

## BANCO DE PRUEBA SENCILLO PARA VERIFICAR DISTANCIÓMETROS LÁSER DE BOLSILLO

S. Tamari, <sup>(1)</sup> A. Laporte-Vergnes, <sup>(2)</sup> G. Salgado <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA)

Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso, Jiutepec Mor. 62550, México.  
email: tamari@tlaloc.imta.mx

<sup>(2)</sup> Ecole Polytechnique Universitaire de Montpellier (Polytech'Montpellier)

Place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier Cedex 5, Francia.

email: lpvgalice@aol.com

**Resumen:** Se presenta un banco de prueba para verificar distanciómetros Láser de bolsillo (DLB) y eventualmente otros distanciómetros portátiles. Las distancias de referencia del banco son definidas con una incertidumbre mejor que  $\pm 2$  mm [ $p = 0.95$ ], para valores que van desde  $\approx 2.5$  hasta 50 m. Al respecto, se presentan ejemplos de aplicación del banco. No es tan sofisticado como para poder calibrar un DLB; sin embargo, se considera como una alternativa práctica, cuando se pretende verificar rápidamente un instrumento antes de llevarlo al campo.

### 1. INTRODUCCIÓN

Los distanciómetros Láser de bolsillo (DLB)[1,2] son disponibles en el mercado desde hace 15 años. Según sus fabricantes, pueden medir distancias desde  $\approx 0.05$  m hasta más de 50 m con una incertidumbre de algunos milímetros [3,5] Por lo anterior, son atractivos: de hecho, son más prácticos que las cintas métricas y las estaciones totales, cuando se requiere medir distancias en el campo.

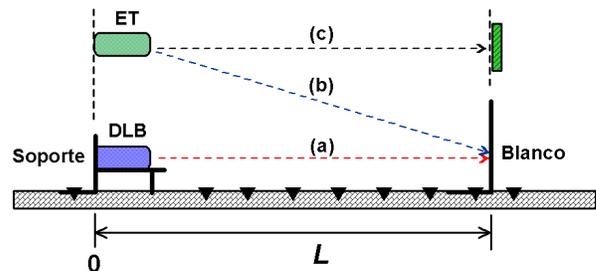
Sin embargo, existen a veces dudas sobre la incertidumbre de las lecturas obtenidas con DLBs; en particular, sus fabricantes no siempre indican con que intervalo de confianza reportan datos de incertidumbre. Además, en la práctica es común preguntarse si un equipo todavía sigue funcionando adecuadamente, después de meses de uso en el campo.

Por lo anterior, se construyó un banco de prueba muy sencillo, para poder verificar DLBs y eventualmente otros tipos de distanciómetros portátiles. Con el banco, se pretendía alcanzar una reproducibilidad propia (es decir: la contribución a la incertidumbre debido a la alineación de un distanciómetro y colocación de un blanco) del orden de 2 mm [ $p = 0.95$ ], es decir: un valor similar a lo que generalmente se requiere para medir distancias en el campo.

### 2. DESCRIPCIÓN DEL BANCO DE PRUEBA

#### 2.1. Estructura del banco

El banco se construyó en 2009 en el Laboratorio de Hidráulica del IMTA; esta constituido por 21 perforaciones realizadas en el piso del laboratorio y orientadas según un mismo eje (las distancias con respecto a la primera van desde  $\approx 2.5$  m hasta 50 m), un soporte para poder colocar un DLB (o alinear otro tipo de distanciómetro) a altura de la primera perforación, y un blanco (placa vertical de aluminio) que puede sujetarse en cualquier otra perforación del banco (Fig. 1 - 3).



**Fig. 1** Esquema del banco para probar distanciómetros Láser de bolsillo (DLB) u otros tipos de distanciómetros portátiles (ET).



**Fig. 2** Soporte para distanciómetros Láser de bolsillo (DLB).



**Fig. 3** Blanco usado para verificar distanciómetros.

## 2.2. Protocolo de uso

Para alcanzar la reproducibilidad propia deseada para el banco, se tuvo que definir un protocolo de uso, que considera una tolerancia máxima para alinear el haz de un distanciómetro Láser, y una forma de sujetar el blanco en una posición de referencia.

### 2.2.1. Para verificar un DLB

Antes de tomar una serie de lecturas con un DLB, debe alinearse el instrumento. El procedimiento elegido para hacerlo es el siguiente: primero, colocar el instrumento sobre su soporte en la primera posición "0" del banco de prueba; luego, colocar el blanco en la última posición "20" del banco; finalmente, hacer los ajustes necesarios para que el haz Láser del DLB este apuntando una marca de referencia dibujada sobre el blanco, con una tolerancia de  $\pm 0.1$  m (en este caso, se

demuestra con un sencillo cálculo trigonométrico que el sesgo causado por un error de alineación es menor a 0.2 mm para cualquier distancia entre 5 y 45 m).

Una vez alineado un DLB, ya no se mueve el instrumento durante su verificación. En este caso, para distancias que no eran la máxima, resultó que el haz Láser del instrumento no estaba siempre apuntando hacia la marca de referencia dibujada sobre el blanco. Lo anterior se debe a que el piso del laboratorio no es horizontal (con cambios de altura de hasta 50 mm). Por este motivo resultó también necesario pisar siempre el ángulo que formaba la parte trasera del blanco, para asegurar que este blanco quede con una misma orientación a cada vez que se toma una lectura de distancia (véase Fig. 3).

Se definieron las distancias de referencia del banco, como siendo las distancias entre la parte trasera de un DLB (es fácil programar estos instrumentos así) y la superficie del blanco (la cual se encuentra a 22 mm atrás de una perforación usada para sujetarla). Con el protocolo anterior, la verificación de un DLB con el banco tarda menos de una hora:  $\approx 10$  min. para alinear el instrumento, y 40 min. para tomar 20 lecturas de distancias.

### 2.2.2. Para verificar otro equipo

Con el banco de prueba, se pueden verificar también distanciómetros montados sobre un tripié, como son las estaciones totales (ET). En este caso, debe primero colocarse el tripié de tal forma que la referencia del instrumento para medir distancias este a la vertical del soporte para DLB (véase Fig. 2); en este trabajo, la ET probada contaba con un haz Láser vertical que permitía hacerlo fácilmente (por lo contrario, podría usarse una plomada). Después, se pueden tomar lecturas de distancias de dos maneras (véase Fig. 1):

- *Primer caso:* si el equipo probado puede calcular internamente la proyección horizontal de una distancia leída, apuntar siempre el haz Láser de un DLB colocado en el banco de prueba (ver inciso anterior).

- *Segundo caso:* por lo contrario, tomar lecturas horizontales de distancia, con un nuevo blanco - tipo estatal - que debe colocarse a la vertical de la placa de aluminio usada para verificar los DLBs.



**Fig. 4** Determinación de las distancias de referencia del banco, con el apoyo del CENAM

**2.3. Distancias de referencia**

Para determinar las veinte distancias de referencia del banco de prueba, se solicitó el apoyo del personal de la División de Metrología Dimensional del CENAM, el cual utilizó un instrumento patrón (Láser Tracker, marca Faro) para realizar el trabajo (Fig. 4). Durante la determinación de distancias, se encontró que la incertidumbre de las mediciones ( $U_D$ , m [ $p = 0.95$ ]) era: [6]

$$U_D = 0.13 \times 10^{-3} + 3 \times 10^{-5} L \quad (1)$$

donde  $L$  es la distancia leída (m). Básicamente, el primer término de la ecuación (es decir: 0.13 mm) se debe a las inestabilidades del blanco del banco, así como a las inestabilidades de palpado con el instrumento patrón; mientras que el segundo término (es decir:  $3 \times 10^{-5} L$ ) es una estimación de la incertidumbre sobre las lecturas obtenidas con el instrumento patrón para las condiciones ambientales al momento de hacer la determinación (13 de agosto de 2009).

**3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

**3.1. Reproducibilidad propia del banco**

Para determinar la incertidumbre propia del banco de prueba (es decir: la incertidumbre sobre la alineación de un distanciómetro y la colocación del blanco en cualquier posición de referencia), se utilizaron tres DLBs (véase Cuadro 1), y se procedió como se indica a continuación.

- *Pruebas de repetibilidad:* se coloca un DLB en el banco, y se coloca el blanco en una posición de referencia ("cercana", "intermedia", o "lejana"); luego se toman sucesivamente lecturas de distancias con el DLB (30 valores), y se calcula la desviación estándar de los datos ( $u_r$ , m).

- *Pruebas de reproducibilidad:* se coloca un DLB en el banco, y se toman lecturas de distancia cuando el blanco se encuentra en una posición de referencia ("cercana", "intermedia", y "lejana"). Luego, se quita todo, y se vuelve a repetir el procedimiento de instalación del DLB y toma de lecturas (3 veces, o más). Finalmente se calcula la desviación estándar de los datos ( $u_R$ , m).

- Como no se encontró un efecto de la distancia medida, se promediaron los datos obtenidos durante las pruebas de repetibilidad o de reproducibilidad por cada DLB usado. Luego, se determinó la reproducibilidad propia del banco ( $U_{RB}$ , m [ $p = 0.95$ ]) de la siguiente manera:

$$U_{RB} = 2 \sqrt{u_R^2 - u_r^2} \quad (2)$$

Se encontró de esta manera que la reproducibilidad propia del banco es  $\pm 1.1$  mm (Cuadro 2), lo cual es bastante satisfactorio. Sumando a esta reproducibilidad la incertidumbre sobre las distancias medidas con un instrumento patrón (véase Ecuación 1), se deduce que la incertidumbre sobre las distancias de referencia del banco de prueba ( $U_B$ , m [ $p = 0.95$ ]) es: [7]

$$U_B = \sqrt{U_D^2 + U_{RB}^2} \quad (3)$$

lo cual es siempre mejor que  $\pm 2$  mm [ $p = 0.95$ ].

**Cuadro 2.** Determinación de la reproducibilidad propia del banco de prueba ( $U_{RB}$ ).

	----- datos en m -----		
DLB	$u_R$	$u_r$	$U_{RB}$
<i>Disto A6</i>	0.00086	0.00056	0.0013
<i>PD 42</i>	0.00068	0.00046	0.0010
<i>Classic 5</i>	0.00089	0.00072	0.0011
<b>Promedio =</b>			<b>0.0011</b>

### 3.2. Ejemplos de uso del banco

Se utilizó el banco para verificar seis instrumentos (**Cuadro 1**): tres DLBs, un distanciómetro Láser industrial (con luz infrarroja), el distanciómetro Láser de una ET (con un *compass* integrado que permite calcular la proyección de una lectura de distancia sobre un plan horizontal), y un nivel digital (con cámara CCD y estatal codificado).

Globalmente, los resultados fueron consistentes con las incertidumbres reportadas por los fabricantes de los equipos probados (**Fig. 5**). Sin embargo, las incertidumbres varían bastante de un equipo a otro: desde algunos milímetros para los tres DLBs (**Fig. 5a-c**), hasta algunos centímetros para el nivel digital (**Fig. 5f**). Además, los datos de la ET probada presentan un sesgo: se sobreestiman las distancias (**Fig. 5d**). Los datos del nivel digital también presentan un sesgo, que es más complejo: a veces se sobreestiman, y a veces se subestiman las distancias (**Fig. 5f**).

Finalmente, se verificó mediante una prueba sencilla que los tres DLBs probados funcionan según el método de "tiempo de travesía" de la luz (ver **Anexo 1**).

### 4. CONCLUSIONES

El banco del IMTA no es tan sofisticado como los que se utilizan para calibrar distanciómetros Láser y no está acreditado. Sin embargo, se considera como una alternativa más económica y práctica, cuando se pretende verificar rápidamente un equipo portátil antes de llevarlo al campo.

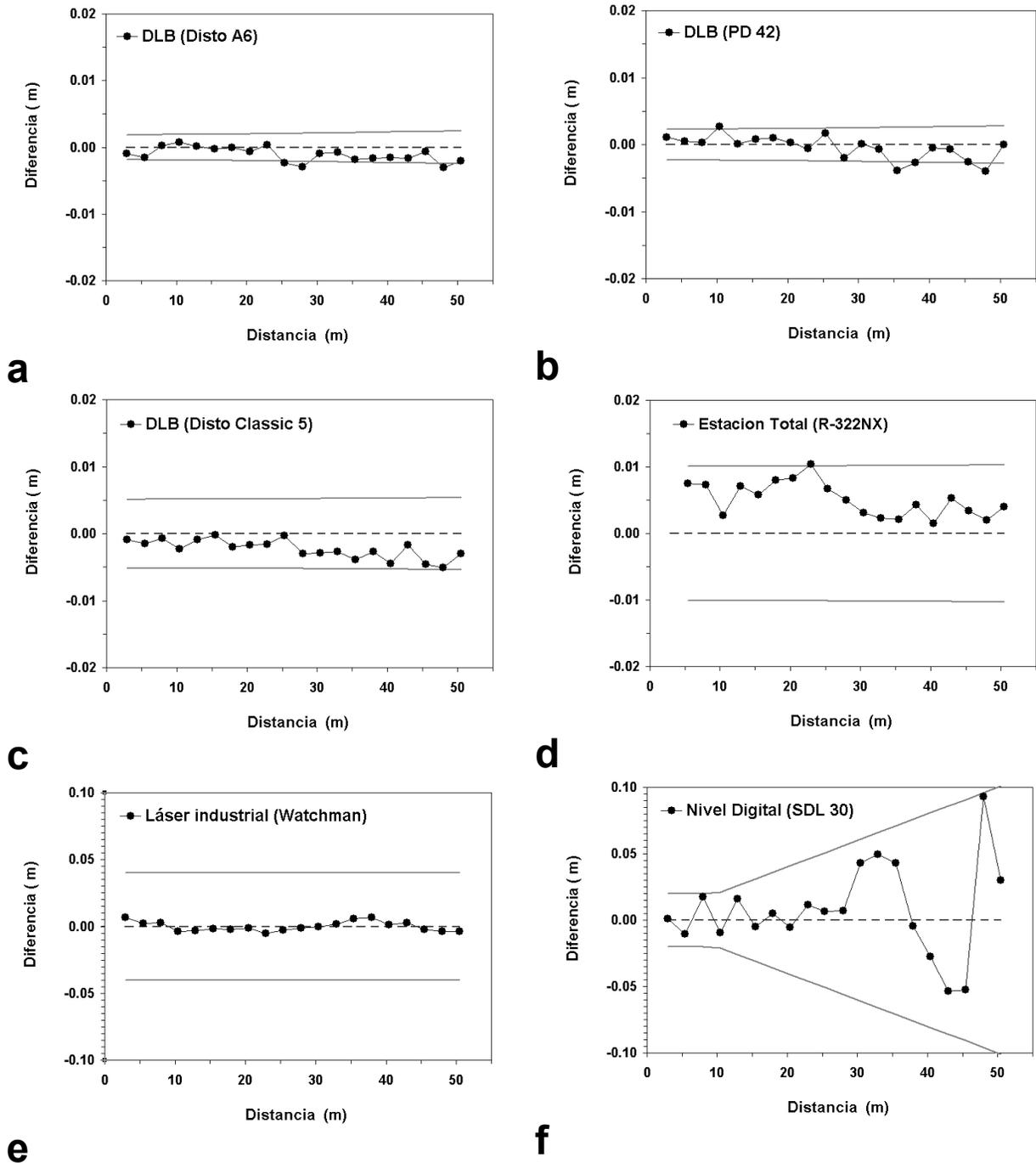
### AGRADECIMIENTOS

Se agradece a Marcos Mendoza y Octavio Icasio (División de Metrología Dimensional del CENAM), así como a Alberto Castro, Luis Jaimes y Wendoly Flores por su apoyo técnico y sus comentarios.

**Cuadro 1** Distanciómetros portátiles probados.

Instrumento probado	1	2	3	4	5	6
Tipo de instrumento	Láser de Bolsillo (DLB)			Láser industrial (infrarrojo)	Estación Total (ET)	Nivel digital (distanciómetro)
Modelo	<i>Disto A6</i>	<i>PD 42</i>	<i>Disto Classic 5</i>	<i>Watchman 3100</i>	<i>R-322NX</i>	<i>SDL 30</i>
Marca	Leica	Hilti	Leica	Optech	Pentax	Sokkia
Referencia	[3]	[4]	[5]	[8]	[9]	[10]
Incertidumbre (mm) [ $p = 0.95$ ] <sup>(a)</sup>	$\pm 1.5$ <sup>(b)</sup>	$\pm 2$ <sup>(c)</sup>	$\pm 5$	$\pm 40$	$\pm 10$ <sup>(c)</sup>	$\pm 20 - 100$ <sup>(c)</sup>
Forma de medir distancias	Tiempo de travesía de la luz <sup>(d)</sup>			Tiempo de travesía de la luz (infrarrojo)	Tiempo de travesía de la luz	Cámara CCD y estatal codificado
Forma de apuntar un blanco	Haz visible del Láser (rojo, $\lambda = 635$ nm)			Apuntador Láser adicional (rojo)	Haz visible del Láser (rojo), <i>compass</i> , y telescopio	Nivel integrado, y telescopio para apuntar un estatal

- (a) Para distancias entre 1 y 50 m, según las especificaciones del fabricante (nota: sin embargo, varios fabricantes comentan que se reservan el derecho de cambiar las especificaciones de sus instrumentos sin previo aviso).
- (b) El fabricante indica que la incertidumbre puede ser mayor para distancias  $> 30$  m.
- (c) El fabricante *no* dice si reporta el error máximo permisible del instrumento, o una incertidumbre con un cierto intervalo de confianza. Asumiendo que se trata de una incertidumbre estándar, se tomó una incertidumbre del doble [ $p = 0.95$ ] para fines prácticos. <sup>[7]</sup>
- (d) El fabricante *no* indica el modo de funcionamiento de su instrumento; sin embargo, véase el **Anexo 1**.



**Fig. 5** Resultado de la verificación de distanciómetros con el banco de prueba.

Cada punto corresponde a la diferencia entre una lectura proporcionada por el equipo probado y la distancia de referencia considerada. Las líneas indican la incertidumbre [ $p = 0.95$ ] que se espera teóricamente sobre estas diferencias; dicha incertidumbre es una combinación de la incertidumbre reportada por el fabricante del equipo (ver **Cuadro 1**) y de la incertidumbre sobre las distancias de referencia ( $U_B$ , véase **Ecuación 3**).

**ANEXO 1 - MODO DE FUNCIONAMIENTO DE LOS DISTANCIÓMETROS LÁSER DE BOLSILLO**

La literatura [1,2] sugiere que los distanciómetros Láser de bolsillo (DLB) funcionan generalmente según el método TOF ("Time of Flight" o "Tiempo de Travesía") aplicado a la luz, es decir: determinan una distancia ( $L$ , m) conociendo la velocidad de la luz en el aire ( $c$ , m/s) y midiendo el tiempo que tarda un impulso de luz para ir hacia un blanco y regresar hacia el aparato ( $t$ , s).

$$L = \frac{c t}{2} \quad (4)$$

Ahora bien, los manuales de los DLBs probados no dicen cual es el modo de funcionamiento de estos instrumentos; solo dicen que la luz del Láser es roja ( $\lambda = 635 \text{ nm}$ ). [3,5] Por este motivo, se hicieron pruebas para saber si los DLBs probados funcionan según el método TOF.

El fundamento de las pruebas es el siguiente: si un distanciómetro Láser funciona según el método TOF, debería sobreestimar la distancia cuando se interpone sobre el camino de su haz Láser un objeto transparente y con índice de refracción mayor al del aire; de hecho, la luz tarda más tiempo en atravesar un objeto con mayor índice de refracción mayor. Considerando que el índice de refracción del aire es  $\approx 1$ , se tendrá teóricamente:

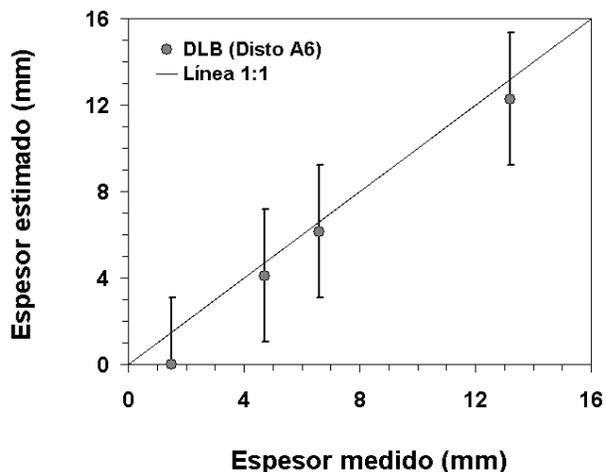
$$\Delta L \approx (n_{ac} - 1) e_{ac} \quad (5)$$

donde  $\Delta L$  es la sobreestimación de distancia (m),  $n_{ac}$  es el índice de refracción del objeto transparente y  $e_{ac}$  es el espesor del objeto (m).

Por lo anterior, las pruebas consistieron en tomar lecturas de distancia ( $\approx 8 \text{ m}$ ) con un DLB cuando se estaba interponiendo sobre el camino del haz Láser bloques de acrílico de distintos espesores. El índice de refracción del acrílico para la luz roja es:  $n_{ac} = 1.48431$ . [11] Se midió el espesor de cada bloque con un vernier (con una tolerancia de  $\pm 0.05 \text{ mm}$ ), obteniéndose los siguientes valores: 1.30, 4.15, 5.80 y 11.60 mm. Para bloques de acrílico más gruesos, no se pudieron tomar lecturas de distancia, probablemente porque la intensidad del haz Láser de los DLBs estaba demasiado atenuada.

Además, se observó durante las pruebas que los DLBs proporcionan a veces resultados inconsistentes (es decir, distancias bastante menores a la realidad) cuando se deja un bloque de acrílico perpendicular al haz Láser; esto se debe probablemente a que parte de la luz que se refleja sobre el bloque puede interferir con las mediciones; el problema dejó de presentarse, cuando se colocaron los bloques de tal forma que tenían una cierta inclinación con respecto a la dirección del haz Láser (en este caso, se tomo en cuenta la inclinación del bloque para calcular el espesor de acrílico atravesado por el haz Láser).

El resultado de las pruebas realizadas con los tres DLBs considerados en este trabajo [3-5] sugiere que funcionan según el método TOF. De hecho, cuando se interponen placas de acrílico en el haz de sus Láser, sobreestiman la distancia (véase Fig. 6) de una manera que es consistente con la teoría (Ecuación 5); aunque el efecto casi no es perceptible para placas de acrílico con un espesor menor a  $\approx 4 \text{ mm}$ . Considerando que los DLBs probados funcionan según el método TOF (Ecuación 4), conviene preguntarse cual es la incertidumbre teórica de este método; esto se comenta en el Anexo 2.



**Fig. 6** Sesgo causado por la presencia de un bloque transparente (acrílico) en el camino del haz Láser de uno de los DLBs probados.

*El eje horizontal de la gráfica corresponde al espesor de acrílico atravesado por el haz Láser, mientras que el eje vertical corresponde al espesor estimado [ $p = 0.68$ ] a partir de la Ecuación 5.*

## ANEXO 2 - VELOCIDAD DE LA LUZ EN EL AIRE

Para medir el tiempo que tarda la luz en transcurrir una cierta distancia, se requiere obviamente de un cronómetro muy preciso; de hecho, considerando:  $c \approx 3 \times 10^8$  m/s, debe medirse el tiempo con una resolución de  $\approx 10$  ps ( $= 10^{-11}$  s) para alcanzar una precisión de 2 mm. [1] Esto es factible en la actualidad; de hecho, para una aplicación todavía no comercial, se ha reportado inclusive un cronómetro con una incertidumbre de 1 fs ( $= 10^{-15}$  s) [12]. Ahora bien, si los distanciómetros Láser actuales cuentan con un cronómetro muy preciso, en teoría los sesgos de estos aparatos solo dependerán de la incertidumbre sobre el valor de la velocidad de la luz en el aire (ver Ecuación 4).

En la actualidad, la velocidad de la luz en el vacío ( $c_0$ ) es un valor convencional:  $c_0 = 299\,792\,458$  (m/s)[13]. Ahora bien, cuando una luz monocromática atraviesa un medio con un cierto índice de refracción del medio ( $n$ ), su velocidad ( $c$ ) será igual a:  $c = c_0 / n$ . En la práctica, el índice de refracción del aire ( $n_a$ ) depende sobre todo de la longitud de onda de la luz ( $\lambda$ ), así como de la temperatura ( $T$ , °C), presión ( $P$ , Pa), humedad relativa ( $HR$ , %) y contenido de dióxido de carbono ( $C_{CO_2}$ ,  $\mu\text{mol} / \text{mol}$ ) del aire. Para la luz visible y el próximo infrarrojo ( $300 \leq \lambda \leq 1600$  nm), dicha dependencia se expresa comúnmente por medio de la ecuación de Edlén o de la ecuación de Ciddor; en este trabajo, se eligió la ecuación de Ciddor y se utilizó una hoja de cálculo disponible en *Internet*. [14]

Considerando que la temperatura del aire ( $T$ ) puede variar entre 0 y 50 °C, que la presión atmosférica ( $P$ ) puede variar entre 80 y 120 kPa, que la humedad relativa del aire ( $HR$ ) puede variar entre 0 y 100 %, y que el contenido de dióxido de carbono ( $C_{CO_2}$ ) puede variar entre 300 y 600  $\mu\text{mol} / \text{mol}$ , se deduce que la velocidad de la luz emitida por los DLBs probados ( $\lambda = 635$  nm) puede variar en un rango de hasta  $\pm 0.01\%$ . En este caso, estos instrumentos podrían teóricamente llegar a tener sesgos de hasta  $\pm 5$  mm cuando se utilizan para medir distancias de hasta 50 m en condiciones de campo. Por lo tanto, se concluye que las incertidumbres reportadas por los fabricantes de los tres DLBs probados son demasiado optimistas. [3-5] Para poder medir distancias de una manera más precisa con un DLB que funciona según el método TOF, el instrumento debería contar con sensores adicionales (sobre todo, un barómetro y un termómetro), como es el caso del distanciómetro de la ET probada. [9]

## REFERENCIAS

- [1] Amann MC, Bosch T, Myllyla R, Rioux M. Láser ranging: a critical review of usual techniques for distance measurement. *Optical Engineering* **40**: 10-19, 2001.
- [2] Bahuguna KC, Sharma P, Vasan NS, Gaba SP. Láser range sensors. *Defense Science Journal* **57**: 881-890, 2007.
- [3] Leica. Disto A6 - User manual (version 1.1). *Leica Geosystem AG*, Heerbrugg (Suiza), 2007 [[www.disto.com](http://www.disto.com)], consultado el 31/05/2010]
- [4] Hilti. PD 42 - Medidor de distancia láser. *Hilti Mexicana*, DF, 2007. [[www.hilti.com.mx](http://www.hilti.com.mx)], 31/05/2010]
- [5] Leica. Disto Classic 5 - User manual (version 1.2). *Leica Geosystem AG*, Heerbrugg (Suiza), 2004 [[www.disto.com](http://www.disto.com)], 31/05/2010]
- [6] Mendoza Reséndiz M, Icasio Hernández O. Informe de medición CNM-IM-740-259/2009. *CENAM*, El Marqués (México), 2009.
- [7] ISO. Guide to the expression of Uncertainty in Measurement. *International Standards Organization*, Geneva, 1995.
- [8] Optech. Watchman 3100 - User manual (LR and SR models). *Optech Inc.*, Vaughan (Canada), 2004.
- [9] Pentax. Quick reference guide - Basic procedures for R-300X Series. *Pentax Industrial Instruments Co.*, Tokyo, 2005.
- [10] Sokkia. SDL 30 - Digital Level. *Sokkia Co.*, Kanagawa (Japan), 1996 [[www.sokkia.com](http://www.sokkia.com)], 31/05/2010]
- [11] Kasarova SN, Sultanova NG, Ivanov CD, Nikolov ID. Analysis of the dispersion of optical plastic materials. *Optical Materials* **29**: 1481-1490, 2007.
- [12] Jin J, Kim YJ, Kim Y, Kim SW. Absolute distance measurements using the optical comb of a femtosecond pulse Láser. *Int. J. of Precision Engineering and Manufacturing* **8**: 22-26, 2007.
- [13] BIPM. 17<sup>a</sup> Conferencia General de las Pesas y Medidas. *Bureau International des Poids et Mesures*, 1983.
- [14] Stone JA, Zimmerman JH. Index of refraction of air. *Informe técnico del NIST*, 2009. [<http://emtoolbox.nist.gov>], 05/03/2009]