

# VERIFICACIÓN DE UN DISTANCIÓMETRO ELECTROÓPTICO QUE MIDE POR EL MÉTODO DE DIFERENCIA DE FASE

Giachello Guillermo<sup>1</sup>, Louge Santiago<sup>2</sup>, Paus Pablo<sup>1,2</sup>, Cordero María C.<sup>1,3</sup>, Aldasoro Roberto<sup>1,2,3</sup>, Soto Jaime<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup> UNITEC, Departamento de Electrotecnia, Fac. de Ingeniería, UNLP – Calle 1 y 47, (1900) La Plata

<sup>2</sup> UIDGPSyM, Departamento de Agrimensura, Facultad de Ingeniería, UNLP – Calle 1 y 47, La Plata

<sup>3</sup> INIFTA, Facultad de Ciencias Exactas, UNLP – Diag. 113 y 64, La Plata

<sup>4</sup> ESNM, Instituto Universitario Naval, Armada Argentina – Rio Santiago, Ensenada

Departamento de Agrimensura - Facultad de Ingeniería - UNLP - Calle 23 N° 290 – (1896) City Bell  
[robertoaldasoro@gmail.com](mailto:robertoaldasoro@gmail.com)

Palabras Claves: Distanciómetro, electroóptico, fase, errores, verificación

## Resumen

El objetivo del presente trabajo ha sido la implementación y análisis de un procedimiento de campo para la verificación de un distanciómetro electroóptico, cuyo principio de medición es el método de diferencia de fase. Para la ejecución del trabajo, y por cuestiones prácticas, se utilizaron dos estaciones totales de distintas generaciones (Topcon ET1 Y SOKKIA 10K) que están disponibles en el Departamento de Agrimensura. Para la verificación se utilizó el procedimiento simplificado de la Norma ISO 17123-4:2001 (Óptica e instrumentos ópticos- Procedimientos de campo para pruebas de instrumentos topográficos y geodésicos – Parte 4: Distanciómetros electroópticos).

## INTRODUCCIÓN

Un distanciómetro es un instrumento electrónico que permite medir distancias entre dos puntos especificados, en forma directa.

Para medir la distancia que existe entre los puntos  $x$  e  $y$ , se debe ubicar el equipo en uno cualquiera de ellos, y en el otro se debe colocar un objeto que le indique al distanciómetro que se trata del extremo opuesto para medir la distancia deseada (el objeto, generalmente, es un espejo especial (prisma)). Luego se debe “enfocar” el equipo a través de una mira (o medio de enfoque similar) dirigida hacia el objeto ya mencionado. (Figura 1). Finalmente, se da inicio a la medición, obteniéndose la indicación correspondiente a la distancia incógnita, en la pantalla del instrumento al cabo de unos momentos.

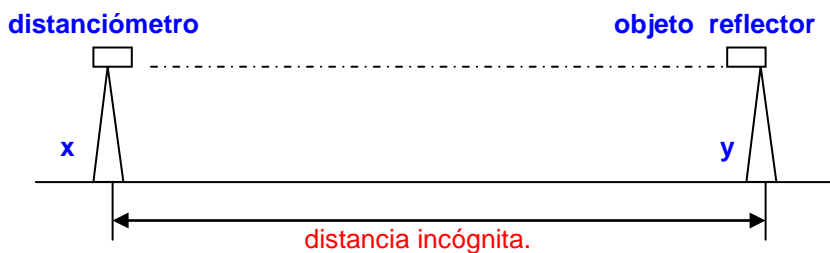


Figura 1.

### ➤ Distanciómetros electro-ópticos

Son aquellos que emiten ondas de luz al medio, las cuales se propagan a la velocidad de la luz. Hay una gran diversidad de equipos de este tipo, obteniéndose gran variedad de alcances. Los distanciómetros electro-ópticos (infrarrojos y láser) son los que se utilizan en la actualidad.

## ➤ Método de fase

Mediante una simple deducción matemática vinculando la diferencia de fase entre la señal emitida y la recibida por el distanciómetro y el tiempo de tránsito de la onda en recorrer la distancia a medir, se obtiene la expresión de la distancia en función de la medida de la diferencia de fase.

$$d = n \cdot \frac{\lambda}{2} + \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \Delta\phi$$

Donde:  $n$  : es un número entero,  $\lambda$ : longitud onda,  $\Delta\phi$  : diferencia de fase.

Para hallar la distancia hay que conocer el valor de “n”, que se obtiene realizando otra medida con el distanciómetro, empleando una onda con una longitud de onda ligeramente inferior.

## ➤ Fuentes de Error en Mediciones Electromagnéticas de Distancias (MED) utilizando el método de diferencia de fase

Errores Sistemáticos:

### 1. Error en la constante del instrumento y del reflector

En muchos instrumentos MED la señal viaja internamente sobre alguna distancia durante la transmisión y el regreso. El punto a partir del cual la señal se puede considerar transmitida, el centro electrónico, puede diferir del centro geométrico referido al lugar donde se localiza el instrumento sobre la estación. Esto da lugar a una constante, que debe aplicarse a todas las distancias medidas con ese instrumento. Pero, además, debe tenerse en cuenta que puede haber discrepancia entre los centros ópticos y geométricos de los reflectores.

### 2. Error en la diferencia de fase

La diferencia de fase involucra tres fuentes de error:

#### 2.a- Por la determinación de la misma:

La diferencia de fase es determinada de manera matemática en el aparato, por lo tanto, las fuentes de error están dadas por la digitalización de las señales (la cantidad de bits usados) y consecuentemente se tendrá una cota del error que será constante, sin importar la medición de la distancia.

#### 2.b- por el error cíclico:

El error cíclico es generado por el efecto multicamino, y el mismo es producido por las múltiples refracciones y difracciones dadas antes de llegar al receptor. El error cíclico es periódico, ya que la diferencia de fase variará entre 0 y 360°, luego se repetirá, y tendrá una forma aproximadamente senoidal, por lo tanto, se tendrá una cota de error.

#### 2.c- por fenómenos de interferencia:

Presentes en los mecanismos ópticos/electrónicos, se considera despreciable respecto al error cíclico.

### 3. Error de escala

Es un error proporcional a la longitud de la línea medida y su causa se debe a factores internos y externos, tales como:

3a- La deriva de la frecuencia del oscilador del cristal en el instrumento. Un distanciómetro se diseña para una frecuencia de medición, esta frecuencia está determinada por un oscilador y cualquier variación de la misma afectará a la distancia resultante.

3b- Falta de homogeneidad entre el patrón de emisión y el de recepción.

3c- Variaciones en las condiciones atmosféricas que afectan la velocidad de propagación. Por causa de factores externos, tales como cambios en las condiciones atmosféricas y la temperatura, se producen cambios en la velocidad de la señal electromagnética. Al variar la velocidad de propagación se modificará la longitud y frecuencia de la onda.

3d- Errores en la medición de la temperatura, presión y humedad.

Errores Aleatorios:

### **1. Error instrumental**

Es el cometido por la limitación en la precisión del instrumento. Lo brinda el fabricante y se expresa en dos partes: un valor fijo que es la precisión en la medida de la diferencia de fase, y una cantidad relativa (función de la distancia medida) que es dependiente del error de escala y se da en partes por millón (ppm). Un ejemplo de error instrumental sería  $\pm(2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm} \times D \text{ mm})$ .

### **2. Error en el estacionamiento**

Se produce al no estar la estación situada exactamente sobre el punto de estación.

### **3. Error en la señal**

Se produce cuando el jalón del prisma no se encuentra exactamente sobre el otro extremo de la distancia a medir.

### **4. Error por inclinación del jalón**

La limitación en la precisión (sensibilidad) del nivel esférico que va acoplado al jalón provoca una cierta inclinación del jalón en el momento de la medición que no se puede controlar.

## **PARTE EXPERIMENTAL**

### **Procedimiento de ensayo simplificado**

Según la Norma ISO 17123-4 el procedimiento de ensayo simplificado proporciona una estimación en cuanto a si la precisión de un equipo EDM dado se encuentra dentro de la desviación permitida especificada según la norma ISO 4463-1 (Métodos de medición para edificios – Replanteos y medición. Parte 1: Planificación y organización, procedimientos de medición, criterios de aceptación).

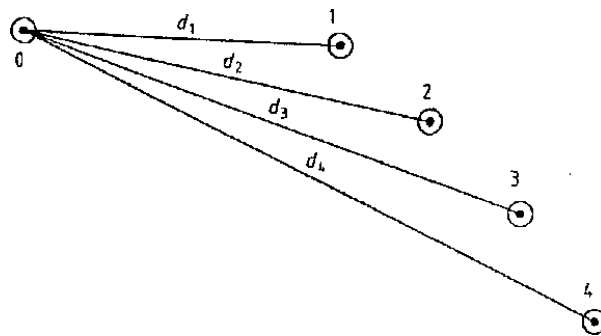
Este procedimiento de ensayo se basa en tener un campo de prueba con distancias que son aceptadas como verdaderos valores.

El campo de prueba estará compuesto por una estación de instrumento permanente y cuatro reflectores permanentemente montados en las distancias típicas de la zona de trabajo habitual del instrumento de EDM (por ejemplo, desde 20 m hasta 200 m). Si el montaje permanente de los reflectores no es posible, entonces los puntos de tierra de las estaciones de reflector deben ser indelebles.

Para establecer el campo de prueba, cada una de las distancias se medirá al menos tres veces y se deberá calcular el valor medio. Estos valores medios serán corregidos para las desviaciones de la temperatura y la presión de aire de STP (Standard de temperatura y presión). Por esta razón es que deberán ser medidas la temperatura y la presión del aire, con el fin de determinar las correcciones necesarias de los valores de las cuatro distancias medias. Los valores medios se corregirán en 1 ppm para cualquier desviación en la temperatura de 1°C, y/o cualquier desviación de 3 hPa (3 mbar) en la presión del aire.

Los valores medidos corregidos de las cuatro distancias serán considerados verdaderos:

$$\bar{x}_1 = d_1 \quad \bar{x}_2 = d_2 \quad \bar{x}_3 = d_3 \quad \bar{x}_4 = d_4$$



Para la aplicación de la norma ISO 17123-4, se utilizó como instrumento de referencia (patrón) la estación SOKKIA Serie 10K con una precisión de +/- (2mm + 2ppm x D mm), y se verificó la estación total TOPCON ET1 compuesta de un distanciómetro electroóptico que mide por el método de diferencia de fase con una precisión de +/- (5mm + 2ppm x D mm), según las especificaciones del manual de operación del fabricante.

Los pasos que se siguieron para la aplicación de la norma fueron los siguientes:

- En primer lugar se hizo un centrado forzoso de la estación SOKKIA, marcando de manera adecuada el punto, para luego ubicar en el mismo lugar la estación a verificar.
- Luego se utilizaron 4 trípodes con bases nivelantes para los prismas, repitiendo el centrado forzoso, marcando de igual manera los correspondientes puntos.
- Los trípodes fueron ubicados en distancias entre 20 y 200 metros según aconseja la Norma.
- Más tarde, se retiró la estación patrón reemplazándola por la que se quería verificar, usando nuevamente el centrado forzoso en el mismo punto.
- Se tomaron medidas de presión y temperatura para realizar las correcciones correspondientes.
- Las correcciones atmosféricas en la estación patrón son realizadas por el mismo aparato, en cambio para el instrumento a verificar las correcciones fueron realizadas posteriormente a la medición.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores de las distancias obtenidas con el equipo considerado patrón (Xp) y con el equipo a verificar (Dc) se observan en la Tabla 1:

Equipo patrón X [m]	Equipo a Verificar D [m]	Valores corregidos Equipo a verificar Dc [m]	Promedio Equipo patrón Xp [m]	Diferencia Xp-Dc [mm]
X1= 23,3808	D1=23,367	D1c=23,3671	X1p=23,3807	13,6
X2= 23,3806				
X3= 23,3806				
X1= 81,1139	D2=81,099	D2c=81,0996	X2p=81,1138	14,2
X2= 81,1137				
X3= 81,1140				
X1=141,4184	D3=141,408	D3c=141,409	X3p=141,4184	9,4
X2=141,4184				
X3=141,4184				
X1=200,2016	D4=200,182	D4c=200,183	X4p=200,2013	18,3
X2=200,2008				
X3=200,2015				

Tabla 1

Temperatura: 22,4 °C, Presión: 1008 hpa/ 757.895 mmHg  
 Modo de instrumento patrón: modo fino promedio 9 repeticiones.

Corrección atmosférica para la estación total Topcon ET1:

$$Ka = \left( 279.6 - \frac{106 * p}{273.2 + t} \right) * 10^{-6}$$

$$Ka = 7.8245 e^{-6}$$

$$Dc = (D + D * Ka)$$

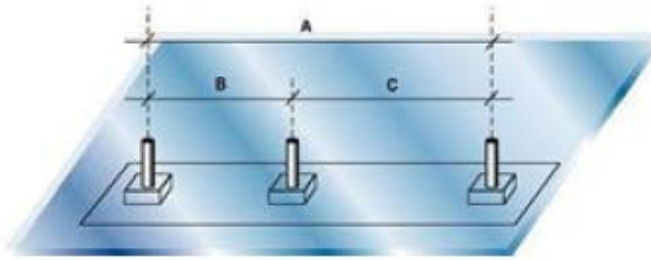
D1= 23,367 m      D2=81,099 m      D3=141,408 m      D4=200,182 m  
 D1c=23,3671 m      D2c=81,0996 m      D3c=141,409 m      D4c=200,183 m

Como se puede observar en las cuatro distancias medidas por ambos instrumentos se verificó una diferencia entre 9,4 mm y 18,3 mm, valores superiores a la precisión especificada por el manual del equipo y con la particularidad que en todos los casos el valor medido por el equipo bajo ensayo fue menor que los obtenidos con la estación más precisa. Por lo tanto, se presume que la estación Topcon ET1 presentaría un error sistemático.

De acuerdo a esto se decidió, basándose en lo aconsejado por dicha Norma, realizar una experiencia en el campo para determinar el posible error sistemático de cero y/o de error de escala del instrumento.

### Determinación del error de cero

Se utilizó el método de medida de tres distancias según muestra el siguiente gráfico:



Si se mide primero el tramo **A**, y luego los tramos **B** y **C**, debería ocurrir que  $A = B + C$  y siendo el error **e** constante, entonces:

$$A+e = (B+e) + (C+e), \text{ lo que equivale a: } (A+e) - (B+e) - (C+e) = 0$$

Por lo tanto,  $e = B+C-A$ , determinándose que su corrección será de signo contrario.

Se llevaron a cabo dos ensayos. En el primero se midieron las distancias comenzando desde el punto extremo izquierdo (o sea colocando la estación total en ese punto y los prismas en los otros dos puntos), y en el segundo ensayo se repitieron las medidas pero comenzando desde el extremo derecho (Tabla 2).

Tabla 2

	Distancia (m)	Error (m)
Primer ensayo		
A	47,670	
B	24,439	$e = - 0,025$
C	23,206	
Segundo ensayo		
A	47,671	
B	24,447	$e = - 0,020$
C	23,204	

Finalmente, siguiendo las recomendaciones de la Norma ISO simplificada se realizó una verificación de la frecuencia de referencia.

### Medición de la frecuencia

Se utilizó un osciloscopio con memoria digital, marca Kenwood, modelo cs-8010, con una punta por uno, sensibilidad vertical 23 volt por división y sensibilidad horizontal 0,5 micro seg. por div. La lectura de un periodo fue de 1,38 div, equivalente a 1,45 Mhz.

Según lo indicado por el fabricante en el manual técnico del equipo Topcon ET1, se utilizó para medir la frecuencia de referencia de 1,5 MHz el switch 1, con pin de FREC (3) en posición ON, modo S/A, y se conectó el osciloscopio a CO y GND. Según las mediciones realizadas, existe una variación de frecuencia de 3,3 %, pero debe tenerse en cuenta que las mediciones realizadas con osciloscopio no son precisas y al estar buscando variaciones en frecuencia del orden de partes por millón, no se puede asegurar el valor con un error adecuado. En consecuencia, con esta medición sólo se pudo ver la forma de onda y se observó que la frecuencia tiene valores dentro el orden indicado.

En la fotografía siguiente puede observarse la forma de onda obtenida en el osciloscopio.



Posteriormente se midió la frecuencia de referencia de la estación TOPCON ET1 con un contador universal de pulsos HP 5328 A (Hewlett Packard), con una resolución de 1Hz. Se midió en el mismo punto que con el osciloscopio y en las mismas condiciones.

Se tomaron los siguientes valores:

1.498.533 Hz – 1.498.535 Hz – 1.498.539 Hz – 1.498.533 Hz  
1.498.532 Hz – 1.498.536 Hz – 1.498.535 Hz – 1.498.532 Hz

Se debería haber medido 1,5 Mhz, pero se obtuvo como valor medido 1,49853 Mhz, por lo que el error es de 0,098 %. También se observó un corrimiento entre las medidas en el orden de los Hz.

## CONCLUSIONES

- ✓ El signo de los errores obtenidos en la determinación del error de cero coinciden con lo que se preveía, según lo determinado en el ensayo de la Norma ISO simplificada, en cuanto a que las distancias medidas por el distanciómetro son menores que las reales.

En cuanto a la magnitud de los mismos (alrededor de 20 mm) parecen ser un poco altos con respecto a los valores de los errores determinados en la experiencia de la norma simplificada, pero hay que considerar dos aspectos:

- a) La propia desviación  $\pm(5\text{mm} + 5 \text{ ppm } D \text{ mm})$  del instrumento de acuerdo a la precisión indicada en las especificaciones técnicas que afectan a los valores medidos.
  - b) Se realizó una sola medida para cada distancia, de acuerdo a lo indicado en la norma, con lo cual los errores aleatorios del equipo tienen una gran influencia en la misma. Por tal motivo, se aconseja realizar un número adecuado de mediciones y obtener el valor medio de las mismas.
- ✓ Como se puede observar, la estabilidad de la frecuencia en el corto tiempo condice con lo esperable, pero su valor es menor que la frecuencia nominal y el sentido de dicho corrimiento produce un error en la determinación de la distancia del mismo signo que el error obtenido inicialmente con las mediciones realizadas durante la aplicación de la Norma ISO simplificada.

Esto se deduce de la expresión de la medida de la distancia en este tipo de distanciómetros que mide por diferencia de fase:

$$d = n \cdot \frac{\lambda}{2} + \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \Delta \varphi$$

El equipo mide la diferencia de fase que se utiliza en dicha expresión, pero emplea para calcular la distancia la longitud de onda referida a la frecuencia original de fábrica almacenada en su memoria. Si la frecuencia, por algún corrimiento, disminuye, la longitud de onda, aumenta (que es la que en realidad se está utilizando en la medida actual), con lo cual la distancia calculada con la frecuencia original es menor que la real.

- ✓ La estación total Topcon ET1 bajo ensayo, según la Norma ISO ISO17123/4, presenta un error sistemático de cero y un corrimiento en la frecuencia que genera en las medidas de las distancias un error sistemático, reflejado en las medidas que se realizaron en el campo. Si bien no se pudo determinar una corrección aplicable en las medidas que se realicen con dicha estación, se verificó la necesidad de realizar un servicio técnico en el equipo para corregir los desvíos mencionados.
- ✓ Si bien el procedimiento analizado en el presente trabajo está basado en un número limitado de medidas, y por lo tanto, no puede ser obtenida una desviación estándar significativa, es un método de campo relativamente simple de implementar y que permite realizar una verificación rápida de la precisión de un distanciómetro electroóptico.

### Bibliografía:

- MetAs “Metrólogos Asociados” (<http://www.metas.com.mx/index.html>)
- Cálculo de Compensación – Profesor Ingeniero Antonio D’Alvia. 1999
- Apuntes de la Cátedra Topografía – Departamento de Agrimensura-Facultad de Ingeniería-Universidad de Buenos Aires. 1975.
- Tratamiento de datos experimentales. Teoría de Errores. 2005  
([http://www.ugr.es/~jnieves/web\\_labdocencia/index\\_archivos/Apendice%20II%20de%20Teoria%20de%20errores\\_rev02Feb.pdf](http://www.ugr.es/~jnieves/web_labdocencia/index_archivos/Apendice%20II%20de%20Teoria%20de%20errores_rev02Feb.pdf))
- Resumen de teoría de errores - Chantal Ferrer Roca y Ana Cros Stötter  
(<http://www.uv.es/cros/docencia/mecanica/RESUMEN%20de%20TEORIA%20DE%20ERRORES.pdf>)
- LABCI “Laboratorios de Calibraciones Industriales” (<http://www.labci.com.ar/nota04.html>)
- Elementary Surveying: An Introduction to Geomatics, Paul R. Wolf & Charles D. Ghilani, 11th Ed.
- Técnicas modernas en topografía - BANNISTER, RAYMOND, BAKER - MARCOMBO-ALFAOMEGA - ISBN: 9701506731 ISBN-13: 9789701506738
- Apuntes de la Cátedra Instrumental y Técnicas Especiales, Dto. de Agrimensura, FIUNLP.
- Nota de Aplicación 200-2 . HEWLETT PACKARD – Fundamentals of Quartz Oscillators
- Theory and Practice – Séptima edición - James M. Anderson & Edward M. Mikhail
- Cálculo de incertidumbres para expresar la calidad de medida. Aplicación a la calibración de los instrumentos de medida electromagnética de distancias Fernández Pareja, M<sup>a</sup> Teresa [te\\_fer@topografia.upm.es](mailto:te_fer@topografia.upm.es), Dto. de Ingeniería Topográfica y Cartografía Univ. Politécnica de Madrid
- Publication Reference EA-4/02-European co-operation for Accreditation -
- Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration – Diciembre 1999
- Expresión de la incertidumbre de medida en las calibraciones, CEA-ENAC-LC/02-Rev.1, Ene 98  
<http://www.madrimasd.org/Laboratorios/Documentos/Enac/default.asp>, Selección de documentos publicados por ENAC (Organismo Nacional de Acreditación en España)
- ISO 17123-4:2001: Optics and optical instruments -- Field procedures for testing geodetic and surveying instruments -- Part 4: Electro-optical distance meters (EDM instruments)
- ISO 4463-1:1989: Measurement methods for building -- Setting-out and measurement -- Part 1: Planning and organization, measuring procedures, acceptance criteria.