

## ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL ERROR CÍCLICO EN EL DISEÑO DE BASES DE CALIBRACIÓN PARA DISTANCIÓMETROS ELECTRO-ÓPTICOS.

José Romano<sup>1</sup>, Pablo Paús<sup>1</sup>, Javier Bergamini<sup>2</sup>, Roberto Aldasoro<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería - UNLP. Departamento de Agrimensura - Facultad de Ingeniería - UNLP - Calle 47 y 116 – La Plata (1900) - [jose.romano@ing.unlp.edu.ar](mailto:jose.romano@ing.unlp.edu.ar)

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas - UNLP

Palabras Claves: M.E.D. - error de ciclo - base de calibración.

### INTRODUCCIÓN

Actualmente se encuentra ampliamente difundido el uso de instrumentos M.E.D. (Medición Electro-Óptica de Distancias) para todo tipo de labores que requieran la medición de distancias. Estos dispositivos emiten una señal electromagnética desde un extremo de una línea a medir hacia el otro, la que regresa al punto inicial luego de ser reflejada; de la observación y procesamiento de la señal recibida surge la medida de la distancia. Con el fin de garantizar la calidad de los resultados y la trazabilidad de las mediciones, es necesario, entre otros aspectos, contar con instrumentos calibrados. El objetivo de este trabajo es analizar y seleccionar un diseño de **base de calibración**, funcional al mayor número de dispositivos M.E.D. Para poder calibrar un instrumento es necesario determinar los errores sistemáticos y la incertidumbre de medida, a partir de la medición de distancias conocidas, materializadas mediante una serie de pilares fijos alineados en el terreno. Para ello se demostrará la conveniencia de un diseño de base en particular y se generaron distintos mecanismos para su análisis pormenorizado.

### DISEÑO EXPERIMENTAL DE UNA BASE. ANÁLISIS DE ERRORES

#### Línea Base de Calibración para Instrumentos M.E.D.

Una base de calibración implica una alineación de pilares, fijos en el terreno, y dispuestos de modo que las distancias entre ellos obedezcan a un patrón de diseño determinado. Sobre estos pilares mediante bases nivelantes "Tribrach" se colocan los Distanciómetros y sus respectivos reflectores a calibrar. Existen diversos diseños de Base: Aarau, Hobart y Heerbrugg.

Una característica específica de los distanciómetros basados en el método de la diferencia de fase es la **unidad de medida (U)**. Ésta es la medida de referencia que emplea el instrumento al realizar una observación, y depende de la longitud de la onda medidora que emite, (un valor típico es 10 m). La base de calibración se diseña para un valor de **U** específico. Si este valor es seleccionado adecuadamente, la base diseñada será apta para equipos con valores diversos de **U**.

#### Errores Sistemáticos en la Medición con Instrumentos M.E.D.

Un instrumento M.E.D. tiene tres errores sistemáticos a considerar y que son fundamentales en el diseño de las diferentes bases de calibración existentes. La operación de calibrar un Distanciómetro M.E.D. implica la determinación de las magnitudes de esos tres errores conjuntamente con sus incertidumbres, en el instrumento con un reflector dado.

a) "**Error de offset**", este error tiene un valor constante para un distanciómetro y un reflector en particular, su existencia se debe a dos causas:

- El cero del distanciómetro, origen para la medición de distancias, no coincide con el centro geométrico del instrumento.

- Dentro del reflector la señal realiza un recorrido, debido al índice de refracción del prisma (Distinto al del aire), se producirá una variación de fase  $\Delta\phi$ , que involucrará en el cálculo de la distancia un recorrido adicional  $d_R$ .

b) Otro de los errores sistemáticos es el **“Error de Escala”**. Su causa radica en que el instrumento produce una frecuencia distinta a la de diseño, con lo cual la unidad de medida teórica  $U$  es diferente a la real, el resultado es que la distancia medida tendrá un error que ha de ser proporcional a su longitud, de ahí la naturaleza escalar del error. Las causas principales son efectos internos: oscilador, diodos emisor y receptor.

c) El tercero de los errores que condicionan el diseño de una base de calibración para distanciómetros es el llamado **“Error de Ciclo o Periódico”**.

Sobre el **estudio de la influencia de este último error en el diseño de bases de calibración para instrumental M.E.D.** se centra este trabajo.

### **Error de Ciclo o Periódico. Adopción de un diseño de base**

Los instrumentos M.E.D. basados en el principio de medición de fase, pueden presentar errores periódicos con longitudes de onda equivalentes a la unidad de medición  $U$ . Los errores periódicos, que se repiten en múltiplos de la unidad de longitud  $U$ , pueden darse debido a la diafonía eléctrica u óptica (feedthrough) o debido a un error sistemático en el sistema de medición de fase. Errores de este tipo con longitud de onda  $U$  son llamados errores periódicos (o de ciclo) cortos de primer orden.

De los modelos de diseño de bases de calibración para instrumentos M.E.D. se adopta el diseño de Heerbrugg. Esta elección se realizó a partir de las siguientes consideraciones:

- **Independencia en la determinación de los errores sistemáticos:** El diseño de Heerbrugg para bases de calibración permite independizar el tratamiento del error de ciclo de los errores de constante y de escala. Dependiendo del método de cálculo elegido, el error de ciclo puede minimizarse, de modo que su influencia no afecte al cálculo de los otros dos errores; alternativamente, proponiendo un modelo matemático distinto, se puede determinar el error de ciclo.
- **Adaptabilidad a instrumentos con diferentes unidades de medida  $U$ :** En este aspecto los diseños de Heerbrugg y Aarau tienen mayores ventajas sobre el diseño de Hobart. Este último requiere un pilar específico para cada valor de unidad de medida, mientras que los dos primeros tipos de base se adaptan para múltiples valores.
- **Número de observaciones:** El método de Hobart provee menor número de observaciones, lo que reduce la precisión de los parámetros determinados, en comparación con los otros dos diseños.
- **Determinación conjunta de los parámetros de calibración:** Los diseños de Heerbrugg y Hobart permiten determinar en un mismo programa de observaciones los parámetros de calibración. El diseño de Aarau requiere de un proceso adicional e independiente para determinar el error de ciclo, como por ejemplo el uso de una “base corta” de longitud  $U$ . Si bien esto no va en desmedro de la precisión del último diseño, implica costos de instalación adicionales y mayor trabajo, tanto en las mediciones como en el cálculo.
- **Oficialización del diseño de Heerbrugg:** El diseño de Heerbrugg ha sido adoptado por las normas de calidad internacional ISO. La norma ISO 17.123-4 “Electro-optical distance meters (EDM instruments)” establece un procedimiento completo para la verificación de instrumentos M.E.D. siguiendo este diseño de línea de base.

Una vez definido el tipo de diseño para la base de calibración, se estudió como inciden en ésta, factores como la unidad de medida de los instrumentos, la longitud total de la base y el número de pilares proyectados. También se analizó el modo en que intervienen la detección y cuantificación de los errores instrumentales en el diseño de Heerbrugg, es decir, como interviene cada uno de los errores en las diferentes instancias del diseño de la base.

**Estudio de la adaptabilidad de un diseño de Base, adiferentes dispositivos M.E.D.**

Un dispositivo M.E.D., para medir una distancia determina un número entero de unidades de medida más una fracción de ésta, denominada resto. Los valores que toman los restos dependen tanto de las distancias observadas como del valor de la unidad de medida **U** del instrumento. Para la minimización o determinación del error de ciclo, la totalidad de las distancias posibles a ser medidas, deben permitir obtener una muestra de restos distribuidos uniformemente a lo largo de la unidad de medida **U** (Fig. 2). El estudio de esta característica se realizó mediante un análisis numérico, el cual se visualiza en una gráfica de la distribución de los restos para cada valor de **U**. Esta metodología permite analizar eficientemente la compatibilidad de una base diseñada para un valor de **U** específico, con equipos que funcionan con otros valores.

Las longitudes de los distintos segmentos de una línea de base construida según el diseño de Heerbrugg surgen de las ecuaciones propuestas (Rüger 1996) donde cada segmento tiene la siguiente expresión:

$$A+i.B+j.D$$

U= Unidad de medida del distanciómetro.

A= Menor distancia de la línea de base (Múltiplo de U)

B= Múltiplo de A más cercano a B<sub>0</sub>.

i, j: enteros positivos.

D: fracción de U.

C<sub>0</sub>= Longitud total deseada de la línea de base.

Donde uno de los parámetros de diseño es la Unidad de Medida **U**. Cada distancia **D<sub>i</sub>**, al momento de medirse, estará comprendida por un número entero de segmento **U** ( $n/2$ ) más un resto (**r<sub>i</sub>**):

Número de Pilares	B <sub>0</sub>	D
5	$\frac{1}{6}(C_0 - 4A - U)$	$\frac{1}{16}U$
6	$\frac{1}{10}(C_0 - 5A - U)$	$\frac{1}{25}U$
7	$\frac{1}{15}(C_0 - 6A - U)$	$\frac{1}{36}U$
8	$\frac{1}{21}(C_0 - 7A - U)$	$\frac{1}{49}U$

$$D_i = n.U + r_i$$

$$r_i = D_i - n.U$$

n: Entero positivo.

La distribución uniforme de los diferentes restos a los largo de la unidad de medida **U** se consigue mediante el diseño de Heerbrugg. La mejor distribución se logra para el valor **U** de diseño, para valores diferentes esta distribución varía. Una distribución uniforme permite, por un lado, minimizar la influencia del error de ciclo en las observaciones realizadas en la base de calibración. O por otro lado determinar la magnitud del error de ciclo, de acuerdo al cálculo que se realice.

El diseño particular de Heerbrugg permite que los **r<sub>i</sub>** del total de las distancias a medir representen una distribución equitativa dentro de la Unidad de Medida **U**. A continuación se muestra un ejemplo de este tipo de diseño (Fig. 1) donde:

U=10 m.

C<sub>0</sub>= 900 m.

Nº de observaciones: 28.

n= 8 pilares.

C= 989,99 m.



Figura1

Pueden medirse 28 distancias diferentes, con sus 28 respectivos restos:

$D_i$		$r_i$	$D_i$		$r_i$
1	60.61	0.61	15	484.89	4.89
2	202.04	2.04	16	666.73	6.73
3	424.28	4.28	17	767.75	7.75
4	686.93	6.93	18	787.95	7.95
5	868.77	8.77	19	262.65	2.65
6	969.79	9.79	20	444.49	4.49
7	989.99	9.99	21	545.51	5.51
8	141.43	1.43	22	565.71	5.71
9	363.67	3.67	23	181.84	1.84
10	626.32	6.32	24	282.86	2.86
11	808.16	8.16	25	303.06	3.06
12	909.18	9.18	26	101.02	1.02
13	929.38	9.38	27	121.22	1.22
14	222.24	2.24	28	20.20	0.20

Para evaluar la distribución de los restos  $r_i$  a lo largo de la Unidad de Medida  $U$  se grafican los valores  $r_i/U$  (Fig. 2), estos varían entre 0 y 1; se muestra además la función seno obtenida a partir de esos restos (1 equivale a  $2\pi$ ):

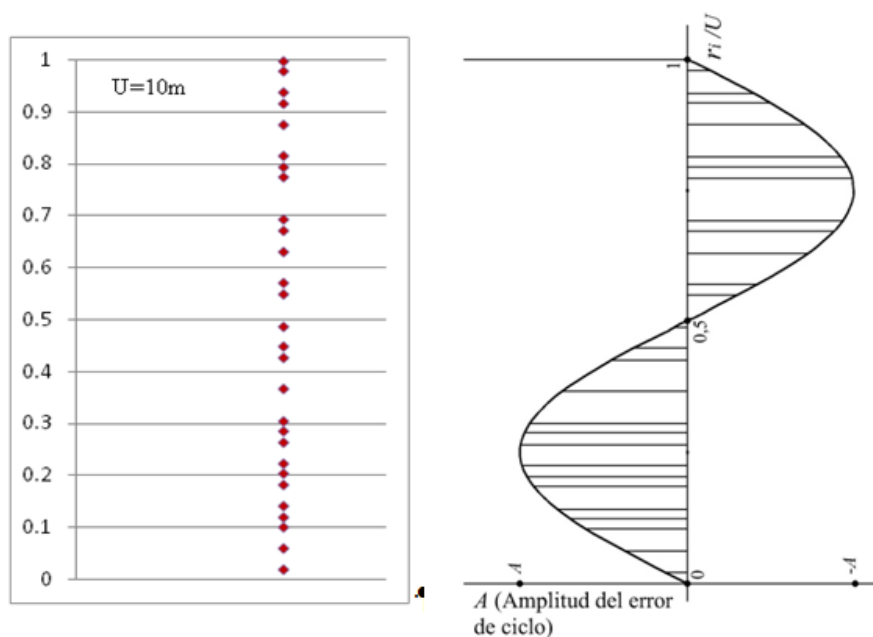


Figura 2

En el gráfico se aprecia cómo se distribuyen equitativamente los  $r_i/U$  dentro del intervalo  $[0; 1]$ . Lo que equivale a una distribución equitativa de los restos a lo largo de  $U = 10\text{m}$ . Pero no todos los distanciómetros tienen la misma Unidad de Medida  $U$ , lo más usual es  $10\text{m}$ , pero pueden encontrarse instrumentos con unidades de medida de  $2\text{m}$ ,  $5\text{m}$ ,  $7,5\text{m}$ ,  $15\text{m}$ ,  $20\text{m}$  y  $30,769\text{m}$ . Con lo cual, si bien **la base se diseña para un valor en particular, es necesario que se adapte a múltiples instrumentos con diferentes valores de Unidades de Medida  $U$** . Por ello fue que se planteó la metodología para analizar esta versatilidad de la base a partir de las gráficas de  $r_i/U$ . Si sobre un mismo gráfico se incluyen los  $r_i/U_j$  para instrumentos con diferentes valores  $U_j$  se obtiene una representación de la adaptabilidad mencionada, para un diseño de base en particular; como se verá a continuación.

## RESULTADOS

Se presentan los resultados de dos de las bases calculadas y su adaptabilidad a diversos valores de  $U$ . Como caso de estudio se toma una distancia inicial  $C_0$  de 500 m y dos unidades de medida  $U_A=7,50$  m y  $U_B=10$  m, para cinco pilares(Fig. 3 y 4).

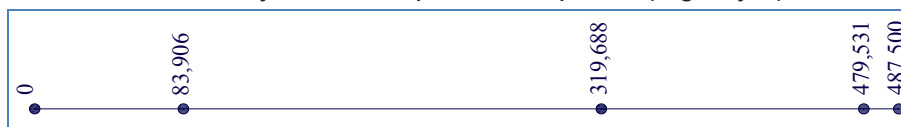


Figura3.

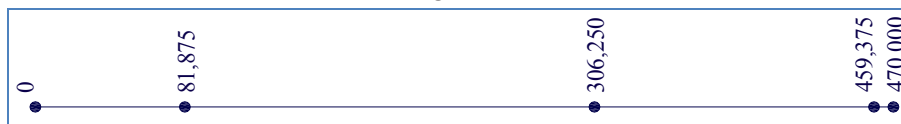


Figura4.

En los gráficos (Fig. 5 y 6) se visualiza como las bases diseñadas para valores  $U_A$  y  $U_B$  específicos se comportan con otros valores. En estos gráficos se volcaron, en el eje de las abscisas los valores de unidad de medida normalmente utilizados  $U_j$  (Incluido el valor de diseño), y en el eje de las ordenadas los cocientes  $r_{ij}/U_j$ . Donde  $r_{ij}$  es el resto obtenido al medir el segmento  $d_i$  usando una unidad de medida  $U_j$  (Instrumento con dicha unidad de medida). Cada resto  $r_{ij}$  toma valores entre 0 y  $U_j$ , por lo tanto  $r_{ij}/U_j$  varía entre 0 y 1,  $U_j$  toma los valores indicados en los gráficos. En cada base de cinco pilares podrán medirse 10 segmentos  $d_i$  de longitudes diferentes, que se distribuyen regularmente a lo largo de la longitud  $C$ .

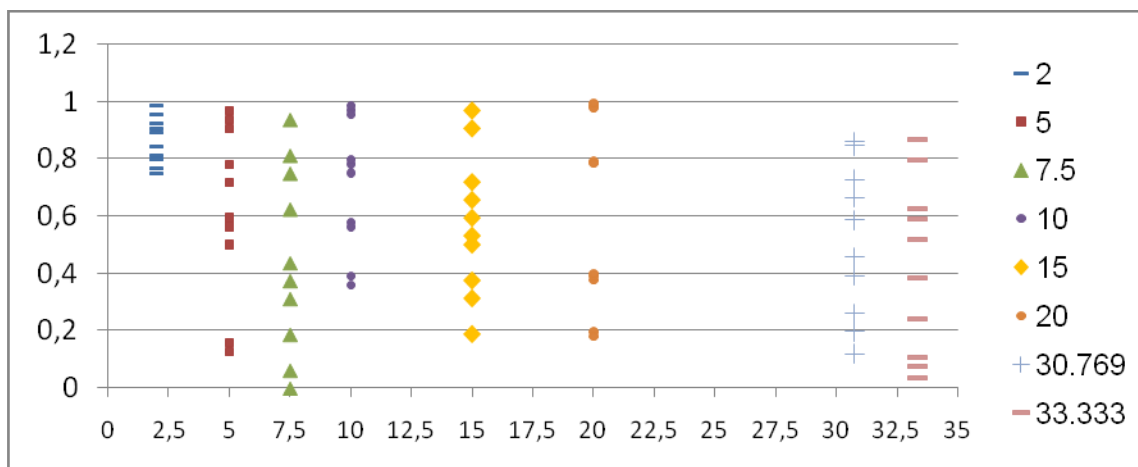


Figura5: Distribución de restos para base diseñada para  $U_A=7,50$  m

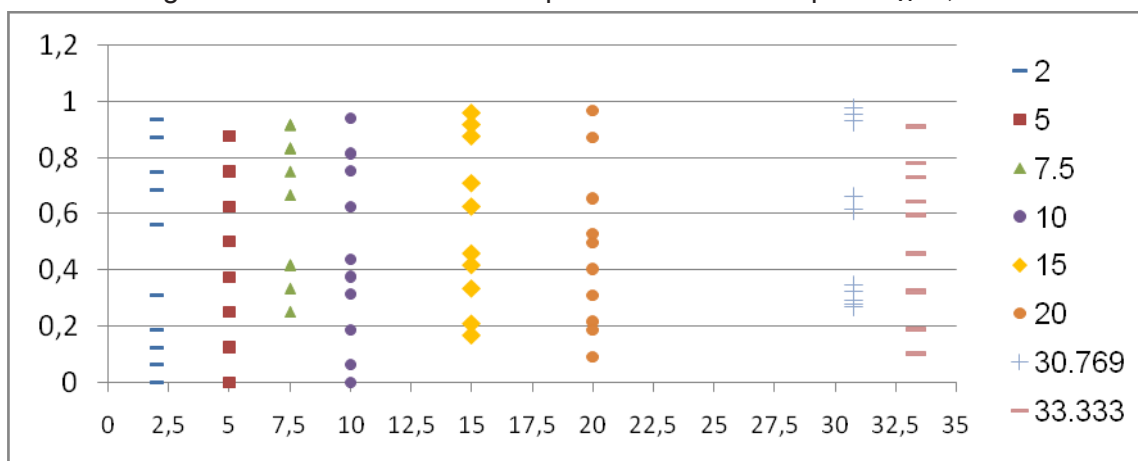


Figura 6: Distribución de restos para base diseñada para  $U_B=10$  m

En los gráficos anteriores se puede apreciar como en la base diseñada para  $U_B=10$  m los residuos se distribuyen de un modo más uniforme, en mayor cantidad de otras unidades de medida. Esto significa que la minimización o cálculo del error de ciclo en esta base se podrá realizar eficientemente, no solo para la unidad de diseño, sino para instrumentos con valores de  $U$  diferentes. Esto no se cumple para la base diseñada para  $U_A=7,50$  m, la cual permitiría el tratamiento eficiente del error de ciclo para el valor  $U$  de diseño y solo algunos pocos valores diferentes.

## CONCLUSIONES

- ❖ El análisis gráfico planteado, que permite visualizar la distribución de diferentes grupos de restos de medida para una determinada Base, demostró ser una herramienta expeditiva para este tipo de estudios. Posibilitando evaluar conjuntamente el comportamiento de instrumentos diversos en una misma base.
- ❖ El diseño para bases de calibración de Heerbrugg, comparado con otros modelos, presenta la mejor alternativa cuando se trata de determinar de modo independiente los errores sistemáticos en instrumental M.E.D. Permitiendo que a partir de un mismo programa de observaciones, puedan determinarse todos los parámetros de calibración, brindando la precisión requerida con el menor número de mediciones.
- ❖ Lo fundamental del método propuesto por este grupo de trabajo, de analizar la distribución de los  $ri/U_j$  a lo largo de la unidad de medida, es que permite establecer la funcionalidad de una base diseñada para un valor  $U$  al ser empleada con instrumentos de valor distintos. Permitiendo realizar el tratamiento del error de ciclo que sea requerido, y así garantizar la independencia en la determinación de los errores sistemáticos.
- ❖ Como parámetro de diseño, la unidad de medida de 10 metros es el valor que posibilita que una base sea utilizable por una mayor variedad de instrumentos M.E.D.

## REFERENCIAS

- J. M. Rüeger**, "Electronic Distance Measurement", 1996, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- M. Chueca Pazos, J. H. Boquera, L. B. Valero**, "Tratado de Topografía I - Teoría de Errores e Instrumentación", 1996, Paraninfo, Madrid.
- N.W.J. Hazelton**, "Instrument Calibration for the 21st Century", 2009, Paper presentado en MSPS (Minnesota Society of Professional Surveyors) 57th Annual Meeting.
- Teresa Fernández Pareja, José Manuel Quintero Echeverri**, " Proyecto de líneas base y diseño de un procedimiento de calibración de instrumentos geodésicos de medición electro-óptica de distancias en la Universidad del Quindío (Colombia) ", 2014, Revista Española de Metrología N° 7, Madrid.
- ISO 17.123-4**, Optics and optical instruments — Field procedures for testing geodetic and surveying instruments — Part 4: Electro-optical distance meters (EDM instruments).