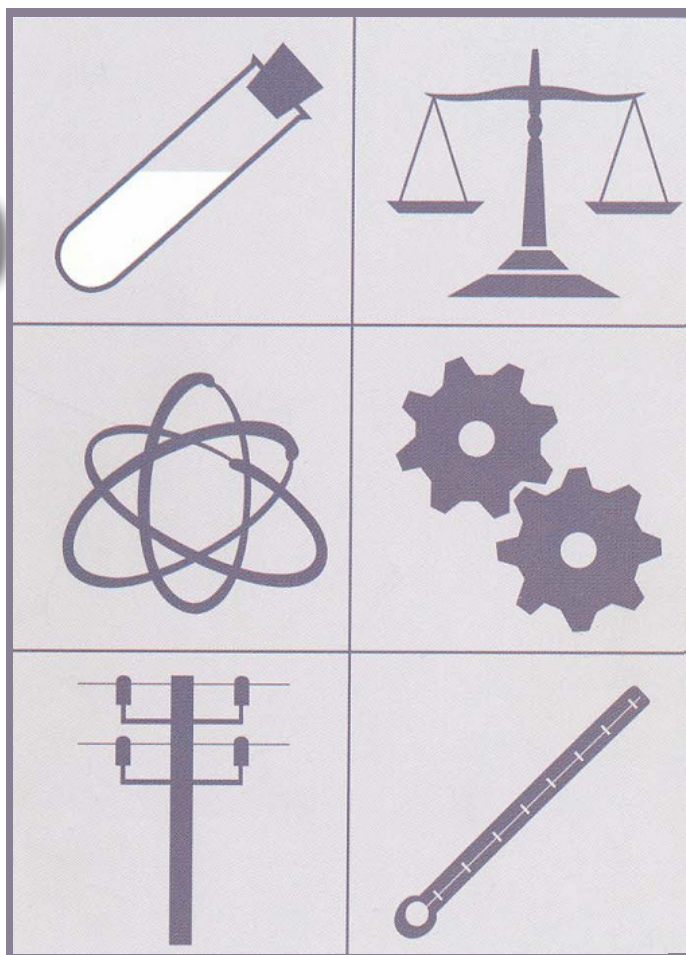


Metrología

PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN



PROCEDIMIENTO DI-004 PARA LA CALIBRACIÓN
DE MEDIDORAS DE UNA COORDENADA
VERTICAL

ñ 13



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

El procedimiento ha sido revisado, corregido y actualizado, respecto a la edición anterior en papel.

Este procedimiento de calibración es susceptible de modificación permanente a instancia de cualquier persona o entidad. Las propuestas de modificación se dirigirán por escrito, justificando su necesidad, a cualquiera de las siguientes direcciones:

Correo postal:

Centro Español de Metrología
C/ del Alfar, 2,
28760 Tres Cantos, Madrid

Correo electrónico:

cem@cem.es



ÍNDICE

	Página
1. OBJETO	4
2. ALCANCE.....	4
3. DEFINICIONES	5
3.1. Regla patrón.....	5
3.2. Captador.....	5
3.3. Palpador	5
3.4. Regulador de la fuerza de contacto	6
3.5. Base de apoyo	6
3.6. Escala.....	6
3.7. Mesa de planitud	6
3.8. Patrón de ajuste	7
3.9. Ajustes previos	7
3.10. Bases suplementarias.....	7
4. GENERALIDADES	8
5. DESCRIPCIÓN.....	10
5.1. Equipos y materiales.....	10
5.2. Operaciones previas	11
5.3. Proceso de calibración.....	13
5.4. Toma y tratamiento de datos	17
6. RESULTADOS	18
6.1. Cálculo de incertidumbres.....	19
6.2. Interpretación de resultados.....	24
7. REFERENCIAS	25
8. ANEXOS.....	26
8.1. Ejemplo numérico	26



1. OBJETO

El presente PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN tiene por objeto exponer un método de calibración para las máquinas MEDIDORAS DE UNA COORDENADA VERTICAL, codificadas como D-02.05 según la Clasificación de Instrumentos de Metrología Dimensional [5]. En lo que sigue se empleará el acrónimo M1CV cuando se considere adecuado.

Este procedimiento se redacta de acuerdo con los criterios generales establecidos por el PROCEDIMIENTO PARA LA ELABORACIÓN DE PROCEDIMIENTOS DE CALIBRACIÓN [1], emplea en todo lo posible la terminología del VIM [2] y sigue, para el cálculo de incertidumbres, las recomendaciones de las referencias [3] y [4].

2. ALCANCE

El presente procedimiento es de aplicación a máquinas medidoras de una coordenada vertical diseñadas para mediciones longitudinales, asociadas generalmente a una mesa de planitud (MP; D-06.05 según [5]), mediante un sistema basado fundamentalmente en una regla patrón y un captador móvil.

Se aplica para campos de medida $C \leq 1$ m de las M1CV a calibrar y para valores de división de escala $E \geq 0,001$ mm, que suelen ser de tipo digital; admiten una gran variedad de palpadores fácilmente intercambiables sobre el captador móvil, siendo los más corrientes los de tipo esférico o “de bola”.

Quedan expresamente fuera del alcance de este procedimiento las reglas verticales de trazos (D-02.18 según [5]), pese a que, como se expondrá más detalladamente en el apartado 4, se trata de instrumentos muy similares conceptualmente.

3. DEFINICIONES

3.1. Regla patrón:

Es uno de los componentes básicos de la M1CV, como ya se ha indicado en el anterior apartado 2. Suelen ser de tipo eléctrico y dentro de dicho tipo, capacitivas, situándose en posición vertical en la carcasa que forma el cuerpo de la medidora y sobre el que se desliza, también verticalmente, el captador que detecta la posición del “trazo” eléctrico sobrepasado y efectúa la interpolación de posicionamiento entre dicho trazo y el siguiente.

3.2. Captador:

Elemento móvil sobre la carcasa del cuerpo de la M1CV, que por una parte lleva el sistema sensor de posición sobre la regla, el de sentido de desplazamiento, etc. y por otra parte lleva también el palpador que ha de efectuar el contacto con el mensurado.

Suele aprovecharse para incorporarle otros elementos como puede ser una escala auxiliar de comparación (véase el apartado 3.3), el regulador de la fuerza de contacto (véase el apartado 3.4), una sonda térmica, etc.

3.3. Palpador:

Elemento, fácilmente intercambiable sobre el cuerpo del captador que efectúa el contacto y posicionamiento sobre el mensurado. El palpador más general de toda M1CV es de tipo esférico o “de bola”, disponiéndose de varios de ellos, de diferentes diámetros de bola, para diferentes aplicaciones.

Otros palpadores usuales son los de tipo cilíndrico, de “bellota” (forma de sector esférico), cónicos (para determinación de la posición del eje de un taladro), de “aguja” (para taladros de muy pequeño diámetro), de “disco” (para rebajes) y de comparador que, asociados a una escala propia, permiten realizar medidas de defectos de perpendicularidad o de rectitud.

3.4. Regulador de la fuerza de contacto:

Como casi todos los instrumentos de metrología dimensional, las M1CV disponen de un regulador para que la fuerza de contacto palpador / pieza permanezca constante durante la medición. Dicho dispositivo, que suele alojarse también en el captador, indica el momento en el que ha alcanzado el valor adecuado mediante algún tipo de señal luminosa o acústica.

3.5. Base de apoyo:

Zona inferior de la M1CV mediante la que apoya sobre la mesa de planitud auxiliar, para poder efectuar con suavidad y comodidad los desplazamientos de la M1CV sobre la MP, dado el tamaño y el peso relativamente grandes de aquélla. Suelen incorporar un sistema neumático que proporciona un colchón de aire comprimido en el momento de moverla y es en la base donde se encuentran situadas las toberas de salida del aire.

3.6. Escala:

Como ya se ha indicado suele ser de tipo digital, situándose en algún lugar de la M1CV y pudiendo disponer de elementos auxiliares de impresión numérica.

3.7. Mesa de planitud:

Las M1CV se emplean en asociación con una MP, generalmente no metálica sino de roca (granito, diabasa, etc.), la cual actúa como plano de referencia y cuya influencia es poco significativa en la medición o calibración porque, de una parte, el tamaño de la base de apoyo es suficientemente grande para que los defectos de planitud de la mesa se traduzcan en errores de coseno despreciables y, de otra parte, muchas medidas se pueden efectuar sin desplazamiento de la M1CV y en posiciones muy similares a las de colocación de los patrones para la calibración.

Sin embargo, la incertidumbre de medida de piezas de cierto tamaño, que obligan a desplazamientos apreciables de la M1CV sobre la MP, puede incrementarse sustancialmente respecto de la incertidumbre de calibración en función de la calidad de la MP.

3.8. Patrón de ajuste:

Elemento mecánico que materializa en ciertas zonas distancias patrón con gran exactitud, fundamentalmente una distancia entre caras paralelas interiores, para la determinación de las correcciones automáticas por diámetro del contacto del palpador y por diferente sentido de palpado (véase el apartado 4).

Suele ser un elemento que acompaña a cada M1CV como accesorio normalizado de la misma, que es imprescindible usar antes de iniciar una sesión de medición y que, independientemente de la M1CV, debe calibrarse periódicamente.

3.9. Ajustes previos:

Operaciones específicamente establecidas por el fabricante en el manual técnico de la M1CV, que se realizan mediante el patrón de ajuste descrito en el anterior apartado 3.8 y sin las cuales no puede comenzarse ninguna medición.

Con muy buen criterio algunas marcas de M1CV no permiten incluso el acceso a la escala de lectura de indicaciones hasta no haber realizado correctamente todas las operaciones de ajuste previo establecidas, entre las que pueden incluso existir criterios de aceptación o rechazo a superar.

3.10. Bases suplementarias:

Las M1CV pueden contar como elementos accesorios con unas bases que, situadas entre la mesa de planitud y la base de apoyo de la M1CV, permiten aumentar su campo de medida C en una cantidad igual a la altura de la base suplementaria. Cuando se trabaja con alguno de estos suplementos se pierde, normalmente, la posibilidad de desplazamiento de la M1CV sobre la mesa de

planitud y sólo puede trabajarse en la modalidad “instrumento fijo / pieza móvil”.

4. GENERALIDADES

Las M1CV son instrumentos no portátiles de metrología dimensional para la medición fundamental de magnitudes lineales y la medición complementaria de características como rectitud, perpendicularidad, etc., sobre mensurandos muy diversos tanto en formas como en tamaños; se trata de instrumentos muy versátiles, de precio medio y de aprendizaje y manejo muy sencillos.

Pueden emplearse en la modalidad “instrumento fijo / pieza móvil”, con la que proporcionan su mejor precisión, para piezas pequeñas o medida de cotas sencillas y también en la modalidad “pieza fija / instrumento móvil”, con la que proporcionan menor precisión, para piezas grandes o medida de cotas complejas.

Gracias a su posibilidad de desplazamiento sobre un colchón de aire, que se elimina para la toma de indicaciones de medida, a lo largo y ancho de la superficie de la mesa de planitud sobre la que se apoya, las M1CV permiten medidas de cotas muy diversas en una pieza compleja con un operador experimentado.

Los modelos modernos de M1CV suelen incorporar en el interior de su cuerpo un pequeño compresor que genera el colchón de aire al actuar sobre un mando, para los desplazamientos sobre la mesa de planitud, así como una batería eléctrica recargable para el accionamiento de todos los circuitos eléctricos, con objeto de eliminar un cable de conexión a la red y un tubo de conexión a un compresor externo, enormemente molestos para el operador al moverse alrededor de la mesa de planitud.

Si en algún caso la batería se hubiese descargado completamente, suelen tener prevista la posibilidad de conectar dicha batería a un cargador auxiliar, con lo que puede comenzarse inmediatamente a emplear la M1CV mientras que, simultáneamente se recarga la batería,

todo ello con la molestia de un cable de conexión a la red, por algún tiempo.

Su escala longitudinal se basa, como ya se ha expuesto anteriormente, en una regla patrón generalmente de tipo eléctrico y lectura digital, asociada a un interpolador entre cada dos “trazos” consecutivos que permite apreciar normalmente valores de división de escala $E = 0,001$ mm. De acuerdo con las incertidumbres que estos equipos pueden alcanzar en sus mediciones, se considera inadecuado reducir el anterior valor de E , pero si en algún caso ello sucediese, sería de fácil aplicación el presente procedimiento DI-004.

El patrón de ajuste es un elemento importante, cuyos valores deben conocerse con una incertidumbre adecuada al valor de la división de escala E de la M1CV; este patrón debe calibrarse con una incertidumbre expandida ($k = 2$) igual o inferior a la mitad de la división de escala E de la M1CV, al objeto de que el ajuste no degrade excesivamente la calidad de las medidas con la M1CV calibrada. A título meramente orientativo, para una M1CV de $E = 0,001$ mm sería deseable que cada cota lineal del patrón de ajuste se conociese con una incertidumbre $U = 0,5 \mu\text{m}$ ($k = 2$) o aún menor, lo cual puede conseguirse mediante su calibración en medidora de tres coordenadas de alta precisión.

Siempre que se vaya a efectuar una medida con la M1CV deberá procederse a limpiar la superficie de la mesa de planitud con paño suave y disolvente adecuado, como, por ejemplo, una mezcla de éter y alcohol al 50 %; una vez limpia la superficie accesible, se moverá ligeramente la M1CV y se limpiará también la zona sobre la que se encontraba apoyada. Se limpiará también el patrón de ajuste, tanto en su base de apoyo como en las zonas que materializan las distancias patrón, situándolo en las inmediaciones de la M1CV, normalmente sobre la mesa de planitud. Por último se limpiará y colocará en su posición más adecuada el mensurando, sobre la mesa de planitud, procurando dejar que todo el conjunto se estabilice térmicamente al menos 15 minutos, tiempo que puede aprovecharse para proceder al ajuste previo de la M1CV.

Obsérvese la semejanza conceptual de la M1CV con un pie de rey cuyo contacto fijo es la mesa de planitud y cuyo contacto móvil es el captador.

En este procedimiento se utilizan las siguientes abreviaturas:

M1CV: Medidora de una coordenada vertical.

MP: Mesa de planitud.

BPL: Bloque patrón longitudinal.

5. DESCRIPCIÓN

5.1. Equipos y materiales

Para la calibración de la escala lineal de una M1CV y siguiendo el principio fundamental en metrología de calibrar de la forma más similar posible a como se mide, se emplearán bloques patrón longitudinales (BPL; D-01.02 según [5]), calibrados con incertidumbres adecuadas a los valores de la división de escala E del instrumento concreto para el que se apliquen.

Para la calibración de M1CV sería deseable utilizar BPL de calidad 1 o mejor (ref. [6]), cuya incertidumbre expandida certificada correspondiente a un factor $k = 2$ no sea en ninguno de ellos superior a $U = (0,5 + 0,5 L_0) \mu\text{m}$, con L_0 en m y $k = 2$, para que las medidas con la M1CV calibrada mantengan una calidad razonable.

Para este tipo de calibraciones es necesario partir de los valores e incertidumbres certificados para los BPL empleados, añadiéndoles, en su caso, las contribuciones que se indican en 5.2.3.

NOTA : La mesa de planitud asociada a la medidora habrá también de calibrarse, de acuerdo con su procedimiento específico, para conocer su defecto de planitud y confirmar que no es preciso incorporar una contribución de incertidumbre para tener en cuenta el hecho de que la calibración de la M1CV se efectúa en la modalidad de más precisión “instrumento fijo / pieza móvil” y que sin embargo para la medida de piezas la M1CV puede también

utilizarse en su otra modalidad de menor precisión “instrumento móvil / pieza fija”.

5.2. Operaciones previas

- 5.2.1 Para poder emitir un certificado de calibración de un M1CV, ésta debe encontrarse identificada, de forma permanente, con los siguientes datos como mínimo:

MARCA
NÚMERO DE SERIE o DE IDENTIFICACIÓN

Es recomendable que, además, incluya:

MODELO
CAMPO DE MEDIDA (C)
DIVISIÓN DE ESCALA (E)

Los anteriores datos de identificación deben encontrarse grabados sobre la propia M1CV, normalmente sobre su cuerpo. El patrón de ajuste llevará su propia identificación, siendo admisible tanto que sea la misma de la M1CV como que sea otra diferente.

En el certificado de calibración deberá reseñarse la identificación completa de la M1CV.

En caso de identificación insuficiente es admisible proceder a establecer la misma de la mejor forma posible, por ejemplo, mediante una etiqueta fuertemente adherida al instrumento, de forma que no exista duda alguna en cuanto a la correspondencia entre el equipo calibrado y el certificado emitido.

- 5.2.2 Es deseable que la temperatura ambiente del local en el que se realice la calibración de la M1CV, se mantenga durante toda la operación dentro del intervalo:

$$T = (20 \pm 5) \text{ } ^\circ\text{C}$$

La temperatura habrá de anotarse, como mínimo, al comienzo y al final de la calibración aunque es recomendable anotarla también aproximadamente cada hora.

- 5.2.3 Se prepararán adecuadamente los patrones a emplear en la calibración del M1CV, desengrasando los BPL y limpiando todos ellos con papel y paños suaves, así como con algún disolvente adecuado, como por ejemplo una mezcla de alcohol y éter al 50 %.

Se tomará nota de los valores de los BPL obtenidos en su última calibración y de sus incertidumbres, que se obtendrán combinando la de calibración con las contribuciones necesarias en función de las condiciones en las que se calibre la M1CV. Se analizarán las posibles contribuciones por temperatura y por deriva.

Análogamente se limpiará el patrón de ajuste y se tomará nota del valor de sus cotas e incertidumbres procedentes de su historial de calibración.

- 5.2.4 Los patrones a emplear, BPL y patrón de ajuste, se situarán en la zona de calibración, los BPL preferentemente sobre una base metálica y el patrón de ajuste sobre la mesa de planitud, que se habrá limpiado según se indicó en el apartado 4, dejándolos estabilizar térmicamente al menos durante media hora.

El apoyo de los BPL sobre la base metálica se hará siempre por las caras laterales, no las de medida, de los mismos, mientras que el patrón de ajuste se situará sobre la mesa de planitud en su posición normal de trabajo.

Si la M1CV dispone de alguna base suplementaria, también se limpiará ésta tanto en su base inferior de apoyo sobre la mesa de planitud como en su base superior que ha de recibir el cuerpo de la M1CV, dejándola estabilizar igual que

los patrones en algún lugar adecuado cercano a la zona de calibración.

- 5.2.5 Antes de proceder a la calibración propiamente dicha de la M1CV, se efectuará una inspección visual de la misma, conectándola eléctricamente y comprobando que sus baterías están cargadas, la correcta legibilidad de la escala, el funcionamiento del compresor de aire, el desplazamiento suave del captador sobre toda la altura del cuerpo, el funcionamiento del dispositivo de la fuerza de contacto, etc.

Este puede ser un momento apropiado, durante la espera de estabilización térmica, para proceder a una limpieza de toda la base de apoyo de la M1CV y en especial de las toberas de salida del aire comprimido. Para ello se acercará la M1CV a un borde de la mesa de planitud y entre dos operadores se inclinará de forma que, mientras uno de ellos la sostiene en su hombro el otro proceda a la limpieza de los elementos indicados con un paño suave y disolvente, tras lo cual se volverá a colocar la M1CV en su posición normal de trabajo, todo ello con gran cuidado.

5.3. Proceso de Calibración

5.3.1. Montaje

Se sitúa la M1CV en la zona habitual de la mesa de planitud en la que se trabaja en la modalidad “instrumento fijo / pieza móvil” y si dispone de base supletoria, montada ya sobre ella.

Con los BPL ha de formarse una “escalera”, situándolos contiguos por sus caras laterales mayores, en orden de menor a mayor longitud y de forma que sus caras de medida queden situadas unas hacia arriba y las otras hacia abajo (figura 1); si esta escalera de BPL apoya directamente sobre la mesa de planitud, los dos palpados correspondientes a cada indicación de calibración se harán en el mismo sentido, uno sobre la cara de medida del BPL accesible (la situada

hacia arriba) y otro sobre una zona de la mesa de planitud próxima a la cara de medida no accesible del BPL (la situada hacia abajo); aunque ésta es una opción admisible, puede mejorarse el montaje si la escalera del BPL se apoya sobre otro BPL auxiliar, situado sobre la mesa de planitud según una de sus caras mayores laterales, de forma que sobresalgan aproximadamente la mitad de las caras de medidas situadas hacia abajo; ahora el palpador obtendrá las indicaciones de calibración tocando en las dos caras de medida de cada BPL, una vez hacia arriba y otra hacia abajo, con lo que el captador trabajará de forma más desfavorable.

Si el diámetro de la bola o zona de contacto del palpador fuese mayor que el espesor del BPL auxiliar, podrían colocarse dos, u otro elemento adecuado, como una paralela patrón (D-01.16 según [5]).

En todo caso, la escalera de BPL debe asegurarse lateralmente por dos piezas de masa suficiente, a fin de evitar caídas de los mismos (figura 1).

Para la presente calibración es recomendable que el operador use guantes.

5.3.2 Ajustes previos

Se efectuarán de acuerdo con lo que indique el manual técnico de la M1CV, con la ayuda del patrón de ajuste.

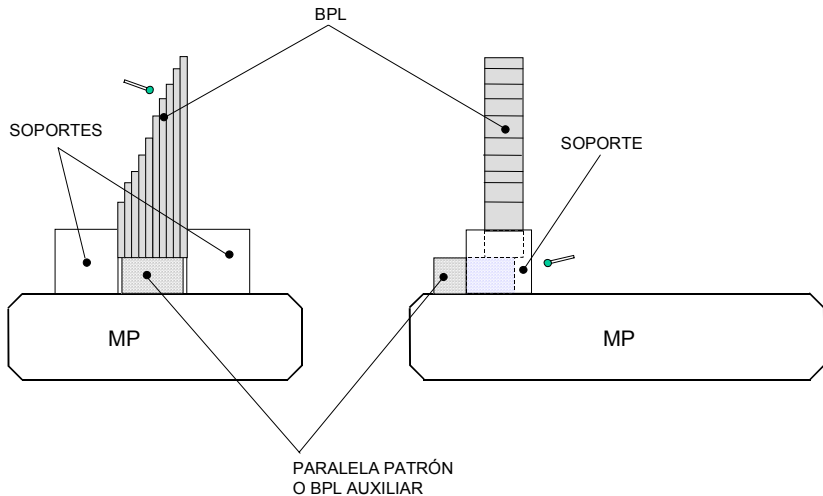


Figura 1: "Escalera" de BPL para la calibración de una M1CV.

5.3.3 Calibración

La calibración propiamente dicha de M1CV se realizará mediante BPL que cumplan con las condiciones establecidas en el apartado 5.1, pudiendo materializarse aquellos valores nominales para los que no se disponga del patrón adecuado mediante unión por adherencia de BPL de los valores apropiados; en estos casos en los que el valor de la covarianza es probablemente muy elevado, puede ser prudente calcular la incertidumbre del conjunto de BPL adheridos, por adición lineal de las incertidumbres de cada uno de los BPL individuales que forman parte de dicho conjunto, en vez de hacerlo cuadráticamente.

Si la M1CV dispone de base suplementaria, se colocará y se calibrará en el campo total de medida que con ella se alcance. Si dispone de más de una habrá de reiterarse lo anterior para cada una de ellas. Opcionalmente puede

además efectuarse la calibración de la M1CV sin ninguna base, disponiéndose entonces de un valor de incertidumbre de calibración para cada una de las posibles modalidades de uso.

El número I de puntos de calibración oscilará entre 10 y 20, con un número J de reiteraciones de medida en cada punto de calibración igual a 10:

$$I = 10 \text{ a } 20 \quad (i = 1 \text{ a } I)$$

$$J = 10 \quad (j = 1 \text{ a } J)$$

Los valores nominales de los I puntos de calibración se tomarán de forma que queden aproximadamente equidistantes dentro del valor del campo de medida C.

Cada medida del patrón resulta de la diferencia de dos lecturas, una aplicando el palpador a la cara superior del BPL y otra en la cara inferior del BPL o en la propia MP.

Respecto de las J reiteraciones en cada punto, conviene ir variando la posición de los patrones tras cada medida, entre las dos posiciones posibles de colocación sobre la mesa de planitud, de forma que la mitad de las indicaciones de calibración se obtengan con una de las caras de medida hacia arriba y la otra mitad se obtengan con dichas caras de medida hacia abajo.

Una buena práctica, para no alargar excesivamente la duración de la calibración, consiste en tomar las indicaciones de toda la escalera de patrones en cada reiteración j, antes de darles la vuelta en lugar de ir completando cada punto de calibración i.

5.4. Toma y tratamiento de datos

Como ya se ha indicado en los apartados 5.1 y 5.2.3, han de emplearse BPL de calidad 1 o superior, incorporando a los valores certificados las contribuciones señaladas.

Se anotarán los datos identificativos de la M1CV y de sus accesorios más significativos, así como las temperaturas e indicaciones, de acuerdo con el detalle señalado en 5.2.1 y 5.2.2.

Se denominarán:

x_{ij} = medida de orden j en el punto i de calibración

($i = 1$ a I ; $I = 10$ a 20 ; $j = 1$ a J ; $J = 10$)

x_{pi} = valor del patrón empleado para calibrar en el punto i .

Las M1CV suelen disponer de "cero flotante" por lo que al realizar el primer contacto con el patrón se establece un cero y la segunda lectura proporciona directamente la diferencia de ambas lecturas. Si la M1CV a calibrar no dispusiese de esta opción, habría que registrar dos indicaciones para cada medida del BPL.

El valor del patrón de calibración es el correspondiente al valor certificado para el BPL, si se trata de un solo BPL, o la suma de los certificados para cada BPL si se componen varios, dado que, como se explica en el modelo de medición, apartado 6.1, las posibles correcciones adicionales se estiman con valor nulo.

Se calcularán los parámetros siguientes:

1) \bar{x}_i = Valor medio de calibración en el punto i :

$$\bar{x}_i = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J x_{ij} \quad (1)$$

2) c_{ci} = Corrección de calibración en el punto i :

$$c_{ci} = x_{pi} - \bar{x}_i \quad (2)$$

3) s_i = Desviación típica de las medidas de calibración en el punto i :

$$s_i^2 = \frac{1}{J-1} \sum_{j=1}^J (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 \quad (3)$$

6. RESULTADOS

Los resultados de la calibración se refieren a 20 °C, y a la misma temperatura se encuentran referidos los certificados de los patrones utilizados. Dichos resultados se concretan en la corrección y su incertidumbre en cada uno de los puntos de calibración. Estas correcciones suelen denominarse locales para distinguirlas de una corrección global que sería aplicable a las medidas del instrumento en cualquier punto de su escala.

La forma de establecer la corrección global y su incertidumbre no es objeto de consideración en el presente procedimiento de calibración.

Las correcciones de calibración expresan fundamentalmente la discrepancia entre los valores de los patrones y las indicaciones del instrumento al medir dichos patrones, apartado 5.4, 2), aunque es frecuente incorporar otras contribuciones como más adelante se indica. Cada corrección ha de acompañarse de su correspondiente incertidumbre.

La incertidumbre del patrón de ajuste no precisa incorporarse en el modelo de calibración empleado, aunque una incertidumbre excesiva del mismo podría determinar una degradación de la calidad de las

medidas en el uso de la M1CV. Por este motivo se limita el máximo de su incertidumbre en 5.1.

Una eventual corrección por temperatura debería tener en cuenta la dilatación diferencial debida a la diferencia de temperatura, $\Delta\theta$, entre la regla de la M1CV y los BPL, así como los valores de sus coeficientes de dilatación. Dado que no es operativo en la metrología industrial medir temperaturas en el interior de las máquinas medidoras ni hacer experiencias para analizar la influencia de las variaciones de temperatura en los resultados de las mediciones, este procedimiento se limita a establecer un modelo sencillo para incorporar una contribución de incertidumbre debida a las variaciones de temperatura, advirtiendo que el mismo puede resultar insuficiente en algunos casos pero que también puede conducir a estimaciones injustificadas de la incertidumbre si los valores de $\Delta\theta$ no se estiman adecuadamente.

La corrección por deriva de los BPL se estimaría a partir de un valor D que podría obtenerse por dos procedimientos: uno, identificando D con la diferencia, en valor absoluto, entre los dos últimos valores certificados, y otro, tomando D de la tabla 2 - Estabilidad dimensional - de la Norma UNE EN-ISO 3650 [6].

No se consideran otras correcciones distintas de las indicadas, lo que no exime al responsable de la calibración de la M1CV de tener en cuenta correcciones adicionales si sus condiciones de trabajo así lo aconsejasen.

6.1. Cálculo de incertidumbres

Utilizando letras mayúsculas para las variables aleatorias que representan el mensurando, de acuerdo con las referencias [3] y [4], cada una de las correcciones locales responde al siguiente modelo:

$$C_i = C_{ci} + C_\theta + C_D + C_E \quad (4)$$

donde:

$$C_{ci} = X_{pi} - \bar{X}_i \quad (5)$$

representa las correcciones de calibración c_{ci} determinadas en el apartado 5.4.

Por consiguiente, el modelo resultante es:

$$C_i = X_{pi} - \bar{X}_i + C_\theta + C_D + C_E \quad (6)$$

La incertidumbre típica del patrón en el punto i de calibración ($i=1$ a l) es u_{pi} , valor obtenido del último certificado de calibración. La varianza de la media de las indicaciones al medir el patrón anterior es, según 5.4 3), s_i^2/J .

La corrección por temperatura puede cuantificarse con un modelo muy simplificado de tipo lineal y unidimensional suponiendo, además, que los coeficientes de dilatación de la regla de la M1CV y de los BPL son iguales. Si la diferencia de temperatura $\Delta\theta$ se mantiene dentro de un intervalo $\pm \Delta\theta_{\text{máx}}$, la corrección por temperatura es:

$$c_\theta = \alpha L \Delta\theta \quad (7)$$

donde se supone que la media de $\Delta\theta$ es cero por lo que también resulta nulo el estimador de la corrección por temperatura, es decir, $c_\theta = 0$.

Admitiendo que la función de densidad de $\Delta\theta$ es triangular, al aceptar como más probable que dicha variable se encuentre más frecuentemente cerca de cero que en los límites del intervalo, se obtiene una contribución de incertidumbre típica dada por:

$$u(C_\theta) = \alpha L u(\Delta\theta) = 11,5 \cdot 10^{-6} \frac{\Delta\theta_{\text{máx}}}{\sqrt{6}} L = 4,7 \cdot 10^{-6} \Delta\theta_{\text{máx}} L \quad (8)$$

en el supuesto de que la regla posea un coeficiente de dilatación similar al del acero.

Si la temperatura ambiente se mantiene en los límites indicados en 5.2.2 y sus variaciones son lentas, los BPL y la M1CV pueden alcanzar una buena estabilización térmica y el valor $\Delta\theta_{\text{máx}}$ resultar tan pequeño que la contribución anterior sea despreciable. Admitiendo un desequilibrio importante que suponga $\Delta\theta_{\text{máx}} = 2^\circ\text{C}$, el valor que se obtiene es:

$$u(C_\theta) = 9,4 \cdot 10^{-6} L \quad (9)$$

lo que determina una contribución apreciable que supondría $9,4 \mu\text{m}$ al medir una longitud de 1 m.

La corrección por deriva, C_θ , también se estima con media nula y su contribución se calcula admitiendo una distribución uniforme a partir del valor máximo D , es decir:

$$u_D = \frac{D}{2\sqrt{3}} \quad (10)$$

Se puede introducir la contribución debida a la expresión del resultado según un múltiplo de la división de escala, mediante una corrección de media nula, C_E , cuya varianza se obtiene de la hipótesis de distribución uniforme en un intervalo $\pm E/2$ siendo E la división de escala de la M1CV. Dado que las medidas en este instrumento se efectúan por diferencia de dos lecturas, la varianza de la contribución por división de escala es:

$$u^2(c_E) = 2 \frac{(E/2)^2}{3} = \frac{E^2}{6} \quad (11)$$

Los estimadores de las variables y sus incertidumbres típicas se pueden recoger en forma de tabla según formato recomendado en la ref. [4] (tabla 1).

(*) NOTA : La convolución de dos distribuciones rectangulares iguales es una distribución triangular.

La expresión de U^2 para la corrección de cada punto calibrado queda de la forma:

$$U_i^2 = k^2 \sum_{m=1}^5 u_m^2(c_i) = k^2 \left(u_{pi}^2 + \frac{s_i^2}{J} + \frac{D^2}{12} + \left(4,7 \cdot 10^{-6} \Delta\theta_{\text{máx}} L \right)^2 + \frac{E^2}{6} \right) \quad (12)$$

donde el subíndice m representa las filas de la tabla 1.

Tabla 1: Contribuciones a la incertidumbre combinada de las correcciones locales

Magnitud X_m	Estimación x_m	Incertidumbre típica $u(x_m)$	Distribución de probabilidad	Coficiente de sensibilidad c_m	Contribución a la incertidumbre $u_m(c_i)$
X_{pi}	x_{pi}	u_{pi}	Normal	1	u_{pi}
\bar{X}_i	\bar{x}_i	$\frac{s_i}{\sqrt{J}}$	Normal	-1	$-\frac{s_i}{\sqrt{J}}$
C_D	0	$\frac{D}{2\sqrt{3}}$	Uniforme	1	$\frac{D}{2\sqrt{3}}$
C_θ	0	$4,7 \cdot 10^{-6} \Delta\theta_{\max} L$	Triangular	1	$4,7 \cdot 10^{-6} \Delta\theta_{\max} L$
C_E	0	$\frac{E}{\sqrt{6}}$	Triangular (*)	1	$\frac{E}{\sqrt{6}}$

C_i	$c_i = \sum_m x_m$	Incertidumbre combinada (u_c)		$u_c = \sqrt{\sum_m u_m^2(c_i)}$
		Incertidumbre expandida (U)		$U = k \cdot u_c$

De acuerdo con el apartado F.2.4.5 de la referencia [3], es posible estimar una corrección única aplicable a toda la escala del instrumento que suele denominarse corrección global.

6.2. Interpretación de resultados

La información mínima que debe figurar en el Certificado de Calibración es la correspondiente a las correcciones e incertidumbres locales del apartado 6.1.

De acuerdo con la referencia [3], las contribuciones tipo A son suficientemente fiables cuando proceden de diez o más medidas repetidas, lo que se satisface en el modelo propuesto. EA recomienda el uso de una incertidumbre expandida que se corresponda con una probabilidad de recubrimiento del 95 %, lo que puede conseguirse con un factor de cobertura $k = 2$ en la mayor parte de los casos. Para ello es suficiente combinar tres o más distribuciones que contribuyan a la incertidumbre típica compuesta en cuantías similares y que las varianzas de las mismas se estimen de forma suficientemente fiable.

En el caso de incorporar las correcciones por deriva y por temperatura, la determinación de cada corrección local utiliza cinco contribuciones (tabla 1), pudiendo ocurrir que las contribuciones más importantes no resulten sensiblemente similares por lo que la adopción de una función de densidad normal para el resultado es poco fiable. No obstante, si una contribución es claramente dominante sobre las demás y su distribución es normal, la hipótesis de normalidad es aceptable. En otros casos habría que obtener la función de distribución a la que realmente responde el resultado y determinar el factor de cobertura para una probabilidad del 95 % con dicha distribución.

La referencia [3] no permite redondeos que disminuyan el valor de la incertidumbre más de un 5 %. En todo caso, es conveniente aplicar el redondeo de la incertidumbre por exceso cuando se aprecie un desequilibrio importante en el valor de sus contribuciones.

Como el valor resultante de las medidas con una M1CV debe expresarse en múltiplos de la división de escala del instrumento así como la incertidumbre de aquél valor, es conveniente que las

correcciones locales y sus incertidumbres se ofrezcan con una cifra decimal respecto al valor de la división de escala, de forma que el redondeo a la división de escala se produzca al final del proceso de elaboración del resultado.

Para las M1CV en la industria puede ser adecuado un periodo de calibración de 18 a 24 meses, mientras que en laboratorios puede ampliarse hasta 36 meses.

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 ed. en español (traducción de 3ª ed. en inglés), Centro Español de Metrología, 2009, NIPO 706-09-001-0.
- [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] Guía CEA-ENAC-LC/02, Expresión de la incertidumbre de medida en las calibraciones, Rev. 1, Enero 1998.
- [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). AENOR, 22 páginas, Enero 2000.

8. ANEXOS

8.1. Ejemplo numérico

Se recoge el resultado de la calibración de una M1CV con campo de medida $C=(0-800)$ mm y división de escala de valor $E=0,001$ mm.

Para la calibración se utilizan bloques patrón longitudinales (BPL) de calidad 1, ref. [6], con los que se materializa una “escalera” con diez puntos de calibración ($I=10$) de los siguientes valores nominales, en mm:

50 – 100 – 150 – 200 – 300 – 400 – 500 – 600 – 700 – 800

En cada punto de calibración se realizan diez medidas del patrón ($J=10$) registrándose la longitud del patrón como diferencia entre las dos lecturas de la M1CV correspondientes al contacto del palpador con la MP y con la cara superior del BPL.

La temperatura de la sala se ha mantenido durante la calibración entre 19,8 °C y 20,4 °C. En estas condiciones, y dadas las características del equipo, se decide estimar $\Delta\theta_{\text{máx}} \approx 0$ por lo que no se aplica la incertidumbre debida a la corrección por temperatura.

Asimismo, la incertidumbre de la corrección por deriva resulta despreciable por lo que tampoco se considera.

La desviación de planitud local de la MP no supera 25 μm , y los puntos de apoyo de la base de la M1CV están separados 250 mm, por lo que en el caso más desfavorable de que la base se apoyase entre puntos con una diferencia de cotas de 25 μm , la columna de la M1CV se inclinaría un ángulo igual a $0,025 / 250 = 0,0001$ rad $\approx 21''$. En una medición vertical de 0,8 m, el error de coseno sería de 4 nanómetros, totalmente despreciable frente a la resolución de la M1CV.

Por consiguiente, el modelo resultante para las correcciones locales que se utiliza es:

$$C_i = C_{ci} + C_E = X_{pi} - \bar{X}_i + C_E$$

En la tabla 3 se recogen los valores de los patrones y de las mediciones efectuadas. Las tres últimas filas de la tabla 2 contienen, respectivamente y para cada punto de calibración, el valor estimado para la corrección local, el de su incertidumbre típica y la estimación de su incertidumbre expandida.

La incertidumbre expandida ($k = 2$) para la corrección de cada punto calibrado que figura en la última fila de dicha tabla 3, responde a la expresión (12) de 6.1 sin la contribución térmica y la de deriva, pero incluyendo las demás, es decir:

$$U_i = 2 \sqrt{\left(u_{pi}^2 + \frac{s_i^2}{J} + \frac{E^2}{6} \right)}$$

Tabla 2: Toma y tratamiento de datos.

Campo de medida C = 0 a 800 mm	División de escala E = 1µm									
	50	100	150	200	300	400	500	600	700	800
Valor nominal (mm)										
Desviac. del patrón al nominal: d_{pn} (µm)	-0,2	-0,5	+0,4	-0,3	+0,2	-0,9	+1,2	+0,7	-2,2	+1,5
Incertidumb. típica del patrón: u_{pn} (µm)	0,10	0,10	0,24	0,25	0,28	0,30	0,33	0,35	0,38	0,40
Indicaciones al medir: los patrones: x_{ij} (µm)	50,001	100,001	149,998	200,001	300,000	400,000	499,999	600,002	699,996	800,002
	50,003	100,001	149,999	200,000	300,000	400,002	500,001	600,005	699,997	800,005
	50,003	99,999	149,998	200,004	299,996	400,004	500,000	600,006	699,996	800,004
	50,000	100,002	149,999	200,000	299,999	400,002	500,001	600,005	699,996	800,002
	50,004	100,001	150,000	199,999	300,001	400,002	499,997	600,002	699,998	800,003
	50,001	100,001	149,998	200,002	300,000	400,001	500,000	600,003	699,995	800,004
	50,000	100,001	150,001	200,001	299,998	400,004	500,001	600,006	699,996	800,003
	50,002	99,999	149,999	200,000	299,998	400,004	500,001	600,006	699,997	800,004
	50,004	99,998	149,998	200,002	300,000	400,002	499,997	600,005	699,998	800,003
	50,003	100,001	150,002	200,000	300,000	400,002	500,001	600,004	699,995	800,005
Valor medio: \bar{x}_i (µm)	50,0021	100,0004	149,9992	200,0009	299,9992	400,0023	499,9998	600,0044	699,9964	800,0035
Desv. típica: s_i (µm)	1,52	1,26	1,40	1,45	1,48	1,34	1,62	1,58	1,07	1,08
Corrección loca: c_i (µm)	-2,3	-0,9	+1,2	-1,2	+1,0	-3,2	+1,4	-3,7	+1,4	-2,0
Inc. típica de la corr. local: $u(c_i)$ (µm)	0,64	0,58	0,65	0,66	0,68	0,66	0,73	0,73	0,65	0,67
Inc. expand. de la corr. local ($k = 2$): U_i (µm)	1,3	1,2	1,3	1,3	1,4	1,3	1,5	1,5	1,3	1,3

Para cada uno de los puntos de calibración cabe elaborar una tabla similar a la tabla 1. La tabla 3 es la tabla correspondiente al punto de calibración de nominal 400 mm.

Tabla 3: Contribuciones a la incertidumbre combinada de la corrección local en el punto de calibración de nominal 400 mm

Magnitud	Estimación	Incert. típica	Distribución de probabilidad	Coefic. de Sensibilidad	Contribución a la incertidumbre
X_m	x_m	$u(x_m)$		C_m	$u_m(C)$
X_{pi}	399 999,1	0,30	Normal	1	0,30
\bar{X}_i	400 002,3	0,42	Normal	-1	-0,42
C_E	0	0,41	Rectangular	1	0,41

C	-3,2	Incertidumbre combinada (u_c)		0,66
		Incertidumbre expandida (U)		1,32

(Todos los valores en μm)

La incertidumbre expandida de la corrección local, para el punto de nominal 400 mm, redondeada a las décimas de micrómetro, es:

$$U_i(k = 2) = 1,3 \mu\text{m}$$

para una probabilidad de cobertura del 95 %, aproximadamente.

