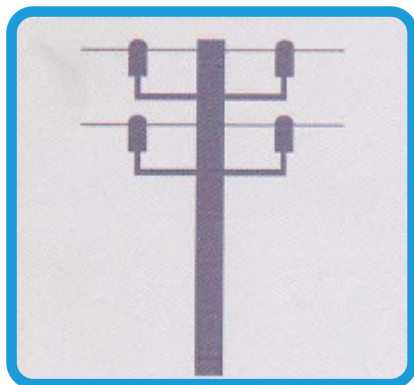
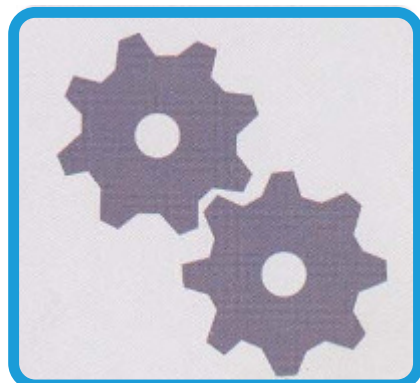
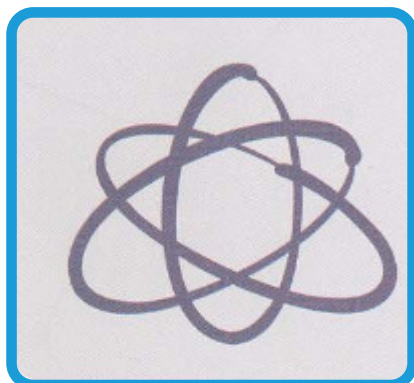
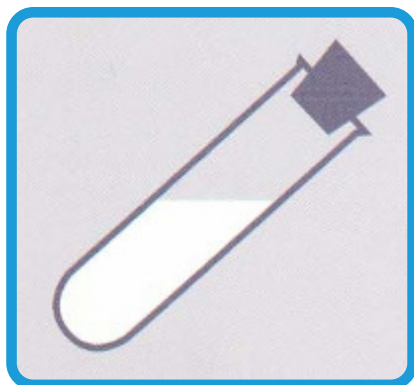
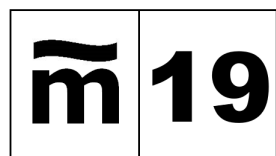


# Metrología



PROCEDIMIENTO DI-017 PARA LA  
CALIBRACIÓN DE BLOQUES PATRÓN  
ANGULARES



# **PROCEDIMIENTO DI-017**

## **CALIBRACIÓN DE BLOQUES PATRÓN ANGULARES**

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

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

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

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

## ÍNDICE

|   | Página |
|---|--------|
| 1. OBJETO .....   | 3      |
| 2. ALCANCE .....  | 3      |
| 3. DEFINICIONES .....   | 3      |
| 4. GENERALIDADES.....   | 4      |
| 5. DESCRIPCIÓN .....  | 7      |
| 5.1. Calibración con un plato divisor (D.05.02) en máquina<br>medidora de tres coordenadas (D-02.07) .....  | 8      |
| 5.2. Calibración con regla de senos (D-05.03), bloques patrón longitudinales (D.01.02),<br>comparador (D.03.01) o (D.03.03), soporte de comparador (D.03.05) y<br>mesa de planitud (D.06.05)..... | 10     |
| 6. RESULTADOS .....   | 13     |
| 6.1. Cálculo de incertidumbres .....  | 13     |
| 6.2. Interpretación de resultados .....   | 20     |
| 7. REFERENCIAS.....   | 21     |
| 8. ANEXOS .....   | 22     |

## 1. OBJETO

El presente procedimiento de calibración tiene por objeto exponer algunos de los métodos posibles para la calibración de bloques patrón angulares codificados como D.04.02, según la Clasificación de Instrumentos de Metrología Dimensional [5].

## 2. ALCANCE

El presente procedimiento es de aplicación a todo tipo de bloques patrón angulares, cuya característica fundamental es que materializan entre dos de sus caras un ángulo con elevada exactitud.

## 3. DEFINICIONES

En el presente procedimiento se utilizará la terminología según [2].

Para la mejor comprensión de las definiciones que se incluyen a continuación, ver la Figura 1, en la que se muestran dos formas habituales de grabado:

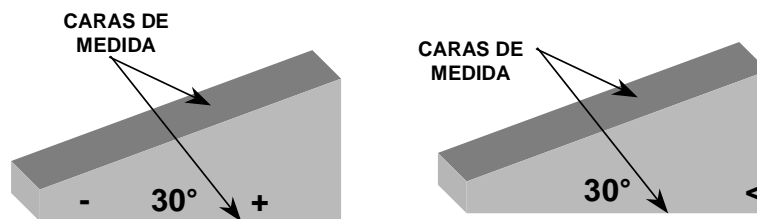


Figura 1: Bloque patrón angular

### Caras auxiliares:

Son aquellas paralelas dos a dos que no son caras de medida.

### Caras de medida:

Son aquellas, con una planitud y acabado superficial similar al de los bloques patrón longitudinales, que materializan el ángulo del bloque patrón angular.

### Valor convencional de una magnitud (según [2] 2.12):

valor asignado a una magnitud, mediante un acuerdo, para un determinado propósito.

### EJEMPLOS:

- Valor convencional de la aceleración de caída libre (antes llamada aceleración normal debida a la gravedad),  $g_n = 9,806\ 65\ \text{m s}^{-2}$ .
- Valor convencional de un patrón de masa dado,  $m = 100,003\ 47\ \text{g}$ .

### NOTAS:

- Habitualmente se utiliza para este concepto el término "valor convencionalmente verdadero", aunque se desaconseja su uso.

- 2) El valor convencional se considera generalmente asociado a una incertidumbre de medida convenientemente pequeña, incluso nula.

Valor nominal (Según [2] 4.6):

Valor redondeado o aproximado de una magnitud característica de un instrumento o sistema de medida, que sirve de guía para su utilización apropiada.

EJEMPLOS:

- El valor  $100 \Omega$  marcado sobre una resistencia patrón.
- El valor 1000 mL marcado con un trazo sobre un recipiente graduado.
- El valor 0,1 mol/L de concentración de cantidad de sustancia de una solución de ácido clorhídrico, HCl.
- El valor  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$  de temperatura Celsius máxima de almacenamiento.

#### 4. GENERALIDADES

Los bloques patrón angulares son unos patrones normalmente de acero, cuya característica fundamental es que materializan entre sus caras de medida un ángulo con elevada exactitud.

Los bloques patrón angulares, desempeñan funciones análogas en la magnitud ángulo, a las que desempeñan los bloques patrón longitudinales (ref. [5]) en la magnitud longitud y al igual que éstos, suelen emplearse formando juegos; sin embargo, los juegos de bloques patrón angulares, están formados normalmente por muchos menos elementos que los juegos de bloques patrón longitudinales, dado que pueden componerse por adherencia tanto sumando como restando sus valores, mientras que los bloques patrón longitudinales sólo pueden componerse sumando sus valores.

La composición más clásica de un juego de bloques patrón angulares es de 17 piezas, con los valores nominales que se indican en la tabla 1.

| UNIDAD   | NOMINAL DE LOS BLOQUES        |
|----------|-------------------------------|
| Grados   | 1 - 3 - 5 - 15 - 30 - 45 - 90 |
| Minutos  | 1 - 3 - 5 - 20 - 30           |
| Segundos | 1 - 3 - 5 - 20 - 30           |

**Tabla 1: Nominales más usuales de bloques patrón angulares**

En las caras auxiliares suelen llevar grabado su valor nominal y los signos menos (-) y más (+), un símbolo > u otro signo, indicando el sentido del ángulo; el cual es obvio en ángulos grandes, pero no es fácil de identificar a simple vista en ángulos pequeños.

Para calibrar los bloques patrón angulares, se pueden utilizar los métodos siguientes:

- Plato divisor (D.05.02 según [5]) de máquina medidora de tres coordenadas (D-02.07 según [5]) o, en general, mesa giratoria, tomada como patrón.
- Regla de senos (D-05.03 según [5]), bloques patrón longitudinales (D.01.02 según [5]), comparador (D.03.01) ó (D.03.03 según [5]), soporte de comparador (D.03.05 según [5]) y mesa de planitud (D.06.05 según [5]).

La calibración por el primer procedimiento proporciona la medida absoluta del ángulo materializado por el bloque patrón angular. Con el segundo procedimiento, se obtiene la diferencia angular entre el bloque patrón angular y el ángulo generado por la regla de senos mediante bloques patrón longitudinales.

En lo que sigue se utilizarán las abreviaturas siguientes:

|        |                               |
|--------|-------------------------------|
| BPA:   | Bloque patrón angular.        |
| BPL:   | Bloque patrón longitudinal.   |
| COMP:  | Comparador.                   |
| MP:    | Mesa de planitud.             |
| MMC:   | Medidora de tres coordenadas. |
| PD:    | Plato divisor.                |
| RS:    | Regla de senos.               |
| SCOMP: | Soporte de comparador.        |

Además, se utilizarán los símbolos que a continuación se relacionan:

|           |   |
|-----------|---|
| $C_C$     | Corrección de calibración del COMP, obtenida de su certificado de calibración.  |
| $C_E$     | Corrección por división de escala del PD.   |
| $C_{EC}$  | Corrección por división de escala del COMP.   |
| $C_d$     | Corrección por deriva del PD desde su última calibración.   |
| $C_{dB}$  | Corrección por deriva de los BPL desde su última calibración.   |
| $C_{dC}$  | Corrección por deriva del COMP desde su última calibración.   |
| $C_{dR}$  | Corrección por deriva de la RS desde su última calibración.   |
| $C_M$     | Corrección por desviación de planitud de la MP, entre los puntos sobre los que se apoya la RS; se obtiene de su certificado de calibración. |
| $C_o$     | Corrección de calibración obtenida del certificado de calibración del PD.   |
| $C_{ROD}$ | Corrección por diferencia de diámetro de los rodillos de la RS; se obtiene de su certificado de calibración.                                |
| $d$       | Distancia nominal entre ejes de la RS.  |
| $D$       | Distancia entre ejes de la RS; se obtiene como suma del valor de su certificado de calibración y las correcciones correspondientes.         |
| $D_c$     | Desviación del COMP en su certificado de calibración $c$ .  |
| $D_{c-1}$ | Desviación del COMP en su certificado de calibración $c-1$ .  |
| $D_o$     | Distancia entre ejes de la RS, obtenida del certificado de su última calibración.   |
| $d_o$     | Desviación al nominal del ángulo del BPA.   |
| $D_i$     | Desviación del PD en su certificado de calibración $i$ .  |
| $D_{i-1}$ | Desviación del PD en su certificado de calibración $i-1$ .  |
| $D_j$     | Distancia entre ejes de la RS en su certificado de calibración $j$ .  |
| $D_{j-1}$ | Distancia entre ejes de la RS en su certificado de calibración $j-1$ .  |
| $E$       | División de escala del instrumento considerado.   |
| $k$       | Factor de cobertura.  |

- $L$  = Longitud más aproximada a  $L'$  que puede formarse con los BPL disponibles; se obtiene como la suma de las longitudes  $L_i$  de los BPL, obtenidas de su certificado de calibración y las correcciones correspondientes.
- $L'$  = Longitud calculada de los BPL para formar con la regla de senos el ángulo nominal del BPA.
- $L_i$  = Longitud del BPL  $i$  de los utilizados.
- $L_0$  = Longitud nominal de los BPL utilizados.
- $N$  = Número de medidas realizadas.
- $N_B$  = Número de BPL utilizados.
- $s_Y$  = Desviación típica experimental de las lecturas del COMP.
- $s_{\bar{Y}}$  = Desviación típica de la media de lecturas del COMP.
- $s_\alpha$  = Desviación típica experimental de las medidas de calibración del BPA.
- $s_{\bar{\alpha}}$  = Desviación típica de la media de las medidas de calibración del BPA.
- $u_C$  = Incertidumbre típica de la corrección de calibración del COMP, obtenida de su certificado de calibración.
- $U_C$  = Incertidumbre expandida de la corrección de calibración del COMP, obtenida de su certificado de calibración.
- $u_d$  = Incertidumbre típica de la corrección por deriva del PD, desde su última calibración.
- $u_D$  = Incertidumbre típica de la distancia entre ejes de la RS.
- $U_D$  = Incertidumbre expandida de la distancia entre ejes de la RS.
- $u_{dB}$  = Incertidumbre típica de la corrección por deriva de los BPL desde su última calibración.
- $u_{dC}$  = Incertidumbre típica de la corrección por deriva del COMP desde su última calibración.
- $u_{dE}$  = Incertidumbre típica de la corrección por división de escala del COMP.
- $u_{dR}$  = Incertidumbre típica de la corrección por deriva de la distancia entre ejes de la RS desde su última calibración.
- $u_{d_o}$  = Incertidumbre típica de la desviación al nominal del ángulo del BPA.
- $U_{d_o}$  = Incertidumbre expandida de la desviación al nominal del ángulo del BPA.
- $u_{D_o}$  = Incertidumbre típica de la distancia entre ejes de la RS, obtenida del certificado de calibración de la RS.
- $U_{D_o}$  = Incertidumbre expandida de la distancia entre ejes de la RS, obtenida del certificado de calibración de la RS.
- $u_E$  = Incertidumbre típica de la corrección por división de escala del PD.
- $u_L$  = Incertidumbre típica de la longitud  $L$  formada por el BPL o el apilamiento de los BPL utilizados.
- $u_{L_i}$  = Incertidumbre típica de la longitud  $L_i$  del BPL  $i$ , obtenida de su certificado de calibración.
- $U_{L_i}$  = Incertidumbre expandida de la longitud  $L_i$  del BPL  $i$ , obtenida de su certificado de calibración.

- $u_M$  = Incertidumbre típica de la corrección de la desviación de planitud de la MP, entre los puntos sobre los que se apoya la RS. Se obtiene del certificado de calibración de la MP.
- $U_M$  = Incertidumbre expandida de la corrección de la desviación de planitud de la MP, entre los puntos sobre los que se apoya la RS. Se obtiene del certificado de calibración de la MP.
- $u_o$  = Incertidumbre típica de la corrección de calibración obtenida del certificado de calibración del PD.
- $U_o$  = Incertidumbre expandida de la corrección de calibración obtenida del certificado de calibración del PD.
- $u_{\text{ROD}}$  = Incertidumbre típica de la diferencia de diámetros de los rodillos de la RS; se obtiene de su certificado de calibración.
- $U_{\text{ROD}}$  = Incertidumbre expandida de la diferencia de diámetros de los rodillos de la RS; se obtiene de su certificado de calibración.
- $u_Y$  = Incertidumbre típica de la distancia Y.
- $u_{\bar{Y}}$  = Incertidumbre típica de la lectura del COMP.
- $u_{\alpha}$  = Repetibilidad de las medidas de calibración del BPA.
- $x$  = Longitud entre marcas en la cara libre del BPA.
- $Y$  = Longitud obtenida sumando a la media de las lecturas del COMP, sus correspondientes correcciones.
- $Y_i$  = Lectura de orden  $i$  del comparador.
- $\bar{Y}$  = Media aritmética de las lecturas del comparador.
- $\alpha$  = Valor calculado del ángulo del BPA.
- $\alpha_o$  = Valor nominal del ángulo del BPA.
- $\alpha_{1i}$  = Lectura de orden  $i$  sobre la primera cara de medida del BPA.
- $\alpha_{2i}$  = Lectura de orden  $i$  sobre la segunda cara de medida del BPA.
- $\alpha_i$  = Valor angular de orden  $i$  del BPA.
- $\bar{\alpha}$  = Media aritmética de las medidas de calibración del BPA.
- $\beta$  = Ángulo medido con el COMP.
- $\beta_o$  = Ángulo materializado por la RS.
- $\beta_o^i$  = Valor nominal del ángulo del BPA a calibrar.
- $\nu_{\text{ef}}$  = Grados efectivos de libertad.

## 5. DESCRIPCIÓN

Los BPA deben estar identificados al menos con un NÚMERO DE SERIE (preferiblemente) y si es posible además con la MARCA y el MODELO (según [7]).

En caso de que no exista alguno de los datos antes citados, se puede proceder a la identificación del BPA de la mejor forma posible (por ejemplo mediante etiqueta fuertemente adherida al mismo, con



un código de identificación único) de forma que no haya duda alguna entre el equipo calibrado y su correspondiente certificado de calibración emitido.

Todos los patrones e instrumentos utilizados para esta calibración deberán tener trazabilidad hacia patrones nacionales o internacionales.

Los certificados de calibración de los patrones deberán contener al menos, la siguiente información:

1. Laboratorio emisor.
2. Identificación del equipo calibrado.
3. Fecha de emisión del certificado.
4. Condiciones ambientales.
5. Procedimiento de calibración.
6. Resultados obtenidos en la calibración.
7. Incertidumbre.
8. Declaración de trazabilidad.

### **5.1. Calibración con un plato divisor (D.05.02) en máquina medidora de tres coordenadas (D-02.07)**

Este procedimiento es el más sencillo y adecuado para la calibración de los BPA.

NOTA:

Las MMC modernas disponen de programas de medida y cálculo de ángulos; si estos tienen asociada una incertidumbre suficientemente pequeña, se pueden utilizar estas MMC para calibrar BPA; en este caso la forma de tomar las lecturas angulares sería la indicada por el manual de la MMC proporcionado por el fabricante, realizando los cálculos de forma análoga a lo que se expone sobre la calibración realizada como se indica en este apartado. No se puede dar un procedimiento general en este caso, dado lo específico que es cada programa y cada medidora.

#### **5.1.1. Equipos y materiales**

Para la calibración se utilizarán un PD con división de escala  $E \leq 1''$ , y una MMC sin ningún requerimiento especial dado que interviene como elemento auxiliar en la calibración.

Un termómetro o un registrador de temperatura con división de escala  $E \leq 1 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Como elementos auxiliares se utilizarán: además de la MMC, bridas, trapos y algún producto desengrasante, se suelen utilizar trapos de algodón y como desengrasante una mezcla de alcohol y éter al 50 %.

#### **5.1.2. Operaciones previas**

Limpiar los BPA a calibrar con un paño y algún producto desengrasante, asegurándose de que no quedan restos del paño sobre el BPA.

Realizar una inspección visual de los BPA a calibrar, para comprobar que no presentan golpes, deformaciones, oxidaciones, rayas, o cualquier otro defecto que imposibilite su uso.

Encender la MMC.

Bridar firmemente el BPA sobre el PD, apoyado en una de sus caras auxiliares (ver Figura 2).

Dejar que se estabilice térmicamente el BPA, al menos durante 30 min.

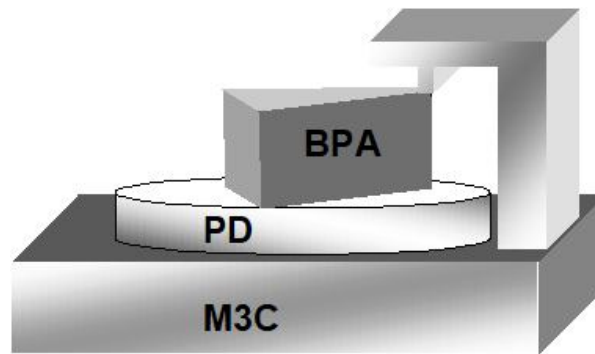


Figura 2: Disposición del BPA sobre el plato divisor de la MMC

Esta calibración es conveniente realizarla en salas de Metrología en las que se mantenga la temperatura dentro de  $20\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ .

La única magnitud de influencia a considerar en esta calibración es la temperatura. No es necesario realizar correcciones por temperatura, siempre que las condiciones ambientales de la sala se mantengan dentro del intervalo de temperaturas indicado en el párrafo anterior.

#### 5.1.3. Proceso de Calibración

Siempre que se pueda se trabajará con un palpador esférico y con la menor fuerza de contacto posible, al objeto de no rayar las caras de medida del BPA.

Mediante giros y traslaciones, alinear una de las caras de medida del BPA, para que quede paralela a uno de los ejes de la MMC.

Una vez alineada una de las caras de medida del BPA, tomar una primera lectura de la posición angular del PD.

Girar el PD el ángulo necesario para alinear la otra cara de medida del BPA respecto del mismo eje que se alineó la primera cara.

Una vez alineada la segunda cara de medida del BPA, tomar la segunda lectura de la posición angular del PD.

Se recomienda reiterar las operaciones antes indicadas, para obtener diez lecturas en cada una de las caras de medida del BPA.

#### 5.1.4. Toma y tratamiento de datos

Al iniciar la calibración se debe tomar la lectura de temperatura a la que se encuentra el laboratorio, durante la misma, se toman los datos:  $\alpha_{1i}$ , y  $\alpha_{2i}$ .

Se aplicará algún criterio de aceptación o rechazo de las medidas realizadas, bien sea de tipo estadístico (Ej. Q de Dixon, Test de Huber, Chauvenet etc.) o basado en la experiencia del responsable del laboratorio.

Se obtiene el ángulo del BPA mediante la ecuación siguiente:

$$\alpha_i = |\alpha_{1i} - \alpha_{2i}|$$

Calcular la media aritmética de las medidas de calibración del BPA, según la ecuación siguiente:

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i}{N}$$

Calcular la desviación típica experimental de las medidas de calibración del BPA, según la ecuación siguiente:

$$s_{\alpha} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\alpha_i - \bar{\alpha})^2}{N-1}}$$

Calcular la desviación típica de la media de las medidas de calibración del BPA, según la ecuación siguiente:

$$s_{\bar{\alpha}} = \frac{s_{\alpha}}{\sqrt{N}}$$

## 5.2. Calibración con regla de senos (D-05.03), bloques patrón longitudinales (D.01.02), comparador (D.03.01) ó (D.03.03), soporte de comparador (D.03.05) y mesa de planitud (D.06.05)

Este procedimiento se considera sustitutivo del indicado en el apartado 5.1 y se recomienda utilizar sólo en el caso de no poder usar el citado en el apartado 5.1. Es un procedimiento más complejo tanto en la manipulación como en el cálculo de resultados.

### 5.2.1. Equipos y materiales

Para la calibración se utilizarán los equipos que se indican a continuación:

Regla de senos cuya longitud entre ejes esté comprendida entre 300 mm y 500 mm.

Bloques patrón longitudinales de calidad 0 o superior, (según [8]).

Comparador mecánico o electrónico, recto o de palanca (suele ser más manejable a estos efectos el de palanca), con división de escala  $E \leq 0,001$  mm.

Mesa de planitud de acero fundido o granito, de calidad 0 o superior, según [9] o [10].

Un termómetro o un registrador de temperatura, con división de escala  $E \leq 1$  °C.

Como elementos auxiliares se utilizarán: una regla rígida con división de escala  $E \leq 1$  mm (D 02.01 según [5]), un soporte de comparador de base plana, cuya desviación de planitud sea  $D_p \leq 0,1$  mm, trapos y algún producto desengrasante; se suelen utilizar trapos de algodón y como desengrasante una mezcla de alcohol y éter al 50 %.

### 5.2.2. Operaciones previas

Limpiar los BPA a calibrar y el resto de patrones e instrumentos que intervienen en la calibración, con un paño y algún producto desengrasante, asegurándose de que no quedan restos del paño sobre el BPA.

Realizar una inspección visual de los BPA a calibrar, para comprobar que no presentan golpes, deformaciones, oxidaciones, rayas, o cualquier otro defecto que imposibilite su uso.

Calcular los BPL a emplear, en función de la distancia entre ejes de la RS y del ángulo del BPA a medir, de la siguiente manera:

A partir del valor nominal  $\alpha_0$  del BPA a calibrar se obtiene una longitud  $L'$  que permite obtener la longitud  $L$  más aproximada que pueda formarse con los BPL disponibles.

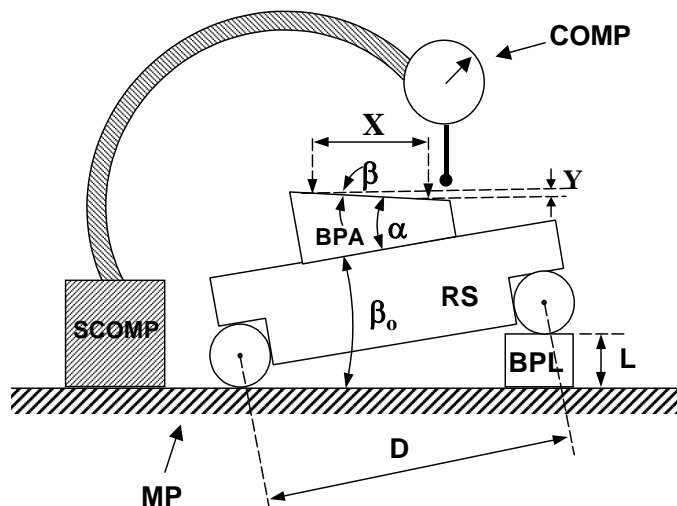
$$L' = D \cdot \text{sen } \alpha_0$$

Adherir los BPL entre sí y realizar el montaje que se indica en la Figura 3: el BPA se sitúa sobre la RS, con su ángulo en sentido opuesto al formado por la RS.

Colocar el COMP con su soporte sobre la mesa de planitud según se indica en la Figura 3.

Marcar sobre la cara libre del BPA la distancia  $X$  (la mayor posible); se puede hacer por ejemplo con dos trazos de rotulador de punta fina y que no dañe el BPA. Medir la distancia  $X$  con una regla rígida. No se requiere una gran exactitud en esta medida, ya que si por ejemplo se considera una longitud  $X$  palpada en la cara libre del BPA de 60 mm (lo cual puede ser una situación muy habitual), una diferencia de  $\pm 3$  mm en esta longitud, daría diferencias angulares menores de  $0,1''$ ; por tanto se consideran despreciables los errores cometidos en el marcado y palpado de la longitud  $X$ , si se mantiene dentro de los márgenes indicados, lo cual se garantiza perfectamente con cualquier regla rígida que cumpla lo indicado en el apartado 5.2.1.

Dejar que se estabilicen térmicamente todos los patrones e instrumentos que intervienen en la calibración, al menos durante 30 min.



**Figura 3: Montaje para la calibración**

Esta calibración es conveniente realizarla en salas de Metrología en las que se mantenga la temperatura dentro de  $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

La única magnitud de influencia a considerar en esta calibración es la temperatura. No es necesario realizar correcciones por temperatura, siempre que las condiciones ambientales de la sala se mantengan dentro del intervalo de temperaturas indicado en el párrafo anterior.

### 5.2.3. Proceso de Calibración

Poner en contacto el palpador del COMP con una de las marcas de la cara de medida libre del BPA y desplazarlo sobre ésta la distancia  $X$  (ver Figura 3). Anotar el desplazamiento  $Y_i$  del comparador al desplazarlo la distancia  $X$  citada.

Por comodidad para realizar las lecturas se debe poner el COMP a cero, palpando sobre el punto más bajo de la cara libre del BPA.

Se recomienda reiterar las operaciones antes indicadas, para obtener diez lecturas  $Y_i$  del COMP.

Aunque resulta muy laborioso, se recomienda desmontar los BPL y volver a adherirlos para cada reiteración de medida.

### 5.2.4. Toma y tratamiento de datos

Al iniciar la calibración se debe tomar la lectura de temperatura a la que se encuentra el laboratorio, junto a los valores de  $L$ ,  $X$  y  $D$ . También se tomarán las lecturas  $Y_i$  del comparador.

Se aplicará algún criterio de aceptación o rechazo de las medidas realizadas, bien sea de tipo estadístico (Ej. Q de Dixon, Test de Huber, Chauvenet etc.) o basado en las experiencia del jefe del laboratorio.

Calcular la media aritmética de las lecturas del COMP, según la ecuación siguiente:

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^N Y_i}{N}$$

Calcular la desviación típica experimental de las lecturas realizadas con el COMP, según la ecuación siguiente:

$$s_Y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}{N - 1}}$$

Calcular la desviación típica de la media de las lecturas del COMP, según la ecuación siguiente:

$$s_{\bar{Y}} = \frac{s_Y}{\sqrt{N}}$$

Calcular el ángulo formado con la RS con los BPL disponibles, mediante la expresión siguiente:

$$\beta_o = \arcsen \frac{L}{D}$$

Calcular el ángulo  $\beta$  mediante la ecuación siguiente:

$$\beta = \text{arc tg } \frac{Y}{X}$$

Calcular el ángulo  $\alpha$  mediante la ecuación siguiente:

$$\alpha = \beta_o + \beta = \text{arc sen } \frac{L}{D} + \text{arc tg } \frac{Y}{X}$$

## 6. RESULTADOS

Los cálculos de incertidumbre de este apartado, se realizan de acuerdo con los criterios de las referencias: [2], [3], [4] y [5].

### 6.1. Cálculo de incertidumbres

En los apartados siguientes, se indicará la forma de realizar el cálculo de incertidumbre, para cada uno de los procedimientos expuestos anteriormente.

#### 6.1.1. Calibración con plato divisor en máquina medidora de tres coordenadas

La desviación al nominal del ángulo del BPA, viene dada por la expresión siguiente:

$$d_o = \bar{\alpha} + C_o + C_d + C_E - \alpha_o$$

NOTA:

Una construcción muy habitual de BPA, es aquella en la que las caras de medida son un cateto y la hipotenusa de un triángulo rectángulo.

Partiendo de la hipótesis de dilatación lineal, y suponiendo que la temperatura del BPA varía en el intervalo indicado en el párrafo 5.1.2 de  $\pm 5$  °C, la variación en el ángulo del BPA sería de  $\pm (1 \cdot 10^{-12})''$  lo cual resulta despreciable. En consecuencia y siempre que la temperatura se mantenga dentro del intervalo indicado de  $\pm 5$  °C, no es necesario aplicar ninguna corrección por esta magnitud de influencia.

Aplicando la ley de propagación de incertidumbres y considerando que todas las magnitudes de entrada son independientes, resulta:

$$u_{d_o} = \sqrt{u_{\alpha}^2 + u_o^2 + u_d^2 + u_E^2}$$

La repetibilidad de las medidas de calibración " $u_{\alpha}$ ", es igual a la desviación típica de la media calculada en el apartado 5.1.4.

La corrección de calibración ( $C_o$ ) del PD, así como su incertidumbre típica ( $u_o$ ); se obtienen del certificado de calibración del mismo.

La corrección por deriva del PD se introduce considerando una corrección de media nula, con distribución uniforme de semi-intervalo  $|D_i - D_{i-1}|$  (este valor se obtiene de los dos certificados de calibraciones precedentes consecutivas del PD, que den lugar a una mayor diferencia entre desviaciones), en consecuencia su desviación típica es:

$$u_d = \frac{|D_i - D_{i-1}|}{\sqrt{3}}$$

La corrección por división de escala del PD, se introduce con una corrección de media nula y distribución rectangular de semi-intervalo  $E/2$  (siendo  $E$  la división de escala del PD), puesto que  $\alpha_i$  se obtiene como diferencia de dos lecturas, y la convolución de dos distribuciones rectangulares iguales es una distribución triangular, su desviación típica viene dada por la ecuación siguiente:

$$u_E = \frac{E}{\sqrt{6}}$$

Los estimadores de las variables y sus incertidumbres típicas se incluyen en la tabla 2 cuyo formato está recomendado (según [3]).

| Magnitud $X_i$ | Estimación $x_i$            | Incertidumbre típica $u(x_i)$                                | Distribución de probabilidad | Coefficiente de sensibilidad $c_i$ | Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$ |
|----------------|-----------------------------|--|------------------------------|------------------------------------|--|
| $\bar{\alpha}$ | $\bar{\alpha}$              | $\frac{s_\alpha}{\sqrt{N}}$                                  | normal                       | 1                                  | $\frac{s_\alpha}{\sqrt{N}}$              |
| $C_o$          | $C_o$                       | $\frac{u_o}{k}$  | normal                       | 1                                  | $\frac{u_o}{k}$                          |
| $C_d$          | 0                           | $\frac{ D_i - D_{i-1} }{\sqrt{3}}$                           | rectangular                  | 1                                  | $\frac{ D_i - D_{i-1} }{\sqrt{3}}$       |
| $C_E$          | 0                           | $\frac{E}{\sqrt{6}}$   | triangular                   | 1                                  | $\frac{E}{\sqrt{6}}$                     |
| $d_o$          | $d_o = \sum x_i - \alpha_o$ | <b>Incertidumbre típica combinada (<math>u_{d_o}</math>)</b> |                              |                                    | $u_{d_o} = \sqrt{\sum u_i^2(y)}$         |
|                |                             | <b>Incertidumbre expandida (<math>U_{d_o}</math>)</b>        |                              |                                    | $U_{d_o} = k \cdot u_{d_o}$              |

**Tabla 2: Contribuciones a la incertidumbre combinada en la calibración del BPA con PD en MMC.**

La incertidumbre expandida queda por tanto:

$$U_{d_o} = k \cdot \sqrt{\frac{s_\alpha^2}{N} + \frac{u_o^2}{k^2} + \frac{|D_i - D_{i-1}|^2}{3} + \frac{E^2}{6}}$$

Dado que en la mayor parte de los casos, las contribuciones con una distribución de probabilidad normal serán las que tienen más peso, el factor de cobertura  $k$  será igual a 2; de no ser así se calculan los grados efectivos de libertad mediante la ecuación de Welch-Satterthwaite (ref. [4]), la cual en este caso sería:

$$v_{ef} = \frac{u_{d_o}^4}{\left(\frac{s_\alpha}{\sqrt{N}}\right)^4 \cdot N - 1}$$

dado que para el resto de contribuciones el número de grados efectivos de libertad sería  $\infty$ .

Una vez conocidos los grados efectivos de libertad, entrando en la tabla E.1 de la ref. [4] se obtiene el valor de  $k$ .

#### 6.1.2. Calibración con regla de senos, bloques patrón longitudinales, comparador, soporte de comparador y mesa de planitud

La desviación al nominal del ángulo del BPA, viene dada por la expresión siguiente:

$$d_o = \alpha - \alpha_o = \left( \arcsen \frac{L}{D} + \arctg \frac{Y}{X} \right) - \alpha_o$$

Aplicando la ley de propagación de incertidumbres y considerando que todas las magnitudes de entrada son independientes, resulta:

$$u_{d_o}^2 = \left( \frac{\partial \alpha}{\partial L} \right)^2 \cdot u_L^2 + \left( \frac{\partial \alpha}{\partial D} \right)^2 \cdot u_D^2 + \left( \frac{\partial \alpha}{\partial Y} \right)^2 \cdot u_Y^2 + \left( \frac{\partial \alpha}{\partial X} \right)^2 \cdot u_X^2$$

En esta ecuación se puede hacer una simplificación consistente en despreciar el cuarto término correspondiente a  $X$ , por las razones expuestas en el apartado 5.2.2, considerando en los cálculos que siguen  $X$  como una constante.

Calculando las derivadas parciales resulta:

$$u_{d_o}^2 = \left( \frac{1}{\sqrt{D^2 - L^2}} \right)^2 \cdot u_L^2 + \left( \frac{-L}{D \cdot \sqrt{D^2 - L^2}} \right)^2 \cdot u_D^2 + \left( \frac{X}{X^2 + Y^2} \right)^2 \cdot u_Y^2$$

No se considera ninguna corrección por temperatura, por las razones expuestas en la nota del párrafo 6.1.1.

Tampoco se considera ninguna corrección por deriva de la MP, puesto que en este tipo de equipos, se puede producir un desgaste por el uso, el cual se detectará en las sucesivas calibraciones, siendo por tanto las variaciones de planitud debidas al efecto citado y no a una deriva en el tiempo.

La longitud  $L$  viene dada por la siguiente expresión:

$$L = \sum L_i + C_{dB} + C_M + C_{ROD}$$

En el caso de haber utilizado un solo BPL, el sumatorio de la ecuación anterior, quedaría reducido a la longitud del único BPL usado.

Aplicando la ley de propagación de incertidumbres y considerando que todas las magnitudes de entrada son independientes, resulta:

$$u_L^2 = \sum \left( \frac{\partial L}{\partial L_i} \right)^2 \cdot u_{L_i}^2 + \left( \frac{\partial L}{\partial C_{dB}} \right)^2 \cdot u_{dB}^2 + \left( \frac{\partial L}{\partial C_M} \right)^2 \cdot u_M^2 + \left( \frac{\partial L}{\partial C_{ROD}} \right)^2 \cdot u_{ROD}^2$$

Calculando las derivadas parciales, resulta:



$$u_L^2 = \sum u_{L_i}^2 + u_{dB}^2 + u_M^2 + u_{ROD}^2$$

La incertidumbre típica  $u_{L_i}$  de la longitud  $L_i$  de cada BPL, se tomará de su certificado de calibración:

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

La corrección por deriva de los BPL, se estima a partir de los datos de la tabla 2 para calidad 0 según [8], considerando una corrección de media nula, con distribución rectangular de semi-intervalo 0,030  $\mu\text{m}$ . Su incertidumbre típica viene dada por la ecuación siguiente:

$$u_{dB} = \sqrt{N_B} \frac{0,030}{\sqrt{3}} \mu\text{m}$$

La corrección de la desviación de planitud de la MP entre los puntos sobre los que se apoya la RS, se obtiene a partir de la diferencia de cotas entre dichos puntos; esta diferencia debe figurar entre los datos tomados durante la calibración de la MP.

La incertidumbre  $u_M$  de  $C_M$ , se tomará de su certificado de calibración:

$$u_M = \frac{U_M}{k}$$

La corrección  $C_{ROD}$  por diferencia de diámetros de los rodillos de la RS, se toma de su certificado de calibración, así como la incertidumbre  $u_{ROD}$  de  $C_{ROD}$ :

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

Sustituyendo cada una de las incertidumbres típicas en la ecuación de  $u_L$  resulta:

$$u_L^2 = \sum \frac{U_{L_i}^2}{k^2} + N_B \frac{(0,030)^2}{3} + \frac{U_M^2}{k^2} + \frac{U_{ROD}^2}{k^2}$$

La distancia  $D$  viene dada por la siguiente expresión:

$$D = D_o + C_{dR}$$

Aplicando la ley de propagación de incertidumbres y considerando que todas las magnitudes de entrada son independientes, resulta:

$$u_D^2 = \left( \frac{\partial D}{\partial D_o} \right)^2 \cdot u_{D_o}^2 + \left( \frac{\partial D}{\partial C_{dR}} \right)^2 \cdot u_{dR}^2$$

Calculando las derivadas parciales, resulta:

$$u_D^2 = u_{D_o}^2 + u_{dR}^2$$

La incertidumbre típica ( $u_{D_o}$ ) de la distancia entre ejes de la RS, se tomará de su certificado de calibración:

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

La corrección por deriva de la distancia  $D$  entre ejes de la RS se introduce considerando una corrección de media nula, con distribución uniforme de semi-intervalo  $|D_j - D_{j-1}|$  (este valor se obtiene de los dos certificados de calibraciones precedentes consecutivas que den lugar a una mayor diferencia de distancias entre ejes), en consecuencia su desviación típica es:

$$u_{dR} = \frac{|D_j - D_{j-1}|}{\sqrt{3}}$$

Sustituyendo las incertidumbres típicas en la ecuación de  $u_D$ , resulta:

$$u_D^2 = \frac{U_{D_o}^2}{k^2} + \frac{|D_j - D_{j-1}|^2}{3}$$

La distancia  $Y$  viene dada por la siguiente expresión:

$$Y = \bar{Y} + C_c + C_{dC} + C_{EC}$$

Aplicando la ley de propagación de incertidumbres y considerando que todas las magnitudes de entrada son independientes, resulta:

$$u_Y^2 = \left(\frac{\partial Y}{\partial \bar{Y}}\right)^2 \cdot u_{\bar{Y}}^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial C_c}\right)^2 \cdot u_{C_c}^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial C_{dC}}\right)^2 \cdot u_{dC}^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial C_{EC}}\right)^2 \cdot u_{EC}^2$$

Calculando las derivadas parciales, resulta:

$$u_Y^2 = u_{\bar{Y}}^2 + u_{C_c}^2 + u_{dC}^2 + u_{EC}^2$$

No se considera corrección por la desviación de planitud del SCOMP, puesto que una vez posicionado el COMP, la distancia entre la punta del palpador y la base del SCOMP se mantiene constante al desplazar este último, siendo las variaciones en las indicaciones del COMP debidas a la pequeña cuña que forma el BPA.

La incertidumbre típica  $u_{\bar{Y}}$  de la media de las lecturas  $\bar{Y}$ , realizadas con el COMP, es la desviación típica de la media obtenida en el párrafo 5.2.4.

La corrección de calibración  $C_c$  del COMP, se toma de su certificado de calibración.

La incertidumbre típica ( $u_{C_c}$ ) de la corrección de calibración del comparador  $C_c$ , se tomará de su certificado de calibración:

$$u_c = \frac{U_c}{k}$$

La corrección por deriva del COMP se introduce considerando una corrección de media nula, con distribución uniforme de semi-intervalo  $|D_j - D_{j-1}|$  (este valor se obtiene de los dos certificados de calibraciones precedentes consecutivas que den lugar a una mayor diferencia entre desviaciones), en consecuencia su desviación típica es:

$$u_{dC} = \frac{|D_c - D_{c-1}|}{\sqrt{3}}$$

La corrección por división de escala del COMP, se introduce con una corrección de media nula y distribución rectangular de semi-intervalo  $E/2$  (siendo  $E$  la división de escala del COMP), puesto que  $Y$  se obtiene como diferencia de dos lecturas, y la convolución de dos distribuciones rectangulares iguales es una distribución triangular, su desviación típica viene dada por la ecuación siguiente:

$$u_{EC} = \frac{E}{\sqrt{6}}$$

Sustituyendo las incertidumbres típicas en la ecuación de  $u_y$ , resulta:

$$u_y^2 = \frac{s_y^2}{N} + \frac{U_c^2}{k^2} + \frac{|D_c - D_{c-1}|^2}{3} + \frac{E^2}{6}$$

Los estimadores de las variables y sus incertidumbres típicas se incluyen en las tablas 3, 4, 5 y 6, cuyo formato está recomendado según [3].

| Magnitud $X_i$ | Estimación $x_i$ | Incertidumbre típica $u(x_i)$                            | Distribución de probabilidad | Coficiente de sensibilidad $g_i$ | Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$  |
|----------------|------------------|--|------------------------------|----------------------------------|---|
| $\sum L_i$     | $\sum L_i$       | $\sum u_{L_i}$   | normal                       | 1                                | $\sum \frac{U_{L_i}}{k}$                  |
| $C_{dB}$       | 0                | $\frac{\sqrt{N_B} \cdot 0,030}{\sqrt{3}}$                | (1)                          | 1                                | $\frac{\sqrt{N_B} \cdot 0,030}{\sqrt{3}}$ |
| $C_M$          | $C_M$            | $\frac{U_M}{k}$  | rectangular                  | 1                                | $\frac{U_M}{k}$                           |
| $C_{ROD}$      | $C_{ROD}$        | $\frac{U_{ROD}}{k}$                                      | triangular                   | 1                                | $\frac{U_{ROD}}{k}$                       |
| $L$            | $L = \sum x_i$   | <b>Incertidumbre típica combinada (<math>u_L</math>)</b> |                              |                                  | $u_L = \sqrt{\sum u_i^2(y)}$              |

(1) Si se usan dos BPL la distribución resultante sería una triangular; si se usan más bloques, la distribución se aproximará cada vez más a una normal.

**Tabla 3: Contribuciones a la incertidumbre combinada de  $L$ , en la calibración del BPA con PD en MMC**

| Magnitud $X_i$ | Estimación $x_i$ | Incertidumbre típica $u(x_i)$            | Distribución de probabilidad | Coficiente de sensibilidad $c_i$ | Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$ |
|----------------|------------------|--|------------------------------|----------------------------------|--|
| $D_o$          | $D_o$            | $\frac{U_{D_o}}{k}$                      | normal                       | 1                                | $\frac{U_{D_o}}{k}$                      |
| $C_{dB}$       | 0                | $\frac{ D_j - D_{j-1} }{\sqrt{3}}$       | rectangular                  | 1                                | $\frac{ D_j - D_{j-1} }{\sqrt{3}}$       |
| $D$            | $D = \sum x_i$   | Incertidumbre típica combinada ( $u_D$ ) |                              |                                  | $u_D = \sqrt{\sum u_i^2(y)}$             |

Tabla 4: Contribuciones a la incertidumbre combinada de  $D$ , en la calibración del BPA con PD en MMC

| Magnitud $X_i$ | Estimación $x_i$ | Incertidumbre típica $u(x_i)$            | Distribución de probabilidad | Coficiente de sensibilidad $c_i$ | Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$ |
|----------------|------------------|--|------------------------------|----------------------------------|--|
| $\bar{Y}$      | $\bar{Y}$        | $\frac{s_Y}{\sqrt{N}}$                   | normal                       | 1                                | $\frac{s_Y}{\sqrt{N}}$                   |
| $C_c$          | $C_c$            | $\frac{U_c}{k}$                          | normal                       | 1                                | $\frac{U_c}{k}$                          |
| $C_{dc}$       | 0                | $\frac{ D_c - D_{c-1} }{\sqrt{3}}$       | rectangular                  | 1                                | $\frac{ D_c - D_{c-1} }{\sqrt{3}}$       |
| $C_{EC}$       | 0                | $\frac{E}{\sqrt{6}}$                     | triangular                   | 1                                | $\frac{E}{\sqrt{6}}$                     |
| $Y$            | $Y = \sum x_i$   | Incertidumbre típica combinada ( $u_Y$ ) |                              |                                  | $u_Y = \sqrt{\sum u_i^2(y)}$             |

Tabla 5: Contribuciones a la incertidumbre combinada de  $Y$ , en la calibración del BPA con PD en MMC

| Magnitud $X_i$ | Estimación $x_i$          | Incertidumbre típica $u(x_i)$                | Distribución de probabilidad | Coficiente de sensibilidad $c_i$      | Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$        |
|----------------|---------------------------|--|------------------------------|---------------------------------------|---|
| $L$            | $L$                       | $u_L$  | normal                       | $\frac{1}{\sqrt{D^2 - L^2}}$          | $\frac{1}{\sqrt{D^2 - L^2}} \cdot u_L$          |
| $D$            | $D$                       | $u_D$  | normal                       | $\frac{-L}{D \cdot \sqrt{D^2 - L^2}}$ | $\frac{-L}{D \cdot \sqrt{D^2 - L^2}} \cdot u_D$ |
| $Y$            | $Y$                       | $u_Y$  | normal                       | $\frac{X}{X^2 + Y^2}$                 | $\frac{X}{X^2 + Y^2} \cdot u_Y$                 |
| $d_o$          | $d_o = \alpha - \alpha_o$ | Incertidumbre típica combinada ( $u_{d_o}$ ) |                              |                                       | $u_{d_o} = \sqrt{\sum u_i^2(y)}$                |
|                |                           | Incertidumbre expandida ( $U_{d_o}$ )        |                              |                                       | $U_{d_o} = k \cdot u_{d_o}$                     |

Tabla 6: Contribuciones a la incertidumbre combinada de  $d_o$ , en la calibración del BPA con PD en MMC

La incertidumbre expandida queda por tanto como:

$$U_{d_o} = k \cdot \sqrt{\frac{1}{D^2 - L^2} \cdot u_L^2 + \frac{L^2}{D^2 \cdot (D^2 - L^2)} \cdot u_D^2 + \frac{X^2}{(X^2 + Y^2)^2} \cdot u_Y^2} =$$

$$= k \cdot \left[ \frac{1}{D^2 - L^2} \cdot \left( \sum \frac{U_{L_i}^2}{k^2} + N_B \frac{0,030^2}{3} + \frac{U_M^2}{k^2} + \frac{U_{ROD}^2}{k^2} \right) + \right. \\ \left. + \frac{L^2}{D^2 \cdot (D^2 - L^2)} \cdot \left( \frac{U_{D_o}^2}{k^2} + \frac{|D_j - D_{j-1}|^2}{3} \right) + \right. \\ \left. + \frac{X^2}{(X^2 + Y^2)^2} \cdot \left( \frac{s_Y^2}{N} + \frac{U_C^2}{k^2} + \frac{|D_C - D_{C-1}|^2}{3} + \frac{E^2}{6} \right) \right]^{1/2}$$

Dado que en la mayor parte de los casos, las contribuciones con una distribución de probabilidad normal serán las que tienen más peso, el factor de cobertura  $k$  será igual a 2; de no ser así se calculan los grados efectivos de libertad mediante la ecuación de Welch-Satterthwaite (ref. [4]), la cual en este caso sería:

$$v_{ef} = \frac{u_{d_o}^4}{\left( \frac{X}{X^2 + Y^2} \cdot \frac{s_Y}{\sqrt{N}} \right)^4 \cdot N - 1}$$

dado que para el resto de contribuciones el número de grados efectivos de libertad sería  $\infty$ .

Una vez conocidos los grados efectivos de libertad, entrando en la tabla de la citada (ref. [4]), se obtiene el valor de  $k$ .

## 6.2. Interpretación de resultados

En la mayor parte de los casos, las contribuciones de incertidumbre que presentan una distribución normal serán las que tienen más peso y las otras son estimaciones tipo B con  $\infty$  grados de libertad. Por tanto, para una probabilidad del 95 %, el factor de cobertura  $k$  será igual a 2.

En determinados casos en los que alguna contribución de incertidumbre sea dominante sobre las demás y su distribución no sea normal, sería necesario calcular la distribución que corresponde al resultado de la calibración y su correspondiente factor de cobertura para una probabilidad del 95 %.

Habitualmente se realizan los cálculos con una cifra decimal más de la división de escala del instrumento utilizado, redondeando al final, según [2], el valor del ángulo y su incertidumbre a un múltiplo entero de la división de escala del citado instrumento.

En los certificados de calibración de laboratorios de calibración acreditados, como mínimo, debe figurar, de acuerdo con lo establecido en [7], el valor convencionalmente verdadero o la desviación al nominal del ángulo del BPA y la incertidumbre expandida del mismo con su correspondiente factor de cobertura  $k$ .

### 6.2.1. Períodos de recalibración

A título orientativo, se considera adecuado recalibrar los BPA cada 36 meses.

En cualquier caso este período es una mera recomendación, siendo el usuario de los BPA quien debe fijar el valor que considere oportuno.

El período de recalibración antes indicado, se debería reducir en el caso de que se presente alguna de las circunstancias siguientes:

- Elevada frecuencia de utilización.
- Condiciones de empleo desfavorables (personal poco cualificado, ambientes sucios, uso al aire libre etc.).
- Cuando se necesiten requisitos especiales de seguridad (Defensa, Sanidad, Justicia, etc.).

Siempre debe procederse a una recalibración de los BPA, cuando los resultados que se estén obteniendo hagan dudar al usuario del correcto estado de los mismos.

### 6.2.2. Calidades

Aunque no existe normalización sobre los BPA, a título experimental se sugieren, en función de las desviaciones al nominal obtenidas aumentadas en la incertidumbre de calibración, las calidades que figuran en la tabla 7.

| CALIDAD | DESVIACIÓN AL NOMINAL |
|---------|-----------------------|
| 1       | 2"                    |
| 2       | 10"                   |
| 3       | 30"                   |

**Tabla 7: Calidades experimentales de BPA**

Si se quisiera determinar el cumplimiento de estas calidades, habría que tener en cuenta las incertidumbres de calibración.

## 7. REFERENCIAS

- [1] Procedimiento para la elaboración de procedimientos de calibración. Grupo de Trabajo MINER-CEM. Ed. 2, Tres Cantos, Madrid. Año 2000.
- [2] Vocabulario Internacional de Metrología. Conceptos fundamentales y generales y términos asociados. 3ª edición 2012 (Ed. VIM 2008 con inclusión de pequeñas correcciones), Centro Español de Metrología, 2012.
- [3] Evaluación de datos de medición. Guía para la expresión de la incertidumbre de medida., 3ª ed. en español (traducción de 1ª ed. 2008 en inglés), Centro Español de Metrología, 2009, NIPO: 706-09-002-6.
- [4] Guide EA-4/02 M: 2013, Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration, Sept. 2013, rev. 01.
- [5] Clasificación de Instrumentos de Metrología Dimensional. 1ª ed. Centro Español de Metrología, 2005, NIPO: 165-02-003-4.

- [6] Proceso de calibración D-054 para bloques patrón angulares D-04.02. Dirección General de Política Tecnológica del Ministerio de Industria y Energía. Sistema de Calibración Industrial (SCI), Edición inicial Diciembre de 1988.
- [7] Criterios específicos de acreditación. Elaboración de certificados de calibración. CEA-ENAC-LC/01, Rev. 3, Entidad Nacional de Acreditación (ENAC), Febrero 1998.
- [8] Norma UNE-EN ISO 3650:2000, Especificación geométrica de productos (GPS). Patrones de longitud. Bloques patrón. (ISO 3650:1998).
- [9] UNE 82309-1:1999, Mesas de planitud. Parte 1: Acero fundido.
- [10] UNE 82309-2:1997, Mesas de planitud. Parte 2: Granito.

## 8. ANEXOS

### ANEXO I. EJEMPLOS DE APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DESCRITO

#### I.1. Calibración con plato divisor en máquina medidora de tres coordenadas

Se calibra un BPA de las siguientes características:

- Ángulo nominal  $30^\circ$ .
- Material del BPA: acero.
- El BPA es un prisma recto en el que las caras de medida son un cateto y la hipotenusa.

La calibración se realiza con un plato divisor de las siguientes características:

- De eje vertical.
- Campo de medida  $360^\circ$ .
- División de escala  $E = 1''$ .
- Dispone de puesta a cero en cualquier punto de su escala angular.
- La corrección de calibración obtenida del certificado de calibración del PD es:  $C_0 = 0$ .
- La incertidumbre expandida de la corrección de calibración del PD obtenida de su último certificado de calibración es:  $U_0 = 2''$  (para  $k = 2$ ).
- De calibraciones anteriores del PD se dispone de los siguientes datos:  $D_i = 0$  y  $D_{i-1} = 0$ .

Se realiza la calibración de la forma descrita en el apartado 5.1.3, obteniéndose las lecturas y resultados que se indican en la tabla 8.

La temperatura durante la calibración se mantiene en  $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ .

| Lecturas angulares |                   | Valor del ángulo  |
|--------------------|-------------------|-------------------|
| $\alpha_{1i}$      | $\alpha_{2i}$     | $\alpha_i$        |
| $0^\circ 0' 0''$   | $30^\circ 0' 5''$ | $30^\circ 0' 5''$ |
| $0^\circ 0' 0''$   | $30^\circ 0' 7''$ | $30^\circ 0' 7''$ |
| $0^\circ 0' 0''$   | $30^\circ 0' 5''$ | $30^\circ 0' 5''$ |
| $0^\circ 0' 0''$   | $30^\circ 0' 6''$ | $30^\circ 0' 6''$ |
| $0^\circ 0' 0''$   | $30^\circ 0' 5''$ | $30^\circ 0' 5''$ |
| $0^\circ 0' 0''$   | $30^\circ 0' 5''$ | $30^\circ 0' 5''$ |

| Lecturas angulares                 |           | Valor del ángulo |
|------------------------------------|-----------|------------------|
| 0° 0' 0"                           | 30° 0' 6" | 30° 0' 6"        |
| 0° 0' 0"                           | 30° 0' 7" | 30° 0' 7"        |
| 0° 0' 0"                           | 30° 0' 5" | 30° 0' 5"        |
| 0° 0' 0"                           | 30° 0' 5" | 30° 0' 5"        |
| Media ( $\bar{\alpha}$ )           |           | 30° 0' 5,6"      |
| Desviación típica ( $s_{\alpha}$ ) |           | 0,84"            |

**Tabla 8: Toma de datos y cálculos realizados**

La desviación al nominal del ángulo del BPA, viene dada por la expresión siguiente:

$$d_o = \bar{\alpha} + C_o + C_d + C_E - \alpha_o = 30^{\circ} 0' 5,6'' + 0 + 0 + 0 - 30^{\circ} 0' 0'' \approx +6''$$

El redondeo realizado de 0,4" se sumará a la incertidumbre final.

La incertidumbre expandida se calcula según lo indicado en el apartado 6.1.1.

Realizando los cálculos indicados en la tabla 2 del apartado 6.1.1, se obtienen los resultados de la tabla 9.

| Magnitud $X_i$ | Estimación $x_i$ | Incertidumbre típica $u(x_i)$                                | Distribución de probabilidad | Coficiente de sensibilidad $c_i$ | Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$ |
|----------------|------------------|--|------------------------------|----------------------------------|--|
| $\bar{\alpha}$ | 30° 0' 6"        | 0,27   | normal                       | 1                                | 0,27                                     |
| $C_o$          | 0                | 1  | normal                       | 1                                | 1  |
| $C_d$          | 0                | 0,14   | rectangular                  | 1                                | 0,14                                     |
| $C_E$          | 0                | 0,40   | triangular                   | 1                                | 0,40                                     |
| $d_o$          | 6"               | <b>Incertidumbre típica combinada (<math>u_{d_o}</math>)</b> |                              |                                  | 1,11                                     |
|                |                  | <b>Incertidumbre expandida (<math>U_{d_o}</math>)</b>        |                              |                                  | <b>2,22</b>                              |

**Tabla 9: Contribuciones a la incertidumbre combinada en la calibración del BPA**

La incertidumbre expandida queda, una vez redondeada:

$$U_{d_o} = 2,22'' + 0,4'' = 2,62'' \approx 3''$$

Dado que las contribuciones de incertidumbre que presentan una distribución normal, son las que más peso tienen, el factor de cobertura  $k$  es igual a 2; no obstante, a efectos didácticos del ejemplo, calculamos  $k$  a partir del resultado de la ecuación de Welch-Satterthwaite (ref. [4]):

$$v_{ef} = \frac{1,11^4}{\frac{0,27^4}{10-1}} = 2\,571$$

De aquí, entrando en la tabla E.1 de la ref. [4], se obtiene el valor de  $k$ . En este caso  $k = 2$ .



En resumen:

$$d_o = 6'' \pm 3''$$

En consecuencia, según lo indicado en el apartado 6.2.2, el BPA se encuentra en calidad 2.

## I.2. Calibración con regla de senos, bloques patrón longitudinales, comparador, soporte de comparador y mesa de planitud

Se calibra un BPA de las siguientes características:

- Ángulo nominal 5°.
- Material del BPA: acero.
- El BPA es un prisma recto en el que las caras de medida son un cateto y la hipotenusa.

La calibración se realiza con: regla de senos, bloques patrón longitudinales, comparador, soporte de comparador y mesa de planitud, las características de estos equipos son las siguientes:

Regla de senos:

- La distancia nominal entre los ejes es:  $d = 500$  mm.
- Los resultados del certificado de su última calibración dan la distancia entre ejes siguiente:  $D_o = D_j = 500,002$  mm, con una incertidumbre expandida  $U_{D_o} = \pm 0,004$  mm (para  $k = 2$ ).
- Los resultados del certificado de su penúltima calibración dan la distancia entre ejes siguiente:  $D_{j-1} = 500,003$  mm, con una incertidumbre expandida  $U_{D_o} = \pm 0,004$  mm (para  $k = 2$ ).
- La diferencia de diámetros entre rodillos de la RS es  $C_{ROD} = 0$ , con una incertidumbre expandida  $U_{ROD} = 0,2$   $\mu\text{m}$  (para  $k = 2$ ).

Bloques patrón longitudinales:

- Juego de BPL de calidad 0, los certificados de su última calibración proporcionan para cada bloque su desviación al nominal y la diferencia de longitudes, su incertidumbre expandida viene dada por la expresión siguiente:

$$U = (0,03 + 0,2 \cdot L_o) \mu\text{m} \text{ (para } k = 2 \text{ y } L_o \text{ en m)}$$

- Los resultados del certificado de la última calibración de los BPL, se recogen en la tabla 10, estando expresadas sus incertidumbres expandidas para  $k = 2$ .

| Nominal (mm)   | Última calibración (mm) |                             |
|----------------|-------------------------|-----------------------------|
|                | Longitud $L_i$ (mm)     | $U_{L_i}$ ( $\mu\text{m}$ ) |
| 1,008          | 1,008 05                | 0,05                        |
| 1,070          | 1,070 03                | 0,05                        |
| 1,500          | 1,500 07                | 0,05                        |
| 40,000         | 40,000 11               | 0,06                        |
| $L_o = 43,578$ | $\sum L_i = 43,578 26$  |                             |

**Tabla 10: Datos del certificado de calibración de los BPL**

Comparador:

- Comparador electrónico de palanca.
- Campo de medida  $C = 6 \mu\text{m}$ .
- División de escala del comparador  $E = 0,1 \mu\text{m}$ .
- La corrección de calibración obtenida del certificado de calibración del COMP es:  $C_c = 0$ .
- La incertidumbre expandida de la corrección de calibración del COMP, obtenida de su último certificado de calibración es:  $U_c = 0,2 \mu\text{m}$  (para  $k = 2$ ).
- De calibraciones anteriores del COMP se dispone de los siguientes datos:  $D_c = 0,1 \mu\text{m}$  y  $D_{c_1} = 0,2 \mu\text{m}$ .

Soporte de comparador:

- De acero, con base plana rectangular de 250 mm x 150 mm.
- Los resultados del certificado de su última calibración dan una desviación de planitud:  $D_p = 0,004 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$  (para  $k = 2$ ).

Mesa de planitud:

- De granito rectangular de 1 000 mm x 600 mm y calidad 0.
- Los resultados del certificado de su última calibración dan para dos puntos situados a una distancia de 500 mm en la zona central de la mesa, una diferencia de cotas  $C_M = 0,004 \text{ mm}$  con una incertidumbre expandida  $U_M = 4 \mu\text{m}$  (para  $k = 2$ ).

Regla de trazos:

- Campo de medida  $C = 300 \text{ mm}$ .
- División de escala  $E = 1 \text{ mm}$ .
- Los resultados del certificado de su última calibración dan una incertidumbre expandida  $U = 1 \text{ mm}$  (para  $k = 2$ ).

Se realiza la calibración en la forma descrita en el apartado 5.2.3, obteniéndose los resultados que se indican a continuación:

La temperatura durante la calibración se mantiene en  $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Se calcula previamente la longitud  $L'$  con la que debe calzarse la regla de senos, para formar el ángulo  $\alpha_0 = 5^\circ$ .

$$L' = D \cdot \text{sen } \alpha_0 = 500,002 \cdot \text{sen } 5^\circ = 43,578\,046 \text{ mm}$$

Considerando el valor de  $L'$  se decide adherir 4 BPL ( $N_b = 4$ ) de los siguientes nominales:

1,008 mm, 1,070 mm, 1,500 mm y 40,000 mm

La suma de las longitudes de los BPL es:  $\sum L_i = 43,578\,26 \text{ mm}$ , lo cual permite formar con la regla de senos un ángulo de:

$$\beta_o = \text{arc sen } \frac{L}{D} = \text{arc sen } \frac{43,578\ 26}{500,002} = 5^\circ\ 0'\ 0,09''$$

Una vez realizados estos cálculos, se procede a realizar el montaje de la Figura 3.

El BPA tiene una cara libre de medida de unos 65 mm de larga, sobre la que se marca una distancia  $X = 60$  mm, siendo esta última longitud sobre la que se realizan los palpados con el comparador, el cual se pone en 0 antes de iniciar cada recorrido.

Se realizan 10 medidas con el comparador, obteniéndose los resultados indicados en la tabla 11.

| Lecturas del COMP ( $\mu\text{m}$ ) |     |
|-------------------------------------|-----|
| 0,1                                 | 0,2 |
| 0,2                                 | 0,1 |
| 0,2                                 | 0,2 |
| 0,1                                 | 0,2 |
| 0,2                                 | 0,2 |
| $\bar{Y} = 0,17\ \mu\text{m}$       |     |
| $s_Y = 0,05\ \mu\text{m}$           |     |
| $s_{\bar{Y}} = 0,016\ \mu\text{m}$  |     |

**Tabla 11: Toma de datos de la calibración**

La longitud  $L$  viene dada por la siguiente ecuación:

$$L = \sum L_i + C_{dB} + C_M + C_{ROD} = 43,578\ 26 + 0 + 0,004 + 0 = 43,582\ 26\ \text{mm}$$

La incertidumbre expandida se calcula según lo indicado en el apartado 6.1.1.

Realizando los cálculos indicados en las tablas 3, 4, 5 y 6 del apartado 6.2.1, se obtienen los resultados de las tablas 12, 13, 14 y 15.

| Magnitud $X_i$ | Estimación $x_i$ (mm) | Incertidumbre típica $u(x_i)$ $\mu\text{m}$ | Distribución de probabilidad | Coficiente de sensibilidad $G_i$ | Contribución a la incertidumbre $u(y)$ ( $\mu\text{m}$ ) |
|----------------|-----------------------|---|------------------------------|----------------------------------|--|
| $\sum L_i$     | 43,578 26             | 0,05  | normal                       | 1                                | 0,05   |
| $C_{dB}$       | 0                     | 0,04  | (1)                          | 1                                | 0,04   |
| $C_M$          | 0,004                 | 2,00  | normal                       | 1                                | 2,00   |
| $C_{ROD}$      | 0                     | 0,10  | normal                       | 1                                | 0,10   |
| $L$            | 43,582 26             | Incertidumbre típica combinada ( $u_L$ )    |                              |                                  | 2,00   |

(1) Como se han utilizado cuatro BPL, la distribución de probabilidad resultante será la convolución de cuatro distribuciones rectangulares del mismo semi-intervalo, la cual se aproxima mucho a una normal.

**Tabla 12: Contribuciones a la incertidumbre combinada de  $L$ , en la calibración del BPA con PD en MMC**

La distancia  $D$  viene dada por la siguiente ecuación:

$$D = D_o + C_{dR} = 500,002 + 0 = 500,002\ \text{mm}$$

| Magnitud $X_i$ | Estimación $x_i$ (mm) | Incertidumbre típica $u(x_i)$ $\mu\text{m}$ | Distribución de probabilidad | Coefficiente de sensibilidad $c_i$ | Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$ ( $\mu\text{m}$ ) |
|----------------|-----------------------|---|------------------------------|------------------------------------|--|
| $D_o$          | 500,002               | 2,00  | normal                       | 1                                  | 2,00   |
| $C_{dR}$       | 0                     | 0,58  | rectangular                  | 1                                  | 0,58   |
| $D$            | 500,002               | Incertidumbre típica combinada ( $u_D$ )    |                              |                                    | 2,08   |

**Tabla 13: Contribuciones a la incertidumbre combinada de  $D$ , en la calibración del BPA con PD en MMC**

La distancia  $Y$  viene dada por la siguiente ecuación:

$$Y = \bar{Y} + C_C + C_{dc} + C_{EC} = 0,17 + 0 + 0 + 0 = 0,17 \mu\text{m}$$

| Magnitud $X_i$ | Estimación $x_i$ ( $\mu\text{m}$ ) | Incertidumbre típica $u(x_i)$ $\mu\text{m}$ | Distribución de probabilidad | Coefficiente de sensibilidad $c_i$ | Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$ ( $\mu\text{m}$ ) |
|----------------|------------------------------------|---|------------------------------|------------------------------------|--|
| $\bar{Y}$      | 0,17                               | 0,02  | normal                       | 1                                  | 0,02   |
| $C_C$          | 0                                  | 0,10  | normal                       | 1                                  | 0,10   |
| $C_{dc}$       | 0                                  | 0,06  | rectangular                  | 1                                  | 0,06   |
| $C_{EC}$       | 0                                  | 0,04  | triangular                   | 1                                  | 0,04   |
| $Y$            | 0,17                               | Incertidumbre típica combinada ( $u_Y$ )    |                              |                                    | 0,13   |

**Tabla 14: Contribuciones a la incertidumbre combinada de  $Y$ , en la calibración del BPA con PD en MMC**

La desviación al nominal del ángulo del BPA, viene dada por la ecuación siguiente:

$$d_o = \arcsen \frac{43,582\ 26}{500,002} + \arcsen \frac{0,170}{60\ 000} - 5^\circ\ 0'\ 0'' = 5^\circ\ 0'\ 2,33'' - 5^\circ\ 0'\ 0'' = 2,33'' \approx 3''$$

El redondeo realizado de  $0,67''$  se sumará a la incertidumbre final.

| Magnitud $X_i$                               | Estimación $x_i$ (mm) | Incertidumbre típica $u(x_i)$ $\mu\text{m}$ | Distribución de probabilidad | Coefficiente de sensibilidad $c_i$ | Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$ (") |
|--|-----------------------|---|------------------------------|------------------------------------|--|
| $L$  | 43,582 26             | 2,00  | normal                       | $2,007 \cdot 10^{-6}$              | 0,83   |
| $D$  | 500,002               | 2,08  | normal                       | $1,749 \cdot 10^{-7}$              | 0,08   |
| $Y$  | 0,000 17              | 0,13  | normal                       | $1,666 \cdot 10^{-5}$              | 0,45   |
| Incertidumbre típica combinada ( $u_{d_o}$ ) |                       |   |                              |                                    | 0,95   |
| Incertidumbre expandida ( $U_{d_o}$ )        |                       |   |                              |                                    | 1,90   |

**Tabla 15: Contribuciones a la incertidumbre combinada de  $d_o$ , en la calibración del BPA con PD en MMC**

La incertidumbre expandida queda, una vez redondeada:

$$U = 1,90'' + 0,67'' = 2,57'' \approx 3''$$

Dado que las contribuciones de incertidumbre que presentan una distribución normal, son las que más peso tienen, el factor de cobertura  $k$  es igual a 2; no obstante y a efectos didácticos del ejemplo, se calcula  $k$  a partir de los resultados de la ecuación de Welch-Satterthwaite (ref. [4]):

$$v_{ef} = \frac{0,95^4}{\frac{0,45^4}{10 - 1}} = 179$$

Entrando en la tabla E.1 de la (ref. [4]), se obtiene el valor de  $k$ . En este caso  $k = 2$ .

En resumen:

$$d_0 = 3'' \pm 3''$$

En consecuencia y según lo indicado en el apartado 6.2.2, el BPA resulta de calidad 2.

# Metrología

NIPO: 113-19-006-0