

## Habilitación de una mesa rotatoria de CMM como instrumento independiente de medición de ángulo

*Eduardo HERRERA M.<sup>1</sup>, Miguel VILIESID A.<sup>2</sup>, Hector CASTILLO M.<sup>3</sup>*

Centro Nacional de Metrología, CENAM, Querétaro, México  
[1eherrera@cenam.mx](mailto:eherrera@cenam.mx), [2miguel.viliesid@cenam.mx](mailto:miguel.viliesid@cenam.mx), [3hcastillo@cenam.mx](mailto:hcastillo@cenam.mx)

### Resumen

Se desarrolló un control electrónico independiente del cuarto eje de una CMM, una mesa rotatoria desmontable con la que contaba la División de Metrología Dimensional (DMD). El proyecto puede dividirse en tres partes principales. La primera consistió en averiguar cómo funcionaba y qué tipo de señales electrónicas requería, dado que no se contaba ni con diagramas electrónicos ni especificaciones del fabricante. La segunda parte fue seleccionar el tipo de micro-controlador que se utilizaría; diseñar y construir las tarjetas electrónicas y establecer la interfaz de comunicación. La última parte consistió en probar y calibrar el instrumento. La mesa rotatoria puede ser utilizada ahora en forma independiente como un instrumento automático de generación de ángulos con características metrológicas adecuadas para muchas aplicaciones.

Se presenta el desarrollo del proyecto, los resultados de la operación automática de la mesa y la calibración en posicionamiento angular del instrumento.

**Palabras clave:** Automatización, ángulo, mesa rotatoria, mesa indexada, rejillas de difracción.

### 1. Introducción

Como primer paso dentro del área de la nanometrología, la DMD del CENAM decidió construir un difractor para la calibración de rejillas de difracción similar al descrito en [1-3], dado que su principio de operación es relativamente sencillo y no se requiere de recursos económicos excesivos. Por otro lado, existe la necesidad de contar con un instrumento de este tipo para calibrar este tipo de dispositivos, como ya nos lo han solicitado varias instituciones. En efecto, las rejillas de difracción se utilizan, como escala unidimensional, para medir longitud en microscopios electrónicos y, a la fecha, no había forma, a nivel nacional, de obtener algún tipo de *trazabilidad* para sus mediciones.

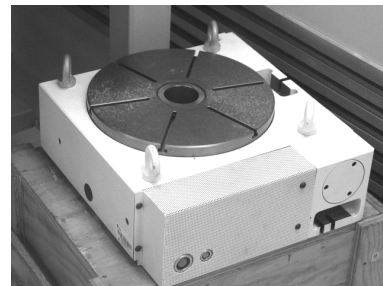
El difractor consta de una mesa rotatoria, sobre la que se colocara la rejilla de difracción a calibrar. Se hace pasar un haz de luz colimado de longitud de onda conocida a través de la rejilla y la luz es difractada. Los ángulos de difracción son medidos y, a

partir de estos, se calcula el paso promedio de la rejilla.

Cabe mencionar que la capacidad en volumen y peso de la mesa utilizada son superiores a los necesarios para soportar las rejillas de difracción. Sin embargo, nos pareció pertinente aprovecharla incorporándola al proyecto del difractor, además de poder utilizarla como un instrumento independiente de medición de ángulo para otros fines.

### 2. Funcionamiento de la mesa rotatoria

En la figura 1 se aprecia el aspecto de la mesa rotatoria. La figura 2 muestra esquemáticamente las partes principales de la misma. Un motor eléctrico de corriente directa transmite el movimiento a una banda dentada la cual, a su vez, lo transmite a un reductor y este a un tornillo sin fin. Éste último acciona un piñón que mueve la corona de la mesa. La corona es doble y cuenta con un sistema que, mediante un resorte, evita el *backlash*<sup>1</sup> del mecanismo. La mesa cuenta con una escala angular o *encoder* óptico que recoge la señal de giro.



**Fig. 1. Mesa rotatoria.**

El dispositivo cuenta con dos conectores eléctricos tipo LEMO uno de doce pines y uno de ocho pines. A través de ellos se alimenta el motor, los fotodiodos (IRLED), los foto-transistores y la electrónica de la escala óptica que proporcionan la lectura. Parte del trabajo consistió en deducir la correspondencia de los

<sup>1</sup>Juego que se presenta en los engranes al moverse en un sentido y el otro.

pinos para cada señal así como el método de control de posición angular.

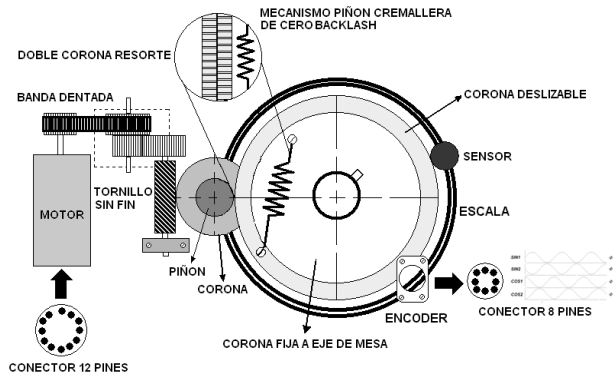


Fig. 2. Componentes mecánicos y electrónicos de la mesa.

La figura 3 es una ilustración de un fabricante de escalas [11] que muestra un sistema típico de escala con su dispositivo de lectura por transmisión. Aunque en el caso particular de la mesa rotatoria en cuestión, la escala es reflexiva, el funcionamiento es análogo. La escala es de vidrio y tiene trazos opacos finamente grabados sobre ella de período  $C$ . De un lado de la escala  $M$  se proyecta un haz colimado de un IRLED y se hace pasar por cuatro retículas adyacentes de periodo similar al de la escala y desfasadas entre sí  $90^\circ$ . En las posiciones respectivas del lado opuesto de la escala, hay cuatro foto-transistores que reciben la luz que se transmite a través de las retículas y la escala. Esto produce un efecto *Moiré* en la posición de cada foto-transistor con desfases de  $90^\circ$  entre sí. Cuando la escala se mueve respecto a las retículas, el haz de luz recibido es modulado y los foto-transistores entregan cuatro señales sinusoidales proporcionales a la intensidad luminosa recibida.

Las cuatro primeras gráficas de la figura 4 muestran esas señales. Los pares de señales desfasadas  $180^\circ$  son combinadas entre sí para generar las señales  $A$  y  $B$  que eliminan el ruido y la componente de DC común. Finalmente de estas se generan las señales cuadradas  $A1$  y  $B1$  desfasadas entre sí  $90^\circ$ . Este proceso permite aumentar la resolución de la escala a la cuarta parte del periodo  $C$  de la misma.

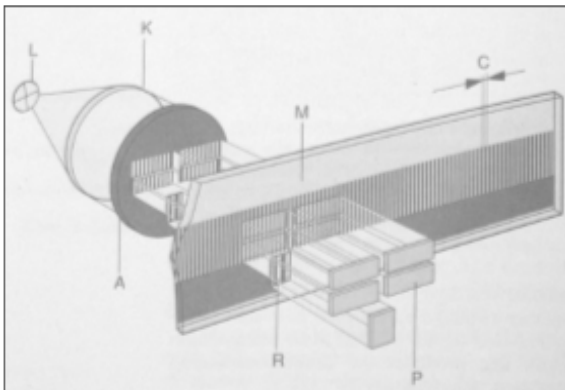


Fig. 3. Sistema lector de la escala [11].

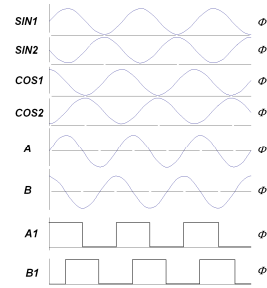


Fig. 4. Principio de medición fotoeléctrico.

### 3. Diseño del Control de Operación

#### 3.1. Necesidades de Operación del Instrumento

- Procesar las señales del *encoder* de la mesa rotatoria utilizando amplificadores operacionales.
- Desarrollar un módulo de cuadratura de señal para decodificar las señales del *encoder* y obtener la relación entre los pulsos de éste y la dirección y magnitud del giro.
- Desarrollar el control de velocidad de la mesa rotatoria.
- Controlar la potencia del motor.
- Desarrollar una interfaz para operar el instrumento.

#### 3.2. Procesamiento de las señales del encoder

##### 3.2.1. Etapa de acondicionamiento de las señales

Las señales provenientes del *encoder* óptico son señales en tensión eléctrica pequeña por lo que se recurrió a un amplificador inversor con ganancia de 10 para obtener una señal eléctrica preamplificada apropiada, la cual será usada en la etapa posterior de normalización de señales.

##### 3.2.2. Etapa de normalización, corrección de offset y corrección de amplitud

En esta etapa se desarrollaron los circuitos electrónicos que genera las señales  $A$  y  $B$  a partir de las señales  $SIN1$ ,  $SIN2$ ,  $COS1$  y  $COS2$  proporcionadas por el *encoder* y que se muestran en la figura 4. Las señales  $A$  y  $B$  están normalizadas ya que son de la misma amplitud, tienen cero nivel de DC y su diferencia de fase es de  $90^\circ$ .

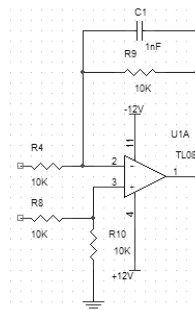


Fig. 5. Circuito amplificador diferencial

Para este fin, en una primera etapa, se utilizaron sendos amplificadores diferenciales como el que se muestra en la figura 5. Aunque este proceso permite entregar señales de aproximadamente la misma amplitud y se elimina ruido y buena parte del nivel de DC, las señales de salida no están perfectamente normalizadas. Esto provoca errores periódicos en las señales de salida que se traducen en errores de lectura. Es necesario, por lo tanto, recurrir a una segunda etapa, mostrada en la figura 6, donde se hacen ajustes finos de la amplitud y del nivel de DC manualmente de tal suerte que queden efectivamente normalizadas ambas señales a la salida.

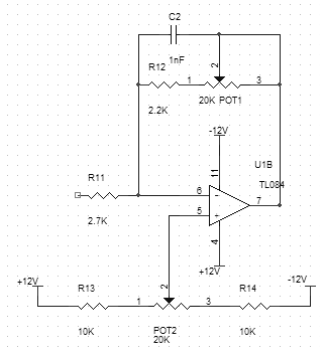


Fig. 6. Circuito para corrección de Offset y amplitud.

### 3.2.3. Etapa de cuadratura de la señal

En esta etapa se obtienen las señales cuadradas A1 y B1 de la figura 4 mediante un amplificador operacional configurado en lazo abierto como se muestra en la figura 7. Este circuito entrega señales de salida TTL de entre 0 y 5 V. Posteriormente se introducen a un contador decodificador de cuadratura y se obtiene la posición de la mesa en función del número de cuentas. A partir de aquí, las señales manejadas son digitales y se pueden procesar en micro-controladores. Si se requiere obtener una resolución por encima de la resolución dada por las señales del *encoder*, es posible introducir una etapa de interpolación. Dado que la aplicación para la calibración de rejillas de difracción no requiere de alta resolución angular, en este momento no se incluyó esta etapa pero posteriormente podrá ser incluida si así se desea.

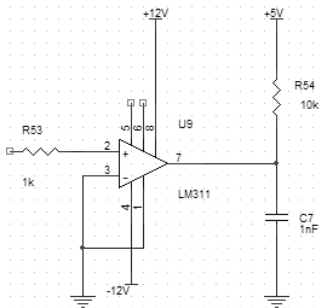


Fig. 7. Circuito de cuadratura.

### 3.3. Selección de microcontrolador ( $\mu C$ )

Se seleccionó el  $\mu C$  18F4431 descrito en [8]. Este  $\mu C$  está diseñado para el control de servomecanismos por lo que resulta idóneo y cuenta con módulos y registros dedicados para este tipo de aplicaciones.

Las necesidades de control que debe cubrir son:

- Contar con un módulo de cuadratura de señal para decodificar las señales del *encoder*.
- Registrar el estado de dirección de giro de la mesa rotatoria.
- Controlar la velocidad de giro de la mesa rotatoria.
- Poder conectar una interfaz de operación.

Estas necesidades son cubiertas en su totalidad por el  $\mu C$  elegido.

### 3.4. Diseño de control para la mesa rotatoria

El control que se propuso lo describe la figura 8, la comunicación PC (CPU)-microcontrolador es bidireccional, el microcontrolador está dedicado a hacer el control de posición, giro y velocidad de la mesa.

El PC solo sirve de interfaz para la escritura y lectura de los parámetros de posición programados y lectura de los registros de posición del microcontrolador.

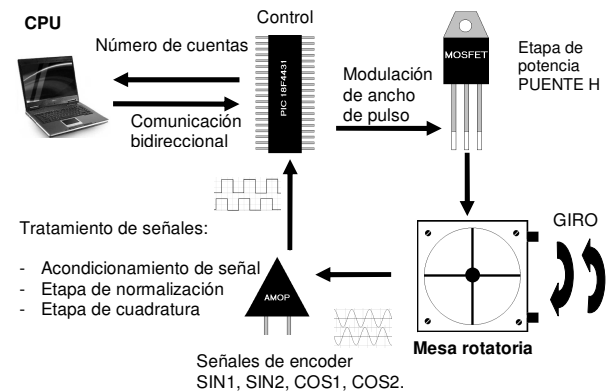


Fig. 8. Diagrama de control de la mesa rotatoria.

### 3.5. Control de velocidad de la mesa rotatoria por modulación de ancho de pulso

El control de velocidad de la mesa rotatoria se logra mediante la modulación del ancho de pulso (PWM) suministrado al motor, parámetro que se puede programar en el  $\mu C$ . Cabe mencionar que si bien se modifica el ancho del pulso, no se modifica la frecuencia de la señal la cual se fijó en 60 Hz ya que experimentalmente dio una buena respuesta el motor.

En la figura 9 se muestra el circuito que se implementó. En esta configuración la electrónica digital queda aislada del circuito de potencia del motor mediante un opto acoplador.

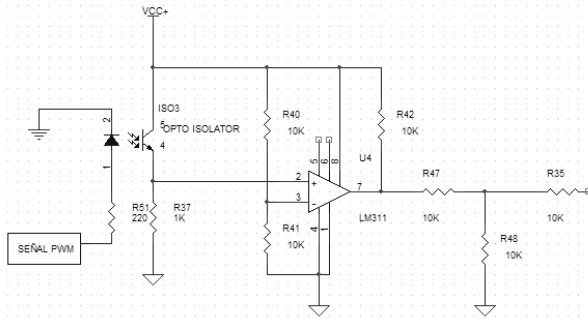


Fig. 9. Circuito de protección de la electrónica lógica y electrónica de potencia.

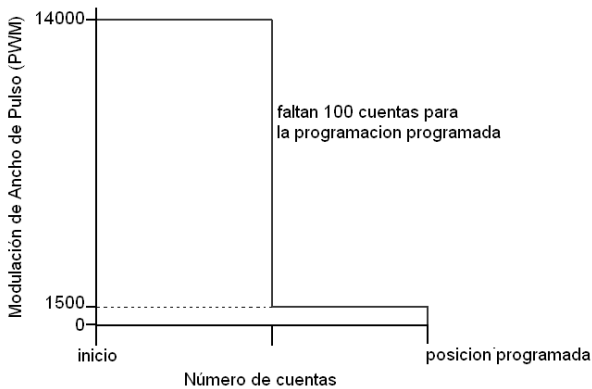


Fig. 10. Grafica PWM por número de cuentas.

La figura 10 ilustra la forma de operación del motor para llegar a una posición preestablecida. En el eje Y se muestra la modulación del ancho de pulso, que es directamente proporcional a la velocidad de giro. Al máximo, la señal suministrada es continua, mientras que el mínimo es un valor por debajo del cual el motor ya no se mueve en forma confiable. En el eje X se muestra el número de cuentas. Cuando el  $\mu C$  envía un número de cuenta que le falta 100 cuentas para llegar a la posición deseada, la velocidad de aproximación se reduce a la mínima.

A continuación se indica la operación de la mesa para alcanzar una posición preestablecida.

1. Se da un *reset* en los registros del  $\mu C$  para inicializar en cero.
2. Se establece la posición a la que debe moverse.
3. Si el desplazamiento corresponde a más de 100 cuentas, la mesa se desplazará inicialmente a velocidad máxima.
4. Se van tomando las lecturas de posición en forma continua a medida que la mesa se mueve.
5. Faltando 100 cuentas del desplazamiento programado, se reduce la velocidad automáticamente a la velocidad mínima.
6. A partir de aquí, a cada cuenta avanzada va a comparar con la condición de paro.

En caso de que el desplazamiento corresponda a menos de 100 cuentas, la velocidad inicial del ciclo será la mínima y se inicia desde el paso 6.

#### 4. Verificación de funcionamiento del control de la mesa

Para verificar el funcionamiento del control de la mesa se utilizó, en un primer tiempo, un autocolimador de alta exactitud con una resolución de  $0,1''^2$  y un alcance de  $\pm 400''$ . En la figura 11 se muestra el montaje utilizado. Se efectuaron varias pruebas que se mencionan a continuación y para las cuales no fue necesario utilizar la mesa a índice mostrada en la figura.

##### 4.1. Determinación de la resolución del encoder

Primero que nada, hubo de determinarse la resolución del *encoder*. Para ello, se giró una vuelta completa y se determinó el número de cuentas que representa. Esto se repitió 20 veces obteniéndose siempre 129,600 cuentas por revolución. Se deduce que una cuenta corresponde a  $10''$  de arco, lo que representa la resolución del instrumento sin interpolación.

El autocolimador arrojó un error promedio de reposicionamiento al girar una vuelta completa tanto en sentido horario como en sentido anti horario de  $(-0,2 \pm 0,1)''$ . Este es el error de reposicionamiento al girar en un solo sentido.

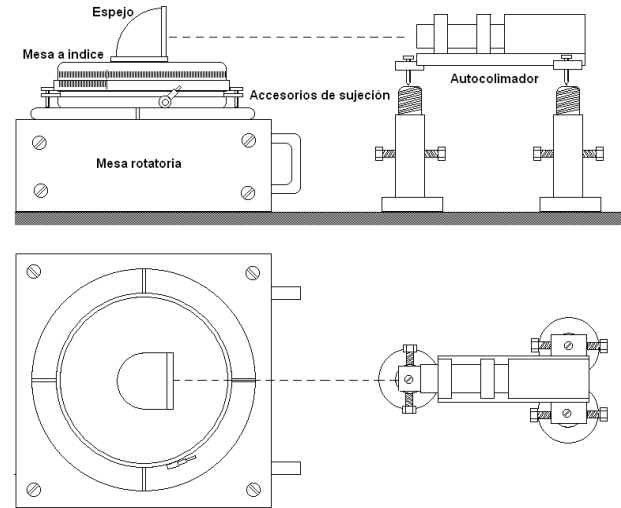


Fig. 11. Montaje del sistema de medición.

##### 4.2. Error de reposicionamiento al girar en ambos sentidos

1. Se acercó tanto el autocolimador como el contador de la mesa.
2. Se giró la mesa a una posición angular arbitraria en sentido horario.
3. Se regreso en sentido anti horario un mismo número de cuentas y se leyó el error de reposicionamiento en el autocolimador.

<sup>2</sup> Las unidades angulares se expresan en sistema sexagesimal. ° representa grados, ' minutos y '' segundos.

4. Se repitieron los pasos 2 y 3 comenzando ahora con un ángulo arbitrario en sentido anti horario primero y después retornando un mismo número de cuentas en sentido horario.

Cada medición se repitió 5 veces con 5 valores distintos de ángulos, a saber,  $30^{\circ} 00' 00''$ ,  $60^{\circ} 00' 00''$ ,  $180^{\circ} 00' 00''$ ,  $52^{\circ} 27' 50''$  y  $97^{\circ} 31' 10''$ . De estos valores se calculó el promedio y la desviación estándar que le corresponde. Se obtuvieron los siguientes valores:

**Tabla 1 Reposicionamiento**

Giro	Error Promedio (")	Desviación estándar del promedio (")
horario /anti horario	8,2	0,2
Anti horario / horario	8,0	0,5

#### 4.3. Avance angular por incremento de cuenta

1. Se acercó tanto el autocolimador como la mesa rotatoria.
2. Se avanzó la mesa una cuenta del *encoder* en sentido horario y se tomó la lectura angular con el autocolimador.
3. Se incrementó una cuenta más en el mismo sentido y se tomó la lectura nuevamente.
4. Se repitió lo anterior hasta cinco incrementos de cuenta.
5. Este procedimiento con pasos incrementales de una cuenta se repitió cinco veces.
6. Se repitieron los pasos 1 a 5 pero estavez en sentido anti horario.

Las tablas 2 y 3 muestran los resultados obtenidos en cada sentido.

**Tabla 2 Amplitud de paso, sentido horario.**

Número de Cuenta	Ángulo promedio (")	Desviación estándar del ángulo promedio (")
0	0	0
1	10,7	1,3
2	20,1	1,1
3	30,2	1,1
4	40,3	0,2
5	50,8	1,3

**Tabla 3 Amplitud de paso, sentido anti-horario.**

Número de Cuenta	Ángulo promedio (")	Desviación estándar del ángulo promedio (")
0	0	0
1	10,0	1,2
2	20,0	1,1
3	31,5	1,2
4	40,1	0,4
5	50,2	0,9

#### 5. Calibración con una mesa a índice de alta exactitud

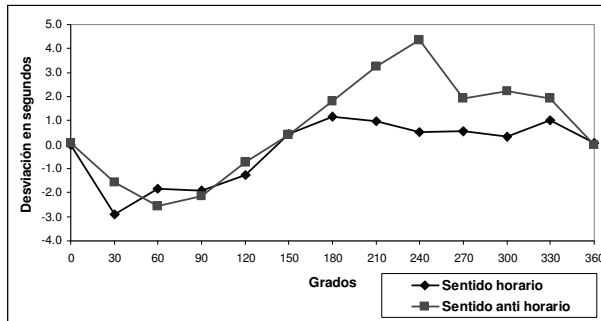
Finalmente se procedió a calibrar la mesa rotatoria cada  $30^{\circ}$ . Se utilizó una mesa a índice *MOORE 1440* con pasos de  $15'$ . La incertidumbre de este instrumento es de  $0,07''$ . El arreglo es el que se muestra en la figura 11. Se procedió a girar la mesa rotatoria de  $30^{\circ}$  en  $30^{\circ}$  en sentido horario y la mesa *MOORE* de  $30^{\circ}$  en  $30^{\circ}$  en sentido inverso, registrándose las desviaciones con el autocolimador. Este procedimiento fue repetido cinco veces. Posteriormente se hizo lo mismo girando las mesas en sentidos inversos. Las tablas 4 y 5 muestran los resultados encontrados en cada sentido. La gráfica 1 muestra los resultados de calibración en ambos sentidos juntos. Cabe mencionar que los resultados en sentido anti horario se muestran en sentido inverso con objeto de que correspondan al mismo punto del *encoder*, esto con la finalidad de identificar algún posible comportamiento sistemático.

**Tabla 4 Calibración de la mesa rotatoria. Sentido horario.**

Valor nominal (°)	Error Promedio (")	Desviación estándar del error promedio (")
0	0	0
30	-2,9	0,4
60	-1,8	0,2
90	-1,9	0,2
120	-1,3	0,5
150	0,4	0,4
180	1,2	0,2
210	1,0	0,1
240	0,5	0,4
270	0,5	0,1
300	0,3	0,3
330	1,0	0,5
360	0,1	0,2

**Tabla 5 Calibración de la mesa rotatoria. Sentido anti horario.**

Valor nominal (°)	Error Promedio (")	Desviación estándar del error promedio (")
0	0	0
30	1,9	0,5
60	2,2	0,6
90	1,9	0,5
120	4,4	0,6
150	3,2	0,5
180	1,8	0,5
210	0,4	0,4
240	-0,7	0,3
270	-2,1	0,5
300	-2,5	0,2
330	-1,6	0,5
360	0,1	0,3



Gráfica 1 Calibración de la mesa rotatoria.

## 6. Conclusiones

- El control implementado para operar la mesa rotatoria en forma independiente probó funcionar correctamente.
- El control probó no perder una sola cuenta en todas las pruebas realizadas.
- Los errores registrados con el autocolimador siempre fueron menores a la resolución del *encoder* de la mesa rotatoria.
- Las dos características anteriores nos llevan a la conclusión de que el control construido es plenamente confiable desde el punto de vista metrológico.
- Las pruebas efectuadas demuestran que la mecánica no presenta juego o *backlash* o, al menos, si es que existe, este es menor a la resolución del *encoder*.
- El desempeño metrológico del instrumento es muy bueno. Su construcción mecánica es de excelente calidad y fue un acierto aprovechar este dispositivo que de otra manera, prácticamente nunca se utilizaba.
- Los buenos resultados de calibración obtenidos nos llevan a proponer una siguiente etapa en la que se insertaría un módulo de interpolación de las señales del *encoder* para aumentar la resolución a, probablemente, 1".
- De las curvas de calibración mostradas en la gráfica 1, parece poderse identificar errores sistemáticos que podrían ser corregidos por lo que se puede pensar en aumentar la exactitud del dispositivo una vez que se hayan hecho mediciones mas exhaustivas.
- Consideramos que fue un acierto haber habilitado este instrumento, que es excelente, para funcionar en forma independiente. Ya prevemos varias aplicaciones aparte de la que inicialmente se concibió.
- A partir de aquí, se continuará con la construcción del difractómetro para calibración de rejillas de difracción que se mencionó al principio. Las características metrológicas de esta mesa cumplen con creces las necesidades modestas de exactitud que requiere el difractómetro.

## Referencias

- [1] Pekelsky J. R., Eves B. J., *et al*, *Imaging laser diffractometer for traceable grating pitch calibration*, Measurement Science and Technology **18** (2007) 375-383, UK.
- [2] Buhr E., Michaelis W., *et al*, *Multi-wavelength VIS/UV optical diffractometer for high-accuracy calibration of nano-scale pitch standards*, Measurement Science and Technology **18** (2007) 667-674, UK.
- [3] Meli F., Thalmann, R., *et al*, High precision pitch calibration of gratings using laser diffractometry, Proc. Of 1<sup>st</sup> Int. Conf. On Precision Engineering and Nanotechnology, P. McKeown et al Editors, 1999, Bremen.
- [4] SIP, Société Genevoise d'Instruments de Physique, CMM5-F-1-4a *Instruction Technique, Installation SIP CMM5* 1995, Geneva.
- [5] SIP, Société Genevoise d'Instruments de Physique, PD-270-CN90-F-237-2 *Instruction Technique, Plateau Diviseur PD 270-CN*, 1995, Geneva.
- [6] SIP, Société Genevoise d'Instruments de Physique, DT 90874 E, Operator's manual / servo amplifier, 1995, Geneva.
- [7] Coughlin R. F. & Driscoll F., Operational amplifiers and linear integrated circuits, Prentice-Hall, 1997, N. Jersey.
- [8] [www.datasheetcatalog.net/es/datasheets\\_pdf/P/I/C/1/PIC18F4431.shtml](http://www.datasheetcatalog.net/es/datasheets_pdf/P/I/C/1/PIC18F4431.shtml), 2003, Microchip Technology Inc.
- [9] <http://www.servotronic.ch/f/index.shtml>
- [10] <http://www.elmomc.com/>
- [11] HEIDENHAIN, *Digital Linear and Angular Metrology*, Verlag Moderne Industrie, D-86895 Landsberg/Lech, 1998.