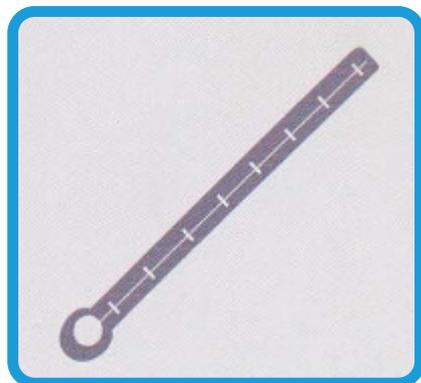
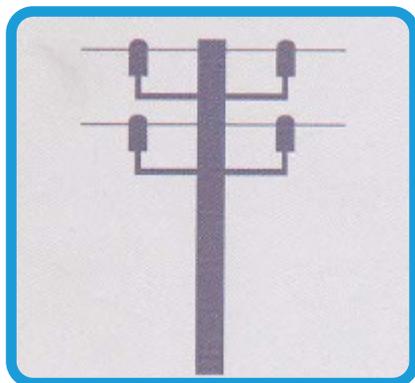
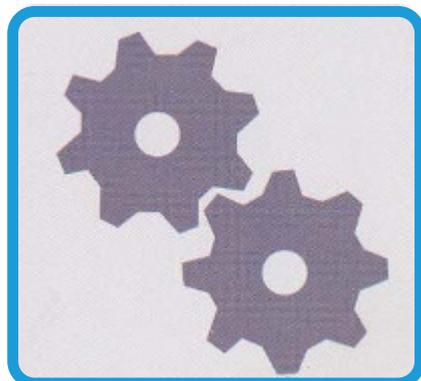
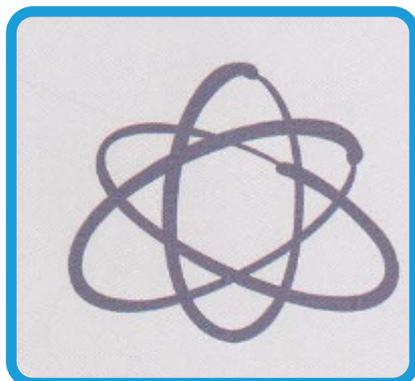
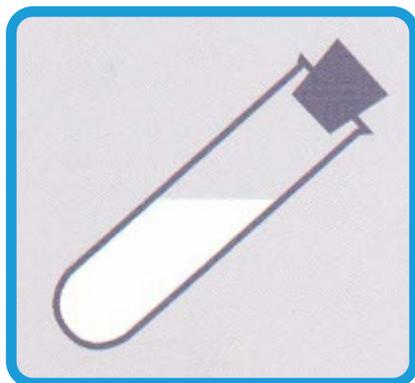


Metrología



PROCEDIMIENTO DI-021 PARA LA
CALIBRACIÓN DE MICRÓMETROS DE
INTERIORES DE DOS CONTACTOS

m 19

**PROCEDIMIENTO DI-021
CALIBRACIÓN DE MICRÓMETROS DE INTERIORES
DE DOS CONTACTOS**

La presente edición de este procedimiento se emite exclusivamente en formato digital y puede descargarse gratuitamente de nuestra página web (www.cem.es).

Los procedimientos editados por el CEM presentan modelos de calibración, en línea con documentos clave universales como son el Sistema Internacional de unidades (SI), el Vocabulario internacional de metrología (VIM) o la Guía para la expresión de la incertidumbre de medida (GUM). Como modelos que son, los usuarios de los mismos pueden, bajo su responsabilidad, modificarlos para adecuarlos a sus necesidades específicas (instrumentación, condiciones ambientales, etc.). En tal caso, siempre deberá primar el sentido crítico y la ética profesional.

El CEM no acepta ninguna responsabilidad derivada de la interpretación y/o uso de este procedimiento.

El CEM no mantiene correspondencia sobre el contenido de los procedimientos.

ÍNDICE

	Página
1. OBJETO	3
2. ALCANCE	3
3. DEFINICIONES	3
4. GENERALIDADES.....	4
5. DESCRIPCIÓN	7
5.1 Calibración del micrómetro	7
5.2 Calibración de las extensiones	9
6. RESULTADOS.....	11
6.1 Cálculo de incertidumbres	11
6.2 Interpretación de resultados.....	15
7. REFERENCIAS.....	16
8. ANEXO. Ejemplo numérico de aplicación del procedimiento	17
8.1 Calibración de un micrómetro de interiores de dos contactos, axial, con extensiones.....	17
8.2 Calibración de las extensiones	19
8.3 Corrección de calibración e incertidumbre de la corrección, usado con extensiones.....	20

1. OBJETO

El presente procedimiento de calibración tiene por objeto exponer un método posible para la calibración de micrómetros de interiores de dos contactos, codificados como D.02.11, según la Clasificación de Instrumentos de Metrología Dimensional [5].

2. ALCANCE

El presente procedimiento es de aplicación a los micrómetros de interiores de dos contactos, tanto laterales como axiales, con o sin extensiones. El rango de medida de estos micrómetros es habitualmente de 25 mm y sus divisiones de escala de 0,01 mm o de 0,001 mm.

3. DEFINICIONES

En el presente procedimiento se utiliza la terminología de [2].

Alcance del campo de medida básico:

En un micrómetro de interiores de dos contactos de tipo axial, es la suma de su campo de medida básico y la longitud de la extensión o extensiones que se le añadan.

Micrómetro de interiores de dos contactos lateral:

Es aquel que tiene los contactos de medida desplazados respecto al eje de la cabeza micrométrica (figura 1).

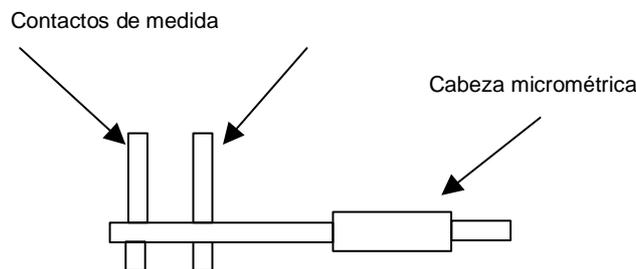


Figura 1: micrómetro de interiores de dos contactos lateral

Micrómetro de interiores de dos contactos axial:

Es aquel que tiene los contactos de medida en el eje axial de la cabeza micrométrica (figura 2).

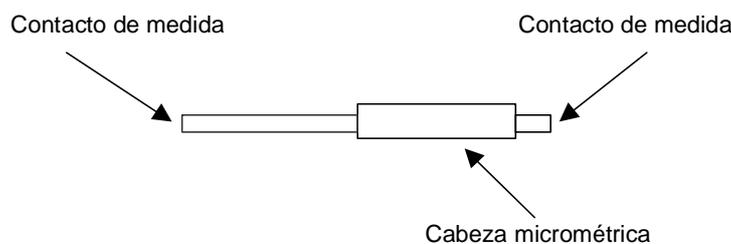


Figura 2: micrómetro de interiores de dos contactos axial

Extensiones de micrómetro interior de dos contactos axial:

Tubos o varillas acoplables que permiten ampliar el campo de medida según las combinaciones que se hagan con ellas.

Campo de medida básico:

En un micrómetro de interiores de dos contactos de tipo axial, es el correspondiente a la cabeza micrométrica, sin extensiones.

4. GENERALIDADES

Los micrómetros de interiores considerados en este procedimiento están destinados a medir diámetros interiores de agujeros o distancias interiores entre superficies planas. Se consideran tanto los laterales como los axiales.

Para calibrar los micrómetros de interiores de dos contactos, se pueden utilizar bloques patrón longitudinales (D.05.01 según [5]) y accesorios de bloques patrón longitudinales (D-01.03 según [5]), habitualmente dos contactos planos y una mordaza.

Para calibrar las extensiones de los micrómetros de interiores de dos contactos axiales, se utiliza una medidora de una coordenada horizontal (D-02.04 según [5]).

En lo que sigue se utilizarán las abreviaturas siguientes:

BPL: Bloque patrón longitudinal.

CP: Contacto plano.

EX: Extensión de micrómetro de interiores de dos contactos axial

M1CH: Medidora de una coordenada horizontal.

M2C: Micrómetro de interiores de dos contactos en general.

M2CA: Micrómetro de interiores de dos contactos axial.

M2CL: Micrómetro de interiores de dos contactos lateral.

MO: Mordaza.

También se utilizarán los símbolos que a continuación se relacionan:

C_{Cj} = Corrección local de calibración del M2C, en el punto j -ésimo de calibración.

C_{Cje} = Corrección local de calibración del M2C, en el punto j -ésimo de calibración con extensiones.

C_{CM} = Corrección de calibración de la M1CH obtenida de su certificado de calibración.

C_{DM} = Corrección por deriva de la M1CH desde su última calibración.

C_{Dpt_1} = Corrección por desviación de planitud del tope plano 1 de los accesorios de BPL.

C_{Dpt2} = Corrección por desviación de planitud del tope plano 2 de los accesorios de BPL.

C_E = Corrección por división de escala del M2C.

C_{EM} = Corrección por división de escala de la M1CH.

DM_i = Desviación de la M1CH en el punto i , según su certificado de calibración.

DM_{i-1} = Desviación de la M1CH en el punto $i-1$, según su certificado de calibración.

D_{pt1} = Desviación de planitud de un tope plano de los accesorios de BPL.

D_{pt12} = Desviación de planitud del otro tope plano de los accesorios de BPL.

E = División de escala del M2C considerado.

k = Factor de cobertura.

Le = Longitud de la extensión e , de un M2C de tipo axial.

Le_i = Lectura i -ésima de la extensión e .

\overline{Le} = Media aritmética de las medidas de la extensión e , de un M2C de tipo axial.

N = Número de medidas de calibración realizadas.

N_b = Número de BPL adheridos entre sí para componer una longitud nominal determinada.

N_e = Número de extensiones que se usan con el M2C.

s_{c_j} = Desviación típica experimental de las lecturas del M2C, en el punto j de calibración.

$\overline{s_{c_j}}$ = Desviación típica de la media de lecturas del M2C, en el punto j de calibración.

s_{Le} = Desviación típica experimental de las medidas de la extensión e .

$\overline{s_{Le}}$ = Desviación típica de la media de las medidas de la extensión e .

u_{CM} = Incertidumbre típica de la corrección de calibración de la M1CH, obtenida de su certificado de calibración.

U_{CM} = Incertidumbre expandida de la corrección de calibración de la M1CH, obtenida de su certificado de calibración.

u_{c_j} = Incertidumbre típica de la media de las medidas del M2C en el punto j de calibración.

$u_{C_{c_j}}$ = Incertidumbre típica de la corrección de calibración local del M2C en el punto j de calibración.

$u_{C_{je}}$ = Incertidumbre típica de la corrección de calibración local del M2C en el punto j de calibración, cuando se utiliza con extensiones.

$U_{C_{ej}}$ = Incertidumbre expandida de la corrección local del M2C en el punto j de calibración.

$u_{c_{je}}$ = Incertidumbre típica de la corrección de calibración local del M2C en el punto j con extensiones.

$U_{c_{je}}$ = Incertidumbre expandida de la corrección de calibración local del M2C en el punto j con extensiones.

$U_{C_{c_{je}}}$ = Incertidumbre expandida de la corrección local del M2C en el punto j de calibración, cuando se utiliza con extensiones.

u_{DM} = Incertidumbre típica de la corrección por deriva de la M1C.

u_E = Incertidumbre típica de la corrección por división de escala del M2C.

u_{Le} = Incertidumbre típica de la longitud de la extensión e .

$u_{\bar{L}_e}$ = Incertidumbre típica de la media de las medidas de la extensión e .

U_{Le} = Incertidumbre expandida de la longitud de la extensión e .

u_{EM} = Incertidumbre típica de la corrección por división de escala de la M1CH.

u_{ohj} = Incertidumbre típica de la longitud del BPL h utilizado en el punto j de calibración; se obtiene de su certificado de calibración.

U_{ohj} = Incertidumbre expandida de la longitud del BPL h utilizado en el punto j de calibración; se obtiene de su certificado de calibración.

$u_{D_{pt_1}}$ = Incertidumbre típica de la desviación de planitud del tope plano 1 de los accesorios de BPL; se obtiene de su certificado de calibración.

$u_{D_{pt_2}}$ = Incertidumbre típica de la desviación de planitud del tope plano 2 de los accesorios de BPL, se obtiene de su certificado de calibración.

$x_{c_{ij}}$ = Lectura i -ésima del M2C, en el punto j de calibración.

\bar{x}_{c_j} = Media aritmética de las lecturas del M2C en el punto j de calibración.

x_{ohj} = Longitud certificada de los BPL adheridos en el punto j de calibración.

ν_{ef} = Grados efectivos de libertad.

5. DESCRIPCIÓN

Los M2C deben estar identificados al menos con un NÚMERO DE SERIE (preferiblemente) y si es posible además con la MARCA y el MODELO.

En caso de que no exista alguno de los datos antes citados, se puede proceder a la identificación del M2C de la mejor forma posible (por ejemplo mediante etiqueta fuertemente adherida al mismo, con un código de identificación único) de forma que no haya duda alguna entre el equipo calibrado y su correspondiente certificado de calibración emitido.

Todos los patrones e instrumentos utilizados en la calibración deberán tener trazabilidad a patrones nacionales o internacionales.

Los certificados de calibración de los patrones deberán contener al menos, la siguiente información:

- 1 Laboratorio emisor
- 2 Identificación del equipo calibrado
- 3 Fecha de emisión del certificado
- 4 Condiciones ambientales
- 5 Procedimiento de calibración
- 6 Resultados obtenidos en la calibración
- 7 Incertidumbre
- 8 Declaración de trazabilidad

5.1. Calibración de micrómetros de interiores de dos contactos

El presente procedimiento es aplicable tanto a los M2C laterales como a los axiales. Los axiales se calibran sin ninguna extensión y posteriormente se calibran las extensiones disponibles.

5.1.1. Equipos y materiales

Para la calibración se utilizarán BPL de las calidades que se indican en la tabla 1.

División de escala E (mm)	Calidad de los BPL
$E < 0,01$	1 o superior
$E \geq 0,01$	2 o superior

Tabla 1: Calidades de BPL utilizados para la calibración

Dos topes planos de los accesorios de BPL.

Un termómetro o un registrador de temperatura con división de escala $E \leq 1$ °C.

Como elementos auxiliares se utilizarán: una mordaza de los accesorios de BPL, trapos y algún producto desengrasante; se suelen utilizar trapos de algodón y como desengrasante una mezcla de alcohol y éter al 50 %.

5.1.2. Operaciones previas

Realizar una inspección visual del M2C a calibrar, para comprobar que no presenta golpes, deformaciones, oxidaciones, rayas, o cualquier otro defecto que imposibilite su uso.

Asimismo, comprobar que la cabeza micrométrica tiene los trazos grabados de forma que permitan una lectura correcta y que se mueve con suavidad en todo su recorrido.

En el caso de micrómetros digitales, comprobar el correcto estado de la batería.

Limpiar los BPL y accesorios de BPL con un paño y algún producto desengrasante, asegurándose de que no quedan restos del paño sobre los elementos antes indicados.

Realizar la adherencia entre BPL, sólo si es necesario para conseguir la longitud nominal que se vaya a utilizar. En cualquier caso no se recomienda realizar adherencias de más de tres BPL.

Embridar el BPL, o los BPL si se han adherido varios, y los topes planos sobre la mordaza (ver figura 3).

Dejar que se establezca térmicamente el M2C y el conjunto de BPL, topes y mordaza, al menos durante 30 min.

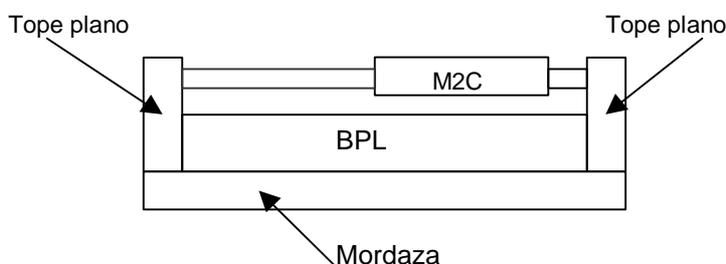


Figura 3: Disposición del BPL y los topes planos sobre la mordaza

Esta calibración es conveniente realizarla en salas de Metrología en las que se mantenga la temperatura en $20\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$.

La única magnitud de influencia a considerar en esta calibración es la temperatura. No es necesario realizar correcciones por temperatura, siempre que las condiciones ambientales de la sala se mantengan dentro del intervalo de temperaturas indicado en el párrafo anterior.

5.1.3. Proceso de Calibración

Se calibra el M2C en un mínimo de seis puntos, elegidos aproximadamente equidistantes, de forma que abarquen todo su campo de medida.

Situar el M2C entre los topes planos de los accesorios de BPL, girar la cabeza micrométrica hasta que los contactos de medida del M2C estén en contacto con los citados topes; anotar la lectura del M2C.

Se recomienda reiterar las operaciones antes indicadas, para obtener diez lecturas, alternando en cada una de ellas la posición del M2C respecto a los topes planos de los accesorios de BPL.

Reiterar este proceso en cada uno de los puntos de calibración seleccionados.

Finalizada la calibración y solo para los M2CA con extensiones, se calibran las extensiones según se indica en 5.2.

5.1.4. Toma y tratamiento de datos

Al iniciar la calibración se debe tomar la lectura de temperatura a la que se encuentra el laboratorio y durante la toma de las $x_{c_{ij}}$

Se aplicará algún criterio de aceptación o rechazo de las medidas realizadas, bien de tipo estadístico (Ej. Q de Dixon, Test de Huber, Chauvenet etc), bien basado en la experiencia del jefe del laboratorio.

Calcular la media aritmética de las lecturas de calibración, según la ecuación siguiente:

$$\bar{x}_{c_j} = \frac{\sum_{i=1}^N x_{c_{ij}}}{N}$$

Calcular la desviación típica experimental de las medidas de calibración realizadas, según la ecuación siguiente:

$$s_{c_j} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_{c_{ij}} - \bar{x}_{c_j})^2}{N-1}}$$

Calcular la desviación típica de la media de las medidas de calibración realizadas, según la ecuación siguiente:

$$s_{\bar{x}_{c_j}} = \frac{s_{c_j}}{\sqrt{N}}$$

Calcular la corrección local de calibración en cada punto de calibración, mediante la ecuación siguiente:

$$C_{c_j} = \sum_{h=1}^{Nb} X_{ohj} - \bar{x}_{c_j} + C_{D_{pt1}} + C_{D_{pt2}} + C_E$$

5.2. Calibración de las extensiones de los M2C axiales

Este procedimiento se aplica exclusivamente a los M2C axiales que dispongan de extensiones.

5.2.1. Equipos y materiales

Para la calibración se utilizarán los equipos que se indican a continuación:

Medidora de una coordenada horizontal con división de escala de 1 μm o menor.

Un termómetro o un registrador de temperatura, con división de escala $E \leq 1$ $^{\circ}\text{C}$.

Como elementos auxiliares se utilizarán: mesa de la M1CH, trapos y algún producto desengrasante; se suelen utilizar trapos de algodón y como desengrasante una mezcla de alcohol y éter al 50 %.

5.2.2. Operaciones previas

Limpiar las extensiones del M2C a calibrar, con un paño y algún producto desengrasante, asegurándose de que no quedan restos del paño sobre las extensiones.

Realizar una inspección visual de las extensiones a calibrar, para comprobar que no presentan golpes, deformaciones, oxidaciones, rayas, o cualquier otro defecto que imposibilite su uso. Comprobar que las roscas de acoplamiento están en condiciones de uso.

Encender la M1CH y dejar que se estabilicen térmicamente las extensiones y la M1CH al menos durante 30 minutos.

Situar en contacto los palpadores de la M1CH y hacer el cero de la misma, de acuerdo con su manual de instrucciones de uso.

Esta calibración es conveniente realizarla en salas de Metrología en las que se mantenga la temperatura en $20\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$.

La única magnitud de influencia a considerar en esta calibración es la temperatura. No es necesario realizar correcciones por temperatura, siempre que las condiciones ambientales de la sala se mantengan dentro del intervalo de temperaturas indicado en el párrafo anterior.

5.2.3. Proceso de Calibración

Situar la extensión a calibrar sobre la mesa de la M1CH, llevar los palpadores de la M1CH a contacto con los extremos de la extensión y anotar la lectura de la medidora.

Se recomienda reiterar las operaciones antes indicadas, para obtener diez lecturas, alternando la posición de la extensión entre los palpadores de la M1C, entre medida y medida.

5.2.4. Toma y tratamiento de datos

Al iniciar la calibración se debe tomar la lectura de la temperatura a la que se encuentra el laboratorio; durante la misma se toman las lecturas Le_i de la M1CH.

Se aplicará algún criterio de aceptación o rechazo de las medidas realizadas, bien de tipo estadístico (Ej. Q de Dixon, Test de Huber, Chauvenet etc.), bien basado en la experiencia del jefe del laboratorio.

Calcular la media aritmética de las lecturas de la extensión, según la ecuación siguiente:

$$\overline{Le} = \frac{\sum_{i=1}^N Le_i}{N}$$

Calcular la desviación típica experimental de las lecturas realizadas, según la ecuación siguiente:

$$s_{Le} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Le_i - \overline{Le})^2}{N-1}}$$

Calcular la desviación típica de la media de las lecturas realizadas, según la ecuación siguiente:

$$s_{\overline{Le}} = \frac{s_{Le}}{\sqrt{N}}$$

Calcular la longitud de la extensión mediante la ecuación siguiente:

$$Le = \overline{Le} + C_{CM} + C_{DM} + C_{EM}$$

6. RESULTADOS

Los cálculos de incertidumbre de este apartado, se realizan de acuerdo con los criterios de las referencias: [3] y [4].

6.1. Cálculo de incertidumbres

En los apartados siguientes, se indicará la forma de realizar el cálculo de incertidumbre de los M2C y de las extensiones, en el caso de los M2C axiales que dispongan de las mismas.

6.1.1. Calibración de M2C laterales y axiales en su campo de medida básico

La corrección local en cada punto de calibración viene dada por la siguiente ecuación:

$$C_{cj} = \sum_{h=1}^{Nb} X_{ohj} - \overline{X}_{cj} + C_{Dpt1} + C_{Dpt2} + C_E$$

En el caso de no usar BPLs adheridos entre sí, el sumatorio de la ecuación anterior, se reduce a la longitud del BPL utilizado.

Nota:

No se considera la corrección por deriva de los BPL dado que ésta es muy pequeña, del orden de 50 nm (según ref. [6]) para un BPL de 100 mm, frente a la división de escala del instrumento considerado 0,01 mm ó 0,001 mm.

Aplicando la ley de propagación de incertidumbres y considerando que todas las magnitudes de entrada son independientes, resulta:

$$u_{C_{cj}} = \sqrt{\sum_{h=1}^{Nb} u_{ohj}^2 + u_{cj}^2 + u_{Dpt1}^2 + u_{Dpt2}^2 + u_E^2}$$

La incertidumbre típica (u_{ohj}) de la longitud de cada BPL utilizado, se obtiene de su certificado de calibración.

$$u_{ohj} = \frac{U_{ohj}}{k}$$

La repetibilidad de las medidas de calibración (u_{c_j}), es igual a la desviación típica de la media calculada en el apartado 5.1.4.

$$u_{c_j} = \frac{s_{c_j}}{\sqrt{N}}$$

Las correcciones por desviación de planitud de los topes planos de los accesorios de BPL, se introducen como una corrección de media nula y distribución rectangular de semiapertura $D_{pt1}/2$ o $D_{pt2}/2$. La incertidumbre típica de dichas correcciones viene dada por las ecuaciones siguientes:

$$u_{D_{pt1}} = \frac{D_{pt1}}{\sqrt{12}} \quad u_{D_{pt2}} = \frac{D_{pt2}}{\sqrt{12}}$$

La corrección por división de escala del M2C, se introduce como una corrección de media nula y distribución rectangular de semiapertura $E/2$ (siendo E la división de escala del M2C). La contribución a la incertidumbre viene dada por la ecuación siguiente:

$$u_E = \frac{E}{\sqrt{12}}$$

Los estimadores de las variables y sus incertidumbres típicas se incluyen en la tabla 2 cuyo formato está recomendado según [4].

Tabla 2: Contribuciones a la incertidumbre combinada en la calibración de los M2C

Magnitud X_i	Estimación x_i	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Distribución de probabilidad	Coefficiente de sensibilidad c_i	Contribución a la incertidumbre $u(y)$
X_{ohj}	x_{ohj}	$\frac{\sum_{h=1}^{Nb} U_{ohj}}{k}$	normal	1	$\frac{\sum_{h=1}^{Nb} U_{ohj}}{k}$
\bar{X}_{c_j}	$-\bar{x}_{c_j}$	$\frac{s_{c_j}}{\sqrt{N}}$	normal	-1	$-\frac{s_{c_j}}{\sqrt{N}}$
$C_{D_{pt1}}$	0	$\frac{D_{pt1}}{\sqrt{12}}$	rectangular	1	$\frac{D_{pt1}}{\sqrt{12}}$
$C_{D_{pt2}}$	0	$\frac{D_{pt2}}{\sqrt{12}}$	rectangular	1	$\frac{D_{pt2}}{\sqrt{12}}$
C_E	0	$\frac{E}{\sqrt{12}}$	rectangular	1	$\frac{E}{\sqrt{12}}$
C_{c_j}	$C_{c_j} = \sum x_i$	Incertidumbre típica combinada ($u_{C_{c_j}}$)		$u_{C_{c_j}} = \sqrt{\sum u_i^2(y)}$	
		Incertidumbre expandida ($U_{C_{c_j}}$)		$U_{C_{c_j}} = k \cdot u_{C_{c_j}}$	

La incertidumbre expandida queda por tanto:

$$U_{C_{ej}} = k \cdot \sqrt{\frac{\sum_{h=1}^{Nb} U_{ohj}^2}{k^2} + \frac{s_{cj}^2}{N} + \frac{D_{pt_1}^2}{12} + \frac{D_{pt_2}^2}{12} + \frac{E^2}{12}}$$

Dado que en la mayor parte de los casos, las contribuciones con una distribución de probabilidad normal serán las que tienen más peso, el factor de cobertura k será igual a 2; de no ser así se calculan los grados efectivos de libertad mediante la ecuación de Welch-Satterthwaite (según [4]), la cual en este caso sería:

$$v_{ef} = \frac{u_{C_{ej}}^4}{\left(\frac{s_{cj}}{\sqrt{N}}\right)^4 \cdot N - 1}$$

dado que para el resto de contribuciones el número de grados efectivos de libertad sería infinito.

Una vez conocidos los grados efectivos de libertad, entrando en la tabla E.1 de la citada ref. [4], se obtiene el valor de k .

6.1.2. Calibración de extensiones de M2C axiales

La longitud de la extensión viene dada por la siguiente ecuación:

$$Le = \overline{Le} + C_{CM} + C_{DM} + C_{EM}$$

Aplicando la ley de propagación de incertidumbres y considerando que todas las magnitudes de entrada son independientes, resulta:

$$u_{Le} = \sqrt{u_{\overline{Le}}^2 + u_{CM}^2 + u_{DM}^2 + u_{EM}^2}$$

La repetibilidad de las medidas de calibración ($u_{\overline{Le}}$), es igual a la desviación típica de la media calculada en el apartado 5.2.4.

$$u_{\overline{Le}} = \frac{s_{Le}}{\sqrt{N}}$$

La incertidumbre típica (u_{CM}) de la corrección de calibración de la M1CH se obtiene del certificado de calibración de la misma.

$$u_{CM} = \frac{U_{CM}}{k}$$

La corrección por deriva de la M1CH se introduce considerando una corrección de media nula, con distribución uniforme de semiamplitud $|D_i - D_{i-1}|$ (este valor se obtiene de los dos certificados de calibración precedentes consecutivos de la M1CH, que den lugar a una mayor diferencia entre desviaciones), en consecuencia su desviación típica es:

$$u_{DM} = \frac{|D_i - D_{i-1}|}{\sqrt{3}}$$

La corrección por división de escala de la M1CH, se introduce con una corrección de media nula y distribución rectangular de semi-amplitud $E/2$ (siendo E la división de escala de la M1CH), su contribución a la incertidumbre, viene dada por la ecuación siguiente:

$$u_{ME} = \frac{E}{\sqrt{12}}$$

Los estimadores de las variables y sus incertidumbres típicas se incluyen en la tabla 3 cuyo formato está recomendado según [4].

Tabla 3: Contribuciones a la incertidumbre combinada en la calibración de las extensiones de M2C axiales.

Magnitud X_i	Estimación x_i	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Distribución de probabilidad	Coefficiente de sensibilidad c_i	Contribución a la incertidumbre $u(y)$
L_e	L_e	$\frac{s_{L_e}}{\sqrt{N}}$	normal	1	$\frac{s_{L_e}}{\sqrt{N}}$
C_{CM}	C_{CM}	$\frac{U_{CM}}{k}$	normal	1	$\frac{U_{CM}}{k}$
C_{DM}	C_{DM}	$\frac{ D_i - D_{i-1} }{\sqrt{3}}$	rectangular	1	$\frac{ D_i - D_{i-1} }{\sqrt{3}}$
C_{EM}	0	$\frac{E}{\sqrt{12}}$	rectangular	1	$\frac{E}{\sqrt{12}}$
L_e	$L = \sum x_i$	Incertidumbre típica combinada (u_{L_e})			$u_{L_e} = \sqrt{\sum u_i^2(y)}$
		Incertidumbre expandida (U_{L_e})			$U_{L_e} = k \cdot u_{L_e}$

La incertidumbre expandida queda por tanto:

$$U_{L_e} = k \cdot \sqrt{\frac{s_{L_e}^2}{N} + \frac{U_{CM}^2}{k^2} + \frac{|D_i - D_{i-1}|^2}{3} + \frac{E^2}{12}}$$

Dado que en la mayor parte de los casos, las contribuciones con una distribución de probabilidad normal serán las que tienen más peso, el factor de cobertura k será igual a 2; de no ser así se calculan los grados efectivos de libertad mediante la ecuación de Welch-Satterthwaite (según [4]), la cual en este caso sería:

$$v_{ef} = \frac{u_{L_e}^4}{\left(\frac{s_{L_e}}{\sqrt{N}}\right)^4 \cdot N - 1}$$

dado que para el resto de contribuciones el número de grados efectivos de libertad sería infinito.

Una vez conocidos los grados efectivos de libertad, entrando en la tabla E.1 de la citada ref. [4], se obtiene el valor de k .

6.1.3. Calibración de los M2C axiales cuando se utilizan con extensiones

Cuando los M2C axiales se utilizan con extensiones, la corrección local de calibración viene dada por la siguiente ecuación:

$$C_{cje} = C_{cj} + \sum_{e=1}^{Ne} Le$$

Aplicando la ley de propagación de incertidumbres y considerando que todas las magnitudes de entrada son independientes, resulta:

$$u_{C_{cje}} = \sqrt{u_{C_{cj}}^2 + \sum_{e=1}^{Ne} u_{Le}^2}$$

La incertidumbre típica ($u_{C_{cj}}$) se calcula según se indica en el apartado 6.1.1.

La incertidumbre típica (u_{Le}) se calcula según se indica en el apartado 6.1.2.

La incertidumbre expandida de la corrección local de calibración viene dada por la siguiente ecuación:

$$U_{C_{cje}} = k \cdot u_{C_{cje}}$$

6.2. Interpretación de resultados

En la mayor parte de los casos, las contribuciones de incertidumbre que presentan una distribución normal serán las que tienen más peso y las otras son estimaciones tipo B con grados de libertad infinitos; por tanto, para una probabilidad del 95 %, el factor de cobertura k será igual a 2.

En determinados casos en los que alguna contribución de incertidumbre sea dominante sobre las demás y su distribución no sea normal, sería necesario calcular la distribución que corresponde al resultado de la calibración y su correspondiente factor de cobertura para una probabilidad del 95 %.

Habitualmente se realizan los cálculos con una cifra decimal más de la división de escala del instrumento utilizado, redondeando al final, según [3], el valor de la corrección local de calibración y su incertidumbre a un múltiplo entero de la división de escala del instrumento.

En los certificados de calibración de M2C emitidos por los laboratorios de calibración acreditados, como mínimo, debe figurar: el valor de la corrección local de calibración en cada punto de calibración y su incertidumbre expandida, con su correspondiente factor de cobertura k ; para las extensiones: su longitud y la incertidumbre expandida de la misma, con su correspondiente factor de cobertura k .

6.2.1. Períodos de recalibración

A título orientativo, se considera adecuado recalibrar los M2C cada 12 meses.

En cualquier caso este período es una mera recomendación, siendo el usuario de los M2C quien debe fijar el valor que considere oportuno.

El período de recalibración antes indicado, se debería reducir en el caso de que se presente alguna de las circunstancias siguientes:

- Elevada frecuencia de utilización.
- Condiciones de empleo desfavorables (personal poco cualificado, ambientes sucios, uso al aire libre etc.).
- Cuando se necesiten requisitos especiales de seguridad (Defensa, Sanidad, Justicia, etc.).

Siempre debe procederse a una recalibración de los M2C, cuando los resultados que se estén obteniendo hagan dudar al usuario de la validez de los mismos.

7. REFERENCIAS

- [1] Procedimiento para la elaboración de procedimientos de calibración. Grupo de Trabajo MINER-CEM. Ed. 2, Tres Cantos, Madrid. Año 2000.
- [2] Vocabulario Internacional de Metrología. Conceptos fundamentales y generales y términos asociados. 3ª edición 2012 (Ed. VIM 2008 con inclusión de pequeñas correcciones), Centro Español de Metrología, 2012.
- [3] Evaluación de datos de medición. Guía para la expresión de la incertidumbre de medida., 3ª ed. en español (traducción de 1ª ed. 2008 en inglés), Centro Español de Metrología, 2009, NIPO: 706-09-002-65.
- [4] Guide EA-4/02 M: 2013, Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration, Sept. 2013, rev. 01.
- [5] Clasificación de Instrumentos de Metrología Dimensional. 1ª ed. Centro Español de Metrología, 2005, NIPO: 165-02-003-4.
- [6] Norma UNE-EN ISO 3650:2000, Especificación geométrica de productos (GPS). Patrones de longitud. Bloques patrón. (ISO 3650:1998).

8. ANEXO. Ejemplo de aplicación del procedimiento descrito

8.1. Calibración de un micrómetro de interiores de dos contactos axial con tres extensiones.

Se calibra un M2CA de las siguientes características:

- Campo de medida básico $C = 15$ mm.
- Alcance del campo de medida básico $A = 65$ mm.
- División de escala $E = 0,01$ mm.
- Dispone de tres extensiones de longitudes nominales 15 mm, 30 mm y 60 mm.

La calibración del M2CA sin extensiones se realiza con BPL y dos accesorios de BPL (topes planos), de las siguientes características:

- Juego de BPL de calidad 1; el certificado de su última calibración proporciona para cada bloque su desviación al nominal y su incertidumbre expandida.
- De los resultados del certificado de la última calibración de los BPL, se obtienen sus longitudes, las cuales se recogen en la tabla 4, estando expresadas las incertidumbres expandidas para $k = 2$.

Tabla 4: Resultados de la última calibración de los BPL

Nominal (mm)	Última calibración (mm)	
	Longitud x_{ohj} (mm)	U_{ohj} (μm)
2,000	1,999 9	0,11
3,000	3,000 2	0,11
5,000	5,000 1	0,11
6,000	6,000 1	0,11
9,000	9,000 0	0,11
50,000	50,000 2	0,15
60,000	60,000 2	0,18

- Los topes planos tienen en su último certificado de calibración desviaciones de planitud $D_{pt1} = 4 \mu\text{m}$ y $D_{pt2} = 5 \mu\text{m}$, con una incertidumbre expandida $U_{pt1} = U_{pt2} = 4 \mu\text{m}$, para un factor de cobertura $k = 2$.

Las longitudes patrón e incertidumbres típicas de las mismas obtenidas por adherencia de BPL son las indicadas en la tabla 5.

Tabla 5: Longitud e incertidumbre de las longitudes patrón en los distintos puntos de calibración.

Punto de calibración (j)	1	2	3	4	5	6
Nominal del patrón (mm)	50,000	53,000	56,000	59,000	62,000	65,000
Longitud patrón (mm)	50,000 2	53,000 4	56,000 3	59,000 2	62,000 1	65,000 3

Incertidumbre típica de la longitud patrón (μm)	0,075	0,093	0,093	0,093	0,105	0,105
--	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Se realiza la calibración en la forma descrita en el apartado 5.1.3, obteniéndose las lecturas y resultados que se indican en la tabla 6.

La temperatura durante la calibración se mantiene en $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tabla 6: Toma de datos de la calibración del M2CA en su campo básico

Punto de calibración (j)	1	2	3	4	5	6
Nominal del patrón (mm)	50,000	53,000	56,000	59,000	62,000	65,000
Lecturas (mm)	50,01	52,99	56,00	58,98	62,01	65,01
	50,01	53,00	56,00	58,99	62,02	65,00
	50,00	52,99	56,01	58,99	62,01	65,00
	50,01	53,00	56,01	59,00	62,01	65,01
	50,00	53,00	56,00	58,99	62,00	65,02
	50,00	53,00	56,00	58,99	62,00	65,02
	50,00	53,00	56,01	58,99	62,00	65,02
	50,00	53,00	56,00	58,99	62,00	65,01
	50,01	52,99	56,01	59,00	62,01	65,00
50,01	52,99	56,00	59,00	62,01	65,01	

Se realizan los cálculos indicados en el punto 5.1.4 y 6.1 obteniéndose los resultados que se indican en la tabla 7.

Tabla 7: Resultados de la calibración del M2CA

Punto de calibración (j)	1	2	3	4	5	6
Nominal del patrón (mm)	50,000	53,000	56,000	59,000	62,000	65,000
Longitud patrón (mm)	50,000 2	53,000 4	56,000 3	59,000 2	62,000 1	65,000 3
Incertidumbre típica de la longitud patrón (μm)	0,075	0,093	0,093	0,093	0,105	0,105
Lecturas (mm)	50,01	52,99	56,00	58,98	62,01	65,01
	50,01	53,00	56,00	58,99	62,02	65,00
	50,00	52,99	56,01	58,99	62,01	65,00
	50,01	53,00	56,01	59,00	62,01	65,01
	50,00	53,00	56,00	58,99	62,00	65,02
	50,00	53,00	56,00	58,99	62,00	65,02
	50,00	53,00	56,01	58,99	62,00	65,02
	50,00	53,00	56,00	58,99	62,00	65,01
	50,01	52,99	56,01	59,00	62,01	65,00
50,01	52,99	56,00	59,00	62,01	65,01	
\bar{X}_{cj} (mm)	50,005	52,996	56,004	58,993	62,007	65,008

C_{cj} (mm)	-0,005	0,004	-0,004	0,007	-0,007	-0,008
s_{cj} (mm)	0,005	0,005	0,005	0,007	0,007	0,008
$u_{C_{cj}}$ (mm)	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
$U_{C_{cj}}$ ($k = 2$) (mm)	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
C_{cj} (mm) redondeada a E	-0,01	0,01	-0,01	0,01	-0,01	-0,01
$U_{C_{cj}}$ (mm) redondeada a E	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

En la tabla 8 se indican las contribuciones de incertidumbre en el punto de nominal 56,000 mm.

Tabla 8: Contribuciones a la incertidumbre combinada en el punto de nominal 56,000 mm

Magnitud X_i	Estimación x_i	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Distribución de probabilidad	Coficiente de sensibilidad c_i	Contribución a la incertidumbre $u(y)$
X_{ohj}	56,000 3	0,000 093	normal	1	0,000 093
\bar{X}_{cj}	56,004	0,002	normal	-1	-0,002
C_{Dpt_1}	0	0,001	rectangular	1	0,001
C_{Dpt_2}	0	0,001	rectangular	1	0,001
C_E	0	0,003	rectangular	1	0,003
C_{cj}	-0,004	Incertidumbre típica combinada ($u_{C_{cj}}$)			$u_{C_{cj}} = 0,004 \mu\text{m}$
		Incertidumbre expandida ($U_{C_{cj}}$)			$U_{C_{cj}} = 0,008 \mu\text{m}$

8.2. Calibración de las extensiones del M2CA.

Se calibran las tres extensiones con una M1CH de las siguientes características:

- Rango de medida $C = 500$ mm.
- División de escala $E = 0,001$ mm.
- La corrección de calibración obtenida del certificado de calibración de la M1CH es: $C_{CM} = 0$.
- La incertidumbre expandida de la corrección de calibración de la M1CH obtenida de su último certificado de calibración es: $U_{CM} = 2 \mu\text{m}$ (para $k = 2$).
- De calibraciones anteriores de la M1CH se dispone de los siguientes datos: $D_i = 0$ y $D_{i-1} = 0$.

La temperatura durante la calibración se mantiene en $20 \text{ °C} \pm 1 \text{ °C}$.

Tabla 9: resultados de la calibración de las extensiones del M2CA

Extensión (e)	1	2	3
Longitud nominal (mm)	15	30	60
Lecturas (mm)	15,002	30,000	60,000
	15,000	29,997	60,000
	15,002	30,001	59,997
	15,002	30,001	59,999
	15,004	30,000	59,998
	15,002	30,000	60,000
	15,002	29,997	60,000
	15,000	29,997	59,997
	15,002	30,001	59,999
	15,000	30,000	60,000

Se realizan los cálculos indicados en los puntos 5.2.4 y 6.1.2 obteniéndose los resultados que se indican en la tabla 10.

Tabla 10: resultados de la calibración de las extensiones del M2CA

Extensión (e)	1	2	3
Longitud nominal	15	30	60
Lecturas (mm)	15,002	30,000	60,000
	15,000	29,997	60,000
	15,002	30,001	59,997
	15,002	30,001	59,999
	15,004	30,000	59,998
	15,002	30,000	60,000
	15,002	29,997	60,000
	15,000	29,997	59,997
	15,002	30,001	59,999
	15,000	30,000	60,000
$\overline{L_e}$ (mm)	15,001 6	29,999 4	59,999 0
$S_{\overline{L_e}}$ (mm)	0,001 3	0,001 7	0,001 3
u_{L_e} (mm)	0,004 2	0,004 3	0,004 2
U_{L_e} (mm) para $k = 2$	0,008 4	0,008 6	0,008 4
L_e (mm) redondeada a E	15,002	29,999	59,999
U_{L_e} (mm) redondeada a E	0,008	0,009	0,008

8.3. Corrección de calibración e incertidumbre de la corrección del M2CA cuando se utiliza con extensiones.

A partir de las ecuaciones del apartado 6.1.3, se obtienen las correcciones de calibración e incertidumbres de las mismas cuando se utiliza el M2CA con extensiones.

En la tabla 11 se indican para el punto origen, los valores de estas incertidumbres cuando se usa el M2CA del apartado I.1 con las extensiones del apartado I.2.

Tabla 11: Corrección de calibración e incertidumbre de la misma cuando se usa el M2CA con extensiones

Extensión	L_e (mm)	C_{cj} (mm)	C_{cje} (mm)	u_{cje} (mm)	U_{cje} (mm) $k = 2$
15	15,002	- 0,01	14,992	0,006	0,012
30	29,999	- 0,01	29,989	0,006	0,012
60	59,999	- 0,01	59,989	0,006	0,012

Los valores de la corrección de calibración y su incertidumbre redondeados a la división de escala del instrumento serían los que se indican en la tabla 12.

Tabla 12: Corrección de calibración e incertidumbre de la misma, redondeadas a la división de escala del M2C, cuando se usa el M2CA con extensiones

Extensión	C_{cje} (mm)	U_{cje} (mm) $k = 2$
15	14,99	0,02
30	29,99	0,02
60	59,99	0,02

Metrología

NIPO: 113-19-006-0