio de 2022.

CONTENIDO

1. OBJETIVO.....	5
2. ALCANCE	5
3. ABREVIATURAS, SIGLAS Y SÍMBOLOS	5
4. DEFINICIONES.....	7
5. GENERALIDADES	9
6. DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES	10
6.1. Método de calibración	11
6.2 Equipos y materiales	11
6.3. Condiciones ambientales	11
6.4. Proceso de calibración	12
6.5. Estimación de la incertidumbre de medición	19
6.5.1. Fuentes de incertidumbre de medición	21
6.5.2. Incertidumbre combinada y peso de cada aporte.	36
6.5.3. Incertidumbre expandida de medición.	37
6.6. Presentación de los resultados	41
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	42

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 de los profesionales David Alonso Plazas Fernández, Víctor Hugo Gil Gil, Jonnathan F. Gonzalez y Jorge L. Galvis Arroyave del Instituto Nacional de Metrología de Colombia – INM. También participó 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

Esta guía tiene como propósito describir un método de calibración para pies de rey técnicamente válido, basado en principios de medición que respaldan la información incluida y sirven de referencia a los laboratorios para mejorar la compatibilidad de los resultados.

2. ALCANCE

Esta guía se aplica tanto a los “pie de rey analógicos” con un intervalo de medición máximo de 0 mm a 1 000 mm y a escala nonio o escala circular en 0.1 mm, 0.05 mm, 0.02 mm y 0.01 mm, como a los “pie de rey digitales” con intervalos de 0 mm hasta un máximo de 1 000 mm y con incrementos de 0.01 mm.

3. ABREVIATURAS, SIGLAS Y SÍMBOLOS

Abreviaturas, siglas y símbolos	Descripción
CCH	Verificador calibre o caliper checker
U	Incertidumbre expandida
$u(x)$	Incertidumbre típica
$u_c(x)$	Incertidumbre combinada
k	Factor de cobertura
v_{eff}	Grados efectivos de libertad
α_p	Coefficiente de expansión térmica del bloque patrón
α_i	Coefficiente de expansión térmica del instrumento (pie de rey)
n	Número de mediciones realizadas
θ_p	Diferencia de temperatura del patrón respecto a la temperatura de referencia
θ_i	Diferencia de temperatura del instrumento (pie de rey), respecto a la temperatura de referencia
e	Error de medida
s_p	Desviación típica experimental estimada a partir de un conjunto de datos.

li	Lectura indicada en el instrumento (pie de rey)
bp	Valor del bloque patrón según el certificado de calibración
u_{abbe}	Incertidumbre por el efecto de Abbe
u_{par}	Incertidumbre por el efecto de paralaje
u_m	Incertidumbre por falta de paralelismo en las mandíbulas
u_{AC}	Incertidumbre debida a la longitud del ancho combinado
u_{pla}	Incertidumbre debida a la planitud de las superficies de medición
u_{CC}	Incertidumbre del caliper checker
$u(\theta_{T_i})$	Incertidumbre por indicador de temperatura utilizado para el instrumento
$u(\theta_{T_p})$	Incertidumbre por indicador de temperatura utilizado para el patrón
Δu	Incertidumbre relativa
vi	Número de grados de libertad
e_a	Efecto de abbe
b	Longitud de la mandíbula
ln	Longitud del nonio o vernier
$huelgo$	Es el ajuste que hay entre el cuerpo principal del pie de rey y el nonio
e_p	Efecto de paralaje
DO	Desplazamiento del observador respecto a la línea perpendicular de observación
DF	Distancia entre el observador y el instrumento.
m	Separación de la escala del nonio respecto a la escala principal
res	Resolución del instrumento
ev	Distancia entre la primera línea del nonio a la segunda línea
$rest$	Resolución del indicador de temperatura
U_t	Incertidumbre que indica el certificado del termómetro
Δ_{tl}	Variación de temperatura del laboratorio
e_{AC}	Error debido a la longitud de ancho combinado

e_{pla}	Error de planitud de las superficies de medición
-----------	--

4. DEFINICIONES

NOTA: Las definiciones acá presentadas son tomadas de la traducción del Centro Español de Metrología CEM del JCGM 2012

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 “auto-calibración”, 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 una 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.

Relacionar las definiciones acordes al propósito del documento haciendo las referencias bibliográficas correspondientes.

5. GENERALIDADES

El pie de rey es un instrumento de medición usado para satisfacer la necesidad de efectuar una lectura directa de longitud que proporcione una medida, en una sola operación. El pie de rey típico puede tomar 3 tipos de mediciones básicas: exteriores, interiores, profundidades. En algunos modelos tiene la capacidad de medir en escalón.

Un pie de rey está constituido principalmente por una escala principal o cuerpo, una escala vernier o nonio que es la auxiliar y que se desliza a lo largo de la escala principal, y unas mandíbulas con sus respectivas superficies de medición.

Este instrumento es utilizado para indicar la distancia entre cada superficie de medición mediante la lectura correspondiente en la escala principal y la escala vernier. Ver Figura 1

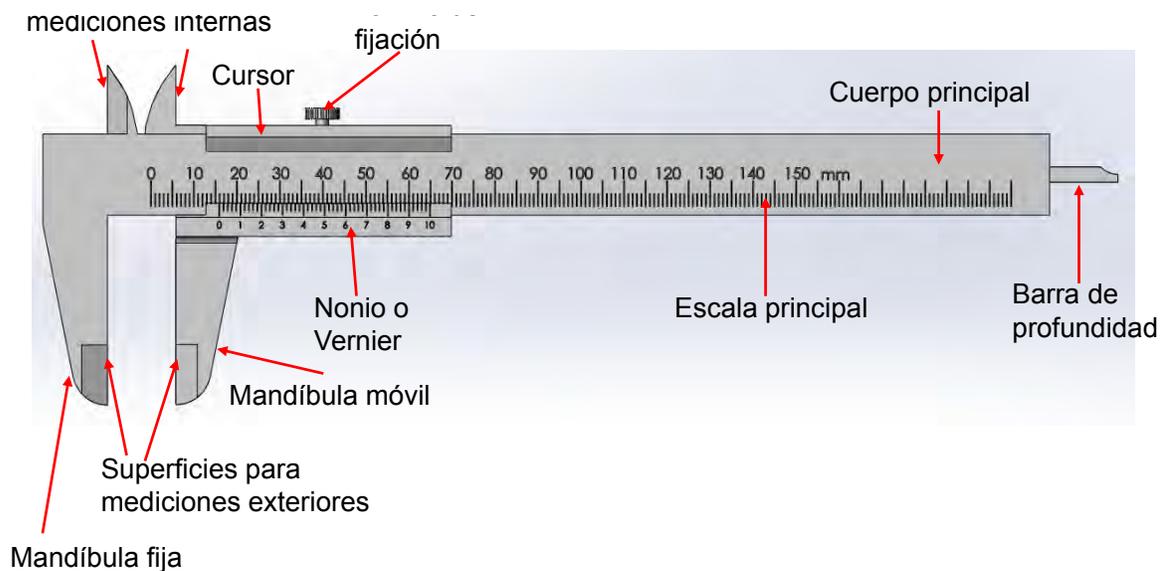


Figura 1. Partes del pie de rey

6. DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES

Antes de iniciar el proceso de Calibración, se deben realizar las siguientes actividades:

- Dejar en cero el pie de rey y observarlo a contraluz para ver si hay alguna imperfección entre las mandíbulas. En caso de que exista alguna imperfección, según lo establecido por el laboratorio, se procede o no a calibrar el instrumento.
- Establecer como mínimo cinco puntos a calibrar a lo largo de todo el intervalo de medición.

NOTA: Para el caso de pie de rey analógicos se deberá incluir valores decimales para la evaluación del nonio siempre y cuando se utilice bloques patrón y no CCH debido a que estos no materializan medidas con valores decimales.

- Limpiar los bloques patrón con solvente, en el caso del CCH limpiarlo con lo que recomienda el fabricante, con el fin de eliminarle la capa protectora de vaselina y las impurezas que se puedan acumular.
- Limpiar las superficies de medición del pie de rey.
- Después de la inspección visual, limpiar nuevamente las mandíbulas del pie de rey y dejarlo sobre el mármol cercano a los bloques, con el fin de que la temperatura sea muy cercana entre el instrumento y los patrones.

- Organizar los patrones y el instrumento bajo calibración sobre el mármol o superficie plana de referencia y dejar por lo menos dos horas antes de iniciar la calibración para alcanzar el equilibrio térmico requerido.

6.1. Método de calibración

El método de calibración es por comparación directa, que consiste en realizar mediciones con un pie de rey en el que la referencia son bloques patrón o un CCH calibrado. Cuando se utiliza la combinación de bloques patrón deberán estar apoyados sobre un mármol de medición, una superficie plana de referencia (calibrados) o estar unidos con accesorios para bloques patrón.

6.2 Equipos y materiales

- Guantes de algodón o nitrilo
- Alcohol y/o Varsol
- Vaselina o lubricantes para conservación del patrón
- Mármol o superficie plana de referencia
- Paño suave
- Bloques patrón o CCH debidamente calibrados
- Anillos patrón calibrados o accesorios para medición de interiores
- Un indicador de temperatura para usarlo al momento de la calibración, con resolución 0.1 °C o mejor y que dicho instrumento esté calibrado.
- Un indicador de humedad relativa con resolución de 1 % o mejor.

6.3. Condiciones ambientales

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

6.4. Proceso de calibración

Tomar el bloque patrón y colocarlo sobre el mármol o mesa de planitud con una leve inclinación, tal como se observa en la figura 2.

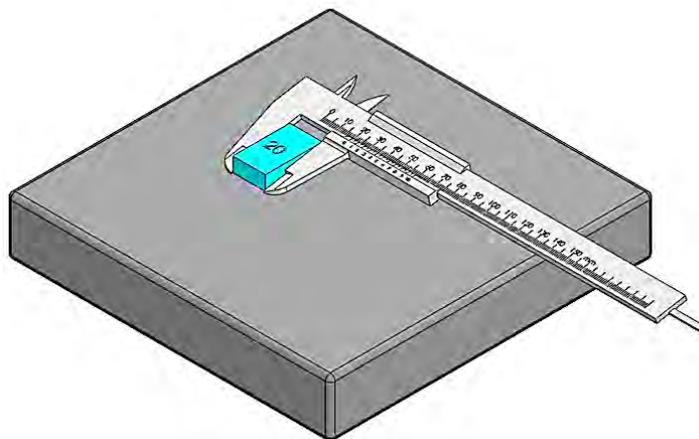


Figura 2. Forma de calibrar pie de rey de exteriores

También se puede realizar con el CCH siguiendo las instrucciones del fabricante.

Para calibrar un pie de rey de interiores, colocar el anillo patrón sobre el mármol, invertir el pie de rey y tomar la medida, como lo muestra la figura 3.

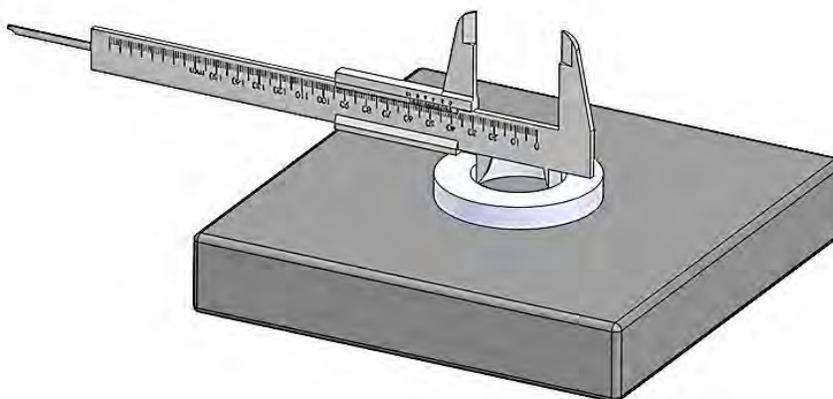


Figura 3. Calibración de interiores

Cuando se calibre las mandíbulas internas con anillos patrón y el diámetro sea muy pequeño es decir menor a 5 mm, es necesario tener en cuenta el error por las mandíbulas, el cual, se puede observar en la figura 4, (extraída del catálogo de Mitutoyo (2))

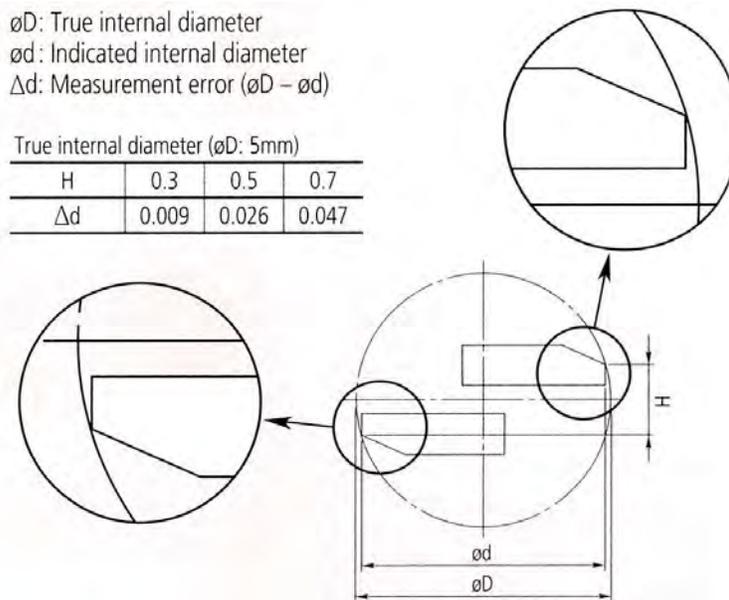


Figura 4. Error por las mandíbulas internas. (Diagrama extraído del catálogo de Mitutoyo (2))

Para encontrar Δd a continuación se realiza el desarrollo:

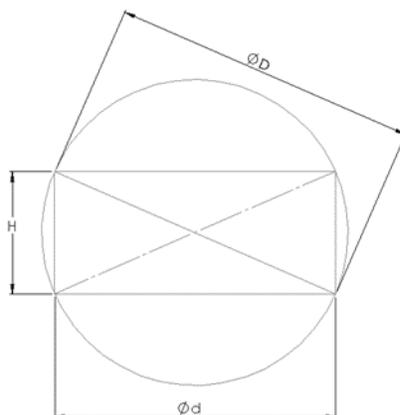


Figura 5. Diagrama del error de las mandíbulas interiores

Donde:

$\varnothing D$ Es el diámetro nominal del anillo patrón

H Es el ancho que puede tener las dos mandíbulas mostradas en la tabla de la figura 5

$\varnothing d$ Es el diámetro que indica el pie de rey

Δd Es la diferencia de diámetros o el error al tomar el diámetro

$$H = \sqrt{\varnothing D^2 - \varnothing d^2}$$

La estimación de la incertidumbre por error de las mandíbulas interiores queda:

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

Otra forma de calibrar las mandíbulas internas es, realizar el montaje de un accesorio como se observa en las figuras 6 y 7.

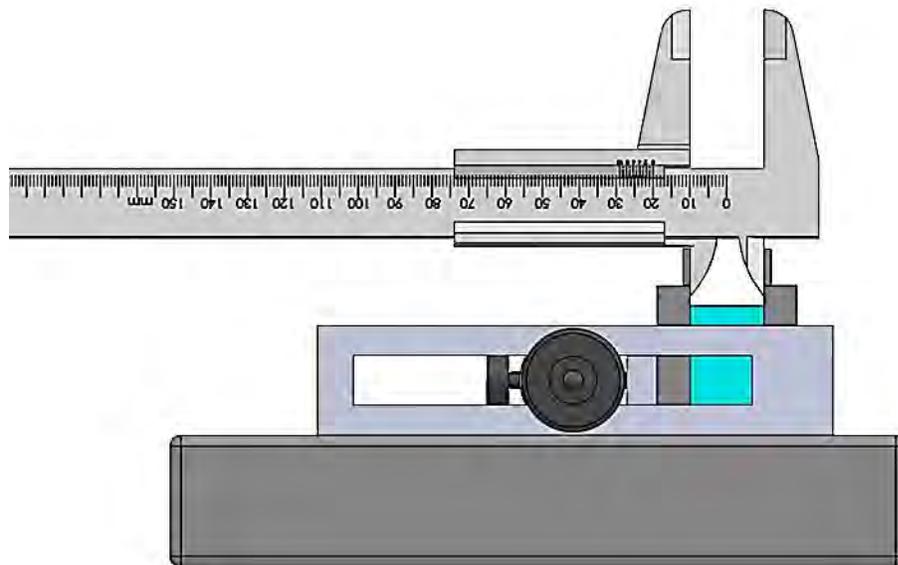


Figura 6. Accesorio para calibración de interiores

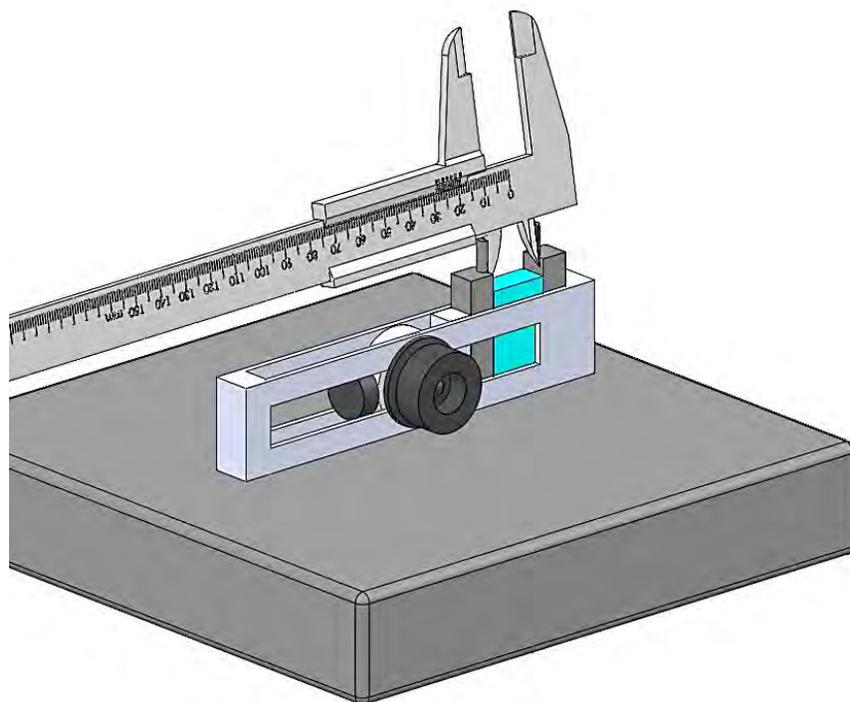


Figura 7. Accesorio para calibración de interiores

Para los pies de rey que tienen mandíbulas para interiores con superficies redondeadas, la calibración se realiza con anillos patrón, como se muestra en la figura 8.

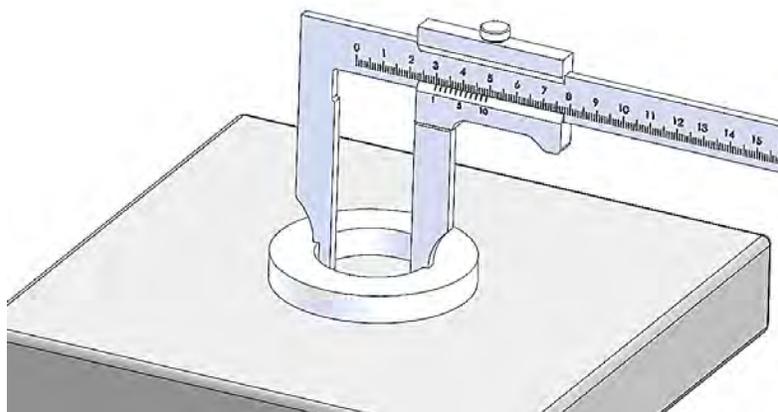


Figura 8. Calibración con anillos patrón

Otra manera para realizar la calibración de interiores es con los accesorios que se observan en la figura 9.

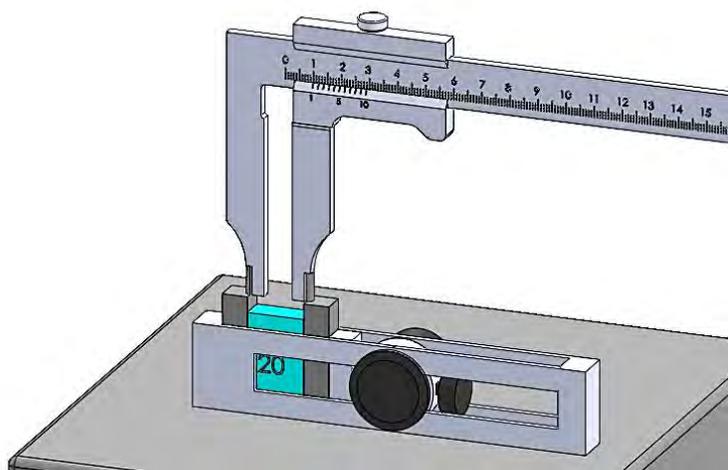


Figura 9. Calibración con el accesorio para bloques.

En este tipo de pie de rey es importante tener en cuenta la longitud del ancho combinado como se observa en la figura 10.

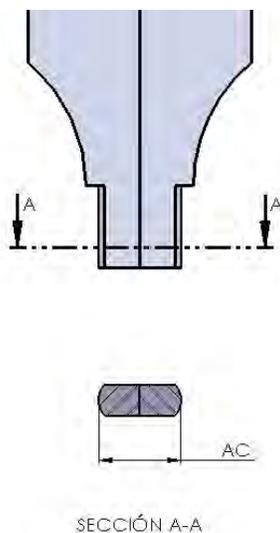


Figura 10. Ancho combinado AC

Dicha longitud se debe medir cinco veces, puede ser con un micrómetro, o con una máquina de una coordenada; de los resultados sacar el promedio el cual no debe sobrepasar los límites especificados en la siguiente tabla, (extraída de documento del CEM (3)):

Resolución (mm)	Errores permitidos para el ancho combinado AC
0.01 y 0.02	0 μm a +10 μm
0.05 y 0.1	0 μm a + 30 μm

Tabla 1. Errores permitidos para el ancho combinado AC

NOTA: La incertidumbre de este error deberá sumarse a las otras fuentes de incertidumbre; para dicha incertidumbre se debe tener en cuenta la incertidumbre por repetibilidad de las mediciones y la declarada en el certificado de calibración del instrumento con que se midió la longitud AC.

Para la barra de profundidad, ubicar dos bloques patrón sobre el mármol o mesa de planitud, de la misma longitud nominal, apoyar la superficie fija sobre los bloques y la superficie de medición sobre el mármol o mesa de planitud, como se observa en las figuras 11 y 12.

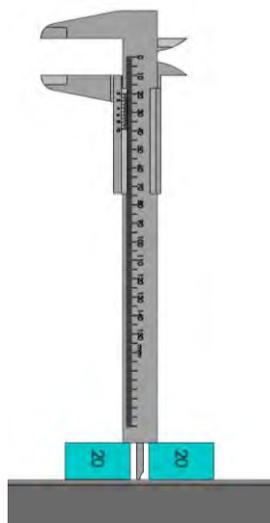


Figura 11. Calibración de barra de profundidad.

NOTA: Para evaluar la incertidumbre del profundímetro, se deben tener en cuenta las mismas fuentes de incertidumbres que para el pie de rey de exteriores, exceptuando la incertidumbre por paralelismo en las mandíbulas, por planitud de la superficie de medición y por el error de Abbe.

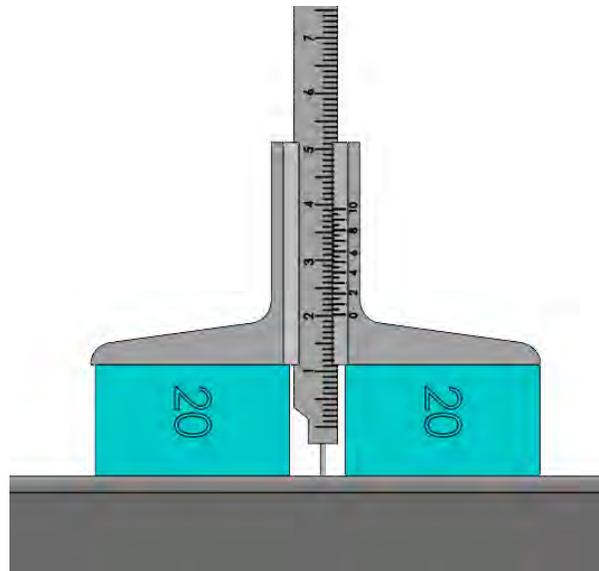


Figura 12. Calibración profundímetro.

Se deberá registrar la temperatura durante la calibración con el fin de obtener la mayor desviación de temperatura respecto a la temperatura de referencia (20 °C), dicho valor debe ir en el presupuesto de incertidumbre por la variación de temperatura θ tanto en el bloque patrón como en el pie de rey.

Tomar el pie de rey y medir el patrón cuidando que las superficies de medición hagan un buen contacto con el patrón (ya sea el bloque o CCH).

Cuando sea necesario materializar una medida con varios bloques, como máximo se permite unir tres bloques.

Luego, continuar al siguiente punto de calibración hasta llegar al último punto a lo largo del máximo intervalo de calibración.

Realizar este mismo proceso, hasta completar como mínimo cinco series de medida.

6.5. Estimación de la incertidumbre de medición

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

$$e = li - bp \quad (1)$$

Donde:

e = Error

li = Lectura en el instrumento

bp = Valor del patrón según el certificado de calibración.

Aplicando correcciones por efecto de temperatura sobre el instrumento y el patrón se obtiene:

$$e = li(1 + \alpha_i\theta_i) - bp(1 + \alpha_p\theta_p) \quad (2)$$

Donde:

α_i = Coeficiente de expansión térmica del material del pie de rey.

θ_i = Máxima variación de la temperatura del pie de rey respecto a la temperatura de referencia (20 °C).

α_p = Coeficiente de expansión térmica del material del patrón.

θ_p = Máxima variación de la temperatura del patrón respecto a la temperatura de referencia (20 °C).

Según el numeral 5.1.2. De la GUM, 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 utilizar la ecuación (3) es necesario hallar los coeficientes de sensibilidad por lo tanto se tiene:

$$e = li(1 + \alpha_i\theta_i) - bp(1 + \alpha_p\theta_p) \quad (2)$$

$$e = f(li, \alpha_i, \theta_i, bp, \alpha_p, \theta_p)$$

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

El valor del producto $\alpha_i \theta_i$ es muy pequeño al compararlo con 1, es decir tiende a cero, por lo tanto se desprecia este producto quedando la derivada parcial:

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

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

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

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

El valor del producto $\alpha_p \theta_p$ es muy pequeño al compararlo con 1, es decir tiende a cero, por lo tanto, se desprecia este producto quedando la derivada parcial:

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

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

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

Remplazando la ecuación (3) perteneciente a la GUM, la incertidumbre combinada para las mediciones quedará de la siguiente manera:

$$u_c^2 = u^2(li) + (li \theta_i)^2 u^2(\alpha_i) + (li \alpha_i)^2 u^2(\theta_i) + u^2(bp) + (-bp \cdot \theta_p)^2 u^2(\alpha_p) + (-bp \cdot \alpha_p)^2 u^2(\theta_p)$$

(4)

Dentro de la incertidumbre por lectura del instrumento $u(li)$, están implícitas las siguientes fuentes de incertidumbre:

u_{rep} : Incertidumbre por repetibilidad

u_{res} : Incertidumbre por resolución

u_{abbe} : Incertidumbre por el efecto de Abbe

u_{ep} : Incertidumbre por el efecto de paralaje

u_{pla} : Incertidumbre por planitud en las superficies de medición

u_m : Incertidumbre por falta de paralelismo en las mandíbulas.

Por lo tanto, la incertidumbre por lectura del instrumento $u(li)$ será igual a:

$$u(li) = \sqrt{u_{rep}^2 + u_{res}^2 + u_{abbe}^2 + u_{ep}^2 + u_{pla}^2 + u_m^2}$$

Al elevarla al cuadrado y remplazarla en la fórmula 4 quedará de la siguiente manera:

$$u_c^2 = u_{rep}^2 + u_{res}^2 + u_{abbe}^2 + u_{ep}^2 + u_{pla}^2 + u_m^2 + (li\theta_i)^2 u^2(\alpha_i) + (li\alpha_i)^2 u^2(\theta_i) + u^2(bp) + (-bp.\theta_p)^2 u^2(\alpha_p) + (-bp.\alpha_p)^2 u^2(\theta_p) \quad (5)$$

6.5.1. Fuentes de incertidumbre de medición

Para la explicación de las fuentes de incertidumbre que contribuyen a la medición, a continuación, se expone el siguiente ejemplo:

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

Se tiene un pie de rey de 150 mm, con resolución de 0.05 mm, fue calibrado a una temperatura mínima de 20.3 °C y una temperatura máxima de 20.4 °C. Las condiciones ambientales del laboratorio son 20 °C ± 1 °C, y humedad relativa de 50 % ± 10 %, el certificado de calibración del bloque reporta una incertidumbre de (0.1 + L) μm, donde L va en metros con un k de 2. La resolución del indicador de temperatura es de 0.1 °C, el certificado de calibración del mismo reporta una incertidumbre de 0.7 °C con un k igual a 2. El bloque patrón es grado 0 el cual tiene 3 meses de calibrado, el material del bloque es de acero con un coeficiente de expansión térmica:

$$11.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \pm 0.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}.$$

El coeficiente de expansión térmica del material del pie de rey es de:

$$11.0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \pm 1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}.$$

La máxima desviación estándar para cinco mediciones fue de 17.7 μm y se obtuvo en el punto 150 mm. La medición del paralelismo de las mordazas dio como resultado 10 μm . La planitud en la mandíbula fija fue de 1.5 μm y en la móvil 0 μm .

6.5.1.1 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.

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

$$u_{rep} = \frac{s_p}{\sqrt{n}}$$

$$u_{rep} = \frac{17.7 \text{ } \mu\text{m}}{\sqrt{5}}$$

$$u_{rep} = 7.92 \text{ } \mu\text{m}$$

6.5.1.2. Incertidumbre por resolución u_{res} :

$$u_{res} = \frac{res}{2\sqrt{3}}$$

$$u_{res} = \frac{50 \text{ } \mu\text{m}}{2\sqrt{3}}$$

$$u_{res} = 14.43 \mu\text{m}$$

NOTA: La resolución es la mínima división de escala para este tipo de instrumento

6.5.1.3. Incertidumbre por el efecto de Abbe u_{abbe}

Este efecto es causado por el juego que existe entre el cursor y el cuerpo del pie de rey cuando se toman medidas que queden alejadas de la escala principal como se observa en la figura 10.

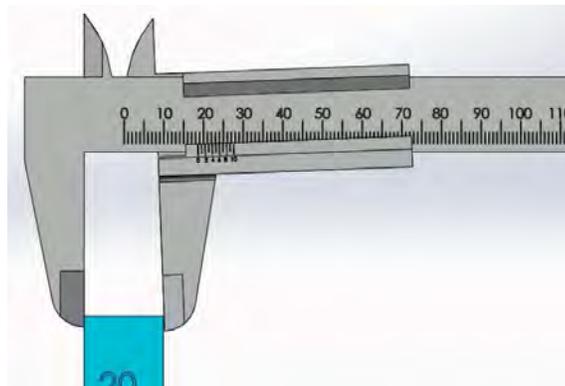


Figura 13. Efecto de Abbe

Para determinar el valor de dicho efecto se emplea la siguiente ecuación:

$$e_a = b \cdot \frac{\text{holgura}}{ln}$$

Donde:

b Longitud de la mandíbula

ln Longitud del nonio o vernier.

$holgura$ Es el ajuste que hay entre el cuerpo principal del pie de rey y el nonio

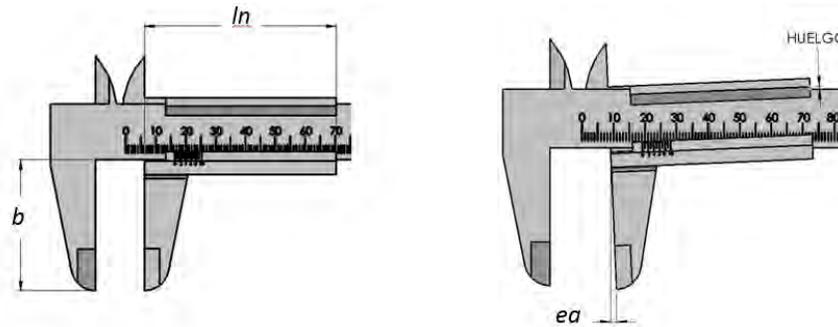


Figura 14. Variables del efecto de Abbe

Para efectos del ejemplo, se asignan los siguientes valores:

$$b = 47 \text{ mm}$$

$$ln = 52 \text{ mm}$$

holgura = 0.03 mm , el cual corresponde a lo indicado en la norma NTC 4303 (4)

Se toman estos datos y se remplazan en la ecuación así:

$$e_a = b \cdot \frac{\text{holgura}}{ln}$$

$$e_a = 47 \text{ mm} \cdot \frac{0.03 \text{ mm}}{52 \text{ mm}}$$

$$e_a = 27.12 \text{ } \mu\text{m}$$

Por lo tanto, la incertidumbre por el efecto de Abbe $u(e_{abb})$ queda.

$$u_{abbe} = \frac{e_a}{2\sqrt{3}}$$

$$u_{abbe} = \frac{27.12 \text{ } \mu\text{m}}{2\sqrt{3}}$$

$$u_{abbe} = 7.83 \text{ } \mu\text{m}$$

6.5.1.4. Incertidumbre por el efecto de paralaje $u(e_p)$

La incertidumbre por paralaje es un error que puede presentarse en la lectura de la escala del nonio del pie de rey, debido a que la escala fija está separada del nonio, ello ocasiona al operador la posibilidad de tomar una lectura errónea, por no estar apropiadamente posicionado respecto al vernier. 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, m la separación entre el nonio y la escala fija, res la resolución del instrumento y ev la distancia entre la primera y la segunda línea del nonio.

La ecuación para determinar el efecto de paralaje es la siguiente:

$$e_p = \frac{DO \cdot m \cdot res}{DF \cdot ev}$$

Donde:

e_p	Efecto de paralaje
DO	Desplazamiento del observador respecto a la línea perpendicular de observación
DF	Distancia entre el observador y el instrumento
m	Separación de la escala del nonio respecto a la escala principal
res	Resolución del instrumento
ev	Distancia entre la primera línea del nonio a la segunda línea (figura 15)

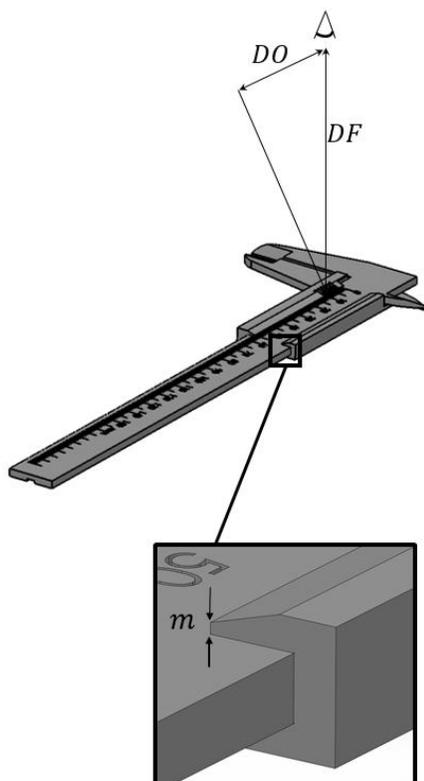


Figura 15. Paralaje

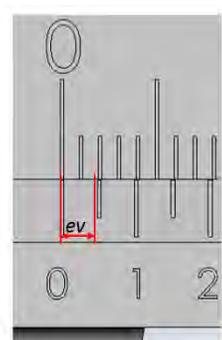


Figura 16. Diagrama ev

Para efectos del ejemplo se tienen los siguientes datos:

$$DO = 32.5 \text{ mm} *$$

$$DF = 300 \text{ mm} *$$

$$m = 0.3 \text{ mm} *$$

$$res = 0.05 \text{ mm}$$

$$ev = 1.95 \text{ mm}$$

NOTA: * Datos extraídos de documento del CENAM (5)

Remplazando en la ecuación:

$$e_p = \frac{DO \cdot m \cdot res}{DF \cdot ev}$$

$$e_p = \frac{32.5 \text{ mm} \cdot 0.3 \text{ mm} \cdot 0.05 \text{ mm}}{300 \text{ mm} \cdot 1.95 \text{ mm}}$$

$$e_p = 0.833 \text{ } \mu\text{m}$$

En consecuencia, la incertidumbre por el efecto de paralaje queda de la siguiente manera:

$$u_{par} = \frac{e_p}{\sqrt{3}}$$

$$u_{par} = \frac{0.83 \text{ } \mu\text{m}}{\sqrt{3}}$$

$$u_{par} = 0.481 \text{ } \mu\text{m}$$

6.5.1.5. Incertidumbre por planitud en las superficies u_{pla}

Para comprobar el error de planitud, se utiliza una regla que tenga aristas biseladas o de filo. También se podrá comprobar dicho error fijando el pie de rey en un soporte sobre el mármol y con un comparador de palanca observar la variación que tiene la superficie a lo largo de la mandíbula.

NOTA: En caso de que no se pueda comprobar el error, ese valor se puede consultar en la siguiente tabla.

El error de planitud, de acuerdo con la tabla extraída del documento del CEM (3); debe ser:

Resolución (mm)	Error de planitud e_{pla}
0.01	5 μm
0.02	
0.05	10 μm por cada 100 mm de su longitud
0.1	

Tabla 2. Error de planitud

Para determinar la incertidumbre por planitud en las superficies $u(e_{pla})$ se debe tener en cuenta la incertidumbre por planitud de las dos superficies que es tipo B y posee una función de distribución de probabilidad rectangular, de semi-ampitud y se y se suman cuadráticamente, de acuerdo con el documento del CEM (3):

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

Si la planitud de las mandíbulas es igual, entonces la incertidumbre por planitud es:

$$u_{pla} = \frac{e_{pla}}{\sqrt{6}}$$

Continuando con el ejemplo, como es solamente una mandíbula, la ecuación queda así:

$$u_{pla} = \frac{e_{pla}}{2\sqrt{3}}$$

$$u_{pla} = \frac{1.5 \mu\text{m}}{2\sqrt{3}}$$

$$u_{pla} = 0.43 \mu\text{m}$$

6.5.1.6. Incertidumbre por falta de paralelismo en las mandíbulas u_m

El paralelismo se comprueba con un bloque patrón, al situarlo en diferentes puntos a lo largo de las mandíbulas; también se puede comprobar con un proyector de perfiles o un sistema óptico de medición. En las siguientes tablas extraídas del documento del CEM (3), se puede observar los errores máximos permitidos, con el fin de saber si el instrumento cumple o no con las especificaciones del fabricante.

NOTA: En caso de que no se pueda comprobar el error, este valor se puede consultar en las siguientes tablas.

Para pie de rey de exteriores con división de escala de 0.01 mm y 0.02 mm:

Longitud de medida (mm)	Error máximo permitido de paralelismo (μm) e_m
0	10
100	10
200	10
300	15
400	15
500	20

Tabla 3. Resolución 0.01 mm y 0.02 mm

Para pie de rey de exteriores con división de escala de 0.05 mm y 0.1 mm:

Longitud de medida (mm)	Error máximo permitido de paralelismo (μm) e_m
0 a 135	10
0 a 160	10
0 a 200	10
0 a 250	10

Longitud de medida (mm)	Error máximo permitido de paralelismo (μm) e_m
0 a 300	15
0 a 500	20
0 a 750	20
0 a 1 000	20

Tabla 4. Resolución 0.05 mm y 0.1 mm

De acuerdo con el procedimiento del CEM (3), la incertidumbre por paralelismo de las mordazas, se considera que tiene una función de distribución rectangular, con semi-amplitud igual a:

$$u_m = \frac{e_m}{2\sqrt{3}}$$

$$u_m = \frac{10 \mu\text{m}}{2\sqrt{3}}$$

$$u_m = 2.89 \mu\text{m}$$

6.5.1.7. Incertidumbre por coeficiente de expansión térmica del instrumento $u(\alpha_i)$

Debido a que el pie de rey es construido con material de 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 pie de rey.

El material del pie de rey 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: $\Delta\alpha_i = 1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

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

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

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

El cambio de temperatura del pie de rey y del bloque patrón es el mismo, debido a que se toma con el mismo termómetro. Por eso, es tan importante dejar estabilizar los instrumentos térmicamente para no tener diferencia de temperaturas entre el pie de rey y el bloque. De acuerdo con los datos utilizados para el ejemplo, la temperatura mínima fue de 20.3 °C y la máxima de 20.4 °C, por lo tanto, la máxima variación es 0.4 °C respecto a 20 °C.

$$\theta_i = 0.4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

El producto $li\theta_i$ queda:

$$li\theta_i = (150\,000 \text{ } \mu\text{m})(0.4 \text{ } ^\circ\text{C})$$

$$li\theta_i = 60\,000 \text{ } \mu\text{m } ^\circ\text{C}$$

El producto $li\theta_i u(\alpha_i)$ queda:

$$li\theta_i u(\alpha_i) = 0.035 \text{ } \mu\text{m}$$

6.5.1.8. Incertidumbre por indicador de temperatura utilizado para el instrumento $u(\theta_{T_i})$

La incertidumbre por el medidor de temperatura está compuesta por la incertidumbre de resolución del instrumento que tiene una función de distribución rectangular, la incertidumbre debida a la calibración del termómetro que tiene una función de distribución normal y un factor de cobertura k y la incertidumbre debida a la variación de la temperatura del laboratorio que tiene una función de distribución rectangular.

$$u(\theta_{T_i}) = \sqrt{\left(\frac{res_t}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{U_{tl}}{k}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{tl}}{\sqrt{3}}\right)^2}$$

Donde:

- res_t Resolución del indicador de temperatura
 U_{tl} Incertidumbre que indica el certificado de calibración del termómetro
 Δ_{tl} Variación de temperatura del laboratorio

$$u(\theta_{T_i}) = \sqrt{\left(\frac{0.1 \text{ °C}}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0.7 \text{ °C}}{2}\right)^2 + \left(\frac{1 \text{ °C}}{\sqrt{3}}\right)^2}$$

$$u(\theta_{T_i}) = \sqrt{(0.028^2 + 0.35^2 + 0.57^2) \text{ °C}^2}$$

$$u(\theta_{T_i}) = 0.67 \text{ °C}$$

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

$$li\alpha_i = 150 \text{ mm} \cdot 11 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$$

$$li\alpha_i = 1.65 \text{ } \mu\text{m}$$

El producto $u(\theta_{T_i})li\alpha_i$ queda:

$$u(\theta_{T_i})li\alpha_i = 1.1 \text{ } \mu\text{m}$$

6.5.1.9. Incertidumbre por patrón $u(bp)$

Para la incertidumbre del patrón, se tiene en cuenta el certificado de calibración del bloque y su cambio de longitud en el tiempo o deriva (der) la cual se obtiene de los estudios realizados en

periodos de tiempo. También se puede usar el límite permisible que indica la norma ISO-3650 (6) 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 5. Deriva de los bloques

La fuente de incertidumbre por bloque patrón está compuesta por dos incertidumbres una debido al bloque patrón que es tipo B con función de distribución normal y con coeficiente de cobertura k y la otra debida a la deriva del bloque que es tipo B y tiene una función de distribución rectangular. De modo que la incertidumbre combinada del bloque patrón tiene una función de distribución normal, tipo B y su coeficiente de sensibilidad es uno.

$$u(bp) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{Ucal}{k}\right)^2 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{der_i}{\sqrt{3}}\right)^2}$$

Cuando se utiliza el CCH de acuerdo con el documento emitido por el CENAM y emm de México (7), se utilizará la siguiente ecuación:

$$u(cc) = \frac{\text{Error máximo}}{2} + \frac{Up}{k}$$

Esta incertidumbre se extrae del certificado de calibración, para efectos del ejemplo se tiene que, para un bloque de 150 mm la incertidumbre es de $0.25 \mu\text{m}$ y el factor de cobertura k es de 2.

$$u(bp) = \sqrt{\left(\frac{U_{\text{bloque}}}{k}\right)^2 + \left(\frac{der_i}{\sqrt{3}}\right)^2}$$

$$u(bp) = \sqrt{\left(\frac{0.25 \mu\text{m}}{2}\right)^2 + \left(\frac{0.020 \mu\text{m}}{\sqrt{3}}\right)^2}$$

$$u(bp) = 0.13 \mu\text{m}$$

6.5.1.10. Incertidumbre por el coeficiente de expansión térmica del patrón $u(\alpha_p)$:

En el catálogo la mayoría de los bloques tiene especificado dicho coeficiente con un error máximo permitido; para efectos del ejemplo, el bloque tiene un coeficiente de expansión térmica de:

$$11.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \pm 0.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

Para la incertidumbre $u(\alpha_p)$ se toma el valor de variación que indica el manual del fabricante y se divide por $\sqrt{3}$

$$u(\alpha_p) = \frac{0.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}}{\sqrt{3}}$$

$$u(\alpha_p) = 2.9 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

El coeficiente de sensibilidad para esta incertidumbre es $-bp \cdot \theta_p$ quedando de la siguiente manera:

$$-bp \cdot \theta_p = -150 \text{ mm} \cdot 0.4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

El producto $u(\alpha_p)(-bp \cdot \theta_p)$ queda:

$$u(\alpha_p)(-bp \cdot \theta_p) = -0.017 \mu\text{m}$$

6.5.1.11. Incertidumbre por indicador de temperatura utilizado para el patrón $u(\theta_{T_p})$

La incertidumbre por el medidor de temperatura está compuesta por la incertidumbre de resolución del instrumento que tiene una función de distribución rectangular, la incertidumbre debida a la calibración del termómetro que tiene una función de distribución normal y un factor de cobertura k y la incertidumbre debida a la variación de la temperatura del laboratorio que tiene una función de distribución rectangular.

Dado que se utilizó el mismo termómetro para el pie de rey como para los bloques patrón, esta incertidumbre queda:

$$u(\theta_{T_p}) = \sqrt{\left(\frac{res_t}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{U_t}{k}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{tl}}{\sqrt{3}}\right)^2}$$

Donde:

- res_t Resolución del indicador de temperatura
- U_t Incertidumbre que indica el certificado de calibración del termómetro
- Δ_{tl} Variación de temperatura del laboratorio

$$u(\theta_{T_p}) = \sqrt{\left(\frac{0.1 \text{ °C}}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0.7 \text{ °C}}{2}\right)^2 + \left(\frac{1 \text{ °C}}{\sqrt{3}}\right)^2}$$

$$u(\theta_{T_p}) = \sqrt{(0.028^2 + 0.35^2 + 0.57^2) \text{ °C}^2}$$

$$u(\theta_{T_p}) = 0.67 \text{ °C}$$

Las componentes de la incertidumbre combinada del medidor de temperatura son tipo B.

El coeficiente de sensibilidad para esta incertidumbre es $(-bp \cdot \alpha_p)$ quedando así:

$$-bp \cdot \alpha_p = -150 \text{ mm} \cdot 11.5 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$$

$$-bp \cdot \alpha_p = -1.7 \text{ } \mu\text{m } \text{°C}^{-1}$$

El producto $u(\theta_p)(-bp \cdot \alpha_p)$ queda:

$$u(\theta_p)(-bp \cdot \alpha_p) = -1.15 \text{ } \mu\text{m}$$

6.5.2. Incertidumbre combinada y peso de cada aporte.

Con los resultados de las incertidumbres típicas y sus respectivos coeficientes de sensibilidad se procede a encontrar la incertidumbre combinada $u_c(x)$:

$$u_c(e) = \sqrt{(7.92^2 + 14.43^2 + 7.83^2 + 0.481^2 + 0.43^2 + 2.89^2 + 0.035^2 + 1.1^2 + 0.13^2 + 0.017^2 + 1.15^2) \mu\text{m}^2}$$

$$u_c(e) = \sqrt{343.5796} \mu\text{m}^2$$

$$u_c(e) = 18.53 \mu\text{m}$$

Para hallar el porcentaje de aporte de incertidumbre es necesario tomar el valor de cada fuente de incertidumbre y dividirla por la sumatoria cuadrática de todas las fuentes de incertidumbre.

A continuación, se puede observar el siguiente ejemplo:

Para encontrar el porcentaje de la incertidumbre por repetibilidad que en el caso del ejemplo es 7.92 μm , se eleva al cuadrado y se divide por la suma de cuadrados de las incertidumbres típicas:

$$\% = \frac{7.92^2 \cdot 100}{7.92^2 + 14.43^2 + 7.83^2 + 0.481^2 + 0.43^2 + 2.89^2 + 0.035^2 + 1.1^2 + 0.13^2 + 0.017^2 + 1.15^2}$$

$$\% = \frac{7.92^2}{343.5796} \cdot 100$$

$$\% = 18.3 \%$$

Y así sucesivamente, se realiza la misma ecuación cambiando el numerador con cada una de las incertidumbres.

Para hallar los grados de libertad se utiliza la ecuación G.3 del anexo G.4 de la **JCGM (8)**.

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

Ejemplo: Se tiene una fuente de incertidumbre con una duda del 10%. *

NOTA: *Este valor de acuerdo con la GUM (8) “se trata de una magnitud subjetiva cuyo valor se obtiene mediante juicio científico basado en el conjunto de informaciones disponibles.”

Remplazando en la ecuación queda:

$$v_i \approx \frac{1}{2} [0.1]^{-2}$$

$$v_i \approx 50$$

Lo cual, da como resultado 50 grados de libertad.

Para hallar el factor de cobertura k es necesario encontrar los grados efectivos de libertad. Para esto se utiliza la ecuación G.2b de la JCGM (8) del anexo G.4.

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

$$v_{eff} = \frac{18.53^4 \mu\text{m}^4}{\left[\frac{7.92^4}{4} + \frac{14.43^4}{200} + \frac{7.83^4}{50} + \frac{0.48^4}{50} + \frac{0.43^4}{50} + \frac{2.89^4}{200} + \frac{0.035^4}{50} + \frac{1.1^4}{50} + \frac{0.13^4}{200} + \frac{0.017^4}{50} + \frac{1.15^4}{50} \right] \mu\text{m}^4}$$

$$v_{eff} = 92.38$$

Para este ejemplo el valor corresponde a un k de 2 para una probabilidad de cobertura del 95 % para una distribución aproximadamente normal.

6.5.3. Incertidumbre expandida de medición.

La incertidumbre expandida U indica un intervalo que representa una fracción p de los valores que puede probablemente tomar el mesurando. El valor de p es llamado nivel de confianza. Por ejemplo, para una distribución normal un $k = 1$ corresponde a $p = 68.27\%$, $k = 2$ a $p = 95.45\%$.

Para hallar la incertidumbre expandida se toma la incertidumbre combinada y se multiplica por el k como se ve a continuación:

$$U = u(x)_c \cdot k$$

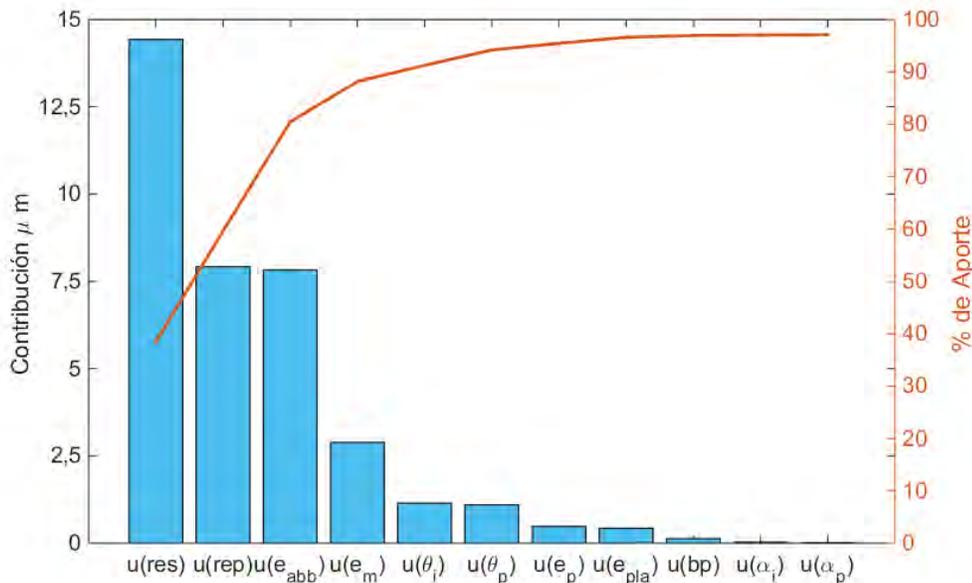
$$U = 18.53 \mu\text{m} \cdot 2$$

$$U \approx 37 \mu\text{m}$$

Fuente de incertidumbre por	Incertidumbre típica	Tipo de dist.	Coefficiente de sensibilidad	Contribución	Grados de libertad	% de aporte
Repetibilidad	$u(rep) = \frac{s_p}{\sqrt{n}}$	A	1	7.92 μm	4	18.3
Resolución	$u(res) = \frac{res}{2\sqrt{3}}$	B	1	14.43 μm	200	60.6
Abbe	$u(e_{abb}) = \frac{e_a}{2\sqrt{3}}$	B	1	7.83 μm	50	17.8
Paralaje	$u(e_p) = \frac{e_p}{\sqrt{3}}$	B	1	0.481 μm	50	0.1
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	0.43 μm	50	0.1
Efecto de paralelismo mandíbulas	$u(e_m) = \frac{e_m}{2\sqrt{3}}$	B	1	2.89 μm	200	2.4
Coefficiente de expansión térmica del pie de rey	$u(\alpha_i) = \frac{1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}}{\sqrt{3}}$	B	$li\theta_i$	0.035 μm	50	0.0
Temperatura del instrumento	$u(\theta_i) = \sqrt{\left(\frac{rest}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{ct}{k}\right)^2 + \left(\frac{tl}{\sqrt{3}}\right)^2}$	B	$li\alpha_i$	1.1 μm	50	0.4

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	0.13 μm	200	0.0
Coefficiente de expansión térmica del patrón	$u(\alpha) = \frac{0,5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}}{\sqrt{3}}$	B	$-bp \cdot \theta_p$	-0.017 μm	50	0.0
Temperatura del patrón	$u(\theta_p) = \sqrt{\left(\frac{rest}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{ct}{k}\right)^2 + \left(\frac{tl}{\sqrt{3}}\right)^2}$	B	$-bp \cdot \alpha_p$	-1.15 μm	50	0.4
$u_c(x)$				18.53 μm		
k				2		
U				37 μm		

Tabla 6 Presupuesto de incertidumbres



6.6. Presentación de los resultados

A continuación, se tiene un modelo de tabla para registro de datos:

Valor patrón	LECTURA DEL INSTRUMENTO					Promedio	sp	Error
	1	2	3	4	5			

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Para el presente documento las referencias con fecha solo aplica la edición citada. Para las referencias sin fecha se aplica la última edición del documento de referencia (incluyendo cualquier modificación).

1. **Centro Español de Metrología CEM.** Vocabulario Internacional de Metrología. España : NIPO: 074-13004-1, 2012.
2. **MITUTOYO.** Catálogo de Instrumentos de medición. 2012. E2012.
3. **Centro Español de Metrología CEM.** Procedimiento DI-008 para la calibración de Pies de Rey.
4. **ICONTEC.** Norma Técnica Colombia. *NTC 4303 Pie de Rey.* 26 de 11 de 1997.
5. **Centro Nacional de Metrología CENAM, Héctor González Muñoz.** Calibración de calibradores Tipo Vernier. México : s.n., 2001.
6. **International Organization Standardization ISO.** ISO 3650:1998. Geometrical Product Specifications (GPS)- Length Standards - Gauge Blocks. 1998.
7. **Centro Nacional de Metrología de México CENAM - ema Entidad Mexicana de Acreditación, A.C.** Guía Técnica de Trazabilidad Metrológica e Incertidumbre de Medida en Metrología Dimensional. 2016.
8. **Centro Español de Metrología CEM.** JCGM 100:2008. *Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida.* s.l. : Edición digital, 2008. NIPO Edición digital 1: 706-10-001-0.



**MINISTERIO DE COMERCIO,
INDUSTRIA Y TURISMO**

GUÍA PARA LA CALIBRACIÓN DE

PIE DE REY

ISBN e-Book: 978-958-53642-1-9

**Subdirección de
METROLOGÍA FÍSICA**

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: (57 601) 254 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: (57 601) 742 7592
E-mail: onac@onac.org.co
www.onac.org.co

