



Estudio de la Capacidad de Medición y Calibración (CMC) de un Autocolimador Electrónico Nikon.

Study of calibration and measurement capability (CMC) of a Nikon electronic autocollimator.

Presentación: 02/09/2019

Aprobación: 30/06/2020

Guillermo J. Bergues

Centro de Investigación y Transferencia en Metrología (CEMETRO), Facultad Regional Córdoba,
Universidad Tecnológica Nacional – Argentina.
gjbergues@gmail.com

Clemer Schürer

Centro de Investigación y Transferencia en Metrología (CEMETRO), Facultad Regional Córdoba,
Universidad Tecnológica Nacional – Argentina.
cschurrer@gmail.com

Nancy Brambilla

Centro de Investigación y Transferencia en Metrología (CEMETRO), Facultad Regional Córdoba,
Universidad Tecnológica Nacional – Argentina.
nancybrambilla@gmail.com

Resumen

En este trabajo se estudia la Capacidad de Medición y Calibración (CMC) de un autocolimador electrónico desarrollado en el Centro de Investigación y Transferencia en Metrología -CEMETRO- de UTN FRC, tomando en cuenta los resultados de su calibración externa. El instrumento está construido en base a un autocolimador analógico comercial, Nikon 6D, y una interfaz visual ad hoc. La calibración fue realizada en el Laboratorio Nacional de Ángulo de Argentina, INTI Córdoba, con trazabilidad internacional al patrón de referencia, el autocolimador Trioptics TA300. El análisis de los resultados de la calibración permite obtener un modelo metrológico más preciso del autocolimador electrónico. Además, define pautas para optimizar las prestaciones del instrumento mediante ajustes de diseño de la interfaz visual electrónica conectada al autocolimador óptico Nikon 6D.

Palabras Claves: autocolimador electrónico; calibración; deformación óptica, CMC.

Abstract

In this work we study the calibration and measurement capability of an electronic autocollimator developed in the Center of Research and transfer in Metrology -CEMETRO- of UTN FRC, taking into account the results of its external calibration. The instrument is built on the basis of a commercial analog auto-collimator, Nikon 6D, and an ad hoc visual interface. The calibration was carried out at the National Angle Laboratory of Argentina, INTI Córdoba, with international traceability to the reference standard (Trioptics TA300 autocollimator). The analysis of the calibration results allows us to obtain a more accurate metrological model of the electronic autocollimator. In addition, it defines guidelines to optimize the performance of the instrument through design adjustments of the electronic visual interface connected to the Nikon 6D optical autocollimator.

Keywords: electronic autocollimator; calibration; optical deformation, CMC.

Introducción

El concepto Capacidad de Medición y Calibración (CMC) enfatiza la confiabilidad de las mediciones y su dependencia de diferentes factores, entre ellos, el método de medición o calibración utilizado. La CMC es la mejor capacidad de medición que está disponible para los usuarios bajo condiciones normales y se expresa cuantitativamente como la Incertidumbre mínima lograda en condiciones normales. Es importante este dato porque el conocimiento del modelo metrológico de un sistema de medición se expresa a través de la obtención de su CMC. Además, cuando se trata de un laboratorio, el alcance de un servicio de medición y/o calibración de un Laboratorio acreditado por el Organismo Argentino de Acreditación (OAA) queda descrito por el Campo de Medición y la Capacidad de Medición y Calibración.

Por esto último, las CMCs de los Institutos Nacionales de Metrología (INM), entre los que se encuentra el Instituto Nacional de Tecnología Industrial de la Argentina (INTI), se encuentran publicadas, para sus distintas áreas y previamente aceptadas por un Acuerdo de Reconocimiento Mutuo (CIPM-MRA) en el página del BIPM (www.bipm.org).

Por otro lado, en los laboratorios de metrología de referencia, donde se realizan mediciones precisas y sin contacto de pequeños ángulos o desviaciones angulares, se necesitan instrumentos de alta exactitud calibrados con trazabilidad a patrones internacionales. En general, los autocolimadores son los instrumentos adecuados para medir desviaciones angulares con resoluciones de décimas y centésimas de arcosegundo.

La calibración de los autocolimadores es una tarea compleja, debido principalmente a los requerimientos de generación de los pequeños ángulos de referencia, los cuales deben tener una correcta magnitud. Dada esta problemática, en la literatura se encuentra que estos instrumentos pueden ser calibrados con diferentes métodos. La calibración permite aumentar la confiabilidad metrológica. Se nombran a continuación los principales métodos.

Una opción de calibración utiliza un comparador angular de alta exactitud basado en la división de un círculo, más conocido como Plato Moore. El componente principal del comparador es un rotor sobre colchón de aire de baja fricción y alta precisión en el que se instala un círculo dividido radialmente. La mínima resolución del desplazamiento con este

dispositivo es 0,0012 arcosegundo. Para la calibración de los autocolimadores, un transductor piezoeléctrico integrado en la unidad de conducción permite un posicionamiento fino en un rango de 6" (arcosegundo) con una reproducibilidad de $\sim 0,002$ " (Just et al., 2003).

Otra opción, bastante utilizada, consiste en trabajar con una barra generadora de ángulos (barra de seno). La barra construida de aluminio tiene una longitud patrón definida por dos esferas vinculadas a la misma y trabaja en conjunto con un sistema generador de ángulos (Oliveira et al., 1998). Este método, ha mejorado en los últimos años, llegándose a desarrollar un generador de ángulo pequeño altamente preciso en el Instituto Nacional de Metrología UME con el objetivo de crear la unidad del SI de ángulo plano (radián). Este dispositivo se utiliza para calibrar autocolimadores de alta precisión, pudiendo generar fácilmente pequeños ángulos en pasos de medición de 0,001" en el rango de medición de ± 8 ". Esto permite la calibración de autocolimadores electrónicos de alta resolución en pasos de medición muy pequeños, cerca de la resolución de los autocolimadores con una incertidumbre expandida de 0,01 arcosegundos ($k = 2$) (Yandaya et al., 2012).

Finalmente, Brucas et al. (2010) describe un sistema, basado en el principio de comparación y destinado a la calibración de instrumentos de medición geodésicos. Para la calibración utiliza una mesa rotativa en la cual coloca un espejo que será utilizado para la comparación. La mesa giratoria actúa como un generador de ángulos pequeños con una sensibilidad de medición de 0,032", una repetitividad de 0,03" y una desviación estándar de menos de 0,32".

La calibración del autocolimador electrónico Nikon en cuestión fue llevada a cabo por el INTI (Instituto Nacional de Tecnología Industrial) que es el Instituto Nacional de Metrología (INM) de la República Argentina, cuya función es la realización, mantenimiento y diseminación de los patrones de las unidades de medida, conforme al Sistema Internacional de Unidades (SI). Particularmente, INTI Córdoba es responsable de establecer el patrón nacional de ángulo plano y tiene reconocimiento a través del Acuerdo Internacional (BIMP, 2012).

Los resultados de la calibración permitieron realizar un estudio detallado de la CMC que se presenta en este trabajo y permite diseñar mejoras en el desarrollo del nuevo instrumento (Interfaz visual + Autocolimador), para aprovechar al máximo la capacidad potencial de la digitalización. Si bien la interfaz visual (Bergues et al., 2015), representa una mejora sustancial para el autocolimador original Nikon 6D, lo hace sobre un rango muy acotado, por lo que resulta necesario modelar el sistema en cada detalle constructivo. El objetivo es solucionar los problemas actuales para poder crear una versión que mida en un mayor campo de medición o rango, manteniendo la confiabilidad de medición confirmada con exactitudes e incertidumbres del mismo orden a las verificadas en la calibración realizada con trazabilidad nacional e internacional.

A continuación, se describirá el método de calibración para luego abocarse en detalle al estudio de los datos otorgados por la misma.

Componentes y método de la calibración.

Autocolimador e interfaz visual.

En la Fig. 1 se observa el autocolimador Nikon 6D junto con su interfaz electrónica que fue explicada en Bergues et al. (2018). Este conjunto es el dispositivo a ser calibrado. La interfaz agregada al sistema óptico del autocolimador Nikon otorga, a través de un procesamiento de imágenes, una mejora en su exactitud y resolución. La interfaz electrónica está constituida por una cámara Basler de alta definición, un dispositivo de posicionamiento y un ordenador

integrado con un software para el procesamiento digital de las imágenes.

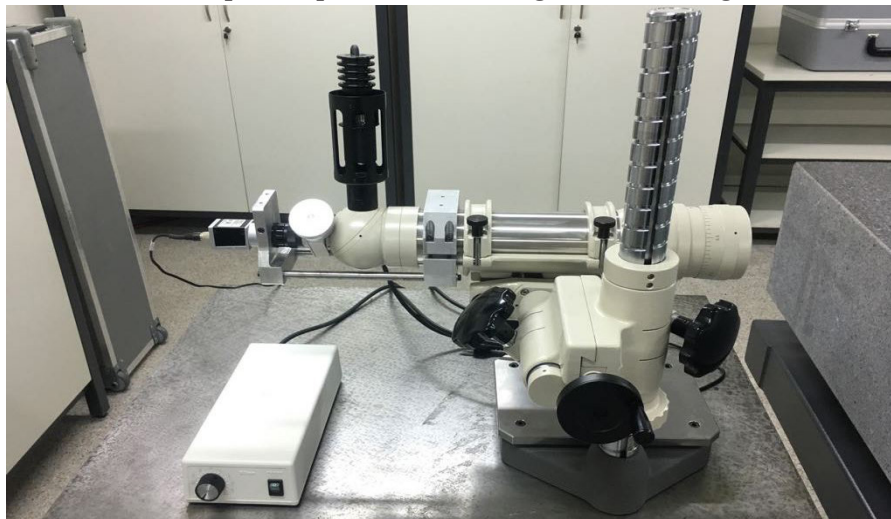


Fig. 1. Autocolimador Nikon 6D junto a su interfaz visual (cámara Basler), ubicada frente al ocular del instrumento.

Base rotatoria (mesa a índice).

La base rotatoria (ver Fig. 2) tiene la capacidad de producir ángulos con una exactitud máxima de $0,1''$. En el caso de que se necesite, se pueden crear 1440 posiciones angulares sucesivas en la unidad grado ($^{\circ}$) y luego se puede subdividir el cuarto de grado creado con el divisor de segundo (de resolución $0,1''$), llegándose a dividir el círculo en 12 960 000 partes uniformes. El movimiento se realiza mecánicamente mediante las roscas laterales que posee el dispositivo.

Si bien esta base es un dispositivo mecánico de alta exactitud y precisión para crear ángulos, no se lo utilizó como el patrón de formación del ángulo. Para aumentar la exactitud del procedimiento, se creó el paso con el instrumento patrón descrito a continuación.

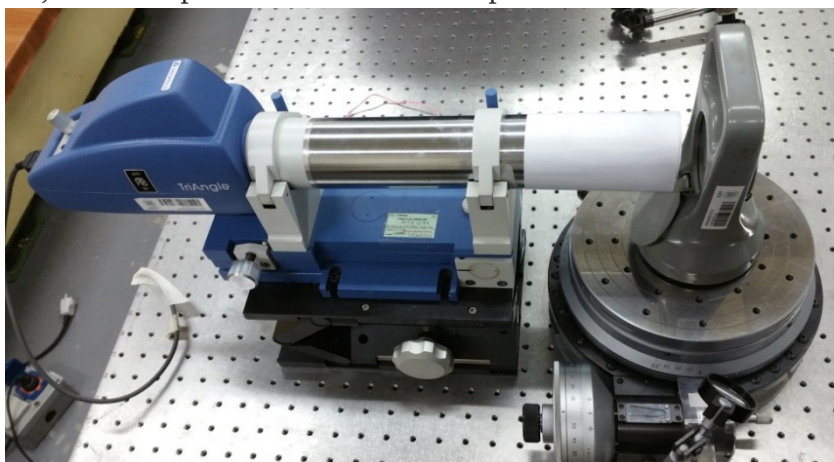


Fig. 2. En esta imagen se puede ver tanto el autocolimador patrón (izquierda) como la base rotatoria (derecha) en la cual está posicionado el espejo reflector.

Autocolimador patrón.

Para la calibración se eligió como instrumento patrón al autocolimador digital Trioptics, modelo TA300, de apertura 49 mm. Este posee una resolución máxima de 0,03 segundos de arco y una repetitividad de 0,08".

El INTI aseguró una cadena de trazabilidad del instrumento a través de la calibración vía bloques patrón. Estos bloques se utilizan para generar ángulos pequeños mediante una barra generadora de ángulos (regla de seno), en la cual se posiciona el espejo reflector observado por el telescopio del autocolimador.

J. Lerda et al. expresan: "Una regla de senos consiste en un cuerpo rígido con dos puntos de apoyo distanciados una distancia conocida (distancia L). Para realizar la medición en uno de los puntos de apoyo se colocan bloques patrón de medida conveniente (distancia h), lo cual permite generar el ángulo deseado (α) formado por el cuerpo de la regla y la superficie de medición sobre la que se coloca el instrumento". El principio sigue la siguiente ecuación:

$$\alpha = \arcsen \frac{h}{L} \quad (1)$$

En la Fig. 3 se pueden ver los componentes principales del experimento utilizado para dar trazabilidad a la calibración del Autocolimador Patrón (Trioptics TA300).

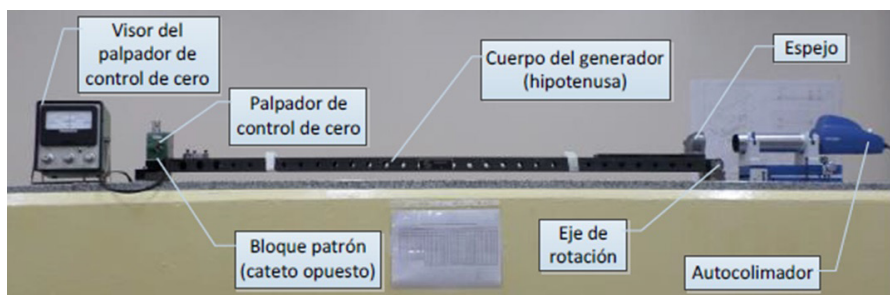


Fig. 3. Generador de pequeños ángulos utilizado para dar trazabilidad a la calibración del Autocolimador patrón (Trioptics TA300). En este gráfico se pueden conocer las componentes de la trazabilidad, el instrumento patrón es contrastado con la generación del ángulo producido por bloques patrón.

Método.

Según procedimiento INTI definido por el nombre PE-MTR.01.11 Rev. 02 para Calibración de Autocolimadores se armó la medición esquematizada en la Fig. 4.

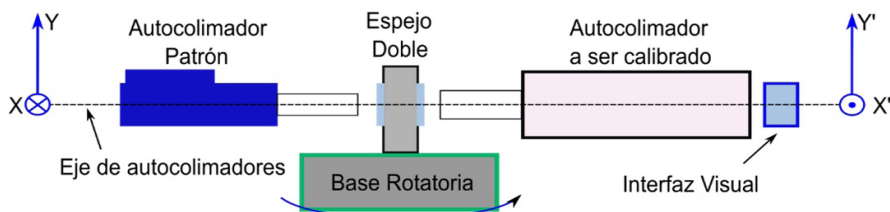


Fig. 4. Esquema de la calibración: se alinean los dos autocolimadores en un mismo eje óptico para no introducir ángulos parásitos. El espejo reflector, montado sobre la base rotatoria es doble para que los autocolimadores midan el mismo paso angular.

Los autocolimadores se posicionaron de modo que sus ejes estén perpendiculares a las caras de un espejo doble. Estos espejos poseen la particularidad de ser planos con alta reflectividad y, además, sus caras son paralelas. De este modo los ejes de los dos autocolimadores quedan alineados. El eje X' del autocolimador Nikon se calibra haciendo girar la base rotatoria donde está apoyado el espejo. De este modo, como los autocolimadores están fijos, la rotación del espejo es medida por el autocolimador patrón en su eje X. Como las caras del espejo doble son paralelas el autocolimador a ser calibrado mide en su eje X' lo mismo que el autocolimador de referencia. Los apartamientos entre ambas escalas permiten realizar la calibración. Si ahora se gira el autocolimador a ser calibrado sobre su eje de modo que el eje Y' quede horizontal (ver fig. 5) entonces, se puede calibrar el otro eje con el procedimiento indicado anteriormente. Cabe destacar que cada autocolimador se montó con la apertura angular completa (que en el caso del Nikon es 12'x16').



Fig. 5. Imagen de la medición realizada. Se puede observar como el autocolimador Nikon 6D está girado para que pueda capturar el ángulo medido por el otro eje de la escala.

Rangos de medición.

Se evaluaron datos sobre dos rangos o campos de medición del instrumento, una definida por un rango corto (enfocando la construcción del ángulo en el centro de la escala) y otra por un rango largo (cubriendo una extensión mayor de la escala del instrumento). La calibración de ambos ejes en el rango corto se efectuó en un intervalo de $\pm 10''$ con pasos de $1''$. Por otro lado, la calibración del rango largo para el eje X fue en el intervalo de $\pm 480''$ con pasos de $60''$ y para el eje Y fue de $\pm 360''$ con pasos de $40''$. Esto se debe a que la interfaz visual tiene diferentes aperturas angulares para medir los otros parámetros: la guiñada y el cabeceo.

En todos los ciclos de medición se garantizó que el cero absoluto esté comprendido en $\pm 0,5$ píxeles de su valor (812 en X y 617 en Y). Para esto se utilizó la interfaz de usuario del instrumento electrónico calibrado. Este tiene la opción de ver dónde está posicionada la cruz de medición de la escala; esta cruz se puede observar en la Fig. 6, la cual es una imagen

de la interfaz de usuario. En la pantalla del instrumento virtual aparece esta cruz, que se va moviendo a través de toda la pantalla de acuerdo a su posición. Como se puede observar, debajo del botón "SET 0" aparecen las coordenadas del centro de la cruz. Con este dato se puede posicionar la medición inicial (la referencia) en el centro de escala. El posicionamiento se realiza mediante los ajustes mecánicos que posee el soporte del autocolimador Nikon 6D, tanto de forma vertical como horizontal, para que cada línea que forma la cruz quede en el centro, tal cual se muestra en la Fig. 6.

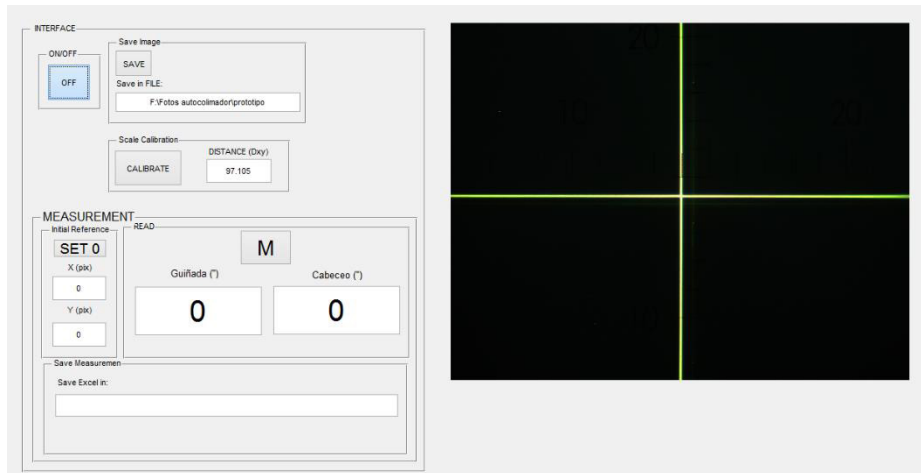


Fig. 6. Interfaz de usuario del autocolimador electrónico Nikon 6D.

Resultados.

Tal como se describió en la Sección Método, las rotaciones angulares de la mesa se pueden leer en dos ejes: en el eje X del autocolimador patrón (a esta lectura la llamaremos valor de referencia) y en el eje X' del autocolimador a ser calibrado (a esta lectura la llamamos valor indicado). Esta medición se repite tres veces y el valor indicado que se reporta es el promedio aritmético de las tres mediciones.

De esta manera, el error de medición del autocolimador electrónico Nikon 6D, con el que se grafican las mediciones realizadas, está dado por:

$$Error = Valor\ indicado - valor\ de\ referencia \quad (2)$$

Estos valores se tomaron siendo las condiciones de temperatura iguales a (20 ± 1) °C. Además, se creó una aislación térmica entre el operario y los instrumentos de medición. El operario introduce cambios en las corrientes de aire al introducir su temperatura corporal, que al medir ángulos cercanos a la centésima de arcosegundo, generan errores en la construcción del haz colimado del autocolimador.

A continuación, se muestran las gráficas que se derivan de las mediciones y del error calculado con la Ec. (2). Las mismas expresan los resultados para ambos ejes y en el rango corto (± 10) y largo (± 480).

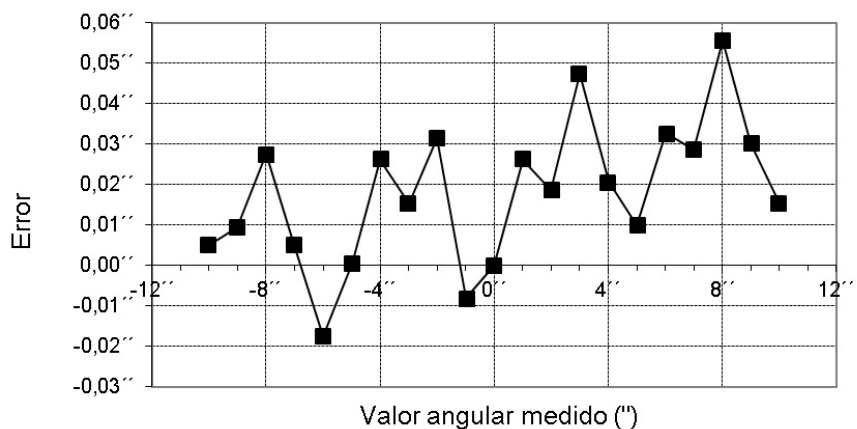


Fig. 7. Medición del eje X, rango corto $\pm 10''$ con pasos de $1''$.

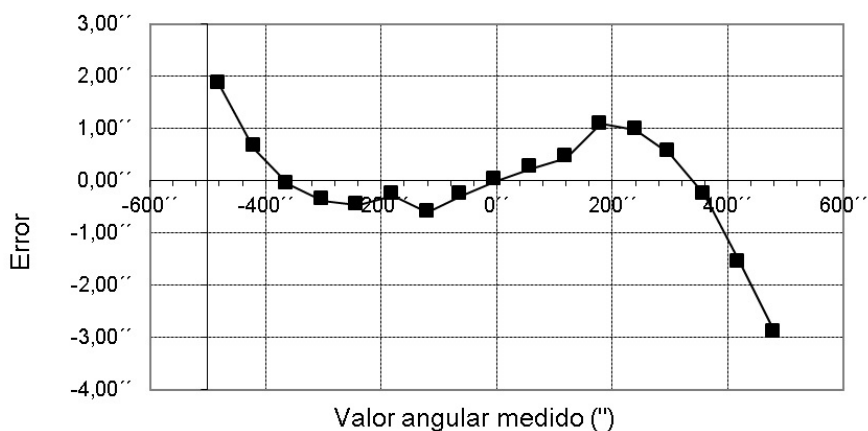


Fig. 8. Medición eje X, rango largo $\pm 480''$ con pasos de $60''$.

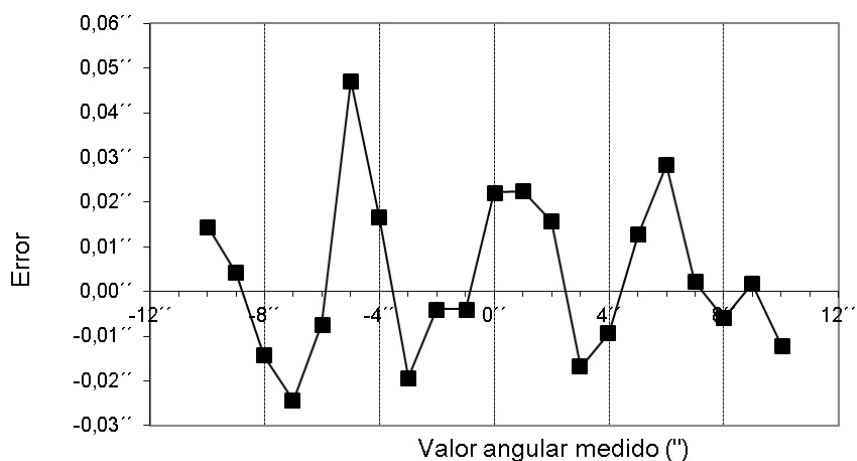


Fig. 9. Medición del eje Y, rango corto $\pm 10''$ con pasos de $1''$.

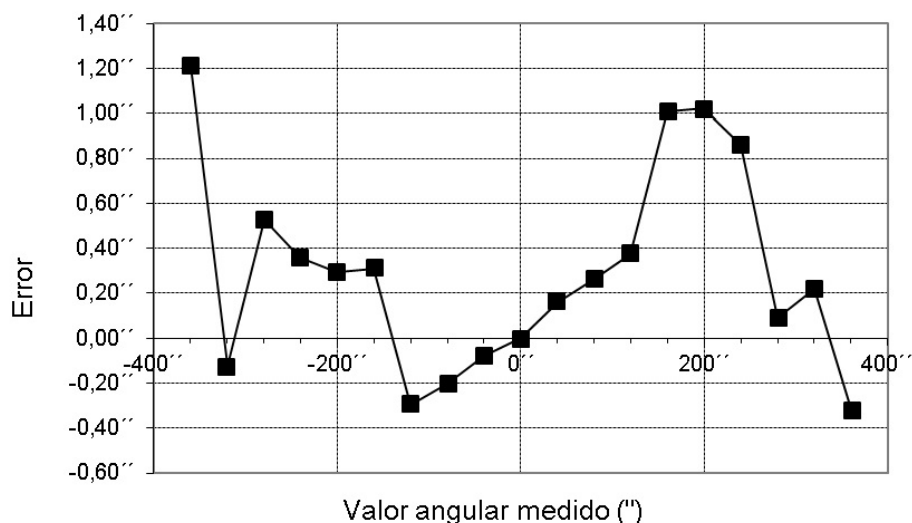


Fig. 10. Medición del eje Y, rango largo ± 360 con pasos de $40''$.

Los datos capturados, junto con estas gráficas, nos ayudan a comprender algunas problemáticas a la vez que nos dirigen al desarrollo de nuevas técnicas, de tal manera que se pueda mejorar el diseño de la interfaz visual. A continuación expresamos los descubrimientos principales.

Incertidumbre de medición en la Calibración.

El cálculo de incertidumbre en la calibración se realizó según lineamientos de la Guía JCGM100: 2008 - Evaluación de datos de Medición. Guía para la Expresión de Incertidumbre de Medición. En la Tabla 1 se indican las contribuciones de las componentes de incertidumbre, identificadas por el origen o fuente y sus valores de incertidumbre típica o estándar. Asumiendo que las variables de entrada son no correlacionadas, se calcula la incertidumbre combinada como raíz cuadrada de la suma de las varianzas calculadas y asumidas, para dar la Incertidumbre expandida U95% ($k=2$) de cada rango, resultando:

Eje X y eje Y rango corto: U95% = $0,17''$

Eje X y eje Y rango largo: U95% = $0,22''$

COMPONENTE N°	FUENTE DE INCERTIDUMBRE	$u(x_i)$	Contrib. %
1	Incertidumbre del Patrón (´´)	0,10	85,8
2	Incertidumbre error del patrón (´´)	0,00	0,0
3	Resolución del patrón (´´)	0,00	0,1
4	Resolución AC bajo calibración (´´)	0,01	0,3
5	Máximo de $s(x)/\text{raíz}(n)$	0,04	13,9

Tabla 1. Contribuciones de las componentes de incertidumbre.

Si observamos la Tabla 1, claramente, la contribución de la fuente de incertidumbre del instrumento Patrón es la mayor, representando un 85% de la incertidumbre total.

Error sistemático rango corto (eje X).

En el rango corto, eje X, se presenta un error sistemático que está en el rango $\pm 0,06''$ y se observa una pendiente creciente en dirección +x. En la Fig. 10 está graficada la pendiente, la cual posee un valor de $0,0014''$. Esta pequeña pendiente puede deberse a condiciones ambientales, como el aumento de la temperatura a medida que avanza la medición. Es por esto que el operario que realizó la medición se tuvo que separar de la misma mediante un material aislante de temperatura.

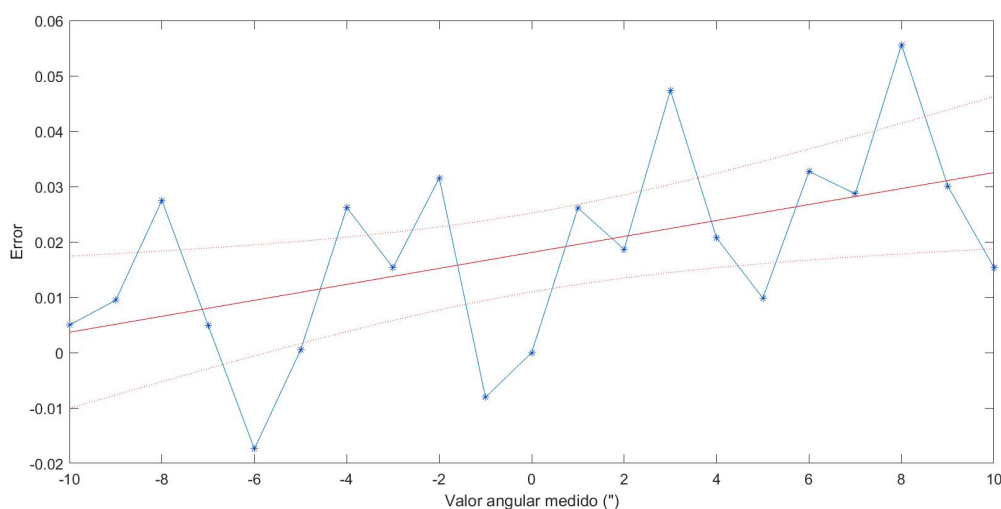


Fig. 11. Modelo de regresión lineal de la medición en el rango corto (eje X).

Error sistemático rango corto (eje Y).

En el rango corto, eje Y, la pendiente es pequeña, pero se observa otra particularidad (que también se repite en el rango largo): los datos tienen algunos valores que se apartan bastante de la recta de regresión, cuestión que no se observa en el eje X. Si bien se mantiene la resolución de la medición dentro de los $\pm 0,06''$, hay saltos de magnitud más apreciables que el suave crecimiento de la pendiente del eje X.

La posición de los píxeles en un sensor no es matemáticamente exacta, sino que cada pixel está muy próximo a la posición ideal que debería ocupar. Estas variaciones de posición se producen durante el proceso de fabricación. Llamaremos a estas variaciones de posición como irregularidades. Como la construcción de la matriz de píxeles sufre de pequeñas irregularidades que derivan en una posición dispar de los píxeles en el sensor se debe hacer un estudio de la misma. En Just et al. (2003), se las estudiaron para un sensor CCD de mayor resolución (el cual fue calibrado con una incertidumbre de $0,007''$ y con pasos de $0,005''$) y llegaron a la conclusión de que estaba por debajo de los $0,002''$. Estas irregularidades se presentan claramente en la forma del pixel, que si bien debería ser cuadrado en la mayoría

de los casos, no lo es. Además, esta pérdida de forma no se mantiene constante en toda la superficie del CCD, sino que las imperfecciones cambian a lo largo del mismo. Sin embargo, a través del estudio nombrado, se pueden proyectar en el error sistemático que se define a continuación para nuestra propia cámara.

En nuestro caso, como expresamos en Bergues et al. (2018), contamos con una cámara Basler Ace de menor resolución (y menor exactitud en el CCD de la misma), por lo cual las irregularidades que se observan en los errores sistemáticos se proyectan mayores (similares a los 0,02").

Errores de la óptica

Resolución limitada del Autocolimador Nikon.

El autocolimador Nikon posee una óptica que permite una resolución máxima de 0,5" según el fabricante. A esta óptica de por sí limitada a esta resolución se le agrega una óptica de cámara que posee irregularidades, deformaciones propias del sistema de construcción. Además, al alinear ambas ópticas, se puede producir un error en el paralelismo del haz de medición, que produzca que el autocolimador no esté apuntando al infinito. Y en la misma línea de análisis, nos encontramos con el espejo reflector que no tiene una planitud absoluta, si bien puede ser de gran reflectividad, todo espejo posee un error de planitud. Como consecuencia de estos factores se observan discrepancias entre los ejes de medición.

Relación de las curvas de calibración en el rango largo con la deformación introducida por el lente.

Como se expresa Bergues et al. (2017), si bien cada lente del sistema tiene corregidas las principales componentes de aberración que degradan la imagen, se mantiene de manera constante la distorsión de campo, debido principalmente a la lente de la interfaz visual conectada al autocolimador Nikon; por esta razón, la calibración fina no es sencilla. La distorsión de campo, entre otras cosas, afecta los desplazamientos relativos del objeto a medir lo cual implica que las mediciones son incorrectas cuando se trabaja con entornos de alta precisión, (Geckeler et al.).

Esta distorsión de campo se puede medir siguiendo el método presentado en Bergues et al. (2017). Este método está fundamentado en la medición de la distorsión del lente mediante la captura y procesamiento de las imágenes generadas virtualmente por el sistema óptico del instrumento. El procesamiento planteado ofrece un polinomio de calibración propio del lente.

La incertidumbre del montaje óptico cuando hay una desalineación es un dato adicional que emerge del estudio del polinomio obtenido. Si se realiza una calibración debe agregarse una contribución a la incertidumbre de la escala de acuerdo a esta deformación. La contribución es de 0,06" para la región central ($\pm 30''$) y hasta 1,7" si se usa la escala completa ($\pm 1800''$).

Conclusiones.

Es necesario estudiar en detalle los datos otorgados por la medición, que expresan de manera concreta lo siguiente: la amplitud del intervalo de errores en el eje X en el rango corto es de $0,08''$ y la amplitud del intervalo de errores en el eje Y en el rango corto es también $0,08''$. Si se compara este error con la incertidumbre de la medición que es de $0,17''$, se llega a la primera conclusión importante: para poder tomar buenas decisiones en el proceso de mejora del autocolimador es imprescindible tener una mejor referencia en el país o bien enviar el equipo a un laboratorio donde la exactitud sea mejor. Claramente, como se destacó en Bergues et al. (2017), la calibración fina del dispositivo mejorado no es sencilla.

Por otro lado, en esta calibración se pueden observar varias fuentes de errores sistemáticos, que hacen a la incertidumbre y que nos proveen la línea de trabajo para las futuras calibraciones. Estas observaciones son cruciales y no se hubieran descubierto sin este procedimiento:

- Influencia del no paralelismo de los haces (el autocolimador no está enfocado al infinito);
- Desviaciones de la planitud del espejo;
- Errores sistemáticos de la matriz CCD;
- Errores causados por el sistema óptico de autocolimador;
- Errores causados por la óptica de la cámara.
- Errores sistemáticos de patrón.

Dado a que la incertidumbre del patrón enmascara la medición en el rango corto, no se puede aseverar cuáles son los errores sistemáticos descritos sean los de mayor peso en la calibración.

Como consecuencia de estos factores, principalmente el último, se deduce que se deben crear nuevos modelos de calibración para este tipo de instrumentos electrónicos. Esta situación se plantea por la gran resolución de estos instrumentos. Para corroborar la precisión y exactitud se necesitan patrones de gran resolución que contengan también una gran precisión y exactitud.

Por otro lado, las observaciones remarcan la necesidad de tener un mejor sistema óptico de captura para proveer de una interfaz adecuada al instrumento mejorado. Las distorsiones que se observan al recorrer la óptica en toda su expansión explican, en primera instancia, la gran diferencia que existe entre el valor medido por el patrón y el instrumento calibrado cuando se aleja del rango corto (y central). La deformación introducida por el lente de la cámara en relación con la óptica del autocolimador Nikon deben ser mejoradas si se desea trabajar en la centésima de arcosegundo en una mayor expansión de rango de escala.

Un objetivo de la nueva calibración será poder distinguir y cuantificar las irregularidades de la matriz CCD. Esto nos otorgaría el modelo adecuado para la escala del autocolimador, que por el momento se realizó con un supuesto lineal del retículo.

Finalmente, el estudio de la CMC del autocolimador digital desarrollado en CEMETRO UTN - FRC y los importantes hallazgos realizados, tanto cuantitativamente como cualitativamente, contribuyen en la caracterización metrológica precisa del instrumento para la definición correcta del Alcance acreditable (OAA). Asimismo, contribuirá a definir la incertidumbre mínima y el campo de medida de futuros servicios de calibración y medición factible de brindar con el instrumento en el Laboratorio CEMETRO (como Laboratorio 44), integrante de la red de laboratorios del Servicio Argentino de Calibración INTI-SAC desde 2011 ininterrumpidamente.

Referencias

- A. Just, M. Krause, R. Probstan, R. Wittekopf "Calibration of high-resolution autocollimators against an angle comparator" *Metrologia* 40 (2003) pp. 288–294
- J.C. Valente de Oliveira, L.H. Brum Vieira "Traceability Chain and Dissemination of Angle Measurement in Brasil" *Precision Engineering* Vol. 22 (1998) pp. :141–152
- Tanfer Yandayan, Bulent Ozgur, Nuray Karaboce and Orhan Yaman, "High precision small angle generator for realization of the SI unit of plane angle and calibration of high precision autocollimators", *Measurement Science and Technology*, 9(23), 2012
- D. Brucas, V. Giniotis "Calibration of precision polygon/autocollimator measurement system" *Journal of Physics: Conference Series* 2388(2010) 1-7
- BIMP, 2012. Recuperado de https://kcdb.bipm.org/appendixC/country_list_search.asp?CountSelected=AR&service=L/DimMet.3
- G. J. Bergues, L. Canali, C. Schurrer and A. G. Flesia, "Electronic Interface With Vignetting Effect Reduction for a Nikon 6B/6D Autocollimator," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 64, no. 12, pp. 3500-3509, Dec. 2015.
- Bergues, G., Schürerer, C., & Brambilla, N. (2018). Interfaz Visual Electrónica para Autocolimador Nikon 6B/6D. *Revista Tecnología Y Ciencia*, (31), 134-142. Recuperado a partir de <http://rtyc.utn.edu.ar/index.php/rtyc/article/view/111>
- Lerda, J., Bellelli, D., Blasco, M., Gastaldi, B., & Spesot, A. (2016). "Desarrollo del nuevo patrón nacional de ángulo plano". *Revista De La Facultad De Ciencias Exactas, Físicas Y Naturales*, 3(1), 63 - 70.
- G. J. Bergues, C. Schürerer and N. Brambilla, "Uncertainty Determination of the Set Nikon 6B Autocollimator + Visual Interface," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 67, no. 5, pp. 1058-1064, May 2018.
- G. J. Bergues, C. Schurrer, N. Brambilla and L. Canali, "Misalignment contribution to the autocollimator's scale distortion," 2017 *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, Turin, 2017, pp. 1-5.
- R.D. Geckeler A. Just "Optimized use and calibration of autocollimators in deflectometry" *Proc. SPIE* vol. 6704 pp. 670407-670407-12 2007.