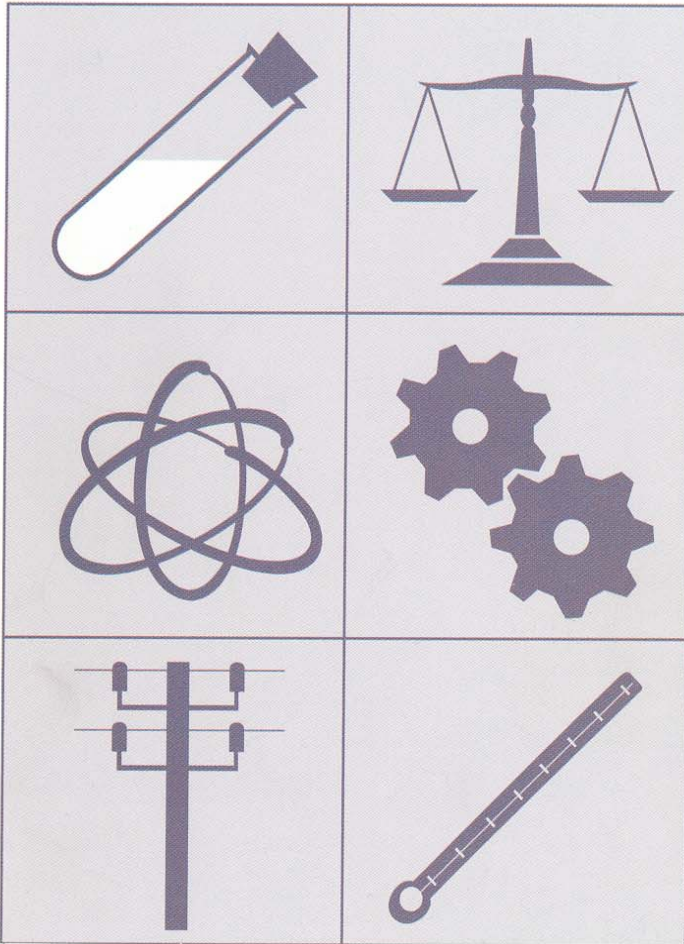


Metrología

PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN



PROCEDIMIENTO DI-016 PARA LA CALIBRACIÓN DE PATRONES CILÍNDRICOS DE DIÁMETRO

m 10

Este procedimiento ha sido revisado, corregido y actualizado, si ha sido necesario.

La presente edición se emite en formato digital. Hay disponible una edición en papel que se puede adquirir en nuestro departamento de publicaciones.

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	4
4. GENERALIDADES	4
4.1. Calibración de diámetro	5
4.2. Calibración de diámetro y redondez	5
4.3. Calibración de diámetro, redondez y cilindridad	6
5. DESCRIPCIÓN	6
5.1. Equipos y materiales	6
5.2. Operaciones previas	6
5.3. Proceso de calibración	7
5.4. Toma y tratamiento de datos	11
6. RESULTADOS	12
6.1. Cálculo de incertidumbres	12
6.2. Interpretación de resultados	19
7. REFERENCIAS	19
8. ANEXOS	20
8.1. Ejemplo numérico de aplicación del procedimiento descrito	20
8.2. Asignación de incertidumbre	22



1. OBJETO

El presente procedimiento tiene por objeto mostrar un método para la calibración de patrones cilíndricos de diámetro, codificados como D-01.06 según la Clasificación de Instrumentos de Metrología Dimensional (ref. [4]).

2. ALCANCE

El presente procedimiento es de aplicación a patrones cilíndricos en general, tanto de diámetro interior, como de diámetro exterior.

3. DEFINICIONES

Patrón de diámetro: Elemento de forma cilíndrica consistente en un disco de un determinado espesor, que puede materializar un diámetro exterior o un diámetro interior.

Diámetro nominal: Diámetro definido en el diseño, sin tener en cuenta las tolerancias dimensionales, ni los errores de forma.

Diámetro efectivo: Diámetro obtenido empleando un determinado método de medición.

Desviación al nominal: Diferencia algebraica entre el diámetro efectivo y el diámetro nominal.

4. GENERALIDADES

En este tipo de patrones, la principal característica a medir es el diámetro, pero normalmente la medida de un solo diámetro no es suficiente para la calibración de un patrón cilíndrico y suele ser necesaria información adicional acerca de las variaciones del diámetro.



La obtención de la variación del diámetro, requiere la medida de varios diámetros en distintas zonas del patrón, o la medida de formas (redondez y cilindricidad)

El presente documento recoge la determinación de las tres características que habitualmente definen a este tipo de patrones y que son las que se indican a continuación:

- Diámetro entre dos puntos diametralmente opuestos.- Se realizará cuando el patrón se utilice para la calibración de instrumentos de medida de diámetros a partir de dos puntos.
- Diámetro y redondez.- Se realizará cuando el patrón se utilice para la calibración de instrumentos de medida de diámetro a partir de dos o tres puntos y para patrones cilíndricos usados como calibres de límites.
- Diámetro y cilindricidad.- Se realizará cuando la forma es relevante en la aplicación del patrón y generalmente para patrones de alta precisión.

En todo caso la determinación de cada una de las características, dependerá del uso del patrón y se llevará a cabo una u otra en función de las necesidades o requerimientos del usuario.

4.1. Calibración de diámetro

Consiste en determinar el diámetro a partir de dos puntos de la superficie del cilindro, situados diametralmente opuestos y tomados mediante palpado directo con medidora de una coordenada o de tres coordenadas.

4.2. Calibración de diámetro y redondez

Consiste en determinar el diámetro según se indica en el apartado anterior, además del error de redondez a partir de una serie de puntos tomados sobre la sección a medir, por palpado continuo en medidora de tres coordenadas o en medidora de formas.



4.3. Calibración de diámetro, redondez y cilindridad

Consiste en determinar el diámetro y la redondez en tres secciones, según se indica en el punto anterior, relacionando las medidas de redondez entre ellas, al objeto de determinar la cilindridad.

5. DESCRIPCIÓN

5.1. Equipos y materiales

Para la calibración de diámetros se utilizará una medidora de una coordenada o de tres coordenadas. Para la calibración de los parámetros de forma (redondez y cilindridad), se podrá utilizar la medidora de tres coordenadas o una medidora de formas. La incertidumbre de los mencionados equipos ha de ser coherente con la calidad de los patrones a calibrar, recomendándose que como máximo sea 1/3 de la tolerancia a garantizar en la calibración del patrón cilíndrico. Así mismo para el conocimiento de la temperatura, es recomendable contar con un termómetro de medida por contacto, con resolución igual o mejor de 0,1 °C.

La temperatura de la medidora se tomará en una zona cercana a la regla y la temperatura del patrón cilíndrico, sobre la superficie del mismo.

5.2. Operaciones previas

Para proceder a la calibración de un patrón cilíndrico de diámetro interior o exterior, éste debe encontrarse perfectamente identificado en lo que se refiere a MARCA, DIAMETRO NOMINAL y NÚMERO DE SERIE. En caso de que no exista alguno de estos datos, se procederá a la identificación del patrón de la mejor forma posible (p. ej., mediante etiqueta fuertemente adherida al patrón, con un código único que podría ser el dado por el propio usuario o uno dado por el laboratorio) de forma que no surja duda alguna en



cuanto a la correspondencia entre el patrón calibrado y el Certificado emitido.

- 5.2.1. La calibración se realizará en un recinto acondicionado, con una temperatura de $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ y la variación de temperatura durante la calibración, no superará $0,2\text{ °C}$. En estas condiciones no será necesario aplicar correcciones por temperatura.
- 5.2.3. Proceder a una limpieza exhaustiva del patrón con alcohol o similar y un paño suave y efectuar una inspección visual, al objeto de comprobar que no existen rayas, oxidaciones o deformaciones localizadas, que pudieran desaconsejar su calibración, dejándolo estabilizar junto a la medidora al menos tres horas.
- 5.2.4. Poner en marcha la medidora y realizar los ajustes previos que se indiquen en su manual de usuario, prestando especial atención a la puesta a cero o calibración inicial, en función del tipo de medida que se vaya a realizar, tipo de medidora y palpador a utilizar.

5.3. Proceso de calibración

En todos los casos, previamente al proceso de medida, se procede a la alineación del patrón cilíndrico sobre la medidora de tal forma que su eje quede ortogonal al plano de medida.

En el supuesto de que la medidora tenga posibilidad de ajuste geométrico mediante software, éste se realizará a partir del eje del cilindro definido por exploración de la superficie cilíndrica y ajuste por mínimos cuadrados de los puntos obtenidos.

Cuando no exista la posibilidad indicada anteriormente, la alineación se realiza físicamente a partir de la alineación de dos generatrices del patrón situadas a 90° .

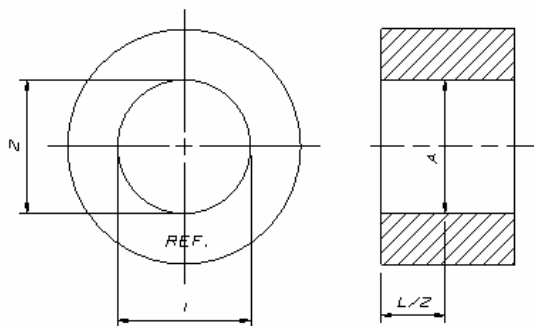
5.3.1. Calibración de diámetro

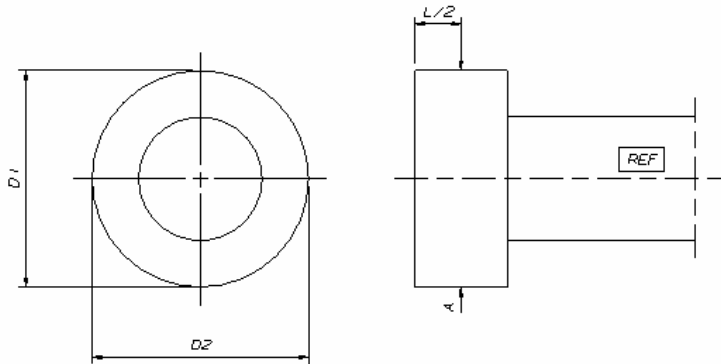
Consiste en determinar el diámetro medido entre dos puntos diametralmente opuestos. Esta operación se realizará en un plano situado aproximadamente en el centro del patrón y en dos diámetros situados ortogonalmente (Figura 1).

Si así se requiere por el uso del patrón, además de en el centro, ésta medida se realizará en secciones situadas a $\frac{1}{4}$ y $\frac{3}{4}$ de la altura de cilindro. A cada uno de los diámetros obtenidos, se le denominará (D_i).

El diámetro se obtiene a partir de los puntos palpados y dependiendo del tipo de medidora, se obtendrá directamente como una media absoluta, o a partir de un patrón inicial de puesta a punto de la medidora.

Figura 1



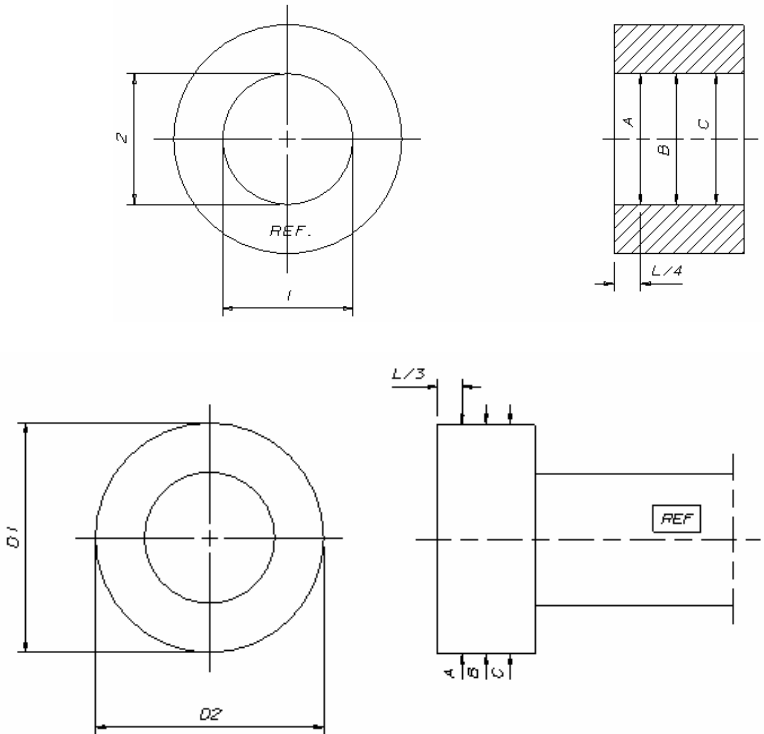


5.3.2. Calibración de diámetro y redondez

Consiste en determinar el diámetro según se indica en el apartado anterior, en tres secciones situadas en el centro del patrón a $\frac{1}{4}$ y a $\frac{3}{4}$ de la altura del mismo (Figura 2). Si así se requiere, en función del uso del patrón, también se puede obtener el diámetro en medidora de tres coordenadas, mediante exploración de la superficie cilíndrica en cada sección y ajuste por mínimos cuadrados de los puntos palpados.

Además, mediante exploración por palpado continuo de la superficie cilíndrica, en medidora de tres coordenadas o en medidora de formas, se obtendrá el error de redondez, como el parámetro (D_{MC}) diferencia radial en el sistema de mínimos cuadrados (UNE 82-307-94).

Figura 2



5.3.3. Calibración de diámetro, redondez y cilindricidad

Se procede a medir el diámetro y la redondez, según se indica en el apartado 5.3.2, en tres secciones situadas en el centro a $\frac{1}{4}$ y $\frac{3}{4}$ de la altura del cilindro pero teniendo en cuenta que las medidas de redondez deberán de estar realizadas con respecto a la misma referencia, al objeto de poder relacionarlas entre si para determinar la cilindricidad.



5.4. Toma y tratamiento de datos

5.4.1. Calibración de diámetros

Registrar los distintos diámetros (D_i) medidos y con los valores obtenidos, en cada caso, determinar el diámetro del patrón (D), la desviación al diámetro nominal (ΔD) y la variación de diámetros (ΔF)

$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i$$

$\Delta D = D - D_0$ siendo (D_0) el diámetro nominal

$$\Delta F = D_{i \text{ máx.}} - D_{i \text{ mín.}}$$

En el registro, se han de incluir los distintos diámetros (D_i), el diámetro (D), la desviación al diámetro nominal (ΔD) y la diferencia de diámetros (ΔF), además de la temperatura del patrón y la medidora al inicio y al final de la calibración.

5.4.2. Calibración de redondez y cilindridad

Registrar los valores de redondez y cilindridad, obtenidos directamente de la medidora de formas o de la medidora de tres coordenadas. Se dará como resultado el parámetro de mínimos cuadrados, (D_{MC}) diferencia radial en el sistema de mínimos cuadrados (UNE 82-307-94), siendo recomendable mostrar un gráfico de la medida realizada.

6. RESULTADOS



El objeto de la calibración es determinar como magnitud de salida la desviación al nominal del diámetro del patrón cilíndrico y si procede la redondez y cilíndricidad del mencionado patrón.

6.1. Cálculo de incertidumbres

La incertidumbre se estima según lo establecido en el documento EA-4/02.

La magnitud de salida (desviación al nominal del diámetro del patrón) viene dada por la expresión:

$$\Delta D = D - D_0 \quad (1)$$

siendo:

D_0 diámetro nominal del patrón.

$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i \quad (2)$$

$$D_i = D_{m_i} + C_0 + C_T \quad (3)$$

Siendo:

D_i - Diámetro en cada posición.

D_{m_i} - Diámetro obtenido en la medidora en cada posición.

Este diámetro dependiendo del tipo de medidora y del patrón a calibrar, se puede obtener directamente o a partir de una puesta a punto previa de la medidora con otro patrón, en cuyo caso:

$$D_{m_i} = D_p + L_m$$



siendo:

D_p - Diámetro del patrón de puesta a punto inicial.

L_m - Lectura de la medidora.

Con lo cual la ecuación (3) se transforma en:

$$D_i = D_p + L_m + C_0 + C_T \quad (4)$$

siendo

C_0 - Corrección debida a la medidora donde se engloban las siguientes componentes:

C_{0m} - Debida a la calibración de la medidora.

C_{0der} - Debida a la deriva de la medidora desde su calibración.

C_{DE} - Debida a la división de escala de la medidora.

C_T .- Corrección asociada a la dilatación diferencial, que responde a la ecuación.

$$C_T = (\alpha_0 \cdot \Delta T_0 - \alpha \cdot \Delta T) \cdot D \quad (5)$$

Siendo:

α_0 = Coeficiente de dilatación de la medidora.



ΔT_0 = Diferencia de temperatura de la medidora con respecto a la temperatura de referencia de 20 °C.

α = Coeficiente de dilatación del patrón a calibrar.

ΔT = Diferencia de temperatura del patrón a calibrar con respecto a la temperatura de referencia de 20 °C.

Aplicando la ley de propagación de incertidumbres a las ecuaciones (1), (2) y (3), las cuales utilizan un modelo de correcciones aditivas, en el que todas las magnitudes de entrada, se pueden considerar independientes, la incertidumbre típica asociada a la magnitud de salida, viene dada por:

$$u_{\Delta D}^2 = u_D^2$$

$$u_D^2 = u_{D_i}^2 + \frac{S_D^2}{n}$$

$$u_{D_i}^2 = u_{D_m}^2 + u_{C_0}^2 + u_{C_T}^2$$

$$u_{C_0}^2 = u_{C_{0m}}^2 + u_{C_{0der}}^2 + u_{DE}^2$$

En el supuesto de que se utilice un patrón de puesta a punto previo:

$$u_{D_i}^2 = u_{D_p}^2 + u_{L_m}^2 + u_{C_0}^2 + u_{C_T}^2$$

Siendo u_{D_p} la incertidumbre típica del patrón y u_{L_m} la incertidumbre típica de la lectura de la medidora.



6.1.1. Contribución debida a la repetibilidad del mesurando $\frac{S_D}{\sqrt{n}}$

Cuando se realicen seis medidas, esta componente estará definida por la desviación típica de las mencionadas medidas. Cuando el número de medidas de diámetro realizadas, sea menos de seis, se tomará como distribución de la repetibilidad del mesurando el máximo de $D_{\max} - D$ ó $D - D_{\min}$.

6.1.2. Contribución debida a la repetibilidad de la medidora
 (u_{D_m})

En este caso se está determinando la incertidumbre para el diámetro (D_i), a partir de una sola medida, por lo que la contribución debida a la repetibilidad de la medidora, será la obtenida en su calibración, (S_0) considerando $n=1$.

6.1.3. Contribución debida a la corrección de calibración de la medidora ($u_{C_{0m}}$)

La componente debida a la dispersión de la corrección de calibración en cada punto de la medidora, está incluida en el punto anterior.

La corrección a las indicaciones de la medidora en un punto próximo al de calibración, debe hacerse sobre los resultados obtenidos. En el caso de que en el certificado de la medidora no figure el punto de calibración o uno muy próximo, se podrá tomar el máximo de los indicados en el certificado, o estimar una corrección global en función de las correcciones locales, considerando en este caso la componente debida a la dispersión de las correcciones locales.



Por otra parte, como se ha indicado en 6.1, dependiendo del tipo de medidora, y del patrón a calibrar, puede ser necesaria una puesta a cero previa de la medidora con otro patrón, en cuyo caso hay que tener en cuenta la componente de incertidumbre debida a dicho patrón.

$$u_p = \frac{U_p}{k}$$

6.1.4. Contribución debida a la deriva de la medidora (u_{0der})

Siendo rigurosos debería tomarse en cuenta la posible deriva desde la última calibración.

En este tipo de medidoras no es habitual que haya una deriva definida entre calibraciones, por lo que dicha contribución puede considerarse despreciable.

6.1.5. Contribución debida a la división de escala de la medidora (u_{DE})

Considerando la resolución de la medidora E, y que el máximo error posible debido a la resolución de la medida es E/2:

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

6.1.6. Contribución debida a la dilatación diferencial (u_{CT})

Considerando que la calibración se realiza en las condiciones que se indican en el punto 5.2.2 y admitiendo que tanto el patrón a calibrar como la medidora se encuentran en equilibrio térmico y que los coeficientes de dilatación de la medidora y del patrón a calibrar son



similares, las correcciones de origen térmico pueden considerarse nulas. Aunque las correcciones sean nulas, no así las contribuciones de incertidumbre, debidas a dichas correcciones.

Considerando $c_{T \approx} (T_0 - T) \alpha D \approx (T_0 - T) \alpha_0 D$, la expresión u_T sería la que se indica a continuación:

$$u_T = D \cdot \alpha \cdot \frac{\delta_t}{\sqrt{3}}$$

siendo δ_t , la diferencia entre la temperatura inicial y la temperatura final de la calibración.

6.1.7. Grados de libertad

Los grados de libertad, se obtendrán utilizando la formula de Welch-Satterthwaite.

$$v_{eff} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4(y)}{v_i}}$$

En este caso, excepto las contribuciones debidas a la repetibilidad de la medidora y del mesurando, todas las demás se consideran contribuciones tipo B, por lo que el número de grados de libertad es infinito.

En los dos casos mencionados anteriormente, se considerará el número de medidas realizadas, para obtener el número de grados de libertad, según la ecuación dada.



6.1.8. Incertidumbre expandida

La expresión U para la desviación al nominal del diámetro (ΔD) queda de la forma siguiente:

$$U_{\Delta D}^2 = k^2 \sum u_i = k^2 \left(\frac{S_D^2}{n} + S_0^2 + \frac{E^2}{12} + \frac{(D \cdot \alpha \cdot \delta_T)^2}{3} \right)$$

A partir de las contribuciones consideradas, puede construirse la Tabla 1:

Estimación	Incertidumbre típica	Distribución de probabilidad	Coefficiente de sensibilidad	Contribución a la incertidumbre
D	$\frac{S_D}{\sqrt{n}}$	normal	1	$\frac{S_D}{\sqrt{n}}$
C_0	s_0	normal	1	s_0
C_{DE}	$\frac{E}{\sqrt{12}}$	rectangular	1	$\frac{E}{\sqrt{12}}$
C_T	$\frac{\delta_T}{\sqrt{3}}$	rectangular	$D \cdot \alpha$	$D \alpha \frac{\delta_T}{\sqrt{3}}$

Incertidumbre combinada (u)	$u = \sqrt{\sum u_c(i)^2}$
Incertidumbre expandida (U) ($k = 2$)	$U = k \cdot u$

Tabla 1: Contribuciones a la incertidumbre combinada

En el caso de redondez y cilindricidad, se asignará una incertidumbre que será la correspondiente a la incertidumbre de uso de la medidora, para este tipo de medidas.



6.2. Interpretación de resultados

Los resultados obtenidos, representan las desviaciones a los valores convencionalmente verdaderos, proporcionados por los patrones utilizados.

Cada desviación llevará asociada una incertidumbre de calibración, obtenida como se indica en el apartado 6.1.

En el certificado de calibración incluirá las desviaciones obtenidas, además de dar la incertidumbre expandida y de especificar el valor del factor de cobertura k utilizado, para una probabilidad del 95 %.

En función de las desviaciones obtenidas, el patrón puede ser incluido dentro de las clases de precisión especificadas por las normas o especificaciones que se consideren. El cumplimiento o no con la tolerancia indicada en una norma, deberá comprobarse teniendo en cuenta las desviaciones obtenidas, con sus incertidumbres asociadas.

El intervalo entre dos calibraciones sucesivas oscilará entre 24 y 48 meses, siendo responsabilidad del usuario establecer el período que estime oportuno, en función del uso.

7. REFERENCIAS

- [1] Procedimiento para la realización de procedimientos de calibración. Grupo de Trabajo MINER-CEM. Ed. 2, 2000.
- [2] Vocabulario Internacional de Metrología. Conceptos fundamentales y generales y términos asociados, Centro Español de Metrología, 3ª Ed., 2008, 88 págs., NIPO: 706-08-008-4.
- [3] Expresión de la incertidumbre de medida en las calibraciones. CEA-ENAC-LC/02, Rev. 1, Entidad Nacional de Acreditación (ENAC), Enero 1998.



- [4] Clasificación de Instrumentos de Metrología Dimensional, Centro Español de Metrología, 1ª Ed., 2005, 261 págs., Madrid.
- [5] Proceso de Calibración D-008 para Patrones cilíndricos de diámetro interior y exterior D-01.06. Sistema de Calibración Industrial (SCI). Ed. Diciembre 1986.

8. ANEXOS

8.1. Ejemplo numérico de aplicación del procedimiento descrito

Se procede a la calibración de un patrón cilíndrico de diámetro exterior, con medida nominal de 50 mm, en una medidora de una coordenada horizontal con división de escala de 0,1 μm , realizando medidas en tres secciones y dos diámetros ortogonales en cada sección.

Los datos correspondientes al último certificado de calibración de la medidora empleando en su calibración bloques patrón grado 00 (UNE 82311-85) cuya incertidumbre pueden despreciarse, se detallan a continuación:

PUNTO DE CALIBRACIÓN (mm)	CORRECCIÓN DE CALIBRACIÓN (μm)	REPETIBILIDAD S_0 (μm)
0	0,0	0,05
5	-0,1	0,06
10	-0,1	0,05
20	-0,1	0,07
25	-0,1	0,06
50	-0,1	0,07
75	0,0	0,07
100	-0,2	0,08



Los resultados obtenidos a una temperatura de 20,3 °C y con una diferencia de temperatura desde el inicio hasta el final de la calibración de 0,2 °C, son los que se recogen en la tabla:

MEDIDAS	VALOR MEDIDO (mm)
1	50,0023
2	50,0020
3	50,0026
4	50,0025
5	50,0023
6	50,0021

A partir de las indicaciones dadas en el proceso de calibración, se obtiene:

NOMINAL (mm)	50
CORRECCIÓN DE CALIBRACIÓN (μm) ⁽¹⁾	-0,1
VALORES MEDIDOS (mm)	50,0023
	50,0020
	50,0026
	50,0025
	50,0023
	50,0021
VALOR MEDIO (\bar{D}) (mm)	50,0023
REPETIBILIDAD (S_D) (mm)	0,0002
DESVIACIÓN AL NOMINAL (ΔD) (mm)	0,0022
DIFERENCIA MÁXIMA (ΔF) (mm)	0,0006

⁽¹⁾ En este caso se dispone de la corrección en el punto de calibración. En el supuesto de que esto no ocurriese, se podría estimar una corrección global en función de las correcciones locales dadas en el certificado de calibración de la medidora, teniendo que considerar en tal caso la componente de incertidumbre debida a la dispersión de las correcciones locales.



8.2. Asignación de incertidumbre

La incertidumbre asociada a la desviación al nominal del patrón calibrado, se obtiene aplicando la expresión:

$$U_{\Delta D}^2 = k^2 \left(\frac{S_D^2}{n} + S_0^2 + \frac{E^2}{12} + \frac{(D \cdot \alpha \cdot \delta_t)^2}{3} \right)$$

Contribución a la incertidumbre debida a la repetibilidad del mesurando

El valor medido se obtiene como media de 6 reiteraciones, con lo que la componente asociada a la repetibilidad será:

$$u_D = \frac{S_D}{\sqrt{n}} = \frac{0,0002}{\sqrt{6}} = 0,00008 \text{ mm}$$

Los grados de libertad de (u_D) son $\nu_D = N - 1$, porque se ha obtenido a partir de la desviación típica correspondiente a N valores, siendo en este caso N=6.

$$\nu_D = 6 - 1 = 5$$

Contribución a la incertidumbre debida a la repetibilidad de la medidora:

Del certificado de calibración de la medidora se obtiene la repetibilidad de la misma en el punto 50 mm, como la desviación típica de calibración en dicho punto:

$$u_{D_i} = S_{0_i} ; \quad u_{D_i} = 0,00007 \text{ mm}$$



Los grados de libertad de (u_{D_i}) son $\nu_{D_i} = N - 1$ porque se ha obtenido a partir de la desviación típica correspondiente a N valores, siendo en este caso $N = 10$:

$$\nu_{D_i} = 10 - 1 = 9$$

Contribución a la incertidumbre debida a la división de escala de la medidora

$$u_{DE} = \frac{E}{\sqrt{12}} = \frac{0,0001}{\sqrt{12}} = 0,00003 \text{ mm}$$

(u_{DE}) se obtiene como una incertidumbre tipo B, por lo que los grados de libertad pueden considerarse ∞ .

Contribución a la incertidumbre debida a la dilatación diferencial

$$u_{CT} = \frac{D \cdot \alpha \cdot \delta t}{\sqrt{3}} = \frac{50.11,5 \times 10^{-6} \cdot 0,2}{\sqrt{3}} = 0,00007 \text{ mm}$$

(u_{CT}) también se obtiene como una incertidumbre tipo B, por lo que los grados de libertad pueden considerarse ∞ .

En la tabla siguiente se recoge el balance de incertidumbres:



Magnitud de entrada	Estimación	u_i	Distrib.	c_i	$c_i u_i$	ν
Diámetro medido	50,0023	$\frac{0,0002}{\sqrt{6}}$	normal	1	0,000 08	5
Corrección de calibración	-0,0001	0,000 07	normal	1	0,000 07	9
Corrección de la división de escala	0	$\frac{0,0001}{\sqrt{12}}$	rectangular	1	0,000 03	∞
Dilatación diferencial	0	$\frac{0,2}{\sqrt{3}}$	rectangular	$1,15 \times 10^{-5}$	0,000 07	∞

CORRECCIÓN	-0,0001	Incertidumbre combinada (u)	0,000 13
		Incertidumbre expandida (U) ($k = 2$)	0,000 26

Tabla 1: Contribuciones a la incertidumbre combinada

Todos los valores en mm.

La incertidumbre obtenida se redondeará a 0,0003 mm = 0,3 μ m.

Nota sobre el factor de cobertura

En este caso la incertidumbre combinada es suma de 4 contribuciones, lo cual permitiría tomar una factor de cobertura $K = 2$ para un nivel de cobertura aproximado del 95%.

Sin embargo, se procederá a determinar el número de grados de libertad, según la ecuación de Welch Satterthwaite:

$$v_{eff} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4(y)}{v_i}}$$



$$v_{\text{eff}} = \frac{0,00013^4}{\frac{0,00008^4}{5} + \frac{0,00007^4}{9} + \frac{0,00003^4}{\infty} + \frac{0,00007^4}{\infty}}$$

$$v_{\text{eff}} = 26$$

Comprobando en la tabla que relaciona los grados efectivos de libertad con el factor de cobertura:

v_{eff}	1	2	3	4	5	6	7	8	10	20	50	∞
k	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,28	2,13	2,05	2,00

Se obtiene que para 26 grados efectivos de libertad, el factor de cobertura sería sensiblemente superior a 2.

Considerando que la incertidumbre obtenida de $0,26 \mu\text{m}$ se ha redondeado a $0,3 \mu\text{m}$, se puede concluir que con un factor de cobertura $k = 2$ la probabilidad de recubrimiento estará muy próxima al 95 %.

