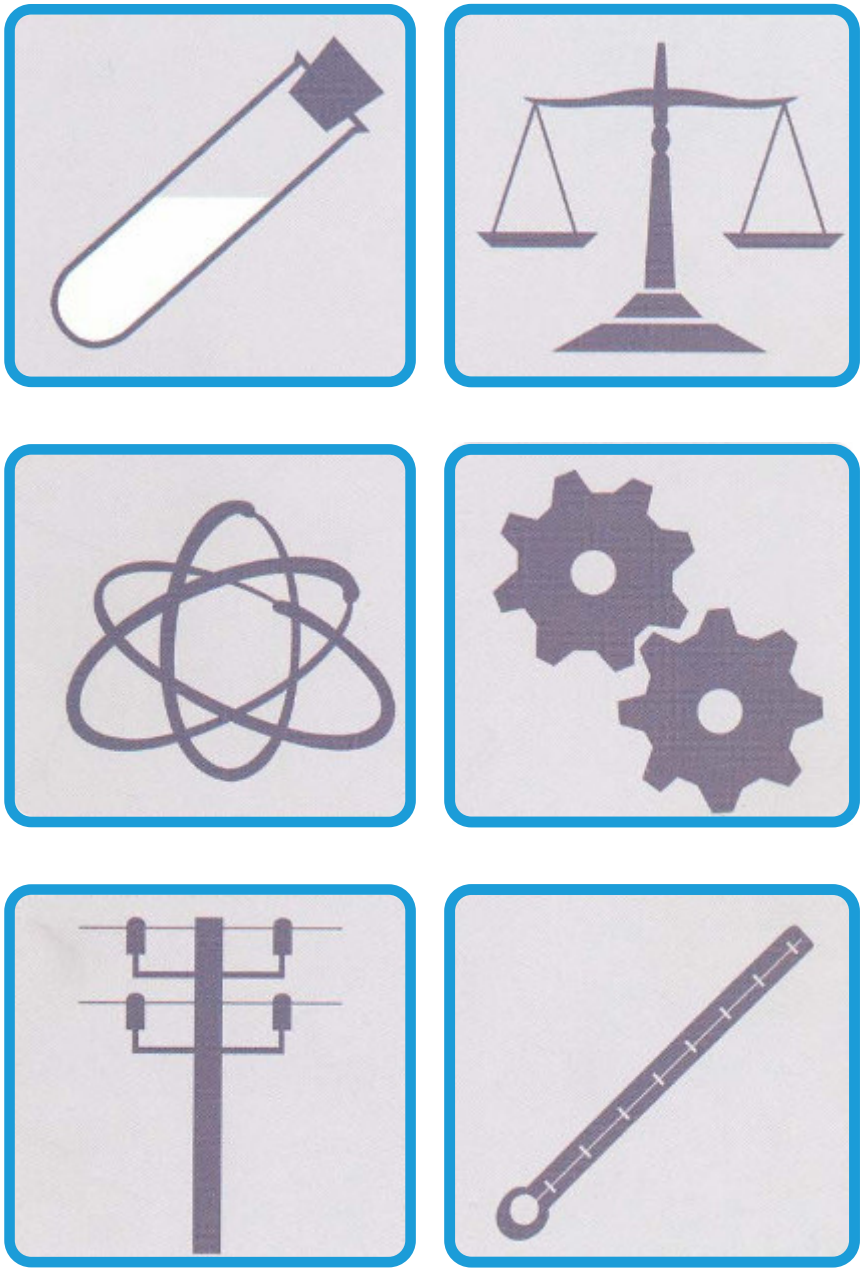
PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN

Metrología



PROCEDIMIENTO DI-039 PARA LA CALIBRACIÓN DE COLIMADORES ÓPTICOS

m 20

GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE INDUSTRIA, COMERCIO Y TURISMO
CEM CENTRO ESPAÑOL DE METROLOGÍA

PROCEDIMIENTO DI-039
CALIBRACIÓN DE COLIMADORES ÓPTICOS

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 4
    4.1 Símbolos y abreviaturas 6
5. DESCRIPCIÓN 7
    5.1 Equipos y materiales 7
    5.2 Operaciones previas 7
    5.3 Proceso de calibración 7
    5.4 Toma y tratamiento de datos 8
    5.5 Criterio de aceptación/rechazo 10
6. RESULTADOS 11
    6.1 Interpretación de resultados 11
    6.2 Incertidumbres 11
7. REFERENCIAS 13
8. ANEXO 14

1. OBJETO

El presente procedimiento técnico tiene por finalidad describir un posible proceso de calibración de colimadores ópticos mediante la utilización de un teodolito o una estación total calibrados.

2. ALCANCE

Este procedimiento es aplicable a los siguientes colimadores utilizados en la verificación de teodolitos y niveles topográficos.

- Colimadores que garantizan su horizontalidad mediante un nivel tórico de burbuja de aire situado en posición caballera y disponen de uno o varios retículos. Están apoyados sobre un soporte que les permite girar sobre sí mismos. Este eje de giro coincide con el eje óptico del colimador.
- Colimadores que garantizan la horizontalidad del eje óptico mediante un compensador automático, similar a los de los niveles automáticos de uso topográfico.
- Conjunto de tres o cuatro colimadores situados en un mismo plano vertical.
- Otros de características similares a los anteriores.

3. DEFINICIONES

3.1.- Ángulo horizontal (Ángulo acimutal)

Ángulo medido en el plano horizontal. El ángulo horizontal entre dos puntos se obtiene mediante la diferencia de las lecturas correspondientes a sus direcciones horizontales.

3.2.- Ángulo vertical

Ángulo medido en el plano vertical. Cuando la dirección de referencia es la dirección que une el punto principal del instrumento con el cénit, el ángulo vertical medido se denomina ángulo cenital o distancia cenital.

3.3.- Colimador

Instrumento óptico que consta de una lente convergente y de un retículo situado en el plano focal, de forma que la imagen del retículo resulta proyectada al infinito. No dispone de ocular, pues los trazos de su retículo son observados a través del objetivo.

Los principales componentes de un colimador son los siguientes:

- Un cuerpo cilíndrico.
- Un objetivo en la parte delantera del cilindro.
- Un retículo situado en el plano focal del objetivo.
- Un sistema de iluminación en la parte trasera del cuerpo cilíndrico.

Además del retículo situado en el plano focal del objetivo (enfoque a infinito), los colimadores pueden disponer de otros retículos para ser enfocados a varias distancias.

A algunos colimadores se les puede sustituir el sistema de iluminación por un ocular intercambiable, para transformarlos en telescopios.

3.4.- Teodolito

Instrumento de medición mecánico-óptico que se utiliza para obtener ángulos verticales y horizontales.

3.5.- Estación total

Teodolito con incorporación de microprocesadores, pantalla y memoria para lectura automática, procesamiento, visualización y almacenamiento de datos de medición.

3.6.- Eje principal

Eje vertical del teodolito o estación total, sobre el que gira la alidada para obtener ángulos horizontales.

3.7.- Eje secundario

Eje horizontal del teodolito o estación total sobre el que gira el telescopio para obtener ángulos verticales.

3.8.- Eje de colimación

Línea definida por el punto focal del objetivo del telescopio y el punto observado, materializado por el centro del retículo.

3.9.- Posición de observación I

Posición del teodolito o estación total en la que a una visual horizontal le corresponde un ángulo cenital de 100 gon.

3.10.- Posición de observación II

Posición del teodolito o estación total en la que a una visual horizontal le corresponde un ángulo cenital de 300 gon.

3.11.- Punto principal

Punto de intersección entre los ejes del teodolito o estación total (eje principal, eje secundario y eje de colimación).

4. GENERALIDADES

Los colimadores ópticos se utilizan para verificar teodolitos y niveles ópticos. Para ello es necesario fijar algunas direcciones fundamentales. Conocer la línea horizontal es básico para estos instrumentos que trabajan ligados a la gravedad.

Los colimadores no pueden trasladarse una vez calibrados, pues esto supone la modificación de los valores angulares definidos por sus ejes ópticos; por esto la calibración debe realizarse in situ.

La calibración de colimadores consiste en la determinación de la posición angular de sus direcciones fundamentales. Puede obtenerse el valor del ángulo horizontal existente entre el eje óptico de un colimador y el de otro considerado como referencia, o el valor del ángulo vertical de un eje óptico. En este último caso la referencia es la línea definida por el punto principal del teodolito y su cenit.

Habitualmente las direcciones de calibración son las siguientes, dependiendo del tipo de colimador y de los requerimientos del cliente.

- Colimadores de horizontalidad

  Según el tipo de retículo se mide el ángulo vertical de uno o varios puntos definidos sobre el hilo horizontal. En la figura siguiente se representa el retículo de un colimador de horizontalidad y los cuatro puntos de calibración. De esta forma se verifica además la posible inclinación del hilo horizontal del colimador.

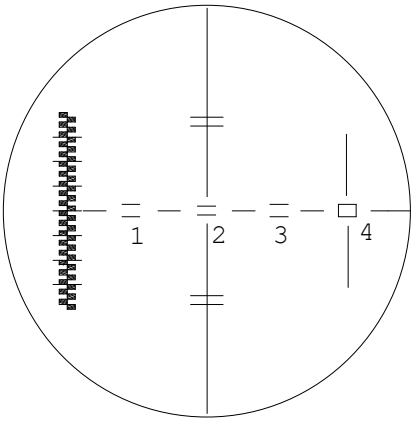


Fig. 1.- Ejemplo de retículo de colimador de horizontalidad

- Conjunto de colimadores

  El conjunto suele disponer de cuatro colimadores situados en un mismo plano vertical. Dos de ellos (1 y 2) situados en el mismo plano horizontal y los otros dos (3 y 4) formando un ángulo de aproximadamente 33,3 gon con aquellos (véase figura 2).

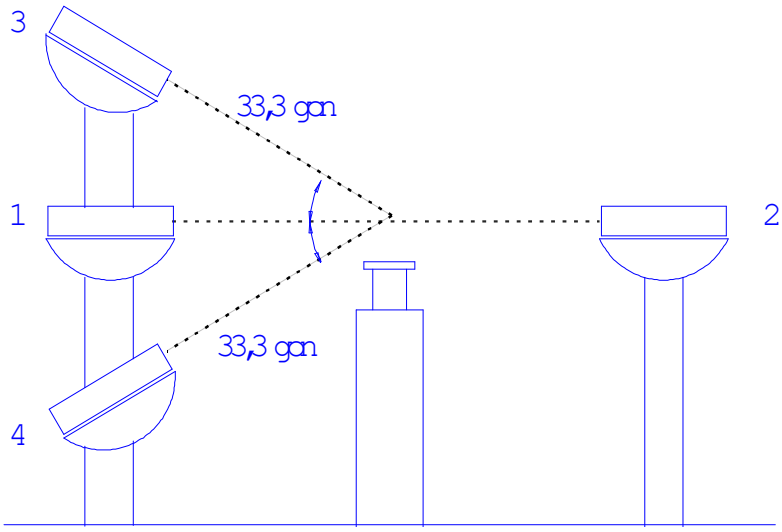


Fig. 2.- Conjunto de colimadores

Habitualmente se mide el ángulo vertical respecto a la horizontal, definido por el hilo horizontal de cada colimador y el ángulo horizontal de los hilos verticales de los colimadores 2, 3 y 4 respecto del colimador 1.

Algunos colimadores tienen una escala vertical graduada con separaciones entre trazos equivalentes a un determinado valor angular (véase figura 3), pudiéndose utilizar esta escala para obtener un error de entrada en los niveles ópticos.

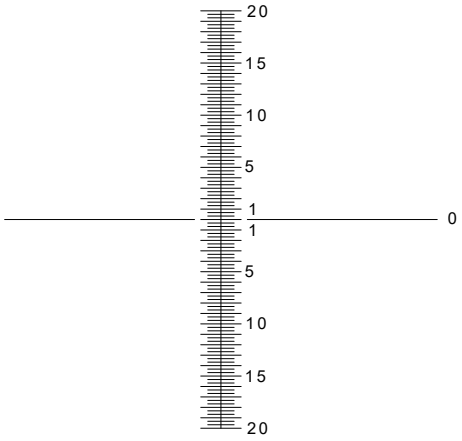


Fig. 3.- Ejemplo de retículo con trazos horizontales situados en un eje vertical

En este caso, si el cliente lo solicita, puede medirse el ángulo vertical de los trazos deseados.

La calibración de colimadores consiste, por tanto, en la determinación de ángulos horizontales y verticales de ciertos ejes o marcas.

4.1 Símbolos y Abreviaturas

A continuación se relacionan los símbolos utilizados en este documento.

$z_{j,k,\mathrm{I}}$	Ángulo vertical medido en la posición I del teodolito, correspondiente a la lectura *j* del punto *k*,
$z_{j,k,\mathrm{II}}$	Ángulo vertical medido en la posición II del teodolito, correspondiente a la lectura *j* del punto *k*,
$z_{k,\mathrm{I}}$, $z_{k,\mathrm{II}}$	Valor medio, para cada grupo de lecturas *j*, del ángulo vertical medido en las posiciones I y II del teodolito, respectivamente,
z_k	Ángulo vertical correspondiente al colimador *k*,
v_k	Ángulo vertical del colimador *k*, respecto a la horizontal,
$z_{j,t,\mathrm{I}}$	Ángulo vertical medido en la posición I del teodolito, correspondiente a la lectura *j* del trazo *t*,
$z_{j,t,\mathrm{II}}$	Ángulo vertical medido en la posición II del teodolito, correspondiente a la lectura *j* del trazo *t*,
$z_{t,\mathrm{I}}$, $z_{t,\mathrm{II}}$	Valor medio, para cada grupo de lecturas *j*, del ángulo vertical del trazo *t*, medido en las posiciones I y II del teodolito, respectivamente,
z_t	Ángulo vertical correspondiente al trazo *t*.
v_t	Ángulo vertical del trazo *t* respecto al trazo de referencia.
$x_{j,k,\mathrm{I}}$	Ángulo horizontal (dirección) medido en la posición I del teodolito, correspondiente a la lectura *j* del punto *k*,

$x_{j,k,\mathrm{II}}$ Ángulo horizontal (dirección) medido en la posición II del teodolito, correspondiente a la lectura *j* del punto *k*,

$x_{k,\mathrm{I}}$, $x_{k,\mathrm{II}}$ Valor medio, para cada grupo de lecturas *j*, del ángulo horizontal (dirección) medido en las posiciones I y II del teodolito, respectivamente,

x_k Ángulo horizontal correspondiente al colimador *k*,

x_{ref} Ángulo horizontal (dirección) correspondiente al colimador de referencia,

$\alpha_k = x_k - x_{ref} = H$, ángulo horizontal entre el colimador *k* y el colimador de referencia

c_{lec} Corrección por lectura.

5. DESCRIPCIÓN

5.1 Equipos y materiales

En este procedimiento, para la calibración de colimadores y conjuntos de colimadores se utilizará como instrumento patrón un teodolito o una estación total, preferiblemente con precisión, según especificación habitual de los fabricantes, de 0,5” (0,15 mgon), y resolución angular de 0,1” (0,03 mgon), y un termómetro de exactitud en torno a 0,5 °C o mejor y resolución del mismo orden.

No obstante, estos equipos pueden sustituirse por otros de características técnicas similares, o por los mejores disponibles, p. ej., teodolito con precisión de 1’’ (0,3 mgon) o 2’’ (0,6 mgon) y resolución de 0,1” (0,03 mgon), 0,5” (0,15 mgon), 1” (0,3 mgon) o 2” (0,6 mgon), si no se contara con los recomendados.

Lógicamente, la incertidumbre de calibración final, dependiente de la calidad metrológica de los equipos empleados, será mayor cuanto peor sea la precisión y resolución delos equipos, lo que condicionará a su vez el nivel metrológico de los instrumentos que puedan calibrarse posteriormente en el equipo o instalación certificada, no siendo posible calibrar un equipo de altas prestaciones, si se parte de un teodolito de bajas prestaciones.

5.2 Operaciones previas

a) Tomar los datos identificativos de la calibración y del colimador, incluida su ubicación, y las correspondientes observaciones relevantes acerca del estado del equipo.
b) Comprobación del estado del equipo.
c) Verificación del ajuste del colimador, y ajuste del mismo, si se observa algo anómalo, antes de proceder a la calibración.
d) La temperatura ambiente del local en el que se realice la calibración deberá mantenerse durante todo el proceso en el intervalo de (20 ± 5) °C. La temperatura se anotará al comienzo y al final de la calibración.
e) Al menos una hora antes de comenzar el proceso deben situarse los instrumentos en el lugar de calibración, para que se adapten a las condiciones ambientales.
f) El teodolito o estación total que actúa como patrón debe estar calibrado y dentro del periodo de validez establecido para dicha calibración.

5.3 Proceso de calibración

a) Situar y nivelar el teodolito o estación total sobre el soporte del colimador, poniéndolo a la misma altura.

- con una distancia cenital de 100 gon y enfocando al retículo más cercano del colimador, se actúa sobre el soporte del colimador hasta poner el equipo a su altura.

o bien

- con un flexómetro se mide la altura del eje del colimador y se repite sobre el eje secundario del teodolito o estación total.

b) Anotar los valores de las condiciones ambientales.

c) Ajustar los niveles electrónicos del teodolito o estación total.

d) Nivelar de nuevo el instrumento.

e) Ajustar el error de índice vertical del teodolito o estación total. En el caso de la calibración de un conjunto de colimadores se debe ajustar además la falta de perpendicularidad entre el eje óptico y el eje secundario y entre el eje secundario y el eje principal del teodolito o estación total.

   Estos ajustes se realizan, utilizando los propios colimadores como punterías, siguiendo el manual de uso del teodolito o estación total.

f) Apuntar al primer colimador con el teodolito o estación total en la posición I para obtener la primera lectura.

g) Apuntar al resto de colimadores manteniendo el teodolito o estación total en la posición I (ya sean ángulos verticales, horizontales o ambos).

h) Tras medir el último colimador, volver al primero, dar la vuelta de campana al teodolito o estación total (giro de 180° de la alidada y volteo del anteojo) y apuntar hacia el colimador en la posición II

i) Medir el resto de colimadores manteniendo el teodolito o estación total en la posición II.

j) Repetir el proceso f) a i) 5 veces.

k) Anotar de nuevo las condiciones ambientales.

La calibración debe realizarse manteniendo un ritmo constante y en un corto espacio de tiempo. Si las condiciones de estabilidad de la instalación del colimador no son adecuadas (vibraciones excesivas), la calibración puede llegar a ser inviable.

5.4 Toma y tratamiento de datos

<u>Ángulos verticales</u>:

El modelo de medición de los ángulos verticales de los colimadores respecto a la horizontal, empleando un teodolito o estación total, es el siguiente:

$$\mathrm{v}_k = z_k - 100 + c_{\mathrm{lec}} \qquad (1)$$

La corrección que aparece en el modelo, aun siendo nula, se incluye para poder contabilizar su contribución a la incertidumbre.

Tras seguir el proceso f) a i) descrito anteriormente, se dispone de diez lecturas (cinco en posición I y cinco en posición II) de ángulos verticales a cada punto de calibración.

Para cada colimador *k* y posición (I y II) del teodolito o estación total se obtiene el valor más probable (valor medio) del ángulo vertical de cada grupo de cinco lecturas.

$$z_{k,\mathrm{I}} = \frac{\sum_{j=1}^{5} z_{j,k,\mathrm{I}}}{5}, \qquad z_{k,\mathrm{II}} = \frac{\sum_{j=1}^{5} z_{j,k,\mathrm{II}}}{5} \tag{2}$$

Se obtienen también las desviaciones típicas correspondientes, que informan de la repetibilidad de las lecturas, y que serán utilizadas tanto como criterio de rechazo, como para la posterior estimación de la incertidumbre.

Para cada colimador *k* se obtiene el ángulo vertical correspondiente, expresado en gon, como

$$z_k = z_{k,\mathrm{I}} + \frac{400 - (z_{k,\mathrm{I}} + z_{k,\mathrm{II}})}{2} \tag{3}$$

El ángulo vertical de cada colimador *k* respecto a la horizontal es

$$\mathrm{v}_k = z_k - 100 \tag{4}$$

<u>Ángulos horizontales</u>:

El modelo de medición del ángulo horizontal *H* entre el colimador *k* y el colimador de referencia es el siguiente:

$$\alpha_k = x_k - x_{ref} + c_{\mathrm{lec}} = H + c_{\mathrm{lec}} \tag{5}$$

Como en el caso anterior, la corrección que aparece en el modelo, aun siendo nula, se incluye para poder contabilizar su contribución a la incertidumbre.

En el caso de la calibración de conjuntos de colimadores se obtienen los ángulos horizontales respecto al colimador de referencia, normalmente denominado “COLIMADOR 1”.

A partir de las diez lecturas obtenidas de ángulos horizontales (cinco en posición I y cinco en posición II) para cada punto de calibración, se calcula para cada colimador *k* y posición (I y II) el valor más probable de la dirección horizontal de las cinco lecturas

$$x_{k,\mathrm{I}} = \frac{\sum_{j=1}^{5} x_{j,k,\mathrm{I}}}{5} \qquad x_{k,\mathrm{II}} = \frac{\sum_{j=1}^{5} x_{j,k,\mathrm{II}}}{5} \tag{6}$$

Se obtiene para cada colimador *k* la dirección horizontal correspondiente, en gon, como

$$x_k = \frac{x_{k,\mathrm{I}} + x_{k,\mathrm{II}} \pm 200}{2} \tag{7}$$

Se utilizará el signo + cuando $x_{k,\mathrm{II}}$ < 200 gon, y el signo – cuando $x_{k,\mathrm{II}}$ > 200 gon.

Finalmente se calcula el ángulo horizontal de cada colimador respecto al colimador de referencia

$$\alpha_k = x_k - x_{ref} \tag{8}$$

Ángulos entre trazos de una escala vertical

Aquí se pretenden obtener los valores angulares entre los trazos horizontales de una escala vertical y un trazo de referencia, habitualmente el situado sobre el hilo horizontal del retículo.

El ángulo vertical del trazo *t* respecto al trazo de referencia es

$$\mathrm{v}_t = z_t - z_{ref} + c_{\mathrm{lec}} \tag{9}$$

La corrección que aparece en el modelo de medición, aun teniendo valor nulo, se incluye para poder contabilizar su contribución a la incertidumbre.

Como en los casos anteriores, se toman diez lecturas de ángulos verticales (cinco en posición I y cinco en posición II) a cada trazo, incluyendo el de referencia. Es habitual tomar 6 trazos sobre el trazo de referencia y 6 trazos por debajo de éste.

Se calcula para cada trazo *t* y posición (I y II) el valor más probable del ángulo vertical de las cinco lecturas

$$z_{t,\mathrm{I}} = \frac{\sum_{j=1}^{5} z_{j,t,\mathrm{I}}}{5} \qquad z_{t,\mathrm{II}} = \frac{\sum_{j=1}^{5} z_{j,t,\mathrm{II}}}{5} \tag{10}$$

Se obtiene el ángulo vertical correspondiente a cada trazo *t*, expresado en gon, como

$$z_t = z_{t,\mathrm{I}} + \frac{400 - (z_{t,\mathrm{I}} + z_{t,\mathrm{II}})}{2} \tag{11}$$

Por último se calcula el ángulo vertical de cada trazo respecto al trazo de referencia

$$\mathrm{v}_t = z_t - z_{ref} \tag{12}$$

Lógicamente, v_t será cero para el trazo de referencia (el nº 7 si se han tomado seis trazos por encima y seis por debajo de él).

NOTA: Para facilitar el tratamiento de los datos y la estimación de incertidumbres, puede utilizarse una hoja de cálculo que recoja las observaciones, realice los cálculos y proporcione los resultados y sus incertidumbres.

5.5 Criterio de aceptación/rechazo

Como criterio de rechazo de las observaciones en la calibración puede establecerse que la diferencia entre las desviaciones típicas máxima y mínima de las series de medidas no sea superior a 2 veces la resolución del teodolito o estación total empleado. Si dicha diferencia resulta superior, se verificarán los ajustes de todos los instrumentos y se comprobarán las condiciones ambientales, repitiéndose el proceso. No obstante, podría fijarse otro criterio suficientemente restrictivo, dependiendo del tipo de instalación y del teodolito o estación total utilizados.

6. RESULTADOS

6.1 Interpretación de resultados

Los resultados de la calibración vienen dados por las expresiones (4), (8) y (12), dependiendo del tipo de colimador y de la solicitud efectuada por el cliente.

Estos resultados son claros y no ofrecen posibilidad de interpretación alguna.

6.2 Incertidumbres

Para la estimación y cálculo de las incertidumbres se seguirá lo establecido en el documento GUM "*Guide to the expresion of Uncertainty in Measurement*", en su versión española, 3ª edición de 2009, publicada por el CEM [3].

Así, si el modelo de medición viene dado, en general, por la función $y = f(x)$, la incertidumbre típica combinada al cuadrado, de la estimación y del mensurando, se nota como $u_c^2(y)$, siendo

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^{N} \left[\frac{\partial f}{\partial x_i}\right]^2 u^2(x_i) = \sum_{i=1}^{N} [c_i u(x_i)]^2 = \sum_{i=1}^{N} u_i^2(y) \qquad (13)$$

En este procedimiento de calibración, los distintos modelos de medición asociados a los distintos tipos de calibración son:

Ángulos verticales: $\mathrm{v}_k = z_k - 100 + c_{\mathrm{lec}}$ (1)

Ángulos horizontales: $\alpha_k = x_k - x_{ref} + c_{\mathrm{lec}} = H + c_{\mathrm{lec}}$ (5)

Ángulos entre trazos: $\mathrm{v}_t = z_t - z_{ref} + c_{\mathrm{lec}}$ (9)

Aplicando la ley de propagación de incertidumbres a las expresiones (1), (5) y (9) se obtienen las expresiones correspondientes a las respectivas incertidumbres típicas combinadas.

$$u^2(\mathrm{v}_k) = u^2(z_k) + u^2(c_{\mathrm{lec}}) = u^2(z_{\mathrm{v}}) + u^2(c_{\mathrm{lec}}) \qquad (14)$$

$$u^2(\alpha_k) = u^2(x_k) + u^2(x_{ref}) + u^2(c_{\mathrm{lec}}) = u^2(H) + u^2(c_{\mathrm{lec}}) \qquad (15)$$

$$u^2(\mathrm{v}_t) = u^2(z_t) + u^2(z_{ref}) + u^2(c_{\mathrm{lec}}) = u^2(z_{\mathrm{v}}) + u^2(c_{\mathrm{lec}}) \qquad (16)$$

A continuación se detalla cada una de las contribuciones a la incertidumbre.

<u>Incertidumbre de calibración del teodolito o estación total utilizada como patrón</u>

Del certificado de calibración del teodolito o <u>estación total</u> que actúa como patrón se obtienen las siguientes contribuciones a la de incertidumbre:

$u(H)$: Incertidumbre de medida de un ángulo horizontal observado en las dos posiciones del teodolito o estación total.

$u(z_v)$: Incertidumbre de medida de un ángulo vertical observado en las dos posiciones del teodolito <u>o</u> estación total.

Lectura

La incertidumbre debida a la lectura está compuesta por la incertidumbre debida a la repetibilidad observada en las series de medidas y por la resolución del instrumento.

- Repetibilidad de las medidas: Se toma la máxima desviación típica observada

$$u_{\mathrm{rep}} = \frac{s_{\mathrm{máx}}}{\sqrt{n}} \tag{17}$$

  siendo $s_{\mathrm{máx}}$ la máxima desviación típica de las medidas realizadas y n el número total de medidas.

- Resolución del teodolito o estación total.

  Esta contribución, aunque está considerada en la incertidumbre de calibración del teodolito o estación total patrón, debe considerarse de nuevo aquí, ya que el instrumento patrón está utilizándose para medir y su capacidad de apreciación contribuye a la incertidumbre del nuevo mensurando.

La incertidumbre expandida se obtiene multiplicando la incertidumbre combinada por un factor de cobertura k = 2, para tener un nivel de confianza de aproximadamente el 95 %, suponiendo una distribución normal del mensurando.

$$U(\mathrm{v}_k) = 2 \cdot u(\mathrm{v}_k) \tag{18}$$

$$U(\alpha_k) = 2 \cdot u(\alpha_k) \tag{19}$$

$$U(\mathrm{v}_t) = 2 \cdot u(\mathrm{v}_t) \tag{20}$$

7. REFERENCIAS

[1] Procedimiento para la elaboración de procedimientos de calibración. CEM, 4ª Edición, 19 páginas, 2003, Madrid.

[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.

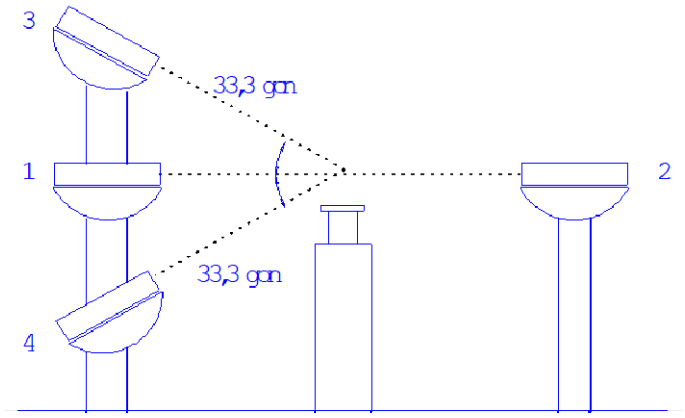
[3] Evaluación de datos de medición. Guía para la expresión de la incertidumbre de medida., 3ª ed. en español (traducción de 1ª ed. 2008 en inglés), Centro Español de Metrología, 2009, NIPO: 706-09-002-6.

8. ANEXO

Ejemplo numérico

Se procede a calibrar un conjunto de cuatro colimadores para verificación de instrumentos topográficos.

El conjunto dispone de cuatro colimadores situados en un mismo plano vertical. Dos de ellos (1 y 2) están situados en el mismo plano horizontal y los otros dos forman un ángulo de aproximadamente 33,33 gon con aquellos, según figura adjunta.



Para la calibración se ha utilizado un teodolito de 0,1 mgon de resolución. Sobre los hilos vertical y horizontal de cada colimador se han realizado cinco medidas en cada una de las posiciones (I y II) del teodolito o estación total.

Las siguientes páginas muestran las hojas de las observaciones, conforme al proceso descrito en el procedimiento, así como los resultados de los ángulos verticales y horizontales, y la incertidumbre asociada a dichos resultados.

Las unidades angulares se expresan en gon al ser las utilizadas habitualmente en estos instrumentos. La equivalencia con la unidad angular del Sistema Internacional es 100 gon = (π/2) rad.

La incertidumbre expandida resultante, asociada a las desviaciones halladas, está expresada para un factor de cobertura k = 2, aproximadamente equivalente a un nivel de confianza del 95 % y resulta de considerar la incertidumbre de medida del teodolito o estación total utilizado, el método de calibración y el elemento en calibración.

Ángulos verticales.

ÁNGULOS VERTICALES

Datos medidos — Orden de lecturas

LECTURAS (gon)	COLIMA 1	COLIMA 2	COLIMA 3	COLIMA 4	COLIMA 1	COLIMA 2	COLIMA 3	COLIMA 4
	P I				P II			
1	100,0005	100,0006	65,7413	133,8332	300,0004	300,0008	334,2596	266,1686
2	100,0005	100,0009	65,7413	133,833	300,0001	300,0009	334,2593	266,1688
3	100,0005	100,0007	65,7413	133,8326	300,0003	300,0009	334,2596	266,1688
4	100,0005	100,0008	65,7414	133,8327	300,0005	300,0009	334,2595	266,1685
5	100,0006	100,0007	65,7413	133,8328	300,0002	300,0009	334,2592	266,1683

Ángulos verticales calculados (gon)	COLIMA 1	COLIMA 2	COLIMA 3	COLIMA 4
1	100,00005	99,99990	65,74085	133,83230
2	100,00020	100,00000	65,74100	133,83210
3	100,00010	99,99990	65,74085	133,83190
4	100,00000	99,99995	65,74095	133,83210
5	100,00020	99,99990	65,74105	133,83225
Promedios:	100,000 11	99,999 93	65,740 94	133,832 13
Sigma:	0,000 09	0,000 04	0,000 09	0,000 16

Sigma máx:	0,000 16	
Rango Sigma:	0,000 11	OK

Ángulos respecto a la horizontal	(gon)
COLIMA 1	0,0001
COLIMA 2	-0,0001
COLIMA 3	-34,2591
COLIMA 4	33,8321

Estimación de incertidumbres

magnitud de entrada X_i	símbolo	valor	unidades	distrib. probab.	incertidumbres $u(x_i)$	$u_c(x_i)$	grados de libertad, u parcial	total	coeficiente de sensibilidad c_i	contribución a incertidumbre u(L) $u_i(H)$	unidades	grados de libertad υ	peso relativo (en %)
teodolito						0,000 25 gon		102	1,414	0,0004	gon	102	95,39
U calibración	*U* cal	0,0005 gon		normal	0,000 25 gon		100						
resolución	*res*	0,0001 gon		rectang.	0,000 03 gon		100						
proceso de medición						0,000 08 gon		4	1,000	0,0001	gon	4	4,61
repetibilidad	s_{rep}	0,0002 gon		normal	0,000 08 gon		4						
												Σ =	100,0
				***U* (*k*(95,45%) =**	**0,0007 gon**			***u*=**		**0,0004**	**gon**	**υ =**	**105**
				***U* (*k*(95,45%) =**	**2,4 "**			*k* (95,45%)	=	2,02			

Ángulos horizontales.

ÁNGULOS HORIZONTALES

Datos medidos — Orden de lecturas

LECTURAS (gon)	COLIMA 1	COLIMA 2	COLIMA 3	COLIMA 4	COLIMA 1	COLIMA 2	COLIMA 3	COLIMA 4
	P I				P II			
1	346,7996	146,7995	346,7997	346,7993	146,7994	346,7994	146,7997	146,8006
2	346,7996	146,7992	346,8002	346,7992	146,7993	346,7994	146,7997	146,8005
3	346,7992	146,7991	346,7998	346,7994	146,7993	346,7993	146,7999	146,8004
4	346,7992	146,7993	346,7999	346,7994	146,7992	346,7994	146,7994	146,8006
5	346,7994	146,7992	346,7998	346,7993	146,7994	346,7994	146,7996	146,8004

Ángulos horizontales calculados (gon)	COLIMA 1	COLIMA 2	COLIMA 3	COLIMA 4
1	346,79950	146,79945	346,79970	346,79995
2	346,79945	146,79930	346,79995	346,79985
3	346,79925	146,79920	346,79985	346,79990
4	346,79920	146,79935	346,79965	346,80000
5	346,79940	146,79930	346,79970	346,79985
Promedios:	346,799 36	146,799 32	346,799 77	346,799 91
Sigma:	0,000 13	0,000 09	0,000 13	0,000 07

Sigma máx:	0,000 13	
Rango Sigma	0,000 06	OK

Ángulos respecto a Colimador 1	(gon)
COLIMADOR 1	0,0000
COLIMADOR 2	-200,0000
COLIMADOR 3	0,0004
COLIMADOR 4	0,0006

Estimación de incertidumbres

magnitud de entrada X_i	símbolo	valor	unidades	distrib. probab.	incertidumbres $u(x_i)$	$u_c(x_i)$	grados de libertad, u parcial	total	coeficiente de sensibilidad c_i	contribución a incertidumbre u(L) $u_i(V)$	unidades	grados de libertad υ	peso relativo (en %)
teodolito						0,000 20 gon		104	1,414	0,0003	gon	104	95,12
U calibración	*U* cal	0,0004 gon		normal	0,000 20 gon		100						
resolución	*res*	0,0001 gon		rectang.	0,000 03 gon		100						
proceso de medición						0,000 06 gon		4	1,000	0,0001	gon	4	4,88
repetibilidad	s_{rep}	0,0001 gon		normal	0,000 06 gon		4						
												Σ =	100,0
				***U* (*k* (95,45%) =**	**0,0006 gon**			***u*=**		**0,0003**	**gon**	**υ =**	**107**
				***U* (*k* (95,45%) =**	**1,9 "**			*k* (95,45%)	=	2,02			

Ángulos entre trazos.

ÁNGULOS VERTICALES ENTRE TRAZOS

Datos medidos

	LECTURAS EN POSICIÓN I (gon)					Promedio	Sigma	LECTURAS EN POSICIÓN II (gon)					Promedio	Sigma
1	99,9637	99,9636	99,9636	99,9636	99,9637	99,963 64	0,000 05	300,0359	300,0357	300,0358	300,0359	300,0357	300,035 80	0,000 09
2	99,9696	99,9698	99,9697	99,9696	99,9698	99,969 70	0,000 09	300,0297	300,0298	300,0297	300,0298	300,0299	300,029 78	0,000 07
3	99,9759	99,9759	99,9758	99,9757	99,9759	99,975 84	0,000 08	300,0234	300,0236	300,0235	300,0235	300,0235	300,023 50	0,000 06
4	99,9818	99,9818	99,9817	99,9819	99,9818	99,981 80	0,000 06	300,0176	300,0175	300,0175	300,0175	300,0176	300,017 54	0,000 05
5	99,9878	99,9879	99,9879	99,9879	99,9878	99,987 86	0,000 05	300,0114	300,0112	300,0112	300,0114	300,0113	300,011 30	0,000 09
6	99,9942	99,9943	99,9942	99,9943	99,9943	99,994 26	0,000 05	300,0051	300,0051	300,0051	300,005	300,0052	300,005 10	0,000 06
REF (7)	100,0006	100,0006	100,0005	100,0004	100,0008	100,000 58	0,000 13	299,9987	299,9989	299,9987	299,9989	299,9988	299,998 80	0,000 09
8	100,0066	100,0067	100,0066	100,0066	100,0067	100,006 64	0,000 05	299,9927	299,9928	299,9927	299,9927	299,9929	299,992 76	0,000 08
9	100,0129	100,0129	100,0128	100,0129	100,0129	100,012 88	0,000 04	299,9863	299,9865	299,9863	299,9864	299,9865	299,986 40	0,000 09
10	100,0189	100,0189	100,0188	100,0189	100,0189	100,018 88	0,000 04	299,9803	299,9805	299,9804	299,9803	299,9805	299,980 40	0,000 09
11	100,0251	100,025	100,0251	100,0251	100,025	100,025 06	0,000 05	299,9742	299,9742	299,9741	299,9744	299,9743	299,974 24	0,000 10
12	100,0313	100,0312	100,0312	100,0312	100,0313	100,031 24	0,000 05	299,9682	299,9681	299,9681	299,9683	299,9682	299,968 18	0,000 07
13	100,0374	100,0373	100,0374	100,0374	100,0373	100,037 36	0,000 05	299,9618	299,962	299,9618	299,962	299,9619	299,961 90	0,000 09

Sigma MÁX.	**0,000 13**	
Rango Sigma	**0,000 09**	OK

Ángulos compensados (gon)		Ángulos respecto a REF (7)
Trazo		
1	99,963 92	-0,0370
2	99,969 96	-0,0309
3	99,976 17	-0,0247
4	99,982 13	-0,0188
5	99,988 28	-0,0126
6	99,994 58	-0,0063
7	100,000 89	0,0000
8	100,006 94	0,0060
9	100,013 24	0,0123
10	100,019 24	0,0183
11	100,025 41	0,0245
12	100,031 53	0,0306
13	100,037 73	0,0368

Estimación de incertidumbres

magnitud de entrada X_i	símbolo	valor	unidades	distrib. probab.	incertidumbres $u(x_i)$	incertidumbres $u_c(x_i)$	grados de libertad, u parcial	grados de libertad, u total	coeficiente de sensibilidad c_i	contribución a incertidumbre u(L) $u_i(H)$	unidades	grados de libertad υ	peso relativo (en %)
teodolito						0,000 25 gon		102	1,414	0,0004	gon	102	98,86
U calibración	*U* cal	0,0005 gon		normal	0,000 25 gon		100						
resolución	*res*	0,0001 gon		rectang.	0,000 03 gon		100						
proceso de medición						0,000 04 gon		12	1,000	0,0000	gon	12	1,14
repetibilidad	s_{rep}	0,0001 gon		normal	0,000 04 gon		12						
												Σ =	100,0
				***U* (*k*(95,45%) =**	**0,0007 gon**			***u*=**		**0,0004**	**gon**	υ =	**104**
				***U* (*k*(95,45%) =**	**2,3 "**			*k* (95,45%)	=	2,02			

PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN

Metrología

NIPO: 113-20-002-9

GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE INDUSTRIA, COMERCIO Y TURISMO
CEM CENTRO ESPAÑOL DE METROLOGÍA