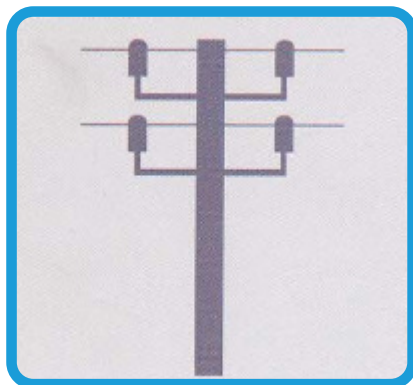
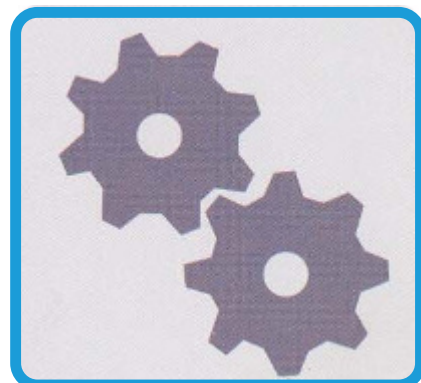
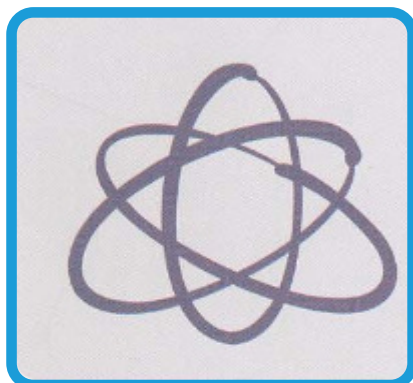
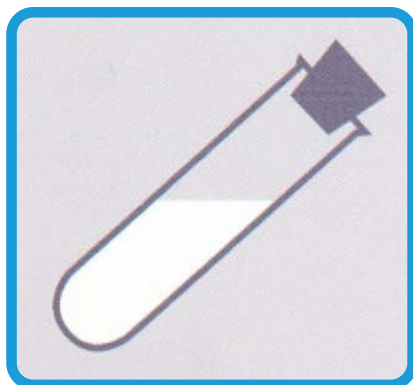
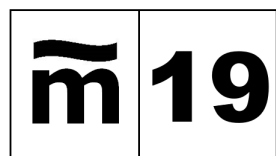


Metrología



PROCEDIMIENTO DI-026 PARA LA
CALIBRACIÓN DE MESAS GIRATORIAS



PROCEDIMIENTO DI-026

CALIBRACIÓN DE MESAS GIRATORIAS

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
5. DESCRIPCIÓN	8
5.1. Equipos y materiales	8
5.2. Operaciones previas.....	9
5.3. Proceso de calibración.....	12
5.4. Toma y tratamiento de datos.....	13
6. RESULTADOS.....	14
6.1. Cálculo de incertidumbres.....	14
6.2. Interpretación de resultados	21
7. REFERENCIAS.....	22
8. ANEXO	22
8.1. Ejemplo numérico	22

1. OBJETO

El presente documento tiene por objeto describir un posible método para realizar la calibración de "mesas giratorias" denominadas "platos divisores" en la Clasificación de Instrumentos de Metrología Dimensional (ref. [4]) y codificadas como D.05.02 en dicha referencia.

2. ALCANCE

Este documento es de aplicación a aquellas mesas giratorias cuyo rango de indicación incluya el intervalo 0 a 360 grados sexagesimales (2π rad) y cuya división de escala sea igual o superior a 1 segundo sexagesimal ($5 \mu\text{rad}$).

El procedimiento descrito en este documento se refiere exclusivamente a la calibración del sistema de medición de giro de dichas mesas, excluyéndose aquellas otras operaciones destinadas a verificar la calidad de dicho giro (véase apartado 4).

3. DEFINICIONES

Las definiciones que a continuación se presentan han sido extraídas del Vocabulario Internacional de Metrología (ref. [1]) salvo aquellas correspondientes a instrumentos de medida que se corresponden con las recomendadas en las correspondientes normas UNE o ISO.

Calibración [1] (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.

Incertidumbre de medida [1] (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 una semiapertura 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.

Polígono Patrón

Prisma recto de gran calidad geométrica tal que el ángulo formado por cada pareja de caras planas constituye un patrón angular muy preciso, de valor nominal $360/N$, siendo N el número de caras, habitualmente entre 4 y 36. Se fabrican en metal o en vidrio, con sus caras lo suficientemente reflectantes como para poder efectuar medidas ópticas sobre ellas. En algunos casos, para protegerlas todo lo posible, van situadas dentro de una carcasa metálica, con ventanas frente a cada cara patrón.

Su calibración se efectúa con ayuda de autocolimadores y mesas giratorias, con base en el método de cierre, por el cual la suma de todos sus ángulos debe ser igual a 360° y la suma de los errores acumulados tras un giro, debe ser nula.

Autocolimador

Instrumento óptico para la medida diferencial de pequeños ángulos o desplazamientos angulares, basado en las propiedades de la reflexión, que emite un haz colimado de luz y lo recoge tras reflejarse en la superficie reflectante de un patrón angular o un espejo, deduciendo el giro angular realizado por dicha superficie.

Tienen gran aplicación en la calibración de polígonos ópticos, bloques patrón angulares y mesas giratorias. Con rangos desde $\pm 20''$ hasta $\pm 300''$, poseen resoluciones típicas de $0,01''$ y $0,1''$. Algunos modelos de alta precisión, alcanzan resoluciones de $0,005''$.

Mesa giratoria

Dispositivo empleado para el posicionamiento y medición de ángulos. Habitualmente dotada de ranuras y taladros en su superficie, para la sujeción de piezas y patrones angulares, porta internamente una regla a trazos circular, junto a algún sistema apropiado de amplificación y lectura, normalmente de tipo óptico, que informa de su posición angular.

Pueden ser de eje vertical u horizontal, o bien orientables, formando habitualmente parte de la dotación de las máquinas de medición por coordenadas. Su campo habitual cubre los 360° , con resoluciones de minutos y segundos. Algunos modelos pueden alcanzar resoluciones de $0,5''$, $0,1''$ e incluso inferiores.

Resolución de un dispositivo (visualizador o indicador) [1] (4.15)

Mínima diferencia entre indicaciones, que puede percibirse de forma significativa

Repetibilidad [1] (adaptado de 2.15 y 2.21)

Precisión de medida (proximidad entre las indicaciones o los valores medidos obtenidos en mediciones repetidas de un mismo objeto, o de objetos similares), bajo condiciones de repetibilidad.

NOTAS

1. Las condiciones de repetibilidad comprenden:
 - El mismo procedimiento de medida.
 - El mismo observador.
 - El mismo instrumento de medida, utilizado bajo las mismas condiciones.
 - El mismo lugar.
 - Repetición durante un corto periodo de tiempo.
2. Es habitual expresar numéricamente la repetibilidad mediante medidas de dispersión tales como la desviación típica, la varianza o el coeficiente de variación bajo las condiciones especificadas.

Intervalo de indicaciones [1] (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".

4. GENERALIDADES

Las mesas giratorias están construidas alrededor de un husillo de precisión cuya función es generar un movimiento de la mesa que resulte ser casi un giro perfecto alrededor de un eje fijo. En general, el eje de giro suele ser vertical. El giro es medido mediante alguno de los siguientes dispositivos:

- Un círculo grabado (limbo) acompañado de un sistema óptico de lectura.
- Un sistema mecánico de lectura (nonius).
- Un transductor electrónico analógico o digital acompañado de su correspondiente unidad de lectura.

El accionamiento de la mesa puede ser tanto manual, como motorizado. En el caso de mesas motorizadas, pueden incluso ser controladas numéricamente.

Las mesas giratorias pueden ser instrumentos autónomos, en cuyo caso para su utilización suelen apoyarse sobre superficies suficientemente estables como puede ser una mesa de planitud. Pero también pueden aparecer integradas en instrumentos complejos como pueden ser máquinas medidoras por coordenadas, medidoras de formas, medidoras de engranajes, rugosímetros, etc...

La calidad metrológica de una mesa giratoria viene determinada fundamentalmente por los dos siguientes aspectos:

- La precisión con la que es capaz de medir o generar un determinado giro.
- La calidad del giro generado por el husillo.

Teóricamente, la mesa debería girar alrededor de un eje fijo y el ángulo girado coincidir con la indicación proporcionada por el medidor del giro. En la práctica se observa que el husillo genera un movimiento de la mesa en el que el eje de giro oscila y se desplaza ligeramente respecto de ese eje fijo teórico. Asimismo, las indicaciones proporcionadas por el medidor del giro también poseen ligeras desviaciones respecto de los ángulos realmente girados por la mesa.

Una verificación completa de una mesa giratoria puede involucrar un gran número de ensayos, entre los cuales los más importantes son los destinados a garantizar la calidad del giro alrededor de ese eje teórico que el husillo intenta materializar. Sin embargo, este procedimiento de calibración, por razones de simplicidad y de extensión, se limitará al control metrológico del subsistema destinado a medir el giro de la mesa.

Así pues, la calibración descrita en este procedimiento permite garantizar la trazabilidad de las lecturas proporcionadas por dicho subsistema pero no garantiza, por sí solo, la calidad del giro de la mesa. Dependiendo del uso a que se destine la mesa giratoria, la influencia de la calidad del giro en las medidas con ella realizadas puede ser irrelevante (medidas o generación de desplazamientos angulares) o por el contrario crítica (medidoras de formas).

Por ello, dependiendo del tipo de aplicación metrológica a la que se dedique la mesa será necesario o no complementar este procedimiento con otros ensayos o verificaciones que permitan garantizar la calidad del giro.

El procedimiento de calibración que a continuación se describe está basado en la utilización de un polígono patrón (codificado como D.04.01 en la referencia [4]) como elemento de referencia.

Como se dijo anteriormente, un polígono patrón es un prisma cuya sección recta es un polígono regular de N lados (Figura 1). Por tanto, el ángulo que forman dos caras laterales y contiguas del prisma es, muy aproximadamente, $\beta = 360^\circ/N$ ($2\pi/N$ rad). Asimismo, el ángulo γ_{ij} que forman las normales a las caras i y j del prisma será, muy aproximadamente, $\gamma_{ij} \cong |i - j| \cdot \beta$. Adicionalmente, los polígonos patrón se fabrican de forma que las dos bases del prisma posean un defecto de perpendicularidad bajo respecto al eje del prisma.

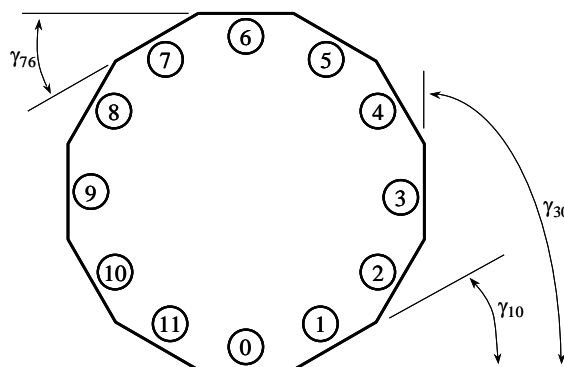


Figura 1. Polígono patrón

Las mesas giratorias, por sí solas, son únicamente dispositivos generadores de desplazamientos angulares. Por tanto, para poder realizar medidas de ángulos materiales, como los que materializa un polígono patrón, será necesario utilizar algún dispositivo adicional que permita observar la alineación

de las caras del polígono respecto de un cierto plano de referencia. En lo que sigue se supondrá que dicho dispositivo es un autocolimador (codificado como D.05.05 en la referencia [4]).

El autocolimador es un instrumento óptico que permite medir los pequeños ángulos de desalineación que puedan existir entre la normal a una superficie óptica reflectante (las caras laterales del polígono patrón) y el eje óptico del autocolimador.

El principio básico del procedimiento de calibración que a continuación se describe es la medida con la mesa giratoria (y con ayuda del autocolimador) de los ángulos γ_{i0} del polígono patrón. El ángulo γ_{i0} es el que forma la cara i -ésima de dicho polígono con la cara 0, origen del mismo. Para ello, el polígono se coloca sobre la mesa giratoria de forma que el eje de éste coincida prácticamente con el eje de giro de la mesa.

En la tabla 1 se incluye una relación con los símbolos y nomenclatura utilizados en la descripción del procedimiento de calibración.

Tabla 1. Nomenclatura utilizada

Símbolo	Descripción
N	Número de caras del polígono patrón
$\beta = 360^\circ / N$	Ángulo nominal entre dos caras consecutivas del polígono
$\gamma_{ij} \cong i - j \cdot \beta$	Ángulo certificado entre la cara i -ésima y la cara j -ésima del polígono
$\gamma_{i0} \cong i \cdot \beta$	Ángulo certificado entre la cara i -ésima y la cara origen (cara nº 0) del polígono correspondiente a la última calibración de dicho polígono
$\gamma_{i0}^{(k)} \cong i \cdot \beta$	Ángulo certificado entre la cara i -ésima y la cara origen (cara nº 0) del polígono correspondiente a la k -ésima calibración del histórico de dicho polígono
K	Número de calibraciones recogidas en el histórico del polígono patrón
n^+	Número de series de medidas en sentido creciente
n^-	Número de series de medidas en sentido decreciente
$n = n^+ + n^-$	Número total de series de medidas
α_{ij}	Lectura de la mesa giratoria correspondiente a la serie j en el punto de calibración i
θ_{ij}	Lectura del autocolimador correspondiente a la serie j en el punto de calibración i
$\varepsilon_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\alpha_{ij} - \theta_{ij})$	Valor medio, correspondiente al punto de calibración i , de las lecturas α_{ij} de la mesa ya corregidas utilizando las lecturas θ_{ij} del autocolimador
c_i	Corrección de calibración de la mesa giratoria en el punto de calibración i
s_{Ri}	Repetibilidad de la mesa giratoria en el punto de calibración i
s_R	Estimación global de la repetibilidad de la mesa giratoria
E_α, E_θ	Divisiones de escala o resoluciones, respectivamente, de la mesa giratoria y del autocolimador.
$\pm (a + b \cdot \theta)$	Especificación del autocolimador (máximo error permitido)

Símbolo	Descripción
$\theta_{MÁX}$	Máximo valor absoluto de las lecturas proporcionadas por el autocolimador durante la calibración de la mesa giratoria
$a + b \cdot \theta $ $A + B \cdot \theta $ $C + D \cdot \theta $	Especificaciones del autocolimador: ecuaciones que representan los valores máximos permitidos para las correcciones de calibración, para las incertidumbres de calibración y para las derivas, respectivamente
$u(\gamma_{i0})$	Incertidumbre típica de calibración correspondiente al valor certificado de la cara i -ésima del polígono patrón
$u(\delta\gamma_{DER})$	Componente de la incertidumbre asociada a la deriva del polígono patrón
$u(\delta\alpha_E)$, $u(\delta\theta_E)$	Componentes de la incertidumbre asociadas a la división de escala o resolución de la mesa giratoria y del autocolimador, respectivamente
$u(\delta\theta_C)$	Componente de la incertidumbre asociada a la calibración del autocolimador
$u(\delta\theta_{NC})$	Componente de la incertidumbre asociada a la no aplicación de las correcciones de calibración del autocolimador

5. DESCRIPCIÓN

5.1. Equipos y materiales

Para la calibración de una mesa giratoria, utilizando como patrón de referencia un polígono patrón, se recomienda la utilización de los siguientes elementos:

- 5.1.1. Un polígono patrón (código D.04.1, [4]) con al menos $N=12$ caras. El número N de caras deberá ser par y preferiblemente múltiplo de cuatro. Se supondrá que las caras están numeradas de 0 a $N-1$. En caso contrario pueden identificarse fácilmente colocando etiquetas adhesivas en la base superior del polígono.

Es deseable, aunque no siempre será posible, que la incertidumbre de calibración del polígono sea igual o inferior a la división de escala o resolución de la mesa giratoria.

- 5.1.2. Un autocolimador (código D.05.05, [4]). Igualmente es deseable que la incertidumbre de uso del autocolimador sea igual o inferior a la división de la mesa giratoria.
- 5.1.3. Una mesa o soporte orientable sobre el que fijar el autocolimador (solamente si el autocolimador carece de un dispositivo equivalente que permita ajustar la orientación de su eje óptico).
- 5.1.4. Una bancada o superficie de trabajo sobre la cual puedan colocarse tanto la mesa giratoria como el autocolimador. Puede utilizarse una mesa de planitud (código D.06.05, [4]).
- 5.1.5. Opcionalmente, puede utilizarse una mesa nivelante que sirva de fijación entre el polígono patrón y la superficie de la mesa giratoria y cuyo fin es facilitar la labor de centrado del eje del polígono patrón frente al eje de giro de la mesa giratoria. Es siempre conveniente que dicha mesa disponga de cuatro grados de libertad: dos giros y dos traslaciones. Actuando primero sobre los giros se puede controlar el paralelismo entre el eje del polígono y el eje de giro. Actuando después sobre las traslaciones se puede hacer coincidir ambos ejes.

- 5.1.6. Material de fijación mecánica o magnética diverso (tornillos, mordazas, soportes magnéticos, etc...) para asegurar la ausencia de movimientos indeseables entre los diversos elementos utilizados (superficie de trabajo, mesa giratoria, mesa nivelante, polígono, soporte orientable, autocolimador).
- 5.1.7. Un termómetro para medir la temperatura ambiente, con incertidumbre igual o inferior a 0,5 °C.
- 5.1.8. Un dispositivo capaz de medir la humedad relativa del aire con incertidumbre igual o inferior a un 10 %.
- 5.1.9. Elementos auxiliares de limpieza. Se pondrá especial cuidado en utilizar líquidos que no contengan agua (las superficies de acero con acabado superficial de gran calidad suelen presentar una resistencia muy baja a la oxidación) y de fácil evaporación o eliminación. Como ejemplo de líquido limpiador que cumple las condiciones anteriores puede mencionarse una mezcla al 50 % de éter y alcohol. Los paños, gamuzas o papeles absorbentes utilizados no deberán rayar las superficies a limpiar (algunas de ellas con acabado especular como las caras laterales del polígono patrón) ni generar residuos (pequeños hilos sueltos, bolitas, pequeños pedazos de papel, etc...).
- 5.1.10. Elementos auxiliares para la manipulación de los elementos que intervienen durante la calibración como pudieran ser guantes o pinzas que minimicen la transmisión de calor desde las manos del operador a estos elementos y el depósito de sudor sobre sus superficies.
- 5.1.11. Un comparador mecánico (codificado D.03.01, [4]), junto con su soporte (codificado D.03.05, [4]), que se utilizará en el alineamiento del eje del polígono patrón respecto del eje de giro de la mesa.

5.2. Operaciones previas

- 5.2.1. Antes de proceder a la calibración de una mesa giratoria, se comprobará que es perfectamente identificable a través de su MARCA, MODELO y NÚMERO DE SERIE, los cuales deben aparecer marcados sobre el instrumento de forma permanente. Si no fuera así, se le asignará a la mesa un código de identificación único que se adherirá, fijará o grabará de forma permanente sobre ella. Dicho identificador único puede ser, por ejemplo, el número de inventario que el propio usuario le hubiera asignado.
- 5.2.2. La calibración se realizará en un recinto que disponga de un sistema de control de la temperatura ambiente que permita garantizar que ésta se encuentra en el intervalo $20\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$. Aun cuando la temperatura no es un factor crítico en la medición de magnitudes angulares (los elementos mecánicos al dilatarse sufren variaciones en sus dimensiones pero no en su forma ni en sus ángulos, siempre que las hipótesis de dilatación homogénea e isotrópica sean admisibles) es siempre conveniente que su margen de oscilación se encuentre acotado, básicamente por su posible influencia en los componentes eléctricos o electrónicos presentes en la instrumentación utilizada.
- 5.2.3. Asimismo, deberá poder garantizarse que en el recinto donde vaya a realizarse la calibración la humedad relativa del aire se encuentre siempre por debajo del 65 %. En caso contrario, existe riesgo real de que se produzca oxidación en las superficies más sensibles de la instrumentación utilizada.

En caso de que la mesa giratoria no estuviera situada de forma permanente en la sala donde se realice la calibración, deberá permanecer en dicha sala un mínimo de 24 horas, con el fin de atemperarse, antes de continuar con el resto de las operaciones.

- 5.2.4. Se realizará una limpieza de la mesa giratoria, seguida de inspección visual del instrumento, comprobando la posible presencia de arañazos, golpes u otros daños que pudieran afectar al correcto funcionamiento del instrumento.
- 5.2.5. Se comprobará que al girar, bien manualmente o bien utilizando el accionamiento automático si lo poseyera, no se detectan ruidos que pudieran indicar la presencia de problemas, ya sea en el accionamiento o en los cojinetes del husillo de la mesa. Es conveniente realizar esta comprobación al menos sobre un giro completo de la mesa.
- 5.2.6. Si las inspecciones descritas en los apartados 5.2.4 y 5.2.5 hicieran sospechar que el funcionamiento del instrumento no fuera el correcto se procederá a realizar una reparación o ajuste del mismo, bien por el propio usuario o por un experto. No deberá continuarse la calibración mientras el resultado de las inspecciones anteriormente citadas no sea satisfactorio.

Si el equipo aún pudiera medir y se hubiera utilizado anteriormente en medidas de cierta responsabilidad, se debiera realizar una pseudo-calibración en algunos puntos de su escala con el fin de conocer su estado. Posteriormente se procedería a su reparación y posterior calibración de acuerdo con el procedimiento descrito en este documento.

- 5.2.7. Se fijará la mesa giratoria a la superficie de trabajo. Si el peso de ésta fuera elevado puede no ser necesario recurrir a elementos de fijación mecánica o magnética, puesto que el rozamiento con la superficie de trabajo puede ser suficiente para mantenerla en una posición fija.
- 5.2.8. A continuación se procederá a situar la mesa nivelante sobre la superficie de la mesa giratoria, utilizando, si fuera necesario, elementos de fijación mecánica (tornillos, bridas) o magnética.
- 5.2.9. Se colocará el polígono patrón sobre la mesa nivelante, fijándolo adecuadamente a ésta. Se orientará el polígono de forma que la cara 0 (origen) sea perpendicular a uno de los ejes de traslación de la mesa nivelante. Al eje de traslación de la mesa nivelante perpendicular a la cara 0 se le denominará eje X y al segundo eje de traslación de la mesa nivelante (paralelo a la cara 0 del polígono) se le denominará eje Y.
- 5.2.10. Haciendo girar la mesa giratoria y ayudándose con, al menos, un comparador mecánico, se observará tanto el desalineamiento del eje del polígono respecto del eje de giro como su posible descentramiento (ver figuras 2 y 3).
- 5.2.11. El descentramiento de ambos ejes se corregirá actuando sobre las dos traslaciones que la mesa nivelante es capaz de generar. El desalineamiento se minimizará actuando sobre los giros que la mesa nivelante genera. Para ello se realizarán las siguientes operaciones:
 - a) Colocando el comparador en posición vertical (figura 2), se palpará sobre la cara superior del polígono mientras se hace rotar la mesa giratoria. Si se observan variaciones en las lecturas del comparador, se deberá actuar sobre los giros de la mesa nivelante para corregirlo. El proceso se repetirá iterativamente hasta lograr que el alabeo detectado por el comparador sea inferior a 0,5 mm.

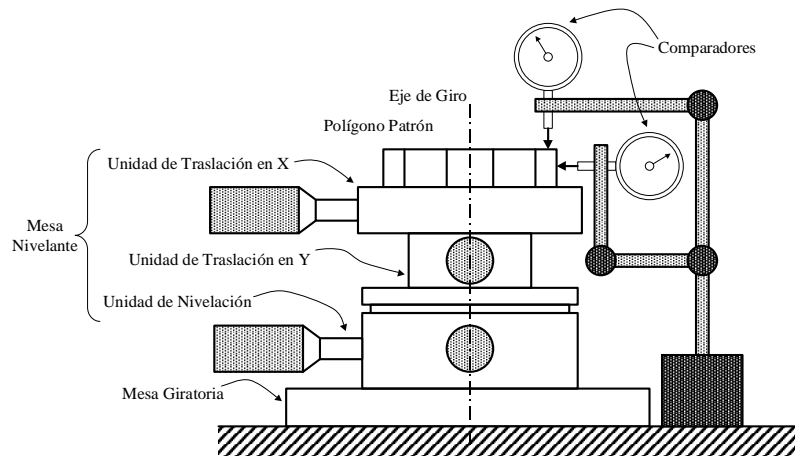


Figura 2. Alineamiento del eje del polígono

- b) Se colocará el comparador en posición horizontal y perpendicular a la cara 0 del polígono (y por tanto, paralelo al eje X de la mesa nivelante, ver figura 3). Se separará el palpador del comparador de la cara del patrón y se hará rotar la mesa giratoria 180°. Si se observa variación en la lectura del comparador se desplazará ligeramente la mesa nivelante a lo largo del eje X hasta conseguir que la variación en las lecturas del comparador al rotar la mesa giratoria 180° no difieran entre sí más de 1 mm.

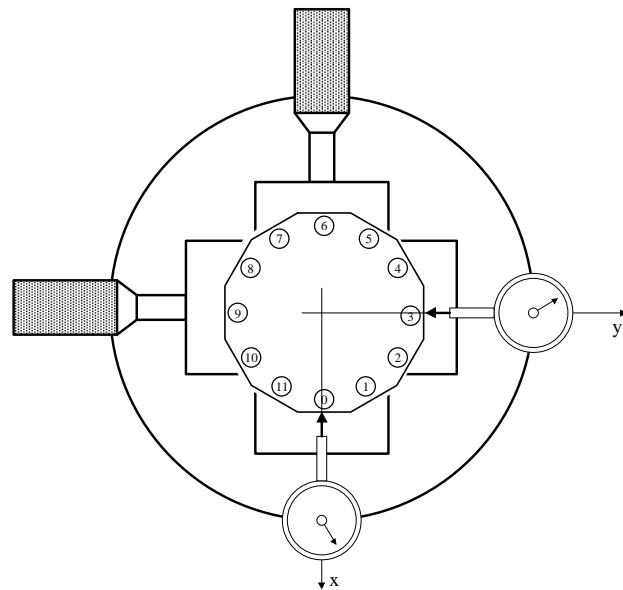


Figura 3. Centrado del polígono patrón

- c) Se colocará el comparador en posición horizontal y perpendicular a una cara que forme un ángulo de $\pm 90^\circ$ respecto a la cara nº 0 del polígono (y por tanto, paralelo al eje Y de la mesa nivelante). Se separará el palpador del comparador de la cara del patrón y se hará rotar la mesa giratoria 180°. Si se observa variación en la lectura del comparador se desplazará ligeramente la mesa nivelante a lo largo del eje Y hasta conseguir que las lecturas del comparador al rotar la mesa giratoria 180° no difieran entre sí más de 1 mm.

5.2.12. Se llevará la mesa giratoria a la posición correspondiente al cero de su escala.

- 5.2.13. Se colocará el autocolimador sobre el soporte orientable fijándose éste último a la superficie de trabajo de forma que el eje óptico del autocolimador sea aproximadamente perpendicular a la cara nº 0 del polígono patrón cuando la mesa giratoria se encuentra en la posición correspondiente al cero de su escala.
- 5.2.14. Se actuará sobre el soporte orientable hasta conseguir que el eje óptico del autocolimador coincida prácticamente con la perpendicular a la cara nº 0 del polígono.
- 5.2.15. Se dejará estabilizar el conjunto durante al menos 1 hora antes de comenzar la calibración. Durante este periodo de tiempo, toda la instrumentación de carácter eléctrico o electrónico deberá permanecer conectada con el fin de que alcance su temperatura normal de funcionamiento.

5.3. Proceso de calibración

- 5.3.1. La calibración se realizará en $N-1$ puntos de la escala del instrumento cuyos valores nominales son $i \cdot \beta$, donde N es el número total de caras del polígono patrón, i es el índice correspondiente al punto de calibración y β el ángulo nominal entre dos caras consecutivas del polígono patrón.
- 5.3.2. Se realizarán $n^+ \geq 2$ series de medida en sentido creciente y $n^- \geq 2$ series en sentido decreciente hasta totalizar un número total de $n = n^+ + n^-$ de series. Cada serie incluirá una medida en cada punto de calibración hasta completar un número total de medidas $n \cdot (N - 1)$.
- 5.3.3. En algunas mesas giratorias, sobre todo aquellas de pequeña división de escala y/o sometidas a una utilización intensiva, puede resultar aconsejable realizar controles entre calibraciones. Un posible control entre calibraciones podría ser una versión simplificada del proceso de calibración descrito en este documento donde el número de series de medida se limitaría a una serie única y el número de puntos de calibración podría ser reducido (del orden de cuatro puntos).

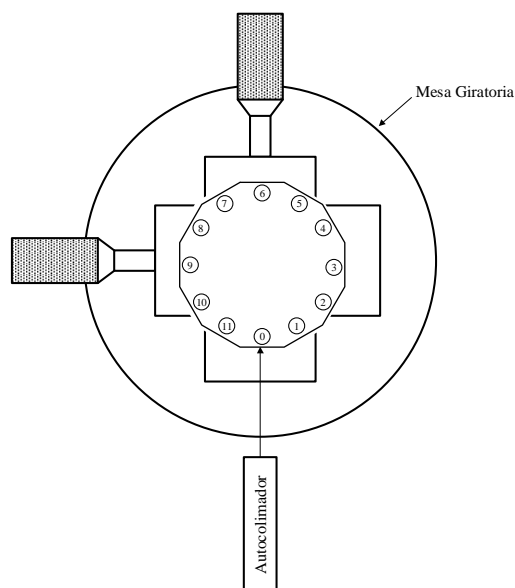


Figura 4a. Disposición de los equipos durante la calibración (vista superior)

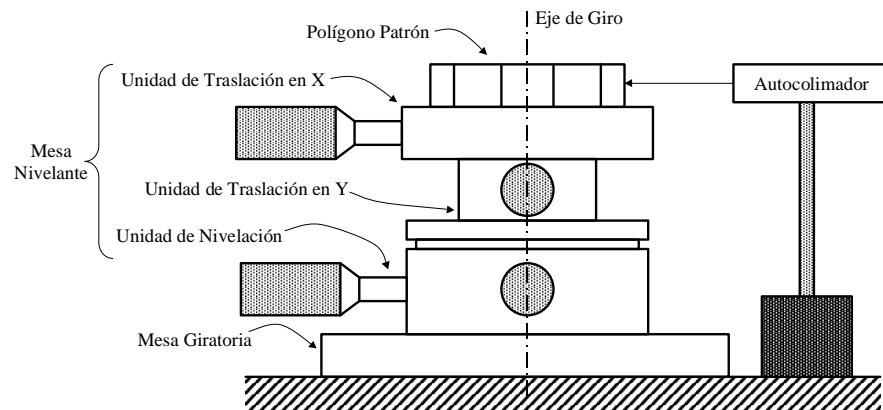


Figura 4b. Disposición de los equipos durante la calibración (vista lateral)

5.4. Toma y tratamiento de datos

- 5.4.1. Antes de comenzar una serie de medidas, tanto creciente como decreciente, se situará la cara nº 0 del polígono perpendicularmente al autocolimador, poniéndose simultáneamente a cero las unidades de lectura tanto de la mesa como del autocolimador.
- 5.4.2. Se comprobará que el signo de la escala del autocolimador coincide con el signo de la escala de la mesa giratoria. Para ello, se girará ligeramente la mesa giratoria en sentido positivo y se comprobará que las lecturas del autocolimador crecen también en sentido positivo. En caso contrario, se invertirá el signo del autocolimador.
- 5.4.3. En el caso de una serie de medidas creciente y siempre después de haber puesto a cero simultáneamente mesa giratoria y autocolimador en la cara nº 0 (ver apartado 5.4.1), la mesa giratoria se irá girando incrementos iguales $+\beta$ en sentido positivo de forma que el eje del autocolimador se sitúe de forma muy aproximada perpendicularmente a las caras 1, 2, 3, etc. hasta alcanzar la cara N-1. Para cada cara se anotarán las lecturas α_{ij} de la mesa giratoria y θ_{ij} del autocolimador. El índice i hace referencia al punto de calibración (o cara del polígono) y el índice j a la serie de medidas.
- 5.4.4. En el caso de una serie de medidas decreciente y siempre después de haber puesto a cero simultáneamente mesa giratoria y autocolimador en la cara nº 0 (ver apartado 5.4.1), la mesa giratoria se irá girando incrementos iguales $-\beta$ en sentido negativo de forma que el eje del autocolimador se sitúe de forma muy aproximada perpendicularmente a las caras N-1, N-2, N-3, etc. hasta alcanzar la cara nº 0. Para cada cara se anotarán las lecturas α_{ij} de la mesa giratoria y θ_{ij} del autocolimador. El índice i hace referencia al punto de calibración (o cara del polígono) y el índice j a la serie de medidas.
- 5.4.5. A continuación se determinarán los siguientes parámetros:

$$c_{ij} = \gamma_{i0} - (\alpha_{ij} - \theta_{ij})$$

$$c_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n c_{ij}$$

CORRECCIONES DE CALIBRACIÓN

$$s_{Ri} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - c_i)^2}{n-1}}$$

$$s_R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N-1} s_{Ri}^2}{N-1}} \quad \text{REPETIBILIDAD GLOBAL}$$

Las mesas giratorias suelen tener un comportamiento, en lo que respecta a su repetibilidad, muy uniforme. Es decir, dicha repetibilidad es aproximadamente la misma en todos los puntos de su escala y se aceptará que podría ser estimada a través de un único parámetro. Por esta razón, es conveniente utilizar como mejor estimador de la repetibilidad el valor medio cuadrático s_R de los diferentes valores s_{Ri} .

No se redondearán los resultados intermedios (como por ejemplo c_{ij} y s_{Ri}) salvo para su presentación en las hojas de recogida de datos, pudiéndose, en este caso, presentarse con al menos una cifra significativa más que la división de escala o resolución de la mesa giratoria.

Los resultados finales c_i se redondearán a la división de escala o resolución de la mesa giratoria o, a lo sumo, a una cifra significativa más que dicha división de escala.

6. RESULTADOS

6.1. Cálculo de Incertidumbres

La estimación y expresión de las incertidumbres de los resultados de la calibración (correcciones de calibración c_i) se realizará siguiendo los criterios de la guías ISO-GUM Y EA-4/02 (referencias [2] y [3]).

Se considera la siguiente función modelo para las correcciones de calibración:

$$c_i = (\gamma_{i0} + \delta\gamma_{\text{DER}}) - \left[\left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} + \delta\alpha_{\text{E}} \right) - \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \theta_{ij} + \delta\theta_{\text{E}} + \delta\theta_{\text{CAL}} + \delta\theta_{\text{DER}} \right) \right]$$

Haciendo la sustitución $\sum_{j=1}^n (\alpha_{ij} - \theta_{ij}) / n = \varepsilon_i$ se tiene:

$$c_i = \gamma_{i0} + \delta\gamma_{\text{DER}} - \varepsilon_i - \delta\alpha_{\text{E}} + \delta\theta_{\text{E}} + \delta\theta_{\text{CAL}} + \delta\theta_{\text{DER}}$$

En la expresión anterior, la corrección es la diferencia entre el valor del polígono patrón (γ_{i0}) y el valor medio de la serie de lecturas obtenidas con el autocolimador (ε_i) en cada punto. Además se consideran determinadas correcciones de valor medio nulo, pero que contribuirán a la incertidumbre de la corrección, como son:

- $\delta\gamma_{\text{DER}}$ Corrección por deriva del polígono patrón.
- $\delta\alpha_{\text{E}}$ Corrección por división de escala (resolución) de la mesa giratoria

- $\delta\theta_E$ Corrección por división de escala (resolución) del autocolimador
- $\delta\theta_{CAL}$ Corrección por calibración del autocolimador
- $\delta\theta_{DER}$ Corrección por deriva del autocolimador

No se tiene en cuenta el efecto de la temperatura, puesto que en las escalas angulares dicho efecto se reduce a un posible incremento en el valor de la repetibilidad, no apareciendo efectos ligados a la dilatación de las escalas como sí ocurre en las escalas lineales.

La aplicación de la Ley de Propagación de las Incertidumbres a la expresión de c_i permite escribir la incertidumbre típica de esta última en función de las incertidumbres asociadas a cada una de las fuentes indicadas anteriormente:

$$u^2(c_i) = u^2(\gamma_{i0}) + u^2(\delta\gamma_{DER}) + u^2(\varepsilon_i) + u^2(\delta\alpha_E) + u^2(\delta\theta_E) + u^2(\delta\theta_{CAL}) + u^2(\delta\theta_{DER})$$

A continuación se describe cómo puede estimarse cada una de las contribuciones a la incertidumbre:

- Incertidumbre asociada a la calibración del polígono patrón, $u(\gamma_{i0})$.

Recuérdese que γ_{i0} es el valor certificado del ángulo que forma la cara i del polígono patrón con la cara 0. El valor de $u(\gamma_{i0})$ se obtendrá dividiendo el valor de la incertidumbre expandida $U(\gamma_{i0})$ asociada a γ_{i0} por el correspondiente factor de cobertura k . Todos estos valores deberán aparecer en el certificado de calibración del polígono.

$$u(\gamma_{i0}) = \frac{U(\gamma_{i0})}{k}$$

Dado que las incertidumbres $U(\gamma_{i0})$ no suelen variar mucho de una cara del patrón a otra, y con el fin de simplificar al máximo el cálculo, se tomará como incertidumbre $u(\gamma_{i0})$ la mayor de todas:

$$u(\gamma_{i0}) = u_0 = \max_i \left\{ \frac{U(\gamma_{i0})}{k} \right\}$$

Salvo mención expresa en sentido contrario en el certificado de calibración del polígono patrón, se supondrá que los grados de libertad $\nu[u(\gamma_{i0})]$ son infinitos y que γ_{i0} se distribuye normalmente.

- Incertidumbre asociada a la deriva del polígono patrón, $u(\delta\gamma_{DER})$

$\delta\gamma_{DER}$ representa la corrección que habría que introducir para compensar dicha deriva. En la práctica siempre se introducirá una corrección nula. La incertidumbre $u(\delta\gamma_{DER})$ asociada a esta corrección se puede estimar a partir del registro histórico de calibraciones del polígono patrón.

Sea $\gamma_{i0}^{(k)}$ el valor certificado para el ángulo que forma la cara i -ésima con la cara nº 0 correspondiente a la k -ésima calibración del histórico. La diferencia para dicho ángulo, en valor absoluto, entre las calibraciones k -ésima y $(k-1)$ -ésima es $\Delta\gamma_{i0}^{(k)} = \left| \gamma_{i0}^{(k)} - \gamma_{i0}^{(k-1)} \right|$. A partir de todas las diferencias $\Delta\gamma_{i0}^{(k)}$ correspondientes a todos los ángulos $\gamma_{i0}^{(k)}$ ($i = 1, 2, \dots, N-1$) y todas las calibraciones $k = 1, 2, \dots, K$ registradas en el histórico, puede determinarse la incertidumbre $u(\delta\gamma_{\text{DER}})$ del siguiente modo:

$$\Delta\gamma_{\text{MÁX}} = \max_{i,k} \left\{ \Delta\gamma_{i0}^{(k)} \right\} \quad u(\delta\gamma_{\text{DER}}) = \frac{\Delta\gamma_{\text{MÁX}}}{\sqrt{3}}$$

Los grados de libertad $\nu[u(\delta\gamma_{\text{DER}})]$ son infinitos.

Se asumirá que $\delta\gamma_{\text{DER}}$ se distribuye uniformemente entre $-\Delta\gamma_{\text{MÁX}}$ y $+\Delta\gamma_{\text{MÁX}}$.

- Incertidumbre por división de escala de la mesa giratoria, $u(\delta\alpha_E)$.

$\delta\alpha_E$ es la corrección que compensaría el efecto de la división de escala. En la práctica se tomará un valor nulo para dicha corrección. Su incertidumbre $u(\delta\alpha_E)$ puede estimarse como sigue, suponiendo que se distribuye uniformemente entre $-E_\alpha / 2$ y $+E_\alpha / 2$:

$$u(\delta\alpha_E) = \frac{E_\alpha / 2}{\sqrt{3}}$$

donde E_α es la división de escala de la mesa giratoria. Los grados de libertad de esta componente de la incertidumbre se supondrán infinitos.

- Incertidumbre por división de escala del autocolimador, $u(\delta\theta_E)$

$\delta\theta_E$ es la corrección que compensaría el efecto de la división de escala. En la práctica se tomará un valor nulo para dicha corrección. Su incertidumbre $u(\delta\theta_E)$ puede estimarse como sigue, suponiendo que se distribuye uniformemente entre $-E_\theta / 2$ y $+E_\theta / 2$:

$$u(\delta\theta_E) = \frac{E_\theta / 2}{\sqrt{3}}$$

donde E_θ es la división de escala del autocolimador. Los grados de libertad de esta componente de la incertidumbre se supondrán infinitos.

- Incertidumbre asociada a la calibración del autocolimador, $u(\delta\theta_{Ci})$.

$\delta\theta_{\text{CAL}}$ sería la corrección de calibración que habría que introducir en las lecturas del autocolimador. Habría que considerar dos componentes de incertidumbre:

- Una primera componente $u(\delta\theta_{Ci})$ que provendría de las incertidumbres asignadas a las correcciones de calibración y que habría que obtener del certificado de calibración del autocolimador:

$$u(\delta\theta_{Ci}) = \frac{U(\delta\theta_{Ci})}{k}$$

donde $U(\delta\theta_{Ci})$ es la incertidumbre expandida incluida en dicho certificado, correspondiente al punto i -ésimo de calibración del autocolimador y k es el factor de cobertura asociado a dicha incertidumbre expandida.

Es frecuente que la incertidumbre de calibración $U(\delta\theta_{Ci})$ venga expresada en la forma:

$$U(\delta\theta_{Ci}) = A + B \cdot |\theta_{Ci}|$$

donde A y B son dos constantes y θ_{Ci} es el punto de calibración i -ésimo del autocolimador.

Si $\theta_{MÁX}$ es el máximo valor absoluto de las lecturas obtenidas con el autocolimador durante la calibración de la mesa giratoria:

$$\theta_{MÁX} = \max_{i,j} \{|\theta_{ij}|\}$$

entonces $U(\delta\theta_{Ci}) \leq A + B \cdot \theta_{MÁX}$ y se podrá tomar como estimación única correspondiente a las correcciones de calibración del autocolimador la siguiente:

$$u(\delta\theta_{Ci}) = \frac{U(\delta\theta_{Ci})}{k} \leq \frac{A + B \cdot \theta_{MÁX}}{k}$$

En general, y salvo mención expresa en sentido contrario en el certificado de calibración, se aceptará que los grados de libertad de esta incertidumbre son infinitos y que está asociada a una distribución normal.

- Una segunda componente $u(\delta\theta_{NC})$ asociada al hecho de no aplicar en la práctica las correcciones de calibración incluidas en el certificado.

Con el fin de simplificar el cálculo se aceptará que el autocolimador posee unas especificaciones para las correcciones de calibración del tipo:

$$|\delta\theta_{Ci}| \leq a + b \cdot |\theta_{Ci}|$$

Estas especificaciones pueden haber sido fijadas por el fabricante del autocolimador o por el propio usuario.

Se supondrá que se dispone de los resultados de las K últimas calibraciones a las que ha sido sometido el autocolimador:

$$\delta\theta_{Ci}^{(k)} \pm U[\delta\theta_{Ci}^{(k)}]$$

donde $\delta\theta_{Ci}^{(k)}$ representa la corrección de calibración correspondiente al punto de calibración θ_{Ci} obtenida en la calibración k -ésima.

Se aceptará que a partir de dichos resultados ha podido declararse la conformidad con especificaciones del autocolimador en todos los casos. Es decir, que

$$- [a + b \cdot |\theta_{Ci}|] \leq \delta\theta_{Ci}^{(k)} - U [\delta\theta_{Ci}^{(k)}] < \delta\theta_{Ci}^{(k)} + U [\delta\theta_{Ci}^{(k)}] \leq a + b \cdot |\theta_{Ci}|$$

En caso de no verificarse las desigualdades anteriores para todos y cada uno de los puntos de calibración, en todas y cada una de las calibraciones históricas, es responsabilidad del usuario volver a fijar las especificaciones del autocolimador de forma que pueda asegurarse, de forma razonable que el autocolimador pueda cumplir las nuevas especificaciones en las futuras calibraciones (y asimismo que cumpla con ellas en las calibraciones históricas).

En las condiciones anteriores, puede aceptarse que una cota máxima para el valor absoluto de la corrección $\delta\theta_{Ci}^{(k)}$ es:

$$|\delta\theta_{Ci}^{(k)}| \leq a + b \cdot \theta_{MÁX}$$

Por tanto, la componente de la incertidumbre asociada a la no aplicación de las correcciones de calibración del comparador sería:

$$u(\delta\theta_{NC}) = \frac{a + b \cdot \theta_{MÁX}}{\sqrt{3}}$$

Los grados de libertad de esta componente de la incertidumbre serían infinitos, aceptando que proviene de una distribución uniforme.

- Componente asociada a la deriva del autocolimador $u(\delta\theta_{DER})$.

La incertidumbre $u(\delta\theta_{DER})$ asociada a esta corrección se puede estimar a partir del registro histórico de calibraciones del autocolimador.

Sea $\delta\theta_{Ci}^{(k)}$ de nuevo el valor certificado para la corrección de calibración del autocolimador en su punto de calibración i -ésimo (θ_{Ci}) correspondiente a la k -ésima calibración de su registro histórico. La diferencia, para dicho punto, en valor absoluto, entre las calibraciones k -ésima y $(k-1)$ -ésima es $\Delta\delta\theta_{Ci}^{(k)} = |\delta\theta_{Ci}^{(k)} - \delta\theta_{Ci}^{(k-1)}|$. A partir de todas las diferencias $\Delta\delta\theta_{Ci}^{(k)}$ correspondientes a todos los puntos de calibración θ_{Ci} y todas las calibraciones $k = 1, 2, \dots, K$ registradas en el histórico puede determinarse una cota máxima para dichas diferencias en función del punto de calibración (ver ejemplo) del tipo:

$$|\Delta\delta\theta_{Ci}^{(k)}| \leq C + D \cdot |\theta_{Ci}|$$

Por tanto, podría estimarse la componente asociada a la deriva del autocolimador como:

$$u(\delta\theta_{\text{DER}}) = \frac{C + D \cdot \theta_{\text{MÁX}}}{\sqrt{3}}$$

Los grados de libertad de esta componente de la incertidumbre serían infinitos, aceptando que proviene de una distribución uniforme.

- Efecto conjunto de la repetibilidad de la mesa giratoria y del autocolimador.

Es la componente asociada al término siguiente:

$$\varepsilon_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\alpha_{ij} - \theta_{ij})$$

Su incertidumbre típica podría ser estimada como $\frac{s_R}{\sqrt{n}}$.

Los grados de libertad serían $\nu(s_R) = (N-1)(n-1)$ y se acepta que el efecto de la repetibilidad se distribuye normalmente.

Finalmente, la incertidumbre típica de la corrección de calibración sería, tal como refleja también la tabla 2, la siguiente:

$$u^2(c_i) = u_0^2 + u^2(\delta\gamma_{\text{DER}}) + u^2(\varepsilon_i) + u^2(\delta\alpha_E) + u^2(\delta\theta_E) + \underbrace{u^2(\delta\theta_{C_i}) + u^2(\delta\theta_{\text{NC}})}_{u^2(\delta\theta_{\text{CAL}})} + u^2(\delta\theta_{\text{DER}})$$

es decir,

$$u^2(c_i) = \sqrt{u_0^2 + \frac{\Delta\gamma_{\text{MÁX}}^2}{3} + \frac{s_R^2}{n} + \frac{E_\alpha^2}{12} + \frac{E_\theta^2}{12} + \left(\frac{A + B\theta_{\text{MÁX}}}{k}\right)^2 + \frac{(a + b\theta_{\text{MÁX}})^2}{3} + \frac{(C + D\theta_{\text{MÁX}})^2}{3}}$$

Los grados de libertad asociados a $u(c_i)$ serían, aplicando la fórmula de Welch-Satterthwaite:

$$\nu[u(c_i)] = \frac{u^4(c_i)}{0 + 0 + \frac{s_R^4}{(N-1)(n-1)} + 0 + 0 + 0 + 0 + 0} = (N-1)(n-1) \cdot \left(\frac{u(c_i)}{s_R}\right)^2$$

En la práctica, el número de grados de libertad suele resultar muy elevado, $\nu[u(c_i)] \gg (N-1)(n-1)$, y siempre superior a 10 puesto que $(N-1)(n-1) \geq (12-1)(4-1) = 33$. Por ello, suele ser aceptable asumir un número de grados de libertad infinito.

Asimismo, dado que el número de contribuciones a la incertidumbre es relativamente alto (ocho) y que en la práctica suelen tener 'pesos' similares, también suele resultar asumible suponer que las c_i se distribuyen normalmente.

En las condiciones anteriores, el coeficiente k correspondiente a un nivel de cobertura de aproximadamente el 95 % es $k = 2$. Por tanto, la incertidumbre expandida de las correcciones de calibración sería:

$$U(c_i) = k \cdot u(c_i) = 2u(c_i)$$

Tabla 2. Balance de incertidumbres

Magnitud de influencia		Incertidumbre Típica	Función de distribución	Coefficiente de sensibilidad	Contribución a la incertidumbre	Grados de libertad
x_k		$u(x_k)$		$c_k = \frac{\partial c_i}{\partial x_k}$	$u_k = c_k \cdot u(x_k)$	ν_k
Calibración del polígono patrón	γ_{i0}	$u(\gamma_{i0}) = u_0$	Normal	1	u_0	∞
Deriva temporal polígono patrón	$\delta\gamma_{\text{DER}} = 0''$	$u(\delta\gamma_{\text{DER}}) = \frac{\Delta\gamma_{\text{MÁX}}}{\sqrt{3}}$	Uniforme	1	$\frac{\Delta\gamma_{\text{MÁX}}}{\sqrt{3}}$	∞
División de escala de la mesa giratoria	$\delta\alpha_E = 0''$	$u(\delta\alpha_E) = \frac{E_\alpha / 2}{\sqrt{3}}$	Uniforme	1	$\frac{E_\alpha / 2}{\sqrt{3}}$	∞
División de escala del autocolimador	$\delta\theta_E = 0''$	$u(\delta\theta_E) = \frac{E_\theta / 2}{\sqrt{3}}$	Uniforme	1	$\frac{E_\theta / 2}{\sqrt{3}}$	∞
Calibración del autocolimador	$\delta\theta_{\text{CAL}} = 0''$	$u(\delta\theta_{\text{CI}}) = \frac{A + B \cdot \theta_{\text{MÁX}}}{k}$	Normal	1	$\frac{A + B \cdot \theta_{\text{MÁX}}}{k}$	∞
No aplicación correcciones autocolimador		$u(\delta\theta_{\text{NC}}) = \frac{a + b \cdot \theta_{\text{MÁX}}}{\sqrt{3}}$	Uniforme	1	$\frac{a + b \cdot \theta_{\text{MÁX}}}{\sqrt{3}}$	∞
Deriva del autocolimador	$\delta\theta_{\text{DER}} = 0''$	$u(\delta\theta_{\text{DER}}) = \frac{C + D \cdot \theta_{\text{MÁX}}}{\sqrt{3}}$	Uniforme	1	$\frac{C + D \cdot \theta_{\text{MÁX}}}{\sqrt{3}}$	∞
Repetibilidad conjunta de mesa giratoria y autocolimador	ε_i	$u(\varepsilon_i) = \frac{s_R}{\sqrt{n}}$	Normal	1	$\frac{s_R}{\sqrt{n}}$	$(N-1)(n-1)$
Corrección de calibración $c_i = \gamma_{i0} + \delta\gamma_{\text{DER}} - \varepsilon_i - \delta\alpha_E + \delta\theta_E + \delta\theta_{\text{CAL}} + \delta\theta_{\text{DER}} = \gamma_{i0} - \varepsilon_i$						
Incertidumbre combinada $u(c_i)$				$u(c_i) = \sqrt{\sum u_k^2}$		
Grados de libertad $\nu[u(c_i)]$				$\nu[u(c_i)] = u^4(c_i) / \sum(u_k^4)$		
Incertidumbre expandida $U(c_i)$				$U(c_i) = k \cdot u(c_i)$		

6.2. Interpretación de resultados

La corrección c_i obtenida en apartados anteriores para el punto de calibración i es el valor que debería adicionarse a las lecturas α de la mesa giratoria cuando ésta esté trabajando en un entorno del punto de calibración i para obtener así la lectura corregida $y = \alpha + c_i$.

Cada corrección c_i lleva asociada una incertidumbre de calibración $U(c_i)$ obtenida según el procedimiento descrito en el apartado 6.1. Obsérvese que dicha incertidumbre es la incertidumbre de la corrección de calibración, siempre distinta e inferior a la incertidumbre $U(y)$ de la lectura corregida y . La incertidumbre $U(y)$ suele denominarse 'incertidumbre de uso' del instrumento (la mesa giratoria en este caso).

Así pues, el usuario de la mesa giratoria, a la hora de utilizar dicha mesa deberá realizar un nuevo balance de incertidumbres para estimar la incertidumbre de uso $U(y)$, entre cuyas componentes aparecerá la incertidumbre $U(c_i)$ de la corrección de calibración. Es también importante hacer notar que en muchas ocasiones la incertidumbre de calibración $U(c_i)$ no es la contribución más importante a la incertidumbre de uso $U(y)$, pudiendo existir otras componentes con contribuciones muy superiores.

Es habitual asignar tolerancias a algunos de los parámetros metroológicos determinados (básicamente las correcciones c_i) con el fin de determinar la aptitud o no del instrumento (la mesa giratoria) para la realización de diversas labores metroológicas o con el fin de facilitar la decisión de cuándo debe ser reparado o dado de baja. La declaración de conformidad con dichas especificaciones deberá realizarse teniendo en cuenta las incertidumbres de las correcciones de calibración c_i .

Aun cuando la fijación del periodo de recalibración es siempre responsabilidad del usuario del instrumento, en la tabla 3 se incluyen algunos valores orientativos en función del uso y de la división de escala de la mesa giratoria.

Tipo de uso	División de Escala E_α (mm)	Periodo de recalibración recomendado
Uso intensivo con piezas pesadas	$E < 5''$	9 meses
	$E \geq 5''$	12 meses
Uso intensivo con piezas ligeras	$E < 5''$	12 meses
	$E \geq 5''$	16 meses
Uso no intensivo con piezas pesadas	$E < 5''$	16 meses
	$E \geq 5''$	24 meses
Uso no intensivo con piezas ligeras	$E < 5''$	24 meses
	$E \geq 5''$	36 meses

Tabla 3. Periodos de recalibración recomendados

Los valores incluidos en la tabla 3 son válidos para un uso normal de la mesa giratoria en una sala de metrología. Si la mesa giratoria va a ser utilizada en un taller o en cualquier otro entorno de trabajo más agresivo es conveniente reducir su periodo de recalibración incluso por debajo de los valores mínimos indicados en la tabla 3.

7. REFERENCIAS

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

8. ANEXO.

8.1. Ejemplo numérico

Se ha procedido a la calibración de una mesa giratoria con unidad de lectura digital, división de escala $E_{\alpha} = 1''$ y rango de indicación de 0° a 360° con un polígono patrón de 12 caras y un autocolimador con división de escala $E_{\theta} = 0,1''$ y campo de indicaciones (para esa división de escala) de $\pm 600''$.

Resumen del histórico y del certificado de calibración del polígono patrón.

Del polígono patrón se posee información relativa a la calibración actualmente en vigor y a otras dos anteriores. Es decir, en total $K = 3$ calibraciones. La información contenida en los correspondientes certificados de calibración se resume en la tabla 4.

Obsérvese que por poseer la mesa giratoria una división de escala baja no ha sido posible disponer de un patrón con una incertidumbre igual o inferior a media división de escala, tal y como se recomendaba en el apartado 5.1.1.

Resumen del histórico y del certificado de calibración del autocolimador.

El autocolimador, de acuerdo con las especificaciones del fabricante, posee como valores máximos de sus correcciones de calibración las siguientes:

$$|\delta\theta_{Ci}| \leq (a + b \cdot |\theta_i|) \quad \text{con } a = 1'' \text{ y } b = 0,01$$

Los resultados de las últimas tres calibraciones (aquellas que aparecen recogidas en el histórico del instrumento) aparecen resumidos en la tabla 5.

Tabla 4. Resumen de las calibraciones del polígono patrón

Calibración		1ª	2ª	3ª (en vigor)
Fecha calibración		Junio-94	Junio-97	Junio-2000
Cara nº	$(i \cdot \beta)^\circ$	Correcciones de calibración $\delta\gamma_{i0}^{(k)}$ (en ") con sus incertidumbres $U(\delta\gamma_{i0}^{(k)})$ (en ")		
1	30	-1 ± 5	-5 ± 5	+1 ± 5
2	60	-6 ± 5	+1 ± 5	-4 ± 5
3	90	+3 ± 5	+4 ± 5	+2 ± 5
4	120	-1 ± 5	+4 ± 5	0 ± 5
5	150	-6 ± 5	0 ± 5	-1 ± 5
6	180	-3 ± 5	-2 ± 5	-2 ± 5
7	210	0 ± 5	-6 ± 5	-6 ± 5
8	240	-3 ± 5	-4 ± 5	-4 ± 5
9	270	-2 ± 5	-1 ± 5	-1 ± 5
10	300	+4 ± 5	0 ± 5	+4 ± 5
11	330	+1 ± 5	+2 ± 5	-1 ± 5

NOTAS:

Las incertidumbres son expandidas, con $k=2$

Los ángulos $\gamma_{i0}^{(k)}$ se obtienen de acuerdo con la expresión $\gamma_{i0}^{(k)} = i \cdot \beta + \delta\gamma_{i0}^{(k)}$ con $\beta = 30^\circ$

Tabla 5. Resumen de las calibraciones del autocolimador

Calibración	1ª	2ª	3ª (en vigor)
Fecha calibración	Diciembre-96	Diciembre-98	Diciembre-2000
Punto de calibración	Correcciones de calibración con sus incertidumbres (valores en segundos, ")		
-500"	+2,6 ± 1,5	+2,7 ± 1,5	+0,4 ± 1,5
-400"	+1,6 ± 1,3	+1,9 ± 1,3	-0,4 ± 1,3
-300"	+1,3 ± 1,1	+1,7 ± 1,1	+0,1 ± 1,1
-200"	+0,9 ± 0,9	+0,8 ± 0,9	+0,2 ± 0,9
-100"	+0,5 ± 0,7	+0,5 ± 0,7	-0,3 ± 0,7
+100"	-0,3 ± 0,7	-0,8 ± 0,7	-0,2 ± 0,7
+200"	-1,6 ± 0,9	-1,0 ± 0,9	-0,8 ± 0,9
+300"	-2,3 ± 1,1	-1,9 ± 1,1	-0,1 ± 1,1
+400"	-2,1 ± 1,3	-2,4 ± 1,3	-0,1 ± 1,3
+500"	-3,0 ± 1,5	-2,5 ± 1,5	-0,4 ± 1,5

NOTA: Las incertidumbres son expandidas, para $k=2$

8.2. Toma y tratamiento de datos

Después de haber realizado las operaciones previas descritas en el apartado 5.2 y siguiendo las instrucciones del apartado 5.4 se han completado las tablas 6 y 7 correspondientes a las lecturas de la mesa giratoria y del autocolimador para $n = 4$ series de medidas, dos en sentido creciente y otras dos en sentido decreciente.

Tabla 6.- Lecturas α_{ij} obtenidas con la mesa giratoria durante la calibración

Punto de Calibración	Serie $j = 1$ (Creciente)	Serie $j = 2$ (Decreciente)	Serie $j = 3$ (Creciente)	Serie $j = 4$ (Decreciente)
30°	29° 59' 38"	29° 59' 54"	29° 59' 54"	29° 59' 56"
60°	59° 59' 41"	59° 59' 58"	59° 59' 39"	59° 59' 53"
90°	89° 59' 40"	89° 59' 42"	89° 59' 39"	89° 59' 44"
120°	119° 59' 57"	120° 00' 03"	119° 59' 46"	119° 59' 54"
150°	149° 59' 47"	150° 00' 06"	149° 59' 56"	149° 59' 54"
180°	179° 59' 52"	180° 00' 06"	179° 59' 45"	180° 00' 02"
210°	209° 59' 53"	210° 00' 15"	210° 00' 12"	210° 00' 12"
240°	239° 59' 48"	240° 00' 08"	240° 00' 08"	240° 00' 00"
270°	269° 59' 52"	270° 00' 02"	269° 59' 59"	270° 00' 03"
300°	299° 59' 45"	299° 59' 56"	299° 59' 57"	299° 59' 57"
330°	330° 00' 00"	330° 00' 01"	330° 00' 04"	330° 00' 03"

Tabla 7. Lecturas θ_{ij} obtenidas con el autocolimador durante la calibración

Punto de Calibración	Serie $j = 1$ (Creciente)	Serie $j = 2$ (Decreciente)	Serie $j = 3$ (Creciente)	Serie $j = 4$ (Decreciente)
30°	-6,8"	+9,1"	+6,2"	+8,9"
60°	-3,9"	+11,0"	-8,6"	+8,2"
90°	-3,7"	-2,0"	-5,7"	+0,6"
120°	+1,5"	+8,8"	-8,2"	-1,4"
150°	-10,7"	+7,2"	-2,6"	-4,3"
180°	-1,5"	+14,2"	-8,6"	+9,1"
210°	-8,9"	+14,6"	+9,0"	+9,8"
240°	-12,2"	+10,2"	+7,5"	-1,3"
270°	-6,6"	+4,1"	-0,1"	+5,0"
300°	-3,6"	+8,9"	+6,9"	+9,0"
330°	-0,9"	-0,3"	+1,2"	+3,1"

A partir de los valores de las tablas 4, 6 y 7 se pueden calcular las correcciones de calibración c_{ij} de acuerdo con la expresión $c_{ij} = \gamma_{i0} - (\alpha_{ij} - \theta_{ij})$ y obtener así los valores de la tabla 8.

Tabla 8.- Obtención de las correcciones de calibración c_i y estimación de la repetibilidad s_R

Punto de Calibración	$c_{ij} = \gamma_{i0} - (\alpha_{ij} - \theta_{ij})$				c_i	s_{Ri}
30°	+16,2"	+16,1"	+13,2"	+13,9"	+14,8"	1,5"
60°	+11,1"	+9,0"	+8,4"	+11,2"	+9,9"	1,5"
90°	+18,3"	+18,0"	+17,3"	+18,6"	+18,1"	0,6"
120°	+4,5"	+5,8"	+5,8"	+4,6"	+5,2"	0,7"
150°	+1,3"	+0,2"	+0,4"	+0,7"	+0,6"	0,5"
180°	+4,5"	+6,2"	+4,4"	+5,1"	+5,1"	0,9"
210°	-7,9"	-6,4"	-9,0"	-8,2"	-7,9"	1,1"
240°	-4,2"	-1,8"	-4,5"	-5,3"	-4,0"	1,5"
270°	+0,4"	+1,1"	-0,1"	+1,0"	+0,6"	0,5"
300°	+15,4"	+16,9"	+13,9"	+16,0"	+15,5"	1,3"
330°	-1,9"	-2,3"	-3,8"	-0,9"	-2,2"	1,2"

NOTA: Aun cuando se presenten los resultados redondeados a 0,1", internamente se ha operado con 16 cifras significativas.

$$s_R = 1,1''$$

8.3. Componentes de la incertidumbre

A continuación se procede a estimar las distintas componentes de la incertidumbre asociadas a las correcciones de calibración antes determinadas. Para ello se sigue el procedimiento descrito en el apartado 6.1.

a) Calibración del polígono patrón: $u(\gamma_{i0})$.

$$u(\gamma_{i0}) = \frac{U(\gamma_{i0})}{k} = \frac{5''}{2} = 2,5''$$

Dado que en el certificado de calibración no se menciona expresamente lo contrario, se supondrá que los grados de libertad $\nu[u(\gamma_{i0})]$ son infinitos y que γ_{i0} se distribuye normalmente.

b) Deriva del polígono patrón: $u(\delta\gamma_{\text{DER}})$

A partir de los valores de la tabla 9 se puede determinar la variación máxima observada en las correcciones de calibración del polígono entre dos calibraciones sucesivas:

$$\Delta\gamma_{\text{MÁX}} = \max_{i,k} \{ \Delta\gamma_{i0}^{(k)} \} = \max_{i,k} \{ |\gamma_{i0}^{(k)} - \gamma_{i0}^{(k-1)}| \} = 7''$$

$$u(\delta\gamma_{\text{DER}}) = \frac{\Delta\gamma_{\text{MÁX}}}{\sqrt{3}} = \frac{7''}{\sqrt{3}} = 4,1''$$

Los grados de libertad $\nu[u(\delta\gamma_{\text{DER}})]$ serían infinitos, asumiéndose que $\delta\gamma_{\text{DER}}$ se distribuye uniformemente entre $-7''$ y $+7''$.

Esta estimación de la incertidumbre asociada a la deriva del polígono patrón es quizá muy conservadora. Obsérvese que la tabla 4 no muestra ninguna tendencia clara respecto a la variación de las correcciones de calibración en función del tiempo. Por otro lado, las variaciones $\gamma_{i0}^{(k)} - \gamma_{i0}^{(k-1)}$ no superan el valor límite de $\pm 7''$, que resulta ser inferior a la incertidumbre de dicha diferencia:

$$U(\gamma_{i0}^{(k)} - \gamma_{i0}^{(k-1)}) = \sqrt{2} \cdot U(\gamma_{i0}^{(k)}) = \sqrt{2} \cdot 5'' = 7,1''$$

Este hecho parecería indicar que las oscilaciones observadas en las correcciones de calibración del polígono patrón son debidas casi exclusivamente a la incertidumbre de calibración de dichas correcciones, siendo despreciable el posible efecto de la deriva.

Sin embargo, por razones de seguridad se decide seguir manteniendo la estimación antes realizada, a pesar de que muy probablemente la estimación correcta de la componente asociada a la deriva pueda ser bastante inferior.

Tabla 9.- Diferencias en las correcciones de calibración $\gamma_{i0}^{(k)}$ entre dos calibraciones sucesivas del polígono patrón

Calibraciones		$\Delta\gamma_{i0}^{(2)} = \gamma_{i0}^{(2)} - \gamma_{i0}^{(1)} $	$\Delta\gamma_{i0}^{(3)} = \gamma_{i0}^{(3)} - \gamma_{i0}^{(2)} $
Cara nº 1	30°	4"	6"
Cara nº 2	60°	7"	5"
Cara nº 3	90°	1"	2"
Cara nº 4	120°	5"	4"
Cara nº 5	150°	6"	1"
Cara nº 6	180°	1"	0"
Cara nº 7	210°	6"	0"
Cara nº 8	240°	1"	0"
Cara nº 9	270°	1"	0"
Cara nº 10	300°	4"	4"
Cara nº 11	330°	1"	3"

c) División de escala de la mesa giratoria: $u(\delta\alpha_E)$

$$u(\delta\alpha_E) = \frac{E_\alpha / 2}{\sqrt{3}} = \frac{1'' / 2}{\sqrt{3}} = 0,3''$$

Se asume una distribución uniforme con grados de libertad infinitos.

d) División de escala del autocolimador: $u(\delta\theta_E)$

$$u(\delta\theta_E) = \frac{E_\theta / 2}{\sqrt{3}} = \frac{0,1'' / 2}{\sqrt{3}} = 0,03''$$

De nuevo se asume distribución uniforme con grados de libertad infinitos.

e) Incertidumbre de las correcciones de calibración del autocolimador: $u(\delta\theta_{Ci})$

Puede comprobarse que las incertidumbres correspondientes a las tres últimas calibraciones del autocolimador son iguales a:

$$U(\delta\theta_{Ci}) = 0,5'' + 0,002 \cdot \theta_{Ci} \quad (k = 2)$$

Puesto que la lectura máxima observada en el autocolimador durante la calibración de la mesa es $\theta_{MAX} = 14,6''$:

$$u(\delta\theta_{Ci}) = \frac{0,5'' + 0,002 \cdot \theta_{Ci}}{k} \leq \frac{0,5'' + 0,002 \cdot 14,6''}{2} = 0,27'' < 0,3''$$

Los grados de libertad de esta componente serían infinitos y se acepta que se distribuye normalmente.

f) Incertidumbre asociada a la no aplicación de las correcciones de calibración del autocolimador: $u(\delta\theta_{NC})$

El autocolimador posee unas especificaciones para las correcciones de calibración del tipo:

$$|\delta\theta_{Ci}| \leq (a + b \cdot |\theta_{Ci}|) \quad \text{con } a = 1'' \text{ y } b = 0,01.$$

Los valores máximos permitidos para dichas correcciones de calibración en los puntos de calibración del autocolimador aparecen en la tabla 10.

Tabla 10. Especificaciones del autocolimador (máximos valores permitidos para las correcciones de calibración)

Punto de calibración	$a + b \cdot \theta $
-500''	6''
-400''	5''
-300''	4''
-200''	3''
-100''	2''
+100''	2''
+200''	3''
+300''	4''
+400''	5''
+500''	6''

Puede comprobarse que en las tres últimas calibraciones dichas especificaciones se han cumplido (teniendo en cuenta en su verificación la incertidumbre de las correcciones). Es decir:

$$- [a + b \cdot |\theta_{Ci}|] \leq \delta\theta_{Ci}^{(k)} - U[\delta\theta_{Ci}^{(k)}] < \delta\theta_{Ci}^{(k)} + U[\delta\theta_{Ci}^{(k)}] \leq a + b \cdot |\theta_{Ci}|$$

En estas condiciones:

$$u(\delta\theta_{NC}) = \frac{a + b \cdot \theta_{MÁX}}{\sqrt{3}} = \frac{1'' + 0,01 \cdot 14,6''}{\sqrt{3}} = 0,67'' < 0,7''$$

Los grados de libertad de esta componente de la incertidumbre son infinitos, aceptando que se distribuye uniformemente.

g) Incertidumbre asociada a la deriva del autocolimador: $u(\delta\theta_{DER})$

Tabla 11.- Diferencias en las correcciones de calibración $\delta\theta_{Ci}^{(k)}$ entre dos calibraciones sucesivas del autocolimador

	$\Delta\delta\theta_{Ci}^{(2)} = \delta\theta_{Ci}^{(2)} - \delta\theta_{Ci}^{(1)} $	$\Delta\delta\theta_{Ci}^{(3)} = \delta\theta_{Ci}^{(3)} - \delta\theta_{Ci}^{(2)} $	$C + D \cdot \theta_{Ci} $
-500"	0,1"	2,3"	2,8"
-400"	0,3"	2,3"	2,3"
-300"	0,4"	1,6"	1,8"
-200"	0,1"	0,6"	1,3"
-100"	0,0"	0,8"	0,8"
+100"	0,5"	0,6"	0,8"
+200"	0,6"	0,2"	1,3"
+300"	0,4"	1,8"	1,8"
+400"	0,3"	2,3"	2,3"
+500"	0,5"	2,1"	2,8"

En la tabla 11 se muestran las derivas del autocolimador obtenidas a partir de los datos de calibración contenidos en la tabla 5. Puede comprobarse que todas las derivas son inferiores al valor máximo que proporcionaría la siguiente expresión:

$$\Delta\delta\theta_{Ci}^{(k)} = C + D \cdot |\theta_{Ci}| \quad \text{con } C = 0,3'' \text{ y } D = 0,005$$

Por tanto, la incertidumbre asociada a la deriva del autocolimador sería:

$$u(\delta\theta_{\text{DER}}) = \frac{C + D \cdot \theta_{\text{MÁX}}}{\sqrt{3}} = \frac{0,3'' + 0,005 \cdot 14,6''}{\sqrt{3}} = 0,22'' < 0,3''$$

Ahora bien, dado que el valor mínimo proporcionado por la ecuación $C + D \cdot |\theta_{Ci}|$ para un punto de calibración (el correspondiente a $\theta_{Ci} = 100''$), resulta ser superior a $C + D \cdot \theta_{\text{MÁX}}$, por razones de seguridad se tomará:

$$u(\delta\theta_{\text{DER}}) = \frac{0,3'' + 0,005 \cdot 100''}{\sqrt{3}} = 0,4''$$

h) Efecto conjunto de la repetibilidad de la mesa giratoria y del autocolimador: $u(\varepsilon_i)$

$$u(\varepsilon_i) = \frac{s_R}{\sqrt{n}} = \frac{1,1''}{\sqrt{4}} = 0,55'' < 0,6''$$

Los grados de libertad serían:

$$v(s_R) = (N-1)(n-1) = (12-1)(4-1) = 33$$

Se acepta pues que se distribuye normalmente.

8.4. Balance de incertidumbres

En la tabla 12 se presenta el balance de incertidumbres. Obsérvese que en este caso existe una componente claramente dominante: la deriva del polígono patrón. Esta componente sería la que determinaría la forma de la función de distribución de los resultados de la calibración. Dado que la deriva del patrón se distribuye uniformemente, la función de distribución de los resultados estaría muy próxima a una distribución uniforme.

El número de grados de libertad es elevado (mayor de 146 000).

En las condiciones anteriores, podría tomarse un coeficiente de recubrimiento $k = 1,65$ que correspondería a un nivel de cobertura aproximado del 95 % en el caso de una distribución uniforme. Sin embargo, por razones de seguridad, se opta por mantener el valor usual de $k = 2$ para un nivel de cobertura aproximado del 95 % en el caso de distribución normal.

En la tabla 13 se presentan los resultados finales una vez redondeados a la división de escala de la mesa giratoria. La incertidumbre expandida que finalmente aparece en la tabla 13 es el resultado de sumar a la incertidumbre de la tabla 12 el máximo redondeo (0,5") y redondear el resultado final por exceso a la división de escala de la mesa giratoria:

$$U(c_i)_{\text{TABLA 13}} = U(c_i)_{\text{TABLA 12}} + 0,5'' = 9,8'' + 0,5'' = 10,3'' < 11''$$

El valor de la incertidumbre de las correcciones de calibración de la mesa giratoria es bastante elevado (11") para un instrumento que posee una división de escala de 1" y que ha presentado una repetibilidad en torno a 1" durante su calibración. La causa de esta incertidumbre sorprendentemente alta reside básicamente en la estimación muy conservadora del efecto de la deriva del polígono patrón (ver punto "b" del apartado 8.3) y, en segundo lugar, en la utilización de un patrón con una incertidumbre relativamente alta (5").

Tabla 12.- Balance de incertidumbres

Magnitud de influencia		Incertidumbre Típica	Función de distribución	Coefficiente de sensibilidad	Contribución a la incertidumbre	Grados de libertad
x_k		$u(x_k)$		$c_k = \frac{\partial c_i}{\partial x_k}$	$u_k = c_k \cdot u(x_k)$	ν_k
Calibración del polígono patrón	γ_{i0}	$u_0 = 2,5''$	Normal	1	2,5''	∞
Deriva temporal polígono patrón	$\delta\gamma_{\text{DER}} = 0''$	$u(\delta\gamma_{\text{DER}}) = 4,1''$	Uniforme	1	4,1''	∞
División de escala de la mesa giratoria	$\delta\alpha_E = 0''$	$u(\delta\alpha_E) = 0,3''$	Uniforme	1	0,3''	∞
División de escala del autocolimador	$\delta\theta_E = 0''$	$u(\delta\theta_E) = 0,03''$	Uniforme	1	0,03''	∞
Calibración del autocolimador	$\delta\theta_{\text{CAL}} = 0''$	$u(\delta\theta_{\text{Ci}}) = 0,3''$	Normal	1	0,3''	∞
No aplicación correcciones autocolimador		$u(\delta\theta_{\text{NC}}) = 0,7''$	Uniforme	1	0,7''	∞
Deriva del autocolimador	$\delta\theta_{\text{DER}} = 0''$	$u(\delta\theta_{\text{DER}}) = 0,3''$	Uniforme	1	0,3''	∞
Repetibilidad conjunta de mesa giratoria y autocolimador	ε_i	$u(\varepsilon_i) = 0,6''$	Normal	1	0,6''	33
Corrección de calibración $c_i = \gamma_{i0} + \delta\gamma_{\text{DER}} - \varepsilon_i - \delta\alpha_E + \delta\theta_E + \delta\theta_{\text{CAL}} + \delta\theta_{\text{DER}} = \gamma_{i0} - \varepsilon_i$						
Incertidumbre combinada $u(c_i)$		$u(c_i) = \sqrt{\sum u_k^2} = 4,9''$				
Grados de libertad $\nu[u(c_i)]$		$\nu[u(c_i)] = u^4(c_i) / \sum(u_k^4) > 146\ 000$				
Incertidumbre expandida $U(c_i)$		$U(c_i) = k \cdot u(c_i) = 2 \times 4,9'' = 9,8''$				

Tabla 13. Resultados finales de la calibración

Punto de Calibración	Correcciones de calibración c_i	Incertidumbres $U(c_i)$ (para $k=2$) de las correcciones de calibración
30°	+15''	11''
60°	+10''	11''
90°	+18''	11''
120°	+5''	11''
150°	+1''	11''
180°	+5''	11''
210°	-8''	11''
240°	-4''	11''
270°	+1''	11''
300°	+16''	11''
330°	-2''	11''

Metrología

NIPO: 113-19-006-0