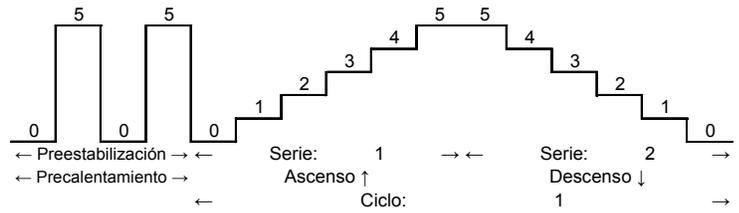


CALIBRACIONES POR MÉTODO DE TRANSFERENCIA

Los metrologos técnico-industriales estamos relacionados con la calibración por el método de comparación directa, de un instrumento o medida materializada con un patrón de referencia.



Existen otros métodos de calibración no tan conocidos o utilizados a nivel técnico-industrial, tal como el método de calibración por transferencia, en el que un instrumento o medida materializada es comparado con otro instrumento o medida materializada pero no de forma directa, sino que a través de un sistema o dispositivo comparador o de transferencia.



En esta edición de *La Guía MetAs*, se evalúa la aplicación del método de calibración por transferencia con respecto al método de comparación directa considerando los casos sin deriva y con deriva a corto plazo, así como la validación de un método de calibración con respecto al otro, mediante la evaluación de exactitud del método, determinado: la veracidad (sesgo, error sistemático) y la repetibilidad (precisión).

Se comparan y evalúan las diferencias y robustez de cada método con respecto a:

- la secuencia de toma de datos y con respecto a
- cálculo del error de ajuste y repetibilidad.

Somos su Relevo a la Calidad

La Guía MetAs, es el boletín periódico de MetAs & Metrologos Asociados.

En *La Guía MetAs* se presentan noticias de la metrología, artículos e información técnica seleccionada por los colaboradores de MetAs & Metrologos Asociados, que deseamos compartir con nuestros colegas, usuarios, clientes, amigos y con todos aquellos relacionados con la metrología técnica e industrial.

Calle: Jalisco # 313. Colonia: Centro
49 000, Cd. Guzmán, Zapotlán El Grande, Jalisco, México
Teléfono & Fax: 01 (341) 4 13 61 23 & 4 14 69 12 con tres líneas
E-mail: laguiametas@metas.com.mx. Web: www.metas.com.mx

Servicios Metroológicos:

Laboratorio de Calibración:

Presión, Alto Vacío, Temperatura, Humedad, Eléctrica, Vibraciones, Masa, Densidad y Volumen

Ingeniería:

Selección de Equipos, Desarrollo de Sistemas de Medición y Software, Reparación y Mantenimiento

Gestión Metroológica:

Subcontratación de Servicios, Outsourcing, Selección de Proveedores, Confirmación Metroológica

Consultoría:

Capacitación, Entrenamiento, Asesoría, Auditorías, Ensayos de Aptitud, Sistemas de Calidad

MÉTODO DE CALIBRACIÓN POR TRANSFERENCIA, VALIDACIÓN E INCERTIDUMBRE

Víctor Aranda, Norma Velasco, Gerardo Aranda, Silvia Medrano y Noel Gutiérrez
MetAs & Metrólogos Asociados
Calle: Jalisco # 313, Colonia: Centro, 49 000, Cd. Guzmán, Jalisco, México
(341) 413 6123 & 413 1691 multilínea. www.metas.com.mx

Resumen: Los metrologos técnico-industriales están relacionados con la calibración por el método de comparación directa, de un instrumento o medida materializada con un patrón de referencia. Existen otros métodos de calibración no tan conocidos o utilizados a nivel técnico-industrial, tal como el método de calibración por transferencia, en el que un instrumento o medida materializada es comparado con otro instrumento o medida materializada pero no de forma directa, sino que a través de un sistema o dispositivo comparador o de transferencia. Se evalúa la aplicación del método de calibración por transferencia con respecto al método de comparación directa considerando los casos sin deriva y con deriva a corto plazo, así como la validación de un método de calibración con respecto al otro, mediante la evaluación de exactitud del método [1], determinado: la veracidad (sesgo, error sistemático) y la repetibilidad (precisión). Se comparan y evalúan las diferencias y robustez de cada método con respecto a la secuencia de toma de datos y con respecto al cálculo del error de ajuste (de un instrumento de medición) (VIM 5.25) [2] y repetibilidad.

1. INTRODUCCIÓN

Los métodos de calibración se basan principalmente en: a) los métodos de medición [2], del instrumento o medida materializada y del patrón de referencia, b) en el tipo de secuencia utilizada en la toma de datos, y c) en la forma en que se calcula el error. En los capítulos siguientes se describen los 3 elementos mencionados.

Estos métodos se ejemplifican: a) en el contexto de la termometría donde el método de calibración por transferencia con compensación de deriva es relativamente conocido para corregir la deriva e inestabilidad a corto plazo de los sistemas termales de calibración como son baños y hornos [3] [4] [5]; así como; b) un ejemplo de calibración de metrología eléctrica donde se encuentra su beneficio al compensar la deriva a corto de plazo de patrones de transferencia utilizados en la calibración de instrumentos de medición de alta exactitud [6], y c) un ejemplo de calibración de metrología de presión y alto vacío donde es común encontrar derivas de presión por faltas de hermeticidad del sistema presurizado.

2. CALIBRACIÓN POR COMPARACIÓN DIRECTA

El método de medición directa figura 1 a), es la base del método de calibración por comparación directa figura 1 b), en este método de calibración, se comparan directamente e instantáneamente los valores proporcionados por el instrumento de medición o medida materializada sujeto a calibración, con los valores proporcionados por un patrón, ejemplos: a) calibración de un manómetro

ordinario secundario con un calibrador de presión, que mide y genera un estímulo de presión, b) calibración de una balanza digital de masas con un marco de pesas patrón, c) calibración de un termómetro en un baño líquido u horno de pozo seco con indicación digital, d) calibración de un multímetro digital de 4½ dígitos (19 999 cuentas) con un calibrador multifunciones eléctricas.



Fig. 1 Método de comparación directa, a) medición, b) calibración.

El método de calibración por comparación directa, y en general los diferentes métodos de calibración, incluyen las siguientes pruebas al equipo: a) alcance de medición (límite inferior y límite superior), b) prueba de exactitud, c) prueba de repetibilidad, d) prueba de resolución, e) prueba de sensibilidad, f) prueba de movilidad. Dependiendo del equipo sujeto a calibración, adicionalmente pueden o deben realizarse las siguientes: g) linealidad, h) prueba de histéresis, i) estabilidad de cero, j) reproducibilidad (ej. Conexiones, montaje), k) límites de detección y de cuantificación. El método de comparación directa requiere una condición importante, el sistema de calibración debe contar con un mensurando estable y sin deriva (el VIM [2] en el capítulo 5 indica que “mensurando se designa a la magnitud aplicada a un instrumento de medición”), como se demostrará mas adelante.

3. CALIBRACIÓN POR TRANSFERENCIA

El método de calibración por transferencia es la base de otros métodos de calibración [6], entre ellos están: a) diferencial, relación, y sustitución [2].

En el método de calibración por transferencia se comparan los valores proporcionados por el instrumento de medición o medida materializada sujeto a calibración, con los valores proporcionados por un patrón (valor de referencia), a través de un patrón de transferencia, incluso en diferente tiempo y lugar, ejemplos: a) comparación de puntos fijos con otros patrones primarios mediante patrones de transferencia de alta exactitud, b) calibración de generadores de magnitudes eléctricas con referencias fijas mediante multímetros de alta exactitud, c) calibración de multímetros de alta exactitud con multímetros de alta exactitud a través de generadores de transferencia.

El método de calibración por transferencia incluye las mismas pruebas que los otros métodos de calibración, dado que las pruebas están destinadas a determinar las diferentes características metrológicas del instrumento de medición o medida materializada sujeto a calibración. La ventaja de este método es que no requiere forzosamente estabilidad en el sistema o mensurando, dado que con la secuencia de toma de datos y el cálculo de los errores se puede eliminar la deriva a corto plazo, la cual es una componente inevitable cuando las mediciones no se realizan al mismo tiempo o en forma instantánea.

El método de medición por sustitución figura 2 a), utiliza un equipo auxiliar, llamado comparador o de transferencia, con el cual se mide inicialmente la muestra (mensurando) y luego un valor de referencia. Este método también es conocido como método de medición por transferencia.

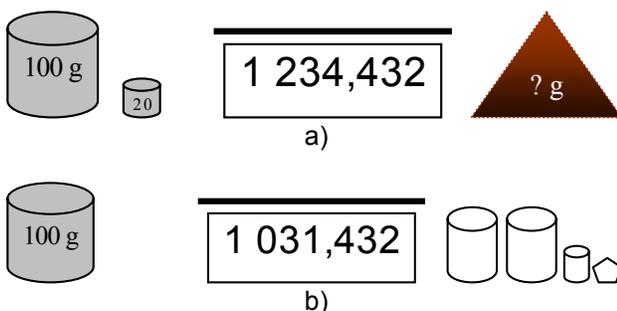


Fig. 2 Método de sustitución (transferencia):
a) medición y b) calibración.

El método de calibración por sustitución figura 2b), utiliza un equipo auxiliar (comparador), con el que se mide inicialmente al patrón y luego al equipo (medida materializada) sujeto a calibración, ejemplos: a) calibración de masas por sustitución simple (ABA), b) calibración de masas por sustitución doble (ABBA), c) sustituciones sucesivas para la calibración de básculas de alto alcance (> 5 t).

4. SECUENCIAS DE MEDICIÓN EN PROCESOS DE CALIBRACIÓN

En la figura 3 se muestran las 3 secuencias de medición más comúnmente utilizadas en los métodos de calibración:

- medición por series, esta secuencia se utiliza por comparación directa, no considera la prueba de histéresis, es necesario que las series sean registradas en forma continua pudiendo ser el sentido en ascenso o descenso.
- medición por ciclos, esta secuencia se utiliza por comparación directa, considera la prueba de histéresis, es necesario que los ciclos sean registrados en forma continua alternado el sentido en ascenso y descenso.
- medición por puntos, esta secuencia se utiliza en comparación por transferencia y también directa, no considera la prueba de histéresis, pero se puede evaluar la estabilidad del cero, los puntos de medición pueden ser registrados en forma continua o discontinua pudiendo ser en orden consecutivo o no consecutivo.

5. DERIVA A CORTO PLAZO Y ERROR EN PROCESOS DE CALIBRACIÓN

5.1. Casos de deriva a corto plazo

La deriva es una característica metrológica normalmente indeseable de un sistema, equipo, instrumento de medición o medida materializada, que siempre esta presente en mayor o menor medida en los procesos de medición y calibración, pero que no necesariamente es considerada, ejemplos son la estabilidad dinámica debida a la sintonización de los controladores, deriva térmica, autocalentamiento, fugas, desgaste, etc. En las figuras 4 y 5 se muestra una representación de la estabilidad dinámica y deriva a corto plazo.

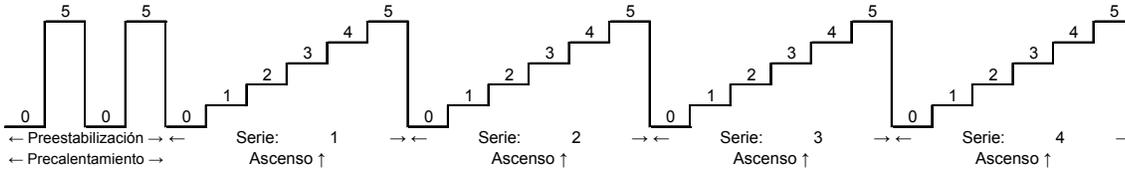
La estabilidad dinámica y deriva a corto plazo pueden y son aprovechadas en algunas magnitudes como pruebas de movilidad o de sensibilidad en la calibración de instrumentos de medición.

Secuencia de puntos de calibración y toma de datos, para diferentes métodos de calibración

Notación: 0 Punto mínimo o cero 1 Punto 10 % del alcance 2-3-4 Puntos distribuidos en el alcance 5 Punto máximo

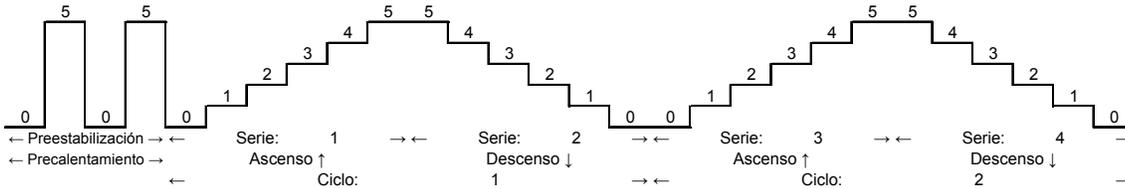
SECUENCIA 1: Medición por SERIES

Método de comparación directa, sin prueba de histéresis
Series continuas, ascensos ó descensos



SECUENCIA 2: Medición por CICLOS

Método de comparación directa, con prueba de histéresis
Ciclos continuos, ascenso y descenso



SECUENCIA 3: Medición por PUNTOS

Método de comparación directa y transferencia, con prueba de estabilidad de cero
Puntos continuos o discontinuos, ascenso o descenso, consecutivos o no consecutivos

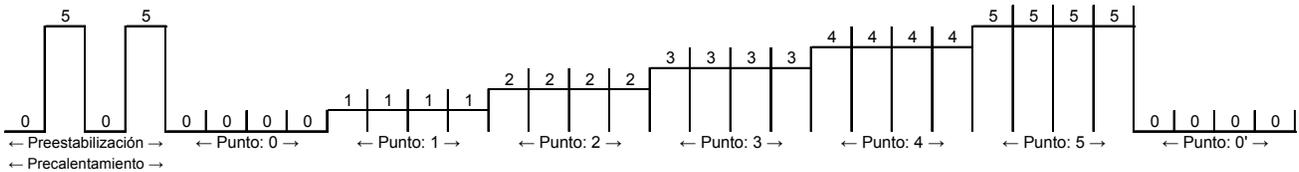


Fig. 3 Secuencias de medición en procesos de calibración.

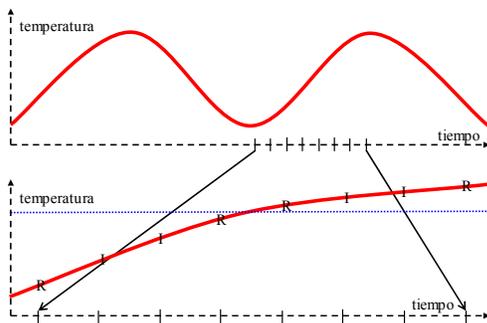


Fig. 4 Secuencia de mediciones en temperatura, sistema termal con estabilidad dinámica.

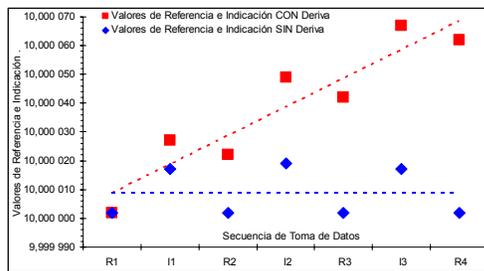


Fig. 5 Mediciones con deriva y sin deriva.

5.2. Cálculo del error de acuerdo con el método de calibración

El error (E_i) se calcula de acuerdo con el VIM (3.10, 3.14 y 5.25) [2] con la ecuación 1, esta ecuación implica que se mantengan las mismas condiciones de repetibilidad tanto en el instrumento (I_i) como en la referencia (R_i), condición esencial del método de comparación directa.

$$E_i = I_i - R_i \quad (1)$$

Cuando no se mantienen las condiciones de repetibilidad, caso al presentarse deriva a corto plazo o se provoca o simula la deriva como prueba de sensibilidad o movilidad, es necesario calcular el error de acuerdo a lo mostrado en la tabla 1, para los métodos de transferencia simple y transferencia con deriva, en los cuales el error de indicación (VIM 5.20) [2] del instrumento o medida materializada se calcula con respecto a valores de referencia que no se midieron bajo las mismas condiciones de repetibilidad (ej. diferente tiempo) mediante aproximación lineal por tramos ó línea quebrada [7].

Tiempo	Referencia	Indicación	Errores de Indicación	Errores de Indicación		Errores de Indicación	
			Comparación Directa	Transferencia Simple (sistema estable) (pivote)	Transferencia con Deriva (sistema con deriva) (triángulo)		
0	R1 (inicial)		E1 = (I1 - R1)	E1 = (I1 - R1)	E1 = I1 - 1/2(R1+R2)	E2 = 1/2(I1+I2) - R2	E3 = I2 - 1/2(R2+R3)
1		I1					
2	R2		E2 = (I2 - R2)	E3 = (I2 - R2)	E4 = (I2 - R3)	E4 = 1/2(I2+I3) - R3	E5 = I3 - 1/2(R3+R4)
3		I2					
4	R3		E3 = (I3 - R3)	E5 = (I3 - R3)	E6 = (I3 - R4)		
5		I3					
6	R4 (final)						

Tabla 1 Cálculo de los errores de indicación para diferentes métodos de calibración.

Método	Sistema Estable en el Tiempo							Validación Método	
	Referencia	Indicación	Referencia	Indicación	Referencia	Indicación	Referencia	Error Sistemático	Error Aleatorio
Sin Deriva (D)	R1 (inicial)	I1	R2	I2	R3	Ij	Rj+1 (final)	Veracidad	Repetibilidad
	10,000 002	10,000 017	10,000 002	10,000 019	10,000 002	10,000 017	10,000 002	E	r
COMPARACIÓN DIRECTA		E1	E2	E3				Promedio (3-Ei)	2 Desv.Est. (3-Ei)
		0,000 015	0,000 017	0,000 015				0,000 016	±0,000 002 3
TRANSFERENCIA SIMPLE		E1	E2	E3	E4	E5	E6	Promedio (6-Ei)	2 Desv.Est. (6-Ei)
		0,000 015	0,000 015	0,000 017	0,000 017	0,000 015	0,000 015	0,000 016	±0,000 002 1

Método	Sistema con Deriva a Corto Plazo							Validación Método	
	Referencia	Indicación	Referencia	Indicación	Referencia	Indicación	Referencia	Error Sistemático	Error Aleatorio
Con Deriva (D)	0	1	2	3	4	5	6		
	10,000 002	10,000 027	10,000 022	10,000 049	10,000 042	10,000 067	10,000 062		
COMPARACIÓN DIRECTA		E1	E2	E3				Promedio (3-Ei)	2 Desv.Est. (3-Ei)
		0,000 025	0,000 027	0,000 025				0,000 026	±0,000 002 3
TRANSFERENCIA SIMPLE		E1	E2	E3	E4	E5	E6	Promedio (6-Ei)	2 Desv.Est. (6-Ei)
		0,000 025	0,000 005	0,000 027	0,000 007	0,000 025	0,000 005	0,000 016	±0,000 022 0
TRANSFERENCIA CON DERIVA		E1	E2	E3	E4	E5		Promedio (5-Ei)	2 Desv.Est. (5-Ei)
		0,000 015	0,000 016	0,000 017	0,000 016	0,000 015		0,000 016	±0,000 001 7

Tabla 2 Resultados de la validación de los métodos.

6. VALIDACIÓN DEL MÉTODO [8]

Los métodos de comparación directa y comparación por transferencia, han sido validados tanto para el caso de sistema estable o sin deriva a corto plazo, como en el caso de deriva a corto plazo, determinado para cada uno de ellos tanto la componente sistemática como la aleatoria. La componente sistemática se evalúa en forma de veracidad que da lugar al error de ajuste de las mediciones y la componente aleatoria se evalúa en forma de repetibilidad, la cual es la principal contribución del método en la incertidumbre. Los resultados se muestran en la tabla 2 y la figura 6.

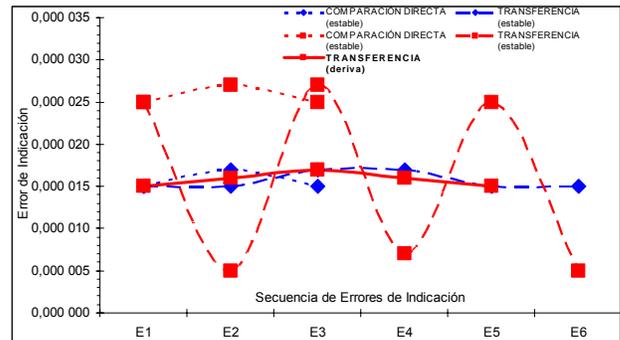


Fig. 6 Errores en los diferentes métodos.

Método	Sistema Estable		Sistema con Deriva		
	Comparación Directa	Transferencia Simple	Comparación Directa	Transferencia Simple	Transferencia Deriva
Simplicidad (Toma de Datos)	Excelente	Bueno	Excelente	Bueno	Regular
Compensa Deriva a Corto Plazo			Malo	Malo	Excelente
Veracidad (Error Sistemático)	Excelente	Excelente	Malo	Excelente	Excelente
Repetibilidad (Error Aleatorio)	Regular	Excelente	Regular	Malo	Bueno
Tamaño de la Muestra (Grados de Libertad)	Regular	Excelente	Regular	Excelente	Excelente

Claves

- E Error Sistemático
- r Repetibilidad
- D Deriva
- N Parejas de Datos
- N/A No aplica
- NO No incluye
- SI Si incluye

Tabla 3 Calificación de los métodos.

7. EJEMPLOS DE CALIBRACIÓN

Las ventajas del método de calibración por transferencia, muestran sus beneficios al realizar calibraciones en donde se presenta estabilidad dinámica y deriva a corto plazo, o cuando se provoca una deriva como prueba de movilidad, actualmente hemos aplicado este método en los casos indicados a continuación, pudiéndose aplicar a otros casos como son; la calibración de flujómetros en líneas de proceso, termómetros e higrómetros integrados en cámaras climáticas.

7.1. Ejemplo de calibración en temperatura

Arreglo para la calibración de un termómetro de resistencia (Pt-100) por CVD con un termómetro patrón de resistencia de platino, figura 7.



Fig. 7 Calibración de un termómetro de resistencia.

7.2. Ejemplo de calibración en eléctrica

Arreglo para la calibración de un multímetro de 7½ dígitos con un multímetro de 8½ dígitos, figura 8.



Fig. 8 Calibración de un multímetro de 7½ dígitos.

7.3. Ejemplo de calibración en presión

Arreglo para la calibración de un barómetro digital con un barómetro patrón digital, figura 9.



Fig. 9 Calibración de un barómetro digital.

8. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Del presente ejercicio de validación de métodos de calibración se concluye con una calificación de los métodos evaluados, ver resultados en la Tabla 3 y las siguientes observaciones:

- la presunta existencia de deriva es una componente fundamental para establecer la secuencia de toma de datos y cálculo de errores,
- sin importar la magnitud o el mensurando de interés los diferentes métodos de calibración requieren conjuntar las pruebas básicas de exactitud, repetibilidad, resolución y movilidad,
- el método de calibración por comparación directa no cuenta con la robustez para compensar deriva a corto plazo, lo cual se refleja en la veracidad del método por incremento de los errores sistemáticos ($E \rightarrow E+D$),
- el método de transferencia simple no cuenta con la robustez para compensar deriva, lo cual se refleja en la repetibilidad del método ($r \rightarrow \approx 2,2D$),
- el método de transferencia con compensación de deriva muestra su robustez al determinar la veracidad y repetibilidad, a expensas de un aumento de complejidad.
- La simulación de deriva pueda utilizarse en conjunto con el método de transferencia con deriva, como prueba de movilidad, en los casos donde normalmente la prueba de repetibilidad resulta con incertidumbre cero, o la resolución es la componente principal.

REFERENCIAS

- ISO 5725-1-2, Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results, Part 1 and Part 2, 1994-12-15.
- Pezet, F. y Mendoza, J., VIM - Vocabulario internacional de términos fundamentales y generales de metrología, CENAM, 1994.
- OIML P 16, Guide to practical temperature measurements, 1991-agosto.
- ASTM E 77, Standard test method for inspection and verification of thermometers, 1998, reapproved 2003.
- NIST/SEMATECH, e-Handbook of Statistical Methods, 2.3.4 catalog of calibration designs, <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/mpc/section3/mpc34.html>, 2001-05-22.
- FLUKE, Calibration: Philosophy in practice, second edition, Fluke Corporation, 1994.
- Smith, W. Allen, Análisis Numérico, sección 7.1, Prentice-Hall Hispanoamericana, 1988.
- ISO/IEC 17025, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories, 2005.