



PROPUESTA DE LINEAMIENTOS GENERALES Y PROCEDIMIENTO PARA LA:

DETERMINACIÓN DE LA MEJOR CAPACIDAD DE MEDICIÓN DE MÁQUINAS Y SISTEMAS DE CALIBRACIÓN DE FUERZA Y SU CLASIFICACIÓN PARA LABORATORIOS ACREDITADOS.

Daniel A. Ramírez Ahedo
Jorge C. Torres Guzmán

CENAM

ANTECEDENTES.

La realización de la magnitud de fuerza de los laboratorios acreditados es derivada de la trazabilidad hacia los patrones nacionales de esta magnitud y directamente mediante estos patrones hacia las unidades de base del SI. Desde hace ya algunos años, CENAM, a través de la División de Metrología de Fuerza y Presión, ha realizado una serie de comparaciones y asesorías técnicas para el Sistema Nacional de Calibraciones (SNC), con el objetivo de elevar el nivel de competitividad nacional e internacional acorde con los cambios y la modernización que actualmente existe en metrología en el ámbito mundial.

Las diferencias de los resultados de las calibraciones de los dispositivos de medición de fuerza obtenidos por los laboratorios acreditados deben estar dentro de los límites especificados de la acreditación de acuerdo a la mejor capacidad de medición del laboratorio. Esto permite establecer concordancia entre los diferentes laboratorios acreditados en los servicios de calibración que estos ofrecen.

El método propuesto en este documento para evaluar la capacidad técnica de un laboratorio es el de evaluación por comparación de su sistema de calibración contra un transductor de transferencia del CENAM previamente caracterizado. Esto permitirá que los efectos parásitos y otras fallas de los sistemas de medición sean evaluados y tomados en cuenta. En esta técnica, la alta resolución y la repetibilidad en corto tiempo de los transductores de fuerza son muy útiles debido al poco impacto que producen en la incertidumbre, sin embargo también otros efectos sistemáticos como el efecto de rotación, efecto de fluencia o “creep”, efecto de histéresis, son considerados de tal forma que no influyan en la comparación de resultados.

1. TIPOS DE SISTEMAS DE CALIBRACIÓN.

La mejor capacidad de medición esperada para sistemas de calibración de fuerza depende del tipo de máquina utilizada para la realización de esta magnitud. En la mayoría de los casos, los requerimientos de los laboratorios de calibración de fuerza deben de cumplir los requisitos indicados en la referencia [1]. La siguiente tabla muestra los valores típicos de clasificación de laboratorios acreditados para calibrar dispositivos de medición de fuerza.

Tipos de sistemas de calibración	Ejemplo de la mejor capacidad de medición (incertidumbre relativa de la fuerza de calibración)
M. Masas Suspendidas	0,005% a 0,01%
Máquinas hidráulicas	0,01% a 0,05%
Máquina comparadora con uno, tres o más transductores.	0,05% a 0,5%

Tabla 1: Intervalos de mediciones típicas en laboratorios acreditados.

Los valores de la tabla 1, se asumen suponiendo que el laboratorio disemina la cantidad vectorial de fuerza como la mejor capacidad de medición dado por el valor promedio de, al menos, tres mediciones obtenidas en diferentes posiciones angulares igualmente distribuidas alrededor del eje central de la máquina. Debido a esto, la diferencia entre los efectos de rotación de las máquinas patrón de CENAM y la máquina o sistema de medición bajo evaluación no se consideran en la evaluación de la incertidumbre de la comparación, ya que este valor, el laboratorio lo tomará en cuenta cuando realice la calibración de un equipo como evaluación de reproducibilidad. Si este valor es relativamente grande, esto deberá ser examinado por el laboratorio como una falta de alineación y/o nivelación en la máquina o en los elementos de apoyo.

En máquinas comparadoras es necesario, independientemente del plan a seguir para la comparación, que el(los) transductor(es) de referencia de esta máquina sea(n) calibrado(s) para después llevar a cabo la comparación.

2. LINEAMIENTOS PARA DETERMINAR LA MEJOR CAPACIDAD DE MEDICIÓN.

Para determinar la mejor capacidad de medición de un laboratorio, el CENAM inicialmente deberá seguir los siguientes lineamientos:

- a) Seleccionar los transductores de transferencia que cubran todo el alcance de medición en el cual el laboratorio de calibración se pretenda evaluar. Los transductores seleccionados deberán ser utilizados del 40% al 100% del alcance de medición. Por ejemplo, para una máquina que se desee evaluar dentro del intervalo de 10 kN a 100 kN, serán necesarios 3 transductores, uno de 20 kN (para 10 kN y 20 kN), otro de 50 kN (para 20 kN, 30 kN, 40kN y 50 kN) y un último de 100 kN (para 50kN, 60 kN, 80 kN y 100 kN). Esto es necesario para minimizar la influencia del transductor de transferencia sobre el sistema de medición.
- b) Determinar los valores de referencia en los transductores de fuerza, basándose en los lineamientos de caracterización – referencia [8] - según diagrama de toma de lecturas anexo A1.
- c) Las mediciones para la comparación deberán ser obtenidas en “n” posiciones rotacionales (al menos 3). También se debe repetir al menos una serie de lecturas en alguna de las posiciones para repetibilidad.
- d) Se determinará la desviación relativa del promedio de todas las mediciones para cada punto del alcance de medición.
- e) Calibrar el transductor antes y después de realizar la comparación en los valores de referencia.

3. EVALUACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE EXPANDIDA DE LOS VALORES DE REFERENCIA.

El presente documento se basó en la guía ISO-BIPM para “Expresión de la Incertidumbre en las

Mediciones” [2]. Para la evaluación de la incertidumbres de los valores de referencia, estos se determinarán de acuerdo a los siguientes pasos:

Paso 1: Determinar la incertidumbre expandida del patrón de referencia $U_{\text{patrón}}$ del patrón nacional de fuerza.

La incertidumbre relativa de los patrones de fuerza de CENAM se da en la tabla 2 para los diferentes alcances de medición.

Paso 2: Determinar la incertidumbre expandida del transductor de transferencia que es calibrado con los patrones nacionales.

Debe de considerarse la incertidumbre debida a la repetibilidad u_{Rep} como la desviación estándar de las mediciones en la misma posición de montaje. La desviación relativa debido a la deriva de la sensibilidad durante un periodo de hasta un mes es necesaria, por lo que la incertidumbre debido a esta variable de influencia se debe evaluar como la desviación estándar de las lecturas obtenidas durante este periodo de tiempo, obtenida bajo carga cero.

Tipos de sistemas de calibración en CENAM	Mejor capacidad de medición. k = 2
M. Masas Suspendidas	2E-05
Máquinas patrón de transferencia	2E-04

Tabla 2. Incertidumbre en las máquinas de calibración del CENAM

La incertidumbre combinada del patrón de transferencia se evalúa para un factor de cobertura $k = 2$ como:

$$u_{\text{Pat. Transf.}} = \sqrt{u_{\text{Deriva}}^2 + u_{\text{Repetibilidad}}^2}$$

$$U_{\text{Pat. Transf.}} = k \cdot u_{\text{Pat. Transf.}}$$

Paso 3: Cálculo de la incertidumbre expandida de los valores de referencia.

Los valores de referencia deben evaluarse considerando la incertidumbre del patrón utilizado.

$$U_{\text{V-Ref}} = \sqrt{U_{\text{Pat. Transf.}}^2 + U_{\text{Patrón}}^2}$$

4. CÁLCULO DE LA MEJOR CAPACIDAD DE MEDICIÓN DE MÁQUINAS DE CALIBRACIÓN DE FUERZA PARA LABORATORIOS ACREDITADOS.

Después de llevar a cabo la comparación, la mejor capacidad de medición, puede ser determinada de acuerdo a los siguientes pasos.

Paso 4: Determinación de la incertidumbre expandida $U_{M-Cal.}$ de la máquina de calibración.

Las magnitudes de influencia y la evaluación de sus incertidumbres son determinadas dependiendo de la varianzas de su distribución de probabilidad, como a continuación se muestra:

$u_{Desv-rel}$

Desviación relativa entre los valores de referencia y el promedio de los valores obtenidos en la fuerza de calibración. Para la evaluación de la incertidumbre, se asigna una distribución rectangular a la desviación relativa obtenida.

$u_{Rep-M-Cal.}$

Repetibilidad de la máquina de calibración o sistema de medición, de los valores sin cambio de posición.

La incertidumbre combinada y la incertidumbre expandida de la máquina o sistema de calibración se evalúan entonces mediante la siguiente expresión.

$$u_{M-Cal.} = \sqrt{u_{Desv.-rel.}^2 + u_{Rep.-Maq-Cal.}^2}$$

$$U_{M-Cal.} = k \cdot u_{M-Cal.}$$

Paso 5: Evaluación de la mejor capacidad de medición de la máquina o sistema de calibración.

La mejor capacidad de medición de una máquina de masas suspendidas se determina como:

$$U_{(mcm)} = \sqrt{U_{V-Ref.}^2 + U_{M-Cal.}^2}$$

Para un sistema de calibración con transductor, una incertidumbre adicional debe ser incluida, la incertidumbre del transductor de referencia de la máquina, así la incertidumbre de la mejor capacidad de medición será:

$$U_{(mcm)} = \sqrt{U_{V-Ref.}^2 + U_{M-Cal.}^2 + U_{Trans.-Maq.}^2}$$

5. EVALUACIÓN DE INCERTIDUMBRES DE UN TRANSDUCTOR EN LA CALIBRACIÓN.

Una vez que se ha determinado la mejor capacidad de medición de una máquina de calibración o de un sistema de calibración, la incertidumbre de la calibración de un dispositivo medidor de fuerza debe evaluarse mediante la siguiente expresión:

$$U_{Cal.} = \sqrt{U_{(mcm)}^2 + U_{Disp. x Cal.}^2}$$

La incertidumbre del dispositivo por calibrar se realizará dependiendo de la norma seleccionada, pero en general se recomienda considerar las siguientes componentes mostradas en la tabla 3, las cuales son obtenidas de mediciones repetidas evaluadas de diferente manera.

Componente de incertidumbre	Distribución de probabilidad	Varianza relativa Estimada
Error de cero	Rectangular	$u_{cero}^2 = E^2_{cero}/12$
Repetibilidad	Normal	$u_{Rep}^2 = S^2_{Rep}/n$
Reproducibilidad	Normal	$u_{Repro}^2 = S^2_{Repro}/n$
Residual de la ecuación ajuste	Normal	$u_{Ec. ajuste}^2 = S^2_{Resid.}$
Resolución	Rectangular	$u_R^2 = R^2/12$
Histéresis	Rectangular	$u_H^2 = H^2/12$

Tabla 3. Componentes de la incertidumbre en la calibración de un dispositivo medidor de fuerza.

La incertidumbre relativa del dispositivo por calibrar puede evaluarse por lo tanto de la siguiente forma:

$$U_{Disp. x Cal.} = k \cdot u_{Disp. x Cal.}$$

Donde la incertidumbre estándar del transductor por calibrar $u_{Disp. x Cal.}$ Puede obtenerse de la siguiente expresión [6],

$$u_{Disp. x cal} = \left(u_{Res}^2 + u_{Rep}^2 + u_{Repro}^2 + u_{Histéresis}^2 + \frac{u_{cero}^2 + u_{Ec. ajuste}^2}{12} \right)^{1/2}$$

6. EVALUACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE RELATIVA DE RESULTADOS DE CALIBRACIÓN DE ACUERDO A LA NORMA ISO-376. (SOLAMENTE PARA CENAM).

La evaluación de los resultados de la calibración, permitirá a los dispositivos de medición de fuerza ser clasificados en 4 diferentes clases de acuerdo a la norma ISO-376 [7]. La tabla 4 que se da a continuación, muestra los valores específicos de

los errores máximos tolerados para las diferentes clases de los transductores basados en la norma ISO 376 y la tabla 5 muestra las varianzas de esos errores permisibles.

Clase	Error relativo del instrumento bajo calibración %					*Incertidumbre U_{mcm} máquina o sistema %
	de reproducibilidad b	de repetibilidad b'	de residual t_c	de cero t_o	de Histeresis v	
00	0,05	0,025	0,025	0,012	0,07	$\pm 0,01$
0,5	0,10	0,050	0,050	0,025	0,15	$\pm 0,02$
1	0,20	0,100	0,100	0,050	0,30	$\pm 0,05$
2	0,40	0,200	0,200	0,100	0,50	$\pm 0,10$

^aLa incertidumbre de la calibración es la mejor capacidad de medición, obtenida mediante el procedimiento aquí descrito.

Tabla 4. Errores permisibles en la calibración de transductores.

Clase	Varianza relativa del instrumento bajo calibración para las diferentes componentes de error %					de Resolución
	de Reproducibilidad	de Repetibilidad.	de Residual	de Cero	de Histeresis	
00	3,1E-04	5,2E-05	2,6E-05	1,2E-05	4,1E-04	R ² /12
0,5	1,3E-03	2,1E-04	1,0E-04	5,2E-05	1,9E-03	R ² /12
1	5,0E-03	8,3E-04	4,2E-04	2,1E-04	7,5E-03	R ² /12
2	2,0E-02	3,3E-03	1,7E-03	8,3E-04	2,1E-02	R ² /12

Tabla 5. Varianza relativa obtenida para clasificación de un transductor sobre la base de los errores permisibles.

La incertidumbre del transductor calibrado, será entonces para una clase determinada la suma de las varianzas, incluyendo la mejor capacidad de medición de la máquina o sistema utilizado. Como ejemplo observe para la clase 00 la incertidumbre máxima de la calibración en la tabla 6.

Incertidumbre estándar relativa combinada $u_{trans \times Cal.}$	$\pm 0,030$
Incertidumbre expandida $U_{Trans. Cal.}$	$\pm 0,060$

Tabla 6. Máxima incertidumbre relativa del resultado de la calibración.

La tabla anterior muestra la posible incertidumbre máxima para las clases consideradas de ISO-376. Obviamente la mínima incertidumbre relativa de una menor clase no puede ser menor que la incertidumbre de la clase superior.

7. CONCLUSIONES.

Esta propuesta presenta los lineamientos que permitirán a los laboratorios determinar la mejor capacidad de medición de su laboratorio aplicable para la determinación de la incertidumbre de un sistema de medición, exclusivamente, para la calibración de dispositivos de medición de fuerza.

La determinación de la capacidad de medición no es excluyente ni determinante en el proceso de acreditamiento de los laboratorios, aunque sí puede ser utilizado como una herramienta determinante para demostrar la mejor capacidad de medición del laboratorio.

Estos lineamientos no aplican para ser utilizados en la determinación de la mejor capacidad de medición para la calibración de máquinas de ensaye u otro tipo de sistemas de medición de fuerza, para otros casos puede usarse como base o referencia y un estudio particular deberá hacerse.

8. REFERENCIAS.

- [1] Ramírez D., Soriano B., Esparza A., Torres J. C., Propuesta para “Criterios de Evaluación Técnica de laboratorios de Calibración Acreditados” Rev. 2.0. Agosto de 1999.
- [2] Guía para la Expresión de la Incertidumbre en las Mediciones. ISO/IEC/OIML/BIPM, publicación 1993.
- [3] Sawla A., Guidelines for the Determination of the Best Measurement Capability of Force Calibration Machines for Measurement Devices According To WECC-Doc.19. PTB. Marzo 1994.
- [4] Li Qing Zhong, Force Measurements, Notas del Curso del National Institute of Metrology China. Septiembre de 1998.
- [5] Ramírez D., Torres J. C., Lineamientos para la Comparación de Patrones Nacionales de Fuerza en el Sistema Interamericano de Metrología SIM. Septiembre de 1997.
- [6] Torres J. C., Ramírez D., Curso de Evaluación de Incertidumbres de la División de Metrología de Fuerza y Presión, CENAM. Marzo de 1999.
- [7] Guía ISO/FDIS-376, Metallic Materials-Calibration of Force Proving Instruments used for the verification of uniaxial testing machines. Junio 1999.
- [8] Ramírez D., Torres J. C., Lineamientos para caracterización de transductores de Fuerza. Procedimiento Interno de la División de Metrología de Fuerza y Presión. Junio de 1999.