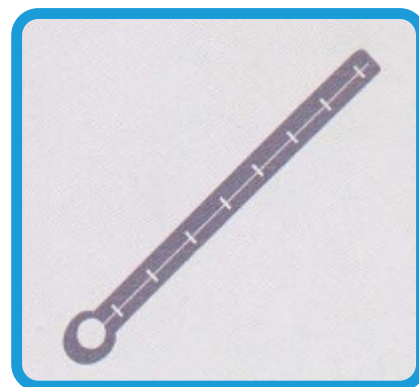
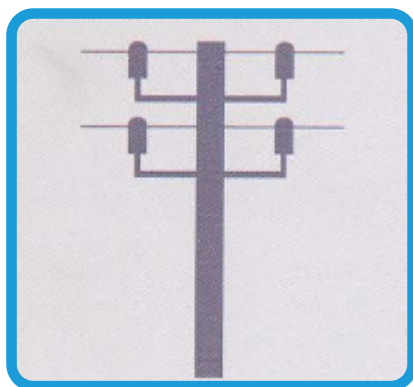
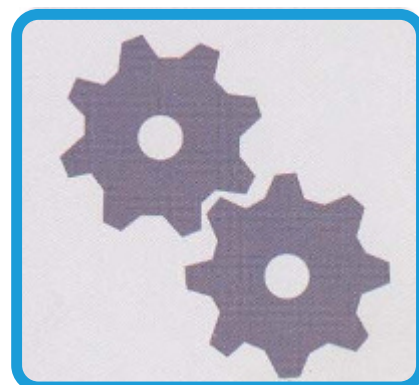
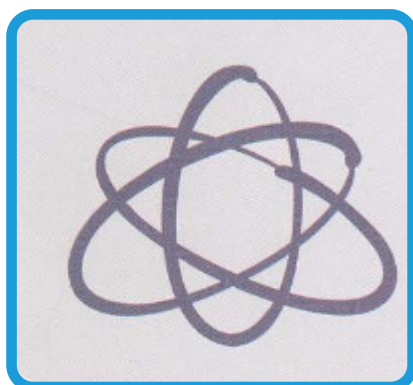
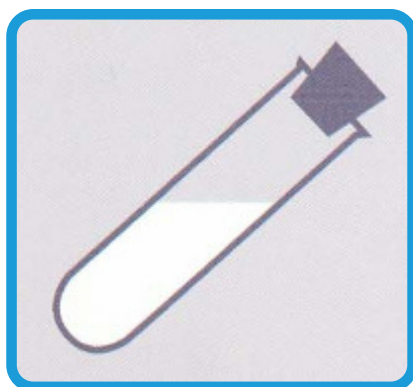


Metrología



PROCEDIMIENTO DI-013 PARA LA
CALIBRACIÓN DE REGLAS PATRÓN
DE TRAZOS

m 19

PROCEDIMIENTO DI-013

CALIBRACIÓN DE REGLAS PATRÓN DE TRAZOS

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

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

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

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

ÍNDICE

	Página
1. OBJETO	3
2. ALCANCE.....	3
3. DEFINICIONES	3
4. GENERALIDADES	5
4.1. Reglas patrón de trazos de tipo portátil.....	5
4.2. Reglas patrón de trazos de tipo fijo	6
4.3. Abreviaturas y símbolos	6
5. DESCRIPCIÓN	7
5.1. Equipos y materiales.....	7
5.2. Operaciones previas.....	7
5.3. Proceso de calibración	8
5.4. Toma y tratamiento de datos	8
6. RESULTADOS.....	10
6.1. Estimación de la incertidumbre.....	10
6.2. Interpretación de resultados.....	14
7. REFERENCIAS	15
8. ANEXOS	15
8.1. Ejemplo numérico de aplicación del procedimiento descrito	15

1. OBJETO

El presente procedimiento tiene por objeto exponer un método de calibración para las REGLAS PATRÓN DE TRAZOS, codificadas como D-01.18 según la Clasificación de Instrumentos de Metrología Dimensional (ref. [2]).

Este procedimiento se redacta de acuerdo con los criterios generales establecidos por el PROCEDIMIENTO PARA LA ELABORACIÓN DE PROCEDIMIENTOS DE CALIBRACIÓN de la ref. [1], emplea en todo lo posible la terminología del VOCABULARIO de la ref. [3] y sigue, para el cálculo de incertidumbres, las recomendaciones de las referencias [4] y [5].

2. ALCANCE

Este procedimiento se refiere a la calibración de reglas patrón de trazos de tipo portátil, de metal vidrio o plástico, que llevan sobre sus cara una escala de trazos, y no es aplicable a las reglas patrón de trazos de tipo fijo montadas en instrumentos de medida o en máquinas-herramienta, que se calibran conjuntamente con el instrumental de medida en el que se montaron.

Este procedimiento es aplicable a la calibración de reglas de diferentes campos de medida, siendo las más habituales entre 1 y 300 mm, aunque si fuesen más largas no invalidarían el presente procedimiento de calibración.

La separación entre trazos puede ser de 1 mm, 0,5 mm, 0,01 mm y de otros valores.

3. DEFINICIONES

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

Enrasar:

En el sentido dado en el presente procedimiento, acción cuyo efecto es lograr la coincidencia entre la línea que define el trazo de la regla y alguna de las líneas del retículo perteneciente, bien al sistema óptico empleado para calibrar la regla, bien al instrumento (p. ej., microscopio) que se calibra con ella.

Alinear:

En este procedimiento se entiende como tal el proceso mediante el cual se hacen coincidir los trazos extremos de la regla con la dirección perpendicular al desplazamiento del eje del dispositivo de medida, una vez que la regla queda situada en la zona de medición.

Calibración [3] (2.39)

Operación que bajo condiciones especificadas establece, en una primera etapa, una relación entre los valores y sus incertidumbres de medida asociadas obtenidas a partir de los patrones de medida, y las correspondientes indicaciones con sus incertidumbres asociadas y, en una segunda etapa, utiliza esta información para establecer una relación que permita obtener un resultado de medida a partir de una indicación.

NOTAS

1. Una calibración puede expresarse mediante una declaración, una función de calibración, un diagrama de calibración, una curva de calibración o una tabla de calibración. En algunos casos,

puede consistir en una corrección aditiva o multiplicativa de la indicación con su incertidumbre correspondiente.

2. Conviene no confundir la calibración con el ajuste de un sistema de medida, a menudo llamado incorrectamente "autocalibración", ni con una verificación de la calibración.
3. Frecuentemente se interpreta que únicamente la primera etapa de esta definición corresponde a la calibración.

Intervalo de indicaciones [3] (4.3)

Conjunto de valores comprendido entre las dos indicaciones extremas

NOTAS

1. El intervalo de indicaciones se expresa generalmente citando el valor inferior y el superior, por ejemplo, 99 V a 201 V.
2. Para ciertas magnitudes se utiliza la expresión proveniente del inglés "rango de indicaciones", mientras que para otras se utiliza "campo de indicaciones".

Desviación típica experimental

Para una serie de n mediciones de un mismo mensurando, la magnitud s que caracteriza la dispersión de los resultados, dada por la fórmula:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

siendo x_i el resultado de la i -ésima medición y \bar{x} la media aritmética de los n resultados considerados.

NOTAS

1. Considerando la serie de n valores como muestra de una distribución, \bar{x} es un estimador insesgado de la media μ , y s un estimador insesgado de la varianza σ^2 de dicha distribución.
2. La expresión s/\sqrt{n} es una estimación de la desviación típica de la distribución de \bar{x} y se denomina desviación típica experimental de la media.

División de escala

Parte de la escala comprendida entre dos trazos consecutivos cualesquiera.

Incertidumbre de medida [3] (2.26)

Parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando, a partir de la información que se utiliza.

NOTAS

1. La incertidumbre de medida incluye componentes procedentes de efectos sistemáticos, tales como componentes asociadas a correcciones y a valores asignados a patrones, así como la

incertidumbre debida a la definición. Algunas veces no se corrigen los efectos sistemáticos estimados y en su lugar se tratan como componentes de incertidumbre.

2. El parámetro puede ser, por ejemplo, una desviación típica, en cuyo caso se denomina incertidumbre típica de medida (o un múltiplo de ella), o la semiamplitud de un intervalo con una probabilidad de cobertura determinada.
3. En general, la incertidumbre de medida incluye numerosas componentes. Algunas pueden calcularse mediante una evaluación tipo A de la incertidumbre de medida, a partir de la distribución estadística de los valores que proceden de las series de mediciones y pueden caracterizarse por desviaciones típicas. Las otras componentes, que pueden calcularse mediante una evaluación tipo B de la incertidumbre de medida, pueden caracterizarse también por desviaciones típicas, evaluadas a partir de funciones de densidad de probabilidad basadas en la experiencia u otra información.
4. En general, para una información dada, se sobrentiende que la incertidumbre de medida está asociada a un valor determinado atribuido al mensurando. Por tanto, una modificación de este valor supone una modificación de la incertidumbre asociada.

Trazabilidad metrológica [3] (2.41)

Propiedad de un resultado de medida por la cual el resultado puede relacionarse con una referencia mediante una cadena ininterrumpida y documentada de calibraciones, cada una de las cuales contribuye a la incertidumbre de medida.

NOTAS

- 1 la referencia puede ser la definición de una unidad de medida, mediante una realización práctica, un procedimiento de medida que incluya la unidad de medida cuando se trate de una magnitud no ordinal, o un patrón.
- 2 La trazabilidad metrológica requiere una jerarquía de calibración establecida.

4. GENERALIDADES

4.1. Reglas patrón de trazos, de tipo portátil

Son patrones cuya longitud nominal está definida por la distancia entre los ejes de dos trazos, que son segmentos rectilíneos paralelos grabados o fotograbados sobre una de las caras de la regla. Hay gran variedad en cuanto a material, sección, longitud... El campo de medida más usual varía entre 1 mm y 300 mm, aunque hay otros de mayor longitud.

Hay reglas patrones de trazos de este tipo en las que la distancia entre trazos, que puede permanecer constante o ser variable, puede llegar a valores muy pequeños, del orden de 0,01 mm o menos en algún caso especial, con lo que es fácil apreciarlos a simple vista, por lo cual pueden venir situados en el interior de un círculo u otra figura geométrica para facilitar su localización.

Se trata de patrones que pueden ser adecuados a la calibración de Microscopios D-10.02 y Proyectores de perfiles D-10.03 y D-10.08 [2].

También son corrientes las reglas patrones de trazos de este tipo, con campos de medida hasta 300 mm y distancias entre trazos de 0,5 mm a 1 mm, que suelen ser transparentes y permiten

complementar la calibración de los Proyector de perfiles D-10.03 y D-10.08 [2] en los recorridos de sus ejes de medidas longitudinales.

Todas estas reglas pueden también utilizarse como elementos auxiliares, en los propios procedimientos de medición con Microscopios y Proyectores de perfiles, para bajas precisiones, y para efectuar medidas de longitud en algunos casos.

4.2. Reglas patrón de trazos, de tipo fijo

Son otro tipo de reglas patrón de trazos de alta resolución también, que van situadas en ciertos instrumentos de medida o en máquinas-herramienta, ligadas a un captador o lector y que actúan de escalas para los desplazamientos longitudinales a lo largo de los ejes de los mismos. En este caso, aunque se se sigue empleando la denominación de trazos, dichos trazos pueden ser de distinta naturaleza, resultando así un sistema transductor como los que a continuación se indican:

- a) Mecánico-óptico: Reglas metálicas o de vidrio con trazos longitudinales o sistema captador de lupa y cuña, redes de trazos, etc.
- b) Electrónicos: Reglas con trazos formados por elementos inductivos o capacitivos de un cierto circuito eléctrico relacionado con el captador.
- c) Óptico: Reglas con trazos formados mediante el tratamiento de una cierta característica óptica que el captador puede discernir, como por ejemplo, opaco-transparente, reflectante-no reflectante, etc.

Casi todas estas reglas patrones de trazos fijos, trabajan con un captador que proporciona indicaciones digitales. Como aplicaciones típicas de las mismas, en metrología dimensional, caben citar las medidoras por coordenadas D-02.04, D-02.05 y D-02.07 [2].

Cuando estas reglas son circulares en lugar de rectas, se clasifican como D-04.04 [2].

Como ya se indicó anteriormente, no se debe aplicar este Procedimiento de calibración, para las reglas patrones de tipo fijo.

La calibración se realiza con una Máquina medidora de una coordenada con visor óptico, aunque también se podrían utilizar medidoras de dos o tres coordenadas.

4.3. Abreviaturas y símbolos

- l_{ij} Lectura de la medida i -ésima en cada uno de los puntos de calibración j -ésimo.
- l_{oj} Valores nominales en cada uno de los puntos de calibración j -ésimo de la regla.
- l_{pj20} Valor certificado a 20 °C del patrón empleado.
- α_p Coeficiente de dilatación lineal del patrón.
- α Coeficiente de dilatación lineal de la regla.
- l_{pjt} Valor del patrón en el punto j a la temperatura t .
- l_{ojt} Valor de la regla en el punto j a la temperatura t .
- t_p Temperatura del patrón.
- t Temperatura de la regla.
- e_p División de escala del sistema de medida patrón
- c_{pj} Corrección del sistema de medida patrón.

- c_{\cos} Corrección por desalineamiento.
- c_t Corrección por diferencia de dilatación térmica.
- c_E Corrección debida al error de engrase.
- $c_{P_{DE}}$ Corrección debida a la división de escala del sistema de medida.
- u Incertidumbre típica.
- U Incertidumbre expandida para un determinado nivel de cobertura.
- EMP Error máximo permitido

5. DESCRIPCIÓN

5.1. Equipos y materiales

Para la calibración de reglas patrón de trazos es necesario emplear un sistema de medición lineal en el que la relación EMP/U para la calibración sea la adecuada (ref. [6]), habitualmente un valor entre 10 y 4, y que disponga de un visor o microscopio, óptico o fotoeléctrico. Asimismo se deberá disponer de un instrumento de medida de temperatura adecuado.

Se pueden utilizar alguna de las soluciones propuestas seguidamente, que se dan de forma totalmente orientativa.

- Microscopio y láser de medida por desplazamiento D-01.15.
- Medidora de una coordenada horizontal D-02.04 y microscopio.
- Medidora de tres coordenadas D-02.07 y microscopio.
- Sistema de medida óptico de dos coordenadas, mediante cálculo numérico de imagen.
- Comparador transversal y microscopio.

A excepción de la primera solución, todas las demás utilizan una regla a trazos interna, como patrón con el que comparar la regla a calibrar.

La calibración aquí contemplada se realiza con una máquina medidora de una coordenada horizontal, con regla patrón interna, dotada de microscopio.

5.2. Operaciones previas

5.2.1 Identificación

Se comprobará que las reglas patrones de trazos tienen grabado como mínimo, Marca y Número de serie.

Si no las llevan grabadas, el Laboratorio de calibración podrá solicitar la asignación de un identificador apropiado como requisito para la emisión del correspondiente Certificado, o asignar un código biunívoco el propio Laboratorio, e identificarlo a través de una Etiqueta.

5.2.2 Condiciones ambientales

La sala de medición se encontrará acondicionada, al menos en (20 ± 1) °C.

5.2.3 Limpieza y legibilidad

Antes de iniciar la calibración de una regla patrón de trazos, se limpiarán sus superficies con éter y un paño suave comprobando visualmente o con ayuda de una lupa que, sobre la cara en que van grabados los trazos, no se aprecian deformaciones, rayas o defectos de cualquier tipo que impidan un uso correcto del patrón.

5.2.4 Estabilización

Tanto el mensurando (la regla) como el equipo patrón utilizado para calibrarlo, se dejarán estabilizar como mínimo tres horas antes de iniciar la calibración. La regla deberá estabilizarse próxima a la zona de calibración.

5.3. Proceso de Calibración

Con independencia del sistema de medida que se utilice, el procedimiento de calibración es análogo. Se comienza por situar la regla sobre el sistema de medida del sistema alineando sus dos trazos extremos, mediante el visor o microscopio, haciendo coincidir cada uno de ellos con el sistema óptico del equipo y que además sean perpendiculares a la dirección de desplazamiento; esta alineación se facilita si la regla se ha colocado sobre una mesa auxiliar giratoria respecto del eje vertical, la cual se sitúa a su vez sobre la zona de medida.

Tras ello se hace cero en el trazo origen y se miden las distancias de un número determinado de trazos, aproximadamente equidistantes, a dicho origen.

El número de puntos recomendados es de 10 o más distribuidos uniformemente. En los casos que se consideren especiales, el número de puntos y la distribución se adaptará a las necesidades. Siempre se tomarán valores que coincidan con divisiones de la regla.

Se recomienda que en las calibraciones posteriores se varíen los trazos calibrados, a fin de que con el tiempo se hayan vuelto a calibrar todos.

Se engrasa el trazo 0 de la regla con el retículo del microscopio y, tomando como referencia dicho engrase, se desplaza el patrón a los siguientes trazos de calibración procediendo a engrases sucesivos, obteniendo en todos los casos la distancia desde el trazo origen hasta cada uno de los trazos de calibración

5.4. Toma y tratamiento de datos

En cada punto j de calibración se reiteran un número n de mediciones tomadas desde el origen, registrándose los valores indicados por el equipo de medida.

En cada punto j de calibración la corrección a aplicar será el valor medio indicado por el sistema de medida (\bar{l}_j) menos el valor nominal del trazo (l_{0j}), más una serie de correcciones ($\sum \delta_j$) procedentes de distintas fuentes.

$$c_j = \bar{l}_j - l_{0j} + \sum \delta_j \quad (1)$$

Se calculan los siguientes parámetros utilizando las expresiones que se indican:

a) Valor medio de calibración en el punto j , \bar{l}_j

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

b) Corrección del sistema de medida empleado como patrón, c_{pj} .

El anterior valor medio de calibración vendrá afectado de una corrección recogida en el certificado de calibración del propio sistema de medida. Se deben corregir los valores del sistema de medida según dichos valores indicados. Si no se realizan correcciones, éstas deberán tenerse en cuenta en la incertidumbre final, según se indica en la Guía para la expresión de la incertidumbre de medida (véase [4] 6.3.1 y F.2.4.5).

c) Corrección por desalineación de ejes.

El desalineamiento entre el eje de la regla y el de la regla de la máquina medidora introduce un error de coseno. Si el ángulo máximo formado por esta desalineación es $\vartheta_{\text{máx}}$ el error será:

$$|c_{\cos}| \leq (1 - \cos \vartheta_{\text{máx}}) l_j \cong [(\vartheta_{\text{máx}}^2)/2] l_j \quad (3)$$

Se supone que esta corrección se distribuye uniformemente entre $+\frac{\vartheta_{\text{máx}}^2}{2} l_j$ y $-\frac{\vartheta_{\text{máx}}^2}{2} l_j$.

Para pequeñas desalineaciones esta corrección puede considerarse nula ($c_{\cos} = 0$). Por ejemplo para un ángulo de 5 minutos, $c_{\cos} = 1 \times 10^{-6} l_j$; es decir, una corrección de 1 $\mu\text{m}/\text{m}$, o bien de 1 nm/mm.

d) Corrección por diferencia de dilatación térmica

La corrección por dilatación diferencial es:

$$c_T = [\alpha_p (t_p - 20) - \alpha (t - 20)] l_j \quad (4)$$

que también puede escribirse como:

$$c_T = [(\alpha + \Delta\alpha)(t + \Delta t - 20) - \alpha (t - 20)] l_j = [\alpha \cdot \Delta t + \Delta\alpha (t - 20)] l_j \quad (5)$$

ya que $\Delta\alpha = \alpha_p - \alpha$ y $\Delta t = t_p - t$.

Después de la estabilización térmica, tanto la regla a calibrar, como la regla patrón del sistema de medida se encuentran prácticamente a la misma temperatura, aunque distinta de 20 °C, por lo que el primer término de (5), $\alpha \cdot \Delta t$, es prácticamente nulo.

En cuanto al término $\Delta\alpha (t - 20)$, ocurre prácticamente lo mismo, ya que $\Delta\alpha$ es un valor habitualmente muy pequeño, incluso nulo, y multiplicado por $(t - 20)$ °C, inferior a 1 °C, puede dar una corrección del orden de algunos nm/mm.

Por ello, en general, puede suponerse una corrección de valor nulo; no así su incertidumbre.

e) Corrección debida al error de enrase c_{DE}

Se considera un error de enrase de valor medio nulo ($c_{DE} = 0$), con incertidumbre asociada $u(c_{DE})$.

f) Corrección por división de escala del sistema de medida

Siendo e_p el valor de la división de escala del sistema de medida, el error cometido y por tanto su corrección estará comprendida entre $+e_p/2$ y $-e_p/2$, siendo la mejor estimación, para un buen enrase, $c_{pDE} = 0$.

6. RESULTADOS

6.1. Estimación de la incertidumbre

Se calculan según lo establecido en la Guía ISO [4] y en la Guía EA4/02 [5]. Se considera la siguiente expresión para la corrección de calibración:

$$c_j = \bar{l}_j - l_{0j} + c_{p_j} + c_{\cos} + c_t + c_{DE} + c_{pDE} \quad (6)$$

Partimos de la expresión (6) para la corrección de calibración, la cual utiliza un modelo de correcciones aditivas, en el que todas las magnitudes de entrada se pueden considerar independientes.

Aplicando la ley de propagación de las incertidumbres a la expresión anterior se obtendría:

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

siendo $u_i(c_j)$ el producto del coeficiente de sensibilidad por la incertidumbre asociada a cada una de las magnitudes de entrada x_i que aparecen en la expresión (6).

Analizamos a continuación cada una de las contribuciones a la incertidumbre:

1. Incertidumbre debida a la repetibilidad de las lecturas, $u(\bar{l}_j)$:

En cada uno de los j puntos, la desviación típica correspondiente a la serie de lecturas efectuadas es una estimación de su repetibilidad:

$$s_j = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (l_{ij} - \bar{l}_j)^2} \quad (8)$$

Como estimación más conservadora se toma el valor máximo encontrado.

La componente asociada a la repetibilidad será:

$$u(\bar{l}_j) = \frac{s_{j\text{máx}}}{\sqrt{n}} \quad (9)$$

siendo n el número de veces que se repite la medida en cada punto de calibración.

El número de grados de libertad es $n-1$

2. Contribución debida al sistema de medida patrón, $u(c_{p_j})$

2.1 Calibración del sistema de medida patrón, $u_{\text{cal}}(c_{p_j})$

Si en el certificado de calibración del equipo de medida patrón figura la incertidumbre expandida en el trazo j de calibración, para un factor k , entonces:

$$u_{\text{cal}}(c_{p_j}) = \frac{U_{c_{p_j}}}{k} \quad (10)$$

En el caso de que en el certificado del patrón, no figure el punto de calibración, o uno muy próximo, un criterio conservador es tomar como incertidumbre la máxima de las indicadas en el certificado.

Si no se aplican correcciones en la medida (lo cual no se recomienda, véase 5.4 b), la corrección debe añadirse a la incertidumbre, sumándola linealmente (véase [4] 6.3.1 y F.2.4.5).

2.2 Deriva del patrón, $u_{\text{der}}(c_{p_j})$

Cuando la deriva entre calibraciones del patrón se estime inferior a 1/10 de la división de escala de la regla a calibrar, no es necesario considerar esta componente. En caso contrario se considerará una distribución rectangular de rango igual a la deriva.

$$u_{\text{der}}(c_{p_j}) = \frac{\text{deriva}}{2\sqrt{3}} = \frac{|V_{\text{máx}_j} - V_{\text{mín}_j}|}{2\sqrt{3}} \quad (11)$$

El número de grados de libertad es infinito.

De 2.1 y 2.2,

$$u(c_{p_j}) = \sqrt{u_{\text{cal}}^2(c_{p_j}) + u_{\text{der}}^2(c_{p_j})} \quad (12)$$

3. Desalineamiento entre la regla y el sistema de medida:

Suponiendo un desalineamiento angular máximo $\theta_{\text{máx}}$, se supone que la corrección se distribuye uniformemente entre $+\frac{\theta_{\text{máx}}^2 \times \bar{l}_j}{2}$ y $-\frac{\theta_{\text{máx}}^2 \times \bar{l}_j}{2}$, siendo la incertidumbre típica:

$$u(c_{\text{cos}}) = \frac{\theta_{\text{máx}}^2 \bar{l}_j}{2\sqrt{3}} \quad (13)$$

4. Diferencia de dilatación térmica:

Como vimos anteriormente, el valor de la corrección por dilatación diferencial es

$$c_t = [\alpha \cdot \Delta t + \Delta\alpha(t - 20)]l_j \quad (5)$$

donde $\Delta\alpha = \alpha_p - \alpha$ y $\Delta t = t_p - t$

Al aplicar a (5) la ley de propagación de incertidumbres, obtenemos:

$$u^2(c_t) = \left[\left(\frac{\partial c_t}{\partial \alpha} \right)^2 u^2(\alpha) + \left(\frac{\partial c_t}{\partial \Delta t} \right)^2 u^2(\Delta t) + \left(\frac{\partial c_t}{\partial \Delta\alpha} \right)^2 u^2(\Delta\alpha) + \left(\frac{\partial c_t}{\partial t} \right)^2 u^2(t) \right] \quad (14)$$

Los coeficientes de sensibilidad de c_t respecto a α , $\Delta\alpha$, t e Δt son:

$$\begin{aligned}\frac{\partial c_t}{\partial \alpha} &= \Delta t \cdot l_j \cong 0 & \frac{\partial c_t}{\partial \Delta t} &= \alpha \cdot l_j \\ \frac{\partial c_t}{\partial \Delta \alpha} &= (t - 20) l_j & \frac{\partial c_t}{\partial t} &= \Delta \alpha \cdot l_j \cong 0\end{aligned}$$

de donde,

$$u^2(c_t) = \left[(\alpha \cdot l_j)^2 u^2(\Delta t) + ((t - 20) l_j)^2 u^2(\Delta \alpha) \right] \quad (15)$$

4.1 Contribución debida a la diferencia de temperaturas, $u(\Delta t)$

Como $\Delta t = t_p - t$, si ambas temperaturas se miden con el mismo termómetro (o con distintos termómetros calibrados frente al mismo patrón), existirá una correlación entre t_p y t , por lo que en la incertidumbre de Δt habrá que tener en cuenta la covarianza de t_p y t . No obstante, con ánimo de simplificar, no consideraremos dicha correlación y supondremos que las mediciones de ambas temperaturas son independientes, lo que además nos proporcionará una incertidumbre superior a la que obtendríamos considerando la correlación entre t_p y t .

Así pues, obtendremos

$$u(\Delta t) = \sqrt{2} \cdot u(t) \quad (16)$$

donde $u(t)$ engloba todas las contribuciones de incertidumbre a la temperatura medida (calibración, resolución y deriva del termómetro utilizado); es decir,

$$u(t) = \sqrt{\left(\frac{U}{k}\right)^2 + \left(\frac{res}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{der}{2\sqrt{3}}\right)^2} \quad (17)$$

Teniendo en cuenta el coeficiente de sensibilidad obtenido anteriormente, obtendremos:

$$u_t(c_t) = \alpha \cdot l_j \cdot \sqrt{2} \cdot u(t) \quad (18)$$

Se considera una distribución normal, dado el número de contribuciones que comprende.

4.2 Contribución debida a la diferencia entre los coeficientes de dilatación, $u(\Delta \alpha)$

Independientemente del valor de $\Delta \alpha$, podemos suponer que el valor de $u(\Delta \alpha)$ es

$$u(\Delta \alpha) = \sqrt{2} \cdot u(\alpha) \quad (19)$$

Teniendo en cuenta el valor del coeficiente de sensibilidad,

$$u_{\alpha}(c_t) = (t - 20) \cdot l_j \cdot \sqrt{2} \cdot u(\alpha) \quad (20)$$

donde los valores de $u(\alpha)$ y $(t-20)$ suelen ser, respectivamente, $\pm 1 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ y $1 \text{ }^{\circ}\text{C}$. En este caso, la incertidumbre sería:

$$u_{\alpha}(c_t) = 1,4 \times 10^{-6} \times l_j \quad (21)$$

Se considera una distribución rectangular y asignamos infinitos grados de libertad.

De 4.1 y 4.2 se obtiene:

$$u(c_t) = \sqrt{[u_t(c_t)]^2 + [u_{\alpha}(c_t)]^2} \quad (22)$$

5. Contribución debida al error de enrase, $u(c_{DE})$

Considerando cualquier lectura como la diferencia de indicaciones entre dos enrases sucesivos, podría evaluarse el error de enrase a partir de la resolución "e" de la regla, considerando que el máximo error posible de enrase es $\pm e/2$.

$$u(c_{DE}) = \sqrt{\left(\frac{e}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{e}{2\sqrt{3}}\right)^2} = \frac{e}{\sqrt{6}} \quad (23)$$

El error de enrase podrá evaluarse de forma más real realizando un estudio en cada uno de los enrases, por ejemplo haciendo mediciones sucesivas en un solo trazo y evaluando el error de enrase como el máximo valor obtenido menos el mínimo. Denominando "e" a este valor *max-min*, la fórmula anterior seguirá siendo válida, siendo infinito el número de grados de libertad.

6. Contribución debida a la división de escala del sistema de medida:

Considerando la lectura, según se indica en el punto anterior, como diferencia de indicaciones entre dos enrases sucesivos, teniendo en cuenta la resolución " e_p " de la medidora y considerando que el máximo error posible debido a la resolución de la medida es $\pm e_p/2$.

$$u(c_{PDE}) = \sqrt{\left(\frac{e_p}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{e_p}{2\sqrt{3}}\right)^2} = \frac{e_p}{\sqrt{6}} \quad (24)$$

El número de grados de libertad es infinito.

Esta contribución será muy baja, si la relación entre el error máximo permitido (*EMP*) y la incertidumbre expandida *U* del sistema de medida elegido es la apropiada.

Contribuciones a la incertidumbre

Magnitud de entrada	Incertidumbre	Distribución de probabilidad	Coefficiente de sensibilidad	Contribución a la incertidumbre
Repetibilidad s	$\frac{s_{j\text{máx}}}{\sqrt{n}}$	Normal	1	$\frac{s_{j\text{máx}}}{\sqrt{n}}$
Calibración sistema patrón	$\frac{U_{c_{p_j}}}{k}$	Normal	1	$\frac{U_{c_{p_j}}}{k}$
Deriva del sistema patrón	$\frac{\text{deriva}}{2\sqrt{3}}$	Uniforme	1	$\frac{\text{deriva}}{2\sqrt{3}}$
Desalineamiento c_{cos}	$\frac{\theta_{\text{máx}}^2}{2\sqrt{3}}$	Uniforme	\bar{l}_j	$\frac{\theta_{\text{máx}}^2}{2\sqrt{3}} \bar{l}_j$
Dilatación diferencial				
Diferencia de temperaturas $\Delta t = t_p - t$	$\sqrt{2} \cdot u(t)$	Normal	$\alpha \cdot \bar{l}_j$	$\alpha \cdot l_j \cdot \sqrt{2} \cdot u(t)$
Diferencia entre coeficientes de dilatación $\Delta \alpha = \alpha_p - \alpha$	$\sqrt{2} \cdot u(\alpha)$	Uniforme	$(t - 20) \bar{l}_j$	$(t - 20) \cdot l_j \cdot \sqrt{2} \cdot u(\alpha)$
Div. esc. sistema de medida c_{PDE}	$\frac{e_p}{\sqrt{6}}$	Uniforme	1	$\frac{e_p}{\sqrt{6}}$
error de enrase c_{DE}	$\frac{\text{enrase}}{\sqrt{6}}$	Uniforme	1	$\frac{\text{enrase}}{\sqrt{6}}$
Incertidumbre combinada (u_c)				$u_c = \sqrt{\sum u_i^2(y)}$
Incertidumbre expandida (U)				$U = k \times u_c$

Dado que la evaluación tipo A de la incertidumbre se efectúa con un número de grados de libertad próximo o superior a 10 y que a las evaluaciones tipo B se les puede asignar un número infinito de grados de libertad, puede utilizarse un factor de cobertura $k = 2$, para un nivel de confianza del 95 %. Si las hipótesis anteriores no fueran ciertas, debería utilizarse la expresión del Anexo E de la Guía EA-4/02 [5].

6.2. Interpretación de resultados

Los resultados obtenidos son las correcciones a aplicar en cada punto calibrado para compensar las desviaciones observadas a los valores convencionalmente verdaderos proporcionados por el patrón utilizado (medidora).

$$c_j = \bar{l}_j - l_{0j} + c_{p_j} + c_{\text{cos}} + c_t + c_{\text{DE}} + c_{\text{PDE}}$$

Cada corrección lleva asociada una incertidumbre expandida de calibración U , obtenida como se indica en el apartado 6.1.

En el certificado de calibración, además de dar las correcciones y la incertidumbre expandida, se especificará el valor del factor de cobertura k utilizado, para una probabilidad del 95 %.

7. REFERENCIAS

- [1] Procedimiento para la elaboración de procedimientos de calibración. Grupo de Trabajo MINER-CEM. Ed. 2, Tres Cantos, Madrid. Año 2000.
- [2] Clasificación de Instrumentos de Metrología Dimensional. 1ª ed. Centro Español de Metrología, 2005, NIPO: 165-02-003-4.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Guide EA-4/02 M: 2013, Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration, Sept. 2013, rev. 01.
- [6] 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

Se calibra una regla patrón de trazos, con una escala única formada por 101 trazos equidistantes, de características:

Campo de medida $C = 1 \text{ mm}$
División de escala $e = 0,01 \text{ mm}$

Se utiliza como patrón una máquina medidora de una coordenada horizontal, situada en un laboratorio acondicionado térmicamente a $(20 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$. Las características de la máquina son:

Campo de medida $C = 500 \text{ mm}$
División de escala $e = 0,000 1 \text{ mm}$

La máquina se calibró en un laboratorio que estaba acondicionado a esta temperatura.

Los datos que se dan a continuación se han obtenido del Certificado de calibración:

Nominal p_r mm	Incert Calib* $U(c_{pr}) \mu\text{m}$	Corrección c_{pr} μm
0	2,00	0,5
5	2,00	0,5
10	2,00	1,0
50	2,02	-1,0
100	2,05	1,0
150	2,07	1,5
200	2,10	1,5
250	2,12	1,0
300	2,15	1,5
350	2,17	2,0
400	2,20	2,2
450	2,22	2,0
500	2,25	1,5

* El factor de cobertura dado es $k=2$

La deriva entre calibraciones de la medidora es inferior a $2 \mu\text{m}$.

Se hace la calibración de la regla de trazos en $J = 11$ puntos. En cada punto se hacen $n = 5$ medidas. En la regla se enrasará siempre en el valor nominal del punto que se quiere calibrar y después se leerá el valor obtenido en la máquina medidora (patrón)

En la siguiente tabla se dan los nominales de la regla de trazos y las lecturas obtenidas en la máquina con los cálculos efectuados:

Valor nominal (μm)	Lecturas (μm)					Desv. Media (μm)	Desv. típica (μm)	Temp ($^{\circ}\text{C}$)
0	0,3	0,5	0,7	0,4	0,2	0,42	0,19	20,7
100	100,6	100,8	100,3	100,9	100,2	0,56	0,30	20,5
200	200,4	200,8	200,6	200,7	200,6	0,62	0,15	20,6
300	300,5	300,7	300,9	300,8	300,2	0,62	0,28	20,6
400	400,9	400,8	400,9	400,7	400,9	0,84	0,09	20,5
500	500,7	500,9	500,8	500,9	500,9	0,84	0,09	20,6
600	601,0	601,3	600,9	600,8	600,9	0,98	0,19	20,5
700	702,2	701,8	701,9	701,9	701,9	1,94	0,15	20,5
800	801,9	802,3	802,6	802,7	802,8	2,46	0,36	20,6
900	900,3	901,0	900,8	900,8	900,7	0,72	0,26	20,7
1000	1002,3	1001,9	1001,9	1001,8	1001,9	1,96	0,19	20,7

Estimación de la Incertidumbre

- Repetibilidad: $u(\bar{J}_j) = \frac{0,36}{\sqrt{5}} = 0,16 \mu\text{m}$

- Calibración de la medidora: $u(c_{p_j}) = \frac{2,00}{2} = 1,00 \mu\text{m}$

Se ha tomado el valor de la incertidumbre de la medidora en el rango de 0 a 5 mm ya que el patrón que se está calibrando, de 1 mm de longitud, está incluido en dicho rango

- Deriva del sistema patrón: $u_{\text{der}}(c_{p_j}) = \frac{2}{2\sqrt{3}} = 0,58 \mu\text{m}$

- Desalineamiento:

Se supone un ángulo de desalineamiento de 5', que en radianes sería:

$$5 \times \frac{1}{60} \times \frac{\pi}{180} = 1,45 \times 10^{-3} \text{ rad}$$

de donde

$$u(c_{\text{cos}}) = \frac{\theta^2}{2\sqrt{3}} \bar{l}_j = \frac{(1,45 \times 10^{-3})^2}{2\sqrt{3}} \bar{l}_j = 6,1 \times 10^{-7} \bar{l}_j \mu\text{m}$$

- Dilatación diferencial:

* Variación de α :

Como la diferencia de valores de temperatura en la calibración es pequeña, varía entre 20,5 °C y 20,7 °C, para simplificar los cálculos se toma el más desfavorable, es decir 20,7 °C:

$$u_{\alpha}(c_j) = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 1 \times 10^{-6} \times (t - 20) l_j = 0,577 \times 0,7 l_j = 0,399 l_j \cong 0,4 \times 10^{-6} l_j$$

* Variación de temperatura:

$$u_{\text{ct}}(c_j) = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 11,5 \times 10^{-6} \times l_j = 0,577 \times 11,5 \times 10^{-6} l_j = 6,63 \times 10^{-6} l_j$$

- Error de enrase:

Debido a la amplificación del sistema de medida se puede considerar que el error de enrase es de una tercera parte de la división de escala del patrón a trazos que se está calibrando. En este caso,

$$u(c_{\text{DE}}) = \frac{10/3}{\sqrt{6}} = 1,36 \mu\text{m}$$

- División de escala del sistema de medida: $u(c_{\text{PDE}}) = \frac{0,1}{\sqrt{6}} = 0,040 \mu\text{m}$

La incertidumbre combinada es:

$$u_c(c_j) = \sqrt{0,16^2 + 1,00^2 + 0,58^2 + (0,6 \times 10^{-6} \bar{l}_j)^2 + (0,4 \times 10^{-6} \bar{l}_j)^2 + (6,63 \times 10^{-6} \bar{l}_j)^2 + 1,36^2 + 0,040^2} \mu\text{m}$$

$$u_c(c_j) = \sqrt{3,21 + 44,48 \times 10^{-12} \bar{l}_j^2} \mu\text{m}$$

El segundo miembro del radical en este caso tiene un valor tan pequeño comparado con el primero que se considera despreciable. Por tal motivo se toma como valor de la incertidumbre combinada:

$$u_c = 1,79 \mu\text{m}$$

Y el valor de la Incertidumbre expandida será:

$$U = k \times u_c = 2 \times 1,79 = 3,58 \mu\text{m}$$

Resultados

El campo de medida máximo del patrón es de 1 mm, es decir, se encuentra entre 0 y 5 mm, dentro del rango de la medidora, por lo que se aplica una corrección de 0,5 μm en todos los puntos.

Nominal (μm)	\bar{l}_j	Resultado corregido ($C_{pj} = 0,5 \mu\text{m}$)	Incertidumbre (μm)
0	0,4	0,9	3,6
100	0,6	1,1	3,6
200	0,6	1,1	3,6
300	0,6	1,1	3,6
400	0,8	1,3	3,6
500	0,8	1,3	3,6
600	1,0	1,5	3,6
700	1,9	2,4	3,6
800	2,5	3,0	3,6
900	0,7	1,2	3,6
1000	2,0	2,5	3,6

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

Metrología

NIPO: 113-19-006-0