

# Desarrollo del nuevo patrón nacional de ángulo plano

Juan M. Lerda<sup>1</sup>; Diego A. Bellelli<sup>1</sup>; Marcos J. Blasco<sup>2</sup>; Bruno R. Gastaldi<sup>1</sup>; Alfredo F. Spesot<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratorio de Metrología Dimensional, INTI – Centro Regional Córdoba, Argentina

<sup>2</sup>Becario del Laboratorio de Metrología, alumno de la carrera Ingeniería Electrónica, FCEFYN, UNC, Argentina

<sup>3</sup>Becario del Laboratorio de Metrología, alumno de la carrera Ingeniería Aeronáutica, FCEFYN, UNC, Argentina

Fecha de recepción del manuscrito: 04/09/2015

Fecha de aceptación del manuscrito: 12/01/2016

Fecha de publicación: 15/03/2016

**Resumen**—La industria Nacional posee y utiliza patrones e instrumentos angulares en su proceso productivo, tales como mesas rotativas, inclinómetros, niveles electrónicos, bloques y polígonos angulares. El laboratorio de metrología dimensional del INTI – Centro Regional Córdoba es el responsable de establecer, mantener y diseminar el patrón nacional de ángulo plano por lo cual debe calibrar adecuadamente dichos instrumentos y patrones con una incertidumbre de medición acorde a los requerimientos actuales. El instrumento principal del patrón nacional de ángulo plano es el generador de pequeños ángulos, el cual permite la realización de la unidad de ángulo plano, el radian, del Sistema Internacional (SI) de unidades. Actualmente la materialización de esta unidad se realiza con un generador del tipo “regla de senos”. A fin de incrementar la confiabilidad y exactitud de sus mediciones el laboratorio elaboró un proyecto cuyo objetivo es el desarrollo de un nuevo generador, el cual tendrá un intervalo de indicación de 1° y pasos de medición de hasta 0,1'', el cual tendrá como objetivo principal la calibración de autocolimadores electrónicos de alta resolución con una incertidumbre expandida menor a 0,05'' ( $k = 2$ ).

**Palabras clave**—Metrología, calibración automática, patrón nacional de ángulo plano, regla de senos, autocolimadores.

**Abstract**—The Argentinian industry have and uses angle standards and angle instruments in its manufacturing process, such as rotary tables, inclinometers, electronic levels, angle blocks and optical polygons. The dimensional metrology division of INTI – Córdoba is the responsible of keeping the angle standard and because of that, it must calibrate all the angular standards and instruments with an uncertainty according to the actual requirements. The main instrument for the angle standard is the small angle generator which can generate the plane angle unit, the radian in SI units. Nowadays the materialization of this unit is made with a sine bar type small angle generator. Looking to improve reliability and accuracy of angular measurements, the Dimensional Metrology Division of INTI – Córdoba started a project which aim is to develop a new small angle generator with 1° of measurement interval and measurement steps of 0,1'' to calibrate high resolution electronic autocollimators with an expanded uncertainty smaller than 0,05'' ( $k = 2$ ).

**Key words**—Metrology, automatic calibration, plane angle standard, sine bar, autocollimators.

## INTRODUCCIÓN

El INTI es el máximo órgano técnico de la República Argentina en el campo de la Metrología. Es función legal del INTI la realización y mantenimiento de los patrones de las unidades de medida, conforme al Sistema Internacional de Unidades (SI), así como su diseminación en los ámbitos de la metrología científica, industrial y legal, constituyendo la cúspide de la pirámide de trazabilidad metrológica en la República Argentina. El laboratorio de metrología dimensional del INTI – Centro Regional Córdoba es responsable de establecer, mantener y diseminar el patrón nacional de ángulo plano.

A fin de incrementar la confiabilidad y exactitud de sus mediciones el laboratorio elaboró un proyecto cuyo objetivo es el desarrollo de un nuevo generador de pequeños ángulos con capacidad automática de posicionado. Este nuevo generador tendrá como función

principal la calibración de autocolimadores electrónicos de alta resolución.

## ACTUAL PATRÓN DE ÁNGULO

El instrumento principal del patrón nacional de ángulo plano es un generador de pequeños ángulos el cual permite la realización de la unidad de ángulo plano, el radian, del SI de unidades. La unidad de ángulo plano es trazable a la unidad longitud a través de la siguiente relación trigonométrica ec. (1).

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{h}{L}\right) \quad (1)$$

El radian se materializa con un generador del tipo “regla de senos”. Fig 1. 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 ( $\alpha$ ) formado por el cuerpo de la regla y la

Dirección de contacto:

Juan Manuel Lerda, Av. Vélez Sársfield 1561, CC 884 X5000JKC, Tel.: 0351 4684835 interno 159, jlerda@inti.gov.ar

superficie de medición sobre la que se coloca el instrumento.

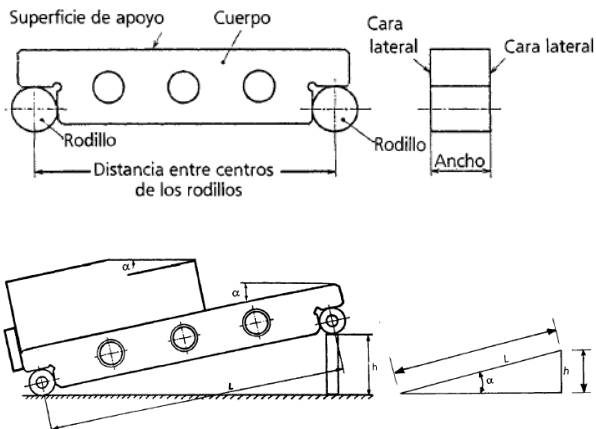


Fig. 1. Regla de senos

Vemos que  $L$  es la distancia entre el eje de rotación de la regla y el punto de apoyo sobre los bloques patrón y  $h$  es la distancia compuesta por los bloques patrón de diferentes longitudes.

En el generador de pequeños ángulos actual del INTI,  $L$  es la distancia entre un eje de rotación (montado sobre 2 rodamientos) y el eje de un palpador electrónico de control de cero. Fig. 2.

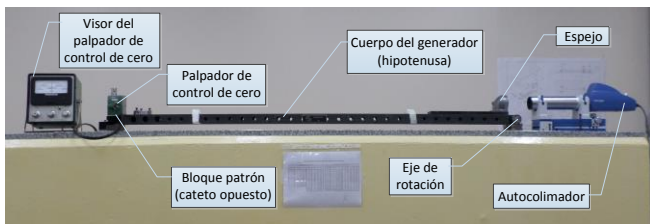


Fig. 2. Generador de pequeños ángulos actual

La distancia  $L$  se mide en una máquina de medir unidimensional con un interferómetro láser incorporado, siendo el valor medido actualmente:  $1676,632 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$ .

La distancia  $h$  (cateto opuesto), formada por bloques patrón grado 0 (ISO 3650) los cuales son calibrados por comparación mecánica en el mismo laboratorio del INTI-Córdoba.

El palpador en el extremo del generador, de resolución  $0,04 \mu\text{m}$ , permite controlar la fuerza de medición al insertar los diferentes bloques patrón, es decir realiza un control del cero.

El generador es de operación manual y permite la calibración de autocolimadores con incertidumbres no menores a  $0,12''$ .

Al ser manual la operación, la calibración se efectúa con pasos no menores a  $1,2''$ . En la Fig. 3 se observa el gráfico de calibración de un eje de un autocolimador de alta resolución, en un intervalo de indicación de  $\pm 21''$ , con una incertidumbre expandida de calibración de  $0,15''$  ( $k = 2$ ).

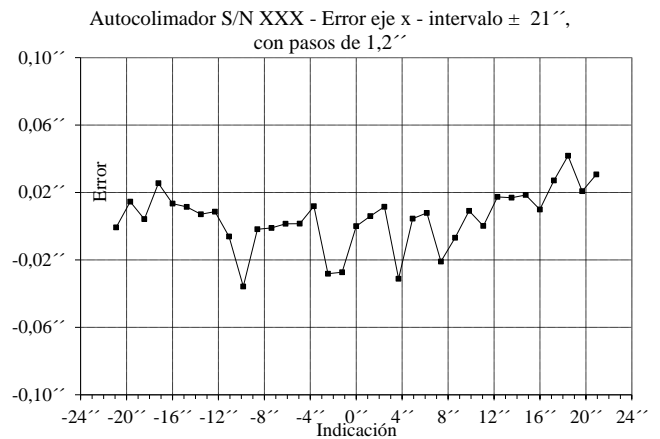


Fig. 3. Gráfico de calibración de un autocolimador

La calibración de autocolimadores con el generador actual presenta los siguientes inconvenientes:

- Medición manual, lo cual implica la necesidad de un operador durante todo el proceso de medición, el cual puede durar hasta 2 semanas.
- La presencia del operador genera un gradiente térmico importante sobre el generador durante la medición, lo cual afecta considerablemente la repetibilidad de las mediciones.
- El paso mínimo práctico de  $1,2''$  no permite controlar los autocolimadores de forma adecuada. No es posible detectar errores con pasos próximos a la resolución.
- La incertidumbre de calibración de autocolimadores, si bien es suficiente para aplicaciones industriales, no lo es para aplicaciones de investigación y desarrollo.

## NUEVO PATRÓN NACIONAL DE ÁNGULO PLANO

A fin de incrementar la confiabilidad y exactitud de sus mediciones el Laboratorio de Metrología Dimensional del INTI – Centro Regional Córdoba elaboró un proyecto cuyo objetivo es el desarrollo de un nuevo generador de pequeños ángulos cuya función principal sea la calibración de autocolimadores electrónicos de alta resolución.

Para esto, se diseñó y construyó un nuevo generador de posicionado automático que permitirá generar pequeños ángulos con pasos de hasta  $0,1''$  en un intervalo de trabajo de  $1^\circ$ . El objetivo principal será calibrar autocolimadores electrónicos con una incertidumbre expandida menor a  $0,05''$  ( $k = 2$ ). Este sistema contará con una interfaz gráfica de usuario, mediante la cual se podrá operar y posicionar el generador. El desarrollo permitirá reducir la incertidumbre de calibración de patrones e instrumentos angulares y además le dará al laboratorio la posibilidad de participar en comparaciones internacionales.

## DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El generador está constituido por los siguientes elementos principales: un palpador de alta exactitud ( $h$ ), un sistema de rotación y cuerpo principal ( $L$ ) y un sistema electrónico de control.

La exactitud del generador dependerá principalmente de una calibración adecuada del palpador ( $h$ ), de un diseño

mecánico óptimo y de un sistema de control que permita el posicionado con pasos muy pequeños ( $0,1''$ ) y reproducibles. De este modo, se dividió el proyecto total en tres desarrollos complementarios e independientes:

**Sistema automático de calibración de palpadores**

El sistema automático de calibración de palpadores permite minimizar los errores introducidos por el operador e incrementar de manera significativa la cantidad de puntos de calibración. El sistema trabaja en conjunto con un calibrador dinámico laser, el cual brinda la trazabilidad requerida.

Como base para implementar este sistema se utilizó el banco de medición de un antiguo rugosímetro marca Taylor Hobson, modelo Talysurf 5-120, actualmente en desuso por obsolescencia. Este equipo posee una columna de desplazamiento de un intervalo de aproximadamente 360 mm sobre la que se desplaza un cabezal de medición sobre guías rectificadas. La columna del banco de medición posee un motor de corriente continua (CC) con reducción, acoplado a un tornillo, el cual desplaza dicho cabezal. Fig. 4.

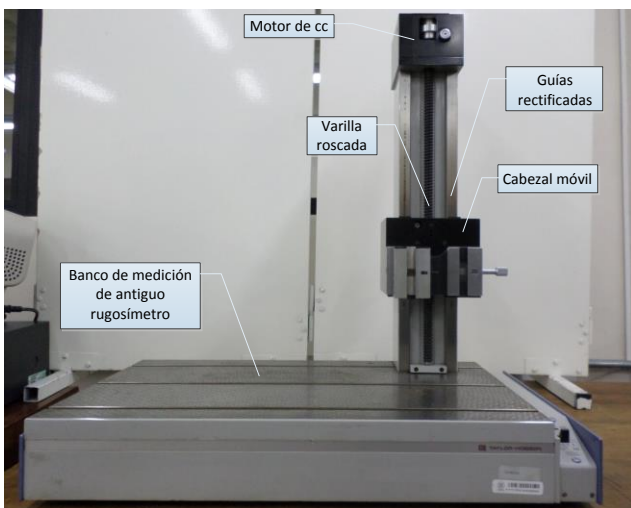


Fig. 4. Banco de medición del antiguo rugosímetro

Se fijará sobre el cabezal móvil el palpador a calibrar, y se desplazará el conjunto hasta que la punta de contacto de medición del palpador entre en contacto con una superficie fija del banco. Luego de este contacto, por cada incremento de desplazamiento del cabezal en el sentido de contacto del palpador, este incrementará su lectura de manera proporcional. Sobre el cabezal móvil y la columna se fijaran el espejo y el interferómetro del calibrador dinámico láser. Este último medirá de forma continua el desplazamiento del cabezal de medición y por ende determinará el desplazamiento del palpador (d). Fig. 5.

Para automatizar este método de calibración de palpadores, se diseñó una placa electrónica de control capaz de posicionar el cabezal y tomar la medición del palpador a calibrar y, de manera simultánea, disparar la captura de medición del calibrador dinámico láser. Se anexó al extremo superior del tornillo que desplaza el cabezal un encoder rotativo. Este encoder es utilizado por el sistema

para realimentar la posición requerida a través de un microcontrolador. Este microcontrolador interpreta los comandos enviados por la PC, controla al motor de corriente continua, al palpador sometido a evaluación y al calibrador dinámico láser. Fig. 6.

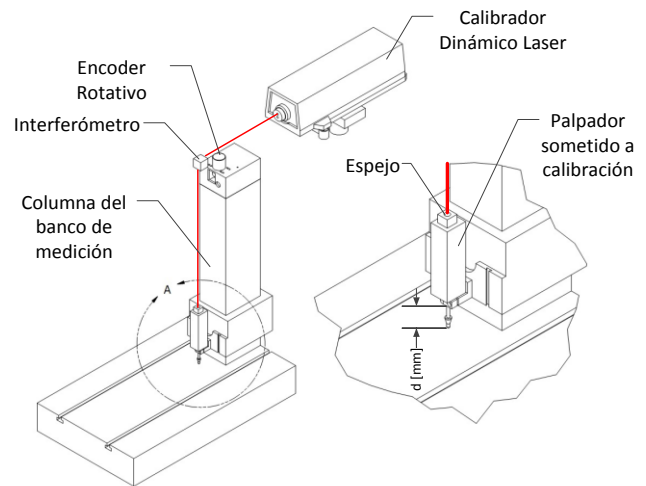


Fig. 5. Esquema del método de calibración de palpadores implementado

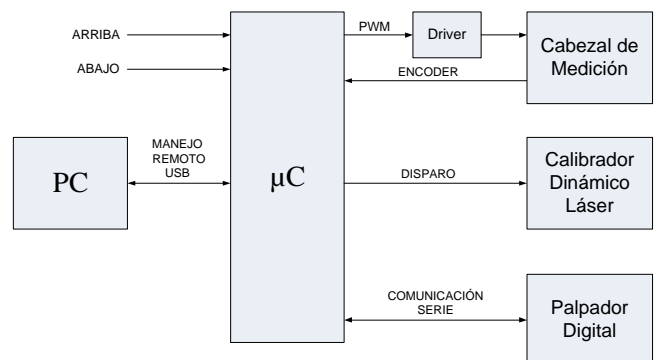


Fig. 6. Diagrama de la placa de control

Por medio de una interfaz gráfica de usuario se configuran parámetros inherentes a la calibración y se ejecuta la calibración automática resguardando los datos al finalizar. El intervalo de indicación del sistema es de 360 mm, con la posibilidad de realizar pasos de calibración de  $7 \mu\text{m}$ .

Es importante destacar que este sistema se utiliza como “medio” para la calibración de palpadores, y no como patrón de referencia; sin embargo la exactitud y repetibilidad en su posicionado son características esenciales para una correcta calibración de los palpadores. De igual modo, es fundamental que los 6 grados de libertad del cabezal respecto a la columna (2 rectitudes, 3 rotaciones y un posicionado) sean acordes a los requerimientos de calibración.

Para corroborar si mecánicamente este sistema cumple con los requerimientos metroológicos adecuados para la implementación del sistema automático de calibración de palpadores se realizó la calibración del sistema de posicionado y el control de rectitud en los ejes “X” e “Y”

sobre la columna de desplazamiento del banco de medición.  
Fig. 7.

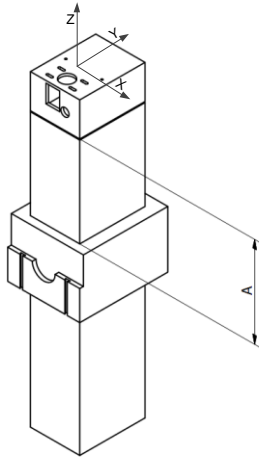


Fig. 7. Definición de ejes de coordenadas de la columna de medición

Se realizó la calibración del sistema en un intervalo de 330 mm, abarcando casi la totalidad del intervalo útil (rango largo) y en un intervalo de 50 mm (rango corto) en la zona central del mismo. En el rango largo se controlaron 12 puntos, mientras que en el rango corto, se controlaron 6 puntos. Para ambos casos se realizaron tres ciclos en sentido descendente y ascendente. Fig. 8.

Los resultados obtenidos mostraron que el sistema posee características adecuadas para su utilización como sistema de posicionado en la automatización de la calibración de palpadores de alta exactitud. Puede observarse de los gráficos de error una adecuada repetibilidad de posicionado.

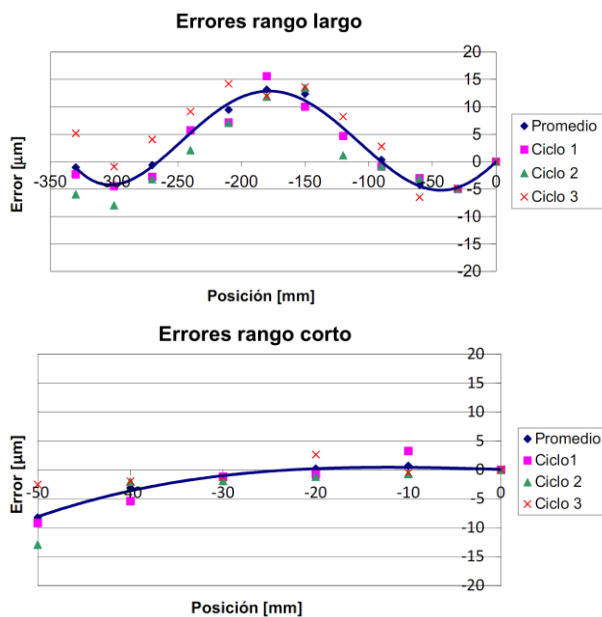


Fig. 8. Calibración de posicionado de la columna de medición

La rectitud de la columna para el eje "X" fue de  $0,006 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$  y para el eje "Y" de  $0,004 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$ . Fig. 9.

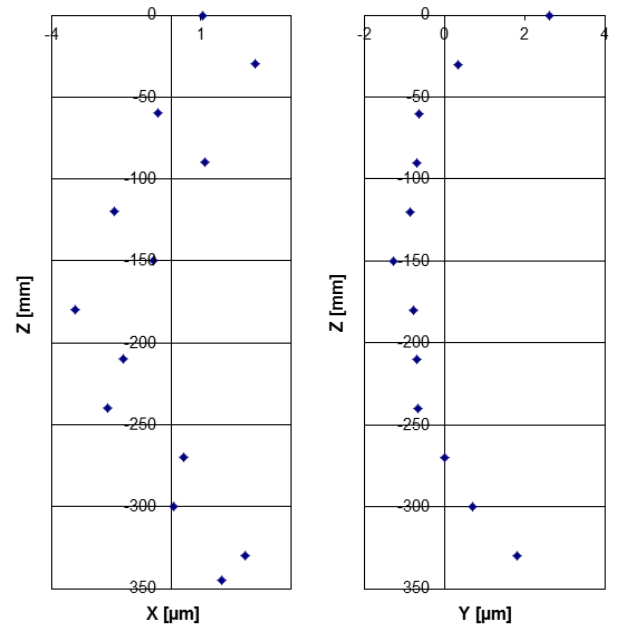


Fig. 9. Control de rectitud

En la siguiente figura se muestra el montaje completo momentos previos a la calibración del palpador marca TESA, modelo 32.10803. Fig. 10.

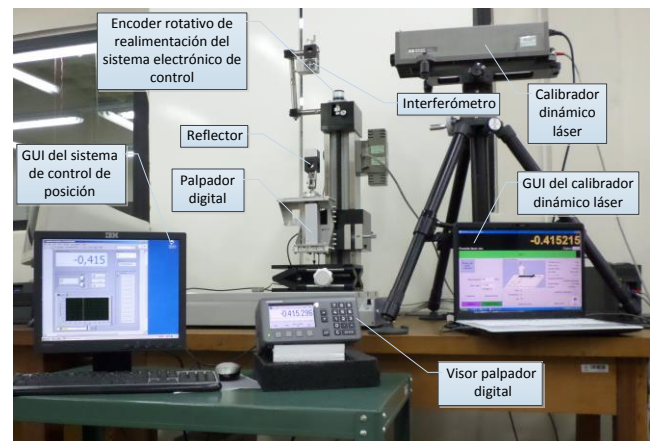


Fig. 10. Montaje completo del sistema previo a una calibración

### Diseño mecánico del generador de pequeños ángulos

El diseño mecánico del generador se realiza en conjunto entre el laboratorio CEMETRO de la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Córdoba y el INTI. El diseño del primer prototipo del generador se encuentra actualmente en proceso de fabricación.

El cuerpo principal y la mayoría de los demás componentes son de aluminio. Fig. 11. El sistema de rotación está constituido por esferas de acero de pequeños errores de forma. El diseño permite la medición de la distancia entre el palpador y el eje de rotación ( $L$ ), cuyo valor nominal es de 400 mm. La medición deberá efectuarse con una incertidumbre expandida menor o igual

a 1  $\mu\text{m}$ , lo cual dependerá principalmente de los siguientes requerimientos de diseño:

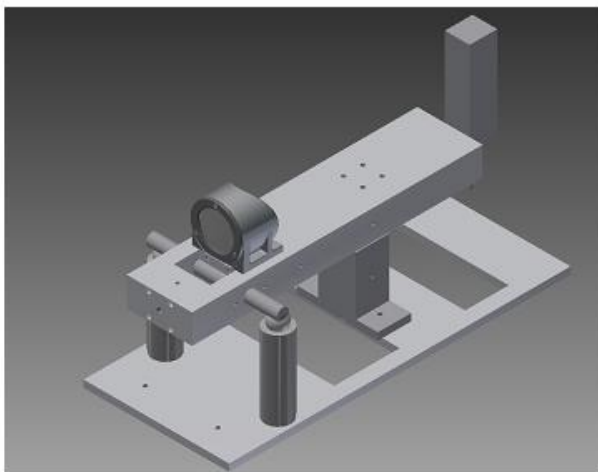
- Perpendicularidad entre el eje de rotación del generador (definido por los centros de las esferas de acero) y el eje de referencia del cuerpo del generador (definido por los centros de esferas colocadas en un lateral del cuerpo del generador)
- Centrado entre el vástago del palpador y las esferas de rotación
- Perpendicularidad entre el plano de referencia del cuerpo del generador (definido por los centros de 3 esferas en los laterales del cuerpo) y el vástago del palpador
- Paralelismo entre el eje de rotación y el plano de referencia

La medición efectuada por el palpador (h) se verá afectada por las siguientes características mecánicas:

- Topografía de la superficie de apoyo de la punta del palpador
- Paralelismo entre el plano de referencia del cuerpo del generador y la superficie de apoyo de la punta del palpador

La calidad de la rotación del cuerpo del generador dependerá de:

- Definición del centro de rotación del sistema
- Errores de forma de las esferas en la zona de apoyo
- Topografía de las superficies de apoyo de las esferas
- Dureza de las esferas y superficie de apoyo de las mismas.



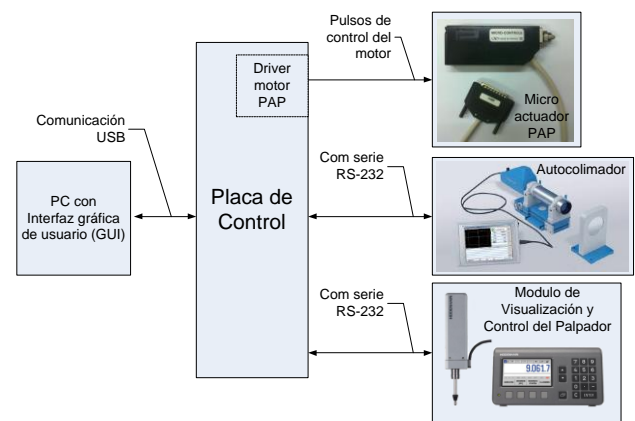
**Fig. 11.** Diseño del generador de pequeños ángulos

Una vez culminada la fabricación de los diferentes componentes se procederá a la medición del generador en una máquina de medir por coordenadas de alta exactitud perteneciente al laboratorio CEMETRO de la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Córdoba. La medición brindará información sobre la calidad de fabricación de los componentes para el cumplimiento de los requerimientos (tolerancias) fijados previamente.

### Sistema de control del generador de pequeños ángulos

El instrumental involucrado en este sistema se compone de un autocolimador digital, el cual es el instrumento sometido a evaluación y un palpador electrónico de alta exactitud con su unidad de visualización, el cual es uno de los patrones de referencia. Se desarrolló la electrónica necesaria capaz de comunicarse en tiempo real con ambos instrumentos, controlar por medio de un driver de potencia a un microactuador lineal y permitir la conexión USB con una PC.

Este sistema de control está integrado por un sistema de posicionamiento que establece el valor angular del generador de pequeños ángulos por medio del accionamiento del microactuador, el cual genera pequeños desplazamientos lineales medidos por medio del palpador electrónico. La placa electrónica es la encargada de controlar al microactuador, como también controlar y adquirir las mediciones del instrumental involucrado, además permitir la comunicación con la PC para poder operar todo el sistema mediante una interfaz gráfica de usuario (GUI). Fig. 12.



**Fig. 12.** Diagrama descriptivo del sistema de control del generador de pequeños ángulos

El sistema es realimentado por medio de ambos instrumentos dependiendo en qué etapa del proceso de calibración se encuentra. Antes de comenzar la calibración, el sistema se realimentará por medio del autocolimador, ya que toda la calibración se debe realizar a partir del cero absoluto de este instrumento. Luego de alcanzar el cero absoluto, se podrá comenzar la calibración automática por lo cual se realimentará la posición por medio del palpador para así alcanzar los distintos puntos angulares de calibración.

El microactuador lineal está compuesto por un motor paso a paso (PAP), el cual por medio de su mecánica interna, es capaz de dar desplazamientos lineales de 50 nm cada  $\frac{1}{2}$  paso alcanzado. Fig. 13. Este desplazamiento, permitiría que el generador de pequeños ángulos alcance un posicionamiento mínimo de  $0,03''$ .

No obstante, para lograr una mayor sensibilidad de posicionado se utilizó un driver de control de motores PAP con el cual se alcanzó un posicionado menor a 10 nm ( $0,005''$ ).

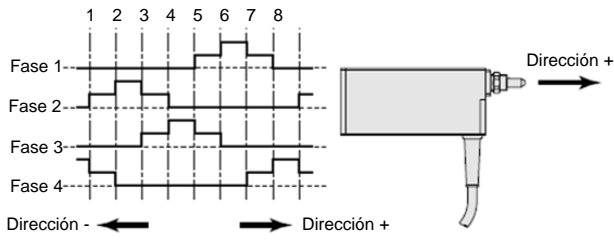


Fig. 13. Posicionamiento del microactuador utilizado

Este driver es capaz de generar micropasos de hasta 1/32 partes del paso característico del motor. Para lograr un micropaso, el driver controla la corriente en las dos fases del motor PAP. Una fase es excitada de forma sinusoidal y la otra de forma cosenoidal, de esta forma se logra un campo magnético rotante que nos permite generar pasos intermedios. Fig. 14.

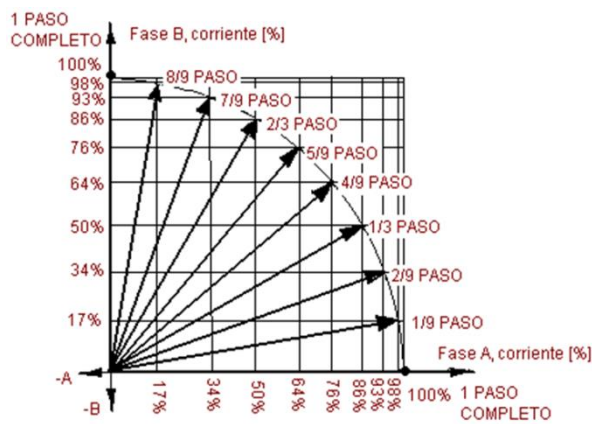


Fig. 14. Composición vectorial de campo magnético utilizando micropasos

Como ventaja adicional al aumento de sensibilidad, la utilización de micropasos disminuye las vibraciones transitorias generadas en cada nueva posición del motor. Estas vibraciones presentan una respuesta sub amortiguada que se genera al dar un paso completo en un motor PAP, las cuales disminuyen proporcionalmente con el aumento de la cantidad de micropasos que pudieran alcanzarse. Fig. 15 y Fig. 16.

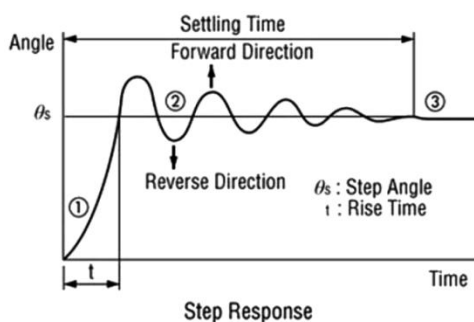


Fig. 15. Respuesta temporal de un paso

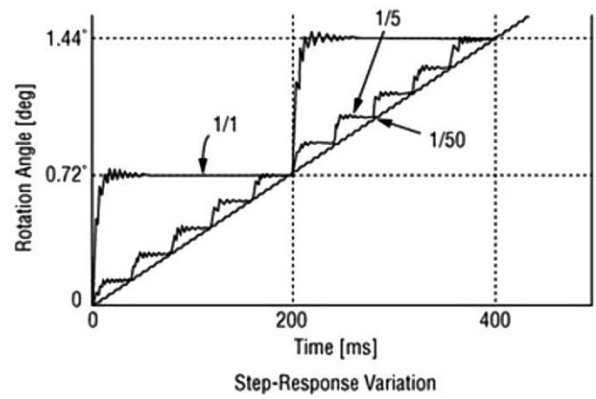


Fig. 16. Disminución de vibraciones en función del aumento de micropasos

## RESULTADOS

El sistema de calibración automática de palpadores ya se encuentra operativo. En la Fig. 17 se observan los resultados de la calibración de un palpador digital marca TESA, modelo 32.10803, con pasos de control de 7  $\mu\text{m}$  en todo su intervalo de indicación,  $\pm 300 \mu\text{m}$

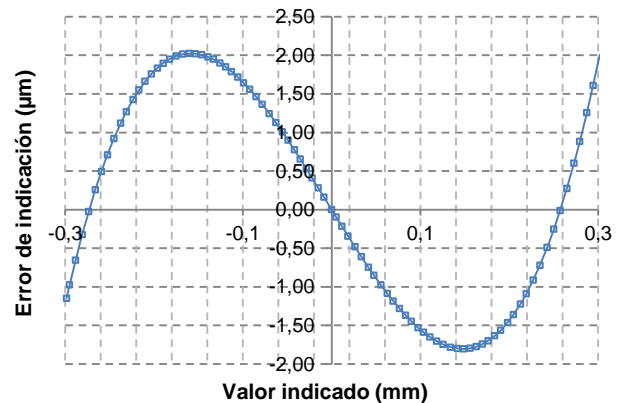


Fig. 17. Calibración automática de un palpador digital

Se realizaron ensayos del sistema de control en un generador de pequeños ángulos de prueba. Fig. 18. Se logró un control de posicionamiento dentro de  $\pm 0,005''$  Fig. 19. Esto permitirá realizar la calibración de autocolimadores de manera automática con pasos de  $0,1''$ .

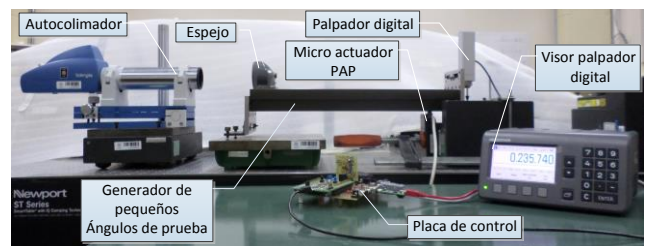
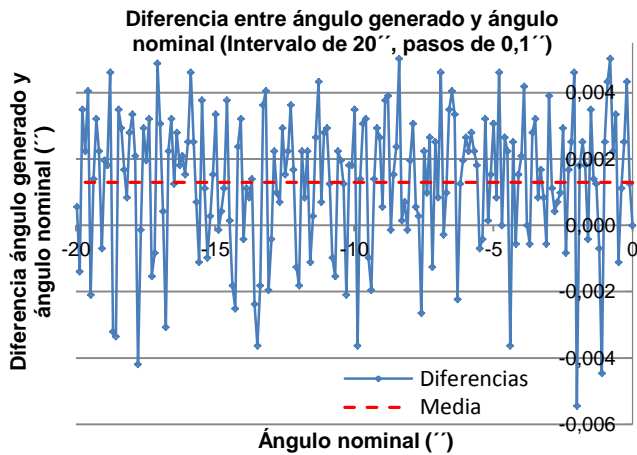


Fig. 18. Ensayo con generador de prueba



**Fig. 19:** Posicionado del generador

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos hasta el momento permiten inferir que será posible alcanzar una incertidumbre menor a 0,05'' en la calibración de autocolimadores electrónicos de alta resolución. Esto permitirá reducir la incertidumbre de calibración de instrumentos y patrones angulares de la industria.

Una vez fabricado el primer prototipo del generador se realizará la validación de todo el sistema, lo cual incluirá: la calibración de diferentes autocolimadores, mediciones de repetibilidad y reproducibilidad y la participación en comparaciones internacionales que permitan asegurar la confiabilidad y exactitud del instrumento.

## AGRADECIMIENTOS

A Marcelo Ángel Díaz y Miguel Ricardo Llaryola por su colaboración en el diseño de la placa electrónica del sistema automático de calibración de palpadores durante su Práctica Profesional Supervisada en nuestro Laboratorio y luego durante la realización de su Proyecto Integrador.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Application Report SLVA416, "High Resolution Microstepping Driver with the DRV88xx Series" (September 2010), TEXAS INSTRUMENT.
- [2] Data Sheet DRV8825, "Stepper Motor Controller IC", TEXAS INSTRUMENT.
- [3] M. Astrua y M. Pisani (9 November 2009), "The new INRiM nanoangle generator", Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica, INRiM, Torino, Italy.