

## Construcción de un inclinómetro óptico

A. Jaramillo-Núñez y M. Lucero-Alvarez  
*Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica,  
Apartado Postal 51 Y 216, PUE., MÉXICO, 72000,  
e-mail: ajaramil@inaoep.mx, mlucero@inaoep.mx*

Recibido el 27 de noviembre de 2006; aceptado el 21 de junio de 2007

En este trabajo se describen la construcción, caracterización y aplicación de un instrumento óptico para medir inclinaciones. El instrumento es de fácil manejo, de no contacto, y puede medir inclinaciones del orden de 0.5 segundos de arco en un rango de 14 minutos de arco. La precisión de las mediciones puede ser modificada cambiando apropiadamente algunos parámetros del arreglo. El instrumento fue desarrollado como un inclinómetro usando como referencia la superficie horizontal de un líquido, además, la inclinación se obtiene midiendo con un detector sensible a la posición el desplazamiento que sufre un haz de láser después de reflejarse en la superficie del líquido. Se muestra la aplicación del instrumento en la medición de la inclinación del husillo de una máquina pulidora de grandes dimensiones.

*Descriptor:* Inclinómetro; metrología; óptica geométrica; desplazamiento de haz.

In this work an optical instrument for measuring tilt is described. The device is compact, requires no special handling and can measure variations in tilt of the order of 0.5 arcsec, although this value can be suitably modified by changing the setup parameters. The instrument was developed as a tiltmeter using a liquid surface as reference surface. The inclination is obtained by measuring the longitudinal displacement of a laser beam after being reflected from the surface of the liquid. The application of the instrument for measuring the tilt of the spindle of a polishing machine of large dimensions is presented.

*Keywords:* Tiltmeter; metrology; geometrical optics; laser beam.

PACS: 07.60.-j; 06.20.-f.; 42.15-i; 41.85.-p.

### 1. Introducción

En la literatura se puede hallar una amplia gama de inclinómetros de burbuja [1], electrónicos [2] y ópticos [3,4]. Cada tipo tiene sus propias ventajas y desventajas y el instrumento particular a usar depende de los requerimientos de medición, condiciones de trabajo y costo.

En un trabajo reciente [5] describimos el uso de un instrumento óptico para medir el nivel de un líquido. En este trabajo se está proponiendo el uso del mismo instrumento para usarse como inclinómetro con la diferencia de que ahora se ha integrado al instrumento un contenedor con aceite. El instrumento consiste de un arreglo óptico simple, de fácil manejo y esta basado en la reflexión óptica. Puede medir en un rango de 14 minutos de arco con una precisión de 0.5 segundos de arco. El rango depende principalmente del diámetro del haz y/o del diámetro del área de detección del detector.

### 2. Descripción del instrumento

#### 2.1. Arreglo

El instrumento es mostrado en la Fig. 1 y consiste de un pequeño diodo láser (de 3 mW de potencia y una  $\lambda$  de 633 nanómetros) cuyo haz colimado incide con cierto ángulo sobre la superficie de un líquido (aceite Lamora 100 con un índice de refracción de 1.488). Parte del haz incidente se refleja e incide en un detector sensible a la posición (con una resolución de un micrómetro) cuyo plano de detección es paralelo a la superficie del líquido. Los datos obtenidos con el detector de cuadrante (DC) son almacenados en una PC para

su análisis posterior. En la parte inferior se muestra el contenedor de aceite el cual tiene un diámetro interior de 50 mm y una profundidad de 10 mm.

Los elementos mencionados anteriormente, con sus respectivas monturas, están sujetos en una placa de aluminio de 260×150 mm. Para evitar que luz del medio ambiente y corrientes de aire alteren las mediciones el instrumento fue introducido dentro de una caja hecha de placas de aluminio quedando completamente aislado. Las dimensiones finales del instrumento fueron 260×150×150 mm.



FIGURA 1. Instrumento para medir inclinaciones, 1 láser, 2 detector de cuadrante y 3 contenedor de aceite.

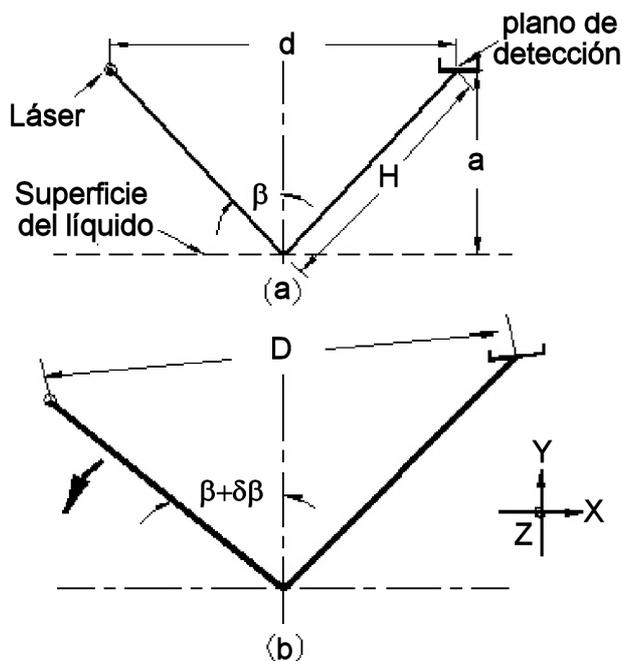


FIGURA 2. Esquema del arreglo, (a) para una cierta posición inicial, (b) para el caso en que el instrumento se ha girado un ángulo  $\delta\beta$  (el giro se ha exagerado). El eje Z del sistema coordenado apunta hacia afuera del dibujo.

de todos los elementos respecto a la superficie del aceite, ya que ésta nunca cambiará su posición puesto que siempre se mantiene perpendicular al vector gravedad.

Para medir la inclinación de un elemento mecánico, por ejemplo, lo que se hace es colocar el instrumento en el elemento a medir. La lectura del DC se anota y se toma como referencia o posición cero. Transcurrido un lapso de tiempo y si el elemento experimentó alguna inclinación, ésta se verá reflejada en que el DC no conservará la lectura inicial debido a que el láser, contenedor y DC han rotado respecto a la superficie del aceite, ocasionando que el ángulo con el que incide el haz y con el que se refleja cambien, dando como resultado que las lecturas inicial y final sean diferentes.

2.3. Teoría

Refiriéndonos a la Fig. 2.a y considerando que el ángulo de incidencia  $\beta$  y el ángulo de reflexión son iguales, se tiene que

$$a = \frac{d}{2 \tan \beta} \tag{1}$$

donde  $d$  es la distancia desde el láser hasta el punto donde el haz de láser incide en el DC,  $a$  es la distancia desde el plano de detección hasta el nivel del líquido y  $\beta$  es el ángulo de incidencia.

Para un incremento  $\delta\beta$  en el ángulo de incidencia, originado por la inclinación del instrumento respecto a la superficie del líquido (en la dirección que muestra la Fig. 2b), se tiene un incremento  $\delta d$  en la distancia  $d$ , siendo  $D$  la nueva distancia. Considerando que el eje de giro es el punto donde el haz incidente toca la superficie del líquido se tiene que la altura  $a$  de la fuente disminuye, siendo ahora  $A$  la nueva distancia, y además la fuente se mueve hacia la izquierda siendo el punto  $P_1$  su nueva posición (ver Fig. 3). Sin embargo, la distancia  $P_0P_1$  sigue siendo  $H$  ya que ésta distancia no cambió.

Empleando los datos iniciales  $d, a$  y  $\beta$  tenemos

$$H = \frac{d}{2 \sin \beta}, \tag{2}$$

$$B = \frac{d \sin(\beta + \delta\beta)}{2 \sin(\beta)}, \tag{3}$$

$$A = \frac{d \cos(\beta + \delta\beta)}{2 \sin(\beta)}, \tag{4}$$

donde  $A$  y  $B$  son las coordenadas  $(x_1, y_1)$  en el plano cartesiano del punto  $P_1$ , tomando como origen el punto  $P_0$ . Lo que se requiere ahora es saber las coordenadas  $(x_2, y_2)$  del punto  $P_2$ , que es donde incide el haz en el DC (ver Fig. 3). Usando conceptos de geometría[6] se puede hallar que dicho punto tiene las coordenadas

$$x_2 = - \frac{d \tan(\delta\beta) \sin(\beta + \delta\beta) + d \cos(\beta + \delta\beta)}{2 \sin(\beta) [\tan(\delta\beta) - \tan(\pi/2 - (\beta + \delta\beta))]} \tag{5}$$

2.2. Principio de funcionamiento

Los inclinómetros son instrumentos que miden la inclinación con respecto a la referencia más estable: el vector vertical gravedad. Ellos miden la posición angular y el movimiento rotacional de los elementos a los cuales están sujetos.

En el instrumento que trataremos la referencia es la superficie del aceite, ya que independientemente de la inclinación que tenga el instrumento, ésta siempre permanecerá perpendicular al vector gravedad. Dado que todos los elementos que componen el instrumento (láser, contenedor y DC) están sujetos a una placa, entonces, cualquier inclinación del instrumento será equivalente a un giro de la misma proporción

TABLA I. Resolución del método en función del ángulo de incidencia  $\beta$ .

$\beta$ (grados)	$a$ (mm) ( $a=d/2\text{tg } \beta, d=160$ )	$\delta d$ mínima/seg. de arco ( $\mu\text{m/seg. de arco}$ )
15	298.564	1.7
30	138.564	1.2
45	80.000	1.2
60	46.188	1.6
75	21.435	2.8

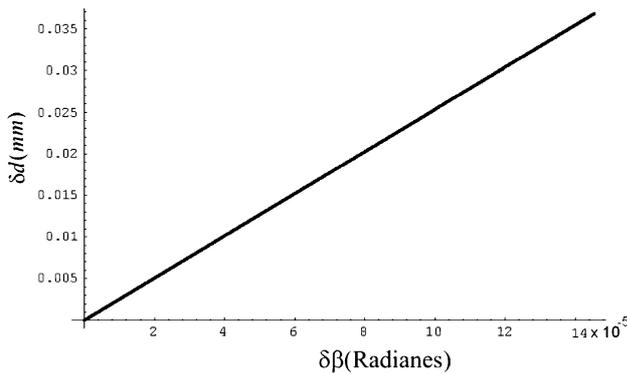


FIGURA 4. Desplazamiento del haz en función de la inclinación del instrumento, para un ángulo  $\beta=45$  grados.

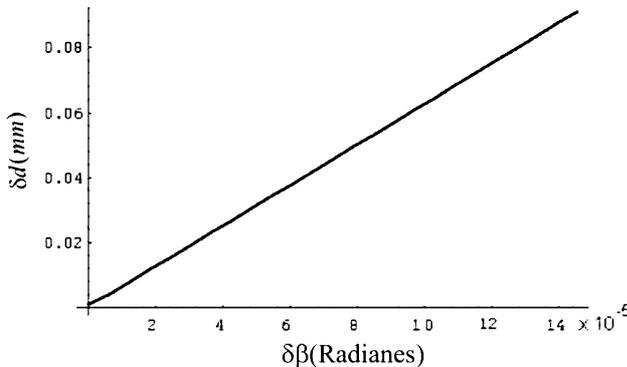


FIGURA 5. Desplazamiento del haz en función de la inclinación del instrumento, para un ángulo  $\beta=75^\circ$ .

$$y_2 = -d \tan[\pi/2 - (\beta + \delta\beta)] \times \frac{\tan(\delta\beta) \sin(\beta + \delta\beta) + \cos(\beta + \delta\beta)}{2 \sin(\beta) [\tan(\delta\beta) - \tan(\pi/2 - (\beta + \delta\beta))]} \quad (6)$$

Usando la ecuación para calcular la distancia entre dos puntos[6] se tiene

$$D = N \left\{ [M - \sin(\beta + \delta\beta)]^2 + [\cos(\beta + \delta\beta) + M \tan(\pi/2 - \beta - \delta\beta)]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (7)$$

donde

$$N = \frac{d}{2 \sin(\beta)} \quad (8)$$

y

$$M = \frac{\tan(\delta\beta) \sin(\beta + \delta\beta) + \cos(\beta + \delta\beta)}{\tan(\delta\beta) - \tan(\pi/2 - \beta - \delta\beta)} \quad (9)$$

Por último, el cambio  $\delta d$  debido a  $\delta\beta$  estará dado por

$$\delta d = D - d. \quad (10)$$

Una gráfica de la Ec. (10) se muestra en la Fig. 4 para el caso en que  $0 \leq \delta\beta \leq \pi/21600$  (0-30 segundos de arco). Como se puede observar, el comportamiento es lineal lo cual es una cualidad importante que se usará posteriormente para calibrar el instrumento.

Cuando son empleados diferentes valores para el ángulo de incidencia  $\beta$  se obtienen algunos resultados interesantes, los cuales se muestran en la Tabla I. Como se puede observar, la resolución aumenta cuando el ángulo de incidencia tiende a  $\pi/2$ , mientras que la altura  $a$  disminuye. La manera como se hizo el calculo fue dividiendo el valor máximo del eje Y de la gráfica, correspondiente a  $\pi/21600$ , entre 30. Por ejemplo, para el caso de las Figs. 4 y 5 una resolución de 1.2 y 2.8  $\mu\text{m/seg. de arco}$  fueron obtenidas.

### 3. Calibración

Para conocer  $\delta d$  en función del incremento  $\delta\beta$  es necesario resolver la Ec. (10) para  $\delta d$  usando las Ecs. (2)-(9). Sin embargo, en la práctica algunos problemas deben ser resueltos antes para obtener  $\delta d$  con precisión de micrómetros.

- 1- La suposición de que el eje de giro del instrumento es el punto donde el haz incide sobre el aceite no es del todo cierta.
- 2- La distancia  $d$  debe medirse con precisión de micrómetros, lo cual no es una tarea trivial ya que no se conoce la posición exacta de la fuente.
- 3- Medir el ángulo  $\beta$  con algún instrumento que tenga una precisión de segundos de arco no es fácil por lo pequeño del arreglo.
- 4- Medir el incremento  $\delta\beta$  tampoco es fácil ya que es del orden de algunos segundos de arco.

Dado que estamos interesados en construir un instrumento que mida inclinaciones con una precisión de segundos de arco, requerimos medir las distancias involucradas con precisiones menores o iguales a un micrómetro y los ángulos con precisiones menores o iguales a un segundo de arco. De no cumplirse esta condición el instrumento igual podrá medir

pero no con la precisión deseada por lo que sería inapropiado para nuestra aplicación.

Para evitar las limitaciones previas y recordando la cualidad de linealidad mostrada en la Sec. 3.1, decidimos calibrar el instrumento de la siguiente manera. Primero, se colocó el láser en la placa de aluminio con una inclinación de aproximadamente 35 grados. A continuación, se colocó el DC aproximadamente 120 mm separado del láser. Con estas dimensiones la distancia superficie-detector fue del orden de 80 mm.

Para cumplir con la condición de que el eje de giro es el punto donde el haz incide sobre el aceite se colocaron tres balines en la parte inferior de la placa base de la caja de aluminio (ver Fig. 6). La geometría de la distribución de los balines se muestra en la Fig. 6b. Como se puede apreciar, la colocación de los balines 2 y 3 es tal que el punto donde se cruzan los ejes de simetría de la figura, al proyectarse hacia arriba a lo largo del eje vertical, coincide con el punto donde el haz incide sobre la superficie del aceite. Es necesario aclarar que en la práctica este proceso se realiza usando líneas trazadas sobre las piezas de aluminio con ayuda de un calibrador de alturas, por lo que el error en la coincidencia de los puntos antes mencionados anteriormente puede llegar a ser de hasta 0.2 mm. Este error ocasiona que no se cumpla completamente la condición de que el eje de giro sea el punto donde el haz incide en el aceite.

Posteriormente colocamos un espejo de 50X70 mm sobre el instrumento, en seguida usamos un autocolimador y la referencia la hicimos incidir sobre el espejo donde se reflejó, regresando nuevamente al autocolimador (ver Fig. 7). Todo fue ajustado de tal manera que la referencia reflejada coincidiera con el cero de la retícula del autocolimador. Posteriormente se colocó una delgada pieza metálica (laina) debajo del balín 1 (ver Fig. 6.c), lo que ocasionó que el instrumento girara o se inclinara un cierto valor (teniendo como eje de giro la línea que pasa por los centros de los balines 2 y 3 ya que estos son los que quedaron en contacto con la mesa de trabajo) y después se dejó reposar 30 minutos. A continuación se midió la inclinación del instrumento con el autocolimador la cual fue de 100.5 segundos de arco. Después se tomó la lectura del DC y se comparó con la lectura inicial (antes del giro). La diferencia de ambas lecturas se dividió entre el ángulo girado y de esta manera se obtuvo cuántos micrómetros se desplazó el haz en el plano del DC por segundo de arco que se inclinó el instrumento.

El desplazamiento en el DC fue de 204  $\mu\text{m}$  y usando el valor de la inclinación (100.5) hallamos que el desplazamiento en el DC por cada segundo de arco que se inclinó el instrumento fue de 2.02  $\mu\text{m}$ . Este valor es el resultado de una operación matemática y por consiguiente no significa que el instrumento pueda resolver hasta centésimas de micrómetro ya que como se mencionó en la Sec. 3.1 el DC tiene una resolución de 1  $\mu\text{m}$ . La incertidumbre de medición asociada a este valor se puede hallar usando los valores 204, 100.5, las incertidumbres de medición del DC (0.5  $\mu\text{m}$ ) y del Autocolimador (0.25 seg. de arco) y la ecuación [7]

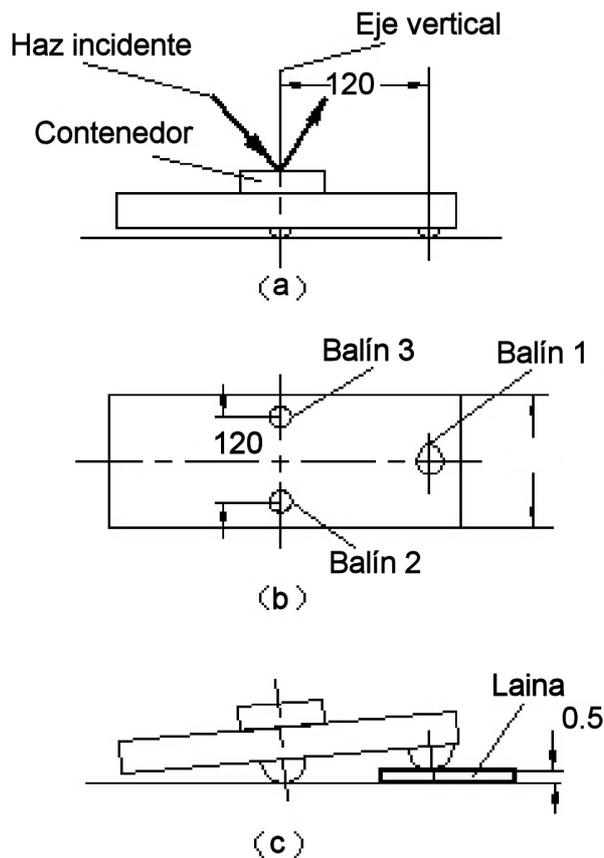


FIGURA 6. Colocación de los balines. (a) Vista frontal, (b) Vista inferior que muestra la distribución de los balines (las medidas están dadas en milímetros), (c) Colocación de la laina (el giro ha sido exagerado).

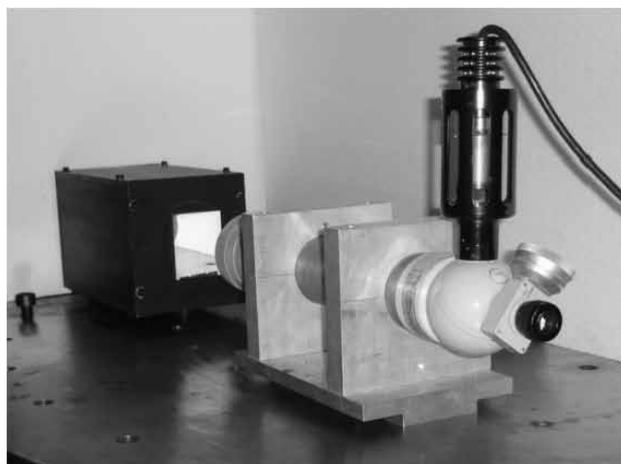


FIGURA 7. Calibración del instrumento.

$$\delta z = \frac{\partial f}{\partial x} \delta x + \frac{\partial f}{\partial y} \delta y, \tag{11}$$

la cual se usa para calcular la incertidumbre de una función de dos variables. Después de realizar la derivada para un cociente e introducir los valores mencionados, hallamos que la

incertidumbre de medición para el valor 2.02 es de  $0.003 \mu\text{m}$  por cada segundo de arco que se inclina el instrumento.

Considerando la resolución del DC y el valor de 2.02 obtenido anteriormente podemos concluir que, para los parámetros de construcción del arreglo mencionados en esta sección y la calibración realizada, la resolución del instrumento es de 0.5 segundos de arco. El autocolimador empleado para la calibración fue uno de la marca Nikon modelo 6D con una precisión de 0.5 seg. de arco y una apertura efectiva de 70 mm.

#### 4. Caracterización

Para evitar que el aceite se contamine con polvo del ambiente y el haz esté cambiando su trayectoria azarosa y rápidamente debido a flujos de aire, el instrumento fue colocado dentro de una caja hecha de placas de aluminio. Debido a que el aceite está en contacto con el medio ambiente éste se evapora, por ello fue necesario medir su velocidad de evaporación.

Como se mencionó en la Sec. 2 el instrumento aquí reportado surge de un instrumento empleado para medir el nivel de un líquido. La única diferencia entre ellos es la fijación del contenedor, así que mientras el inclinómetro no experimente ninguna inclinación o movimiento también será capaz de medir la disminución del nivel del líquido del contenedor. La manera como se realiza es la siguiente: después de haber encendido el láser se toma la lectura observada en el DC y se usa como referencia. Después de cierto tiempo se toma otra lectura y, si el nivel del líquido ha disminuido, entonces el DC mostrará una lectura diferente a la referencia. El cambio se debe a que el haz reflejado en el aceite incide en un punto diferente al anterior sobre el DC ya que se habrá desplazado en cierta dirección debido a la disminución del aceite. La expresión para calcular la disminución del nivel  $\delta h$  en función del desplazamiento  $\delta d$  observado en el DC es[5]

$$\delta h = \frac{\delta d}{2 \tan \beta}, \quad (12)$$

donde  $\beta$  es el ángulo de incidencia del haz. Para una descripción más detallada del método se recomienda ver la Ref. 5.

Para realizar la medición se mantuvo el instrumento en un laboratorio con temperatura controlada a  $18^\circ\text{C} \pm 1$  durante 11.6 horas. La disminución del nivel de aceite durante el intervalo de tiempo mencionado fue de 2.9 micras, es decir,  $0.25 \mu\text{m}/\text{h}$ .

Este resultado, junto con los de la calibración, sugieren que el instrumento es apropiado para medir inclinaciones que sean mayores a 0.5 segundo de arco, ya que para inclinaciones menores a este valor el instrumento no podrá resolverlos debido a que su precisión es del mismo orden. Además, se sugiere el uso del instrumento para realizar mediciones que no requieran un tiempo mayor a 2 horas de trabajo continuo, ya que para tiempos mayores a éste será necesario realizar algunas correcciones, como consecuencia de la evaporación del aceite, lo que alteraría su incertidumbre de medición.

Por último, se midió el tiempo requerido para que el aceite regrese a su estado de reposo después de que el instru-

mento experimente algún movimiento. Para ello se colocó el instrumento, conservando la posición que tuvo durante la calibración, en el husillo de una máquina pulidora de grandes dimensiones[5] y se dejó reposar durante 12 horas. En esa posición la lectura del DC se tomó como la referencia de la medición. Posteriormente se desplazó el husillo a una velocidad de 30 mm/seg una distancia de 110 mm y después se mantuvo en reposo alrededor de 100 seg. Esta operación se realizó manualmente 4 veces y los resultados que se obtuvieron se muestran en la Fig. 8. En promedio, sólo se requieren 8 seg para que el aceite recupere su estado de reposo, así que éste será el tiempo mínimo requerido para realizar una medición después de haber sido movido el instrumento.

#### 5. Cálculo del rango de medición

Considerando un láser con un diámetro de haz de 3 mm y un ángulo de incidencia de 35 grados es fácil deducir que el haz que incide sobre el aceite describe una elipse sobre su superficie con un diámetro mayor de 3.4 mm y un diámetro menor de 3 mm. Dado que el área de detección del detector es paralela a la superficie del aceite, entonces el haz reflejado en el aceite también formará una elipse sobre el detector de las mismas dimensiones. Por otro lado, tomando en cuenta que el diámetro del área sensora del detector es de 8 mm, entonces el haz sólo puede desplazarse 2.3 mm en la dirección X del detector, considerando que el haz incidente está centrado y que el diámetro mayor de la elipse es paralelo al eje X del detector (ver Fig. 9). Debido a que la longitud del haz es de 3.4 mm y tomando en cuenta la condición de que el haz debe incidir en los cuatro cuadrantes del detector para tener lecturas confiables, entonces, en realidad solo puede moverse una distancia menor a 1.7 mm en tal dirección. En la caracterización del instrumento hallamos que por cada segundo de arco que se inclina el instrumento el haz se desplaza 2.02 micras. Realizando el cociente  $1700/2.02$  podemos encontrar el rango de medición, el cual es de 14 minutos de arco para los parámetros antes citados.

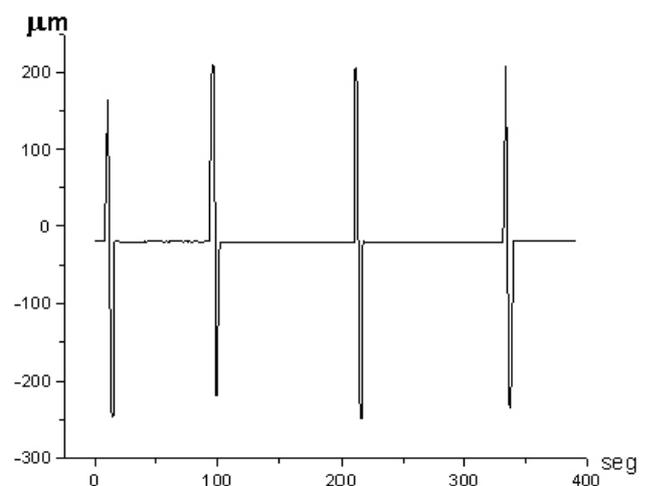


FIGURA 8. Gráfica obtenida después de desplazar el husillo 4 veces.

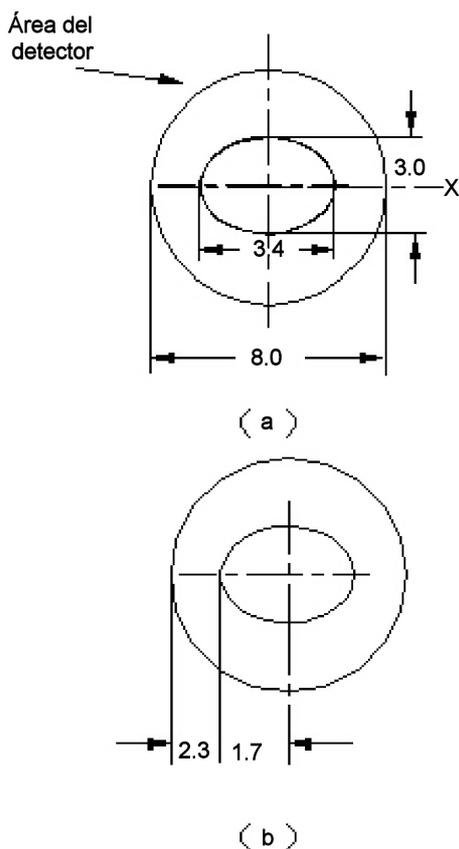


FIGURA 9. Dimensiones del haz de láser, (a) sobre el área de detección, (b) desplazamiento que puede tener el haz en la dirección X del detector.

### 6. Aplicación

En la Ref. 5 se describió cómo se midió la rectitud del desplazamiento del husillo de una máquina pulidora (MP) de grandes dimensiones. La longitud del desplazamiento fue de 5 metros y el error de rectitud obtenido fue del orden de 50  $\mu\text{m}$ .

En esa medición, el error de rectitud se consideró causado únicamente por las imperfecciones mecánicas de la máquina. Ahora creemos que la longitud del husillo (1600 mm) y las diferentes inclinaciones que éste adquiere durante su desplazamiento ocasionan un error en el posicionamiento de la punta del husillo que contribuye también al error de rectitud, ya que la punta sube o baja dependiendo del valor y del signo de la inclinación.

Las diferentes inclinaciones que va adquiriendo el husillo durante su desplazamiento también traerán como consecuencia que las coordenadas mostradas por el sistema de posicionamiento de la máquina difieran de las coordenadas en las cuales esté posicionada físicamente la punta del husillo. Tal diferencia en cada punto del recorrido del husillo siempre será diferente y estará en función de su inclinación y longitud. Para poder medir esas inclinaciones fue que se construyó el instrumento.

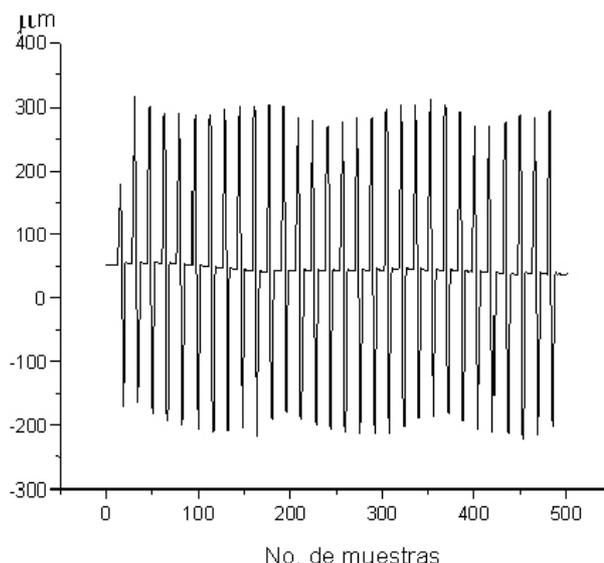


FIGURA 10. Datos obtenidos de las inclinaciones del husillo durante su reposo y traslación a lo largo de sus guías. Nótese como los segmentos rectos horizontales no todos tienen el mismo valor.

Después de colocar el inclinómetro en el husillo se dejó reposar durante 12 horas. En esta posición, el valor indicado por el DC fue tomado y usado como referencia para el resto de las mediciones. Posteriormente se eligió una razón de muestreo de 1 muestra/segundo. En seguida se desplazó el husillo una distancia de 100 mm a una velocidad de 30 mm/seg y después se detuvo durante 12 segundos. Después, el husillo se desplazó otros 100 mm con una velocidad de 30 mm/seg y el proceso se repitió hasta que se completó el recorrido del husillo.

El proceso de medición fue realizado automáticamente, puesto que la trayectoria de la máquina y el proceso de guardar los datos fueron programados simultáneamente. El tiempo que duró el proceso fue de 17 minutos y el número de muestras fue de 1020.

#### 6.1. Resultados

El resultado de la medición se muestra en la Fig. 10. Es necesario aclarar que en esa gráfica están desplegados los datos que corresponden a 2.5 metros del recorrido, ya que si se graficaran los 5 metros no se apreciarían los detalles. Podemos observar que hay una serie de segmentos de líneas rectas horizontales colocadas a diferentes alturas, las cuales son las que se consideran para conocer la inclinación del husillo. Con ayuda de los valores de los segmentos rectos de las líneas horizontales se realizó el cálculo para saber por cuántos micrómetros cambió la posición de la punta del husillo respecto a la referencia. Es decir, usando el valor de la inclinación y la longitud del husillo es posible saber si la punta subió o bajó en cada punto medido y/o si la punta del husillo no coincide con las coordenadas mostradas por la electrónica de la máquina.

Para construir la Tabla II se consideraron sólo las primeras diez secciones rectas horizontales de la Fig. 10 y una lon-

TABLA II. Variación de la posición de la punta del husillo debido a las inclinaciones que adquiere durante su desplazamiento a lo largo de sus guías. El cálculo se hizo solo para los primeros diez segmentos rectos horizontales de la Fig. 10 (lo que esta entre paréntesis cuadrados indica como fue calculado el valor de la columna).

$\delta d$ (desplazamiento del haz en el DC) ( $\mu\text{m}$ )	$\delta\beta$ (inclinación del husillo) [ $\delta d / 2$ ] (seg. de arco)	Contribución al error de rectitud [error=long. del husillo $[\cos(\delta\beta) - 1]$ ] ( $\mu\text{m}$ )	Error de posición de la punta del husillo debido a la inclinación [error=long. del husillo $\sin(\delta\beta)$ ] ( $\mu\text{m}$ )
0	0	0	0
2	1	0	7
4	2	0	15
4	2	0	15
3	1.5	0	11
0	0	0	0
-2	-1	0	-7
-4	-2	0	-15
-6	-3	0	-23
-8	-4	.0003	-31

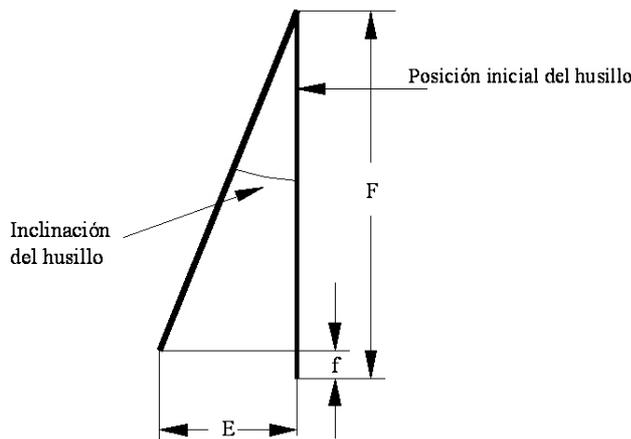


FIGURA 11. Posición del husillo después de una inclinación. Se puede observar cómo la inclinación del husillo origina dos cambios en la posición de la punta: uno es en la altura ya que ahora es F-f y el otro es un desplazamiento E hacia la izquierda (la inclinación ha sido exagerada).

gitud del husillo de 1600 milímetros. En la primera columna están los desplazamientos del haz observados en el DC. En la Sec. 4 hallamos que por cada segundo de arco que se inclina el instrumento el haz se desplazaba  $2 \mu\text{m}$ . Si en lugar de la inclinación conocemos el desplazamiento entonces podemos hallar el ángulo de inclinación dividiendo el desplazamiento entre dos. Este resultado es deducido fácilmente aplicando una simple regla de tres. La inclinación calculada de esta manera es la que se encuentra en la columna dos. Dado que el inclinómetro está fijo al husillo, entonces la inclinación que mide el instrumento es la misma que experimenta el husillo. Conociendo la inclinación del husillo y su longitud podemos hallar cuál es la posición de la punta respecto a la posición inicial. Para este caso se pueden tener dos cambios: uno en

la altura y otro en forma de desplazamiento (ver Fig. 11). El cambio en la altura es el que se muestra en la columna tres y es el que puede contribuir al error de rectitud de la máquina. Usando una calculadora con 10 dígitos no fue posible hallar algún cambio en la altura de la punta del husillo con respecto a la posición inicial. Esto indica que la contribución al error de rectitud debido a la inclinación del husillo es nula al menos para las diez inclinaciones mostradas. El desplazamiento ocasionado por la inclinación es el que se muestra en la columna cuatro y es el único que contribuye al error de posicionamiento del husillo. Los datos de esta columna muestran que la punta del husillo tiene un movimiento similar al de un péndulo, ya que en las primeras dos mediciones se desplaza un total de  $15 \mu\text{m}$  en una dirección, por ejemplo en la dirección +X, después regresa y continúa moviéndose hasta desplazarse  $31 \mu\text{m}$  en la dirección -X. En caso de que se tratara del eje Z de una máquina de medición por coordenadas (MMC) el error en la posición sería significativo con los datos que se obtuvieron y más aún si dicho eje fuese más largo, como es el caso de la MMC que se describe en la Ref. 5, el cual tiene una longitud máxima de 4 metros.

Los datos de las rectas faltantes poco contribuyeron al error de rectitud, el valor más grande fue de  $3 \mu\text{m}$ , pero para el caso del desplazamiento el valor más grande fue de  $55 \mu\text{m}$ , el cual es un valor significativo considerando que el error de posicionamiento del sistema de la MP es de  $1 \mu\text{m}$ . Esto significa que mientras más se incline el husillo, más grande será la diferencia entre las coordenadas que muestra la electrónica de la máquina y la posición real de la punta del husillo. Dicho de otra de manera, a mayor inclinación mayor error en el posicionado de la máquina. Sin embargo, si se realiza una buena caracterización de la máquina el error debido a la inclinación podría ser reducido mediante software.

## 7. Conclusiones

Se describió un inclinómetro óptico empleado para medir inclinaciones mayores a 0.5 segundos de arco y menores a 14 minutos de arco. El instrumento es de fácil manejo y es apropiado para usarse en ambientes con temperatura controlada y de preferencia libres de polvo y vibraciones. Se recomienda su uso en aplicaciones donde el tiempo de medición no sea mayor a dos horas, ya que la evaporación del aceite podría alterar su incertidumbre de medición. De los resultados obtenidos en la caracterización se muestra que no es un instrumento que pueda medir en modo continuo, ya que es necesario esperar al menos 8 segundos entre medición y medición. Esto con el fin de dar tiempo para que el aceite regrese a su estado de reposo, después de haber movido el instrumento, esto es una desventaja con respecto a otros inclinómetros que pueden medir en modo continuo pero para nuestra aplicación esta desventaja no afecta la eficiencia del instrumento.

Para verificar la funcionalidad del instrumento como inclinómetro se colocó en el husillo de una máquina pulidora para medir las inclinaciones que tiene cuando se desplaza a lo largo de sus guías. A partir de la información obtenida de la inclinación fue posible realizar algunos cálculos y se halló que ésta no influyó significativamente en el error de rectitud, pero si contribuye de manera importante al error de posicionamiento de la punta del husillo.

De los resultados obtenidos se puede concluir que el instrumento es apropiado para medir las inclinaciones de máquinas que tengan ejes verticales largos como es el caso de la MP o el eje Z en el caso de la MMC de grandes dimensiones, la cual será la aplicación principal que se le dará al instrumento.

## Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración de Ana Ma. Zárate Rivera por la elaboración del presente trabajo.

- 
1. D.F. Horne, *Optical Instruments and their applications*, Adam Hilger (London, 1980) p. 234.
  2. A.W. Young, *Optical workshop instruments in R. Kingslake (ed)*, Applied and Optical Engineering (Academic Press, New York, 1967) Vol. 4, Chap. 7.
  3. J.D. Mc. Grae, *Optical tooling in industry* (Hayden, New York, 1964) p. 53.
  4. D.C. O'shea, *Elements of modern optical design* (John Wiley and Sons, New York, USA, 1985) p. 390.
  5. A. Jaramillo-Núñez y M. Lucero-Alvarez, *Opt. Eng.* **45** (9) (2006) 093601.
  6. W.R. Longley, P.F. Smith y W.A. Wilson, *Analytic Geometry and Calculus* (Ginn and company, New York, 1952) p. 12.
  7. D.C. Baird, *Experimentación: Una introducción a la teoría de mediciones y al diseño de experimentos* (Prentice-Hall Hispanoamericana, México, 1990) p. 20.