

TENDENCIAS ACTUALES DE LA CALIBRACION DE INSTRUMENTOS PARA PESAR DE FUNCIONAMIENTO NO AUTOMATICO

¹Pablo Canalejo, ² Jorge Mendoza

¹IBSEI S. A. de C. V.; ²Laboratorio SIMMA S. A. de C. V.

¹Rayas No. 111 Col. V. Gómez 15620 México D.F.; ²Zona B, Casa 75 A, Los Reyes Iztacala, Edo. Mex.

¹Tel (55) 57 59 08 58; Fax: (55) 55 37 45 66; ²Tel y Fax: (55) 58 83 35 18

¹pablo.canalejo@ibsei.com; ²jmi_simma@yahoo.com.mx

RESUMEN

La ponencia presenta las tendencias actuales para la calibración de instrumentos para pesar de funcionamiento no automático y su importancia en los laboratorios de calibración de México. Se mencionan algunas magnitudes de influencia que pueden producir mayor impacto en la calibración, que se consideran actualmente en la Comunidad Económica Europea, su mejor estimado y su incertidumbre para instrumentos de bajo y mediano alcance de medición. Se presenta un ejemplo comparativo del presupuesto de incertidumbre obtenido siguiendo los criterios actuales usados comúnmente por los laboratorios de calibración en México y siguiendo las tendencias actuales que se presentan y analizan (Anexo A).

1 INTRODUCCIÓN

Existen pocos documentos que establecen los métodos de calibración de estos instrumentos, algunos de ellos fueron publicados hace algunos años [1]. En general solo se consideraba como contribuyentes de la incertidumbre, la repetibilidad del instrumento, la resolución del mismo y la incertidumbre del patrón utilizado.

Existen otras magnitudes de influencia que contribuyen a la incertidumbre del instrumento. Se considera necesario tomar en consideración estos factores a fin de que la incertidumbre asociada a su calibración sea representativa de las características del instrumento.

Existen ya publicaciones que tratan este tema con la finalidad de que se utilicen como guía de requisitos mínimos para la normalización correspondiente [2], [3].

En este documento solo se mencionan algunas de las magnitudes que se pueden considerar de mayor impacto en la incertidumbre de la calibración.

2 EL PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN

2.1 Generalidades

El procedimiento debe considerar la determinación del error de indicación (prueba de linealidad) y su

incertidumbre de medición para un número limitado de cargas de

prueba y debe reproducir las operaciones de pesada que realiza el usuario de manera rutinaria tanto como sea posible.

Se puede considerar que en términos resumidos, una calibración consiste en aplicar al instrumento cargas de prueba bajo condiciones especificadas, determinar el error de la indicación y estimar la incertidumbre de medición asociada al error de indicación.

Una calibración se realiza normalmente en el lugar donde el instrumento está instalado y debe abarcar todo el intervalo de pesada desde cero hasta el alcance máximo (Max). El cliente puede especificar cierta parte del intervalo de pesada, o puede especificar ciertas cargas nominales individuales para las que requiere la calibración.

Se debe también tomar en cuenta ciertos requisitos para que un instrumento pueda ser calibrado, entre estas se encuentran que: el instrumento pueda ser

identificado claramente; todas sus funciones estén libres de contaminación o daño y operen correctamente; las indicaciones puedan leerse con facilidad sin ambigüedades; haya sido conectado a la fuente de alimentación durante el tiempo apropiado; sea nivelado cuando aplique y haya sido excitado con carga de valor cercano a Max al menos una vez.

3 RESULTADO DE LA CALIBRACIÓN

El resultado de la calibración de un instrumento para pesar es el error de indicación (ε) que se determina por la expresión:

$$\varepsilon = I - M_c \quad (1)$$

donde: I es la indicación del instrumento y M_c es el valor de masa convencional de la carga de referencia.

Cualquier indicación I correspondiente a una carga de prueba es básicamente la diferencia de la indicación con carga I_L y la indicación sin carga I_0 :

$$I = I_L - I_0 \quad (2)$$

Las indicaciones de un instrumento están limitadas por su resolución, y a su vez están afectadas por diversos factores entre los que se encuentran la excentricidad; las condiciones ambientales; las condiciones de instalación y operación (nivelación, corrientes de aire, fuentes de calor, radiación, alimentación eléctrica, vibraciones, influencias magnéticas) y la variabilidad en los resultados de medición.

Por eso, se puede afirmar que:

$$I = I_L + \delta I_{digL} + \delta I_{rep} + \delta I_{exc} - (I_0 + \delta I_{dig0}) \quad (3)$$

Donde I_L es la lectura del el instrumento con carga; I_0 es la lectura del instrumento sin carga; δI_{dig0} es la corrección por el redondeo de la indicación sin carga; δI_{digL} es la corrección por el redondeo de la indicación con carga; δI_{rep} es la corrección debida a la repetibilidad imperfecta y δI_{exc} es la corrección debida a la carga excéntrica.

Todas estas correcciones pueden tener esperanzas cero [2].

Sustituyendo (3) en (1) obtenemos:

$$\varepsilon = I_L + \delta I_{digL} + \delta I_{rep} + \delta I_{exc} - (I_0 + \delta I_{dig0}) - M_c \quad (4)$$

Las tendencias actuales en la calibración de instrumentos para pesar incluyen la expresión de los resultados de la calibración mediante una ecuación de aproximación lineal [2]. No obstante, para fines de simplificación, no es objetivo de los autores hacer uso de este recurso.

En adelante abordaremos solo el caso en que la carga de referencia está conformada por pesas.

La masa convencional (M_c) de las pesas se puede expresar como:

$$M_c = V_n + \delta \pm U \quad (5)$$

donde: V_n es el valor nominal de la carga; δ es la desviación con respecto al valor nominal determinada en condiciones convencionales y U es la incertidumbre certificada en el Informe de calibración.

Sustituyendo (5) en (4) se puede escribir:

$$\varepsilon = I_L + \delta I_{digL} + \delta I_{rep} + \delta I_{exc} - (I_0 + \delta I_{dig0}) - V_n + \delta \quad (6)$$

El valor de masa convencional de la carga de prueba puede estar afectado por la probable deriva de su valor en el tiempo (C_p), los efectos del empuje del aire (C_{emp}); los efectos de convección (C_{conv}) y los efectos magnéticos (C_{mag}).

Considerando lo anterior en la ecuación (6), obtenemos para el error la expresión siguiente:

$$\varepsilon = I_L + \delta I_{digL} + \delta I_{rep} + \delta I_{exc} - (I_0 + \delta I_{dig0}) - V_n + \delta + C_p + C_{emp} + C_{conv} + C_{mag} \quad (7)$$

Se debe considerar que aun cuando el mejor estimado de una corrección sea cero se debe tener en cuenta su incertidumbre estándar siempre que ésta pueda afectar de manera significativa a la incertidumbre de la calibración.

Los errores de indicación se determinan durante la prueba que conocemos como prueba de exactitud, que debe realizarse usando al menos 5 cargas de prueba diferentes distribuidas simétricamente a lo largo del alcance normal de pesada ajustando la indicación a cero antes de la prueba.

4 EVALUACIÓN DE LAS MAGNITUDES DE INFLUENCIA Y SU INCERTIDUMBRE

4.1 Redondeo de la indicación o resolución (δI_{dig0}); (δI_{digL})

Las indicaciones se obtienen normalmente como múltiplos enteros de la división de escala d . En este caso es recomendable asumir el mejor estimado de ambas correcciones como cero, considerando que la probabilidad de encontrar su valor entre los límites $\pm d_0/2$ o $\pm d_L/2$ respectivamente es del 100 %,

d_0 es la división de escala del instrumento para la carga cero y d_L la división de escala del instrumento para la carga L .

La incertidumbre estándar para δI_{dig0} (resolución sin carga) se estima, asumiendo una distribución rectangular con límites $\pm d_0/2$, mediante la ecuación siguiente:.

$$u(\delta I_{dig0}) = \frac{d_0}{2\sqrt{3}} \tag{8}$$

La incertidumbre estándar para δI_{digL} (resolución con carga). se estima, asumiendo una distribución rectangular con límites $\pm d_L/2$; mediante la ecuación siguiente:

$$u(\delta I_{digL}) = \frac{d_L}{2\sqrt{3}} \tag{9}$$

4.2 Repetibilidad (δI_{rep})

Normalmente el mejor estimado de esta corrección es cero y se determina durante la prueba de repetibilidad.

La prueba consiste en la colocación repetida de una misma carga sobre el receptor de carga, bajo condiciones idénticas de manipulación de las cargas y el instrumento, tanto como sea posible. La carga de prueba no tiene que ser calibrada y debe estar concentrada en un solo punto.

La prueba se realiza al menos con una carga de prueba L_T . Para los instrumentos con división de escala d constante es apropiado usar una carga $0,5 Max \leq L_T \leq Max$; esta carga puede reducirse si $L_T > 0,5 Max$ asciende a varias toneladas. Antes

de la prueba la indicación sin carga debe ser cero. La carga debe aplicarse al menos 5 veces o 3 veces cuando $L_T \geq 1\ 000\ kg$.

Para la evaluación de la incertidumbre debida a la repetibilidad (δI_{rep}) se asume una distribución normal, estimada como:

$$u(\delta I_{rep}) = s(I_j) \tag{10}$$

donde j es el número de mediciones realizadas en la prueba de repetibilidad.

El mejor estimado de la incertidumbre estándar asociada a la indicación del instrumento es:

$$u(\delta I_{rep}) = s(I_j) / \sqrt{n} \tag{11}$$

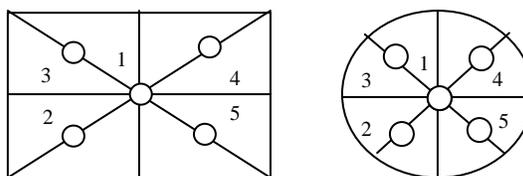
donde n es el numero de mediciones realizadas en la prueba de exactitud con carga.

Cuando se realiza solo una prueba de repetibilidad, esta desviación estándar puede considerarse como representativa para todas las indicaciones del instrumento en todo el intervalo de pesar considerado. Cuando se determinan varias con diferentes cargas de prueba, debe usarse el mayor de los valores.

4.3 Excentricidad (δI_{exc})

La prueba consiste en colocar una carga de prueba en diferentes posiciones del receptor de carga de tal modo que el centro de gravedad de la carga coincida con las posiciones indicadas en el esquema que sigue o en posiciones equivalentes tanto como sea posible.

Posiciones de la carga para la prueba de excentricidad [3]



Las cargas de prueba deben tener al menos un valor de masa aproximado a $Max/3$ y no tiene que estar calibrada.

El efecto de carga excéntrica puede determinarse calculando las $\Delta I_{exc,i}$. (diferencias entre las indicaciones I_i obtenidas en diferentes posiciones de

la carga con respecto a la indicación I_1 en el centro del receptor de carga):

$$\Delta I_{exc,i} = I_i - I_1 \quad (12)$$

El efecto de carga excéntrica (δI_{exc}) aplicable a cualquier indicación I del instrumento se basa en el modulo de la mayor de las diferencias $|\Delta I_{exc,i}|_{max}$ determinadas en la prueba de carga excéntrica, la carga de prueba L_{exc} y la indicación I , y su valor se estima mediante la ecuación siguiente [2]:

$$\delta I_{exc} = \left\{ |\Delta I_{exc,i}|_{max} / (2L_{exc}) \right\} I \quad (13)$$

se asume una distribución rectangular de modo que la incertidumbre estándar es:

$$u(\delta I_{exc}) = \left\{ |\Delta I_{exc,i}|_{max} / (2L_{exc} \sqrt{3}) \right\} I \quad (14)$$

4.4 Incertidumbre estándar de la masa de referencia

La corrección δ es la desviación de la pesa dada en el Informe de Calibración conjuntamente con la incertidumbre de la calibración U y el factor de cobertura k . La incertidumbre estándar es:

$$u(\delta) = U/k \quad (15)$$

Cuando la carga de prueba esta conformada por más de una pesa patrón las incertidumbres se suman aritméticamente para considerar las correlaciones asumidas. En tal caso la expresión (15) se transforma en:

$$u(\delta) = \sum_i U_i/k \quad (16)$$

4.5 Deriva del valor de masa convencional de la carga de prueba, C_p

Para la corrección por la posible deriva de M_c desde la última calibración es recomendable asumir un valor límite D basándose en la diferencia en M_c obtenida a partir de dos calibraciones consecutivas. Es aceptable asumir que el valor de esta corrección es cero y que la probabilidad de encontrar su valor entre los límites simétricos $\pm D$ es del 100 %

Si no esta disponible la información, D puede estimarse a partir de la calidad de las pesas, la frecuencia y el cuidado en su uso, como un múltiplo de su incertidumbre expandida $U(M_c)$:

$$D = k_D U(M_c) \quad (17)$$

donde el valor de k_D puede elegirse entre 1 y 3.

Para la evaluación de la incertidumbre de C_p , es recomendable asumir una distribución simétrica con límites $\pm D$ (distribución rectangular). La incertidumbre es entonces:

$$u(C_p) = D/\sqrt{3} \quad (18)$$

4.6 Empuje del aire (C_{emp})

El valor de esta corrección depende de la densidad real ρ del material de la pesa de calibración, de la densidad del aire ρ_a en el lugar de calibración y del lugar en que se ajusta el instrumento.

Se pueden considerar tres situaciones típicas.

Cuando se realiza el ajuste del instrumento en el mismo lugar en que se calibra, inmediatamente antes de la calibración, la corrección se obtiene de la siguiente expresión [2]:

$$C_{emp} = - M_c [(\rho_a - \rho_0)(1/\rho - 1/\rho_c)] \quad (19)$$

donde: ρ_0 es la densidad convencional del aire; ρ_c es la densidad convencional de las pesas y ρ es densidad de las pesas;

Si el instrumento fue ajustado en un lugar diferente del lugar de la calibración, en un ambiente con densidad del aire ρ_{as} desconocida, la corrección se obtiene de la siguiente expresión:

$$C_{emp} = - M_c [(\rho_a - \rho_0)(1/\rho - 1/\rho_c) + \Delta\rho_{as}/\rho_c] \quad (20)$$

Donde $\Delta\rho_{as}$ es la diferencia entre las densidades del aire en el lugar del ajuste y en el lugar de la calibración respectivamente.

Si se asume que la densidad del aire en el lugar del ajuste es la densidad convencional, lo cual es una solución posible, entonces la ecuación (20) se transforma en la siguiente:

$$C_{emp} = - M_c [(\rho_a - \rho_0)/\rho] \quad (21)$$

Si el instrumento se ajusta antes de la calibración, la varianza se obtiene de la siguiente expresión:

$$u^2 C_{emp} = m_N^2 [u^2(\rho_a)(1/\rho - 1/\rho_c)^2 + (\rho_a - \rho_0)^2 u^2(\rho)/\rho^4] \quad (22)$$

Si el instrumento fue ajustado en forma independiente a la calibración en un ambiente con densidad del aire desconocida la varianza se obtiene de:

$$u^2 C_{emp} = m_N^2 \left[u^2(\rho_a) \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_c} \right)^2 + (\rho_a - \rho_0)^2 \frac{u^2(\rho)}{\rho^4} + \frac{u^2(\Delta\rho_{as})}{\rho_c^2} \right] \quad (23)$$

Si la densidad del aire en el lugar del ajuste es igual a la densidad convencional del aire, la varianza se obtiene de:

$$u^2 C_{emp} = m_N^2 [u^2(\rho_a)/\rho^2 + (\rho_a - \rho_0)^2 u^2(\rho)/\rho^4] \quad (24)$$

4.7 Incertidumbre estándar asociada a la densidad del material de las pesas $u(\rho)$

La incertidumbre asociada a la densidad del material de fabricación de las pesas, se determina en el laboratorio o puede estimarse a partir de la aleación del material con que se fabrica la pesa. (Ver Tabla B.7 correspondiente al Método F2 recomendado en la del Anexo B de la OIML R111:2004) [5].

De modo que:

$$u\rho = U_{Tabla} / 2 \quad (25)$$

4.8 Incertidumbre estándar asociada a la densidad del aire $u(\rho_a)$

La densidad del aire se puede evaluar usando la siguiente expresión aproximada siguiente [5].:

$$\rho_a = \frac{0,34848p - 0,009(hr)(e^{0,062t})}{273,15 + t} \quad (26)$$

donde: ρ_a es la densidad del aire (kg/m^3); h es la humedad relativa (%); p es la presión barométrica del ambiente (hPa); t es la temperatura del ambiente ($^{\circ}C$).

Aplicando la Ley de propagación de las Incertidumbres [5] [6]., la varianza de la densidad del aire se determina por:

$$u^2\rho_a = \left(\frac{\partial\rho_a}{\partial p} \right)^2 u^2p + \left(\frac{\partial\rho_a}{\partial h} \right)^2 u^2h + \left(\frac{\partial\rho_a}{\partial t} \right)^2 u^2t \quad (27)$$

4.9 Efectos de convección (C_{conv})

Si la temperatura de las pesas (t_p) es diferente a la del ambiente (t), se manifiesta una diferencia de temperatura $\Delta T = t_p - t$. que se evalúa usando un termómetro junto a las pesas en el interior de su estuche.

Cuando se coloca la pesa sobre el receptor de carga, $\Delta T > 0$ genera un flujo de aire y fuerzas parásitas que provocan un cambio aparente en su masa convencional ΔM_c . El signo de ΔM_c es opuesto al signo de ΔT .

El mejor estimado de esta corrección puede considerarse cero siempre que su efecto sobre la masa convencional sea despreciable: En este caso la corrección puede ser asumida como cero y su incertidumbre se puede estimar asumiendo una distribución rectangular con límites $\pm \Delta M_c$.

La corrección se determina por la expresión [3]:

$$C_{conv} = -k_v M_c^{3/4} \frac{\Delta T_{conv}}{|\Delta T_{conv}|^{1/4}} - k_h M_c \Delta T_{conv} \quad (28)$$

Si $\Delta T_{conv} > 0$; $k_v = 215 \times 10^{-9}$ y $k_h = 75,4 \times 10^{-9}$.
Si $\Delta T_{conv} < 0$; $k_v = 119 \times 10^{-9}$ y $k_h = 20,2 \times 10^{-9}$.

Y la incertidumbre, por la expresión:

$$u(C_{conv}) = \frac{C_{conv}}{\sqrt{3}} \quad (29)$$

4.10 Efectos magnéticos (C_{mag})

Para considerar los efectos de interacción magnética entre las pesas y los instrumentos de muy alta resolución es recomendable detectar si esta es apreciable. Se debe pesar la pesa patrón conjuntamente con un separador no metálico, por ejemplo de plástico o de madera. El separador se debe colocar primero encima de la pesa y luego debajo de ella para obtener dos indicaciones. Si la

diferencia de las indicaciones es desigual de cero, esto puede considerarse como una advertencia en el informe de calibración.

En principio, la corrección aplicable debería corresponder a la diferencia de las indicaciones de la balanza. Sin embargo lo masa apropiado sería eliminar el efecto indeseable.

La corrección aplicable y su incertidumbre deben ser objeto de discusiones posteriores.

NOTA:

No es objetivo de este trabajo considerar los posibles efectos debidos a: histéresis, deriva del instrumento debido a los cambios de temperatura durante la calibración, no evaluación de los dispositivos de tara y no evaluación de la movilidad ni considerar las particularidades de los instrumentos con más de un valor de división en el alcance normal de pesada.

5 INCERTIDUMBRE ESTÁNDAR DEL ERROR

5.1 Agrupando las incertidumbres consideradas, la incertidumbre estándar combinada asociada al error de indicación se calcula por:

$$u^2(\varepsilon) = d_0^2/12 + d_I^2/12 + s^2(I_j)/n + u^2(\delta I_{exc}) + u^2(\delta m_c) + u^2(C_{emp}) + u^2(C_p) + u^2(C_{conv}) \quad (30)$$

Todas las magnitudes de entrada se asumen independientes, por lo que no se consideran las covarianzas.

5.2 Incertidumbre expandida de la calibración

La incertidumbre expandida del error es:

$$U(\varepsilon) = k u(\varepsilon) \quad (31)$$

Donde k es el factor de cobertura.

6 CONCLUSIONES

En México no se cuenta en la actualidad con una Guía de Calibración de instrumentos para pesar. No obstante, los laboratorios acreditados siguen un procedimiento más o menos uniforme, sin embargo es insuficiente comparado con las

tendencias actuales aceptadas por la Comunidad Europea.

Lo anterior significa que en las calibraciones de instrumentos para pesar que se realizan en México no toman en cuenta algunas magnitudes de influencia que tienen aportaciones significativas a la incertidumbre del resultado de la calibración por lo que está presente una subestimación del valor correcto.

Las insuficiencias mencionadas afectan la mejor capacidad de medición manifestada por los laboratorios, así como la elaboración de los presupuestos de incertidumbres que la soportan.

REFERENCIAS

- [1] Becerra La calibración de instrumentos para pesar:- Publicación CENAM
- [2] EA-10/18 Guidelines on the calibration of nonautomatic weighing instruments (June 2005).
- [3] Paschalis Tsimitras.- Calibration of electronic non automatic weighing instruments. Error analysis. OIML Bulletin Number 2. April 2003.
- [4] OIML D 28 Conventional value of the result of weighing in air. 2004.
- [5] OIML R 111-1 Weights of classes E₁, E₂, F₁, F₂, M₁, M₂, M₂₋₃. Edition 2004 (E).
- [6] Guide for the expression of the uncertainty (GUM) ISO, 1993.

ANEXO A Ejemplo de aplicación para una calibración particular.

Instrumento: Balanza electrónica
Alcance máximo (Max): 300 g
División mínima (d): 0,000 1g

Condiciones de referencia

Temperatura de las pesas 20 ° C
 Temperatura ambiente promedio 22,5° C
 Humedad relativa promedio: 40 %
 Presión barométrica promedio: 777 hPa
 Densidad de las pesas (ρ): 7 850 kg/m³

Prueba de carga excéntrica:

Carga de prueba: 100 g
 Resultados obtenidos en gramos
 99,999 4; 99,999 7; 99,999 2; 99,999 6; 99,999 5;
 99,999 2

Prueba de repetibilidad

Carga de prueba: 100 g
 Resultados obtenidos en gramos:
 99,999 3; 99,999 4; 99,999 3; 99,999 4; 99,999 5;
 99,999 4; 99,999 4; 99,999 5; 99,999 4; 99,999 4

Prueba de linealidad: Ver datos en la tabla 1 para 5 cargas de prueba.

Incertidumbre estándar por los patrones: Ver resultados para 3 cargas de prueba en la tabla 2.

Incertidumbre estándar por deriva de los patrones: Ver resultados para 3 cargas de prueba en la tabla 2.

Incertidumbre estándar por resolución

$u(d_0) = 2,89E-05$ g
 $u(d_L) = 2,89E-05$ g

Incertidumbre estándar por carga excéntrica

$\delta I_{exc} = 0,000 4$ g
 $u(\delta I_{exc}) = 1,154 6 \times 10^{-6}$ (este valor es relativo).
 La contribución en unidades de masa se obtiene multiplicando por el valor de la carga. Por ejemplo, si se calcula para la carga de prueba usada (100g)

$u(\delta I_{exc}) = 1,154 6 \times 10^{-4}$ g

Incertidumbre estándar por repetibilidad

$s = 6,67 \times 10^{-5}$ g

Efectos de convección

Δt (conv) = -4° C
 $K_v = 1,19E-07$
 $K_h = 2,02E-08$

Ver los resultados en la tabla 2

Incertidumbre estándar por empuje del aire

Densidad del aire (ρ_a) = 0,914 kg/m³
 $u(\rho_a) = 0,003$ kg/m³
 Densidad de las pesas (ρ) = 7 850 kg/m³
 $u(\rho) = 157$ kg/m³

Ver los resultados en la tabla 2

Tabla 1 Resultados de la prueba de linealidad (determinación del error de indicación del instrumento)

Carga (g)	m_c	δ_{mc}	C_{emp}	l	ε
M	g	G	g	g	g
60	60,000022	0,022	4,096E-05	59,9998	-0,00018
120	119,999954	-0,046	8,192E-05	119,9998	-0,00007
180	179,999978	-0,022	1,229E-04	179,9997	-0,00016
240	240,000134	0,134	1,638E-04	239,9996	-0,00037
300	300,000068	0,068	2,048E-04	299,9993	-0,00056

Tabla 2 Presupuestos de incertidumbre (expandida con $k=1$) para 3 valores de carga

Magnitud	Distribución	grados de libertad (ν)	60 g	180 g	300 g
			U ($k=1$)	U ($k=1$)	U ($k=1$)
			g	g	g
Resolución	Rectangular	∞	2,89E-05	2,89E-05	2,9E-05
Resolución	Rectangular	∞	2,89E-05	2,89E-05	2,9E-05
Repetibilidad	Normal	9	6,67E-05	6,67E-05	6,7E-05
Excentricidad	Rectangular	∞	6,93E-05	2,08E-04	3,5E-04
Masa convencional	Normal	100	2,70E-05	6,55E-05	7,5E-05
Empuje	Normal	100	4,92E-05	1,48E-04	2,5E-04
Deriva de patrones	Rectangular	∞	1,56E-05	3,78E-05	4,3E-05
Convección	Rectangular	100	1,21E-05	3,11E-05	4,9E-05
Error ε (g)			-1,2E-4	-1,6E-4	-5,6E-4
Uc ($k=2$) g			2,4E-4	5,6E-4	8,9E-4
ν eff			21	10	8

Tabla 3 Comparación de resultados (incertidumbres expandidas con $k=2$)

Carga aplicada	U tradicional	U Propuesta
g	mg	mg
60	0,2	0,2
120	0,2	0,4
180	0,2	0,5
240	0,2	0,7
300	0,2	0,9