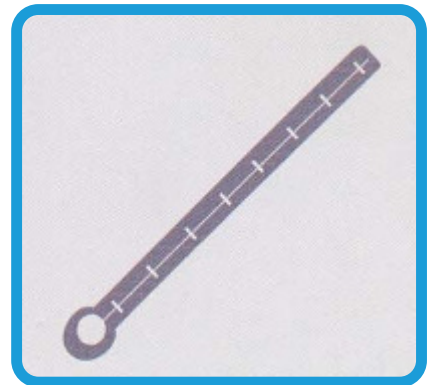
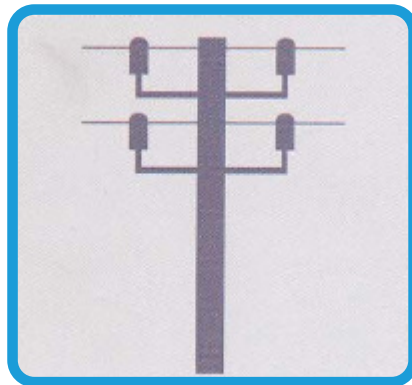
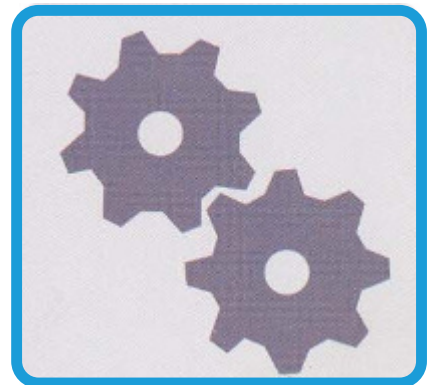
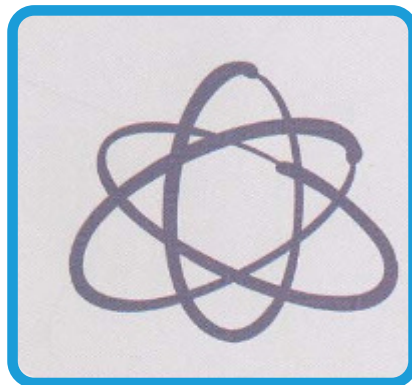
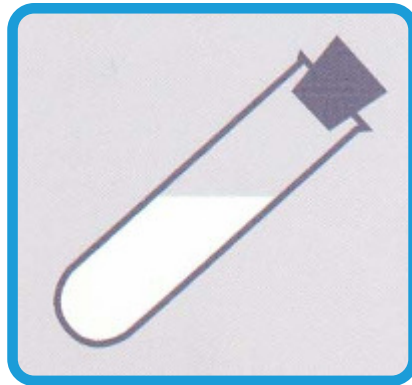
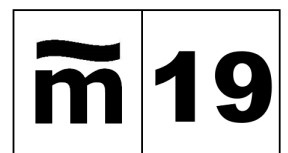


# Metrología



PROCEDIMIENTO DI-0007 PARA LA  
CALIBRACIÓN DE MÁQUINAS DE UNA  
COORDENADA HORIZONTAL



# **PROCEDIMIENTO DI-007**

## **CALIBRACIÓN DE MÁQUINAS DE UNA COORDENADA HORIZONTAL**

La presente edición de este procedimiento se emite exclusivamente en formato digital y puede descargarse gratuitamente de nuestra página web ([www.cem.es](http://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 .....	5
5. DESCRIPCIÓN .....	6
5.1. Equipos y materiales .....	6
5.2. Operaciones previas.....	6
5.3. Proceso de calibración .....	8
5.4. Toma y tratamiento de datos .....	9
6. RESULTADOS.....	10
6.1. Cálculo de incertidumbres.....	10
6.2. Interpretación de resultados .....	17
7. REFERENCIAS .....	18
8. ANEXO .....	18
8.1 Ejemplo numérico de aplicación del procedimiento descrito .....	18

## 1. OBJETO

El objeto de este procedimiento es proporcionar un método adecuado para la calibración de medidoras de una coordenada horizontal, codificadas como D-02.04 (medidoras de una coordenada horizontal), según la clasificación de Instrumentos de Metrología Dimensional (ref. [5]).

## 2. ALCANCE

El presente procedimiento es de aplicación a medidoras de una coordenada horizontal (M1CH), tanto de lectura analógica como digital sobre escalas o reglas patrón, de forma directa o mediante un dispositivo óptico, o también utilizando un sistema láser.

El dispositivo de ajuste final de la lectura se realiza mediante un palpador de contacto mecánico de lectura digital o analógica. Las medidoras de una coordenada horizontal disponen de un mecanismo para el ajuste de la fuerza de palpado y para la elección de su sentido, que puede ser decreciente (para medición de exteriores) o bien creciente (para mediciones de interiores y medidas especiales).

El procedimiento es válido para las diferentes divisiones de escala o resoluciones de las que disponen las diferentes medidoras de una coordenada horizontal existentes en el mercado, las más usuales de 0,1  $\mu\text{m}$ , 0,2  $\mu\text{m}$ , 0,5  $\mu\text{m}$ , 1  $\mu\text{m}$ , 2  $\mu\text{m}$  y 5  $\mu\text{m}$ .

El presente procedimiento se basa en la utilización de bloques patrón longitudinales, aunque también podrían utilizarse sistemas láser, principalmente para las M1CH de gran campo de medida. Este último método no se contempla en el presente procedimiento.

## 3. DEFINICIONES

Son de aplicación las definiciones de la referencia [2]. Algunas de ellas se indican a continuación, además de otras específicas para el presente procedimiento.

### Medidora de una coordenada horizontal

Equipo medidor de dimensiones, con sistema de amplificación óptico, electrónico o más recientemente mediante sistema láser, que permite la realización de medidas directas o por comparación, ajustando la lectura final mediante comparador electrónico. Los principales componentes de una medidora de una coordenada horizontal son: sistema de palpado, regla patrón graduada o sistema interferométrico láser, objetivo de amplificación para la lectura, o sistema de amplificación electrónico y visualizador digital, mesas accesorias para las medidas de las diferentes posibilidades de medición, bancada sólida (normalmente de fundición) y equipos auxiliares.

Para el ajuste inicial de la máquina (puesta a cero), se dispone normalmente de un bloque patrón de referencia, el cual deberá estar calibrado.

### Sistema interferométrico láser

Sistema de medida basado en una fuente láser que permite utilizar fenómenos de interferencia para el conteo de las franjas contenidas en una determinada longitud, o bien evaluar el desplazamiento relativo existente entre dos sistemas de franjas. Contar el número de franjas es equivalente a contabilizar cuántas semilongitudes de onda de la radiación utilizada están contenidas en una determinada longitud.

### Captador de desplazamiento electrónico

Sistema de captación que transforma una variación de longitud en una variación de una magnitud eléctrica. Los captadores pueden ser inductivos, capacitivos o potenciométricos, según que la punta del palpador móvil vaya solidaria a un núcleo de material magnético, que puede desplazarse en el interior de una bobina, o bien forme parte de una placa de un condensador, o del cursor de un potenciómetro. El palpador modifica la inducción de la bobina en función de su longitud dentro de la misma, lo cual es traducido a distancia y amplificado electrónicamente; los desplazamientos pueden ser leídos en un visualizador digital o analógico, logrando resoluciones de hasta 0,01  $\mu\text{m}$ .

### Palpador mecánico de cuadrante

Sistema parecido al anterior, con la diferencia de que, en este caso, la amplificación se realiza mecánicamente mediante un sistema de engranajes o mediante palanca. Puede ser leído como desplazamiento de una aguja sobre una escala circular. La resolución de estos es peor (normalmente de 10  $\mu\text{m}$ ).

### Patrón de planitud de vidrio

Patrón codificado como D-06.04 (ref. [5]), con forma de disco cilíndrico, que permite determinar la planitud de otros patrones o elementos (bloques patrón, bocas de medida de micrómetros, etc.). Para el análisis de la planitud utiliza el fenómeno de generación de interferencias, con la ayuda de una fuente de luz monocromática.

### Corrección

Valor sumado algebraicamente al resultado sin corregir de una medición para compensar un error sistemático.

### Sensor [2] (3.8)

Elemento de un sistema de medida directamente afectado por la acción del fenómeno, cuerpo o sustancia portador de la magnitud a medir.

EJEMPLOS: Bobina sensible de un termómetro de resistencia de platino, rotor de la turbina de un medidor de flujo, tubo Bourdon de un manómetro, flotador de un instrumento medidor de nivel, célula fotoeléctrica de un espectrómetro, cristal líquido termotrópico que cambia su color en función de la temperatura.

NOTA En algunos campos se emplea el término "detector" para este concepto.

### Escala (de un instrumento de medida) [2] (3.5)

Parte de un instrumento de medida con visualizador, que consiste en un conjunto ordenado de marcas, eventualmente acompañadas de números o valores de la magnitud.

### Ajuste (de un instrumento o sistema de medida) [2] (3.11)

Conjunto de operaciones realizadas sobre un sistema de medida para que proporcione indicaciones prescritas, correspondientes a valores dados de la magnitud a medir.

NOTA 1 Diversos tipos de ajuste de un sistema de medida son: ajuste de cero, ajuste del *offset* (*desplazamiento*) y ajuste de la amplitud de escala (denominado también ajuste de la ganancia).

NOTA 2 No debe confundirse el ajuste de un sistema de medida con su propia calibración, que es un requisito para el ajuste.

NOTA 3 Después de su ajuste, generalmente un sistema de medida debe ser calibrado nuevamente.

#### Resolución [2] (4.14)

Mínima variación de la magnitud medida que da lugar a una variación perceptible de la indicación correspondiente.

NOTA La resolución puede depender, por ejemplo, del ruido (interno o externo) o de la fricción. También puede depender del valor de la magnitud medida.

## 4. GENERALIDADES

Una medidora de una coordenada horizontal (M1CH) es un instrumento con capacidad para la medición de longitudes de patrones materializados (bloques patrón longitudinales, barras de extremos, patrones lisos de diámetro exterior e interior, patrones roscados exteriores e interiores), y para la realización de mediciones específicas (calibración de micrómetros, de comparadores mecánicos de cuadrante, medición de distancias entre caras paralelas, diámetros interiores y exteriores, roscas de interior y exterior, esferas, etc.).

El sistema de medida utilizado por este tipo de instrumentos puede ser de lectura digital o analógica directas, o por medio de un dispositivo óptico. En los sistemas de lectura digital el enrastre final de la lectura no depende del observador, eliminando de esta manera los posibles errores de lectura que se puedan cometer y mejorando así la resolución. Para el ajuste final de lectura de la medida, utiliza un captador de desplazamiento (normalmente de tipo inductivo) que es utilizado bien manualmente o de forma automática, como posicionador de precisión para la realización de la medida.

Las medidoras de una coordenada horizontal tienen la posibilidad, adaptando los accesorios adecuados, de calibrar bloques patrón longitudinales mayores de 100 mm, mediante comparación con otro bloque de igual longitud nominal.

El procedimiento de calibración que se desarrolla a continuación para la calibración de las medidoras de una coordenada horizontal, se basa en el uso de patrones materializados de longitud, es decir de bloques patrón longitudinales, codificados como D-01.02 (ref. [5]).

Las M1CH son instrumentos que, por su construcción, están de acuerdo con lo que se conoce como principio de Abbe, según el cual “la máxima exactitud se obtiene únicamente cuando el patrón está en línea con el eje de la pieza bajo medición”. Para el caso de las M1CH la regla suele ir alojada en el carro, coincidiendo su eje de medida con el del objeto a medir.

Sin embargo, es posible cometer un error de alineamiento, que se puede presentar cuando se mida con la M1CH y no tengamos precaución de alinear correctamente la pieza a medir respecto del instrumento. Este error es difícil de comprobar, pero se podrá evitar si tenemos cuidado al efectuar las medidas y hacemos el alineamiento de la pieza haciendo uso adecuado de los mecanismos de que suelen disponer.

#### Notación

En este procedimiento se utilizan las siguientes notaciones:

M1CH	Medidora de una coordenada horizontal
BPL	Bloque patrón longitudinal

## 5. DESCRIPCIÓN

### 5.1. Equipos y materiales

Para la calibración se utilizarán bloques patrón longitudinales de calidad 1 o mejor, con su correspondiente certificado de calibración.

Para M1CH de división de escala o resolución inferior o igual a  $1\ \mu\text{m}$  se utilizarán bloques de grado 0, y para las de división de escala superior a  $1\ \mu\text{m}$  se utilizarán preferentemente bloque patrón de grado 1.

Se deberá contar con un patrón de vidrio plano-paralelo, de planitud inferior a  $0,1\ \mu\text{m}$ , y una lámpara de luz monocromática.

Para realizar la corrección de temperatura, se dispondrá de un sensor de contacto, de resolución igual o inferior a  $0,1\ ^\circ\text{C}$ , para poder situarlo sobre los patrones a utilizar en la calibración, observando el incremento de temperatura que sufren éstos durante el proceso. Para el caso de M1CH que efectúen la medida mediante láser se deberá contar con un sensor de ambiente próximo al camino del haz (pero sin que se interponga en su camino).

Asimismo, para el conocimiento de la temperatura ambiente, es recomendable contar con un sensor de resolución igual o inferior a  $0,1\ ^\circ\text{C}$ , situado próximo a la máquina. La misma resolución puede ser apropiada para conocer la temperatura del bloque patrón.

Se dispondrá de todo lo necesario para una adecuada limpieza de los bloques. Se utilizarán paños y tejidos suaves que no suelten fibras y un producto adecuado (p. ej., mezcla de alcohol y éter al 50 %).

Para la calibración de la M1CH se utilizarán los accesorios adecuados incluidos en su dotación (mesas nivelantes, bloque patrón de ajuste inicial, etc.)

### 5.2. Operaciones previas

5.2.1 Para proceder a la calibración de una M1CH, ésta debe encontrarse perfectamente identificada en lo que se refiere a MARCA, MODELO y NÚMERO DE SERIE. En caso de que no exista alguno de estos datos, se procederá a la identificación del instrumento de la mejor forma posible (p. ej., mediante etiqueta firmemente adherida al instrumento) de forma que no surja duda alguna en cuanto a la correspondencia entre el equipo calibrado y el Certificado emitido.

5.2.2 La calibración se realizará en un recinto acondicionado, con una temperatura dentro de  $20\ ^\circ\text{C} \pm 1\ ^\circ\text{C}$ . Toda desviación de la temperatura de referencia ( $20\ ^\circ\text{C}$ ), observada mediante la lectura del sensor de temperatura, implica la aplicación de una corrección, tal como se describe en el punto 5.4 apartado 2.

5.2.3 Se verificará que toda la dotación de la M1CH, necesaria para la calibración, se encuentra completa y disponible.

5.2.4 Se procederá a preparar el conjunto de patrones que va a ser utilizado, limpiándolos cuidadosamente mediante paños y tejidos suaves, que no suelten fibras, y utilizando un producto adecuado (p. ej., mezcla de alcohol y éter al 50 %).

- 5.2.5 Los patrones a emplear se situarán próximos a la M1CH, preferiblemente sobre una base metálica, dejándolos estabilizar al menos durante 5 horas.
- 5.2.6 Se comprobará mediante el patrón de vidrio plano-paralelo la planitud correcta de los palpadores planos de la M1CH, para lo cual se colocará el vidrio sobre la superficie de cada palpador, y se comprobará el estado de estos, es decir, ausencia de rayas, arañazos o puntos de óxido. La planitud debe ser inferior a  $1\ \mu\text{m}$  (lo que corresponde aproximadamente a 4 franjas de interferencia, si se utiliza una lámpara de sodio). Si presentara alguno de los problemas señalados o la planitud no fuera la correcta, no se realizará la calibración hasta la sustitución o reparación de los palpadores.
- 5.2.7 Antes de iniciar la calibración de la M1CH y una vez encendida se esperará unos 30 minutos para la estabilización de los componentes y la electrónica de la M1CH.
- 5.2.8 Transcurridos los 30 minutos, se procederá al ajuste de la M1CH con el juego de palpadores planos, de la siguiente manera:
- 5.2.8.1. Se situará entre los palpadores un bloque patrón longitudinal de longitud nominal 5 mm o 10 mm (o del que disponga la máquina para realizar esta operación de ajuste inicial). Este bloque dispondrá de su certificado de calibración en vigor.
- 5.2.8.2. Con el bloque indicado y con los palpadores planos se ajustará la máquina, tomando como valor de referencia el del bloque. Esta operación se repetirá unas 5 veces comprobando que el valor del bloque se repite correctamente. Si no, se volverá a iniciar el ajuste. No se recomienda poner en contacto entre sí los dos palpadores planos (se registrarán todos los valores obtenidos).
- 5.2.8.3. La calibración de la M1CH se realizará con bloques patrón longitudinales de caras planas y paralelas, por lo que es aconsejable utilizar palpadores esféricos (se recomienda utilizar palpadores esféricos para palpar superficies planas y palpadores planos para superficies esféricas o cilíndricas). Para determinar la constante  $K_p$  de los palpadores esféricos (o de otro tipo que no sean los básicos), se realizarán 10 medidas consecutivas sobre el bloque utilizado para el ajuste inicial. El valor de  $K_p$  se anotará para restarlo de las medidas que posteriormente se realicen con dichos palpadores. Del valor obtenido de la media de esas medidas se restará la longitud del bloque según indique el certificado del mismo, es decir

$$K_p = \overline{M} - L_p \quad [1]$$

siendo:

$\overline{M}$  : el valor medio de las 10 medidas realizadas.

$L_p$  : longitud del bloque patrón utilizado para el ajuste, según su certificado.

si la M1CH dispone de cero flotante, se introducirá mediante el teclado la longitud del bloque (según certificado) y se volverá a medir el bloque para comprobar que se repite correctamente la longitud del bloque de referencia.



### 5.3. Proceso de Calibración

- 5.3.1 La calibración de la M1CH se realizará en 10 puntos materializados con bloques patrón, de tal manera que se cubra su campo de medida y dichas longitudes sean aproximadamente equidistantes (entre estos se incluirán el valor mínimo y máximo del campo de medida, o próximos a ellos).
- 5.3.2 Los puntos de calibración se materializarán preferiblemente sin adherir bloques entre sí, aunque si no se dispone de bloques de longitud adecuada para cubrir todo el campo de medida de la M1CH se podrán adherir bloques.
- 5.3.3 Los bloques patrón de longitud tal que necesiten dos mesas nivelantes (accesorios normales de la M1CH para este tipo de medidas) para situarlos en la M1CH (normalmente los de  $L > 100$  mm), se apoyarán sobre los denominados puntos de Airy, situados a  $0,211 L$  mm de sus extremos (siendo  $L$  la longitud nominal del bloque en mm). Algunos bloques llevan indicados dichos puntos mediante dos rayas en la cara lateral marcada (ver fig. 1).

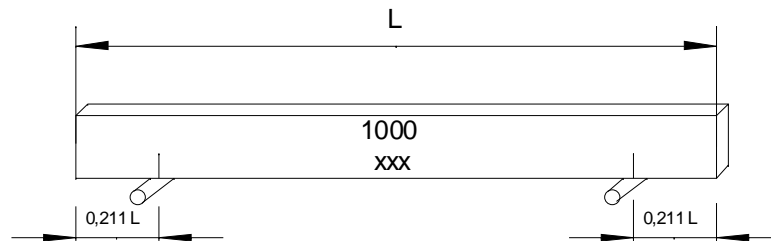


Fig. 1

- 5.3.4 Se realizarán 10 medidas en total por cada bloque, 5 medidas en la posición A (visto el bloque de frente se lee la cara marcada), y 5 medidas en la posición B (cara marcada oculta, manteniendo la misma cara lateral de apoyo), según se ve en la fig. 2.

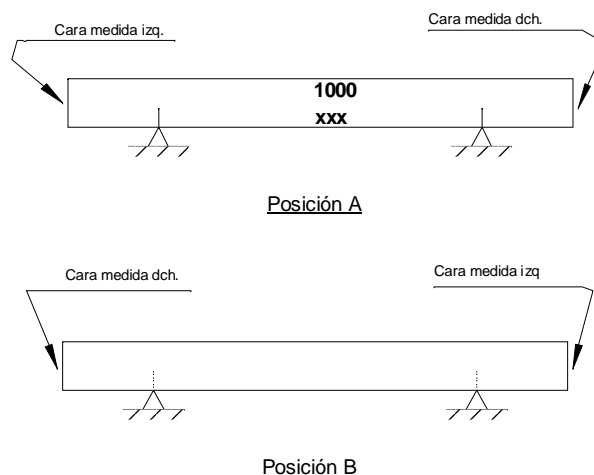


Fig. 2

- 5.3.5 Cada bloque que se mida se deberá alinear correctamente respecto de los ejes de medida de la M1CH antes de efectuar la lectura, para lo cual se actuará sobre las mesas de apoyo y se buscará la lectura mínima en la indicación del instrumento, en dos direcciones perpendiculares al eje de medida de la máquina que une los dos palpadores (ver fig. 3).

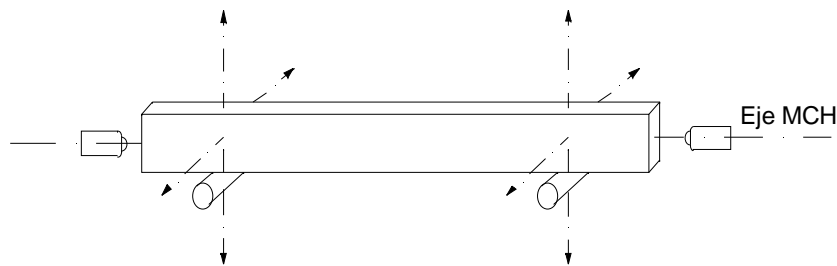


Fig. 3

5.3.6 Antes de cada observación repetida de cada bloque, se separará el palpador y se iniciará el proceso de medida buscando de nuevo la lectura mínima y realizando los ajustes necesarios, según se indica en el apartado 5.3.5.

5.3.7 Antes de proceder a la medida de los bloques en cada una de las posiciones indicadas, se dejarán estabilizar unos 30 minutos (esto último se hará tanto si situamos un nuevo bloque en la M1CH para su medida, como cuando lo cambiamos de posición). Se tendrá cuidado con los bloques en su manipulación, para lo cual se protegerán las manos con guantes y se situarán en su posición de medida lo más rápido posible. Se recomienda también efectuar la lectura de cada medida rápidamente, para evitar en lo posible la alteración de las condiciones ambientales alrededor de la M1CH.

#### 5.4. Toma y tratamiento de datos

En la toma y tratamiento de los datos, denominaremos:

$l_{ji}$  medida  $i$ -ésima de longitud en el punto de calibración  $j$ -ésimo.

Nota: si la M1CH no tuviera cero flotante este valor representaría la longitud leída menos el valor de la constante del palpador  $K_p$

$n$  número de repeticiones en cada punto de calibración.

$l_{pj/20}$  valor certificado a 20 °C del patrón empleado en el punto  $j$  de calibración.

$\alpha$  coeficiente de dilatación lineal del patrón considerado (en el caso del acero y si no se conoce exactamente el coeficiente de los bloques, se puede tomar  $\alpha = (11,5 \pm 1) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , según ISO 3650.

Se calcularán los siguientes parámetros, utilizando las expresiones que se indican:

1)  $\bar{l}_j$  = valor medio de calibración en el punto  $j$  (a la temperatura  $t$ )

$$\bar{l}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_{ji} \quad [2]$$

2)  $l_{j20}$  = lectura de la máquina en el punto  $j$  de calibración, a la temperatura de referencia de 20 °C.

$$l_{j20} = \bar{l}_j [1 + \alpha \Delta t] = \bar{l}_j [1 + \alpha (20 - t)] \quad [3]$$

donde  $t = (t_f + t_i)/2$ , siendo  $t_f = t_{\text{final}}$  y  $t_i = t_{\text{inicial}}$

NOTA:  $t_f$  y  $t_i$  deben medirse, para ser rigurosos, mediante el sensor en contacto con los patrones. En caso de contar únicamente con sensor de ambiente, se tomarán las lecturas de este sensor.

- 3)  $D_{\bar{l}_j}$  = Desviación respecto al valor del patrón, en el punto  $j$  (a la temperatura de referencia de 20 °C).

$$D_{\bar{l}_j} = \bar{l}_{j20} - l_{pj20} \quad [4]$$

- 4) Varianza de repetibilidad:

$$s_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (l_{ji} - \bar{l}_j)^2 \quad [5]$$

## 6. RESULTADOS

### 6.1. Cálculo de incertidumbres

Para la estimación y cálculo de las incertidumbres se seguirá lo establecido en la Guía ISO, o en la Guía EA-4/02 (referencias [3] y [4]).

En el cálculo de incertidumbres que se realice puede asociarse una expresión de incertidumbre en función de la longitud.

La expresión matemática de la que se parte para la evaluación de la incertidumbre, teniendo en cuenta que lo que pretendemos determinar es la desviación de las lecturas de la M1CH respecto a los valores de los patrones de referencia utilizados para la calibración (según certificado), puede ser:

$$D = l_{j20} - l_{pj20} + \delta l_{e\cos} + \delta l_{pla} + \delta l_{pi} + \delta l_{de} + \delta l_{pr} + L \cdot \alpha \cdot \Delta t \quad [6]$$

donde:

$l_{j20}$  longitud medida por la máquina a la temperatura de referencia de 20 °C;

$l_{pj20}$  longitud del bloque patrón a la temperatura de referencia de 20 °C (dato del certificado) correspondiente;

$\delta l_{e\cos}$  error de coseno debido al posible desalineamiento del bloque patrón respecto al eje de la M1CH;

$\delta l_{pla}$  error debido al defecto de planitud de las superficies de los palpadores planos de la M1CH;

$\delta l_{pi}$  error debido al palpador inductivo utilizado como ajuste final de la lectura;

$\delta l_{de}$  error debido a la división de escala o resolución del instrumento;

$\delta l_{pr}$  error debido al patrón utilizado como referencia para el ajuste inicial de la M1CH (puesta a cero del instrumento);

$L$  longitud nominal del bloque patrón considerado;

$\alpha$  posible variación del coeficiente de dilatación del material, para el acero se considera que  $\alpha$  puede variar entre los límites  $\alpha = (11,5 \pm 1) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ;

$\Delta t$  desviación de temperatura respecto a la de referencia 20 °C;

Según la ley de propagación de incertidumbres tendremos la expresión para la incertidumbre típica combinada  $u_c(y)$  (se supone que no existe correlación entre las variables):

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{\partial f}{\partial x} \right]^2 u^2(x_i) = \sum_{i=1}^N [c_i u(x_i)]^2 \equiv \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad [7]$$

Para el caso de la de evaluación de la incertidumbre de la M1CH, y en concreto de la variable de entrada  $D$  tendremos:

$$\begin{aligned} u_c^2(D) = & \left( \frac{\partial f}{\partial \delta l_{j20}} \right)^2 u^2(\delta l_{j20}) + \left( \frac{\partial f}{\partial \delta l_{pj20}} \right)^2 u^2(\delta l_{pj20}) + \left( \frac{\partial f}{\partial \delta l_{ecos}} \right)^2 u^2(\delta l_{ecos}) + \\ & + \left( \frac{\partial f}{\partial \delta l_{pla}} \right)^2 u^2(\delta l_{pla}) + \left( \frac{\partial f}{\partial \delta l_{pi}} \right)^2 u^2(\delta l_{pi}) + \left( \frac{\partial f}{\partial \delta l_{de}} \right)^2 u^2(\delta l_{de}) + \\ & + \left( \frac{\partial f}{\partial \delta l_{pr}} \right)^2 u^2(\delta l_{pr}) + \left( \frac{\partial f}{\partial \alpha} \right)^2 u^2(\alpha) + \left( \frac{\partial f}{\partial \Delta t} \right)^2 u^2(\Delta t) \end{aligned} \quad [8]$$

Operando, tendremos:

$$\begin{aligned} u_c^2(D) = & u^2(\delta l_{20}) + u^2(\delta l_{pj20}) + u^2(\delta l_{ecos}) + \\ & + u^2(\delta l_{pla}) + u^2(\delta l_{pi}) + u^2(\delta l_{de}) + \\ & + u^2(\delta l_{pr}) + (L \times \Delta t)^2 u^2(\alpha) + (L \times \alpha)^2 u^2(\Delta t) \end{aligned} \quad [9]$$

En esta fórmula se ha considerado la longitud nominal del bloque  $L$  y no la longitud real del mismo puesto que el valor de corrección por temperatura es prácticamente igual en un caso y en otro. La contribución por corrección de temperatura del bloque utilizado para el ajuste inicial se considera prácticamente despreciable.

Se consideran las siguientes contribuciones a la incertidumbre final:

Debida a la repetibilidad del instrumento,  $u(\delta l_{20})$

En la calibración del instrumento en los diferentes puntos que se han considerado se calcularán las desviaciones típicas a partir de las diez medidas realizadas en cada punto. La incertidumbre típica de tipo A será:

$$u(\delta l_{j20}) = \frac{s_j}{\sqrt{n}} \quad [10]$$

siendo  $n$  el número de medidas repetidas realizadas en cada punto.

Nota: en la práctica se puede considerar la desviación máxima de las obtenidas en los puntos de calibración, es decir:

$$u(\delta l_{j20}) = \frac{s_{j\max}}{\sqrt{n}}$$

Debida al patrón utilizado para la calibración de la M1CH,  $u(\delta l_p)$

- Los bloques patrón que se utilicen para la calibración de la M1CH deberán estar calibrados, por lo que se dispondrá de su certificado de calibración en vigor, en el que figurará la incertidumbre expandida  $U_{\text{cpc}}$  para un determinado factor de cobertura, que por regla general será  $k = 2$ ; luego la incertidumbre típica del patrón utilizado para la calibración será:

$$u_{\text{cpc}} = \frac{U_{\text{cpc}}}{k} = \frac{U_{\text{cpc}}}{2}$$

- Por otro lado consideraremos la posible variación dimensional entre calibraciones; ésta la podremos obtener del registro histórico de los bloques, y si no disponemos de éste podremos considerar como variación la propia incertidumbre de calibración, pero tomada como semi-amplitud de una distribución rectangular, de donde la incertidumbre típica será:

$$u_{\text{dpc}} = \frac{U_{\text{cpc}}}{\sqrt{3}}$$

y por tanto la contribución a la incertidumbre combinada final del bloque utilizado para la calibración será:

$$u(\delta l_{\text{pc}}) = \sqrt{u_{\text{cpc}}^2 + u_{\text{dpc}}^2} = \sqrt{\left(\frac{U_{\text{cpc}}}{2}\right)^2 + \left(\frac{U_{\text{cpc}}}{\sqrt{3}}\right)^2} = 0,76 \times U_{\text{cpc}} \quad (11)$$

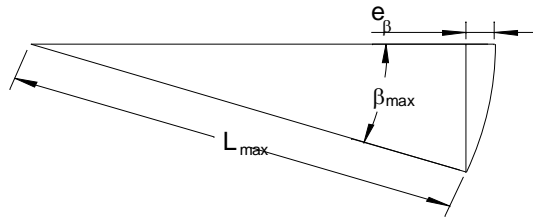
Debida al posible error de coseno,  $u(\delta l_{\text{ecos}})$

El error de coseno puede surgir de un desalineamiento del objeto a medir (en este caso bloques patrón) respecto del eje de medida de la M1CH.

Suponiendo una distribución rectangular, de semi-amplitud  $e_{\text{cos}}/2$ , la incertidumbre típica será:

$$u(\delta l_{\text{ecos}}) = \frac{e_{\text{cos}}}{\sqrt{3}}$$

Nota: Como ejemplo se puede considerar que el máximo error de desalineamiento que podamos tener cuando buscamos la lectura mínima del bloque, moviendo los tornillos de las mesas de apoyo (el movimiento lo haremos en dos ejes), es la del indicador electrónico de puesta a cero del palpador inductivo (el cual tiene una resolución de  $0,1 \mu\text{m}$ ), y suponiendo que nos podamos mover en un círculo de aproximadamente  $1 \text{ mm}$  de diámetro, tendremos para la longitud máxima que puede medir (en este caso  $1 \text{ m}$ ) y  $\beta_{\text{máx}}$ :



$$e_{\cos} = L_{\max} (1 - \cos \beta_{\max}) \cong L_{\max} (\beta_{\max}^2 / 2)$$

$$\beta_{\max} = \arctan \frac{0,1 \mu\text{m}}{1 \text{ mm}} = \arctan \frac{0,1 \mu\text{m}}{1 \times 10^3 \mu\text{m}} = 0,0001$$

Luego, el error de coseno será, considerando el máximo error que podamos cometer:

$$e_{\cos} = 10^6 \mu\text{m} \times \left( \arctan \frac{0,1 \mu\text{m}}{1 \times 10^3} \right)^2 \times \frac{1}{2} = 0,005 \mu\text{m}$$

Suponiendo una distribución rectangular, la incertidumbre típica será:

$$u(\delta l_{e\cos})_{\text{eje y}} = \frac{e_{\cos} / 2}{\sqrt{3}} = \frac{0,0025 \mu\text{m}}{\sqrt{3}} \cong 0,002 \mu\text{m}$$

Como hemos dicho anteriormente, el ajuste final se hará en dos direcciones perpendiculares al eje de medida de la M1CH, por lo que podremos tener errores de coseno en las dos direcciones. Por ello:

$$u(\delta l_{e\cos}) = \sqrt{u(\delta l_{e\cos})_{\text{eje y}}^2 + u(\delta l_{e\cos})_{\text{eje z}}^2} = 0,003 \mu\text{m} \quad (12)$$

Debida al defecto de planitud de los palpadores planos,  $u(\delta l_{\text{pla}})$

El defecto de planitud de los palpadores planos debe ser menor de  $1 \mu\text{m}$ . Como utilizamos dos palpadores tendremos, considerando una distribución rectangular de semi-amplitud  $1 \mu\text{m}/2 = 0,5 \mu\text{m}$ :

$$u(\delta l_{\text{pla}}) = \sqrt{(u(\delta l_{\text{pla1}}))^2 + (u(\delta l_{\text{pla2}}))^2} = u(\delta l_{\text{pla1}}) \sqrt{2} = \frac{0,5 \mu\text{m}}{\sqrt{3}} \sqrt{2} = 0,41 \mu\text{m} \quad (13)$$

Debida al palpador inductivo utilizado,  $u(\delta l_{\text{pi}})$

La resolución de los palpadores inductivos utilizados suele ser  $0,1 \mu\text{m}$  (puede haberlos de mejor resolución, hasta de  $0,01 \mu\text{m}$ ). Considerando una distribución rectangular de semi-amplitud  $0,1 \mu\text{m}/2 = 0,05 \mu\text{m}$ , la incertidumbre típica será:

$$u(\delta l_{\text{pi}}) = \frac{0,05 \mu\text{m}}{\sqrt{3}} = 0,03 \mu\text{m} \quad (14)$$

Debida a la división de escala de la M1CH,  $u(\delta l_{de})$

Considerando una distribución rectangular de semi-amplitud  $d/2$ , tendremos:

$$u(\delta l_{de}) = \frac{d/2}{\sqrt{3}} = (0,29 d) \mu\text{m} \quad (15)$$

Debida al patrón utilizado para ajustar la M1CH,  $u(\delta l_{pr})$

Para poner la M1CH a cero (ajuste inicial) se suele utilizar un bloque patrón de 5 mm o 10 mm, de grado 0 (u otro bloque de diferente longitud nominal que las señaladas).

- Si se dispone del certificado de calibración del bloque utilizado para el ajuste inicial, en el que nos indica la incertidumbre expandida para un factor de cobertura  $k = 2$ , la incertidumbre típica será:

$$u_{cpr} = \frac{U_{cpr}}{2}$$

- Por otro lado consideraremos la posible variación dimensional entre calibraciones, a partir del histórico de los bloques, y si no disponemos de esta, podremos considerar para esta variación la propia incertidumbre de calibración, pero tomada como semi-amplitud de una distribución rectangular, de donde

$$u_{dpr} = \frac{U_{cpr}}{\sqrt{3}}$$

La variación dimensional del bloque utilizado para el ajuste, por efecto de la temperatura, suponiendo una temperatura de  $20 \text{ °C} \pm 1 \text{ °C}$ , y que el material del bloque es acero con un coeficiente de dilatación lineal  $\alpha = (11,5 \pm 1) \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$ .

Nota: Esta contribución sería igual a  $6,7 \cdot 10^{-6} L_{pr}$  (considerando distribución rectangular para las dos contribuciones: variación de temperatura y coeficiente de dilatación):

$$u_{tpr} = L_{pr} \sqrt{\left(\frac{1 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{11,5 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{3}}\right)^2} = 6,7 \times 10^{-6} L_{pr}$$

Si consideramos que el bloque es de 10 mm, esta incertidumbre típica será  $u_{tpr} = 0,067 \mu\text{m}$

- También se tendrá en cuenta la repetibilidad ( $s_{rep}$ ) de las medidas efectuadas sobre este bloque patrón, y tendremos

$$u_{rep} = \frac{s_{rep}}{\sqrt{10}}$$

Por lo tanto la incertidumbre típica será:

$$\begin{aligned}
 u(\delta l_{pr}) &= \sqrt{u_{cpr}^2 + u_{dpr}^2 + u_{tpr}^2 + u_{tpr}^2} = \\
 &= \sqrt{\left(\frac{U_{cpr}}{2}\right)^2 + \left(\frac{U_{cpr}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{s_{rep}}{\sqrt{10}}\right)^2 + (0,067)^2} = \\
 &= \sqrt{0,58 \times U_{cpr}^2 + \left(\frac{s_{rep}}{\sqrt{10}}\right)^2 + (0,067)^2}
 \end{aligned}$$

(16)

### Debida a la influencia de la temperatura

En la influencia debida a la temperatura, vamos a considerar dos posibles fuentes de incertidumbre, una debida a la lectura del termómetro utilizado y por otro lado la debida al conocimiento del coeficiente de dilatación lineal, en este caso el del acero, siendo este  $\alpha = (11,5 \pm 1) \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ .

a) debida al coeficiente de dilatación lineal  $u(\alpha)$

Si consideramos que la temperatura de la sala se mantiene en  $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ , suponiendo que el coeficiente de dilatación lineal del acero puede estar dentro de los límites  $\pm 1 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , y considerando una distribución rectangular de semi-amplitud  $\delta\alpha = 1 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ .

$$u(\alpha) = \frac{\delta\alpha}{\sqrt{3}}$$

b) debida a la lectura del termómetro utilizado  $u(\Delta t)$ .

En este caso tendremos en cuenta las siguientes contribuciones a la incertidumbre:

- Debida al certificado del termómetro utilizado, en el que se especifica que la calibración del termómetro tiene una incertidumbre expandida  $U_{ct}$ , para un factor de cobertura  $k = 2$ . La incertidumbre típica será:

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

- Debida a la deriva del termómetro,  $u_{dt}$ . Para evaluar esta contribución consideraremos el histórico que tengamos del termómetro (deriva del termómetro entre calibraciones  $dr_i$ ), considerando una distribución rectangular de semi-amplitud  $dr_i/2$  (si no se considera la información del fabricante):

$$u_{dt} = \frac{dr_i/2}{\sqrt{3}}$$

Nota 1: Si en el certificado de calibración del termómetro no se indica que la resolución está incluida en la incertidumbre, se deberá incluir esta contribución,  $u_{rt}$ . Suponemos distribución rectangular de semi-amplitud igual a  $resol/2$  y la incertidumbre típica será:



$$u_{rt} = \frac{r/2}{\sqrt{3}}$$

Nota 2: Si no se dispone de ninguna de las anteriores se podrá considerar la incertidumbre del termómetro, pero suponiendo una distribución rectangular de semi-amplitud  $U_{ct}$ , de donde la incertidumbre típica será:

$$u_{dt} = \frac{U_{ct}}{\sqrt{3}}$$

La incertidumbre de la lectura del termómetro será

$$u(\Delta t) = \sqrt{u_{ct}^2 + u_{dt}^2} = \sqrt{\left(\frac{U_{ct}}{2}\right)^2 + \left(\frac{dr_t/2}{\sqrt{3}}\right)^2} \quad (17)$$

A partir de las contribuciones consideradas, puede construirse la Tabla 1 (ref. [4]):

**Tabla 1: Contribuciones a la incertidumbre combinada en la calibración de la M1CH**

magnitud de entrada $X_i$	incertidumbre típica $u(x_i)$	distribución de probabilidad	coeficiente de sensibilidad $C_i$	contribución a la incertidumbre $u_i(y)$
$\delta l_{20}$	$s_j/\sqrt{n}$	normal	1	$s_j/\sqrt{n}$
$\delta l_p$	$0,76 \times U_{cpc}$	(3)	1	$0,76 \times U_{cpc}$
$\delta l_{ecos}$	0,003 $\mu\text{m}$	rectangular	1	0,003 $\mu\text{m}$
$\delta l_{pla}$	0,41 $\mu\text{m}$	rectangular	1	0,41 $\mu\text{m}$
$\delta l_{pi}$	0,03 $\mu\text{m}$	rectangular	1	0,03 $\mu\text{m}$
$\delta l_d$	0,29 $d \mu\text{m}$	rectangular	1	0,29 $d \mu\text{m}$
$\delta l_{pr}$	(1)	(3)	1	(1)
$t$	$(\delta\alpha/\sqrt{3})$	rectangular	$L \times \Delta t$	$(\delta\alpha/\sqrt{3})L \times \Delta t$
	(2)	(3)	$L \times \alpha$	(4)
<b>incertidumbre combinada (<math>u</math>)</b>				$u = \sqrt{\sum u_i^2(y)}$
<b>Incetidumbre expandida (<math>U</math>)</b>				$U = k \cdot u$

$$(1) \quad u(\delta l_{pr}) = \sqrt{u_{cpr}^2 + u_{dpr}^2 + u_{tpr}^2 + u_{lpr}^2} = \sqrt{0,58 \times U_{cpr}^2 + \left(\frac{s_{K_p}}{\sqrt{10}}\right)^2 + (0,067)^2}$$

$$(2) \quad \sqrt{\left(\frac{U_{ct}}{2}\right)^2 + \left(\frac{dr_t/2}{\sqrt{3}}\right)^2}$$

(3) composición de distribuciones normal y rectangular

$$(4) \quad \left( \sqrt{\left(\frac{U_{ct}}{2}\right)^2 + \left(\frac{dr_i/2}{\sqrt{3}}\right)^2} \right) L \cdot \alpha$$

La expresión de  $U^2$  para cada punto calibrado queda pues como sigue:

$$U_j^2 = k^2 \sum u_i^2(y) = k^2 u_c^2 = \left. \begin{aligned} & \left[ \frac{s_j^2}{n} + 0,58 U_{cpc}^2 + 0,173 \mu\text{m}^2 + 0,084 d^2 + 0,58 U_{cpr}^2 \right. \\ & \left. + \frac{s_{k_p}^2}{10} + \frac{(\delta\alpha \cdot L \cdot \Delta t)^2}{3} + \left( \sqrt{\left(\frac{U_{ct}}{2}\right)^2 + \left(\frac{dr_i/2}{\sqrt{3}}\right)^2} \right)^2 L^2 \cdot \alpha^2 \right] \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

## 6.2. Interpretación de resultados

Para cada bloque patrón medido obtendremos cinco medidas en cada posición. La medida final será el promedio de las dos posiciones. Si  $\bar{l}_{jA}$  y  $\bar{l}_{jB}$  son las medias en cada una de las dos posiciones, la medida final será el promedio de estas, es decir:

$$\bar{l}_j = \frac{\bar{l}_{jA} + \bar{l}_{jB}}{2} \quad [19]$$

Normalmente esto se presentará como **tabla de desviaciones** a los valores convencionalmente verdaderos, proporcionados por los patrones utilizados, de acuerdo con su certificado de calibración. Las correcciones a aplicar, para cada uno de los puntos de calibración considerados, serán los valores de dichas desviaciones, cambiados de signo.

Cada desviación llevará asociada una incertidumbre de calibración, obtenida como se indica en el apartado 6.1. Esta incertidumbre se da en forma de una ecuación en función de la longitud medida.

En el Certificado de Calibración, además de declarar la incertidumbre expandida, se especificará el valor del factor de cobertura  $k$  utilizado.

Por no existir norma alguna para este tipo de instrumentos, no cabe incluirlos en clase de precisión alguna, a la vista de las desviaciones obtenidas. Sin embargo, puede ser habitual el haber definido previamente una tolerancia o error máximo permitido para la M1CH. En este caso, el cumplimiento o no con dicha tolerancia deberá comprobarse teniendo en cuenta las desviaciones obtenidas, con sus incertidumbres asociadas (ref. [8]).

**NOTA FINAL:** Una vez concluida la calibración de la M1CH, si en el trabajo habitual resulta complejo o no deseable aplicar las correcciones obtenidas, puede trabajarse con una incertidumbre de calibración ampliada, que englobe la máxima desviación encontrada en la calibración, en valor absoluto. De esta forma, como incertidumbre global de calibración de la M1CH, podría tomarse

$$U = U + |D_{\text{máx}}| \quad (\text{apartado F.2.4.5, de ref. [3]})$$

Si en la calibración de la M1CH se utilizara un sistema interferométrico láser, se tendrían que tener en cuenta una serie de contribuciones diferentes para la evaluación de la incertidumbre. Entre estas habría que considerar:

- La influencia de la óptica utilizada.
- La incertidumbre del cabezal láser (longitud de onda), según certificado.
- La influencia de las condiciones ambientales sobre el índice de refracción
- La distancia muerta.

Un período de tiempo razonable para la recalibración de estos instrumentos puede oscilar entre 1 y 2 años, aunque el intervalo de tiempo a asignar dependerá fundamentalmente de los resultados de las calibraciones (por ejemplo su estabilidad) y de la frecuencia de uso de la M1CH. El usuario del equipo será siempre el responsable de asignar el período de recalibración, y de revisarlo cuando sea preciso. En este sentido, los plazos podrán disminuirse si se aprecia una discrepancia importante entre calibraciones o si ha ocurrido algún problema grave en el uso de la M1CH.

## 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: 706-09-002-6).
- [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] Proceso de Calibración D-010 para Medidoras de una Coordenada Horizontal D-02.04. Sistema de Calibración Industrial (SCI). Ed. Diciembre 1988.
- [7] Norma UNE-EN ISO 3650:2000, Especificación geométrica de productos (GPS). Patrones de longitud. Bloques patrón. (ISO 3650:1998).
- [8] UNE-EN ISO 14253-1:2019, Especificación geométrica de productos (GPS). Inspección mediante medición de piezas y equipos de medida. Parte 1: Reglas de decisión para verificar la conformidad o no conformidad con las especificaciones. (ISO 14253-1:2017).

## 8. ANEXO

### 8.1. Ejemplo numérico de aplicación del procedimiento descrito

Calibración de una M1CH, con campo de medida de 1000 mm, con lectura digital de resolución 0,5  $\mu\text{m}$ .

La calibración se realiza para todo el campo de medida, utilizando bloques patrón longitudinales de calidad 0. Se eligen 10 bloques, repitiéndose las mediciones 10 veces sobre cada bloque, 5 veces en cada posición A y B.

El material de los bloques es acero, y la incertidumbre expandida de calibración de los mismos, para  $k = 2$ , responde a la expresión  $U_{cp} = 2[(0,04 \mu\text{m})^2 + (0,18 \times 10^{-6} L)^2]^{0,5}$ , donde  $L$  representa la longitud nominal del bloque (para esta fórmula la longitud del bloque habrá que introducirla en las mismas unidades que el primer término, es decir en  $\mu\text{m}$ ). El bloque utilizado para el ajuste es un bloque de acero de longitud nominal 10 mm y de calidad K. Según su certificado, la desviación al nominal es  $+0,10 \mu\text{m}$  y la incertidumbre de calibración es  $U_{cp} = 0,02 \mu\text{m}$  para  $k = 2$ .

La temperatura se mide mediante un sensor de contacto, al igual que la temperatura ambiente que es controlada mediante una sonda. Los dos tienen una resolución de  $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$  e incertidumbre de medida  $U_t = 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$  para  $k=2$ ; en el certificado se indica que la resolución está incluida en la incertidumbre. La deriva de los sensores de contacto es de  $0,05 \text{ }^\circ\text{C}$  (dato obtenido del histórico entre calibraciones).

En las siguientes tablas se incluyen los datos de medición, el tratamiento de los mismos y los resultados e incertidumbres obtenidos.

La M1CH dispone de cero flotante, por lo que en el ajuste que realizamos sobre el bloque de referencia de 10 mm, introducimos el valor del bloque según certificado, y sobre este realizamos diez medidas obteniéndose los siguientes resultados:

longitud BPL de 10 mm	Medidas
10,00010	10,000 10
	10,000 15
	10,000 10
	10,000 10
	10,000 05
	10,000 10
	10,000 10
	10,000 05
	10,000 10
	10,000 10
media (mm) =	10,000 10
desviación típica ( $\mu\text{m}$ ) =	0,03

Tabla 2 Hoja de resultados de la calibración de la medidora de una coordenada horizontal

Punto de calibración	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
tª inicial (°C)	20	20	20	20,5	20,5	20,5	21	20,5	20,5	20
longitud nominal (mm)	125	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
longitud bpl (20 °C)	125,00009	199,99992	300,00014	400,00006	499,99974	600,00083	700,00023	799,99959	900,00090	999,99998
Resultados $I_{ji}$	125,0000	200,0000	300,0020	400,0025	500,0005	600,0020	700,0060	800,0030	900,0060	1000,0035
	124,9995	200,0000	300,0015	400,0025	500,0000	600,0030	700,0055	800,0035	900,0065	1000,0000
	124,9990	200,0005	300,0015	400,0015	499,9995	600,0035	700,0055	800,0035	900,0055	1000,0015
	125,0000	200,0010	300,0015	400,0015	500,0000	600,0035	700,0065	800,0045	900,0060	1000,0000
	125,0005	200,0005	300,0015	400,0030	500,0005	600,0025	700,0040	800,0050	900,0060	1000,0010
	125,0000	200,0005	300,0025	400,0030	500,0005	600,0025	700,0050	800,0045	900,0070	1000,0015
	124,9990	200,0010	300,0030	400,0025	500,0000	600,0040	700,0055	800,0050	900,0065	1000,0000
	124,9990	200,0000	300,0035	400,0025	500,0000	600,0045	700,0065	800,0055	900,0065	1000,0020
	124,9995	200,0005	300,0025	400,0045	499,9995	600,0025	700,0050	800,0050	900,0070	1000,0025
	124,9995	200,0000	300,0025	400,0020	499,9995	600,0025	700,0065	800,0045	900,0070	1000,0025
media (mm)	124,99960	200,00040	300,00220	400,00255	500,00000	600,00305	700,00560	800,00440	900,00640	1000,00145
Desv. típica (µm)	0,52	0,39	0,72	0,86	0,41	0,8	0,81	0,81	0,52	1,21
tª final (°C)	20	20	20,5	20,5	20,5	21	21	21	20,5	20
tª media (°C)	20,00	20,00	20,25	20,50	20,50	20,75	21,00	20,75	20,50	20,00
valor medio a 20 °C	124,99960	200,00040	300,00134	400,00025	499,99713	599,999787	699,99755	799,999750	900,00122	1000,00145
desv. al final (µm)	-0,49	0,48	1,20	0,19	-2,61	-2,95	-2,68	-2,09	0,32	1,47

Nota: 1 El valor medio a 20 °C es calculado según la fórmula:  $I_{20°C} = I_i (1 + \alpha(20 - t))$ ; siendo  $t$  la tª media

2 La desviación al nominal (a la temperatura de referencia de 20 °C) es:  $k_{20°C} - I_{\text{patión a } 20°C}$

### Incertidumbres:

Cada una de las incertidumbres asociadas a cada punto calibrado  $j$ , se obtiene aplicando la expresión (18), para un factor de cobertura  $k = 2$ .

Para este ejemplo elegiremos el punto de máxima desviación típica  $(s_j)_{\max}$  de repetibilidad, la cual tomaremos para determinar la incertidumbre de tipo A; de esta manera evitamos tener que efectuar cálculos innecesarios; no obstante, si se desea conocer la incertidumbre en cada punto de calibración se deberá calcular ésta en cada uno de ellos, considerando en este caso las desviaciones típicas individuales  $s_j$ .

$$U_j^2 = k^2 \sum u_i^2(y) = k^2 u_c^2 = \left[ \frac{s_j^2}{n} + 0,58 U_{\text{cpc}}^2 + 0,173 \mu\text{m}^2 + 0,084 d^2 + 0,58 U_{\text{cpr}}^2 + \frac{s_{k_p}^2}{10} + \frac{(\delta\alpha \cdot L \cdot \Delta t)^2}{3} + \left( \sqrt{\left(\frac{U_{\text{ct}}}{2}\right)^2 + \left(\frac{dr_i/2}{\sqrt{3}}\right)^2} \right)^2 L^2 \cdot \alpha^2 \right] \quad [18]$$

donde

$s_j$  (en  $\mu\text{m}$ ) ha sido obtenida a partir de 10 repeticiones en cada punto. Para la determinación de la repetibilidad de la M1CH se toma la desviación típica máxima obtenida en la calibración, en este caso  $(s_j)_{\max} = 1,21 \mu\text{m}$ .

$$d = 0,5 \mu\text{m}$$

$U_{\text{cpc}} = 2[(0,04 \mu\text{m})^2 + (0,18 \times 10^{-6} L)^2]^{0,5}$  ( $k = 2$ ), donde  $L$  representa la longitud nominal del bloque patrón (la longitud se deberá introducir en las unidades que indica el primer sumando).

$$U_{\text{cpr}} = 0,02 \mu\text{m} \text{ para } k = 2.$$

$$s_{k_p} = 0,03 \mu\text{m}$$

$$\Delta t = \left( \frac{t_i + t_f}{2} - 20 \right) ^\circ\text{C} = \left( \frac{20 - 21}{2} - 20 \right) ^\circ\text{C} = 0,5 ^\circ\text{C} \text{ (elegimos el caso más extremo)}$$

$$U_t = 0,1 ^\circ\text{C} \text{ (} k = 2 \text{)}$$

deriva de los sensores:  $0,05 ^\circ\text{C}$

resolución del termómetro ( $dr_i$ ):  $0,1 ^\circ\text{C}$

$$\alpha = 11,5 \times 10^{-6} ^\circ\text{C}^{-1}, \delta\alpha = 1 \times 10^{-6} ^\circ\text{C}^{-1} \text{ e } \Delta t = 0,5 ^\circ\text{C}$$

Sustituyendo los valores obtenidos en la ecuación (18) se obtiene una incertidumbre típica combinada igual a:

$$u_c(D) = \sqrt{(0,74 \mu\text{m})^2 + (0,73 \cdot 10^{-6} L)^2}$$

siendo  $L$  la longitud medida (en las unidades del primer sumando, es decir, en  $\mu\text{m}$ )

La incertidumbre expandida será, aplicando un factor de cobertura  $k = 2$ :

$$U = 2 \left( \sqrt{(0,74 \mu\text{m})^2 + (0,73 \cdot 10^{-6} L)^2} \right) \quad \text{para } k = 2$$

Así,

para  $L = 10 \text{ mm}$        $U = 1,5 \mu\text{m}$ , con un nivel de confianza del 95 %

para  $L = 1000 \text{ mm}$        $U = 2,1 \mu\text{m}$ , con un nivel de confianza del 95 %

Las incertidumbres expandidas de calibración indicadas corresponden a incertidumbres típicas multiplicadas por un factor de cobertura  $k = 2$  que, para una distribución normal, corresponde a un nivel de confianza del 95 % aproximadamente.

Conforme a la NOTA FINAL del presente procedimiento, si no fueran a aplicarse correcciones a las medidas individuales efectuadas con la M1CH, podría tomarse como incertidumbre global de calibración de la M1CH, el valor:

$$U = U_j + |D_{\text{máx}}|$$

sustituyendo  $U$  y  $|D_{\text{máx}}| = 2,91 \mu\text{m}$ , tendremos:

$$U = 2 \left( \sqrt{(0,74 \mu\text{m})^2 + (0,73 \cdot 10^{-6} L)^2} \right) + 2,91 \mu\text{m} \quad \text{para } k = 2$$

Como antes, tendremos que

para  $L = 10 \text{ mm}$        $U = 4,4 \mu\text{m}$ , con un nivel de confianza del 95 %

para  $L = 1000 \text{ mm}$        $U = 5,0 \mu\text{m}$ , con un nivel de confianza del 95 %

# Metrología

NIPO: 113-19-006-0