

Determinación y expresión de la mínima incertidumbre de calibración para la calibración de instrumentos de pesar

Resumen

Los instrumentos de pesar de funcionamiento no automático se utilizan para la determinación del valor de una carga en términos de masa. Según la legislación argentina, están sujetos a control metrológico legal. Sin embargo, en ocasiones se requiere la confirmación de sus cualidades metrológicas mediante calibración según requisitos de las normas ISO/IEC 17025. El objetivo de la calibración es la indicación proporcionada por el instrumento en respuesta a la aplicación de una carga conocida sobre el receptor de carga. Normalmente, la calibración de un instrumento de pesar implica determinar:

- errores de medición y las incertidumbres de medida asociadas,
- histéresis,
- repetibilidad,
- excentricidad y
- movilidad.

El objetivo del presente documento es unificar la metodología para el cálculo de la mínima incertidumbre de calibración para el servicio de calibración de instrumentos de pesar en el marco de la red SAC. Para este fin, se presenta primero una introducción, y luego se documentan dos procedimientos para el cálculo de la mínima incertidumbre de calibración. En el anexo 1 se presenta un esquema simplificado para el cálculo con el objetivo de brindar una rápida asistencia al usuario.

Abreviaturas

R : es la resolución del instrumento a calibrar, para el caso de balanzas digitales se debe considerar el valor del dígito menos significativo.

m_p : es el valor de la masa de una pesa patrón o de la suma de las pesas patrones utilizadas.

U : es la incertidumbre calculada.

U_e : es la incertidumbre debida a la deriva entre calibraciones (estabilidad temporal) de las pesas.

U_p : es la incertidumbre combinada de calibración y de estabilidad temporal de una pesa.

U_c : es la incertidumbre de calibración de la pesa.

U_{cr} : es la incertidumbre de calibración relativa de las pesas de una determinada clase cuyo valor nominal sea igual o mayor a 100 g. Se considera que la incertidumbre de calibración relativa de pesas de la misma clase se mantiene constante de 100 g a 1000 kg).

f_{ur} : es el factor de incertidumbre relativa que depende de cada clase de pesas e incluye la incertidumbre de calibración relativa (U_{cr}) y la componente de estabilidad temporal.

EMP : error máximo permitido de una determinada clase de pesa.

f_{tr} : es el factor de tolerancia relativa, máximo error relativo permitido para una clase de pesa dividido por raíz de 3.

I_L : es la indicación del instrumento con carga.

I_0 : es la indicación del instrumento sin carga.

δI_{RL} : se refiere al error de redondeo de la indicación con carga (resolución en carga).

δI_{R_0} : es el error de redondeo de la indicación sin carga (resolución sin carga).

δI_{REP} : se refiere al error probable debido a la falta de repetibilidad.

δI_{EXC} : es el error probable debido a la posición descentrada del centro de gravedad de la carga.

m_N : es la masa nominal.

δm_c : se refiere al error de masa convencional respecto a masa nominal para obtener la masa convencional.

δm_B : es el error debido al empuje de aire.

δm_E : es el error debido a la estabilidad o deriva temporal de la masa convencional desde la última calibración.

δm_{conv} : se refiere al error debido a los efectos de convección.

Incertidumbre de medida

La incertidumbre de medida en la determinación de los errores de medida de un instrumento de pesar, depende significativamente de las propiedades del propio instrumento y no sólo de los equipos del laboratorio de calibración. El modelo matemático básico para la determinación de los errores de medición E_M de un instrumento de pesar es:

$$E_M = I_L - m_p,$$

Entonces, la incertidumbre combinada del error de medición se calcula como la incertidumbre de las pesas de referencia y de la lectura del instrumento. Las incertidumbres de la indicación y del valor de referencia se determinan a partir de los siguientes modelos. Se considera que todas las correcciones tienen esperanza matemática nula pero no así su incertidumbre.

$$I = (I_L - I_0) + \delta I_{RL} + \delta I_{R_0} + \delta I_{REP} + \delta I_{EXC}$$

$$m_p = m_N + \delta m_c + \delta m_B + \delta m_E + \delta m_{conv}$$

Por lo tanto, la incertidumbre combinada de la indicación se calcula como la sumatoria cuadrática de todos los componentes de incertidumbre.

Cálculo de la mínima incertidumbre de calibración

La mínima incertidumbre de calibración es la menor incertidumbre con la que podrían determinarse los errores de indicación. Esto supone que durante la calibración deberían verificarse ciertas condiciones ideales que hagan que el aporte de algunas fuentes de incertidumbre tienda o sea igual a 0 (cero). Para el caso de un instrumento de pesar debería verificarse que:

- $u(\delta I_{REP}) \cong 0$: esto significa que el instrumento presenta excelente repetibilidad, es decir, las indicaciones no varían al depositar sucesivamente una misma carga sobre el receptor de cargas;
- $u(\delta I_{EXC}) \cong 0$: esto significa que el instrumento no presenta excentricidad, es decir, las indicaciones no varían independientemente de la posición de aplicación de la carga sobre el receptor de carga;
- $u(\delta m_B) \cong 0$: esto implica la necesidad de emplear muy buenos instrumentos para la medición de las condiciones ambientales (temperatura, humedad relativa y presión atmosférica) y posterior cálculo de la densidad de aire;
- $u(\delta m_{conv}) \cong 0$: esto implica la necesidad de permitir que se alcance el equilibrio térmico entre instrumento, pesas de referencia y ambiente de la sala dónde se encuentra instalado el instrumento.

Por lo tanto, la mínima incertidumbre de calibración para instrumentos de pesar depende de la clase de exactitud de las pesas que posea el laboratorio y de la resolución de lectura del instrumento a calibrar.

Se presenta a continuación dos procedimientos para el cálculo de la mínima incertidumbre de calibración. Se considera que las incertidumbres relativas de calibración son distintas para cada pesa en el rango de 1 mg a 50 g y permanece constante a partir de los 100 g.

Cálculo de la mínima incertidumbre de calibración utilizando los valores medidos y las incertidumbres del certificado de calibración de las pesas patrones

Cuando se corrigen los errores de las pesas por el valor del certificado de calibración se debe utilizar la incertidumbre de calibración de la pesa (U_c) más la incertidumbre por deriva entre calibraciones (estabilidad temporal) de las pesas (U_e). La primera se obtiene del certificado de calibración y se considera con distribución normal. La estabilidad se puede obtener del gráfico de control de la pesa y en tal caso su distribución podría ser normal. Si el patrón no posee historia se puede definir el tiempo entre calibraciones de tal manera que la deriva no supere la incertidumbre de calibración, y en tal caso se estima una deriva igual a la incertidumbre de calibración, $U_e = U_c$, asignándole distribución rectangular. A continuación, se presenta un ejemplo de este caso:

$$U_p = \sqrt{\left(\frac{U_c}{2}\right)^2 + \left(\frac{U_e}{\sqrt{3}}\right)^2} = \sqrt{\frac{U_c^2}{4} + \frac{U_c^2}{3}} = \sqrt{\frac{3U_c^2 + 4U_c^2}{12}} = \sqrt{\frac{7U_c^2}{12}} = 0,764 U_c$$

Luego, si la calibración del instrumento de pesar se realiza mediante la suma de pesas de 1 mg a 99,99 g se deben sumar sus incertidumbres y se debe sumar dos veces la incertidumbre de resolución (esta última participa en la indicación del instrumento descargado y en el instrumento cargado) resultando la siguiente expresión:

$$U = 2 \sqrt{(\sum_i U_{p_i})^2 + 2 \left(\frac{R^2}{12}\right)}.$$

En cambio, si se utilizan pesas iguales o mayores de 100 g, como la incertidumbre de calibración relativa de las pesas es constante, podemos utilizar el valor U_{cr} de la clase de pesa utilizada multiplicada por la masa de la pesa o suma de pesas utilizadas. Estos valores se obtienen como la incertidumbre de calibración de una pesa de 100 g especificada en resolución 456/83 de una determinada clase dividido su masa nominal. Se toma el valor de 100 g para la fórmula ya que desde ese peso la incertidumbre relativa es constante. El cuadro siguiente muestra los valores de U_{cr} para cada clase de pesa:

Clase	U_{cr} (mg/g) o (g/kg)
E2	0,0005
F1	0,0015
F2	0,005
M1	0,015

Se muestra a continuación, como forma de ejemplo, las incertidumbres de calibración relativas para una pesa de 1 kg y otra de 100 g, teniendo en cuenta las incertidumbres de calibración especificadas en la resolución 456/83 de la Secretaría de Comercio,

$$U_{cr}(\text{pesa } E2_{1\text{ kg}}) = \frac{U_c[g]}{\text{Valor nominal [kg]}} = \frac{0,0005 \text{ g}}{1 \text{ kg}} = 0,0005 \frac{\text{g}}{\text{kg}},$$

$$U_{cr}(\text{pesa } E2_{100\text{ g}}) = \frac{U_c[\text{mg}]}{\text{Valor nominal [g]}} = \frac{0,05 \text{ mg}}{100 \text{ g}} = 0,0005 \text{ mg/g}.$$

Combinando el factor 0,764 que incluye la incertidumbre de calibración y la incertidumbre debida a la falta de estabilidad temporal de las pesas obtenemos el factor f_{ur} como

$$f_{ur} = 0,764 U_{cr}.$$

De esta manera la incertidumbre de calibración de un instrumento de pesar se calcula de la siguiente forma:

$$U = 2 \sqrt{(f_{ur} \cdot m_p)^2 + 2 \left(\frac{R^2}{12}\right)}.$$

La siguiente tabla presenta el valor de f_{ur} para cada clase de pesas.

Clase	f_{ur} (mg/g) o (g/kg)
E2	0,000382
F1	0,00115
F2	0,00382
M1	0,0115

Cuando se quiera conocer CMC's en puntos que requieren la combinación de pesas mayores y menores a los 100 g se debe utilizar ambas fórmulas para ese punto. En esta ecuación $m_{p \geq 100}$ es la suma de todas las pesas mayores a 100 g y $U_{c_{p < 100}}$ es la suma de todas las pesas menores de 100 g.

$$U = 2 \sqrt{\left(0,764 \left[\sum (U_{cp < 100}) + U_{cr} m_{p \geq 100} \right] \right)^2 + 2 \left(\frac{R^2}{12} \right)}$$

Ejemplo 1:

Cálculo de la mínima incertidumbre de calibración para instrumentos de pesar utilizando una pesa E2 de 200 g, considerando su deriva temporal y una resolución de la balanza igual a 0,1 g.

$$U = 2 \sqrt{(f_{ur} \cdot m_p)^2 + 2 \left(\frac{R^2}{12} \right)} = 2 \sqrt{(0,000382 \text{ g/kg} \cdot 0,2 \text{ kg})^2 + 2 \left(\frac{0,1 \text{ g}^2}{12} \right)} = 0,0816 \text{ g.}$$

Ejemplo 2:

Se desea calcularla mínima incertidumbre de calibración para una balanza calibrada en el punto 3,570 kg y que posee resolución de 5 g. Primero se debe determinar que pesas se utilizaran en el servicio. Se propone para este ejemplo utilizar cinco pesas clase M1 de valor: 20 g, 50 g, 500 g, 1000 g y 2000 g. Se asume, de acuerdo a las exigencias de la resolución 456/83, que la pesa de 20 g se calibró con una incertidumbre de 0,0008 g y la de 50 g con 0,001 g. Entonces, se calcula la menor incertidumbre de calibración cómo:

$$U = 2 \sqrt{\left(0,764 \left[(0,001 \text{ g} + 0,0008 \text{ g}) + 0,015 \frac{\text{g}}{\text{kg}} * 3,500 \text{ kg} \right] \right)^2 + 2 \left(\frac{5 \text{ g}^2}{12} \right)} = 4,083 \text{ g.}$$

Cálculo de la mínima incertidumbre de calibración utilizando los errores máximos permitidos (tolerancias) de las pesas

El laboratorio puede considerar para este cálculo los valores de los errores máximos permitidos (EMP) para cada clase de pesa por la resolución 456/83, siempre y cuando sean pesas verificadas, en lugar de los valores medidos de sus patrones. La suma aritmética del error y la incertidumbre de calibración no debe superar el error máximo permitido (tolerancia) de la pesa en cuestión. Esto es posible si el laboratorio aplica todas las recomendaciones de la reglamentación 456/83 (calibraciones anuales, manipulación y almacenamiento adecuado, material constitutivo de cada clase, formato, terminación superficial y elementos de manipulación, entre otras). Por lo tanto, la incertidumbre estándar del valor de masa convencional de las pesas estará dada por

$$u_p = \frac{EMP}{\sqrt{3}}$$

Entonces, para cargas superiores a 100 g la CMCs se calculan como

$$U = 2 \sqrt{(f_{tr} \cdot m_p)^2 + 2 \left(\frac{R^2}{12} \right)}$$

En donde $f_{tr} = \frac{EMP}{\text{valor nominal} \cdot \sqrt{3}}$ y se encuentra tabulado según las clases de cada pesa.

Clase	f_{tr} (mg/g) o (g/kg)
E2	0,00087
F1	0,0029

F2	0,0087
M1	0,029

Si se deben determinar CMC's en puntos que requieren la combinación de pesas mayores y menores a los 50 g se debe utilizar ambas fórmulas para ese punto. Generalmente se utiliza este tipo de cálculo para balanzas de clase III, donde por su precisión no se hacen correcciones de las pesas según su certificado de calibración y se utiliza entonces su valor nominal. Este tipo de balanzas difícilmente requieren utilización de pesas menores a 100 g en sus carreras de calibración. Sin embargo, si fuera necesario expresarlo para algún caso la formula seria la siguiente:

$$U = 2 \sqrt{\left(\frac{EMP}{\sqrt{3}}\right)^2_{(m_p < 100 \text{ g})} + f_{tr} \cdot m_{p \geq 100 \text{ g}})^2} + 2 \left(\frac{R^2}{12}\right)$$

En esta ecuación, $m_{p < 100 \text{ g}}$ corresponde a una pesa individual o a la combinación de pesas menores a 100 g.

Nota para los auditores

Es común que en el ámbito voluntario esté mucho más difundida la recomendación OIML R111 que la resolución 456/83 de la Secretaría de Comercio y que muchas empresas subsidiarias de firmas extranjeras utilicen en sus procedimientos las tolerancias de la OIML. Aunque las diferencias en la práctica son despreciables, adjuntamos una tabla comparativa para demostrar que en el peor de los casos las tolerancias de la resolución 456/83 son menores.

VN	Resolución 456					R111				
	E1	E2	F1	F2	M1	E1	E2	F1	F2	M1
g	mg	mg	mg	mg	mg	mg	mg	mg	mg	mg
50000	25	75	250	750	2500	25	80	250	800	2500
20000	10	30	100	300	1000	10	30	100	300	1000
10000	5,0	15	50	150	500	5,0	16	50	160	500
5000	2,5	7,5	25	75	250	2,50	8,0	25	80	250
2000	1,0	3,0	10	30	100	1,00	3,0	10	30	100
1000	0,50	1,5	5,0	15	50	0,50	1,6	5,0	16	50
500	0,25	0,75	2,5	7,5	25	0,25	0,80	2,5	8,0	25
200	0,10	0,30	1,0	3,0	10	0,10	0,30	1,0	3,0	10
100	0,050	0,15	0,50	1,5	5,0	0,050	0,16	0,50	1,6	5,0
50	0,030	0,10	0,30	1,0	3,0	0,030	0,10	0,30	1,0	3,0
20	0,025	0,080	0,25	0,80	2,5	0,025	0,080	0,25	0,80	2,5
10	0,020	0,060	0,20	0,60	2,0	0,020	0,060	0,20	0,60	2,0
5	0,015	0,050	0,15	0,50	1,5	0,016	0,050	0,16	0,50	1,6
2	0,012	0,040	0,12	0,40	1,2	0,012	0,040	0,12	0,40	1,2
1	0,010	0,030	0,10	0,30	1,0	0,010	0,030	0,10	0,30	1,0
0,5	0,0080	0,025	0,080	0,25	0,80	0,0080	0,025	0,080	0,25	0,80
0,2	0,0060	0,020	0,060	0,20	0,60	0,0060	0,020	0,060	0,20	0,60
0,1	0,0050	0,015	0,050	0,15	0,50	0,0050	0,016	0,050	0,16	0,50
0,05	0,0040	0,012	0,040	0,12	0,40	0,0040	0,012	0,040	0,12	0,40
0,02	0,0030	0,010	0,030	0,10	0,30	0,0030	0,010	0,030	0,10	0,30
0,01	0,0020	0,0080	0,025	0,080	0,25	0,0030	0,0080	0,025	0,080	0,25
0,005	0,0020	0,0060	0,020	0,060	0,20	0,0030	0,0060	0,020	0,060	0,20
0,002	0,0020	0,0060	0,020	0,060	0,20	0,0030	0,0060	0,020	0,060	0,20
0,001	0,0020	0,0060	0,020	0,060	0,20	0,0030	0,0060	0,020	0,060	0,20

Referencias

1. EURAMET cg-18 Versión 4.0 (11/2015), “Guía para la calibración de instrumentos de pesaje de funcionamiento no automático”, Edición digital en español. Disponible en: https://www.cem.es/sites/default/files/euramet_cg-18_calibracionipfna_0.pdf
2. Resolución ex Secretaría de Comercio N° 456, “Medidas de denominadas pesas”, 2 de diciembre de 1983.
3. Resolución Secretaría de Comercio y Negociaciones Económicas Internacionales N° 2307, “INSTRUMENTOS DE PESAR NO AUTOMÁTICOS”, 11 de noviembre de 1980.

Anexo 1

CMC's

Cuando se corrigen los errores de las pesas por el valor del certificado de calibración Se utiliza la incertidumbre de calibración de la pesa (U_c) más la incertidumbre por estabilidad temporal de las pesas (U_e). Se considera distribución normal en U_c y rectangular a U_e rectangular. Se considera $U_c = U_e$ para la determinación de las CMCs.

$$u_p = \sqrt{\left(\frac{U_c}{2}\right)^2 + \left(\frac{U_e}{\sqrt{3}}\right)^2} = \sqrt{\frac{U_c^2}{4} + \frac{U_c^2}{3}} = \sqrt{\frac{3U_c^2 + 4U_c^2}{12}} = \sqrt{\frac{7U_c^2}{12}} = 0,764 U_c$$

Utilizando pesas de 1 mg a 99,99 9g:

$$U = 2 \sqrt{\left(0,764 \sum_i U_{ci}\right)^2 + 2 \left(\frac{R^2}{12}\right)}$$

Utilizando pesas superiores a 100 g: $U = 2 \sqrt{(f_{ur} \cdot m_p)^2 + 2 \left(\frac{R^2}{12}\right)}$

$$f_{ur} = 0,764 \frac{U_{c, p \geq 100} [\text{mg}]}{100}$$

Cuando no se corrigen los errores de las pesas por el valor del certificado de calibración

$$u_p = \frac{EMP}{\sqrt{3}}$$

$$f_{tr} = \frac{\frac{EMP}{\text{nominal}}}{\sqrt{3}}$$

Cargas superiores a 100 g

$$U = 2 \sqrt{(f_{tr} \cdot m_p)^2 + 2 \left(\frac{R^2}{12}\right)}$$

Cuando se quiera conocer CMC's en puntos que requieren la combinación de mayores y menores a los 50 g se debe utilizar ambas fórmulas para ese punto

$$U = 2 \sqrt{\left(\frac{EMP}{\sqrt{3}}\right)^2_{(m_p < 100 \text{ g})} + (f_{tr} \cdot m_{p \geq 100 \text{ g}})^2 + 2 \left(\frac{R^2}{12}\right)}$$

Cuando se quiera conocer CMC's en puntos que requieren la combinación de pesas mayores y menores a los 50 g se debe utilizar ambas fórmulas para ese punto

$$U = 2 \sqrt{\left(0,764 \left[\sum \left(U_{Cp < 100} \right) + U_{Cr} m_{p \geq 100} \right] \right)^2 + 2 \left(\frac{R^2}{12} \right)}.$$

Tabla con el valor de U_{cr} para cada clase de pesas

Clase	U_{cr} (mg/g) o (g/kg)
E2	0,0005
F1	0,0015
F2	0,005
M1	0,015

Tabla con el valor de f_{tr} para cada clase de pesas

Clase	f_{tr}
E2	0,00087
F1	0,0029
F2	0,0087
M1	0,029

Tabla con el valor de f_{ur} para cada clase de pesas

Clase	f_{ur} (mg/g) o (g/kg)
E2	0,000382
F1	0,00115
F2	0,00382
M1	0,0115