



Diseño de Base de Calibración para instrumentos de medición electro-óptica de distancias.

J. Romano⁽¹⁾, P. Paús⁽²⁾, J. Bergamini⁽³⁾, R. Aldasoro⁽⁴⁾.

(1) Facultad de Ingeniería - UNLP, Profesor Adjunto, Ing. Agrimensor, Calle 1 y 47 - La Plata (B1900TAG) - Buenos Aires - Argentina -, Tel.: 0221-425-8911 (int.254), agrimromano@gmail.com.

(2) Facultad de Ingeniería - UNLP, JTP-Ing. en Electrónica, Calle 1 y 47 - La Plata (B1900TAG) - Buenos Aires - Argentina -, Tel.: 0221-425-8911 (int.254), pablo.paus@ing.unlp.edu.ar.

(3) Prof. en Física y Matemática. Laboratorio de Óptica - Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas - UNLP. Paseo del Bosque S/N, La Plata. CP (1900). Te. 0221-427-4914. jrbergamini@yahoo.com.

(4) Facultad de Ingeniería - UNLP, Profesor Adjunto, Calle 1 y 47- La Plata (B1900TAG) - Buenos Aires - Argentina -, Tel.: 0221-425-8911 (int.254), robertoaldasoro@gmail.com.

1- RESUMEN

Actualmente se encuentra ampliamente difundido el uso de instrumentos electro-ópticos para todo tipo de labores que requieran la medición de distancias. La importancia que cobran estas mediciones, hace necesario que los profesionales vinculados a su realización, deban dar certeza de las mismas.

Surge de ello la necesidad de contar con un laboratorio, que ante la demanda por parte de los usuarios directos de instrumental topogeodésico, principalmente profesionales de la Agrimensura, pueda verificar y/o calibrarlos, garantizando así la trazabilidad de las mediciones. Este tipo de laboratorio debe disponer esencialmente de una base de calibración para instrumental M.E.D. (Medición Electroóptica de Distancias)

En tal sentido, el objetivo de este trabajo, es presentar el diseño de una base de calibración. Esta base se conforma por un conjunto de pilares alineados, fijos en el terreno, y dispuestos de modo que las distancias entre ellos obedezcan a un patrón de diseño en particular. Este diseño particular se debe a que existe una gran variedad de Instrumentos, y la base debe servir para el mayor conjunto posible de ellos.

PALABRAS CLAVE: calibración; M.E.D.; error de ciclo; línea de base.

2- INTRODUCCIÓN

2.1- Problemática.

Las mediciones electro-ópticas de distancia han ganado relevancia en gran número de situaciones, vinculadas al sector productivo, industrial y agropecuario; en obras civiles e hidráulicas: trazado de rutas, construcción de diques, edificaciones o mediciones catastrales. La falta de exactitud de estas mediciones puede conllevar un costo económico significativo, que suele pasar desapercibido para el común de la gente.

Dado el alcance de este tipo de mediciones, los comitentes públicos o privados requieren la seguridad de que el trabajo que soliciten, sigue prácticas de medición adecuadas. Cabe mencionar que es cada vez más común el pedido de certificados de calibración de instrumentos topogeodésicos en licitaciones de obras públicas y privadas.

Un sistema confiable de mediciones, se obtiene dando trazabilidad a las medidas, a partir de



una cadena de comparaciones con patrones nacionales e internacionales. El INTI (*Instituto Nacional de Tecnología Industrial*) es quién garantiza la trazabilidad de las mediciones, por cumplir las funciones de Organismo Nacional de Metrología. En una instancia inferior se encuentran los laboratorios que realizan las calibraciones de los instrumentos utilizados por la industria y los profesionales, siendo pocos los que brindan este servicio en el país, cumpliendo con normas internacionales y demostrando su competencia técnica.

2.2- Propuesta.

El análisis de las normas y la bibliografía especializada sobre la temática, sugiere la necesidad del desarrollo e implementación de un laboratorio con personal calificado e infraestructura específica con los siguientes aspectos:

- Una base de calibración (o línea base). Ésta consiste en una alineación de pilares (5 a 8), fijos en el terreno, y dispuestos de modo que las distancias entre ellos obedezcan a un patrón de diseño particular.
- Un gabinete con instrumental óptico y electrónico para detectar y cuantificar la onda medidora. El instrumental estaría formado por osciloscopio, frecuencímetro y lector óptico, entre otros.
- El laboratorio además debe contar con personal calificado para la realización de los ensayos.
- Implementación de un sistema de calidad en el laboratorio.

2.3- Objetivos.

El objetivo principal de este trabajo es diseñar una base de calibración para instrumental M.E.D., que pueda ser utilizada para la verificación y /o calibración del mayor número posible de estos instrumentos. Dado que el método por el cual los instrumentos M.E.D. determinan las distancias, depende del valor de diseño adoptado por el fabricante para la Unidad de Medida (U), hace que exista una gran variedad de estos, siendo imposible generar una base de calibración para cada uno.

Otro objetivo es el desarrollo del procedimiento de cálculo para la validación de la metodología utilizada para el diseño de bases. Para esto se utilizaron conjuntos de datos representativos de las medidas que realizan estos instrumentos y se adoptaron diversos errores supuestos, tanto sistemáticos como aleatorios.

3- DESARROLLO.

La calibración consiste en establecer una relación entre las indicaciones obtenidas con el instrumento y el valor de un patrón, ambos con su incertidumbre asociadas, de manera tal que esta información pueda ser utilizada en una segunda etapa, para obtener el resultado de una medida, a partir de la indicación del instrumento.

Para poder realizar la calibración de los instrumentos M.E.D. es necesario conocer tres errores sistemáticos que presentan este tipo de instrumentos: el error de offset, el error de escala y el error de ciclo. Solamente conociendo las distancias entre los pilares de la base,



es posible determinar la totalidad de los mismos.

El diseño de una base de calibración M.E.D. queda caracterizada por tres factores a saber: la unidad de medida de los distanciómetros, la longitud total deseable de la base y el número de pilares a utilizar. A partir de esas variables se analizaron diferentes diseños de base de calibración. Se estudió la aptitud de esos diseños mediante análisis numéricos y gráficos generados en el desarrollo de este trabajo.

3.1- Errores Sistemáticos en la Medición con Instrumentos M.E.D.

La distancimetría electro-óptica se basa en la emisión de 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. Una característica específica de los instrumentos M.E.D. basados en el método de la diferencia de fase es la unidad de medida (U). Dicha unidad es la medida de referencia que emplea el instrumento al realizar una observación, y depende de la longitud de la onda medidora que emite. Los fabricantes de estos equipos emplean valores usuales de U de (Rüger, 1996): 2 m, 5 m, 10 m, 7,50 m, 15 m, 20 m, 30,769 m y 33,333 m, siendo U=10 m el más común.

Este tipo de instrumentos M.E.D. presentan los errores sistemáticos (Rüger, 1996) de: offset, escala y de ciclo.

- 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.
- 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 es el llamado “**Error de Ciclo o Periódico**”. 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, 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.



3.2- Adopción de un diseño de línea base de calibración para instrumentos M.E.D.

Sobre los pilares y mediante plataformas nivelantes "Tribrach" se colocan los Distanciómetros y sus respectivos reflectores a calibrar. Existen diversos diseños de Base, conocidos por el nombre de las ciudades donde fueron implantadas por primera vez: Aarau, Hobart y Heerbrugg (Rüger, 1996). Tras un análisis pormenorizado 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 offset 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 errores sistemáticos:** Los diseños de Heerbrugg y Hobart permiten determinar en un mismo programa de observaciones los tres errores. 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 establece un procedimiento completo para la verificación de instrumentos M.E.D. siguiendo este diseño de línea de base.

3.3 Cálculo de una Línea Base por el método de Heerbrugg.

El diseño de una base mediante el método de Heerbrugg, implica que deben ser adoptados tres parámetros:

- i. Longitud total de la base, que depende de la distancia disponible para su emplazamiento. Mínimamente 600 m (ISO 17.123-4),
- ii. el número de pilares que conformarán la base, entre 5 y 8 (Rüger, 1996), y
- iii. un valor U específico, con lo cual, en principio una base de calibración se diseña para un modelo de distanciómetro en particular.

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 (1):

$$A + p \cdot B + q \cdot D \tag{1}$$



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

U= Unidad de medida.

B: Múltiplo de A más cercano a B₀ (Tabla 1).

p, q: enteros positivos.

D: fracción de U (Tabla 1).

C₀= Longitud total deseada para la línea de base.

Tabla 1.- Cálculo de parámetros B₀ y D.

Número de pilares	B ₀	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	$\frac{1}{21} (C_0 - 7A - U)$	$\frac{1}{49} U$

Adoptado el método de Heerbrugg para el diseño de la base, se estudió como inciden en éste, 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. De ese análisis se pudo deducir:

- Si el valor U de diseño de la base, coincide con la del equipo a calibrar, pueden ser estimados los errores de offset y de ciclo.
- Si la base tiene una longitud mínima y está calibrada (Distancias entre pilares conocidas) se puede estimar además, el error de escala.
- Si la unidad de medida U de diseño de la base no coincide con la del instrumento, podría faltar información para estimar el error de ciclo (Hazelton, 2009).

El problema a resolver es que línea base en particular, que atienda los factores de diseño señalados precedentemente, se debe construir para que pueda ser utilizado en el mayor número posible de instrumentos.

3.4- Metodología.

Un dispositivo M.E.D., para medir una distancia determina un número entero de unidades de medida más una fracción de ésta, denominada resto (2). Los valores que toman los restos dependen tanto de las distancias observadas como del valor de la unidad de medida del instrumento U_j (3). Para estimar el error de ciclo de un instrumento, la totalidad de las distancias posibles a ser medidas en la base (Figura 1), deben permitir obtener una muestra de restos distribuidos uniformemente a lo largo de U_j . 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_j . Esta metodología permite analizar eficientemente la compatibilidad de una base diseñada para un valor de U específico, con equipos que funcionan con otros valores.

$$d_i = n \cdot U_j + r_{ij} \tag{2}$$

$$r_{ij} = d_i - n \cdot U_j \tag{3}$$



d_i : distancia i observada.
 U_j : unidad de medida de un instrumento j .
 n : número entero positivo.
 r_{ij} : resto obtenido al medir la distancia i con un instrumento j .

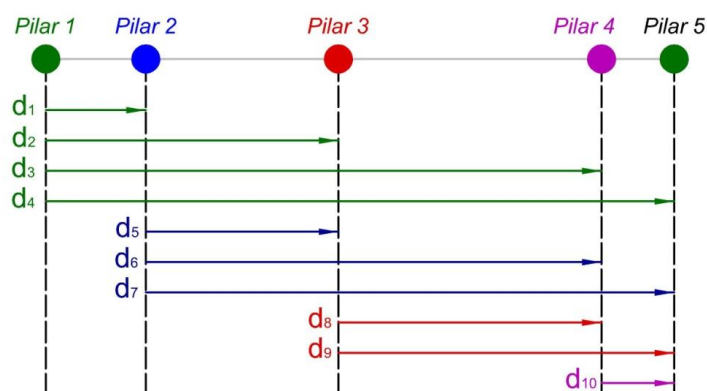


Figura 1.- d_1 a d_{10} son las distancias posibles a ser medidas en una base Heerbrugg de cinco pilares.

El error de ciclo p_i se modeló matemáticamente (4) mediante la función seno (Hazelton, 2009) de periodo igual a la unidad de medida U_j del instrumento y amplitud A (Figura 2).

$$p_i = A \cdot \sin\left(\frac{r_{ij} \cdot 2\pi}{U_j}\right) \quad (4)$$

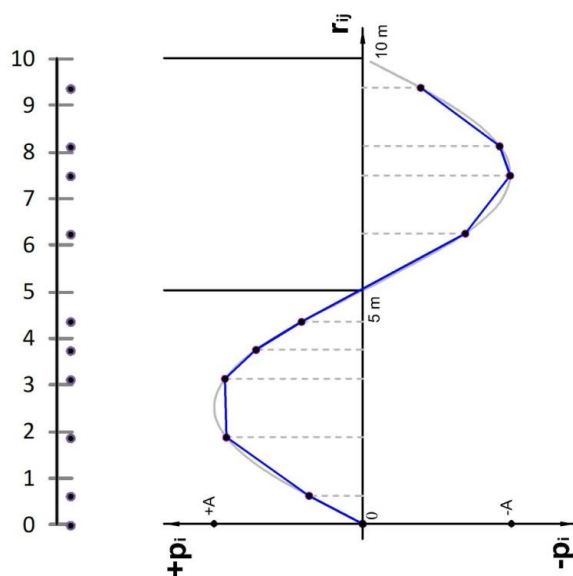


Figura 2.- Distribución óptima de restos r_{ij} a lo largo de U_j , para una base de calibración con cinco pilares.



Con el fin de analizar la distribución de los restos se proyectaron bases con diferentes valores U de diseño, longitudes deseables C_0 y números de pilares.

3.5- Resultados y Análisis.

Se presentan los resultados de dos de las bases calculadas. Como caso de estudio, cada base se diseñó con 5 pilares, distancias iniciales C_0 de 600 m y unidades de medida: $U_A=7,50$ m para la primera (Figura 3a) y $U_B=10$ m para la segunda (Figura 3b). En cada una de estas bases podrán medirse diez segmentos de longitud d_i .



Figura 3a.- $U_A=7,50$ m y $C_0=600$ m.



Figura 3b.- $U_B=10$ m y $C_0=600$ m.

En los gráficos (Figuras 4a y 4b) se visualiza como estas bases diseñadas para $U_A=7,50$ m y $U_B=10$ m se comportan con los valores usuales U_j : 2 m, 5 m, 7,50 m, 10 m, 15 m, 20 m, 30,769 m y 33,333 m. Esos gráficos representan, en el eje de las abscisas los valores de unidad de medida usuales 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 con un instrumento que posee unidad de medida U_j . Un resto r_{ij} puede tomar valores dentro del intervalo $[0; U_j]$, por lo tanto los cocientes r_{ij}/U_j pertenecen al intervalo $[0; 1]$.

La distribución más uniforme de restos r_{ij} se logra para el valor U_j coincidente con el valor U de diseño, para valores U_j diferentes esta distribución varía, siendo más o menos uniforme en cada caso.

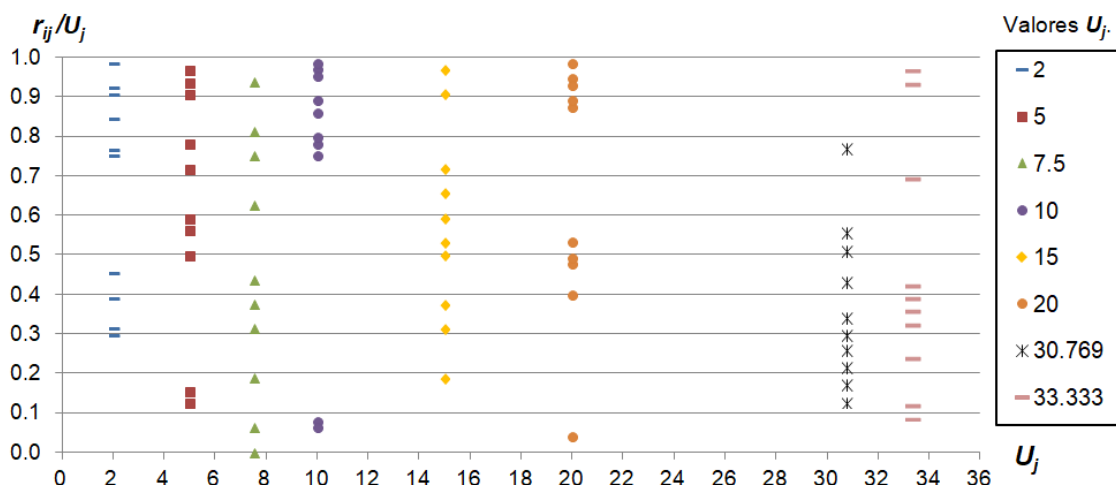


Figura 4a.- Gráfico de valores r_{ij}/U_j para $U_A=7,50$ m.

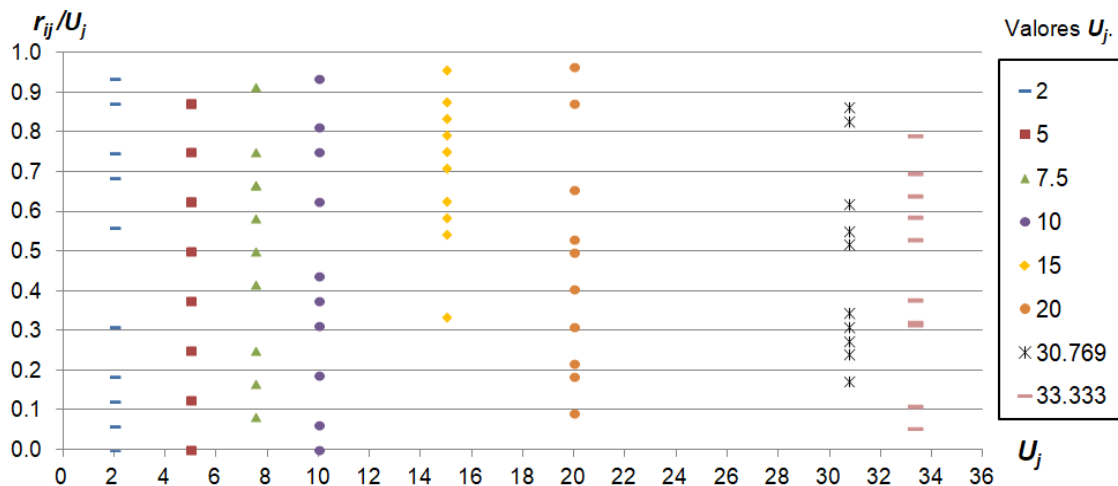


Figura 4b.- Gráfico de valores r_{ij}/U_j para $U_B = 10,00$ m.

En el gráfico de la figura 4a se visualiza como en una base diseñada con $U=7,50$ m se obtienen distribuciones uniformes entre 0 y 1 para los r_{ij}/U_j cuando el valor U_j del M.E.D. es: 7,50 m y 15 m. En el gráfico de la figura 4b, base diseñada con $U=10$ m, se visualiza como los valores r_{ij}/U_j se distribuyen uniformemente entre 0 y 1 en los casos en que el valor U_j del M.E.D. es: 2 m, 5 m, 7,50 m, 10 m y 20 m.

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.

3.6- Validación del método de cálculo de los errores.

Se propone un método de cálculo de los errores sistemáticos a partir de las observaciones posibles en una base. El mismo consiste en la estimación de los errores sistemáticos y sus desviaciones estándar a partir de asumir valores típicos (Hazelton, 2009) de los mismos. Como caso particular, a todas las distancias correspondientes a la base calculada para $C_0 = 600$ m, 5 pilares y $U_B = 10$ m (Figura 3b) se les suman errores sistemáticos supuestos de: offset (C), escala (E) y de ciclo (p_i). Además se considera una variable aleatoria e_{Di} que representa el residuo de cada medición. Ver Tabla 2.

Cada e_{Di} se obtiene a partir del generador de números aleatorios y de la función DIST.NORM.INV con media aritmética cero y varianza σ_{di}^2 (OpenOffice 4.1.3). El valor para σ_{di} se toma de la hoja de datos de un instrumento y es utilizado por el fabricante para expresar la precisión en la medición de distancias.

Las mediciones supuestas se obtienen a partir de la ecuación (5):

$$d_i = D_i + \frac{D_i E}{1 \times 10^6} + C + p_i + e_{Di} \quad (5)$$

Donde:

D_i : Distancia verdadera (Obtenida directamente del diseño de la base).

d_i : Distancia observada (Calculada a partir de D_i y los errores supuestos).

Considerando la norma ISO 17.123-4 se asigna el mismo peso a todas las observaciones.



Se obtiene un sistema de diez ecuaciones (10 d_i observadas) con tres incógnitas representado con la notación matricial (6) (Ghilani and Wolf, 2006):

$$A X = L + v \tag{6}$$

A: Matriz de coeficientes (10 x 3).

X: Matriz de incógnitas (3 x 1).

L: Matriz de observaciones (10 x 1).

v: Matriz de residuos (10 x 1).

Este sistema de ecuaciones es ajustado por el método de los mínimos cuadrados (7) (Ghilani and Wolf, 2006):

$$X = (A^T A)^{-1} A^T L \tag{7}$$

Tras este ajuste, los errores sistemáticos aplicados a las observaciones se recuperan junto a sus correspondientes desviaciones estándar. C_R , E_R y A_R son los errores obtenidos como resultados. El valor s corresponde a la desviación estándar de referencia para el ajuste global (Ghilani and Wolf, 2006).

En este caso el valor de E_R es influenciado significativamente por su desviación estándar: $1,000004 \pm 0,000003$. En otras bases se verificó como esta desviación estándar reduce su influencia sobre E_R para distancias mayores a 1.500 m.

Tabla 2. - Cálculo de los errores.

D_i [m]	Errores supuestos		d_i [m]	N° de pilares	5
101,875			101,909	Observaciones	10
386,250			386,278	Incógnitas	3
579,375	Sistemáticos [m].		579,403	Grados de Libertad	7
590,000	$C=$	0,030 m	590,033	Resultados	
284,375	$E=$	5 ppm . D	284,407	$s=$	$\pm 0,0011$ m
477,500	$A=$	0,005 m	477,527	Errores calculados	
488,125	Precisión de cada medición		488,151	Error [m]	σ [m]
193,125			$C_R=$	0,030 m	$\pm 0,001$ m
203,750	$\sigma_{d_i}=$	$\pm 0,003$ m	203,783	$E_R=$	4 ppm . D
10,625			$A_R=$	0,0046 m	$\pm 7,1E-0,4$



4- CONCLUSIONES.

En el país existe la necesidad de desarrollar la capacidad técnica para brindar servicios de calibración y/o verificación de instrumentos topogeodésicos, cumpliendo con normas internacionales.

Para realizar la calibración y/o verificación de instrumentos M.E.D. se requiere de una base de calibración. Su construcción es costosa y su naturaleza fija no permite que pueda ser reconfigurada, por este motivo es de fundamental importancia contar con un diseño adecuado, que sirva para el mayor número posible de instrumentos.

Como resultado del trabajo realizado, es posible concluir:

- 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.
- Las gráficas de r_{ij}/U_j para diferentes valores de U_j , permiten obtener una representación de la adaptabilidad de un diseño de base en particular a distintos instrumentos. Esto posibilita una rápida visualización del comportamiento de una base para múltiples instrumentos en simultáneo.
- Después de analizar Bases Heerbrugg con diversos U_j , C_0 y número de pilares, se concluye el valor de 10 m tomado como valor U de diseño, es el valor que permite que una base sea utilizable por una mayor variedad de instrumentos M.E.D.
- El análisis de la base mediante el cálculo con errores supuestos, resultó de utilidad a la hora de probar el método de cálculo de los errores sistemáticos a partir de las observaciones teóricas.

5- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

Rüeger, J. (1996). "Electronic Distance Measurement". Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

ISO 17.123-4, Optics and optical instruments — Field procedures for testing geodetic and surveying instruments — Part 4: Electro-optical distance meters (EDM instruments).

Hazelton, N. (2009). "Instrument Calibration for the 21st Century". Paper for the MSPS 57th Annual Meeting.

Ghilani, C. and P. Wolf. (2006). "Adjustment Computations: Spatial Data Analysis". Fourth Edition. John Wiley & Sons, INC.